



مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و روبه در پانل‌های ساندویچی با هسته فوم و روبه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری

رضا خندابی^۱، حسین خدارحمی^۲، روح‌اله حسینی^{۳*} و مجتبی ضیاء شمامی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

^۴ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

چکیده

پانل‌های ساندویچی معمولاً به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بالا، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، صنایع دریایی و خودروسازی دارند. این مطالعه به بررسی استحکام و کارایی پانل‌های متشکل از فوم‌های پلی‌یورتان با چگالی کم که بین دو پوسته آلومینیومی ساندویچ شده می‌پردازد. در این مقاله، با تهیه فوم‌های پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، با استفاده از دستگاه شاک تیوب انفجاری و انجام تعدادی آزمایش انفجاری هدفمند، اثر ضخامت فوم در مقدار جابجایی سطح پشتی ساختار ساندویچی و میزان جذب انرژی آن، مورد مطالعه قرار گرفته است؛ همچنین با استفاده از نتایج آزمایش فشار انجام شده روی فوم، شبیه‌سازی سازه ساندویچی تحت بار انفجاری به کمک نرم‌افزار اتوداین انجام شده است. مقایسه نتایج بیانگر این است که بین نتایج تجربی و عددی، تطابق خوبی وجود دارد. بررسی‌های تجربی و مطالعات پارامتریک انجام شده، نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت فوم و ضخامت روبه پشتی ساختار ساندویچی، جابجایی روبه پشتی کاهش یافته و میزان جذب انرژی آن افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری؛ پانل ساندویچی؛ فوم پلی‌یورتان؛ جذب انرژی؛ شاک تیوب.

Experimental and Numerical Study of Core and Face-Sheet Thickness Effects in Sandwich Panels with Foam Core and Aluminum Face-Sheets Subjected to Blast Loading

R. Khondabi¹, H. Khodarahmi², R. Hosseini^{3,*}, M. Zia Shamami⁴

¹ MS.c. Student, Mech. Eng., Imam Hossein Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Imam Hossein Univ., Tehran, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng., Imam Hossein Univ., Tehran, Iran.

⁴ Ph.D. Student, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran.

Abstract

Sandwich panels, due to high strength to weight ratio and energy absorption properties, are widely used in various industries including aerospace industries, marine and automotive industries. This study explored the strength and performance of panels composed of low-density polyurethane foam core sandwiched between two aluminum skins. In this article several aluminum sandwich panels with polyurethane foam core having different thickness were designed and tested using a shock tube facility. Some blast test were performed in order to determine the effects of foam thickness on displacement of back face-sheet and energy absorption of sandwich structures. Also using the compression test results performed on the foam, numerical simulation using Autodyn software were performed. There was a good agreement between experimental investigation and numerical results. Using experimental investigation and parametric studies, it is shown that the amount of displacement of back face-sheet of sandwich structures is decreased and energy absorption is increased as foam and back face-sheet thickness is increased.

Keywords: Blast Loading; Sandwich Panel; Polyurethane Foam; Energy Absorption, Shock Tube.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱-۷۷۱۰۵۱۰۵

آدرس پست الکترونیک: kprhosseini@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

ساختارهای ساندویچی با هسته سلولی (مانند فوم پلیمری)، علاوه بر کاربردهای سازه‌ای، به عنوان جاذب‌های ضربه و انرژی نیز به کار می‌روند. بحث جذب انرژی سازه‌های ساندویچی، به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بسیار بالا، مورد توجه محققان واقع شده است. ساختار سلولی این سازه‌ها، قابلیت تغییر شکل‌های پلاستیکی بزرگ در مقابل بارهای انفجاری را داراست که با توجه به چنین خصوصیتی، مقدار زیادی از انرژی ناشی از برخورد ایمپالس، قبل از این جذب می‌شود که موجب تخریب سازه گردد [۱].

مواد و سازه‌هایی که به عنوان جاذب‌های انرژی به کار می‌روند، عموماً دارای منحنی‌های تنش-کرنش کشیده و یکنواخت می‌باشند. این جاذب‌ها در تنشی که به تنش پایا^۱ معروف است، دچار تغییر شکل پلاستیک شده و انرژی زیادی را جذب می‌نمایند. یک قطعه یا سازه هنگامی به عنوان جاذب انرژی محسوب می‌شود که بتواند بیش‌ترین مقدار کرنش و یا تغییر شکل را داشته باشد. به همین دلیل اکثر جاذب‌های انرژی، اولاً دارای مقدار تنش پایای بالایی بوده و علاوه بر این، منحنی تنش-کرنش آن‌ها نیز بسیار کشیده است. سطح زیر منحنی بیانگر مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم اولیه است؛ بنابراین موادی که منحنی‌های کشیده‌تری داشته باشند، مقدار انرژی بیش‌تری را می‌توانند جذب نمایند [۲].

