



بررسی تجربی جذب انرژی در ساختارهای ساندویچی با هسته ساخته شده از ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه ای

زهرا باقری^۱، مهساسادات میرعلینقی^۲، مجتبی حقگو^۳، مجید علی طاوولی^۴ و هاشم بابایی^{*۴}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ استادیار، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین- پیشوا، ورامین، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

چکیده

در این پژوهش، مکانیزم تغییر شکل پلاستیک و شکست ساختارهای ساندویچی با رویه های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین مورد بررسی قرار گرفته است. از سیستم سامانه سقوط وزنه برای اعمال بار ضربه ای به نمونه در ۷ سطح انرژی مختلف ۳۴/۳، ۶۸/۶، ۱۰۲/۹، ۱۳۷/۲، ۱۵۴/۶، ۱۷۱/۵، ۲۰۵/۸ ژول استفاده شد. برای دستیابی به سطوح انرژی مذکور، جرم ضربه زننده ثابت و برابر با ۳/۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد و ارتفاع ضربه زننده از نمونه از ۱ تا ۶/۵ متر تغییر کرد. ۱۰ نمونه آزمایشی در دو نوع لایه‌بندی، با و بدون هسته ذرات لاستیکی در نظر گرفته شد. در این سری از آزمایش‌ها، ۱ میلی‌متر ضخامت ثابت رویه آلومینیومی و ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر برای هسته ذرات لاستیک ضایعاتی در نظر گرفته شد. نتایج تجربی ساختار ساندویچی با هسته ۱۶ میلی‌متری، ناحیه کوچک‌تر تغییر شکل دائمی در حدود ۳۷ و ۱۸ درصد را به ترتیب برای ارتفاع سقوط ۲ و ۳ متر به علت فضای متخلخل کم‌تر میان دو رویه آلومینیومی نشان داد؛ همچنین، در قیاس با ساختار ساندویچی بدون هسته، استفاده از هسته ذرات لاستیک ضایعاتی با جرم کم در سطوح انرژی کم موجب افزایش ۱۹ درصدی قطر سوراخ ورق جلویی شد.

کلمات کلیدی: بارگذاری ضربه‌ای؛ سامانه سقوط وزنه؛ مطالعه آزمایشگاهی؛ ورق‌های ساندویچی؛ ذرات لاستیک ضایعاتی.

Experimental investigation into the energy absorption of sandwich structures with the core made of waste rubber particles under impact loading

Zahra Bagheri¹, Mahasadat Miralinaghi², Mojtaba Haghgoo³, Majid Ali Tavoli⁴, Hashem Babaei^{*4}

¹ M.Sc., Mechanical Engineering Faculty, Guilan University, Rasht, Iran

² Assist. Prof., Department of Chemistry, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

³ Ph.D. student, Mechanical Engineering Faculty, Guilan University, Rasht, Iran

⁴ Assoc. Prof., Mechanical Engineering Faculty, Guilan University, Rasht, Iran

Abstract

In this research, the plastic deformation and failure mechanism of sandwich structures with aluminum face-sheets and waste rubber particles core under low-velocity impact loading have been investigated. The drop hammer testing machine was used to apply the impact load to the sample at seven different energy levels 34.3, 68.6, 102.9, 137.2, 154.3, 171.5, and 205.8 J. To achieve the mentioned energy levels, the weight of the hammer was considered constant and equal to 3.5 kg and the standoff distance of the hammer was changed from 1 to 6.5 m. 10 test samples were considered in two types of layering with and without the core of rubber particles. In this series of experiments, the thickness of aluminum face-sheets was constant at 1 mm and two different thicknesses of 16 and 32 mm were considered for the core. Experimental results showed that, the sandwich panel with 16 mm had a 37 and 18 % smaller deformed area for fall heights of 2 and 3 meters, respectively, due to the less porous space between two aluminum face-sheets. Also, compared to the coreless sandwich structure, the use of a low-mass waste rubber particle cores at low energy levels increased the front sheet perforation diameter by 19 %.

Keywords: Impact loading; Drop hammer testing machine; Experimental study; Sandwich sheets; Waste rubber particles.

۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی همواره مورد توجه محققین و صنعت‌گران بوده است. به طور کلی روش‌های شکل‌دهی به دو دسته تقسیم می‌شوند (۱) روش شکل‌دهی با نرخ انرژی زیاد، (۲) روش شکل‌دهی با نرخ انرژی کم. در روش شکل‌دهی با نرخ انرژی کم، برای شکل‌دهی فلزات از یک جرم به عنوان ضربه‌زننده استفاده می‌شود. در این شیوه، سرعت جرم به هنگام ضربه زدن می‌تواند در حدود کمتر از ۹ متر بر ثانیه باشد [۱، ۲]. انرژی تولیدی در این روش با انرژی تولیدشده به روش شکل‌دهی با سرعت زیاد قابل قیاس نیست که فشار زیادی در مدت کوتاهی بر قطعه اعمال می‌شود. روش شکل‌دهی با نرخ انرژی زیاد دارای معایب زیادی است. به طور مثال، صدای ناهنجار انفجار، امکان بروز حادثه، عدم دسترسی آسان به مواد منفجره و مسائل امنیتی از مهم‌ترین معایب و محدودیت‌های این روش‌اند [۳، ۴]. روش‌های شکل‌دهی با نرخ انرژی کم با وجود محدودیت در میزان شکل‌پذیری ورق، ارزان و قابل دسترس هستند؛ همچنین، این روش، در مقیاس نمونه‌سازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرایند شکل‌دهی با نرخ انرژی زیاد باشد. با توجه به تغییر شدید در انتقال انرژی بین ضربه‌زننده و نمونه، اتلاف انرژی با توجه به سرعت ضربه‌زننده متغیر است. ضربات سرعت پایین در سرعت پایین ۱۰ متر بر ثانیه، ضربات متوسط در سرعتی بین ۱۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه و ضربات سرعت زیاد در محدود سرعت ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه رخ می‌دهند [۵]. طراحی و ساخت یک جاذب انرژی با ساختاری سبک و ارزان‌قیمت با ظرفیت زیاد مهم است. تایرهای فرسوده وسایل نقلیه از جمله مواد تجزیه‌ناپذیری هستند که بازیافت آنها کمک شایانی به محیط زیست می‌کند؛ بنابراین مصرف مجدد آنها در ساخت سایر محصولات سودمند است. این ذرات باعث بهبود بسیاری از ویژگی‌ها از قبیل افزایش مقاومت در برابر حرارت، بارهای ضربه‌ای، سایش و ترک‌خوردگی می‌شوند؛ همچنین این ذرات باعث افزایش خاصیت انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی می‌شوند.

