



رفتار فوم آلومینیومی ساندویچی در برابر بار ضربه با سرعت پایین

محمد امین ترابی زاده^{1*}

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مشهد
*مشهد، صندوق پستی 91379-33435، m.torabizadeh@uast.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/06/20

پذیرش: 96/07/16

کلیدواژگان:

فوم آلومینیومی ساندویچی

ضربه با سرعت پایین

مقطع نگاری رایانه ای

جذب انرژی

سازه‌هایی که با فناوری‌های ساندویچی تولید می‌شوند دارای خواص مکانیکی منحصر بفردی از قبیل جذب انرژی بالا و وزن پایین می‌باشند. بنابراین در صنایع حمل و نقل (خودرو سازی، صنایع هوایی و کشتی سازی) که اصول سبک سازی و ایمنی وسایل نقلیه حائز اهمیت است، کاربردی فراوانی دارند. از آنجاییکه سازه‌های ساندویچی با هسته پلیمری سال‌هاست که مورد استفاده محققین قرار گرفته، اخیراً توجه ویژه‌ای به استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی شده است. در تحقیق پیشرو به تحلیل رفتار صفحات فوم آلومینیومی ساندویچی در دو نوع رویه بهم پیوسته و رویه مجزا در برابر بار ضربه با سرعت پایین و همچنین بررسی شکل شکست آن‌ها با استفاده از تصاویر مقطع نگاری رایانه‌ای پرداخته شده است. همچنین یک روش تئوری بر مبنای مدل موازنه انرژی برای بررسی رفتار ضربه ماده با استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده از تصاویر مقطع نگاری نمونه‌های پس از ضربه، بکار گرفته شده است. تجمیع نتایج تئوری و آزمایشگاهی حاکی از آنست که تخریب نهایی و شکست کامل پانل‌های ساندویچی آلومینیومی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی پلیمری، دارای گستره کمتر و نمونه‌های سالم‌تری پس از ضربه بوده و در نتیجه خواص مکانیکی و عملکرد آنها پس از ضربه بهتر خواهد بود.

Response of aluminum foam sandwiches under low velocity impact

Mohammad Amin Torabizadeh ^{1*}

1- Mechanical Engineering Department, University of Applied Science and Engineering, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91379-33435 Mashhad, Iran, m.torabizadeh@uast.ac.ir

Keywords

Aluminum foam sandwich
Low velocity impact
Computed tomography
Energy absorption

Abstract

The structures realized using sandwich technologies combine low weight with high energy absorbing capacity, so they are suitable for applications in the transport industry (automotive, aerospace, ship building industry) where the "lightweight design" philosophy and the safety of vehicles are very important aspects. While sandwich structures with polymeric foams have been applied for many years, currently there is a considerable and growing interest in the use of sandwiches with aluminum foam (AFS) core. The aim of this paper was the analysis of low-velocity impact response of aluminum foam sandwich panels in two different types (integral skins and bonded skins) and the investigation of their collapse modes using computed tomography (CT). A theoretical approach, based on the energy balance model, has been applied to investigate their impact behavior and the model parameters were obtained directly from the measurements carried out on CT images of the impacted sandwiches. The AFS structures are relatively intact compared to the more catastrophic and localized fracture of the polymeric sandwiches, so the mechanical properties and their performance after impact will be better than polymeric sandwiches.

Please cite this article using:

Torabizadeh, M. A. "Response of aluminum foam sandwiches under low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 177-184, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

سبک سازی سازه‌ها در صنایع حمل و نقل از قبیل صنایع خودروسازی، صنایع هوایی و کشتی سازی دارای اهمیت ویژه‌ای است. سازه‌های سبک با ظرفیت ترابری ناوگان بیشتر، قابلیت سرعت بالاتر و مصرف سوخت کمتری را دارا می‌باشند. لذا مواد و فناوری‌های جدید بخصوص استفاده از سازه‌های ساندویچی به صورت قابل توجهی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش تقاضا برای تولید وسایل نقلیه سبک‌تر، صنعت حمل و نقل را وادار به جایگزینی و ساخت سازه‌های متفاوت از گذشته، کرده است. در این میان خلاء آشنایی با رفتار مکانیکی و استحکام برخی از مواد پیشرفته جدید واضح و آشکار گردیده است. استفاده گسترده از سازه‌های ساندویچی، مستلزم شناخت کافی از همه ابعاد اختلاف این سازه‌ها با مواد رایج است. لذا به منظور رفع این نیاز، انجام مطالعات جدید در حوزه شناخت رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی الزامی است.

علاوه بر این، شناخت پدیده ضربه و برخورد در وسایل نقلیه زمینی و دریایی با سرعت بالا بسیار مهم و حیاتی به شمار می‌رود که در این میان شناخت رفتار سازه‌های ساندویچی بدلیل قابلیت بالای جذب انرژی¹، ضروری به نظر می‌رسد. تغییر شکل هسته و شکست آن از عوامل مؤثر در قابلیت جذب انرژی سازه‌های ساندویچی است. پرتابه پس از شکست پوسته، امکان نفوذ و تخریب هسته سازه را دارد. در هسته لانه زنبوری² آلومینیومی، تخریب در اطراف نقطه برخورد پرتابه به صورت خرد شدن³ یا کمانش⁴ دیواره سلول است. در صورتیکه در هسته فومی، شکست بیشتر همانند ایجاد ترک در برخورد با انرژی پایین اتفاق می‌افتد [1].

