بررسی تجربی رفتار جذب انرژی پنل‌های ساندویچی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین

حسین تقی پور[1]

[1] استادیار، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، h.taghipoor@velayat.ac.ir

چکیده

پنل‌های ساندویچی با هستهٔ لانه زنبوری، ساختارهایی سبک با قابلیت جذب انرژی بالا هستند که در ساختمان‌سازی، بسته بندی و جاذب‌های انرژی کاربرد دارند. در این مقاله رفتار پنل‌های ساندوچی با رویهٔ آلومینیومی و هستهٔ موجدار از جنس آلومینیوم تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. هندسهٔ مربعی و مثلثی با ارتفاع متفاوت برای هستهٔ موجدار مورد استفاده قرار گرفته و تأثیر هندسهٔ هسته بر میزان جذب انرژی و مقاومت پنل بررسی می‌شود. برای اعمال ضربه از دستگاه سقوط آزاد با ضربه زننده‌ای به وزن 17 کیلوگرم استفاده می‌شود. شتاب، سرعت و جابجایی ضربه زننده و همچنین انرژی جذب شده توسط پنل ساندویچی اندازه‌گیری می‌شوند. مکانیزم جذب انرژی شامل جدایش هسته از رویه و ایجاد لولاهای پلاستیک در ورق تشکیل دهندهٔ هسته است. نتایج نشان می‌دهند که ارتفاع پنل و هندسهٔ هسته نقش مؤثری بر میزان جذب انرژی و مقاومت پنل ساندویچی ایفا می‌کنند، بطوری که پنل‌های با ارتفاع بیشتر قابلیت جذب انرژی بالاتری داشته و مقاومت به ضربهٔ نمونه‌های با هستهٔ مربعی بیشتر از نمونه‌های با هستهٔ مثلثی است.

واژه های کلیدی

جذب انرژی، ساندویچ پانل، ضربه سرعت پایین، سقوط وزنه

مقدمه

هسته‌های موجدار با شکل ذوزنقه‌ای به سازه‌های ساندویچی این امکان را داده که در مقابل تخریب مقاومت خود را افزایش بدهند. پنل‌های ساندویچی به دلیل دارا بودن مشخصه‌هایی همچون استحکام و سفتی بالا و وزن کم در ساخت انواع هواپیما، خودرو، کشتی و سازه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مزایای ساختاری اغلب به دلیل وجود هسته با چگالی پایین است که صفحات بیرونی را از هم جدا می‌کند. طراحی سازه‌های ساندویچی بر اساس پارامترهایی چون فراهم آوردن استحکام لازم و کمترین وزن ممکن انجام می‌شود. جداسازی صفحات بیرونی از یکدیگر موجب افزایش ممان اینرسی مقطع و در نتیجه مقاومت بیشتر پنل در برابر کمانش و خمش می‌شود. هسته می‌بایست دارای سفتی قابل قبول در جهت برشی باشد تا بتواند از لغزش صفحات نسبت به یکدیگر جلوگیری نماید[1,2].

