مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۱۴/ شماره ۳/ صفحه ۹۵-۱۰۶

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/jsfm.2024.13942.3817

بررسی تجربی رفتار مکانیکی هسته مرکب از فوم پلی‌یورتان و پوکه معدنی اسکوریا برای استفاده در ورق‌های ساندویچی جاذب انرژی انفجاری

محمود کفاش میرزا رحیمی[۱،*]، حسین خدارحمی[۲]، مجتبی قمری زاده[۳]، مجتبی ضیاء شمامی[۳]، روح الله حسینی[۳]

[۱] پژوهشگر، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۲] استاد، دانشگاه امام حسین(ع) تهران، ایران

[۳] استادیار، دانشگاه امام حسین(ع) تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

چکیده

در این مقاله جاذب انرژی انفجار جدیدی معرفی و به صورت تجربی مطالعه شده است. برای بررسی و مطالعه رفتار مکانیکی آن ۳ نوع آزمایش متفاوت انجام شده است. هدف از انجام اولین سری از آزمایشات تجربی، انتخاب ماتریس مورد استفاده است. ماتریس هسته از ۳ ماده آلومینیومی، رزین و فوم پلی‌یورتان انتخاب شده است. معیار انتخاب استحکام و بازده جذب انرژی است. هسته انتخاب‌شده ترکیبی از فوم پلی‌یورتان و پوکه معدنی اسکوریا با دو نوع دانه‌بندی متفاوت است. در دومین سری از آزمایشات، خواص مکانیکی هسته شامل نمودار تنش-کرنش و بازده جذب انرژی توسط آزمایش فشار تعیین شده است. در سومین سری از مجموعه آزمایشات رفتار مکانیکی ورق و خیز بیشینه صفحه پشتی آن تحت انفجار ارزیابی شده است. تغییرشکل ماکزیمم در نمونه‌هایی که در ترکیب هسته آنها از پوکه معدنی نخودی استفاده شده است، نسبت به نمونه‌هایی که از پوکه معدنی بادامی ساخته شده است، ۲۸/۵ درصد کمتراست. در این مقاله ترکیب هسته جدید برای ورق ساندویچی مطالعه و معرفی شده است که با توجه به سبکی، استحکام مناسب، هزینه کم، تولید آسان توام با بازده خوب جذب انرژی مورد پذیرش قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: تست تجربی؛ جذب انرژی؛ ورق ساندویچی؛ فوم پلی یورتان؛ پوکه معدنی اسکوریا.

Experimental investigation of the mechanical behavior of the core composed of polyurethane foam and scoria mineral pumice for use in explosive energy absorbent sandwich panels

M. Kaffash Mirzarahimi[1,*], H. Khodarahmi2, M. Ghamarizadeh[3], M. ZiaShamami[3], R. Hosseini[3]

[1] Researcher, IHU Univ., Tehran, Iran

[2] Prof., IHU Univ., Tehran, Iran

[3] Assist. Prof., IHU Univ., Tehran, Iran

Abstract

In this article, a new explosion energy absorber has been introduced and studied experimentally. To investigate and study its mechanical behavior, 3 different types of tests have been performed. The purpose of conducting the first series of experimental tests is to select the matrix to be used. The core matrix is selected from 3 materials: aluminum, resin and polyurethane foam. The selection criterion is strength and energy absorption efficiency. The selected core is a combination of polyurethane foam and scoria mineral pumice with two different types of granulation. In the second series of tests, the mechanical properties of the core including the stress-strain diagram and energy absorption efficiency were determined by the pressure test. In the third series of tests, the mechanical behavior of the plate and the maximum deflection of its back sheet under explosion have been evaluated. The maximum deformation in the samples whose core is made of pea mineral pumice is 28.5% less than the samples made of almond mineral pumice. In this article, a new core composition for sandwich sheet has been studied and introduced, which is accepted due to its lightness, proper strength, low cost, easy production and good efficiency of energy absorption.

Keywords: Experimental test; absorbing energy; sandwich panel; polyurethane foam; Scoria mineral pumice.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۴۱۵۷۴۳۵۴ فکس: ۰۲۱۴۴۹۰۸۹۰۶

آدرس پست الکترونیک: m.kaffash.r@gmail.com

۱- مقدمه

روش‌ها و سازه‌های متنوعی برای جذب انرژی مانند انرژی ناشی از انفجار وجود دارد. فوم آلومینیوم ماده پیشرفته‌ای است که کاربردهای فراوانی در جذب انرژی بارهای ضربه و انفجار دارد، ولی هزینه تهیه و ساخت آن بالا است و فناوری پیچیده ای برای ساخت آن لازم است. ماده‌ای که خصوصیاتی مشابه فوم آلومینیوم در جذب انرژی داشته باشد و در عین حال ارزان‌تر باشد و بتوان از آن برای ساخت سازه‌های محافظ- در برابر موج انفجار استفاده گردد، از ارزش بالایی برخوردار است. استفاده از پوکه‌های معدنی به‌عنوان جاذب انفجار به دلیل چگالی پایین، قیمت پایین و جذب انرژی بالا جایگزین خوبی برای فوم‌های آلومینیمی است. در این نوع جاذب‌ها، به دلیل دانه‌ای بودن مواد تشکیل‌دهنده، نیاز به پرکننده‌ای وجود دارد که پوکه‌های معدنی را کنار هم نگه‌داشته و ساختاری منظم-تری ایجاد کند. این پرکننده‌ها همانند رزین در ساخت موارد مرکب عمل می‌کنند. مواد واسط نگهدارنده پوکه‌ها و فرم دهنده هسته هستند و از موادی مانند آلومینیم، رزین، چسب و... تامین می‌شوند.

کار تجربی انجام شده در این پژوهش شامل ۳ بخش متمایز است که به ترتیب انجام شامل موارد زیر هستند.

۱) تعیین بهترین ماده واسط از بین مواد مختلف جهت استفاده در ساخت هسته جاذب انرژی.

۲) بررسی خواص مکانیکی ۲ نوع هسته ساخته شده از پوکه‌های معدنی و ماده واسط منتخب.

۳) بررسی جذب انرژی و رفتار ساندویچ پنل ساخته شده تحت انفجار آزاد.

در این پژوهش ماده هسته جدید مرکب از پوکه‌های معدنی اسکوریا و فوم پلی‌یورتان برای استفاده به عنوان جاذب انرژی در ساخت ساندویچ پنل ها معرفی شده‌است.