از آنجاییکه فوم‌های پلیمری در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته، در حال حاضر، علی‌الخصوص در صنعت حمل و نقل، استفاده از فوم‌های فلزی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. فوم آلومینیومی ساندویچی⁵ [2-3] با ترکیب صفحات رویه فلزی به همراه هسته فوم سبک فلزی، خواص مکانیکی منحصر بفردی از قبیل وزن کم، قابلیت بالای جذب انرژی، استحکام بالای ضربه، عایق صوت و دما و خاصیت میرایی بالا را بوجود می‌آورد که این سازه‌ها را به انتخاب مناسبی در کاربردهای خاصی در طراحی سازه‌های سبک با استحکام مکانیکی و قابلیت جذب انرژی بالا تبدیل می‌کند. سازه‌های ساندویچی آلومینیومی برای ساخت وسایل نقلیه تندرو زمینی و دریایی مناسب است. این سازه‌ها با داشتن خاصیت میرایی و جذب انرژی بالا همزمان با وزن کم، ضمن حفظ ایمنی و رفاه مسافری، امکان افزایش سرعت و وسیله نقلیه را نیز فراهم می‌نماید. کاربرد سازه‌های سبک در صنعت کشتی سازی از اهمیت بالایی برخوردار است و در مقایسه با صنایع خودروسازی، نیاز به انعطاف پذیری فرآیند تولید بیشتری دارند. فوم‌های فلزی سلول بسته⁶، برای سبک سازی بخش‌های مختلف کشتی از قبیل سکوها⁶ آسانسوری، درب‌ها، دریچه‌ها و دیواره‌های عایق آب مورد استفاده قرار می‌گیرد [4].

فوم‌های آلومینیومی به واسطه ایجاد کرنش‌های بزرگ بازی تحمل تنش تقریباً یکنواخت در اثر اعمال ضربه، برای تولید جاذب‌های انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [5]. فوم‌ها به دلیل ساختار متخلخل خود، پس از دریافت ضربه، دچار تغییر شکل شده در صورتیکه تنش داخلی آن‌ها در حد

استحکام فشاری ماده باقی مانده است. این پدیده قابلیت جذب انرژی مکانیکی بالایی در این مواد ایجاد کرده است؛ طوریکه می‌توان از آنها به عنوان جاذب انرژی ضربه‌ای که قابلیت استهلاک شتاب پرتابه را حین ضربه دارد، استفاده کرد. فوم تهیه شده از مواد آلی دارای وزن ویژه کم است، اما مقدار انرژی قابل تبدیل به انرژی کرنشی به طور نسبی کمتر از فوم‌های پلیمری با استحکام پایین است. از آنجاییکه فوم‌های فلزی استحکام فروپاشی بالاتری نسبت به فوم‌های پلیمری دارند، می‌توان از آن‌ها در کاربردهای خاصی که تاکنون قابل استفاده نبوده اند، بهره برد.

آزمایش‌های ضربه با سرعت پایین روی تعدادی از سازه‌های فوم پلیمری توسط هیزبن و همکارانش [6] انجام شده است. آن‌ها مدل موازنه انرژی را برای پیش بینی رفتار سازه‌ها بکار برده‌اند. کرابی و همکاران [7] رفتار سازه‌های فوم آلومینیومی ساندویچی تحت بار استاتیکی را با فوم پلیمری مقایسه کرده‌اند. شکل شکست و تخریب سازه صفحات برش مقطع نگاری رایانه‌ای⁷ نیز توسط همین محققان مورد ارزیابی قرار گرفته است [8]. از این روش غیر تهاجمی به منظور ارزیابی کمی ریز ساختار و معماری داخلی انواع مختلف فوم آلومینیومی سلول بسته [9] و همچنین دستیابی به مدل المان محدود نمونه‌های فوم آلومینیوم سلول باز [10] استفاده شده است. بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه فوم آلومینیومی با استفاده از تحلیل آماری توسط فراهت و احمدی [11] صورت پذیرفته است. آن‌ها دریافتند که با انجام عملیات حرارتی علاوه بر افزایش بار پلاتو، میزان جذب انرژی فوم نیز به میزان 40 درصد افزایش می‌یابد. لیو و همکاران [12] به بررسی رفتار سازه ساندویچی با هسته آلومینیومی و رویه کامپوزیتی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش میزان جذب انرژی با استفاده از رویه پلیمری به نسبت رویه آلومینیومی می‌باشد. تاثیر دما روی رفتار دینامیکی فوم آلومینیومی توسط وانگ و همکارانش [13] مورد تحلیل قرار گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش دما، نرخ کرنش فوم آلومینیوم نیز افزایش یافته است. بررسی رفتار استاتیکی فوم آلومینیومی تولید شده بر روش متالورژی پودر تحت بارگذاری-های متفاوت توسط کاوه‌ای [14] و همچنین پرونی و همکاران [15] انجام شده است. تحلیل صفحات فوم آلومینیوم تحت اثر ضربه بالستیک و چگونگی عبور پرتابه از ورق بوسیله فعلی و جعفری [16] و همچنین شبیه سازی توسط روش المان محدود این فرآیند توسط گستانی پور و همکاران [17] صورت گرفته است. محاسبه میزان جذب انرژی در پنل‌های ساندویچی با هسته فومی در سوراخ کاری شبه استاتیکی به همراه شبیه سازی این فرآیند در نرم افزار المان محدود و مقایسه نتایج نیز توسط گستانی پور و همکاران [18-19] انجام شده است.

با توجه به مرور مطالعات گذشته مشاهده شده، استفاده از فوم آلومینیومی به عنوان هسته پانل‌های ساندویچی و ارزیابی رفتار آن‌ها در برابر بار ضربه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان ارزیابی اثر نوع اتصال رویه به هسته فومی روی رفتار پانل ساندویچی و همچنین استفاده از روش مقطع نگاری رایانه‌ای برای ارزیابی کیفیت و رفتار نمونه‌ها تا کنون توسط سایر محققین مورد بررسی قرار نگرفته است.

