



## بررسی تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی سازه ساندویچی با هسته‌ی فوم پلی یورتان تقویت‌شده با پوکه‌ی معدنی تحت بارگذاری انفجاری

حسین خدارحمی<sup>۱\*</sup>، محمود کفاش میرزارحیمی<sup>۲</sup>، مجتبی ضیاء شامامی<sup>۳</sup> و روح‌اله حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

### چکیده

سازه‌های ساندویچی با هسته ساخته‌شده از مواد متخلخل از جمله انواع فوم‌های فلزی و پلیمری در جذب انرژی بارهای انفجاری مؤثر بوده و به دلیل سبکی می‌تواند کاربرد خوبی در صنایع مختلف داشته باشد. در این مقاله تغییر فرم و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با رویه آلومینیومی و فولادی و هسته ساخته‌شده از فوم پلی‌اورتان که از دو نوع پوکه معدنی با سایز مختلف (اصطلاحاً نخودی و بادامی) پر شده است، تحت بارگذاری انفجاری آزاد بروش تجربی و شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی ابتدا رفتار مکانیکی هسته با ساخت نمونه‌های ترکیبی از فوم پلی‌اورتان و پوکه‌های معدنی، تحت آزمایش فشار مطالعه شده و نتایج آن در مدل‌های رفتاری نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته است. پس از مقایسه نتایج عددی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی و صحت سنجی نتایج روش عددی، مطالعات پارامتریک عددی انجام گرفته و اثر نوع پوکه، ضخامت هسته، جنس رویه‌ها و ضخامت رویه‌ها در میزان تغییر فرم یا خیز رویه‌ها و همچنین میزان جذب انرژی اجزاء سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، پانل با رویه‌ی پشتی ضخیم‌تر عملکرد بهتری در جذب انرژی انفجار دارد؛ همچنین با افزایش استحکام یا ضخامت رویه‌ها نقش هسته در جذب انرژی کمتر می‌شود.

**کلمات کلیدی:** جذب انرژی، فوم پلی یورتان، پوکه‌ی معدنی، انفجار

## Experimental and numerical evaluation of energy absorption capacity of sandwich panel with polyurethane foam core reinforced with mineral pumice under explosive loading

H. Khodarahmi<sup>1\*</sup>, M. Kaffash Mirzarahimi<sup>2</sup>, M. Ziashamami<sup>3</sup>, R. Hosini<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof., Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assis. Prof., Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### Abstract

Sandwich structures with cores made of porous materials such as various types of metal and polymer foams are effective in absorbing the energy of explosive loads and due to their lightness can be used well in various industries. In this paper, deformation and energy absorption of sandwich panels with aluminum and steel face sheet and cores made of polyurethane foam, which is filled with two types of mineral pumice of different sizes (so-called chickpea size and almond size), under experimental free explosion loading. And numerical simulation has been studied with the help of Abaqus finite element software. In this study, the mechanical behavior of the core was first studied by making samples of polyurethane foam and mineral pumice under compression testing and the results were used in software behavioral models. After comparing the numerical results with the results of experimental test, and validating the results of numerical methods, numerical parametric studies were performed and the effect of pumice type, core thickness, face sheet material and thickness on the rate of deformation and energy absorption of sandwich panel components have been studied. The results show that the panel with a thicker back face sheet has a better performance in absorbing explosion energy. Also, as the strength or thickness of the face sheets increases, the role of the core in energy absorption decreases.

**Keywords:** Energy absorption, polyurethane foam, pumice, explosion

## ۱- مقدمه

یک سازه‌ی مهندسی باتوجه‌به کاربرد و موقعیت استفاده از آن در طول عمر خود می‌تواند تحت بارگذاری‌های مختلفی قرار گیرد. یکی از انواع بارگذاری که ممکن است سازه با آن مواجه شود بار ضربه‌ای و یا انفجاری است. بارگذاری ضربه‌ای بسیار رایج است و در سازه‌های مختلف از جمله در شاسی خودرو، سپر و ستون‌های خودرو حین تصادف و ... دیده می‌شود؛ اما اهمیت حالت انفجاری بیشتر در سازه‌های نظامی، کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌های در معرض احتمال انفجار، ساختمان‌های مسکونی و غیرمسکونی و ... است. استفاده از موادی نظیر فوم‌های فلزی و پلی‌یورتان جهت جذب انرژی انفجار و کاهش آسیب آن رایج است که این قابلیت به دلیل توانایی بالای این مواد در جذب انرژی است. بعلاوه مواد دانه‌ای نسبتاً ارزان قیمت مانند شن، براده‌ی آهن، پوکه‌های معدنی، خاکاره و ... می‌توانند بستر مناسبی برای میرایی موج شوک ناشی از انفجار ایجاد کنند.

مواد متخلخل و دانه‌ای به دلیل داشتن اثر کاهش امواج شوک در کاربردهای محافظتی مختلف موردتوجه قرار گرفته‌اند. به همین دلیل، بررسی فیزیک حاکم بر مسائل انتشار امواج شوک در محیط مواد متخلخل و دانه‌ای از اهمیت خاصی برخوردار است و مدل‌های مختلفی برای آن توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. پیچیدگی‌های خاص حاکم بر رفتار محیط‌های دانه‌ای موجب شده است که بسیاری از این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی درست رفتار مواد دانه‌ای در مواجهه با موج شوک نباشند. از سوی دیگر پیچیدگی معادلات حاکم موجب می‌شود که حل عددی این معادلات نیز با مشکلات و هزینه‌های محاسباتی زیادی همراه باشد [۱]، به همین دلیل کارهای زیادی به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی در این زمینه صورت گرفته است.

لیوی [۲] از مدل حاکم ماکروسکوپی که برای توصیف موج شوک در مواد متخلخل توسعه داده شده در بررسی برخورد موج شوک با مواد دانه‌ای استفاده کرده است. بررسی‌های لیوی با استفاده از برنامه‌های عددی نشان داد، مدلی که در ابتدا برای مواد متخلخل ایجاد شده، می‌تواند با موفقیت برای پیش‌بینی برخورد امواج ضربه‌ای و انتشار آن در مواد دانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش برایتن و همکارانش [۳] مطالعه بر روی کاهش موج شوک در فیلترهای دانه‌ای پرداخته شده است. در

این مطالعه از تأثیر پارامترهایی نظیر شکل ذرات صرف‌نظر شده است و مشخص شده که برای شبیه‌سازی آن‌ها استفاده از مدل‌های یک‌بعدی هم می‌تواند با واقعیت هم‌خوانی خوبی داشته باشد. ویتالی نسترنکو [۴] در یک کار آزمایشگاهی با عنوان استهلاک موج شوک با استفاده از مواد نرم فشرده شده تأثیر استفاده از خاکاره در یک مخزن فلزی تست انفجار را مورد بررسی قرار داده و مشاهده شده که با استفاده از این ماده میزان تغییر شکل مخزن به شدت کاهش یافته و از تخریب آن جلوگیری شده است. هانگای و همکارانش [۵] به تأثیر تخلخل و حفره‌های ساختاری در خواص فشرده سازی فوم آلومینیوم پرداخته‌اند. فوم ساخته شده در این پژوهش به روش ریخته گری بوده است. 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] به بررسی استهلاک موج شوک در سازه‌های محافظت شده با فوم آلومینیوم پرداخته‌اند. آن‌ها برای این منظور از تست تجربی و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار ال اس داینا استفاده کرده‌اند. طبق تحقیقات آنها ضخامت، چگالی و خصوصیات صفحات رویه‌ی پانل مهمترین پارامتر برای تخمین رفتار سازه‌ی ساندویچی است. از آنجایی که فشار بارگذاری انفجاری در فاصله نزدیک یکنواخت نیست، خصوصیات رویه‌ها به دلیل تأثیر در توزیع فشار بر روی فوم نقش مهمی در رفتار فوم دارد. تحقیقات گسترده‌ای نیز تاکنون در زمینه‌ی جذب انرژی فوهای پلیمری صورت گرفته، یازسی و همکارانش [۷] تأثیر تزریق فوم در پانل‌های لانه زنبوری را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که با تزریق فوم در هسته‌ی لانه زنبوری جابجایی رویه‌ی جلویی و پشتی پانل ساندویچی می‌تواند بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد. خندابی و همکارانش [۸] با تهیه فوم‌های پلی یورتان با ضخامت‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق آلومینیومی و هسته فوم پلی یورتان، با استفاده از دستگاه شک تیوب انفجاری و انجام تعدادی آزمایش هدفمند، اثر ضخامت فوم در مقدار جابجایی سطح پشتی ساختار ساندویچی و میزان جذب انرژی آن‌را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بررسی آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش ضخامت فوم و ضخامت رویه پشتی ساختار ساندویچی، جابجایی رویه پشتی کاهش یافته و میزان جذب انرژی آن

سلول باز پلی یورتان در حجم محدود کلاه خود عملکرد مناسبی ندارند.