امروزه ساختارهای چیدمانی و مواد متنوع به منظور استفاده به عنوان هسته مطرح شده‌اند. پرکاربردترین این ساختارها لانه زنبوری شش وجهی آلومینیومی و همچنین لنواع فوم‌های پلیمری هستند. هسته‌های فومی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که خواصی همچون مقاومت در برابر حرارت، عایق بودن در برابر نفوذ آب و سر و صدا مد نظر باشد. به علاوه فوم‌های پلیمری از جمله ارزانترین مواد مورد استفاده در تولید هسته هستند که از لحاظ اقتصادی نقش مؤثری در تولید مقرون به صرفهٔ پنل ساندویچی دارند[3]. در مواردی که خواص بالستیک دارای اهمیت است می‌توان از فوم آلومینیومی به عنوان هسته استفاده کرد. از سوی دیگر ساختارهای ساندویچی دارای نسبت سفتی به وزن بیشتری هستند که افزایش صلبیت پنل را به همراه دارد، اما مشکل اصلی این هسته‌ها کوچک بودن سطح تماس دیواره های سلولی و صفحات بیرونی است. این ضعف موجب کاهش چسبندگی شده و به دلایلی همچون عیوب تولید و شرایط بحرانی سرویس‌دهی، جدایش صفحات و تخریب پنل را به دنبال دارد[4]. پر کردن هستهٔ لانه زنبوری با انواع فوم می‌تواند به عنوان روشی موثر در مقاوم‌سازی پنل در برابر پدیده بازشدگی صفحات مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که بیشتر خرابی‌های ایجاد شده در بدنه هواپیماها و هلیکوپترها به دلیل ارتعاشات شدید در شروع حرکت است درک صحیح از ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌های ساندویچی همچون مقادیر ویژه فرکانسی و مودهای ارتعاشی، بسیار مهم است. از آنجا که پنل‌های لانه زنبوری در موارد بسیاری به عنوان جاذب انرژی در مقابل بار ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند بررسی رفتار ضربه‌ای آنها نیز بخصوص زمانی که با فوم پر می‌شوند، حائز اهمیت است[5].

مطالعات گسترده‌ای که بر روی پاسخ سازه‌های ساندویچی با هسته اسفنجی یا لانه زنبوری تحت ضربهٔ سرعت بالا یا بارگذاری انفجاری انجام گرفته است نشان دهندهٔ جذب انرژی عالی این سازه ها در مقایسه با ورق‌های یکپارچه می‌باشد [1-6]. ژو و همکاران [7] تأثیر پارامترهای مختلف طراحی را بر پاسخ پنل‌های ساندویچی با هستهٔ لانه زنبوری آلومینیوم تحت انفجار در هوا بررسی کردند. مطالعهٔ آنها بیانگر وابستگی نحوهٔ تغییر شکل و تخریب به ضخامت رویه‌ها و مشخصات هسته همچون ابعاد حفره ها و ضخامت جداره آنها بود.

فان و همکاران [8] با انجام آزمایش بر روی پنل‌های ساندویچی با رویه و هستهٔ لانه زنبوری آلومینیومی تأثیر پارامترهای طراحی بر

مقاومت سازه و مکانیزم تخریب را تحت انفجار در زیر آب بررسی نمودند. لی و همکاران [9] با مطالعهٔ تجربی پنل‌های آلومینیومی با هستهٔ لانه زنبوری، مودهای مختلف تغییر شکل و تخریب شامل فشردگی کامل هسته، کمانش پیش رونده، تغییر شکل برشی و شکستگی را مشاهده کردند. آنها دریافتند با کاهش فاصلهٔ مادهٔ منفجره از نمونه، بیشترین فشار وارد بر رویهٔ پنل افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش فاصلهٔ مادهٔ منفجره منجر به افزایش تغییر شکل پلاستیک خواهد شد.