تحقیقات تجربی نسبتاً گسترده‌ای در زمینه تغییر شکل ساختارهای ساندویچی توسط سقوط ضربه‌زننده انجام شده است. در سال ۱۹۹۲، گلداسمیت و ساکمن^۱ [۶]، پانل‌های ساندویچی ساخته‌شده از ورق‌هایی از کامپوزیت و فلز را مورد تحقیق قرار دادند، آنها خم شدن و کشش هسته را مطالعه کردند. هدف تعیین اتلاف انرژی سازه بر اثر اصابت پوسته استوانه فلزی با سرعت ۱۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه بود. آنها برای نمونه‌های تقویت‌شده، مکانیزم فشردگی هسته، خمش و کشش رویه بالایی به همراه ورق زیرین صدمه ندیده را مشاهده کردند. در سال ۱۹۹۶، السون و مکمانوس^۲ [۷]، مدلی برحسب اجرام ضربه‌زننده به پانل ساندویچی حاوی رویه الاستیک و هسته کاملاً پلاستیک ارائه کردند. مدل پس از تسلیم هسته، مسئله را به دو بخش ناحیه بیرونی با هسته الاستیک و ناحیه درونی حاوی فشار عکس‌العمل ثابت هسته بر رویه تقسیم کرد. ناحیه بیرونی به صورت ورق و ناحیه درونی با استفاده از تئوری‌های ورق مدل شدند. آنها رابطه‌ای خطی بین نیرو و اندازه دندانه یافتند. در سال ۱۹۹۸، ماینز و همکاران^۳ [۸] پانل‌های ساندویچی ساخته‌شده از شیشه اپوکسی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها بر افزایش جذب انرژی با افزایش سرعت ضربه بر اثر افزایش لهیدگی هسته تأکید داشتند. نتایج آنها بر افزایش انرژی سوراخ‌شدگی پانل بر اثر استفاده از رویه‌های چندلایه با شکل‌پذیری زیاد دلالت داشت. در سال ۲۰۰۱، القمدی^۴ [۹]، تحقیقاتی که در چهار دهه اخیر بر روی جاذب‌های انرژی که تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته را مورد بررسی قرار داد. تحقیقات او بر مد تغییر شکل مشابه لوله‌های دایره‌ای تحت فشار دینامیکی و استاتیکی تأکید داشت. این لوله‌های دایره‌ای بیشترین تغییر شکل را در انتهای استوانه تجربه کردند. در سال ۲۰۰۴، کادر و همکاران^۵ [۱۰]، مطالعه‌ای بر تغییر شکل پلاستیک فوم‌های فلزی حین نفوذ پرتابه انجام دادند. آنها تغییر شکل را محدود به یک ناحیه فشرده کروی زیر تورفتگی یافتند. بیان تحلیلی‌شان تغییرات اندازه این ناحیه فشرده را به صورت تابعی از چگالی نسبی فوم، قطر و عمق فرورونده منعکس کرد. در سال ۲۰۰۴، کاو و گریستد^۶ [۱۱]، دو نوع اتصال چسبی-پیچی و اتصال سوراخ‌دار همراه با

⁴ Alghamdi

⁵ Cadar et al.

⁶ Cao and Grenestedt

¹ Goldsmith and Sackman

² Olsson and McManus

³ Mines et al.

مقاومت فشاری و کششی نوع دیگری از این جاذب‌های انرژی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۱]. آن‌ها بر استفاده ترکیبی از الیاف و ورق‌های مشبک فولادی برای افزایش جذب انرژی تأکید داشتند. محققان از لوله فلزی مشبک برای جذب انرژی قطعه برخوردکننده بهره‌بردارند [۲۲، ۲۳]. آنها با بهره‌بردن از یک مطالعه عددی، بر افزایش ظرفیت جذب انرژی با افزایش سطح مقطع و تعداد لایه‌های لوله مشبک تأکید داشتند.

با مرور مطالعات پیشین، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی با هسته‌های فلزی بوده و تاکنون تحقیقی بر تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت انجام نشده است. با هدف ساختن یک سازه با قابلیت ذخیره انرژی، ذرات لاستیک ضایعاتی با داشتن حالت کشسان گزینه مناسبی اند؛ لذا برای تحقق این هدف، رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی در دو ترکیب‌بندی مختلف تحت هفت سطح انرژی متفاوت استفاده می‌شوند. هدف اصلی این طرح، پیشنهاد هسته ذرات لاستیک ضایعاتی به عنوان یک جاذب انرژی با ساختاری سبک و ارزان در سازه پانل ساندویچی است. در این مطالعه تجربی، اثر ضخامت لایه ذرات لاستیک ضایعاتی و فاصله استقرار ضربه‌زننده بر پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه مطالعه می‌گردد.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- سامانه تست آزمایشگاهی

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی رفتار دینامیکی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت با سامانه سقوط وزنه در دانشگاه جامع امام حسین (ع) انجام شد. مطابق با شکل ۱، از سامانه سقوط وزنه برای مطالعه تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت استفاده می‌شود.