لذا هدف تحقیق پیشرو، تحلیل رفتار پانل‌های فوم آلومینیومی ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت کم و بررسی شکل شکست آن‌ها برش مقطع نگاری رایانه ای است. دو نوع نمونه پانل های فوم آلومینیومی ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است؛ تفاوت آنها در کیفیت فوم و

1 Energy absorption

2 Honeycomb core

3 Crushing

4 Buckling

5 Aluminum foam sandwiches (AFS)

6 Closed-cell metal foams

7 Computed Tomography (CT)

جدول 2 خواص فیزیکی و هندسی پانل‌های آلومینیومی ساندویچی

Table 2 Physical and geometrical properties of the Aluminum foam sandwiches

نوع II		نوع I		نوع نمونه
هسته	رویه	هسته	رویه	
AlSi7	AlMn1	AlSi10	Al	جنس ماده
0.45±0.04	2.73	0.53±0.06	2.73	چگالی (kg/dm ³)
9	1	9	1	ضخامت (mm)
0.87±0.04		0.95±0.05		چگالی نهایی (kg/dm ³)
11		11		ضخامت نهایی (mm)

بررسی میزان تخریب هسته فوم آلومینیوم که بوسیله چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست، با استفاده از روش مقطع نگاری رایانه‌ای انجام شده است.⁴ این تجهیزات به اشعه ایکس⁵ با بیشینه ولتاژ و جریان به ترتیب 225 کیلو ولت و 7.1 میلی آمپر که بر اساس فاصله کانونی⁶ از بین مقادیر 250، 300، 500 و 800 میکرومتر قابل انتخاب است، مجهز می‌باشد. سیستم شناسایی از یک صفحه تخت با وضوح تصویر 1920×1536 تشکیل شده است. نتایج گزارش شده در این مقاله با تنظیمات فاصله کانونی 250 میکرومتر، ولتاژ اشعه ایکس 210 کیلو ولت و شدت جریان 1.1 میلی آمپر انجام شده است. میله مخروطی اشعه، نمونه را با نرخ 0.0087 رادیان بر ثانیه تا پوشش کامل دوران 2π رادیان اسکن می‌کند و در نهایت با تعداد 1440 تصویر، مدل سه بعدی نمونه تهیه می‌گردد. زمان جمع بندی⁷ دستگاه نیز معادل 500 میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است از آنجاییکه در این روش غیرمخرب، نیازی به برش و آماده سازی نمونه‌ها برای سنجش نمی‌باشد، در کاهش زمان انجام آزمایش و افزایش دقت تحلیل تخریب داخلی نمونه‌ها بدون آسیب ناشی از آماده سازی تاثیر بسزایی دارد. همچنین با استفاده از این روش علاوه بر بررسی میزان تخلخل فوم، امکان تشخیص و جانمایی منافذ را نیز وجود دارد.

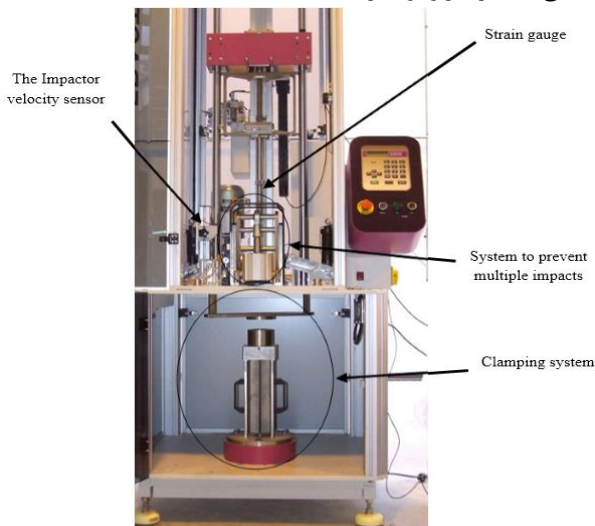


Fig. 2 Drop-weight impact test machine

شکل 2 دستگاه آزمایش ضربه ثقلی

چسبندگی هسته و رویه است. آزمایش ضربه با سرعت کم توسط دستگاه تست ضربه ثقلی با سرعت برخورد متفاوت و مقایسه میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف انجام و شکل شکست نمونه‌های و تخریب ساختار داخلی آن‌ها بروش مقطع نگاری رایانه‌ای سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک روش تئوری بر مبنای مدل موازنه انرژی برای بررسی رفتار ضربه ماده با استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده از تصاویر مقطع نگاری نمونه‌های پس از ضربه، بکار گرفته شده است. تجمیع نتایج تئوری و آزمایشگاهی در مواردی که نیاز به سازه های سبک همراه با قابلیت جذب انرژی بالا دارند (از قبیل صنعت حمل و نقل)، از اهمیت فراوانی برخوردار است.

2- روش‌ها و مواد

2-1- جنس مواد

در این مقاله از دو نوع فوم آلومینیومی ساندویچی معمول استفاده شده است. نوع اول فوم آلومینیومی با رویه های آلومینیومی اکستروژ شده¹ (رویه یکپارچه) و نوع دوم فوم آلومینیومی با رویه‌های آلومینیومی که به وسیله چسب اپوکسی² در دمای محیط و تحت فشار گیره به مدت 24 ساعت به هسته متصل شده است (شکل 1).

ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و هندسی صفحات تولید شده در جداول 1 و 2 ارائه شده است.

2-2- روش‌ها

آزمایش ضربه با سرعت پایین با استفاده از دستگاه ضربه ثقلی (مطابق شکل 2)³ که قابلیت کنترل ضربات برگشتی را دارد انجام شده است. این دستگاه با تغییر نوع ضربه زننده و ارتفاع اولیه آن، بازه وسیعی از انرژی‌های ضربه را پوشش می‌دهد.

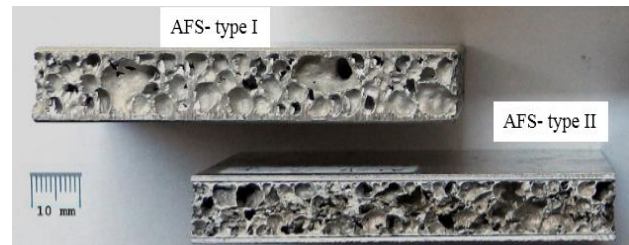


Fig. 1 Aluminum foam sandwiches

شکل 1 دو نمونه فوم آلومینیومی ساندویچی

جدول 1 ترکیب شیمیایی پانل‌های آلومینیومی ساندویچی

Table 1 Chemical composition of the Aluminum foam sandwiches

نمونه نوع II	نمونه نوع I	
Al 99.6%, 0.4%	O	رویه
Al 82.3%, Si 17%, Ti 0.14%, O 0.56%	Al 98.97%, Mn 1.03%	هسته
C 72.12%, 27.71%, Cl 0.17%	Al 92.38%, Si 7.03%, Ti 0.14%	چسب اپوکسی