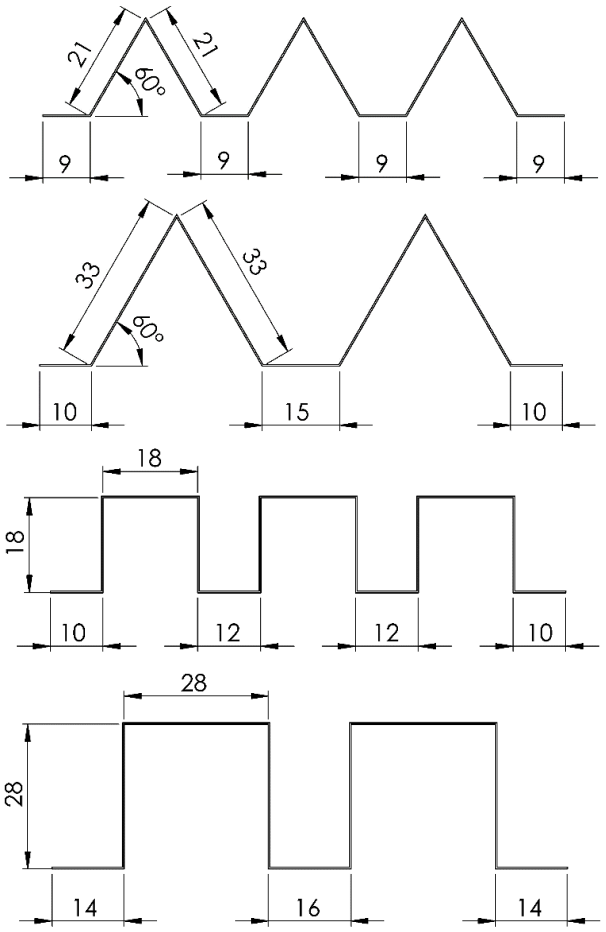
دارماسنا و همکاران [6] با انجام آزمایش انفجار، پاسخ دینامیکی پنل‌های لانه زنبوری مربعی را با پنل توپر مقایسه کرده و نشان دادند که پنل لانه زنبوری، خیز کمتری نسبت به پنل توپر با جرم برابر دارد. نوریک و همکاران [10] تأثیر ارتفاع هسته، ضخامت رویه و برهم کنش اجزای پنل را بر مودهای تخریب آن بررسی کردند. تئوبالد [11] با مقایسهٔ پنل‌ها با هسته‌های مختلف دریافت که ضخامت رویه، بیشترین تأثیر را بر رفتار پنل‌های ساندویچی تحت انفجار دارد. وادلی و همکاران [12] تغییر شکل و شکست پنل های ساندویچی با هستهٔ موجدار مثلثی را تحت بار ضربه ای ناشی از برخورد پوسته های ماسه ای پر شتاب مورد بررسی قرار دادند. یحیا و همکاران [13] تأثیر شکل هستهٔ پنل را بر تغییر شکل آن در اثر اصابت پرتابهٔ فوم آلومینیوم با سرعت‌های مختلف مطالعه کردند.

رفتار بالستیکی سازه های ساندویچی با هستهٔ لانه زنبوری در مقالات متعددی بررسی شده است [14-16].

با توجه به آنکه تا کنون مطالعه ای بر روی رفتار سازه های ساندویچی با هستهٔ موجدار تحت ضربهٔ سرعت پایین انجام نگرفته است در این مقاله، عکس العمل پنل‌های ساندویچی با هستهٔ موجدار در مقابل ضربه اعمالی توسط دستگاه آزمون ضربهٔ سقوطی و همچنین توانایی جذب انرژی آنها مورد آزمایش قرار گرفته و تأثیر هندسهٔ هسته بر میزان جذب انرژی و مقاومت پنل بررسی می‌شود.