تزریق فولاد زنگ‌نزن سازه ساندویچی با رویه کامپوزیتی با هسته‌ای از جنس فوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج‌شان بر استحکام عالی هر دو نوع اتصال تأکید داشت. آن‌ها مشاهده کردند که خرابی همیشه دور از نقطه اتصال در بخشی از کامپوزیت به وقوع می‌پیوست. در سال ۲۰۰۵، تن و همکاران^۱ [۱۲] مکانیزم فشرده شدن و مقاومت فوم را در حین نفوذ مطالعه کردند. آن‌ها بر افزایش استحکام دینامیکی بر اثر اثرات اینرسی و لهیدگی موضعی دینامیکی تأکید داشتند. در سال ۲۰۰۸، علوی نیا و همکاران [۱۳]، مقاومت صفحات آلومینیومی را توسط ضربه‌زننده استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند و یک مدل تحلیلی بالاستیک برای آن ارائه دادند. در سال ۲۰۰۹، بوئیان و همکاران^۲ [۱۴]، بار بیشینه و انرژی جذب شده را در طول تغییر شکل سازه مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۱، لی و همکاران^۳ [۱۵]، خواص جذب انرژی توسط سازه لانه زنبوری فلزی را مورد مطالعه قرار دادند، آنها از مدل سطح پاسخ برای بهینه‌سازی انرژی جذب شده استفاده کردند. در سال ۲۰۱۲، احمدی و همکاران [۱۶]، اثرات سرعت، انرژی جنبشی و همچنین رفتار ضربه، تورفتگی و جابجایی بر پانل ساندویچی را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۹، حسن پور و همکاران [۱۷]، در مورد صفحات ساندویچی، پاسخ ضربه به این صفحات را وابسته به حداکثر ضربه، ضخامت سازه و نوع ورق پانل ساندویچی دانستند. مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در زمینه ضربه وارد بر ورق‌های فولادی تخت و انحنادار [۱۸]، توجه محققان را به خود جلب کرده است. آن‌ها با بهره‌بردن از مدل سازی عددی بر کاهش شتاب ضربه در ورق‌های انحنادار تأکید داشتند. مطالعه جاذب‌های انرژی هم در سالیان اخیر گسترش یافته است. بشیری و همکاران [۱۹] آزمایش‌هایی را بر جذب انرژی در ورق‌های یک و دولایه انجام دادند. آن‌ها بر کمتر بودن جذب انرژی و جابجایی ورق‌های دولایه تأکید داشتند. حاتمی و همکاران [۲۰] پانل‌های مستطیلی کامپوزیت را تحت ضربه ضربه‌زننده گوی شکل بررسی کردند. آن‌ها بر کم بودن تاثیر مقدار فیبر، ضخامت لایه و تعداد لایه‌ها بر قابلیت جذب انرژی کامپوزیت تأکید داشتند.

¹ Tan et al.

² Bhuiyan et al.

³ Li et al.

نمونه برداری شامل اندازه گیری قطر و عمق سوراخ، پس از جدا کردن قطعه از ورق های فولادی و توسط کولیس انجام شد؛ همچنین از سنسور ارتفاع سنج برای محاسبه ارتفاع وزنه استفاده شد.

۲-۲- نمونه های آزمایشگاهی و خواص مکانیکی

ساختارهای ساندویچی دارای رویه های آلومینیومی با ضخامت ثابت ۱ میلی متر در تمامی آزمایش ها هستند؛ همچنین، هسته ای از جنس ذرات لاستیک ضایعاتی در دو ضخامت مختلف ۱۶ و ۳۲ میلی متر مهیا شده است. لازم به توضیح است که ورق های آلومینیومی سری ۶۰۶۱ از شرکت آلومینیوم اراک در ایران خریداری شدند.

در ابتدا، نمونه ورق های مورد آزمایش در ابعاد 400×300 میلی متر برش زده شدند. نمونه های آزمایشی بین دو نگهدارنده فولادی به ابعاد 400×300 میلی متر و ضخامت ۲۰ میلی متر قرار داده شدند و توسط ۴ پیچ M12 به طور کاملاً گیردار مهار شدند. هر دو نگهدارنده دارای سوراخی به ابعاد 250×150 میلی متر هستند که این سوراخ در نگهدارنده جلویی برای امکان خروج و شکل گیری ورق و در نگهدارنده عقبی برای اعمال بار بر نمونه آزمایشی تعبیه شدند. فرض بر این است که به دلیل ضخامت زیاد نگهدارنده های فلزی، آن ها از اجسام غیر قابل تغییر شکل هستند؛ یعنی در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی نازک، تغییر شکل غیر قابل توجهی دارند. شایان توجه است که برای قرار دادن ذرات لاستیک ضایعاتی به عنوان جاذب انرژی در میان دو رویه آلومینیومی از نگهدارنده های چوبی در ضخامت های ۱۶ و ۳۲ میلی متر استفاده گردید. برای ساخت نمونه، رویه آلومینیومی بین ورق فولادی با سوراخ مستطیلی و به ضخامت ۲۰ میلی متر و قالب چوبی با سوراخ مستطیلی به ضخامت ۱۶ میلی متر قرار گرفت. فضای خالی با لاستیک ضایعاتی پر شد و با بستن رویه آلومینیومی دوم بین طرف دیگر قالب چوبی و ورق فولادی توخالی دوم و سفت کردن پیچ ها، نمونه ساخته شد. شماتیک هندسی نمونه آزمایشی و همچنین نمونه ای از تخته پر شده به همراه ذرات لاستیک ضایعاتی به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده اند.