هنسن و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۲ بانصب ورق‌های فوم آلومینیوم روی یک آونگ بالستیک و انفجار خرج انفجاری در فاصله‌ی از پیش تعیین شده، حداکثر زاویه‌ی انحراف آن را اندازه گرفته و با صرف‌نظر از نیروهای ناپایستار و استفاده از اصل بقای انرژی مکانیکی، انرژی و ایمپالس منتقل شده به آونگ را اندازه‌گیری نموده‌اند.

رادرفورد و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۶، پاسخ دینامیکی ورق‌های مرکب از دوصفحه فولاد ضدزنگ AISI 304 و لایه میانی فوم آلومینیوم و تکیه‌گاه‌های کاملاً گیردار به برخورد مرکزی پرتاب‌هایی به‌طول ۵۰mm و قطر ۲۸ mm از فوم آلومینیومی که با سرعت‌های ۱۶۰-۵۷۰m/s ازدهانه تفنگ گازی پرتاب شده‌اند را بررسی نموده‌اند. افزایش چشم‌گیر بازده ورق در سرعت‌های برخورد بالا نسبت به ورق‌های تک‌لایه با وزن یکسان و نیز نسبت مستقیم مقاومت سازه با ضخامت لایه فوم از مهم‌ترین نتایج گزارش شده توسط این محققین به شمار می‌رود [۲۲].

شن و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰ به روش تجربی رفتار دینامیکی و مقاومت در برابر انفجار ورق‌های ساندویچی انحنادار با رویه‌های آلومینیمی و هسته فوم آلومینیمی با دو شعاع انحناء متفاوت برای ۳ انفجار با شدت‌های مختلف را موردبررسی قراردادند. آن‌ها تغییرمکان را برحسب شدت انفجار(ایمپالس)، ضخامت هسته، ضخامت رویه‌های ورق‌های ساندویچی و نسبت ضخامت رویه‌های ورق ساندویچی به دست آوردند. همچنین اثر انحناء را بر میزان مقاومت در برابر انفجار مورد تحلیل قراردادند.

شن و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱ مقاومت در برابر انفجار ورق‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی و هسته فوم فلزی که دارای یک انحنا هستند را به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. بررسی مقاومت در برابر انفجار نمونه-هایی با دو انحناء متفاوت، ۶ چیدمان مختلف لایه‌های هسته توسط ایشان انجام‌شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها شعاع انحنا کوچک‌تر عملکرد بهتری برای مقاومت در برابر شوک انفجار دارد. همچنین نمونه با شعاع انحنا بزرگ‌تر جذب انرژی بهتری به خاطر تغییر شکل کلی ناشی از کشش و خمش دارد.

هانگای و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر تخلخل و حفره‌های ساختاری در خواص فشرده سازی فوم آلومینیوم پرداخته‌اند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد، افزایش تخلخل باعث کاهش تنش و جذب انرژی شده است، اما در صورتی که جرم فوم نیز مورد توجه قرار گیرد فوم‌هایی با تخلخل بالاتر، جذب انرژی بالاتری را در واحد جرم نشان دادند.

شیم و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۲ به بررسی استهلاک موج شوک در سازه‌های محافظت‌شده با فوم آلومینیوم پرداخته‌اند. آن‌ها برای این منظور از آزمایش تجربی و شبیه سازی عددی با نرم‌افزار ال اس داینا استفاده کرده‌اند. طبق تحقیقات آنها ضخامت، چگالی و خصوصیات صفحات رویه‌ی

ورق مهمترین پارامتر برای تخمین رفتار سازه‌ی ساندویچی است.

گول و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۵ برخورد موج شوک با یک فوم آلومینیوم بسته را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش به منظور آزمایش تجربی از لوله شوک استفاده شده است. اثر ضخامت نمونه بر کاهش موج و استفاده از نمونه به‌صورت ورق ساندویچی مورد مطالعه قرارگرفته است. در این مطالعه ثابت شد که چگالی فوم، ضخامت نمونه و همچنین قرار دادن صفحات پوشش از همان جنس در جلو و پشت فوم دارای اثر قابل توجهی بر فشار شوک منعکس شده است.

روتاریو و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۶ به بررسی اندازه‌گیری میرایی پالس در محیط‌های مواد دانه‌ای متخلخل به روش آزمایش تجربی پرداختند. از نمونه کارهای آن‌ها استفاده از یک ورق مربعی فولادی پشت نمونه‌ی دانه‌ای بود که با اندازه‌گیری تغییر زاویه‌ی دائمی ورق، میزان استهلاک موج را تخمین می‌زند.

خندابی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و رویه‌ها در ورق‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌یورتان و رویه‌های آلومینیمی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت فوم و ضخامت رویه پشتی، جابجایی رویه پشتی کاهش یافته و میزان جذب انرژی آن افزایش می‌یابد.

لان و همکاران[۱۰] در سال ۲۰۱۹ پاسخ دینامیکی ورق-های ساندویچی استوانه‌ای با هسته فوم آلومینیمی، لانه‌زنبوری ۶ وجهی تحت بار انفجاری به روش عددی را موردمطالعه قراردادند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. در این تحلیل قابلیت استحکام در برابر انفجار پوسته‌های با هسته لانه‌زنبوری بهتر از پوسته‌های هسته فوم آلومینیومی گزارش شده است.

خندابی و همکاران[۱۱] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی متغیر و رویه آلومینیمی در ورق‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت فوم و ضخامت رویه پشتی، جابجایی رویه پشتی کاهش یافته و میزان جذب انرژی آن افزایش می‌یابد.

گانگیون سان و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه روی ورق ساندویچی با هسته فوم فلزی با صفحه پشتی و جلویی از جنس‌های آلیاژ آلومینیومی، فولادی و فیبر کربنی در مقابل انفجار پرداخته‌اند و به بررسی تغییرشکل و مودهای شکست، تأثیر جنس صفحه پشتی و جلویی وگرادیان چگالی هسته روی تغییر شکل صفحه پشتی پرداخته شده است.

ژو و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۲۰ به بررسی انفجار زیر آب ورق ساندویچی با پوسته فلزی و هسته فوم PVC پرداخته-اند. آن‌ها نشان دادند، ورق با صفحه جلویی نازک و صفحه پشتی ضخیم کارایی بهتری دارد و بهترین گرادیان برای هسته کاهش تدریجی چگالی است.

پارتمو و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۲۰ عملکرد یک سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم در برابر انفجار آزاد ۸ کیلوگرم تی ان تی را با شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی بررسی کردند، آن‌ها از هر دو روش هیدرو دینامیک ذرات و روش افزایش بار انفجار استفاده کردند. بررسی آن‌ها نشان می-دهد، در قسمت وسط ورق با ایجاد یک حفره و فرو ریختن فوم آلومینیوم ایجاد شده‌است.