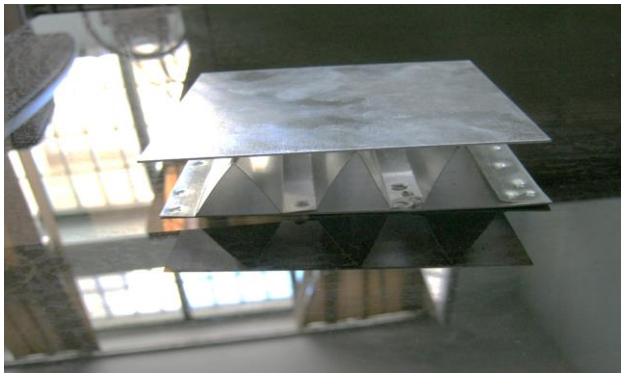
2- مواد و آزمون

از صفحات آلومینیومی درجه 1200 که آلومینیوم تقریباً خالص می‌باشد برای ساخت نمونه ها استفاده شده است. صفحات در ابعاد 2×1 متر با دو ضخامت متفاوت 0.3 میلی متر برای هسته و 0.8 میلی متر برای صفحات بالایی و پایینی تهیه شدند. سپس با توجه به ابعاد مورد نیاز برای پنل‌های ساندویچی، دو نمونه با زاویهٔ خم 60 درجه برای هسته مثلثی و ابعاد کلی 2×10×10 سانتیمتر و دو نمونه با زاویهٔ خم 90 درجه برای هسته مربعی و ابعاد کلی 3×10×10 سانتیمتر برش داده شده و طراحی اولیه هسته‌ها بصورت شکل 1 انجام گرفت.

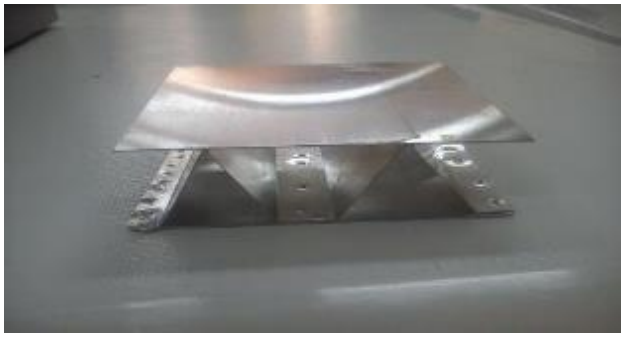


شکل 1 هندسهٔ هسته پنل‌های ساندویچی، از بالا به پایین: هستهٔ 1، هستهٔ 2، هستهٔ 3 و هستهٔ 4

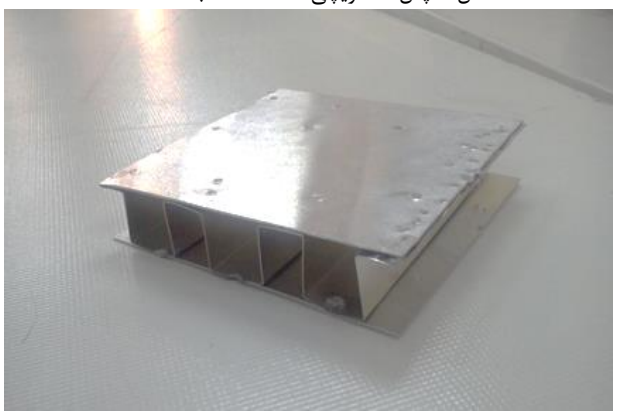
تمامی خمکاری‌ها با دستگاه ورق خم‌کن دستی انجام شده است. سپس برای مونتاژ پنل‌های ساندویچی آنها را به کمک دستگاه نقطه جوش به یکدیگر متصل کرده و قطعات با زاویهٔ هستهٔ 60 درجه که دارای لبه‌های تیز بوده و سطح اتکای مناسب برای جوشکاری صفحه بالایی را ندارند با چسب آهن به رویهٔ پنل ساندویچی متصل شدند. شکل‌های 2 الی 5 تصاویر نمونه‌های پنل ساندویچی ساخته شده برای آزمون ضربه را نشان می‌دهند. نمونه‌ها توسط دستگاه آزمون ضربهٔ سقوطی که در شکل 6 مشاهده می‌شود آزمایش شدند. اعمال ضربه با سقوط وزنهٔ 17 کیلوگرمی از ارتفاع 10 cm انجام شد.