حاتم پور و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی و عددی و تحلیل رگرسیونی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی تقویت شده با فوم پلیمری تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چگالی فوم پلی یورتان مهم‌ترین عامل در تغییر شکل پلاستیک ورق ساندویچی است.

سیاح بادخور و همکاران [۱۷] به روش عددی به مطالعه اثر شرایط مختلف بارگذاری و هندسه ساختار بر رفتار ساختارهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت بارگذاری دفعی پرداختند. مدل رگرسیونی پیشنهاد شده در این تحقیق انطباق خوبی با نتایج تجربی ارائه کرده است.

پیمان و همکاران [۱۸] در پژوهشی به بررسی عددی اثر شکل هندسی هسته ورق ساندویچی فولادی، بر رفتار و میزان جذب انرژی آن در برابر موج انفجار پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در فشارهای پایین مدل با هسته دارای شبکه افقی چهارضلعی، بیشترین میزان جذب انرژی و کمترین جابجایی را دارد. با این وجود، در فشارهای بالا مدل با هسته دارای شبکه عمودی شش ضلعی دارای کمترین میزان جابجایی و مدل با شبکه عمودی شش ضلعی دارای بیشینه میزان جذب انرژی است. به عبارت دیگر وابسته به میزان فشار انفجار، ورق ساندویچی با هندسه خاصی می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد.

رحمانی و مسلمی استفاده از ترکیب پوک‌های معدنی و آلومینیوم را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند، در پژوهش آن‌ها با استفاده از تست فشار شبه استاتیکی خواص نمونه‌های ریختگری آلومینیوم بر روی پوک‌های معدنی را به دست آورده و با شبیه‌سازی عددی رفتار این ماده در برابر موج انفجار را بررسی کردند، مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد این ماده رفتار نزدیکی به فوم آلومینیوم در هر دو حالت بارگذاری شبه استاتیکی و شوک دارد [۱۹ و ۲۰]. جذب انرژی انفجار توسط مواد دانه‌ای توسط رحمانی و همکارانش [۲۱] بررسی شده است، در تحقیقات آن‌ها به صورت تجربی و عددی جذب انرژی در پوک‌های معدنی و خاک اره مورد بررسی قرار گرفت، آن‌ها از پوک‌های معدنی و خاک اره (به صورت جداگانه) پر شده در کیسه‌های کوچک به عنوان هسته‌ی پانل ساندویچی استفاده

افزایش می‌یابد. اودی و همکارانش [۹] پانل‌های ساندویچی با هسته‌ی فوم پلی یورتان و رویه‌های کامپوزیتی را بررسی کردند، بررسی آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش چگالی فوم صلبیت سازه افزایش یافته و جابجایی کاهش یافته است. روتاریو و همکارانش [۱۰] به بررسی اندازه‌گیری میرایی پالس در محیط‌های مواد دانه‌ای متخلخل به روش تست 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 می‌زنند. تین یو ژو و همکارانش [۱۱] به بررسی پارامترهای هندسی و گرادیان چگالی هسته در مقابل بارگذاری بلست پرداخته‌اند. برای این منظور نمونه‌های ساخته شده بوسیله تست انفجار آزاد تحت بارگذاری بلست قرار گرفته است. حاتمی و همکارانش [۱۲] به بررسی سوراخ شدن اهداف نازک آلومینیومی تحت ضربه پرسرعت پرتابه‌های کروی آلومینیومی، به منظور بدست آمدن قطر سوراخ پرداخته‌اند. مدل بی‌بعد ارائه شده توسط آن‌ها، اکثر خواص هندسی و خواص ماده را از جمله ویژگی‌های موج ضربه‌ای ماده و همچنین زاویه ضربه را در نظر می‌گیرد. حاتمی و همکارانش [۱۳] به بررسی عملکرد جاذب‌های لوله فلزی منبسط شده تحت بارگذاری ضربه محوری پرداخته‌اند. ورق‌های فلزی منبسط شده جدار نازک علی‌رغم وزن کم، ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند. جهت سلولی ورق‌های فلزی منبسط شده تاثیر زیادی بر رفتار جاذب خواهد داشت. گانگیون سان و همکارانش [۱۴] به مطالعه بر روی ساندویچ پانل با هسته فوم فلزی با صفحه پشتی و جلویی از جنس‌های آلایژ آلومینیومی، فولادی و فیبر کربنی در مقابل بلست پرداخته‌اند. در این پژوهش به بررسی تغییر شکل و مودهای شکست، تأثیر جنس صفحه پشتی و جلویی و گرادیان چگالی هسته بر روی تغییر شکل صفحه پشتی پرداخته شده است. ریس و همکارانش [۱۵] تأثیر ضربه‌گیرهای فومی در کلاه خود در برابر انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آنها عبور موج از کلاه خود و آسیبی که می‌تواند به سر بزند را مطالعه کردند. نتایج نشان داد، هرچه فوم متراکم‌تر باشد، اثر تقویت آن بیشتر می‌شود. در حالی که در مقالات مختلف گزارش شده است که فوم‌ها پس از بکارگیری در ضخامت مشخص به کاهش موفقیت آمیز انفجارها دست می‌یابند، این پژوهش نشان داده است که بسیاری از فوم‌های

کردند که نتایج نشان داد در ضخامت های کم هسته پوک‌های معدنی عملکرد بهتری در جذب انرژی انفجار دارد. ایده استفاده از پوک‌های معدنی به عنوان جاذب انفجار به دلیل چگالی پایین و جذب انرژی بالا ایده خوبی است. مشکلی که در این نوع جاذب‌ها وجود دارد به دلیل دانه‌ای بودن مواد تشکیل دهنده نیاز به پرکننده‌ای دارد تا پوک‌های معدنی را کنار هم نگه داشته و ساختاری منظم تر ایجاد کند. برای این منظور در این پژوهش سعی می‌شود با استفاده از ترکیب فوم پلی یورتان و پوک‌های معدنی، پانلی ساخته شود که علاوه بر رفع این نقص، جذب انرژی انفجار را نیز بهبود بخشد؛ همچنین به دلیل جدید بودن ساختار این پانل، بدیهی است هیچ گونه کار عددی، تجربی و تحلیلی روی این پانل‌ها صورت نگرفته است که در این پژوهش تلاش می‌گردد، مقدار تغییر شکل و جذب انرژی انفجار برای پارامترهای مختلف پانل ساندویچی از جمله ضخامت و جنس صفحه پشتی و رویی، سایز پوک‌های معدنی، نوع پرکننده محاسبه گردد.