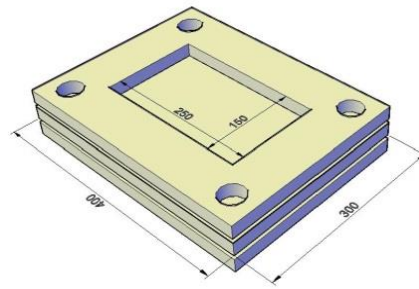
مطابق با شکل ۱، در این سامانه، انرژی پتانسیل وزنه در ارتفاع معین به انرژی جنبشی تبدیل شده و به صورت بار ضربه ای به نمونه تحت آزمایش وارد می شود؛ به عبارت دیگر انرژی جنبشی پرتابه به نیروی دینامیکی تبدیل می شود و به تبع آن تغییر شکل ساختار رخ می دهد. این روش ماهیتی کاملاً مکانیکی دارد و نرخ تغییر شکل در آن در بازه میلی ثانیه است. این سامانه متشکل از یک ضربه زننده فولادی با تنش تسلیم زیاد است. این ضربه زننده فولادی توسط دو ریل با حداقل اصطکاک در اطرافش مهار شده که در راستای کاملاً عمودی سقوط می کند تا فرایند شبیه سقوط آزاد شود. ضربه زننده سامانه مورد استفاده به همراه متعلقاتش جهت سقوط جرمی برابر با $3/5$ کیلوگرم تعبیه شده است و حداکثر می توان آن را تا ارتفاع ۷ متر بالا برد. جهت انجام آزمایش، ضربه زننده با دستگیره مغناطیسی قابل کنترل تا ارتفاع مناسب بالا برده می شود و سپس با کلید رهاسازی طراحی شده سقوط می کند. پس از رهاسازی، ضربه زننده به نمونه که بین ورق فولادی با ضخامت ۲۰ میلی متر و قالب چوبی به ضخامت ۱۶ میلی متر گیردار شده برخورد می کند. ورق های فولادی صلب در جای خود کاملاً گیردار شدند و هیچ تغییر شکلی حین برخورد تجربه نکردند. پس از برخورد اولیه، محققان از یک قطعه پلاستیکی برای دفع نیروهای بعدی و جلوگیری از برخورد مجدد ضربه زننده به نمونه استفاده کردند.



شکل ۱- سامانه سقوط وزنه حاوی نمونه و ضربه زننده

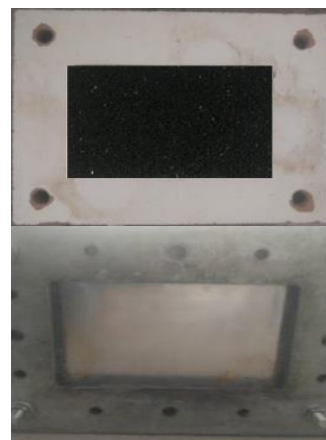
جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم و ذرات لاستیک

ماده	تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش شکست	چگالی (Kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)
آلومینیوم	۱۱۰	۱۲۳	۰/۴	۲۷۰۰	۶۹
ذرات لاستیک	-	-	-	۹۲۰	-



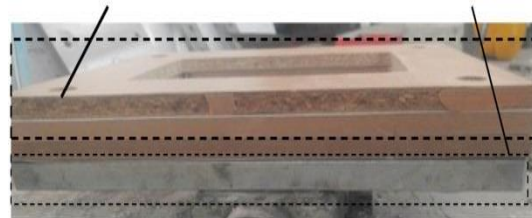
شکل ۲- شماتیک هندسی قطعه آزمایش (ابعاد به میلی-متر است)

با توجه به توضیحات ارائه شده و مطابق با جدول ۲، ۱۰ ساختار ساندویچی شامل ۹ ساختار با هسته ذرات لاستیک ضایعاتی و ۱ ساختار بدون هسته ذرات لاستیک ضایعاتی در سه گروه بندی به منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ساختارهای ساندویچی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت طراحی شدند. گروه اول، تحت ۵ سطح انرژی مختلف و گروه دوم، تحت ۴ سطح انرژی مختلف بارگذاری شدند. در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام گرفته بر میزان اثربخشی استفاده از هسته ذرات لاستیک ضایعاتی بر افزایش مقاومت ساختارهای ساندویچی سبک در برابر بار ضربه‌ای بود.



جدول ۲- سه گروه بندی مختلف آزمایش های تجربی

نوع سازه	چگالی سطحی (kg/m ²)	فاصله ضربه زننده از هدف (m)	تعداد آزمایش
AI-R16-AI	۱۷/۴۸	۱،۲،۳،۴،۶	۵
AI-R32-AI	۲۹/۴۴	۲،۳،۴،۵	۴
AI-A32-AI	۱۰/۸	۶	۱



شکل ۳- تخته توخالی پر شده از ذرات لاستیک ضایعاتی

در جدول ۲، در ستون کد آزمایش، حرف AI بیانگر ورق آلومینیومی، حرف R بیانگر هسته ذرات لاستیک ضایعاتی و عدد بعد از حرف R نشان‌دهنده ضخامت هسته است؛ همچنین حرف A به معنای در نظر گرفتن هوا بین دو ورق آلومینیومی است.