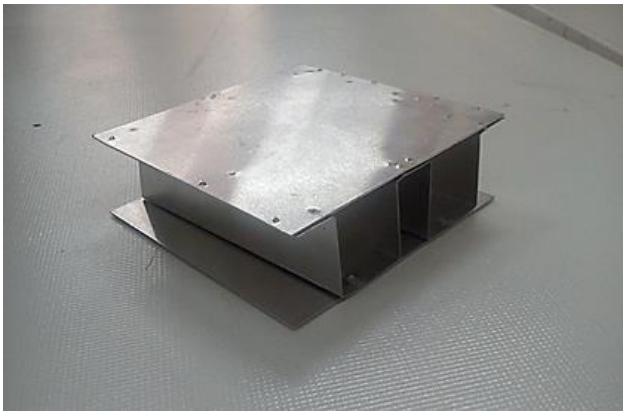
شکل 2 پنل ساندویچی ساخته شده با هستهٔ 1



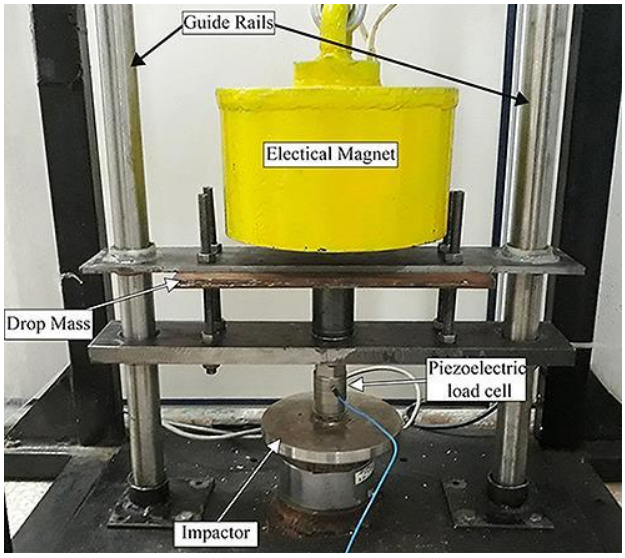
شکل 3 پنل ساندویچی ساخته شده با هستهٔ 2



شکل 4 پنل ساندویچی ساخته شده با هستهٔ 3



شکل 5 پنل ساندویچی ساخته شده با هستهٔ 4

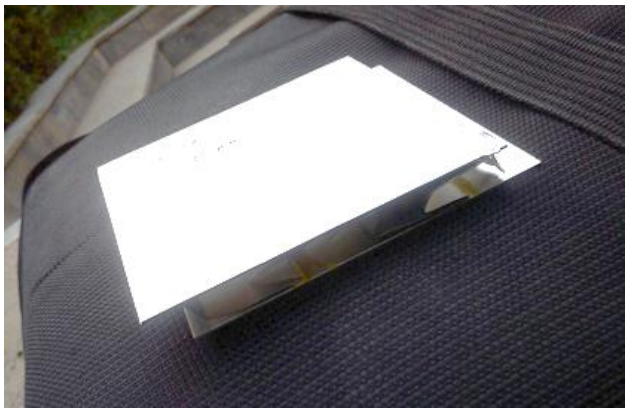


شکل 6 دستگاه آزمون ضربه با وزنهٔ سقوطی

3- نتایج تجربی

عکس نمونه‌ها پس از انجام آزمون ضربه در شکل‌های 7 الی 10 نشان داده شده است.