## ۲- بررسی تجربی

ماده‌ی منفجره‌ی مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق از نوع C4 می‌باشد، این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابلیت شکل دهی و قالبگیری را دارد، ماده‌ی منفجره به صورت کروی شکل دهی شده است. جهت شروع انفجار از چاشنی الکتریکی شماره‌ی ۸ (قطر ۸ میلی‌متر) استفاده شده است. در این پژوهش آزمایش به صورت انفجار آزاد صورت می‌گیرد (انفجار در فضای باز، نه هدایت شده مانند شاک تیوب)، پانل‌های ساندویچی به شکل مربعی و با طول و عرض ۳۰ سانتیمتر می‌باشند. رویه‌های پانل ساندویچی از دو نوع ورق آلومینیومی AA1100 و ورق فولادی St37 ساخته شده است. نحوه‌ی آماده سازی آزمایش و شرایط مرزی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به اندازه‌ی دانه بندی متفاوت پوک‌های معدنی چگالی هسته‌های به دست آمده متفاوت می‌شود، از دو سایز دانه بندی مختلف بادامی (با حداکثر ابعاد ۴ سانتیمتر) و نخودی (با حداکثر ابعاد ۱ سانتیمتر) استفاده شده است، هسته‌های ساخته شده با پوک‌های بادامی دارای چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب و هسته‌ی ساخته شده با پوک‌های نخودی دارای چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. مقدار پوک‌ها در هسته با پوک‌های نخودی نسبت به هسته با پوک‌های بادامی

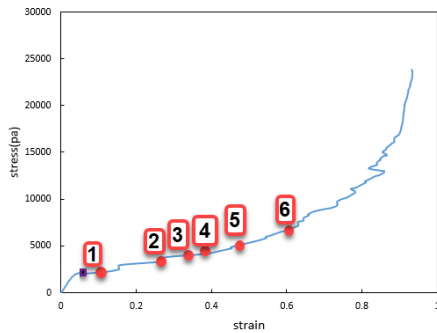
۲۰ درصد بیشتر است. هسته‌ها با ریختن فوم پلی‌یورتان مایع با چگالی ۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب بر روی پوک‌های پر شده در قالب، ساخته می‌شود، سپس قالب داخل گیره محکم بسته می‌شود زیرا فوم به شدت منبسط می‌شود و در صورت محکم نبودن قالب می‌تواند از آن خارج شود در شکل ۱ دو نمونه از هسته‌های ساخته شده برای پژوهش مشاهده می‌شود. در آزمایش اول از هسته با چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب (هسته ساخته شده با پوک‌های نخودی) با ضخامت ۳۰ میلی متر، رویه‌های آلومینیوم ۱۱۰۰، با ضخامت ۱ میلی‌متر و ۳۰ گرم خرج انفجاری C4 در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری استفاده شده است. دورتادور نمونه، تکیه‌گاه به صورت گیردار است. برای ایجاد شرایط گیردار پانل با تعداد ۱۶ عدد پیچ مطابق شکل ۱ به قاب تکیه‌گاه وصل می‌شود.

آزمایش دوم هسته ساخته شده با پوک‌های بادامی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر بوده است. رویه‌های دو طرف پانل از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر و میزان خرج انفجاری ۴۰ گرم C4 در فاصله‌ی ۱۵ سانتیمتری از مرکز پانل است.

در آزمایش سوم هسته به ضخامت ۳۰ میلی‌متر با پوک‌های بادامی ساخته شده، رویه‌ها از جنس فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر و ۴۰ گرم خرج انفجاری در فاصله‌ی ۱۵ سانتیمتری از مرکز پانل قرار گرفته است. آزمایش چهارم با هسته‌ی ساخته شده از پوک‌ها با سایز نخودی و با ضخامت ۳۰ میلی‌متر انجام شده، ورق‌های رویه از جنس فولادی ۱ میلی‌متری است، ۳۰ گرم خرج انفجاری در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری استفاده شده است.

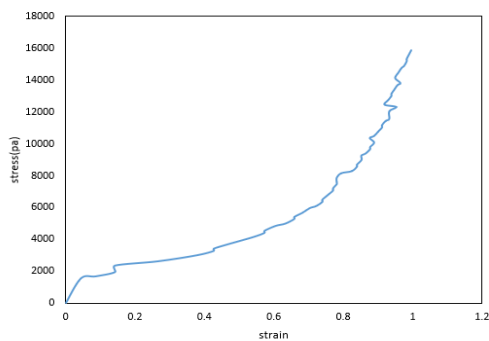
در آزمایش پنجم، به منظور بررسی تاثیر اضافه کردن پوک‌های معدنی به فوم پلی‌یورتان، هسته مطابق شکل ۱ از جنس فوم پلی‌یورتان به ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است. رویه‌های دو طرف پانل از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر بوده و میزان خرج انفجاری ۴۰ گرم C4 در فاصله‌ی ۱۵ سانتیمتری از مرکز پانل است.

دستگاه تست فشار نمودار نیرو و جابه‌جایی را ارائه می‌کند که از آن می‌توان نمودار تنش کرنش مهندسی را به دست آورد. شکل ۴ و ۵ نمودار تنش و کرنش را برای دو سایز پوکه نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار تنش کرنش حاصل تست فشار هسته با پوکه‌ی نخودی

باتوجه به نمودار تنش کرنش شکل ۴ و تصاویر شکل ۳ تا اندکی قبل از نقطه‌ی ۱ (که با علامت مربع کوچک مشخص است) رفتار نمونه تقریباً الاستیک است. پس از نقطه ۱ تغییر شکل نمونه شدیدتر شده نمونه حالت بشکله‌ای می‌شود، تا اینجا فقط پوکه‌های داخل نمونه خرد می‌شوند و در سطح رویی فوم ترکی دیده نمی‌شود. در نقطه‌ی ۲ در دیواره نمونه ترک ایجاد شده و در نقطه ۳ این ترک گسترش می‌یابد، در نقطه ۴ قسمتی از نمونه جدا می‌شود و ترک‌های دیگری دیده می‌شود. در نقطه‌ی ۵ با افزایش ترک‌ها سرعت تخریب نمونه بیشتر می‌شود، در نقطه‌ی ۶ فوم تقریباً به طور کامل تخریب شده است.



شکل ۵- نمودار تنش کرنش حاصل تست فشار هسته با پوکه‌ی بادامی

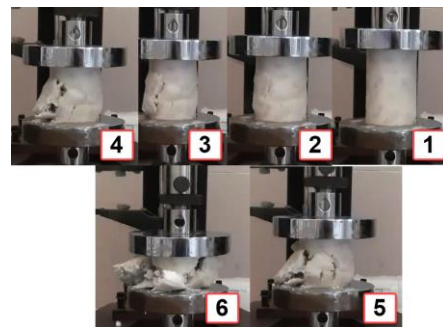


شکل ۱- آزمایش تجربی پائل

به منظور استخراج پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی عددی تست فشار بر روی نمونه‌های استاندارد ساخته شده انجام شده است [۲۲]. طول نمونه‌ها ۸۰ و قطر آنها ۵۰ میلی‌متر است. نمونه‌ها با دو سایز پوکه بادامی (با حداکثر ابعاد ۳ سانتیمتر) و نخودی (با حداکثر ابعاد ۱ سانتیمتر) ساخته شده‌اند. شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده و در شکل ۳ مراحل انجام تست فشار و فشرده شدن یک نمونه دیده می‌شود. در شکل ۴ این نقاط روی نمودار تنش کرنش به دست آمده مشخص شده‌اند. سرعت بارگذاری، برابر با ۴mm/min در نظر گرفته شد.



شکل ۲- نمونه‌های ساخته شده برای تست فشار



شکل ۳- انجام تست فشار (مراحل فشرده شدن نمونه)

### ۳- شبیه‌سازی عددی

باتوجه به نمودارهای تنش کرنش به دست آمده در بخش قبل و مقایسه آن با رفتار فوم مشاهده می‌شود رفتار نمونه‌ها در بارگذاری شبه استاتیکی مشابه فوم‌ها است، بنابراین از مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رفتار فوم استفاده می‌شود می‌توان برای شبیه‌سازی هسته‌ی پانل ساخته شده با پوکه معدنی و فوم استفاده نمود. نمودارها نشان می‌دهد که هسته با چگالی ۴۵۰ استحکام نسبتاً بیشتری از هسته با چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارد. برای تعریف این ماده در نرم‌افزار آباکوس از مدل الاستیک خطی و مدل پلاستیک لهیدگی فوم استفاده شده است. مدول الاستیک با استفاده از قسمت خطی (قبل از نقطه ۱ در شکل ۴) نمودارهای شکل ۴ و ۵ و استفاده از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

مقدار به دست آمده برای مدول الاستیک هسته با پوکه‌ی نخودی ۶۵/۷ کیلو پاسکال و برای هسته با پوکه‌ی سبزی بادامی ۴۵/۶ کیلو پاسکال به دست آمده است. مقدار ضریب پواسون برای فوم معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. ضریب پواسون برای اکثر سنگ‌ها و بتن نیز بین ۰/۱ الی ۰/۲ است. در هسته‌های ساخته شده ۴۰ الی ۵۰ درصد از حجم هسته را فوم تشکیل می‌دهد و ۶۰ تا ۵۰ درصد نیز از پوکه‌ی معدنی تشکیل شده است؛ بنابراین ضریب پواسون مقداری بین ۰ الی ۰/۱ است. در این پژوهش مقدار میانی این بازه یعنی ۰/۰۵ برای این ضریب در نظر گرفته شده است. تعریف مدل فوم شکست پذیر نیز با معرفی نقاطی از نمودار تنش کرنش به نرم‌افزار انجام می‌شود.