اکثر کارهای انجام گرفته روی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم فلزی یا هسته لانه زنبوری بوده‌اند. گورپراساد و ماخرجی برنامه آزمایش‌های خود را با انفجار خرج TNT در بالای سطح رویی سازه چندلایه سلولی ساخته شده از فولاد نرم به انجام رسانده‌اند [۳، ۴]. نتایج حاصل بیانگر عملکرد موفق سپر فنا شونده مورد استفاده در کنترل و میرا نمودن امواج تابشی می‌باشند. دیگر گزارش مهم آزمایش‌های انفجاری روی سازه‌های مرکب فناشونده، ماحصل پژوهش میدانی هانسن و همکارانش است [۵]. این محققان

آزمایش‌های خود را با نصب پانل‌های فوم آلومینیوم روی یک آونگ بالستیک و انفجار خرج انفجاری در فاصله از پیش تعیین شده انجام داده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن بوده است که در همه نمونه‌های همراه با پوشش فولادی و نیز در نمونه‌های بدون پوششی که فوم متلاشی نشده است، پانل فومی و ورق فولادی به شکل دوقوسی^۴ درآمدند. ما و یه^۵ نیز با ارائه مدل تحلیلی و المان محدود یک سپر فناشونده با دولایه فوم آلومینیوم با چگالی‌های مختلف، ظرفیت بهبود یافته جذب انرژی و اثرات مثبت آن در جلوگیری از وقوع حالت تقویت امواج شوک را بررسی نموده‌اند [۶]. کاراگیزوا و همکارانش^۶ نیز، نتایج تجربی و عددی پژوهش خود روی بارگذاری انفجاری سازه‌های ساندویچی دایروی با ورق‌های فولادی و هسته‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی و پلی‌استایرن را گزارش نموده‌اند [۷]. مطالعه خیز پوسته^۷ پستی و چگونگی تغییر آن با ایمپالس دریافتی، محققان را به این باور رسانده است که برای پانل‌های با جرم برابر، هسته لانه‌زنبوری عملکرد بهتری نسبت به هسته پلی‌استایرن از خود نشان می‌دهد. شن و همکارانش^۸ با استفاده از پاندول بالستیک رفتار پانل‌های ساندویچی انحنادار را تحت بارگذاری انفجاری بررسی کرده‌اند [۸]. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که این پانل‌ها با توجه به انحنای اولیه، نسبت به سازه‌های یکپارچه و پانل‌های ساندویچی مسطح عملکرد بهتری دارند. تئوبالد و همکارانش^۹ تأثیر نوع هسته و ضخامت پوسته را روی مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی با رویه فولادی بررسی کرده‌اند [۹]. عملکرد پانل‌ها با یک ورق فولادی یکپارچه معادل از نظر وزن مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده مقاومت انفجاری بهتر سازه ساندویچی با رویه نازک‌تر نسبت به ورق فولادی ساده است و پانل‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی، عملکرد بهتری را در محدوده وسیعی از ایمپالس‌ها از خود نشان می‌دهند. یازیزی و همکارانش^۹ به صورت تجربی و عددی تأثیر تزریق فوم داخل هسته لانه زنبوری را روی

⁴ Double-Curved Shape

⁵ Ma and Ye

⁶ Karagiozova et al.

⁷ Shen et al.

⁸ Theobald et al.

⁹ Yazici et al.

¹ Plateau stress

² Guruprasad and Mukherjee

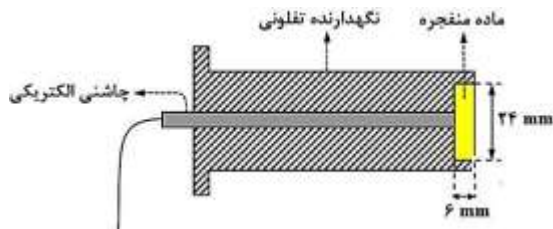
³ Hanssen et al.