خواص مکانیکی مواد فلزی مورد استفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره بر مبنای استاندارد ASTM-E8 بر نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس آلایز آلومینیوم به دست آمده است [۲۴]. برای بررسی همگنی خواص مواد، باید ورق‌ها در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) با دستگاه وایرکات برش زده شوند و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار گیرند. در جدول ۱، خواص مکانیکی برای هر دو ماده آلومینیوم و لاستیک ارائه شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج تجربی

در بارگذاری دینامیک، نوع فروریزش در اثر اعمال ضربه اهمیت زیادی دارد [۲۵]. در جدول ۳ تمام مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده بر ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت ضربه‌زننده‌ای به جرم ۳/۵ کیلوگرم در سطوح انرژی مختلف ارائه شده است. در این جدول، $W_{0,f}$ بیشترین خیز دائمی رویه جلویی، $W_{0,b}$ بیشترین خیز دائمی رویه عقبی، D_f قطر سوراخ رویه جلویی و D_b قطر سوراخ رویه عقبی است. به دلیل گلبرگی شدن رویه، داده‌های ستاره‌دار معرف بیشترین تغییر شکل دائمی سازه تا نقطه اثر هستند. جدول ۳ بر تاثیر مستقیم تغییر ارتفاع ضربه زننده بر نوع تغییر شکل سازه دلالت دارد. تغییر انرژی جنبشی بر اثر تغییر سرعت، علت این پدیده است [۲۶].

جدول ۳- مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده (نمادهای D_f ، D_b ، $W_{0,b}$ ، $W_{0,f}$ به ترتیب اندازه دندان سوراخ ایجاد شده ورق جلو، عقب، قطر حفره ایجاد شده در ورق جلو و ورق عقب اند)

نوع سازه	ارتفاع سقو ط (m)	$W_{0,f}$ (mm)	$W_{0,b}$ (mm)	D_f (mm)	D_b (mm)
AI-R16-AI-1	۱	۴/۷۹	۰	۴/۷	۰
AI-R16-AI-2	۲	۶/۷۳	۰	۱۰/۵۵	۰
AI-R16-AI-3	۳	*۸/۱۱	۲/۰۲	۱۶/۳۵	۰
AI-R16-AI-4	۴	*۹/۳۶	۳/۹	۲۲/۰۵	۱/۶
AI-R16-AI-5	۶	*۱۱/۲۸	*۴/۶	۳۱/۵	۲۴/۲
AI-R32-AI-6	۲	*۲۷/۲۳	۰	۱۷/۰۲	۰
AI-R32-AI-7	۳	*۳۲/۵۶	۲/۷۱	۲۰/۰۳	۰/۵۵
AI-R32-AI-8	۴/۵	*۳۹/۳۶	۳/۲۸	۲۳/۶۵	۳/۶
AI-R32-AI-9	۵	*۴۱/۶۵	*۲۴/۳	۲۹/۶۵	۲۴/۲

۳-۱- مکانیزم تغییر شکل و الگوی شکست

در این بخش، در ابتدا به بیان مشاهده‌های تجربی در مورد مدهای تغییر شکل ساختارهای ساندویچی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند ضخامت هسته، بودن یا نبودن هسته و سطح انرژی بر بیشترین خیز دائمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای ساندویچی با رویه آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای کم‌سرعت انجام می‌گیرند. در طی ۵ آزمایش برای ضخامت ۱۶ میلی‌متری هسته، ساختارها و سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ، پارگی جزئی و همچنین گلبرگ شدن رخ دادند. این در حالی است که با افزایش انرژی جنبشی به ۱۰۲/۹ ژول، به تدریج رویه عقبی شروع به تغییر شکل پلاستیک کرد؛ همچنین گلبرگی شدن رویه جلویی در چهارمین سطح انرژی؛ یعنی ۱۳۷/۲ ژول، رخ داد. شایان توجه است که این تغییر شکل بسیار جزئی بوده و می‌توان اینگونه در نظر گرفت که ساختار AI-R16-AI توانایی جذب انرژی تا ۱۳۷/۲ ژول را بدون آنکه به رویه عقبی آسیب برسد دارد. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای آزمایشی AI-R16-AI در شکل ۴ نشان داده شده است. پروفیل‌های تغییر شکل نشان داده شده برای سازه در این مجموعه آزمایشی بیانگر آن است که لایه جلویی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی، انرژی قابل توجهی از برخورد ضربه‌زننده به سازه را جذب می‌کنند و این در حالی است که انرژی جنبشی منتقل شده بر سطح لایه عقبی در سطح انرژی آخر یعنی ۲۰۵/۸ ژول باعث گلبرگی شدن رویه عقبی می‌شود. این پدیده به علت تغییر در هندسه تغییر شکل رویه جلویی است؛ همچنین سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشدند.



الف



ب

شکل ۵- سازو کار تغییر شکل پلاستیک رویه جلویی ساختارهای آزمایشی AI-R32-AI-6 (الف) و AI-R32-AI-9 (ب)



الف



ب

شکل ۴- مکانیزم تغییر شکل پلاستیک رویه جلویی ساختارهای آزمایشی AI-R16-AI-1 (الف) و AI-R16-AI-5 (ب)

۳-۲- رابطه بیشترین خیز دائمی با انرژی

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین به تحلیل نتایج تجربی به دست آمده پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام شده در این بخش، جرم ضربه‌زننده برابر با ۳/۵ کیلوگرم لحاظ شده است. در شکل ۶، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی رویه جلویی برای دو ساختار AI-R16-AI و AI-R32-AI برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است. در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ساختارهای مختلف با افزایش انرژی پتانسیل به صورت غیر-خطی افزایش می‌یابند. این پدیده، نشان‌دهنده قابلیت جذب انرژی سازه در انرژی‌های زیاد است. شکل ۶ نشان می‌دهد که در تمامی سطوح انرژی، ساختار AI-R16-AI دارای عملکرد بهتری در برابر بار ضربه‌ای بوده است. این پدیده به علت تنش-های موضعی وارده به ناحیه سوراخ‌شدگی رخ داد. این در صورتی که رویه عقبی در هر دو ساختار در سطح انرژی ۶۸/۶ ژول، تفاوت چندانی با هم ندارند. مقایسه نتایج به دست آمده برای ساختار AI-R16-AI نشان می‌دهد که افزایش انرژی پتانسیل از ۳۴/۳ تا ۲۰۵/۸ ژول منجر به افزایش بیشترین خیز