همانطور که ذکر شد، ورق آلومینیوم مورد استفاده برای رویه‌های پانل ساندویچی از سری AA1100 و فولاد از سری St37 می‌باشند که خصوصیات مکانیکی مورد استفاده برای آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

#### جدول ۱- خصوصیات مکانیکی آلومینیوم AA1100 و فولاد St37 [۲۳ و ۲۴]

پارامتر	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E(Gpa)	$\nu$	G(Gpa)
AA1100	۲۷۱۰	۷۵	۰/۳	۲۵/۵
St-37	۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۳	۸۰

با استفاده از مقادیر بالا مدل الاستیک آلومینیوم و فولاد تعیین می‌شود، باتوجه به بارگذاری انفجاری ماده به احتمال زیاد وارد فاز پلاستیک و شکست می‌شود، مقادیر مدل پلاستیک و شکست جانسون کوک که به طور رایج برای فلزات استفاده می‌شود، برای آلومینیوم AA1100 و فولاد St37 در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

#### جدول ۲- ضرایب مدل پلاستیک جانسون کوک

##### آلومینیوم ۱۱۰۰ و فولاد St-37 [۲۳ و ۲۴]

پارامتر	AA1100	St-37
$\varepsilon\left(\frac{1}{\%}\right)$	۰/۱	۰/۱
A(Mpa)	۱۳۵/۴۳	۲۱۷
B(Mpa)	۳۱۹/۱۳	۲۳۳/۷
N	۰/۲۴	۰/۵۱۷۶
C	۰/۰۱۵	۰/۱۰۵۶
دمای ذوب (C°)	۶۷۰	۱۳۷۰

#### جدول ۳- ضرایب مدل شکست جانسون کوک آلومینیوم

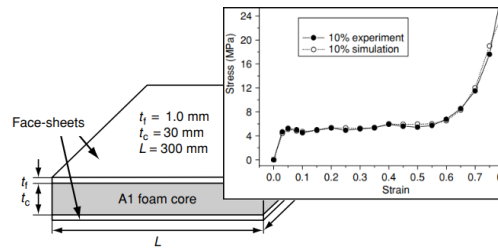
##### ۱۱۰۰ و فولاد St-37 [۲۳ و ۲۴]

پارامتر	AA1100	St-37
D1	۰/۰۷۱	۰/۰۵
D2	۱/۲۴۸	۳/۴۴
D3	-۱/۱۴۲	-۲/۱۲
D4	۰/۱۴۷	۰/۰۰۲
D5	۰	۰/۶۱

برای صحت سنجی، نتایج شبیه‌سازی با پژوهش انجام گرفته توسط ژو و همکارانش [۲۵] مقایسه شده است، آن‌ها تحقیقات مشابهی را بر روی پانل با هسته‌ی فوم آلومینیوم انجام دادند، ابعاد پانل و نمودار خواص هسته پانل مورد بررسی توسط ژو و همکارانش در شکل ۶ مشاهده می‌شود. آن‌ها یک پانل ساندویچی با رویه‌های آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر و هسته‌ی فوم آلومینیوم به ضخامت ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل ۶ را در معرض انفجار ۳۰ گرم TNT در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری از پانل قرار دادند.

#### ۴- نتایج، بحث و مطالعه‌ی پارامتریک

در این قسمت از مقاله نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است، ابتدا به منظور اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، نتایج آن با تحقیقات دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی مقایسه می‌گردد و در ادامه پارامترهای مؤثر در جذب انرژی بررسی شده‌اند.



شکل ۶- ابعاد هندسی مسئله‌ی صحت سنجی [۲۵]

#### ۴-۱- صحت سنجی نتایج عددی

نتایج جابجایی‌های ورق پستی، ورق رویی و هسته حاصل از شبیه‌سازی این تحقیق با تحقیقات ژو و همکارانش [۲۵] که در شکل ۶ هندسه‌ی مسئله‌ی آن مشاهده می‌شود در جدول ۵ مقایسه شده است. در شبیه‌سازی انجام شده برای صحت سنجی هسته از نوع فوم آلومینیوم سلول بسته با مدول یانگ ۱/۵ مگا پاسکال و چگالی ۰/۲۷ گرم بر سانتیمتر مکعب و ضریب پواسون صفر در نظر گرفته شده است.

#### جدول ۵- مقایسه نتایج جابجایی‌ها از شبیه‌سازی

این تحقیق با مرجع [۲۵]		
مرجع [۲۵]	شبیه‌سازی	درصد اختلاف
۶/۷	۷/۴	۹/۴
۱۰/۲	۱۱/۵	۱۱/۳
۲۱	۱۹/۴۶	۷/۲

باتوجه به درصد اختلاف نتایج و باتوجه به اینکه نتایج مرجع با تست تجربی به دست آمده شبیه‌سازی قابل قبول است. خطای به وجود آمده را می‌توان ناشی از یکسان نبودن شرایط مرزی و کامل نبودن خصوصیات ارائه شده در مقاله‌ی مرجع دانست. مقایسه پروفیل تغییر شکل پانل بعد از انفجار نیز در شکل ۷ قابل مشاهده است.

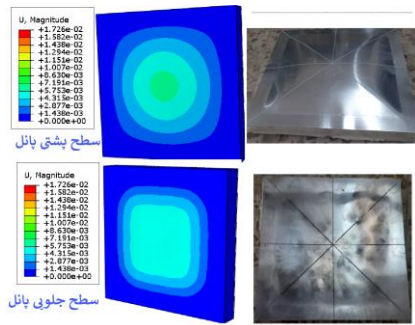
از آنجایی که مسئله دارای تقارن صفحه‌ای است اما به دلیل استفاده از روش کانوپ لازم است تا هندسه مسئله به طور کامل مدل شود، همچنین تنها یک مربع به ضلع ۲۵ سانتیمتر از پانل در معرض موج است.

یکی از موارد اصلی در شبیه‌سازی عددی بررسی مستقل از مش بودن پاسخ است. برای رسیدن به تعداد مطلوب المان‌ها یک پارامتر اصلی که هدف تحلیل بوده در نظر گرفته می‌شود (مثلاً تنش بیشینه، یا جابجایی در نقطه میانی ورق). در گام بعد تعداد المان‌ها را دو برابر کرده (ابعاد هر المان نصف می‌شود) و مجدداً حل تکرار می‌شود تا تأثیر این ریز کردن مش بر پارامتر مذکور سنجیده شود. کار را تا جایی ادامه می‌یابد که یک مصالحه بین زمان و تعداد المان برقرار شود، به عبارت دیگر با افزایش تعداد المان‌ها تغییر خاصی در جواب‌ها ایجاد نشود، و در واقع هزینه محاسبات بر تغییرات جواب‌ها غلبه کند. با توجه به جدول ۴ اختلاف مقدار جابجایی برای تغییر سایز مش از ۱/۵ به ۱ میلی‌متر ۰/۱۲ میلی‌متر است که مقداری ناچیز است؛ بنابراین برای هسته‌ی فوم و نیز ورق‌های رویه سایز مش ۱/۵ میلی‌متر را به عنوان سایز مش بهینه انتخاب می‌شود.