فشرده شدن فوم، ارتعاش رویه ورق و جابجایی کلی نسبت به طراحی مرسوم می‌شود. کاهش مشابهی در انرژی جنبشی و ذخیره شده و انرژی کرنشی مخرب وجود داشته است [۱۳]. رامن و همکارانش^۴ پلی‌یورتان الاستومر را برای تقویت سازه‌های بتنی تحت بارگذاری دینامیکی را مورد پژوهش قرار داده‌اند. هدف آن‌ها افزایش جذب انرژی سازه‌های مورد مطالعه در برابر بارگذاری دینامیکی بوده است. آن‌ها تعدادی آزمایش تجربی روی نمونه‌های بتنی پوشیده شده به صورت هشت حالت مختلف از نظر محل قرارگیری و ضخامت‌های پوشش انجام داده‌اند؛ همچنین آزمون خمش سه نقطه تحت شرایط شبه‌استاتیکی و دینامیکی با تغییر نرخ کرنش انجام شده است. پارامترهای ماکزیمم تنش خمشی، کرنش شکست و چگالی انرژی کرنشی برای ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی استفاده شده است. لایه‌های پلیمری با ضخامت ۱ تا ۴ میلی‌متر باعث افزایش ۲/۹ تا ۸/۹ برابری کرنش شکست، ۳ تا ۱۱/۳ برابری چگالی انرژی کرنش و افزایش نهایی تنش موجی ماکزیمم تحت شرایط دینامیکی در مقایسه با پاسخ دینامیکی نمونه بتنی بدون پوشش شده است. علاوه بر این پاسخ دینامیکی نمونه‌های بتنی زمانی بهبود یافته است که پوشش روی دو طرف قرار می‌گیرد [۱۴]. ایمبالزانو و همکارانش^۵ به بررسی طراحی پارامتری و مقایسه‌ای مقایسه‌ای مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی آگرتیک و لانه‌زنبوری پرداخته‌اند. آن‌ها رفتارهای دینامیکی ساختارهای مذکور را به صورت عددی، مورد بررسی قرار داده‌اند. برای تعریف استحکام دینامیکی ساندویچ‌های کامپوزیتی در معرض بارگذاری‌های با نرخ کرش بالا از مدل جانسون کوک استفاده شده است. آن‌ها مطالعات پارامتریک برای ارزیابی عملکرد پانل‌های ساندویچی مختلف تحت بارگذاری ایمپالسی انجام داده‌اند. به دلیل متقارن بودن مدل یک چهارم آن با المان پوسته مدل شده و برای شبیه سازی بارگذاری انفجار از مدل کانوپ استفاده شده است. آن‌ها دریافتند که پانل‌های آگرتیک رفتار لهیدگی بسیار جالبی نشان می‌دهند و بطور مؤثری با بارگذاری دینامیکی سازگاری دارند و مقاومت آن‌ها در برابر ضربه افزایش می‌یابد [۱۵].

مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی بررسی کرده‌اند. آن‌ها سه نوع پانل با هسته‌های لانه زنبوری، فومی و ترکیب لانه زنبوری و فومی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که پر کردن فوم در سلول‌های لانه زنبوری هر دو مقدار ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی را بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد [۱۰]. چانگ و همکارانش^۱ آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی ضربه و انفجار انفجار در نزدیکی پانل‌های ساندویچی آگرتیک با هسته لانه زنبوری را بررسی کرده‌اند. آن‌ها آزمایش دراپ و انفجار را به منظور استفاده از ساندویچ‌های مطرح شده به عنوان محافظ برای پانل‌های بتونی در ترکیب با صفحات محافظ فولادی مرسوم انجام داده‌اند. شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است. محافظ ترکیبی در محافظت سازه‌های بتنی تقویت شده در برابر ضربه‌های شدید و بارهای انفجار نزدیک مؤثر واقع شد. پانل‌های آگرتیک پیشنهاد شده بهتر از پانل‌های لانه‌زنبوری معمولی با اندازه، چگالی و مواد مشابه عمل کردند و جذب انرژی صفحات فولادی یکپارچه را ۲/۵ برابر افزایش دادند [۱۱]. داگرا و همکارش^۲ به بررسی تأثیر پلی‌یورتان ترموپلاستیک تقویت شده با نانولوله کربنی چند دیواره بر پوتین سربازان تحت بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها هدفشان کاهش آسیب پوتین‌های سربازان در معرض انفجار بوده است. پلی‌یورتان ترموپلاستیک، به عنوان جذب کننده انرژی مورد استفاده قرار گرفته و از کامپوزیت کربن-کوولار برای کاهش تأثیر بار انفجاری استفاده شده است. آن‌ها در این مطالعه سه پوتین متفاوت را مورد استفاده قرار داده‌اند. علاوه بر این، خواص مکانیکی این مواد را با استفاده از آزمون‌های کشش بدست آورده‌اند. بهترین خواص مکانیکی با درصد وزنی ۱٪ نانولوله کربنی بدست آمده است؛ در نتیجه پژوهش آن‌ها، بهترین کاهش بار انفجار ۱۲٪ بدست آمده که با پوتین سرباز به طور کامل خنثی شده است [۱۲]. باهی‌الدین و همکارش^۳ رفتار پانل‌های ساندویچی تقویت شده با لایه‌های داخلی پلی‌اوره/ پلی‌اورتان را تحت بارهای انفجاری، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پلی‌اوره بین هسته فوم و رویه بیرونی باعث کاهش

¹ Chang et al.² Dogru et al.³ Bahei-El-Din et al.⁴ Raman et al.⁵ Imbalzano et al.