در طی چهار آزمایش برای ضخامت ۳۲ میلی‌متری هسته، مشابه با حالت قبل، ساختارهای آزمایشی سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ، پارگی جزئی و همچنین گلبرگی شدن را نشان دادند. این به معنی جذب انرژی کمتر در حجم مادی است. این درحالی است که برخلاف حالت قبلی و با افزایش ضخامت هسته، گلبرگی شدن رویه جلویی از سطح انرژی کم‌تری (۶۸/۶ ژول) در مقایسه با هسته ۱۶ میلی‌متری شروع شد. این پدیده به علت افزایش فضای متخلخل بین دو رویه است؛ همچنین افزایش ضخامت هسته ذرات لاستیک ضایعاتی باعث شد که هسته انرژی بیشتری جذب کند و رویه عقبی تنها در سطح انرژی آخر یعنی ۱۷۱/۵ ژول دچار تغییر شکل پلاستیک شد. نمونه‌هایی از پروفیل تغییر شکل ساختارهای آزمایشی AI-R32-AI در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. پروفیل‌های تغییر شکل نشان داده شده، بیانگر آن است که رویه جلویی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی، انرژی قابل توجهی از برخورد ضربه‌زننده با سازه را جذب می‌کنند و رویه عقبی فقط در سطح انرژی آخر یعنی ۱۷۱/۵ ژول دچار تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ (گلبرگی شدن) می‌شود. این پدیده به علت فروریختن ناگهانی هسته لاستیک ضایعاتی بر اثر تنش‌های چندراستایی است.

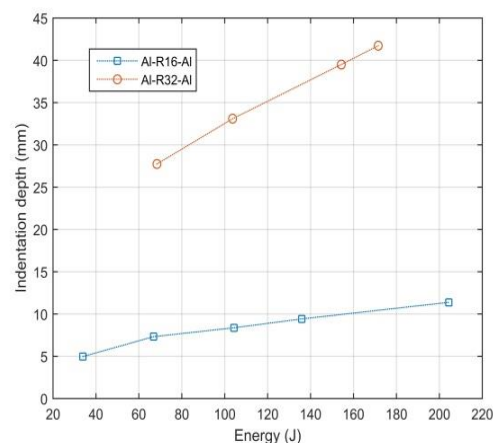
۳-۳- رابطه قطر ناحیه تغییر شکل یافته با انرژی

اکنون پس از بررسی و تشریح رابطه بیشترین خیز دائمی با انرژی پتانسیل در رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین به تحلیل رابطه قطر سوراخ با انرژی پرداخته می‌شود. در شکل ۷، نمودار تغییرات قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی برای دوساختار Al-R16-Al و Al-R32-Al برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است. در حالت کلی، همانطور که انتظار می‌رفت، قطر ناحیه تغییر شکل یافته ساختارهای مختلف با افزایش انرژی پتانسیل به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد به طوری که در ابتدا دارای شیب بسیار صعودی و پس از آن به مقداری ثابت می‌رسد. شکل ۷ نشان می‌دهد که در تمامی سطوح انرژی، در ساختار Al-R16-Al ناحیه کوچکتری دچار تغییر شکل دائمی می‌شود و این بدان علت است که فضای متخلخل میان دو ورق فلزی کم‌تر است. این درحالی است که هر دو ساختار در سطح انرژی ۶۸/۶ ژول، تفاوت چندانی در فرورفتگی رویه‌های عقبی ندارند. مقایسه نتایج بدست آمده برای ساختار Al-R16-Al نشان می‌دهد که افزایش انرژی پتانسیل از ۳۴/۳ تا ۲۰۵/۸ ژول، منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۱۲۴/۴۷، ۲۴۷/۸۷، ۳۶۹/۱۵ و ۵۷۰/۲۱ درصد به ترتیب با افزایش فاصله استقرار ضربه‌زننده به مقدار ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر است؛ همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۱۲۴/۴۷، ۵۴/۹۸، ۳۴/۸۶ و ۴۲/۸۶ درصد در مرحله قبل می‌شود.

مقایسه نتایج بدست آمده برای ساختار Al-R32-Al نشان می‌دهد که افزایش تصاعدی انرژی پتانسیل از ۶۸/۶ تا ۱۷۱/۵ ژول منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۱۹/۵۷، ۴۴/۵۵ و ۵۲/۹۶ درصد با افزایش فاصله استقرار ضربه‌زننده به مقدار ۱، ۲/۵ و ۳ متر از حالت اولیه است؛ همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۱۹/۵۷، ۲۰/۸۸ و ۵/۸۲ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود. مقایسه نتایج

دائمی رویه جلویی به میزان ۴۱/۳۹، ۷۰/۳۸، ۹۶/۶۴ و ۱۳۶/۹۷ درصد به ترتیب با افزایش فاصله استقرار ضربه‌زننده به مقدار ۱، ۲، ۳ و ۴ متر است؛ همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی در رویه جلویی به میزان ۴۱/۳۹، ۲۰/۵، ۱۵/۴۱ و ۲۰/۵ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود.