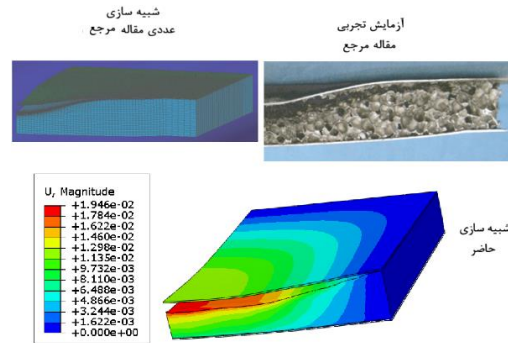
#### جدول ۴- بررسی عدم وابستگی به مش

سایز مش (mm)	۵	۳	۲	۱/۵	۱
جابجایی مرکز ورق (mm)	۱۶/۶۴	۱۷/۸۶	۱۷/۶۳	۱۸/۰۲	۱۷/۹۰

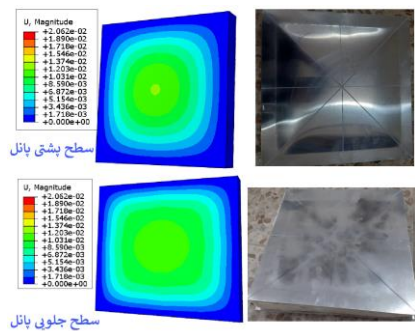
المان‌ها از نوع مکعبی ۸ نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. ورق‌های رویه و هسته جدا از همدیگر هستند و بین آن‌ها تماس با ضریب اصطکاک ۰/۳ تعریف شده است.



شکل ۱۰- مقایسه آزمایش سوم با شبیه سازی



شکل ۷- مقایسه تغییر شکل شبیه سازی



شکل ۱۱-مقایسه آزمایش چهارم با شبیه سازی

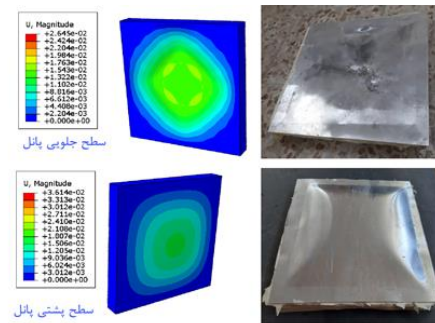
نتایج شبیه سازی با آزمایش های تجربی انجام گرفته در جدول ۶ مقایسه شده است. مشاهده می شود که خطای به دست آمده برای شبیه سازی در اکثر موارد کمتر از ۱۰ درصد است و با توجه به خطاهایی که در ایجاد شرایط تکیه گاهی ایده آل (در اینجا تکیه گاه کاملاً گیردار) و اندازه گیری در آزمایشگاه همیشه وجود دارد نتایج قابل قبول است.

جدول ۶- مقایسه نتایج خیز مرکز ورق آزمایش و

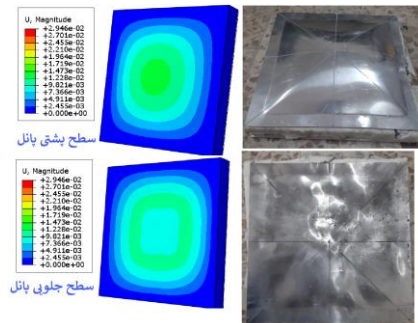
شبیه سازی			
شماره آزمایش	آزمایش (mm)	شبیه سازی (mm)	درصد اختلاف
۱	۱۷/۵	۱۸/۰۱	۲/۸
۲	۱۴	۱۴/۷۳	۵/۲
۳	۷/۵	۷/۱۹	۴/۲
۴	۱۱	۱۲/۰۳	۸/۵

#### ۴-۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی

به منظور صحت سنجی نتایج شبیه سازی ابتدا نتایج شبیه سازی با آزمایش های تجربی انجام شده مقایسه می گردد. شکل های ۸ تا ۱۱ کانتور جابجایی سطح رویه ی جلویی و پشتی پانل ها در آزمایش های ۱ تا ۴ را نشان می دهد. مقدار جابجایی مرکز رویه ی پشتی نمونه ها به منظور مقایسه با شبیه سازی عددی اندازه گیری شده است.

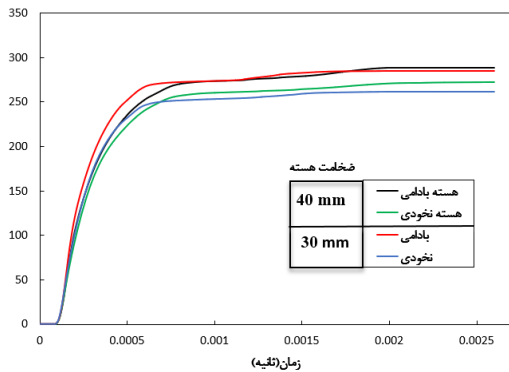


شکل ۸- مقایسه آزمایش اول با شبیه سازی



شکل ۹- مقایسه آزمایش دوم با شبیه سازی

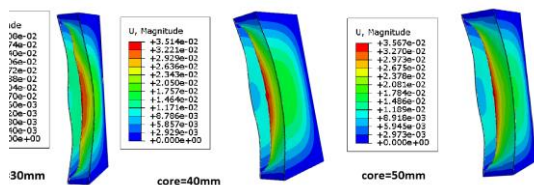




شکل ۱۳- انرژی جذب شده در پانل با هسته‌های مختلف

خصوصیات هندسی پانل قطعاً تأثیر زیادی در جذب انرژی و عملکرد پانل دارد، در نمودارهای شکل ۱۲ تأثیر تغییر در ضخامت هسته برای هر دو نوع هسته با چگالی ۳۷۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب (به ترتیب نخودی و بادامی) مشاهده می‌شود.

باتوجه به تصویر با افزایش ضخامت هسته پروفیل تغییر شکل یکنواخت‌تری ایجاد شده است. برای مقایسه جابه‌جایی اجزای پانل برای حالت‌های با ضخامت هسته مختلف پانل با پوک‌ه بادامی در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. باتوجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت باوجود اینکه جابه‌جایی ورق پشتی اندکی کاهش یافته، اما جابه‌جایی هسته بیشتر شده است (در واقع هسته فشرده‌تر شده). نمودار شکل ۱۵ انرژی جذب شده در اثر تغییر شکل پلاستیک در کل پانل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، پانل با ضخامت بیشتر هسته انرژی بیشتری جذب می‌شود.

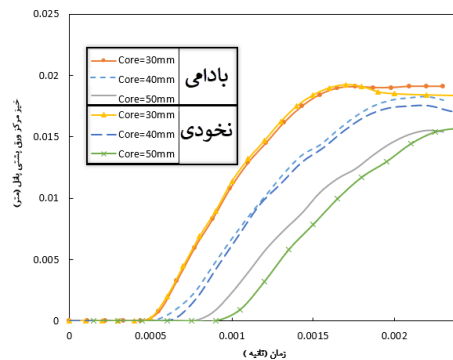


شکل ۱۴- کانتور جابه‌جایی اجزای پانل

### ۳-۴- بحث و مطالعات پارامتریک

پارامترهای مختلفی در میزان جذب انرژی و تغییر شکل پانل مؤثر هستند. در این قسمت پارامترهای چگالی، ضخامت هسته، ضخامت رویه‌ها و جنس رویه‌ها که جزء مؤثرترین پارامترها در جذب انرژی و تغییر شکل پانل هستند، بررسی شده‌اند.

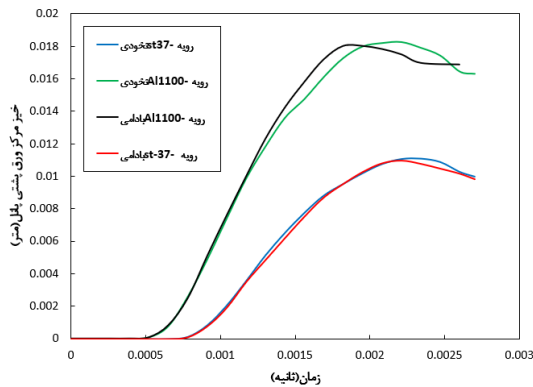
همان‌طور که ذکر شد، هسته پانل‌های ساندویچی مورد بررسی در این پژوهش دارای دو چگالی مختلف ۳۷۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است که نمودارهای تنش کرنش این دو نوع هسته در شکل و ارائه شد. در این قسمت تأثیر چگالی در جذب انرژی و جابه‌جایی لایه پشتی پانل بررسی می‌شود. در شکل ۱۲ جابه‌جایی رویه‌ی پشتی برای پانل‌ها با دانه‌بندی و ضخامت هسته‌ی مختلف مقایسه شده است. همه‌ی پانل‌های این تصویر دارای رویه‌ی آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر هستند.