¹ Extruded faces

² Bonded faces with epoxy adhesive

³ Impact instrument : Ceast Fractovis Plus

⁴ CT instrument: Y.CT Vario

⁵ X-ray

⁶ Focal spot

⁷ Integration time

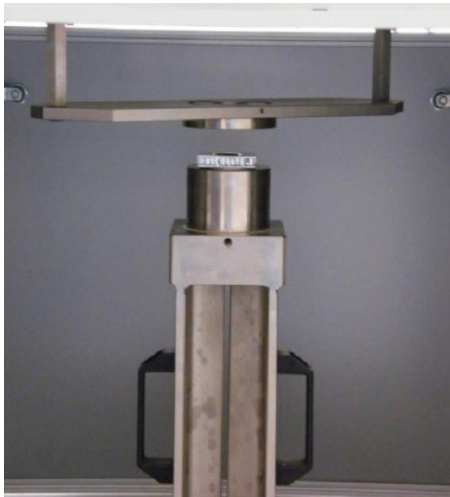


Fig. 5 Clamping system of specimen for impact test

شکل 5 محل استقرار نمونه برای انجام آزمایش ضربه

پیچش کل صفحه را خواهد داشت. از آنجاییکه نرخ کرنش و اثرات انتشار موج در بار ضربه با سرعت کم قابل اغماض می‌باشد، لذا از قوانین فیزیکی برخورد می‌توان در تحلیل این نوع بارگذاری استفاده نمود [1]. لذا در این تحقیق نمونه هدف در آزمایش ضربه، حین آزمایش ثابت در نظر شده و فرض می‌شود که تمام انرژی جنبشی ضربه زنده توسط نمونه جذب می‌گردد. با توجه به توضیحات ساختار دستگاه آزمایش ضربه ثقلی در بخش قبل و با عنایت به اینکه این دستگاه اجازه ضربه برگشتی را به ضربه زنده نخواهد داد، فرضیات در نظر گرفته شده با واقعیت آزمایش همخوانی دارد. لذا رابطه تعادل انرژی به صورت رابطه‌ی (1) خواهد بود:

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_b + E_s + E_m + E_c \quad (1)$$

که m و v به ترتیب جرم و سرعت برخورد ضربه زنده و اندیس a, b و c به ترتیب بیانگر اتلاف انرژی در خمش، برش، پوسته و سطح برخورد است. از آنجاییکه صفحه دارای ضخامت زیادی است، لذا توزیع نیروی غشایی قابل صرفنظر کردن است [1، 6، 21]. انرژی جذب شده ناشی از تغییر شکل خمشی و برشی در بیشینه مقدار جابجایی عبارتست از:

$$E_b + E_s = \frac{F_{max}^2}{2K_{bs}} \quad (2)$$

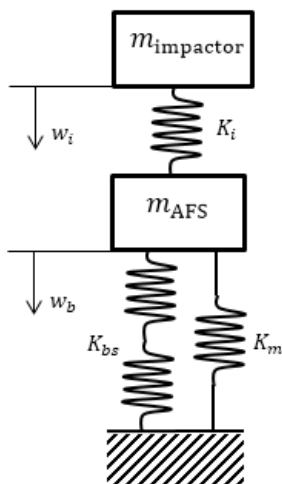


Fig. 6 Spring-mass model for impact dynamics

شکل 6 مدل جرم و فنر برای شبیه سازی ضربه دینامیکی

به دلیل غیر یکنواختی ساختار پانل‌های فوم آلومینیوم ساندویچی، کنترل نمونه‌های تولیدی پیش از انجام آزمایش ضربه ضروری است. در این تحقیق، نمونه‌های تولیدی که دارای عیوب زیر باشد مورد استفاده قرار نگرفته است: وجود یک سلول تنها در راستای ضخامت؛ وجود یک سلول با ابعاد بیش از 5 برابر متوسط اندازه و یا بزرگتر از 15 میلی متر مطابق شکل 3.

3- آزمایش ضربه با سرعت کم

آزمایش ضربه روی دو نوع از نمونه‌های تولیدی که در بخش قبل بدان اشاره شد، با جرم ضربه زنده 7 کیلوگرم و سرعت برخورد بین 1.5 تا 8 متر بر ثانیه و انرژی ضربه بین 8 تا 225 ژول انجام شده است. ضربه زنده دارای هندسه کروی با قطر 20 میلی متر بوده و به کرنش سنجی با قابلیت اندازه‌گیری نیرو تا مقدار 40 کیلو نیوتن مجهز است (شکل 4). نمونه‌های تولید شده با ابعاد $60 \times 60 \times 11$ میلی متر، ضخامت هسته 9 میلی متر و ضخامت رویه 1 میلی متر به طور کامل روی صفحه فلزی صلب با قطر 40 میلی متر مطابق شکل 5 مستقر شده است.

4- تئوری موازنه انرژی

رفتار ضربه سازه های ساندویچی با استفاده از روش تئوری بر مبنای مدل موازنه انرژی [1] به منظور بررسی اثر میزان خمش، برش و مولفه های دنده-ای تغییر شکل، مدل سازی شده است. در این روش نمونه ساندویچی با ترکیب دو فنر بر اساس مدل پیشنهادی شیواکومار و همکاران [20] شبیه سازی شده است: یک فنر خطی با سفتی K_{fs} برای سنجش جابجایی کلی w_b و یک فنر غیر خطی با سفتی K_i به منظور نشان دادن اثرات جابجایی محلی (همانند شکل 6).

پانل ساندویچی که روی لبه‌های خود کاملاً ثابت شده است، جابجایی محلی α بعلت تغییر شکل صفحه بالایی و جابجایی کلی w_b بعلت خمش و

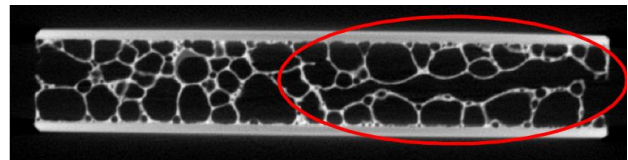


Fig. 3 CT analysis of an aluminum sandwich panels type-I before impact test

شکل 3 تصویر مقطع نگاری رایانه ای از پانل تولید شده نوع 1 پیش از انجام آزمایش ضربه



Fig. 4 Spherical Impactor with strain gauge

شکل 4 ضربه زنده کروی به همراه کرنش سنج متصل شده

نتایج بدان اشاره شده است.