ساندهو و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۲۰ استهلاک انرژی انفجار در فوم در حالت استفاده از شوک تیوب و انفجار آزاد را مقایسه کرده‌اند. شوک تیوب بیشتر برای مقایسه استهلاک موج شوک در مواد مختلف مناسب است. برای بررسی مقدار واقعی ضربه منتقل شده و رفتار ماده، روش انفجار آزاد مناسب است.

سرخوش و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۳ به روش عددی به مطالعه ساندویچ پانل‌های استوانه‌ای با هسته فوم آلومینیومی و رویه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری توسط نرم افزار Abaqus پرداختند. ایشان ۷ نمونه مختلف با تراکم هسته مختلف را مورد مطالعه قرار دادند که جرم و ضخامت کل ورق ثابت باقی مانده بود. نتایج ایشان نشان داد که هسته فوم چند لایه تاثیر بسزایی بر میزان جذب انرژی و جابجایی پانل دارد و جابجایی آن با هسته چند لایه بهینه شده در مقایسه با نمونه با جرم و ضخامت هسته برابر به میزان ۵۹/۸ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین کاهش چگالی هسته در امتداد ضخامت می‌تواند مقاومت انفجاری بالاتری در ورق ایجاد کند.

رحمانی و همکاران [۱۷] در سال۲۰۲۰ به روش عددی به مطالعه نمونه‌هایی با ریخته گری آلومینیوم روی پوکه معدنی متخلخل ساختند و با استفاده از تست فشار خواص مواد را استخراج نمودند. آنها سپس با استفاده از شبیه‌سازی عددی با استفاده از برنامه ANSYS AUTODYN و آزمایش لوله

شوک، توانایی این نمونه‌ها را در کاهش موج ضربه بررسی نمودند.

با مرور مطالعات پیشین محققان این حوزه، این نتیجه حاصل شده‌است که بررسی پاسخ سازه ساندویچی با هسته متخلخل با پوکه‌های معدنی تحت بار انفجارآزاد کمتر موردبررسی واقع شده‌است و تحقیقات قبلی عموماً برای ورق با هسته فومی و هسته‌های مرکب از فوم آلومینیمی و پوکه معدنی بوده است و ترکیب این هسته مرکب از فوم پلی یورتان و پوکه معدنی به عنوان یک هسته مرکب بررسی نگردیده است. در ترکیب جدید ضمن دستیابی به هسته با جذب انرژی بالا که توانایی رقابت با هسته‌های فوم فلزی را دارا است، هزینه تولید ورق نیز کاهش می‌یابد. لذا با توجه به هزینه بسیار زیاد استفاده از جاذب‌های انرژی ساندویچی که در ساختار آنها از لانه‌زنبوری‌های فلزی یا فوم آلومینیمی به عنوان هسته استفاده می‌شود، ترکیب جدیدی در این مقاله معرفی شده است که دارای ساختاری ساده، سبک و مشخصه خوب جذب انرژی است و هزینه های بسیار زیاد سایر جاذب‌های ساندویچی انرژی انفجار مانند جاذب انرژی یا هسته فوم آلومینیمی را ندارد.

در این پژوهش برای اولین بار ماده هسته جدیدی مرکب از پوکه های معدنی اسکوریا و فوم پلی‌یورتان برای استفاده به عنوان جاذب انرژی در ساخت ورق‌های ساندویچی معرفی شده است.

۲- تعریف مسئله

معرفی ساختار جدیدی از ورق‌های ساندویچی با هسته مرکب از یک ماده واسط به عنوان ماتریس و پوکه‌های معدنی اسوکریا هدف از مسئله تعریف شده در این تحقیق به روش تجربی است. کار تجربی انجام شده در این پژوهش شامل ۳ بخش متمایز است که به ترتیب انجام شامل موارد زیر هستند.

۱) ساخت نمونه‌های مختلف تجربی جهت تعیین و انتخاب بهترین ماده واسط از بین مواد مختلف شامل فوم پلی یورتان، فوم آلومینیمی و رزین جهت استفاده در ساخت هسته جاذب انرژی.

۲) ساخت نمونه تست فشار برای بررسی خواص مکانیکی ۲ نوع هسته ساخته شده از پوکه‌های معدنی و ماده واسط منتخب.

۳) ساخت نمونه‌های ورق‌های ساندویچی برای بررسی عملکرد ورق از نظر جذب انرژی و رفتار ساندویچ پنل ساخته شده تحت انفجار آزاد.

در ادامه این مقاله مطالعات و آزمایش‌های تجربی به ترتیب ذکر شده ارائه می‌شود و ورق ساندویچی با ساختار جدید معرفی می‌گردد.

۲-مطالعه تجربی

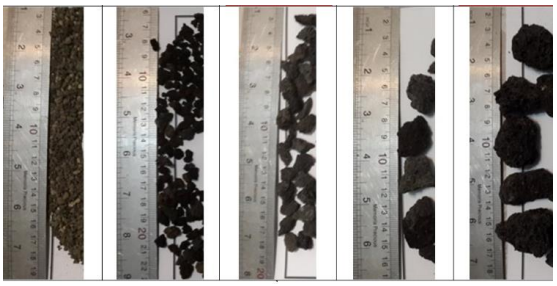
بخش تجربی این تحقیق شامل ۳ قسمت اصلی: ۱) تست‌های اولیه برای بدست آوردن ماده واسط مناسب برای هسته ۲) آزمایش‌های فشار شبه‌استاتیک برای بدست آوردن نمودار تنش-کرنش و خواص مکانیکی هسته ۳) بارگذاری انفجاری روی ورق اصلی است. قبل از پرداختن به آزمایش‌های تجربی موارد اولیه و اصلی تشکیل‌دهنده هسته شامل پوکه معدنی مورد استفاده و ماده واسط هسته معرفی می‌شوند.

۲-۱-پوکه معدنی مورد استفاده

در ایران دو جنس از پوکه معدنی به‌صورت رایج وجود دارد که بیشترین استفاده را در صنعت ساختمان دارد: ۱- اسکوریا ۲- پومیس. علاوه بر نوع پوکه معدنی، آن را بر اساس اندازه نیز دسته‌بندی می‌کنند. دسته‌بندی رایج پوکه‌ها در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در این پژوهش از دو اندازه پوکه معدنی بادامی (حداکثر ابعاد ۳ سانتی‌متر) و نخودی (حداکثر ابعاد ۱ سانتی‌متر) از نوع اسکوریا استفاده شده است.