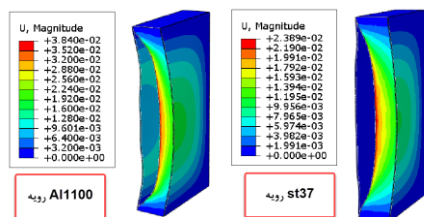
شکل ۱۲- بررسی تأثیر سایز دانه‌ها

باتوجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که پانل‌های با هسته پوک‌ه‌ی نخودی که چگالی بیشتری نیز دارد، تغییر شکل مرکز ورق پشتی اندکی کمتر است. انرژی جذب شده در پانل با هسته ساخته شده از پوک‌ه‌ی نخودی و بادامی نیز برای پانل‌ها با ضخامت هسته متفاوت در شکل ۱۳ مقایسه شده است.

است. در شکل ۱۷ جابه‌جایی رویه‌ی پشتی پانل برای دو جنس متفاوت رویه در پانل با هسته‌ی نخودی (چگالی ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و بادامی (چگالی ۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب) مقایسه شده است. ضخامت هسته برای تمام موارد ۳۰ میلی‌متر و ضخامت رویه‌ها ۱ میلی‌متر می‌باشد. فاصله‌ی خرج انفجاری نیز از رویه‌ی جلویی پانل ۲۰ سانتیمتر است. کانتورهای جابه‌جایی ورق برای دو حالت با رویه‌های آلومینیوم و فولاد نیز در شکل ۱۸ ارائه شده‌اند. باتوجه‌به کانتورها مشخص است که در حالت با رویه‌ی آلومینیومی فشردگی هسته بیشتر است؛ بنابراین انتظار می‌رود، جذب انرژی بیشتری در شرایط مساوی داشته باشد. در شکل ۱۷ نیز مشاهده می‌شود که جابه‌جایی پانل‌های با رویه فولادی به مراتب کمتر است.

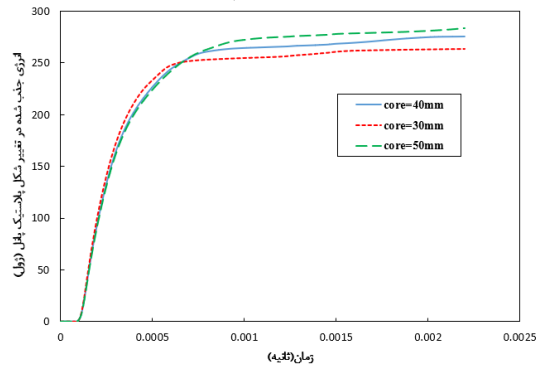


شکل ۱۷- جابه‌جایی ورق پشتی پانل برای جنس‌های مختلف رویه



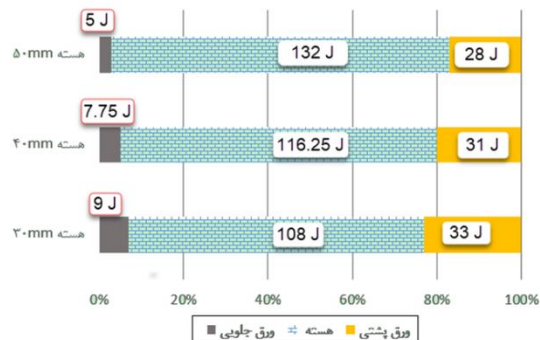
شکل ۱۸- کانتور جابه‌جایی پانل با رویه‌ی مختلف

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، پانل با رویه فولادی تغییر شکل کمتری داشته است، همچنین تصویر نشان می‌دهد تأثیر تغییر رویه در هر دو چگالی هسته (بادامی و نخودی) یکسان است. در شکل ۱۹ نیز میزان انرژی جذب شده توسط پانل‌ها در اثر تغییر شکل پلاستیک مشاهده می‌شود.



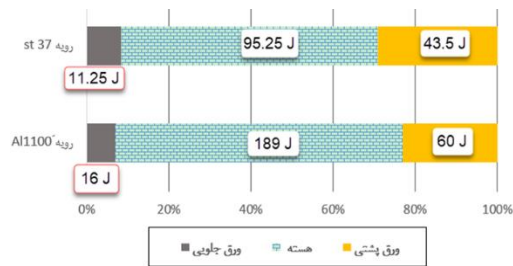
شکل ۱۵- انرژی جذب شده کل پانل با ضخامت مختلف

پانل دارای سه عضو اصلی ورق رویی (ورقی که موج ابتدا به آن برخورد می‌کند)، هسته و ورق پشتی است. در شکل ۱۵ انرژی جذب شده توسط کل پانل یعنی هر سه این اجزا مشاهده شد. هر یک از این اجزا مقداری از انرژی موج انفجار را با تغییر شکل پلاستیک جذب می‌کند. به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از اجزا انرژی جذب شده با تغییر شکل پلاستیک توسط هر یک از اجزای پانل برای نمونه‌های پانل با هسته‌ی بادامی و رویه‌ی آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر با ضخامت هسته‌ی مختلف در شکل ۱۶ مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت هسته نقش هسته در جذب انرژی افزایش یافته و در مقابل نقش ورق پشتی و جلویی کاهش یافته است.



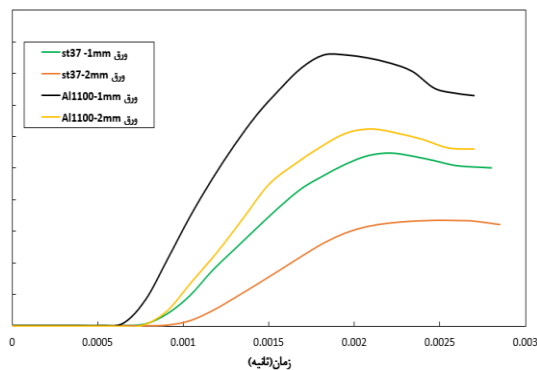
شکل ۱۶- تغییر درصد انرژی جذب شده در اجزای پانل با تغییر ضخامت هسته

دو جنس رویه مختلف استفاده شده در پانل‌ها در این بخش مقایسه شده‌اند. تغییر در جنس رویه برای هر دو چگالی هسته و برای هسته‌ها با ضخامت‌های مختلف بررسی شده



شکل ۲۰- درصد انرژی جذب شده هر بخش از پانل برای دو نوع رویه‌ی مختلف

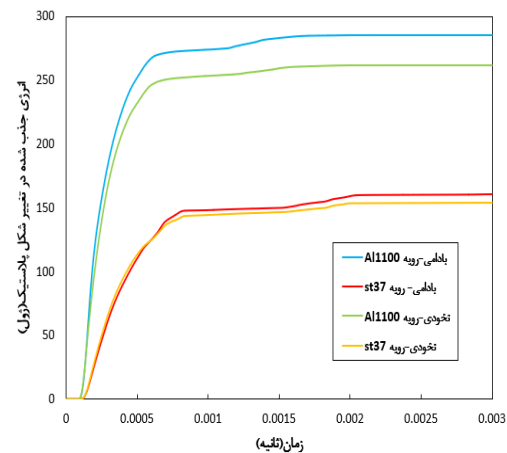
دو ضخامت مختلف ۱ و ۲ میلی‌متر برای رویه‌های پانل در نظر گرفته شده، در این بخش به بررسی تأثیر ضخامت ورق‌ها برای هر دو نوع ورق آلومینیومی و فولادی پرداخته شده است. در شکل ۲۱ جابه‌جایی مرکز رویه‌ی پشتی برای پانل‌ها با هسته بادامی به ضخامت ۴ سانتیمتر و رویه‌های مختلف برای ۳۰ گرم خرج C4 در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری مشاهده می‌شود.