5- نتایج

نیرو وارده ناشی از بار ضربه بوسیله کرنش سنج متصل به ضربه زننده دستگاه ضربه ثقلی در طول برخورد اندازه گیری شده و تغییرات آن نسبت به زمان ثبت و توسط نرم افزار تحلیل می شود. سرعت برخورد از انتگرال شتاب نسبت به زمان در طول مدت برخورد محاسبه می شود. تغییرات مولفه شتاب خود از حاصل تقسیم نیروی وارده بر جرم ضربه زننده در هر لحظه و مولفه جابجایی نیز از حاصل انتگرال مولفه های جابجایی هر لحظه بدست می آید.

نمودار نیرو-زمان که در سرعت های مختلف برخورد (4، 5، 6، 7 و 8 متر بر ثانیه) اندازه گیری شده است، برای نمونه های نوع I و II به ترتیب در اشکال 8 و 9 ارائه شده است.

نمودار بیشترین نیروی برخورد بر حسب سرعت های اولیه مختلف برای هر دو نوع نمونه بررسی شده در شکل 10 نشان داده شده است.

پراکندگی داده ها در نتایج آزمایشات به دلیل اختلاف در توزیع تخلخل فوم آلومینیومی می باشد. بنابراین بررسی کیفیت فوم بوسیله روش های غیر مخرب مانند روش مقطع نگاری رایانه ای دارای اهمیت فراوانی است. جدول 3 نتایج مقدار انرژی جذب شده به همراه بیشترین نیروی برخورد را برای کلیه

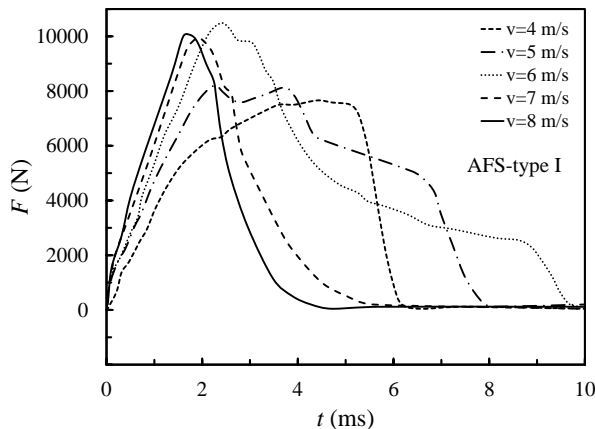


Fig. 8 Load-time curves for specimens type-I

شکل 8 نمودار نیرو-زمان برای نمونه های نوع اول

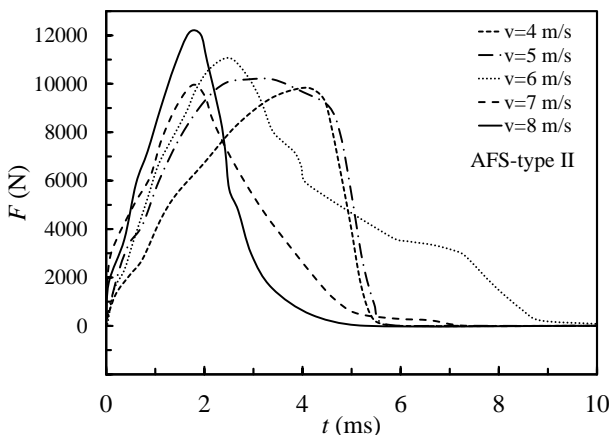


Fig. 9 Load-time curves for specimens type-II

شکل 9 نمودار نیرو-زمان برای نمونه های نوع دوم

که در آن K_{bs} سفتی خطی ناشی از اثرات خمشی و برشی است. اثرات برخورد ضربه زننده به سازه ساندویچی با استفاده از قانون برخورد میرا¹ بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$F = K_i \alpha^n \quad (3)$$

که در آن K_i و n مقادیر ثابتی هستند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست می آید. انرژی جذب شده ناشی از برخورد سطوح، به بیان ریاضی، با استفاده از انتگرال رابطه (3) به صورت (4) محاسبه می شود:

$$E_c = \int_0^{\alpha_{max}} F d\alpha = \frac{F_{max}^{1+\frac{1}{n}}}{(n+1)K_i^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

در نهایت، موازنه انرژی برای سازه ساندویچی با فرض تساوی انرژی اولیه جنبشی با انرژی جذب شده ناشی از خمش، برش و برخورد سطوح به شکل زیر برقرار خواهد شد:

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_b + E_s + E_c = \frac{F_{max}^2}{2K_{bs}} + \frac{F_{max}^{1+\frac{1}{n}}}{(n+1)K_i^{\frac{1}{n}}} \quad (5)$$

از این روش تئوری برای بررسی رفتار پانل آلومینیومی ساندویچی در این تحقیق استفاده شده است. این روش از طریق مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش های تجربی در برخی سرعت های برخورد، صحت گذاری شده است. همچنین می توان از این روش (رابطه (5)) به منظور پیش بینی نیروی برخورد پیشینه برای سرعت برخورد مشخص نیز استفاده نمود. پارامترهای مورد نیاز در این روش در بیشتر مطالعات از طریق نتایج آزمایش های استاتیکی بدست آمده است. اما در این تحقیق، این پارامترها به صورت مستقیم از تصاویر مقطع نگاری رایانه ای اندازه گیری شده است (شکل 7)؛ جابجایی عمودی هسته (w_b) در بخش تحتانی رویه و جابجایی ضربه زننده (w_i) در سرعت های کمتر از 5 متر بر ثانیه که منجر به تخریب کامل نشده است. فشردگی هسته (α) حاصل از تفریق جابجایی ضربه زننده و جابجایی عمودی هسته بدست می آید.