شکل 7 نمونهٔ اول پس از تست ضربه



شکل 8 نمونهٔ دوم پس از تست ضربه

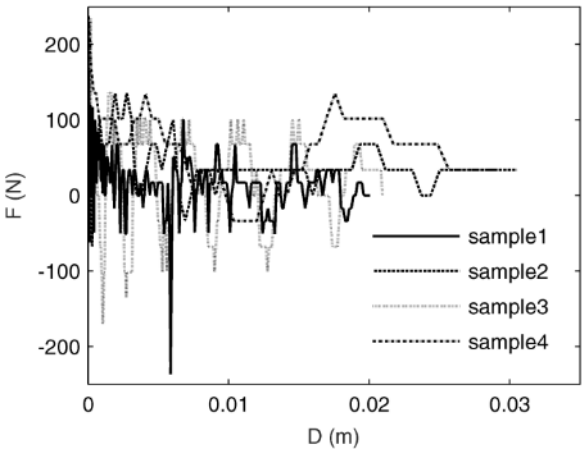
شکل 9 نمونهٔ سوم پس از تست ضربه

شکل 10 نمونهٔ سوم پس از تست ضربه

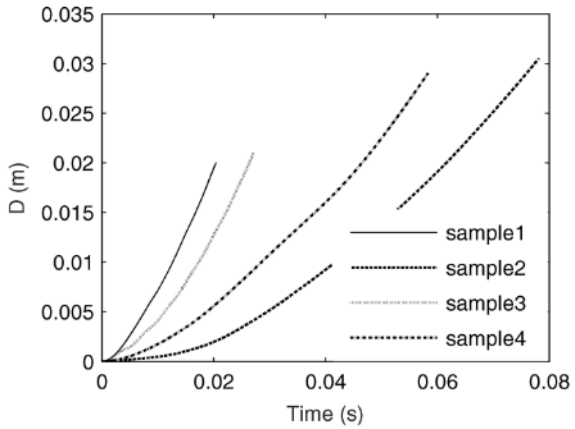
اطلاعات بدست آمده از دستگاه تست ضربه برای تعیین تغییرات جابجایی، سرعت و شتاب رویهٔ پنل ساندویچی و همچنین محاسبهٔ میزان انرژی جذب شده توسط آن استفاده شده است. شکل 11 تغییرات نیروی وارد بر پنل ساندویچی را بر حسب میزان فشردگی آن برای نمونه‌های مختلف پنل‌های ساندویچی نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که نمونه‌های با هستهٔ مربعی دارای میانگین نیروی بالاتری بوده و لذا می‌توان نتیجه گرفت این نمونه‌ها مقاومت به ضربهٔ بالاتری دارند.

نمودارهای جابجایی ضربه زننده بر حسب زمان برای نمونه‌های مختلف در شکل 12 مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌های با ارتفاع کمتر، سرعت لهیدگی بیشتری دارند.

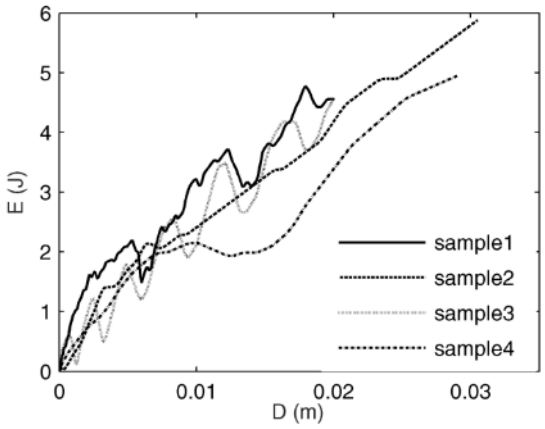
میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های مختلف پنل ساندویچی با گذشت زمان در شکل 13 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه با ارتفاع بیشتر انرژی بیشتری را در حین تغییر شکل جذب می‌کنند.



شکل 11 تأثیر هندسهٔ هسته بر نمودار نیرو- جابجایی پنل‌های ساندویچی



شکل 12 تأثیر هندسهٔ هسته بر نمودار جابجایی- زمان پنل‌های ساندویچی



شکل 13 تأثیر هندسهٔ هسته بر نمودار انرژی- جابجایی پنل‌های ساندویچی

جمع‌بندی

در این مقاله، پنل ساندویچی شامل رویه‌های آلومینیومی به ضخامت 0.3 میلیمتر و هستهٔ موجدار با چهار هندسهٔ مختلف متشکل از ورق آلومینیومی به ضخامت 0.8 میلیمتر تحت بار ضربه‌ای قرار داده شد.