شکل ۲۱- مقایسه پانل با رویه‌های مختلف

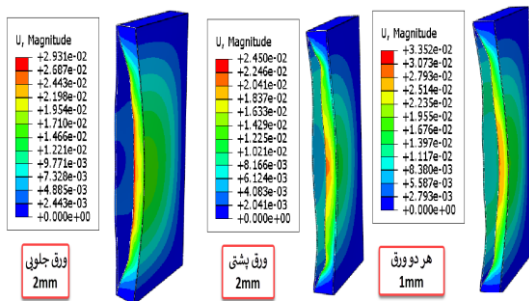
مشخص است که ورق ضخیم‌تر و دارای استحکام بیشتر یعنی ورق فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر کمترین جابه‌جایی را دارد، همچنین باتوجه‌به شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که ورق‌های ضخیم‌تر و محکم‌تر نوسان کمتری دارند و نمودار خیز آنها یکنواخت‌تر است. انرژی تلف شده به شکل تغییر شکل پلاستیک در پانل با هسته‌ی بادامی برای رویه‌های مختلف در شکل ۲۲ مقایسه شده است.

مشاهده می‌شود که در پانل‌های با رویه‌ی استیل جذب انرژی کمتری صورت گرفته است. همچنین از شکل می‌توان دریافت که در پانل‌های با رویه‌ی استیل، نقش چگالی (نوع هسته) کمتر است، به طوری که مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده در پانل‌های با هسته‌ی نخودی و بادامی با رویه‌ی فولادی بسیار نزدیک به هم است، در صورتی که این اختلاف در پانل‌های با رویه‌ی آلومینیومی قابل توجه است. در واقع می‌توان چنین توجیه کرد که باتوجه‌به استحکام بیشتر رویه‌های فولادی و باتوجه‌به استحکام نزدیک به هم هسته‌ها در این حالت تأثیر نوع هسته کمتر شده است.

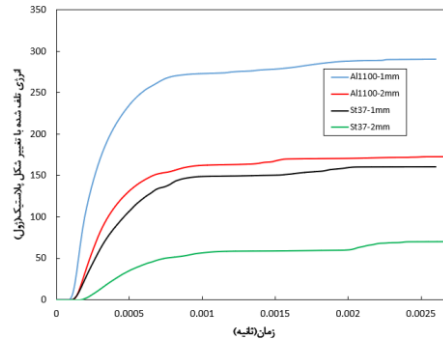


شکل ۱۹- انرژی جذب شده در اثر تغییر شکل پلاستیک برای پانل با رویه‌های مختلف

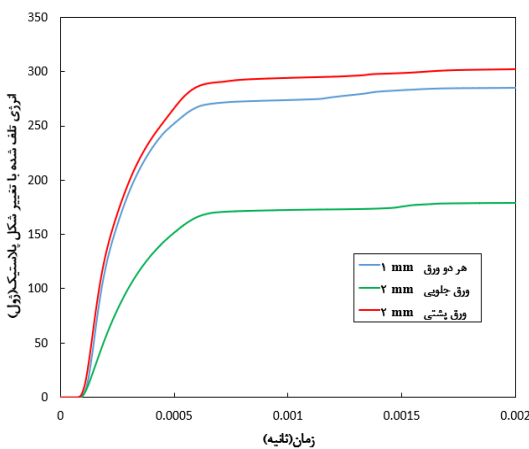
باتوجه‌به استحکام بیشتر رویه‌های فولادی نسب به آلومینیومی تأثیر هریک از اجزای پانل در جذب انرژی انفجار در پانل‌های با رویه‌ی مختلف متفاوت است. در شکل ۱۳ میزان جذب انرژی هر بخش از پانل برای دو نوع رویه‌ی مختلف مقایسه شده است. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در پانل با رویه‌ی فولادی تأثیر هسته در جذب انرژی مقداری کمتر شده است، این موضوع در واقع تغییر شکل کمتر هسته که در شکل نیز مشاهده می‌شود را نیز تأیید می‌کند.



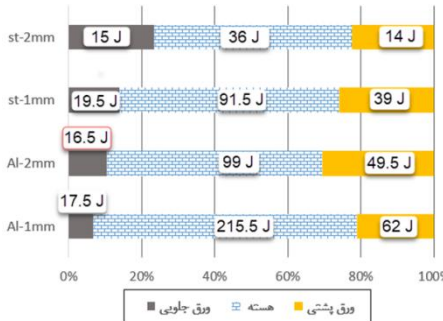
شکل ۲۴- مقایسه تأثیر استفاده از ضخامت مختلف در رویه ها



شکل ۲۲- مقایسه ی انرژی جذب شده در پانل با رویه های مختلف



شکل ۲۵- مقایسه تأثیر استفاده از ضخامت مختلف برای رویه ها در جذب انرژی در پانل



شکل ۲۳- سهم اجزای پانل در جذب انرژی برای پانل با رویه های مختلف

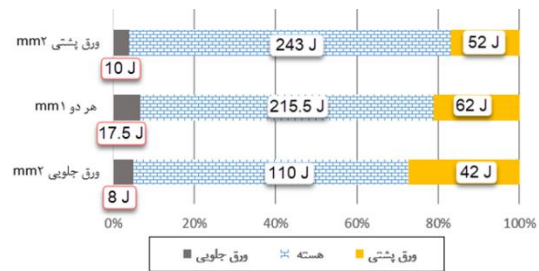
سهم هر یک از اجزای پانل در جذب انرژی نیز در شکل ۲۶ مقایسه شده است. باتوجه به تصویر در حالتی که لایه ی پشتی ضخامت بیشتری دارد نقش هسته در جذب انرژی افزایش یافته است. باتوجه به این نمودار و نمودار شکل ۲۵ مشخص می شود که این حالت (ورق پشتی ضخیم تر) عملکرد مطلب تری دارد. در واقع در این حالت لایه ی ضخیم پشتی باعث می شود که هسته بهتر فشرده شود و نقش بیشتری در جذب انرژی داشته باشد. در حالتی که ورق پشتی دو میلیمتر و ورق جلویی یک میلیمتر باشد، نسبت به حالتی که ورق جلویی دو میلیمتر و ورق پشتی یک میلیمتر است، مقدار جذب انرژی توسط هسته ۱۲۰ درصد افزایش پیدا می کند.

نوع دیگری از چیدمان که می توان بررسی کرد، استفاده از رویه ها با ضخامت مختلف در جلو و پشت پانل است. برای بررسی این حالات سه پانل در نظر گرفته شده، همه ی پانل ها دارای هسته ی با پوکه ی بادامی هستند و ضخامت هسته ی آنها ۳۰ میلیمتر است و در معرض ۳۰ گرم خراج انفجاری C4 در فاصله ۲۰ سانتیمتری قرار گرفته اند. رویه ها از جنس آلومینیوم است. در حالت اول هر دو رویه به ضخامت ۱ میلیمتر هستند، در حالات بعدی یکبار رویه ی جلویی و بار دیگر رویه ی پشتی پانل ضخامت ۲ میلیمتر دارد. کانتورهای جابه جایی این سه حالت پانل در شکل ۲۴ مقایسه شده است. انرژی تلف شده با تغییر شکل پلاستیک در این سه حالت پانل در شکل ۲۵ مقایسه شده است. باتوجه به شکل ۲۵ مشخص است که انرژی تلف شده در این سه حالت اختلاف قابل توجهی دارند. کمترین حالت جذب برای پانل با رویه ی جلویی ضخیم تر است و بهترین حالت پانل با رویه ی پشتی ضخیم تر است.