۲-۲-انتخاب ماده واسط مناسب

برای انتخاب ماده واسط مناسب، چندین ماده واسط از جمله آلومینیوم، رزین و فوم پلی‌یورتان استفاده شده‌است. به‌طوریکه هسته‌های مختلف از ترکیب پوکه معدنی با این مواد ساخته شده و بارگذاری انفجاری روی این ورق‌ها در لوله شاک انجام گرفته است. برای ساخت نمونه‌های فومی از فوم پلی یورتان سلول بسته با چگالی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است.



شکل ۱- دانه‌بندی مختلف پوکه‌های اسکوریا

نمونه‌ها پس از ساخت برای تعیین چگالی وزن می‌شوند. صفحه پشتی نمونه برای اندازه‌گیری‌های بعد از آزمایش به صورت دایره‌ای مش بندی می‌شود. صفحات دو طرف هسته با استفاده از چسب به هسته متصل می‌شوند. برای چسباندن صفحات از لایه نازکی از چسب آرالدیت ۲۰۱۱ استفاده شده است. سه نوع هسته‌ی اصلی شامل: هسته با پرکننده رزینی، فومی و آلومینیومی مورداستفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۲) به ترتیب از راست به چپ ورق‌های ساخته شده با هسته‌های دارای ماده واسط رزین، آلومینیم و فوم پلی یورتان مشاهده می‌شود.

شکل ۲-ورق‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف

لوله شوک مورد استفاده دارای شعاع داخلی ۷۷ میلیمتر و طول ۷۲۰ میلیمتر است. به منظور ایجاد شرایط تکیه‌گاه گیردار، صفحه پشتی ورق‌ها با تعداد ۱۲ عدد پیچ به دهانه لوله شوک بسته می‌شود که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، خرج انفجاری در قسمت انتهایی لوله شوک و داخل یک نگهدارنده تفلونی قرار می‌گیرد و چاشنی انفجاری نیز در انتهای نگهدارنده قرار می‌گیرد. شکل (۴) نحوه اتصال ورق‌ها به لوله‌ی شوک و نحوه قرارگیری ماده منفجره در انتهای آن را نشان می‌دهد.

شکل ۳-لوله شوک مینیاتوری مورداستفاده

شکل ۴- اتصال ورق ها به لوله شوک جهت آزمایش

ماده منفجره مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی انفجار، از نوع C۴ است. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی شماره ۸ (شماره چاشنی، نشان‌دهنده قطر چاشنی است) استفاده شده است. این چاشنی دارای طول ۴۰ میلیمتر است. بعد از انجام آزمایش‌ها هسته با ماده واسط فوم پلی‌یورتان به دلیل جذب انرژی بهتر و عملکرد مطلوب استحکامی انتخاب شده‌است.

۲-۳-تعیین خواص مکانیکی هسته

به‌منظور انجام شبیه‌سازی عددی، نیاز به معرفی خصوصیات مواد است. برای دستیابی به خواص هسته ساخته شده از ترکیب پوکه و فوم، روی نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد ISO/DIS 13314 تست فشار انجام شده است، با استفاده از تست فشار نمودار تنش-کرنش و برخی خواص مکانیکی موردنیاز به دست می‌آید. طول نمونه‌های تست فشار ۸۰ و قطر آنها ۵۲ میلیمتر است. نمونه‌ها با دو سایز پوکه بادامی (با حداکثر ابعاد

۳ سانتیمتر) و نخودی (با حداکثر ابعاد ۱ سانتیمتر) ساخته شده‌اند. نمونه‌های با پوکه‌ی نخودی دارای چگالی حدود ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نمونه‌های با پوکه بادامی دارای چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. نمونه‌های تست فشار ساخته شده‌ی فومی و آلومینیومی در ۰(۵) مشاهده می‌شود.

(الف)

(ب)

شکل ۵- نمونه‌های (الف) فومی و (ب)آلومینیومی جهت تست فشار

برای انجام تست فشار از دستگاه STM-۱۵۰ در دانشگاه جامع امام حسین(ع) مطابق شکل (۶) استفاده شده‌است و سرعت بارگذاری mm/min ۴ است.

شکل ۶-دستگاه تست کشش و فشار

۲-۴-بارگذاری انفجاری بر روی نمونه‌های نهایی

آزمایش‌ها به صورت انفجار آزاد صورت می‌گیرد، ورق‌های ساندویچی به شکل مربعی و با طول و عرض ۳۰ سانتیمتر ساخته شده‌اند. رویه‌های ورق از جنس آلومینیوم و فولاد هستند که ورق آلومینیوم مورداستفاده برای رویه‌های ورق ساندویچی از سری ۱۱۰۰ و فولاد از سری ۳۷ می‌باشند. آماده سازی آزمایش و شرایط مرزی نمونه در شکل (۷) مشاهده می‌شود. با توجه به اندازه و دانه‌بندی متفاوت پوکه‌های معدنی چگالی هسته‌های به دست آمده متفاوت می‌شود. از دو اندازه دانه‌بندی مختلف بادامی (با حداکثر ابعاد ۳ سانتیمتر) و نخودی (با حداکثر ابعاد ۱ سانتیمتر) استفاده شده‌است. مقدار پوکه در هسته با پوکه نخودی نسبت به هسته با پوکه بادامی ۲۰ درصد بیشتر است. هسته‌ها با افزودن فوم پلی‌یورتان مایع با چگالی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب روی پوکه‌های پر شده در قالب، ساخته می‌شود و پس از فوم‌ریزی، قالب داخل گیره محکم بسته می‌شود تا از خروج فوم به دلیل انبساط آن جلوگیری شود. شرایط مرزی و تکیه‌گاه نمونه به صورت گیردار است. برای ایجاد شرایط گیردار، ورق ساندویچی با ۱۶ عدد پیچ مطابق شکل به تکیه‌گاه وصل می‌شود. مقداری از حاشیه ورق ساندویچی در زیر گیره قرار می‌گیرد و صفحه‌ای به ابعاد ۲۵ در ۲۵ سانتیمتر از ورق در معرض موج انفجار قرار می‌گیرد.