بر اساس مدل جرم و فنر، می توان یک رابطه خطی بین نیروی ضربه و جابجایی پانل ساندویچی متناظر با آن (w_b) و با ضریب زاویه K_{bs} یافت. علاوه بر این سفتی K_{bs} با تغییر سرعت ضربه ثابت است، بنابراین در این تحقیق سفتی K_{bs} با شیب تابع خطی میان یابی شده از پیشینه نیروی برخورد در سرعت های ضربه مختلف (حاصل از آزمایش ضربه و اندازه گیری تغییر شکل نمونه از تصاویر مقطع نگاری رایانه ای) برآورد شده که در بخش

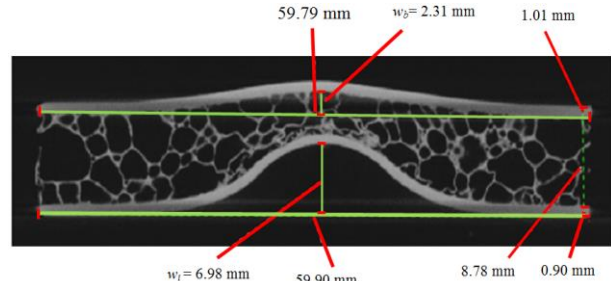


Fig. 7 Measurements of the displacements w_i and w_b carried out on the CT image

شکل 7 اندازه گیری پارامترهای جابجایی w_i و w_b روی تصویر بدست آمده از مقطع نگاری رایانه ای

² Data scattering

¹ Meyer contact law

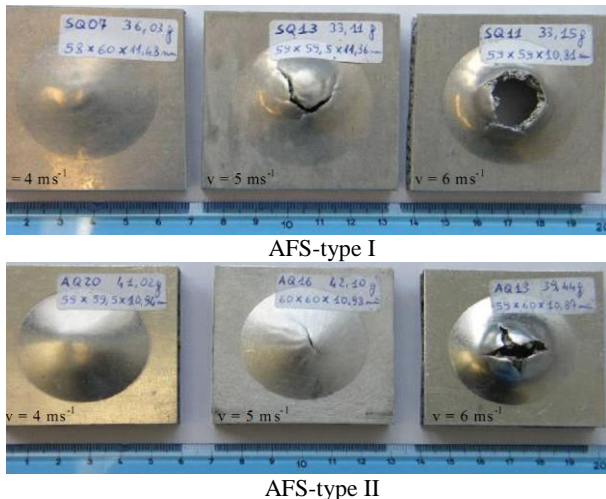


Fig. 11 Aluminum foam sandwich panels after the impact at different impact velocities

شکل 11 نمونه‌های فوم آلومینیومی ساندویچی پس از ضربه با سرعت‌های برخورد مختلف

بررسی عملکرد پس از ضربه نمونه‌ها نتایج تحقیق کامپستون و همکاری [23] را تایید می‌کند. نمونه‌های پانل ساندویچی آلومینیومی با عملکرد به مراتب انعطاف پذیرتر نسبت به رفتار الاستیک پانل‌های ساندویچی پلیمری، با جابجایی‌های بزرگ خارج از صفحه امکان جذب انرژی ضربه بالاتری را فراهم می‌کند. تخریب نهایی¹ و شکست کامل پانل‌های ساندویچی آلومینیومی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی پلیمری، دارای گستره کمتر و نمونه‌های سالم‌تری پس از ضربه بوده و در نتیجه خواص مکانیکی و عملکرد آنها پس از ضربه بهتر خواهد بود [7، 8 و 12]. لذا به دلیل جذب تدریجی انرژی ضربه، پانل‌های ساندویچی آلومینیومی در مقایسه با ساندویچ پانل‌های پلیمری، از اولویت انتخاب بهره‌مند خواهند بود.

مقادیر بیشینه نیروی برخورد بر حسب مقادیر تغییر شکل میانی صفحه پانل به همراه رگرسیون خطی داده‌ها برای محاسبه سفتی K_{bs} برای هر دو نمونه تولیدی، در شکل 13 نشان داده شده است.

سهم مقدار انرژی از دست رفته به دلیل خمش و برش (E_{bs}) با استفاده از رابطه (2) و انرژی برخورد (E_c) با کسر مقدار انرژی از کل انرژی از دست رفته بدست خواهد آمد. با فرض بیان لگاریتمی رابطه (4)، رابطه خطی (6) بدست می‌آید:

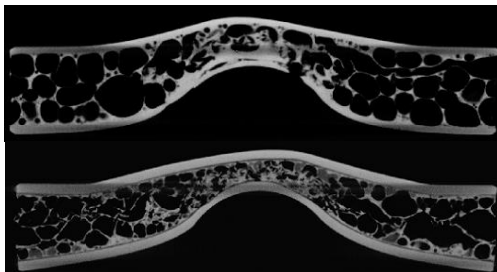


Fig. 12 CT image of Aluminum foam sandwich panels after impact ($v=4$ m/s)

شکل 12 تصاویر مقطع نگاری رایانه ای نمونه های پانل ساندویچی با سرعت برخورد 4 متر بر ثانیه

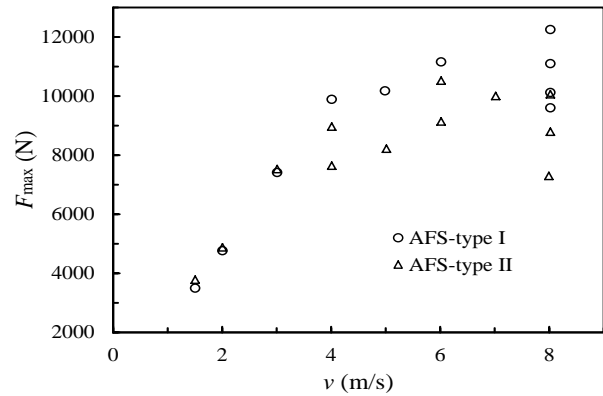


Fig. 10 Contact force peak velocity curves for aluminum sandwich panels

شکل 10 نمودار بیشترین نیروی برخورد بر حسب سرعت اولیه برای هر دو نوع نمونه

آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد. میزان انرژی مورد نیاز برای تخریب کامل پانل‌های ساندویچی نوع I مقدار 122 ژول و برای نوع II مقدار 142 ژول محاسبه شده است. علیرغم اتصال ضعیف تر هسته و پوسته در پانل‌های ساندویچی نوع II، نتایج آزمایشات بیانگر عملکرد بهتر آنها تحت بار ضربه نسبت به پانل‌های نوع I می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که اختلاف معناداری میان چگالی هسته دو نوع پانل وجود ندارد. بنابراین رفتار دینامیکی این نوع پانل‌های ساندویچی متأثر از شیوه اتصال هسته و پوسته نبوده، بلکه تابع کیفیت و خواص مکانیکی هسته فومی آنها می‌باشد [22].