مقایسه نتایج به دست آمده برای ساختار Al-R32-Al نشان‌دهنده‌ی افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۱۹/۵۷، ۴۴/۵۵، ۵۲/۹۶ درصد به ترتیب با افزایش فاصله استقرار به مقدار ۱، ۲/۵ و ۳ متر است؛ همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۱۹/۵۷، ۲۰/۸۸، ۵/۸۲ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود. مقایسه نتایج برای دو ساختار نشان می‌دهد که روند افزایش در ساختار ساندویچی با هسته به ضخامت ۳۲ میلی‌متر صعودی‌تر بوده و این به علت افزایش حجم فضای متخلخل ایجادشده بین دو ورق آلومینیومی است؛ لذا باید سعی کرد تا بهینه‌ترین فاصله بین دو ورق را برای پر کردن ذرات لاستیک ضایعاتی به دست آورد. علاوه بر آن، مقایسه‌ی نتایج برای دو حالت با و بدون هسته نشان می‌دهد که استفاده از هسته لاستیکی منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی رویه عقبی به میزان قابل توجهی می‌شود که مانعی برای نفوذ کامل ضربه‌زننده در هسته و رویه عقبی است.



شکل ۶- تاثیر ساختار ساندویچ بر خیز دائمی دندان سوراخ در انرژی‌های مختلف

(مد اول تغییر شکل)، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه زنده و همچنین گلبرگ شدن نشان داده شدند. با افزایش انرژی جنبشی به ۱۰۲/۹ ژول به تدریج رویه عقبی شروع به تغییر شکل پلاستیک کرد؛ همچنین گلبرگی شدن رویه جلویی در همین سطح انرژی یعنی ۱۰۲/۹ ژول رخ داد. همین طور در سطح انرژی ۱۳۷/۲ ژول، رویه جلویی گلبرگی شد اما رویه عقبی آسیب چندانی ندید. با افزایش سطح انرژی توسط افزایش ارتفاع سقوط ضربه‌زنده از ۱ به ۲، ۳ و ۴ متر، عمق دندان سوراخ ایجاد شده در ورق جلویی به ترتیب ۶۹ و ۹۶ درصد افزایش یافت؛ همچنین با این افزایش سطح انرژی ضربه‌زنده، قطر سوراخ ایجاد شده در ورق جلویی به ترتیب تقریباً دو، سه و پنج برابر شد.

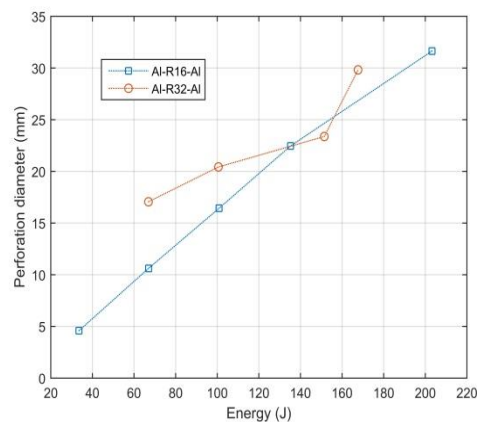
۲- در طی ۴ آزمایش برای ضخامت ۳۲ میلی‌متری هسته، تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه‌زنده و همچنین گلبرگی شدن مشاهده شد. با افزایش ضخامت هسته، گلبرگی شدن رویه جلویی از سطح انرژی پایین‌تری (۶۸/۶ ژول) شروع شد. در سطح انرژی ۱۵۴/۶ ژول هم رویه جلویی گلبرگی شد، اما به رویه عقبی آسیب چندانی وارد نشد. با افزایش سطح انرژی توسط افزایش ارتفاع سقوط از ۲ به ۳ و ۴/۵ متر عمق دندان سوراخ ایجاد شده در ورق جلویی به ترتیب ۱۹ و ۳۰ درصد افزایش یافت؛ همچنین با این افزایش سطح انرژی، قطر سوراخ ایجاد شده در ورق جلویی ۱۷ و ۳۵ درصد افزایش یافت.

۳- در قیاس با ساختار ساندویچی بدون هسته، استفاده از هسته ذرات لاستیک ضایعاتی نمی‌تواند مانع تغییر شکل پلاستیک رویه عقبی شود به طوری که در ساختار با ضخامت هسته ۳۲ میلی‌متر در مقایسه با ساختار بدون هسته، قطر سوراخ ایجاد شده در ورق جلویی ۱۹ درصد بیشتر بود. یعنی در سطح انرژی بالا، وجود ذرات لاستیک ضایعاتی به عنوان جاذب انرژی نقشی در جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک ندارد. همچنین در ساختار Al-R16-Al، اندازه دندان ایجاد شده در ورق پشتی، ۴۸ درصد کمتر بود که به علت فضای متخلخل کم‌تر میان دو رویه بود.

مراجع

- [1] Deng Y, Zhang Y, Xiao X, Hu A, Wu H, Xiong J (2020) Experimental and numerical study on the ballistic impact behavior of 6061-T651 aluminum

برای دو ساختار نشان می‌دهد که روند افزایشی در ساختار ساندویچی با هسته به ضخامت ۱۶ میلی‌متر صعودی تر بوده؛ یعنی ساختار Al-R16-Al در سطوح انرژی پایین مقاومت بیشتری در برابر بار ضربه‌ای دارد و با بالا رفتن سطح انرژی (از سطح انرژی ۱۰۲/۹ ژول) شروع به گلبرگی شدن در رویه جلویی می‌کند. تغییرات قطر نسبت به انرژی نمونه با ضخامت هسته ۳۲ میلی‌متر، دارای نظم کمتری است که به علت تاثیرگذاری ضخامت هسته بر تغییر شکل رویه جلو است. این نقش با ضخامت کمتر هسته کم‌رنگ می‌شود.