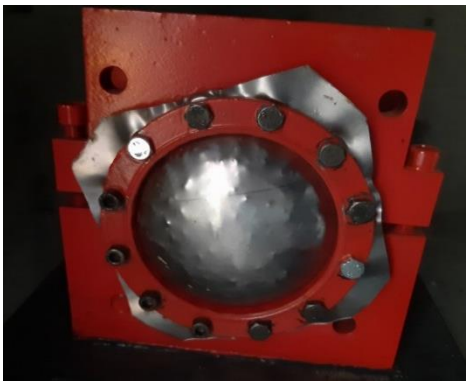
شکل ۷- تست انفجار آزاد بر روی ورق ساندویچی

۳-بحث و بررسی نتایج

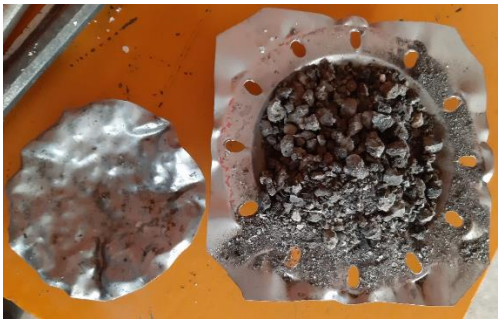
نتایج تجربی در ۳ بخش مجزا مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. این نتایج به ترتیب انجام آزمایش و مطالعه انجام شده در این مقاله به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرند. بررسی شامل بارگذاری انفجاری روی نمونه‌های تعیین ماده واسط، بحث و بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تعیین خواص مواد هسته و بحث و بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های نهایی اثر انفجار بر نمونه‌های ساندویچی و رفتار جذب انرژی آنها است که در ادامه به ترتیب ارائه می‌شوند.

۳-۱- بار گذاری انفجاری روی نمو نه های تعیین ماده واسط

همانطور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، یکی از آزمایش های انجام شده، آزمایش تعیین ماده واسط برای ساخت هسته ورق های ساندویچی است. در این آزمایش از ورق فولادی به ضخامت ۱ میلیمتر استفاده شده است، ضخامت هسته ۳۰ میلیمتر و خرج انفجاری ۸ گرم C۴ است. در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب صفحه پشتی ورق، وضعیت هسته و صفحه جلویی مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود، هسته کاملا تخریب و خرد شده است و صفحه جلویی نیز کاملا دچار تغییر شکل شده و پوکه‌ها نیز اثری ترکش مانند روی صفحه پشتی داشته اند و اثر آن‌ها کاملا مشهود است. در این حالت خیز ورق پشتی ورق ۲۸ میلیمتر است، اما ورق دچار پارگی نشده است.

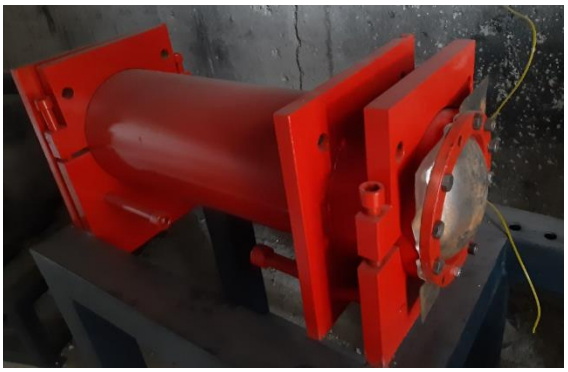


شکل ۸- آزمایش نمونه با هسته پوکه معدنی و آثار پوکه‌ها



شکل ۹- نمونه با هسته پوکه معدنی پس از تست

در آزمایش بعدی از هسته با ترکیب رزین و پوکه معدنی استفاده شده است. ضخامت هسته‌ی ورق ۳۰ میلیمتر ورق‌های رویی و پشتی ورق فولادی و دارای ضخامت ۱ میلیمتر و مقدار خرج انفجاری ۸ گرم C۴ است. در شکل (۱۰) ورق ساندویچی پس از انجام تست در دهانه‌ی لوله‌ی شوک مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- تست ورق ساندویچی با هسته ترکیب رزین و پوکه معدنی

در ۰ (۱۱) ورق ساندویچی بعد از انفجار مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ورق جلویی نمونه مقداری دچار تغییر فرم شده است. خیز ورق پشتی نمونه پس از اندازه‌گیری ۲۵ میلیمتر به دست آمده است. هسته دچار تغییر شکل شده است، اما همچنان یکپارچه است و شکستگی در هسته مشاهده نمی‌شود.

شکل ۱۱- نمونه با هسته‌ی فومی پس از تست

هسته ورق‌های بعدی با ترکیب آلومینیوم و پوکه ساخته شده است. ضخامت هسته ۳۰ میلیمتر و رویه ورق فولادی به ضخامت ۱ میلیمتر است. برای این آزمایش از ۸ گرم خرج انفجاری C۴ استفاده شده است. در ورق ساندویچی پس از آزمایش انفجار مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر مشخص است که ورق پشتی کاملاً از لبه‌های هسته پاره و جدا شده است.

شکل ۱۲- نمونه با هسته‌ی آلومینیومی و رویه آلومینیوم

با توجه به اینکه استحکام هسته از رویه ها خیلی بالاتر بوده، هیچ جذب انرژی‌ای توسط هسته انجام نپذیرفته و هسته مانند جسم صلب عمل کرده و هیچ تغییر شکلی در اثر انفجار انجام نپذیرفته است. در واقع هسته بیشتر انرژی را به ورق پشتی منتقل کرده است و هسته در این حالت قابلیت جذب انرژی خوبی نشان نداده است. نتایج حاصل از این آزمایشات به طور خلاصه در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱- نتایج بارگذاری انفجاری بر روی نمونه‌ها اولیه

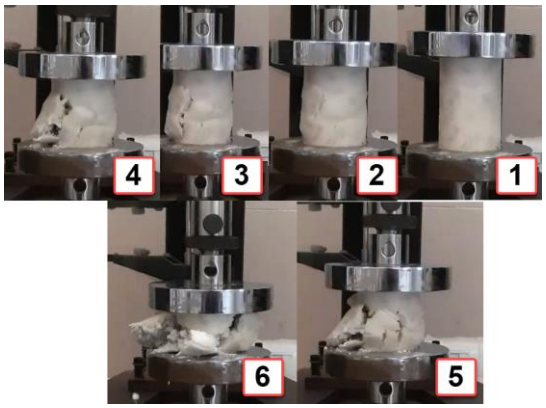
نوع هسته	جرم ماده منفجره [gr]	ضخامت رویه ها (mm)	جنس رویه	جابجایی بیشینه صفحه پشتی (mm)
پوکه معدنی	۸	۱	St37	۲۸
پوکه معدنی و فوم آلومینیوم	۸	۱	St37	پارگی صفحه پشتی
پوکه معدنی و رزین	۸	۱	St37	۲۵
پوکه معدنی و فوم پلی‌یورتان	۸	۱	St37	۱۵
پوکه معدنی و گچ	۸	۱	St37	پارگی صفحه پشتی
بدون هسته	۸	۱	St37	۳۵