در شکل 11 پانل‌های ساندویچی آلومینیومی پس از ضربه در سرعت‌های برخورد مختلف (4، 5 و 6 متر بر ثانیه) نشان داده شده است. نتایج مؤید ایجاد جابجایی‌های خارج از صفحه بزرگتر نمونه‌های نوع I پس از برخورد می‌باشد.

تصاویر حاصل از مقطع نگاری رایانه‌ای برای هر دو نوع نمونه پس از ضربه با سرعت 4 متر بر ثانیه در شکل 12 نشان داده شده است. این تصاویر امکان درک بهتری از شکل تخریب نمونه‌ها را فراهم می‌کند. تخریب تدریجی و پیش رونده سلول‌های هسته فومی و توزیع یکنواخت ضربه وارده در اشکال بدست آمده قابل مشاهده است.

جدول 3 نتایج کلیه آزمایشات ضربه انجام شده

Table 3 Results of all the impact tests

سرعت برخورد (m/s)	نمونه نوع I		نمونه نوع II	
	انرژی جذب شده (J)	بیشینه نیروی برخورد (N)	انرژی جذب شده (J)	بیشینه نیروی برخورد (N)
1.5	3757	3458	8	3458
2	4810	4722	14	4722
3	7499	7398	31	7398
4	8967	9822	56	9822
4	7565	-	56	-
4	7640	-	56	-
5	8214	10257	88	10257
6	10460	11112	127	11112
6	9132	-	127	-
7	9948	10010	130	10010
8	8769	11010	119	11010
8	8740	8542	117	8542
8	10010	10150	134	10150
8	7253	12213	110	12213

¹ Catastrophic fracture

- نتایج آزمایش ضربه با سرعت پایین روی نمونه‌های پانل ساندویچی آلومینیومی بیانگر تاثیر معنادار کیفیت و خواص مکانیکی هسته فومی بر عملکرد دینامیکی آن‌ها می‌باشد.
- میزان انرژی مورد نیاز برای تخریب کامل پانل‌های ساندویچی نوع I مقدار 122 ژول و برای نوع II مقدار 142 ژول محاسبه شده است. علیرغم اتصال ضعیفتر هسته و پوسته در پانل‌های ساندویچی نوع II، نتایج آزمایشات بیانگر عملکرد بهتر آن‌ها تحت بار ضربه نسبت به پانل‌های نوع I می‌باشد.
- تخریب نهایی و شکست کامل پانل‌های ساندویچی آلومینیومی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی پلیمری، دارای گستره کمتر و نمونه‌های سالم‌تری پس از ضربه بوده و در نتیجه خواص مکانیکی و عملکرد آنها پس از ضربه بهتر خواهد بود، لذا پانل‌های ساندویچی آلومینیومی در مقایسه با ساندویچ پانل‌های پلیمری، از اولویت انتخاب بالاتری به عنوان جاذب انرژی بهره‌مند خواهد بود.
- با استفاده از مدل جرم و فنر ارائه شده، رابطه خطی بین نیروی ضربه و جابجایی پانل ساندویچی متناظر با آن (w_b) و همچنین رابطه مستقیم محاسبه انرژی جذب شده بر حسب نیروی بیشینه به منظور تحلیل و طراحی سازه‌های واقعی ارائه شده است.
- نتایج این تحقیق در ساخت سازه‌هایی که در عین وزن کم به قابلیت جذب انرژی بالا نیازمندند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این قبیل کاربردها می‌توان به صنایع حمل و نقل اشاره نمود. استفاده از این سازه‌های ساندویچی می‌تواند ضمن کاهش وزن وسیله نقلیه، افزایش استحکام سازه‌های آنرا حین شرایط بهره‌برداری در پی داشته باشد.

7- مراجع

- [1] Abrate, S., "Impact on Composite Structures", Cambridge University Press, 2005.
- [2] Ashby, M. F. Evans, A.; Fleck, N.A.; Gibson, L.J. and Hutchinson, J.W.; Wadley, H.N.G., "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth Heinemann: Burlington, 2000.
- [3] Gibson, L. J. A., M.F., "Cellular Solids" 2 ed., Cambridge University Press, 1997.
- [4] Banhart, J. S., C.; Neumann, U. , "Light-Weight Aluminum Foam Structures for Ships" in Proceeding of 55-63, 2011.
- [5] Baumeister, J. B., J.; Weber, M., "Aluminum Foams for Transport Industry" Material Design Vol. 18, pp. 217-220, 1997.
- [6] Hazizan, M. A. C., W.J., "The Low Velocity Impact Response of Foam-Based Sandwich Structures" Composites: Part B Vol. 33, No. 1, pp. 193-204, 2002.
- [7] Crupi, V. E., G.; Guglielmino, E., "Low Velocity Impact Strength of Sandwich Materials" Journal of Sandwich Structure Material, Vol. 13, No. 1, pp. 409-426, 2011.
- [8] Crupi, V. E., G.; Guglielmino, E., "Computed Tomography Analysis of Damage in Composites Subjected to Impact Loading" Fracture and Structure Integrity, Vol. 17, No. 1, pp. 32-41, 2011.
- [9] Olurin, O. B. A., M.; Körner, C.; Singer, R.F. , "The Investigation of Morphometric Parameters of Aluminum Foams Using Micro-Computed Tomography" Material Science Engineering, Vol. 328, No. 1, pp. 334-343, 2002.
- [10] Wicklein, M. T., K., "Numerical Investigations of the Elastic and Plastic Behavior of an Open-Cell Aluminum Foam" Material Science Engineering, Vol. 397, No. 1, pp. 391-399, 2005.

$$\log(E_c) = \left(1 + \frac{1}{n}\right) \log(F_{max}) - \left[\log(n+1) + \frac{1}{n} \log(K_i)\right] \quad (6)$$

مقادیر انرژی برخورد (E_c) بر حسب بیشینه نیروی برخورد در مقیاس لگاریتمی و رگرسیون خطی به منظور دستیابی به پارامترهای (K_i و n) در رابطه (6) در شکل 14 نشان داده شده است. مقادیر ثابت K_i و n برای نمونه‌های نوع I، $n = 0.74$ و $K_i = 4.70 E^5 Nm^{-0.74}$ ، و برای نمونه‌های نوع II، $n = 1.42$ و $K_i = 1.51 E^7 Nm^{-1.42}$ بدست آمده است.