پانل با رویه‌ی آلومینیومی حدود ۷۲ درصد بیشتر است. با انتخاب رویه از جنس آلومینیوم، در حالتی که ورق پشتی دو میلیمتر و ورق جلویی یک میلیمتر باشد، نسبت به حالتی که ورق جلویی دو میلیمتر و ورق پشتی یک میلیمتر است، مقدار جذب انرژی توسط هسته ۱۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. در واقع می‌توان گفت، اگر پانل سازه‌ی اصلی باشد جهت جلوگیری از تخریب بهتر است از رویه فولادی استفاده کرد، اما در صورتی که پانل محافظ سازه‌ی اصلی باشد بهتر است از رویه آلومینیومی استفاده کرد تا با جذب انرژی بیشتر مانع انتقال انرژی موج به سازه‌ی اصلی شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد، پانل با رویه‌ی پشتی ضخیم‌تر عملکرد بهتری در جذب انرژی انفجار دارد، زیرا در این حالت ورق پشتی به راحتی تغییر شکل نمی‌دهد. این موضوع سبب می‌شود، هسته‌ی لهیدگی بیشتری داشته باشد و جذب انرژی بیشتری در هر سته صورت گیرد. با توجه به نتایج مشخص شد که با افزایش استحکام یا ضخامت رویه‌ها نقش هسته در جذب انرژی کمتر می‌شود.

#### ۶- مراجع

- [1] Zenkert D (1995) An Introduction to Sandwich Construction. EMAS Publ. Chameleon Press LTD, London, UK.
- [2] Levy A (1999) Shock waves interaction with granular materials. Powder Technol 103(3): p. 212-219.
- [3] Britan A, Ben-Dor G, Igra O, Shapiro H (2001) Shock waves attenuation by granular filters. Int J Multiphas Flow 27(4): 617-634.
- [4] Nesterenko V (2002) Shock (blast) mitigation by "soft" condensed matter. MRS Online Proceedings Library Archive.
- [5] Hangai Y, Kato H, Utsunomiya T, Kitahara S, Kuwazuru O, Yoshikawa N (2012) Effects of porosity and pore structure on compression properties of blowing-agent-free aluminum foams fabricated from aluminum alloy die castings. Mater Trans 53(8): 1515-1520.
- [6] Shim C, Yun N, Yu R, Byun D (2012) Mitigation of blast effects on protective structures by aluminum foam panels. Metals-Basel 2(2): 170-177.
- [7] Yazici M, Wright J, Bertin D, Shukla A (2014) Experimental and numerical study of foam filled corrugated core steel sandwich structures subjected to blast loading. Compos Struct 110: 98-109.



شکل ۲۶- درصد سهم هر یک از اجزا در جذب انرژی در پانل با ضخامت مختلف رویه‌ها

در آزمایش پنجم، هسته بدون اضافه شدن پوک‌ه معدنی ساخته شده است. در این آزمایش مطابق شکل ۲۷ مقدار جابجایی مرکز صفحه پشتی، ۳۱ میلیمتر اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج آزمایش دوم و پنجم نشان می‌دهد که با اضافه شدن پوک‌ه معدنی به فوم پلی یورتان، مقدار جابجایی مرکز صفحه پشتی حدود ۵۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲۷- پانل با هسته فوم پلی یورتان پس از انجام تست

#### ۵- نتیجه‌گیری

با اضافه نمودن پوک‌ه معدنی به فوم پلی یورتان، مقدار جابجایی مرکز صفحه پشتی، حدود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. با استفاده از پوک‌ه نخودی به جای پوک‌ه بادامی (افزایش ۲۰ درصدی مقدار پوک‌ه در ترکیب هسته)، استحکام هسته در حالت شبه استاتیک حدود ۴۳ درصد افزایش می‌یابد، با این وجود نتایج آن‌ها در بارگذاری انفجاری نزدیک به هم است، بطوریکه در پانل‌ها با هسته پوک‌ه‌ی ساینز نخودی تغییر شکل، فقط در حدود ۵ درصد کمتر است. در پانل‌های با رویه فولادی تغییر شکل به طور قابل ملاحظه‌ای (حدود ۷۰ درصد) از پانل با رویه آلومینیوم کمتر است؛ اما انرژی جذب شده در

- [۱۷] سیاح بادخور و همکارانش (۱۳۹۹). "مطالعه عددی و بهینه‌سازی رفتار ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از روش سطح پاسخ. مهندسی مکانیک." مجله مهندسی مکانیک امیرکبیر، سال پنجاه و دوم شماره ۱۰.
- [۱۸] پیمان، صفا، علی، ابراهیم‌زاده. (۱۳۹۹) " بررسی عددی تأثیر هندسه بر میزان جذب انرژی پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری." فصلنامه علمی علوم و فناوریهای پدافند نوین. دوره ۱۱، شماره ۴.
- [19] Rahmani M, Petrudi A M (2021) Experimental and numerical optimization study of shock wave damping in aluminum panel sandwich. *Frattura ed Int Str* 15(55): 88-109.
- [20] Rahmani M, Petrudi A M (2020) Optimization and experimental investigation of the ability of new material from aluminum casting on pumice particles to reduce shock wave. *Periodica Polytech Mec Eng* 64(3): 224-232.
- [۲۱] مسعود رحمانی، علیرضا نذاف اسکوئی، حسین خدارحمی، روح اله حسینی (۱۳۹۹) بررسی تجربی و عددی میرایی موج انفجار با استفاده از پنل ساندویچی با هسته‌ی مواد دانه‌ای. مجله علمی- پژوهشی مواد پر انرژی، سال ۱۵، شماره ۱، پیاپی ۴۵:۵۳-۶۶.
- [۲۲] فراهت، احمدی بروغنی، و سید یوسف (۱۳۹۶). " بررسی رفتار فوم کامپوزیتی A356/SiCp تحت بار ضربه ای با سرعت پائین." مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها دوره ۷، شماره ۲ صفحه: ۱۲۹-۱۴۷.
- [23] Sahu S, Mondal D P, Goel M D, Ansari M Z (2018) Finite element analysis of AA1100 elasto-plastic behaviour using Johnson-Cook model. *Mat Today: Proc*, 5(2), 5349-5353.
- [24] Öztürk G (2010) Numerical and experimental investigation of perforation of ST-37 steel plates by oblique impact. (Master's thesis, Middle East Technical University).
- [25] Zhu F, Zhao L, Lu G, Wang Z (2008) Structural response and energy absorption of sandwich panels with an aluminium foam core under blast loading. *Adv Struct Eng* 11(5): 525-536.
- [۸] خندابی و همکارانش (۱۳۹۷). "مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و رویه در پانل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری." مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها، دوره ۸، شماره ۳: صفحه ۹۱-۱۰۶.
- [9] Uday C, Varma C S T, Varma B N K, Ramya M, and Padmanabhan K (2014) The Influence of Rigid Foam Density on the Flexural Properties of Glass Fabric/epoxypolyurethane Foam Sandwich Composites. *ChemTech* 6(6) : 3314-3317.
- [10] Rotariu A N, Dima C, Trană E, Enache C, Timplaru F, Matache L C (2016) Uninstrumented measurement method for granular porous media blast mitigation assessment. *Exp Techniques* 40(3): 993-1003.
- [11] Zhou T, Zhang P, Xiao W, Liu J, Cheng Y (2019) Experimental investigation on the performance of PVC foam core sandwich panels under air blast loading. *Compos Struct* 226: 111081.
- [12] Hatami H, Hosseini M, Yasuri AK (2019). Perforation of thin aluminum targets under hypervelocity impact of aluminum spherical projectiles. *Materials Evaluation*. Mar 1;77(3):411-22.
- [13] Ghodsbin Jahromi A, Hatami H (2018). Numerical behavior study of expanded metal tube absorbers and effect of cross section size and multi-layer under low axial velocity impact loading. *Amirkabir J of Mech Eng*.;49:685-96.
- [14] Sun G, Wang E, Zhang J, Li S, Zhang Y, Li Q (2020) Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different facesheets and core gradients subjected to blast impulse. *Int J Impact Eng*, 135: 103327.
- [15] Bloodworth-Race S, Critchley R, Hazael R, Peare A, Temple T (2021) Testing the blast response of foam inserts for helmets. *Heliyon* 7(5): e06990.
- [۱۶] حاتم‌پور و همکارانش (۱۳۹۹). "بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده با فوم پلیمری تحت بارگذاری انفجاری." مهندسی مکانیک مدرس. ۲۰ (۱۱): ۲۶۷۸-۲۶۷۱.