از نتایج ملاحظه می‌شود، کمترین خیز بیشینه صفحه پشتی به هسته با ترکیب پوکه معدنی و فوم پلی یورتان اختصاص دارد. در سایر ترکیب‌ها بیشترین خیز صفحه پشتی بیشتر است یا در آنها پارگی صفحه پشتی ایجاد شده است. از این نتایج تاثیر نوع ماده واسط مورد استفاده در هسته کاملا مشخص است. استفاده از مواد واسط فوم پلی یورتان و رزین در ترکیب هسته به ترتیب باعث کاهش ۵۳ و ۹ درصدی خیز بیشینه صفحه پشتی نسبت به هسته بدون ماده واسط می شود. همچنین ملاحظه می‌شود، در نمونه‌های با هسته‌ای که در ترکیب آنها از ماده واسط فوم آلومینیوم و گچ استفاده شده است، صفحه پشتی کاملا دچار پارگی شده است و لذا از نظر جذب انرژی عملکرد مطلوبی برای شرایط بارگذاری و شرایط بارگذاری و رویه‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها را ندارند و هسته با ترکیب فوم و پوکه معدنی به عنوان هسته ورق ساندویچی مطالعات موضوع این مقاله انتخاب شده است.

۳-۲-بحث و بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش های تعیین خواص مواد هسته

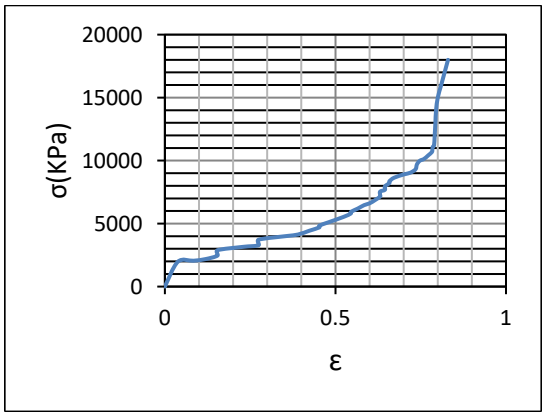
با توجه به آزمایشات انجام شده برای تعیین خواص مواد هسته، از نمونه‌های زیر تست در فرآیند انجام آزمایش فشار عکس برداری انجام شد. زمان عکس برداری با زمان ثبت داده‌های

آزمایش مورد کنترل قرار گرفت و مراحل ۶ گانه‌ای مطابق شکل (۱۳) ثبت گردید.

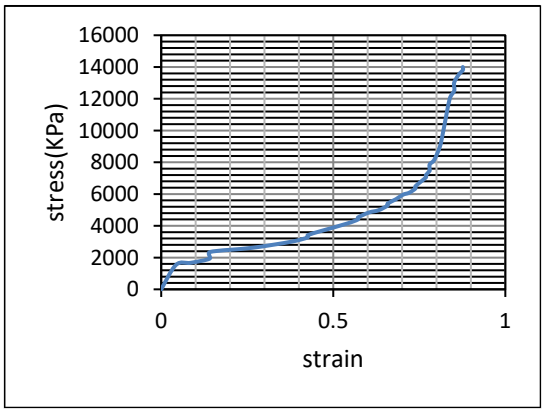


شکل ۱۳- مراحل فروریزش نمونه فومی در تست فشار

در شکل (۱۴) نمودار آزمایش تنش کرنش نمونه با چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و در شکل (۱۵) نمودار آزمایش تنش کرنش نمونه با چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، نمودارهای تنش کرنش این نمونه ها در بارگذاری شبه‌استاتیکی مشابه رفتار فوم‌ها است. با توجه به نمودار تنش کرنش در ابتدای بارگذاری رفتار نمونه تقریبا الاستیک است. مطابق شماره‌گذاری انجام شده در شکل (۱۳) برای مراحل فروریزش نمونه فومی، بعد از مرحله ۱ تغییر شکل نمونه شدیدتر شده و نمونه حالت بشکه‌ای می‌شود. تا این مرحله فقط پوکه‌های داخل نمونه له می‌شوند و در سطح رویی فوم ترکی دیده نمی‌شود. در مرحله ۲ در دیواره نمونه ترک ایجاد شده و در مرحله ۳ این ترک گسترش می‌یابد. در مرحله ۴ قسمتی از نمونه جدا می‌شود و ترک‌های دیگری دیده می‌شود. در مرحله ۵ با افزایش ترک‌ها سرعت تخریب نمونه بیشتر می‌شود و نهایتا در مرحله ۶ فوم تقریباً به طور کامل تخریب شده است.



شکل ۱۴- نمودار تنش-کرنش هسته با پوکه نخودی



شکل ۱۵-نمودار تنش-کرنش هسته با پوکه بادامی

نمودارها نشان می‌دهند که هسته با چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب استحکام بیشتری نسبت به هسته با چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب دارد. همانطور که از شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ملاحظه می‌شود، بیشترین تنش ثبت شده در نمونه با چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب حدود ۱۸ کیلوپاسکال و در نمونه با چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب حدود ۱۴ کیلوپاسکال است که افزایش حدود ۲۸ درصدی را نشان می دهد.

بازده جذب انرژی $\eta(\varepsilon_a)$ به صورت انرژی جذب شده تا کرنش معین ε_a تعریف می‌گردد که با مقدار تنش مربوطه $\sigma_C(\varepsilon)$ نرمال می‌شود و به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد [۱۷].

$$\eta(\varepsilon_a)=\frac{\int_0^{\varepsilon_a}\sigma_C(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma_C(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_a}} \qquad (۱)$$

کرنش چگالش ε_D مقدار کرنش مربوط به نقطه ثابتی در منحنی بازده-کرنش است که در آن بازده حداکثر است، یعنی:

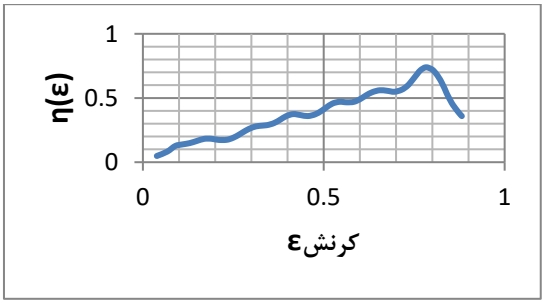
$$\left.\frac{d\eta(\varepsilon_D)}{d\varepsilon}\right|\varepsilon=\varepsilon_D=0 \qquad (۲)$$