از نمودارهای انرژی بر حسب جابجایی نتیجه می شود که با افزایش ارتفاع پنل، میزان جذب انرژی افزایش یافته و ساختار ساندویچی با خم هسته 60 درجه و ارتفاع 30 میلی‌متر بیشترین مقدار جذب انرژی را دارا می‌باشد. بررسی هندسهٔ هسته‌ها در حین ضربه نشان می‌دهد که تغییر شکل اولیه پنل در نتیجهٔ کمانش دیوارهٔ هسته می‌باشد. پس از کمانش، هسته دچار تغییر شکل پلاستیک شده و لولاهای پلاستیک ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر، جدا شدن هسته از پوسته در نواحی اتصال جوشی نشان دهندهٔ وجود تنش برشی بالا میان هسته و پوسته است. با توجه به آنکه میانگین نیرو در نمونه‌های با هستهٔ مربعی بیش از نمونه‌های با هستهٔ مثلثی است می‌توان نتیجه گرفت این نمونه‌ها مقاومت به ضربهٔ بالاتری دارند. از طرف دیگر نتیجه می شود نمونه‌های با ارتفاع کمتر، سرعت لهیدگی بیشتری دارند.

مراجع

[1] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part 1- analytical studies, Int. Journal of Impact Engineering, vol. 24, 957-973, 2000.
[2] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading: Part 2- experimental studies. International Journal of Impact Engineering, vol. 24, pp. 975-984, 2000.
[3] J.W. Shen, G.X. Lu, L.M. Zhao, Z.H. Qu, Response of Curved Sandwich Panels Subjected to Blast Loading. Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 25, pp. 382-393, 2011.
[4] V. Rizov, A. Shipsha, D. Zenkert, Indentation study of foam core sandwich 365 composite panels. Composite Structures, vol. 93, pp. 1300-1308, 2011.
[5] D.D. Radford, G.J. McShane, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, The response of clamped 367 sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading. International Journal of Solids and Structures, vol. 43, pp. 2243-2259, 2006.
[6] K.P. Dharmasena, H.N.G. Wadley, Z.Y. Xue, J.W. Hutchinson, Mechanical response of 370 metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, International Journal of Impact Engineering, vol. 35, pp. 1063-1074, 2008.
[7] F. Zhu, L.M. Zhao, G.X. Lu, Z.H. Wang, Deformation and failure of blast-loaded 373 metallic sandwich panels—Experimental investigations. International Journal of Impact Engineering, vol. 35, pp. 937-951, 2008.
[8] Z. Fan, Y. Liu, P. Xu, the blast resistance of metallic sandwich panels subjected to proximity underwater explosion, International Journal of Impact Engineering, http://dx.doi.org/doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.03.001, 2016.
[9] X. Li, P. Zhang, Z. Wang, G. Wu, L. Zhao, Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis, Composite Structures, vol. 108, pp. 1001–1008, 2014.
[10] G.N. Nurick, G.S. Langdon, Y. Chi, N. Jacob. Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast – Part 1: Experiments. Composite Structures, vol. 91, pp. 433-441, 2009.
[11] M.D. Theobald, G.S. Langdon, G.N. Nurick, S. Pillay, A. Heyns,
[12] H.N.G. Wadley, T. Børvik, L. Olovsson, J.J. Wetzel, K.P. Dharmasena, O.S. Hopperstad, V.S. Deshpande, J.W. Hutchinson, Deformation and fracture of impulsively loaded sandwich panels. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 61, pp. 674-699, 2013.
[13] M.A. Yahaya, D. Ruan, G. Lu, M.S. Dargusch, Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact - An experimental study, International Journal of Impact Engineering, vol. 75, pp. 100-109, 2015.
[14] N. Pirmohammadi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, H. Sabouri , Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014. (In Persian)
[15] N. Pirmohammadi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014. (In Persian)
[16] S. Feli, S.S. Jafari, Analytical investigation of perforation of aluminum–foam sandwich panels under ballistic impact, Vol. 13, No. 6, pp. 52-59, 2012. (In Persian)