شکل ۷- تأثیر سازه با ضخامت هسته متفاوت بر تغییرات قطر سوراخ ایجاد شده در رویه جلویی

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته ذرات لاستیک ضایعاتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین با سامانه سقوط وزنه انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها، ۱۰ ساختار ساندویچی شامل ۹ ساختار با هسته ذرات لاستیک ضایعاتی و یک ساختار بدون هسته با رویه‌های آلومینیومی در سه گروه‌بندی طراحی شدند. گروه اول، تحت ۵ سطح انرژی ۳/۳، ۶/۶، ۹/۹، ۱۳۷/۲ و ۲۰۵/۸ ژول و گروه دوم تحت ۴ سطح انرژی ۶/۶، ۹/۹، ۱۵۴/۳ و ۱۷۱/۵ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج زیر از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش هستند:

۱- در جریان ۵ آزمایش برای ضخامت ۱۶ میلی‌متری، ساختارها و سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ

- honeycomb energy absorber used in lunar lander. *Int. J. Crashworthiness*, 16(4):411-419.
- [16] Ahmadi H, Liaghat G, Sabouri H, Bidkhour E (2013) Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates. *J. Compos. Mater*, 47(13):1605-1615.
- [17] Hassanpour Roubeneh F, Liaghat G, Sabouri H, Hadavinia H (2019) Experimental investigation of impact loading on honeycomb sandwich panels filled with foam. *Int. J. Crashworthiness*, 24(2):199-210.
- [18] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H, Kamalvand M (2020) Studies on the effect of reinforcers types on flat and curved steel sheets' performance under drop impact. *AEROSPACE MECHANICS JOURNAL*, 16(4):39-59.
- [19] Bashiri A, Hosseini M, Hatami H (2019) Experimental and Numerical Analysis of Single and Double layered Aluminum Sheet 3105 With Mechanical Joints under Drop Weight Impact. *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 30(2):109-123.
- [20] Hatami H, Dalvand A, Chegeni AS (2020) Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 42(6):1-23.
- [۲۱] دالوند ا، حاتمی ح، صیدی چگنی آ (۱۴۰۰) بررسی آزمایشگاهی تاثیر بارگذاری دینامیکی بر پنل های مسلح مستطیلی ساخته شده با کامپوزیت سیمانی خود تراکم الیافی و ورق های مشبک. مهندسی سازه و ساخت، دوره ۱، شماره ۸، صفحه ۱۳۱-۱۵۱.
- [22] Damghani Noori M, Hatami H, Ghodsbin Jahromi A (2015) Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorbers under Axial Impact Loading. *Modares Mechanical Engineering*, 15(1):371-378.
- [23] Hatami H, Fathollahi AB (2018) Theoretical and Numerical Study and Comparison of the Inertia Effects on the Collapse Behavior of Expanded metal tube Absorber with Single and Double Cell under Impact Loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(5):999-1014.
- [24] Ma'at N, Nor MKM, Ho CS, Latif NA, Kamarudin K-A, Jamian S, Ibrahim MN, Awang MK (2019) Effects of Temperatures and Strain Rate on the Mechanical Behaviour of Commercial Aluminium Alloy AA6061. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 54(1):21-26.
- [۲۵] موسوی زاده ا، حسینی م، حاتمی ح (۱۴۰۰) بررسی تجربی و عددی عملکرد ورق های فولادی ساده و تقویت شده با لچکی alloy thick plates against blunt-nosed projectiles. *Int. J. Impact Eng.*, 144:103659.
- [2] Rahimijonoush A, Bayat M (2020) Experimental and numerical studies on the ballistic impact response of titanium sandwich panels with different facesheets thickness ratios. *Thin-Walled Struct.*, 157:107079.
- [3] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H (2020) Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin-Walled Struct.*, 155:106851.
- [4] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part L: J. Mater.: Des. Appl.*, 233(7):1449-1471.
- [5] Safri S, Sultan M, Yidris N, Mustapha F (2014) Low velocity and high velocity impact test on composite materials—a review. *Int J Eng Sci*, 3(9):50-60.
- [6] Goldsmith W, Sackman JL (1992) An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates. *Int. J. Impact Eng.*, 12(2):241-262.
- [7] Olsson R, McManus HL (1996) Improved theory for contact indentation of sandwich panels. *AIAA J.*, 34(6):1238-1244.
- [8] Mines R, Worrall C, Gibson A (1998) Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. *Int. J. Impact Eng*, 21(10):855-879.
- [9] Alghamdi A (2001) Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-Walled Struct.*, 39(2):189-213.
- [10] Kádár C, Maire E, Borbély A, Peix G, Lendvai J, Rajkovits Z (2004) X-ray tomography and finite element simulation of the indentation behavior of metal foams. *Mater. Sci. Eng., A*, 387:321-325.
- [11] Cao J, Grenestedt JL (2004) Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A*, 35(9):1091-1105.
- [12] Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, Zou Z, Li S (2005) Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II—'shock' theory and comparison with experimental data and numerical models. *J. Mech. Phys. Solids*, 53(10):2206-2230.
- [13] Nia AA, Razavi S, Majzoobi G (2008) Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—experimental study. *Mater. Sci. Eng., A*, 488(1-2):273-280.
- [14] Bhuiyan MA, Hosur M, Jeelani S (2009) Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial (± 45) braided face sheets. *Composites Part B*, 40(6):561-571.
- [15] Li M, Deng Z, Liu R, Guo H (2011) Crashworthiness design optimisation of metal

[26] Hatami H, Hosseini M (2019) Elastic-plastic analysis of bending moment–axial force interaction in metallic beam of T-Section. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(1):162-173.

تحت ضربه سقوط آزاد، مهندسی مکانیک ایران، دوره ۲۳، شماره ۱، صفحه ۶۴-۸۴.