برای حذف انرژی قابل بازیافت در مرحله الاستیسیته، معادله (۳) به صورت زیر اصلاح شده است:

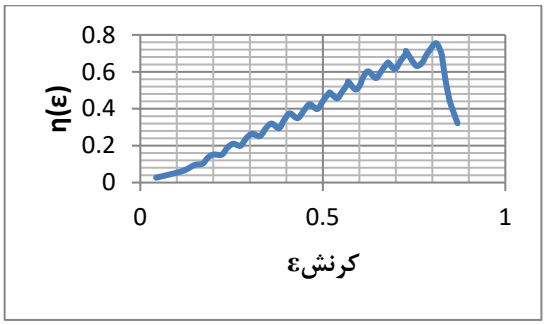
$$\eta(\varepsilon_a)=\frac{\int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_a}\sigma_C(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma_C(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_a}} \qquad (۳)$$

که در آن ε_{cr} کرنش در نقطه تسلیم است که مربوط به شروع رژیم پلاتو است.

در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب نمودار بازده جذب انرژی-کرنش هسته تقویت شده با پوکه نخودی با چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نمودار بازده جذب انرژی- کرنش هسته تقویت شده با پوکه بادامی با چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب نشان داده شده است. این نمودارها از نتایج حاصل از آزمایش تنش کرنش هسته به دست آمده است.



شکل ۱۶- نمودار بازده جذب انرژی- کرنش هسته تقویت شده با پوکه نخودی



شکل ۱۷- نمودار بازده جذب انرژی- کرنش هسته تقویت شده با پوکه بادامی

ملاحظه می‌گردد، بیشینه مقدار بازده جذب انرژی در هر دو نمونه تقریبا برابر و حدود ۷۶ درصد است. تفاوت این بازده جذب انرژی این دو نوع هسته در نحوه رسیدن به مقدار ۷۶ درصد است که در نمونه نخودی با حرکتی صعودی و نسبتا یکنواخت به مقدار بیشینه می‌رسد و در نمونه بادامی با حرکتی سینوسی و صعودی به مقدار بیشینه می‌رسد. علاوه بر این در نمونه نخودی مقدار بیشینه اندکی کمتر از کرنش ۰/۸ و در نمونه بادامی مقدار بیشینه اندکی بیشتر از کرنش ۰/۸حاصل شده است. دلیل این دو موضوع تغییر چگالی ناشی از تغییر اندازه دانه‌های پوکه معدنی استفاده شده در ترکیب هسته است.

۳-۳- بحث و بررسی نتایج بارگذاری انفجاری بر روی نمونه‌های ساندویچی تحت بار انفجار

نتایج حاصل از بارگذاری انفجار آزاد ورق‌های ساندویچی شامل خیز بیشینه صفحه پشتی است که در جدول (۲) ثبت شده است. از ۷ آزمایش انجام شده ۶ آزمایش با هسته مرکب از فوم پلی یورتان و پوکه معدنی و یک آزمایش با هسته کاملا فومی و بدون پوکه معدنی انجام شده است. اندازه پوکه‌های استفاده شده از ۲ نوع نخودی و بادامی است و جنس رویه‌های استفاده شده نیز از آلومینیوم و فولاد است. فاصله انفجار ۱۵ و۲۰ سانتیمتر و ضخامت رویه‌ها هم ۱ و ۲ میلیمتر است. ضخامت هسته کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر ۳۰ میلیمتر است.

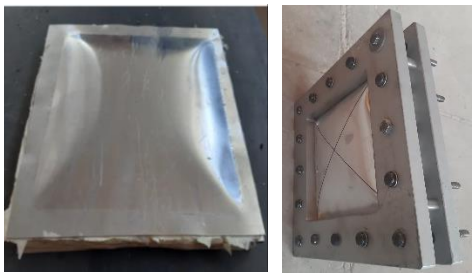
جدول ۲- مشخصات نمونه‌های آزمایش و خیز بیشینه صفحه پشتی ورق ساندویچی(ابعاد به mm)

شماره نمونه	نوع پوکه هسته	جنس رویه‌ها	ضخامت رویه‌ها	فاصله خرج	جرم خرج [gr]	خیز
۱	نخودی	آلومینیوم	۱	۲۰	۳۰	۱۷/۵
۲	بادامی	آلومینیوم	۲	۱۵	۴۰	۱۴
۳	بادامی	استیل	۲	۱۵	۴۰	۷/۵
۴	نخودی	استیل	۱	۲۰	۳۰	۱۱
۵	نخودی	آلومینیوم	۲	۱۵	۴۰	۱۰
۶	بادامی	استیل	۱	۱۵	۴۰	۷
۷	فومی	آلومینیوم	۲	۱۵	۴۰	۳۱

در شکل (۱۸) تصاویری از نمونه با رویه آلومینیمی و هسته فومی قبل و بعد از انجام آزمایش ارائه شده است.

شکل ۱۸- نمونه با رویه آلومینیمی قبل و بعد آزمایش

و نمونه‌هایی از تغییرشکل صفحه پشتی حاصل از آزمایش در شکل (۱۹) نیز تصاویری از نمای نزدیک نمونه‌های انفجار آزاد بر ورق‌های ساندویچی دارای رویه‌های آلومینیمی و هسته فومی نشان داده شده‌است.



شکل ۱۹- انجام آزمایش و تغییرشکل رویه یک از نمونه‌ها ناشی انفجار آزاد

ملاحظه می‌شود در همه نمونه‌ها استفاده از پوکه معدنی دارای نقش خوبی در جذب انرژی است و باعث کاهش خیز بیشینه صفحه پشتی ورق ساندویچی می‌شود، به طوریکه بیشترین خیز مربوط به ورق ساندویچی با هسته فومی بدون پوکه معدنی است. این به دلیل خاصیت له شدگی، شکنندگی و فروپاشی پلاستیک سلول‌های پوکه‌های استفاده شده در ساختار هسته است که باعث جذب بخش قابل توجهی از انرژی انفجار و عدم انتقال انرژی به رویه پشتی ورق ساندویچی می شود. ملاحظه می‌گردد، در نمونه با هسته دارای پوکه نخودی(۵) نسبت نمونه با هسته دارای پوکه بادامی (۲) که جنس رویه‌ها آلومینیم است و سایر شرایط هندسی و بارگذاری مشابه هستند، مقدار خیز بیشینه ۲۸/۵ درصد کاهش یافته است. دلیل آن به طور مشخص به خاطر اندازه و حجم بزرگتر دانه‌های پوکه معدنی بادامی است. هر قدر حجم دانه‌های پوکه معدنی در ساختار هسته افزایش یابد، میزان جذب انرژی توسط هسته افزایش می‌یابد و به تبع آن میزان انرژی منتقل شده به صفحه پشتی کاهش می‌یابد.