6- بحث و نتیجه گیری

عملکرد پانل‌های فوم آلومینیومی ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت کم، بررسی شکل شکست آن‌ها و همچنین استخراج پارامترهای دینامیکی، بر خلاف سایر مطالعات پیشین که از نتایج آزمایش استاتیکی استخراج شده، از اندازه‌گیری تصاویر مقطع نگاری رایانه‌ای نمونه‌های پس از ضربه اندازه‌گیری شده است. دو نوع نمونه پانل‌های فوم آلومینیومی ساندویچی مورد بررسی قرار گرفت که تفاوت آن‌ها در کیفیت فوم و چسبندگی هسته و رویه می‌باشد. آزمایش ضربه توسط دستگاه تست ضربه ثقلی با سرعت برخوردهای متفاوت، مقایسه میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف و تحلیل شکل شکست نمونه‌ها و تخریب ساختار داخلی آن‌ها بر روش مقطع نگاری رایانه‌ای سه بعدی صورت پذیرفته است. همچنین یک روش تئوری بر مبنای مدل موازنه انرژی برای بررسی رفتار ضربه ماده بکار گرفته شده است. اهم نتایج حاصله بر اساس مشاهدات تحلیلی بدین شرح می‌باشد:

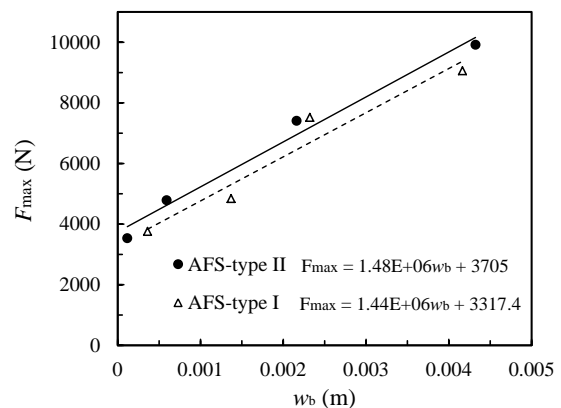


Fig. 13 Peak load vs. midplane sandwich deflection

شکل 13 بیشینه نیروی برخورد بر حسب تغییر شکل میانی صفحه

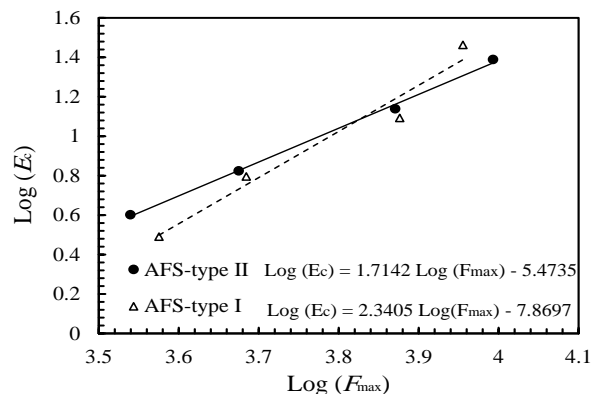


Fig. 14 Contact energy dissipation vs. peak load

شکل 14 انرژی برخورد از دست رفته بر حسب بیشینه نیروی برخورد

- [11] Hossein Farahat, S. Y. A. B., "Effect of Heat Treatment on the Impact Response of Aluminum Foam with Consideration of Statistical Analysis" In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 199-206, 2016.
- [12] Chengjun Liu a, Y. X. Z., L. YebHigh, "Velocity Impact Responses of Sandwich Panels with Metal fibre Laminate Skins and Aluminum Foam Core" *International Journal of Impact Engineering* Vol. 100, No. 1, pp. 139-153, 2017.
- [13] Pengfei Wang a, b., Songlin Xu a,n, Zhibin Li a, Jinglei Yang b, Hang Zheng a, Shisheng Hu, "Temperature Effects on the Mechanical Behavior of Aluminum Foam under Dynamic Loading" *Materials Science & Engineering A* Vol. 599, No. 1, pp. 174-179, 2014.
- [14] Kavei, G., "Mechanical Properties of Aluminum Foam Fabricated by Aluminum Powders with Na or Carbamide Replica" *AASCIT Journal of Material*, Vol. 1, No. 2, pp. 22-30, 2015.
- [15] Lorenzo Peroni, M. A., Marco Peroni, "The Mechanical Behavior of Aluminum Foam Structures in Different Loading Conditions" *international Journal of Impact Engineering* Vol. 35, pp. 644-658, 2008.
- [16] S. Feli, S. S. J., "An Analytical Investigation of Perforation of Aluminum-Foam Sandwich Panels under Ballistic Impacts", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 52-59, 2013.
- [17] Golestanipoor, M., Babakhani, A, Zebarjad, M, "Simulation of Absorbed Impact Energy in Aluminum Sandwich Panels with Foam-Core under High Rate Impact Test", In Persian, *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 17-27, 2014.
- [18] Golestanipoor, M., Babakhani, A, Zebarjad, M, Tavakoli, M, Naderi, B, "Investigation of Absorbed Energy in Sandwich Panels with Foam-Core under Drilling", In Persian, *Journal of Modern Materials*, Vol. 3, No. 2, pp. 10-15, 2012.
- [19] Golestanipoor, M., Babakhani, A, Zebarjad, M, "Investigation and Simulation of Quasi Static Drilling in Sandwich Panels with Foam-Core", In Persian, *Journal of Modern Materials*, Vol. 6, No. 2, pp. 23-28, 2015.