همچنین ملاحظه می‌گردد، در نمونه‌های (۳) و (۶) که فقط ضخامت رویه‌های آن متفاوت است و سایر شرایط مشابه است، مقدار خیز تفاوت چندانی ندارد، به طوریکه با ۲ برابر شدن ضخامت رویه‌ها مقدار خیز بیشینه فقط ۷ درصد تغییر کرده است. دلیل این موضوع این است که در ورق‌های ساندویچی، نقش هسته در جذب انرژی به مراتب از نقش ضخامت رویه‌ها بیشتر است.

همچنین ملاحظه می‌گردد، در نمونه با رویه استیل(۴) نسبت به نمونه با رویه آلومینیم (۱) که دارای ترکیب یکسان هسته با پوکه معدنی نخودی هستند و سایر شرایط هندسی و بارگذاری نیز مشابه هستند، مقدار خیز بیشینه ۳۷ درصد کاهش یافته است که به دلیل استحکام ذاتی استیل است که به مراتب بیشتر از آلومینیم است.

نتیجه گیری

در این مقاله نوع جدیدی از ساندویچ پنل‌های جاذب انرژی انفجار معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است که هسته آنها ترکیبی از فوم پلی یورتان و پوکه معدنی اسکوریا با دو نوع دانه بندی متفاوت است. در فرآیند تجربی انتخاب ماده واسط مورد استفاده در ترکیب هسته، فوم پلی یورتان دارای عملکرد

مطلوب‌تری از نظر استحکام و جذب انرژی نسبت آلومینیم، گچ ساختمانی و رزین است، به طوریکه کمترین خیز بیشینه صفحه پشتی ورق‌های ساندویچی به هسته با ترکیب پوکه معدنی و فوم پلی یورتان اختصاص دارد. در سایر ترکیب‌ها با هسته مرکب از پوکه معدنی و آلومینیم، گچ ساختمانی و رزین، خیز بیشینه صفحه پشتی یا بیشتر است یا در آنها پارگی ایجاد شده است.

به دلیل تغییر در دانه‌بندی پوکه معدنی اسکوریا در ترکیب هسته و به تبع آن تغییر در چگالی هسته، نمودار بازده جذب انرژی بر حسب کرنش در نمونه نخودی دارای حرکت صعودی و نسبتا یکنواخت و در نمونه بادامی با حرکتی سینوسی و صعودی به مقدار بیشینه می‌رسد.

استفاده از پوکه معدنی و نقش آن در جذب انرژی باعث کاهش خیز بیشینه صفحه پشتی ورق ساندویچی می‌شود. بیشترین خیز مربوط به ورق ساندویچی با هسته فومی بدون پوکه معدنی است. خیز بیشینه در هسته ورق‌هایی که از پوکه نخودی در آنها استفاده شده است، نسبت به ورق‌هایی کمتر است که از پوکه بادامی در هسته آنها استفاده شده‌است. ضخامت رویه‌ها نسبت به دانه‌بندی هسته و جنس رویه‌ها تاثیر چندانی در جذب انرژی ندارد. خیز بیشینه ورق پشتی و در نمونه‌های با رویه استیل نسبت به نمونه‌های با رویه آلومینیم کمتر است.

مراجع

[1].Hanssen, A., et al., (2002) Close-range blast loading of aluminium foam panels. Int. J. Impact Engin. 27(6): p. 593-618.

[2].Radford, D., et al., (2006) The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading. Int. J.solids struc., 43(7-8): p. 2243-2259.

[3].Shen, J., et al., (2010) Experiments on curved sandwich panels under blast loading. Int. J.Impact Engin., 37(9): p. 960-970.

[4].Shen, J., et al., (2011) Response of curved sandwich panels subjected to blast loading. J. Perform. Construc. Facilities, 25(5): p. 382-393.

[5].Hangai, Y., et al., (2012) Effects of porosity and pore structure on compression properties of blowing-agent-free aluminum foams fabricated from aluminum alloy die castings. Materials Transactions, 53(8): p. 1515-1520.

[6].Shim, C., et al., (2012) Mitigation of blast effects on protective structures by aluminum foam panels. Metals, 2(2): p. 170-177.

[7].Goel, M., et al., (2015) Interaction of a shock wave with a closed cell aluminum metal foam. Combustion, Explosion, and Shock Waves,. 51(3): p. 373-380.

[8].Rotariu, A.-N., et al., (2016) Uninstrumented Measurement Method for Granular Porous Media Blast Mitigation Assessment. Experimental Techniques, 40(3): p. 993-1003.

[۹] خندابی و همکاران(۱۳۹۸)، مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و رویه در پانل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها.

[10].Lan, X., et al., (2019) A comparative study of blast resistance of cylindrical sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. Aerospace Science and Technology,. 87: p. 37-47.

[۱۱] خندابی و همکاران(۱۳۹۹) ,بررسی تجربی و عددی عملکرد پانل‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی متغیر در برابر بار انفجاری. نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران.

[12].Sun, G., et al. (2020) Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different facesheets and core gradients subjected to blast impulse. Int. J. Imp. Engin., 135: p. 103327.

[13].Zhou, T., et al. (2020) Experimental investigation on the performance of PVC foam core sandwich panels subjected to contact underwater explosion. Composite Structures, 235: p. 111796.

[14].Pratomo, A.N., et al. (2020), Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading. Int. J.Imp. Engin. 146: p. 103699.

[15].Sandhu, I., et al., (2020) Stability of Detonation Waves Propagating in Plane and Rectangular Channels. Combustion, Explosion, & Shock Waves, 56(1).

[16].Sarkhosh, A., et al., (2022). Experimental and numerical study on ballistic resistance of aluminum foam sandwich panel considering porosity and dimensional effect. Int. J. Imp. Engin..173. 104441

[17].Rahmani, M., et al., (2020). Optimization, Experimental Investigation of the Ability of New Material from Aluminum Casting on Pumice Particles to Reduce Shock Wave. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 64, 3, 224–232.