ساندویچی مورد نظر از فوم پلی‌یورتان با سلول‌های بسته و نسبت چگالی ۸ درصد تهیه شده است. برای اتصال رویه‌ها به هسته از چسب کرافت رازی استفاده شده است.



شکل ۱- شماتیک نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته داخل آن



شکل ۲- نمایی ایزومتریک از یکی از نمونه‌های ساندویچی

برای تعیین رفتار مکانیکی فوم پلی‌یورتان از استاندارد ASTM D1621-00 استفاده شده است [۱۶]. مطابق این استاندارد نمونه با ابعاد $70 \times 80 \times 50$ میلی‌متر ساخته شده است. پس از آماده‌سازی نمونه، آزمایش فشار محوری با دستگاه آزمایش فشار سنتام و با سرعت فک بالایی ۳ میلی‌متر بر دقیقه روی آن انجام شده است (شکل ۳). شکل ۴ منحنی فشار برای فوم پلی‌یورتان با چگالی ۸ درصد، تحت نیروی فشار محوری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فوم سه مرحله کاملاً مجزا را در خلال آزمایش فشار سپری می‌کند. در ابتدا، خمش الاستیک دیواره سلول‌ها، باعث ظهور یک ناحیه الاستیک در منحنی نیرو-جابجایی ماده می‌شود. کماتش و فروریزش پلاستیک سلول‌ها، باعث تشکیل یک ناحیه وسیع و نسبتاً هموار در ادامه ناحیه الاستیک اولیه می‌شود. پس از پایان فروریزش پلاستیک سلول‌ها، ناحیه

در این پژوهش، برای اولین بار به صورت تجربی و عددی عملکرد پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌یورتان در برابر بار انفجاری مورد بررسی قرار گرفته و اثر ضخامت فوم و رویه‌ها در مقدار جابجایی سطح پشتی و میزان جذب انرژی پانل بررسی شده است. پانل‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف ساخته شده و با استفاده از دستگاه لوله شاک انفجاری تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفته‌اند. پس از صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج تجربی، پارامترهای دیگر به صورت عددی بررسی شده‌اند.

۲- بررسی‌های تجربی

۲-۱- خصوصیات مواد اولیه

ماده منفجره مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی انفجار، از نوع C4 است. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. برای ثابت نگه داشتن و قالب‌گیری و ایجاد دیسک خرج با شکل موردنظر، برای هر آزمایش یک نگهدارنده از جنس تفلون ساخته شده است. مقدار ماده منفجره در تمامی آزمایش‌ها، ثابت و برابر ۴ گرم در نظر گرفته شده است. شکل دیسک خرج و قالب آن برای هر آزمایش به شکل یک دیسک استوانه‌ای شکل در نظر گرفته شده و قطر و ارتفاع آن به ترتیب برابر ۲۴ و ۶ میلی‌متر است. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است. این چاشنی در وسط نگهدارنده تفلونی و پشت دیسک خرج قرار می‌گیرد. در شکل ۱ نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته داخل آن نشان داده شده است.

در این پژوهش از رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان جهت ساخت پانل‌های ساندویچی استفاده شده است (شکل ۲). برای اطمینان بهتر از صحت نتایج طبق استاندارد، آزمایش‌ها روی هر نمونه باید چهار مرتبه تکرار شود و از میانگین نتایج استفاده نمود. رویه‌های آلومینیومی برای نمونه‌های ساندویچی از سری AL-6061-T6 انتخاب شده، دارای ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشند. برای هر پانل ساندویچی یک ورق دایروی با قطر ۱۵۴ میلی‌متر برای رویه جلویی و یک ورق مربعی با ابعاد 250×250 میلی‌متر برای رویه پشتی پانل تهیه شده است؛ همچنین هسته سازه‌های

¹ Plastic Collapse

بخش پشتی دستگاه و ابعاد هندسی مربوط به آن نمایش داده شده است. نمونه‌ها روی دهانه لوله به وسیله فیکسچر و پیچ‌هایی محکم شده‌اند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه‌های رویه پشتی سازه ساندویچی تأمین گردد. ماده منفجره نیز با استفاده از نگهدارنده تفلونی در پشت لوله قرار می‌گیرد. مقدار ماده منفجره در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴ گرم در نظر گرفته شده است. فاصله ماده منفجره تا پانل ساندویچی برابر ۶۶۰ میلی‌متر است. با انفجار ماده منفجره، موج شاک تولید شده از طرف لوله هدایت شده و به پانل برخورد کرده و باعث تغییر شکل آن می‌شود.



شکل ۵- نمایشی از دستگاه لوله شاک انفجاری

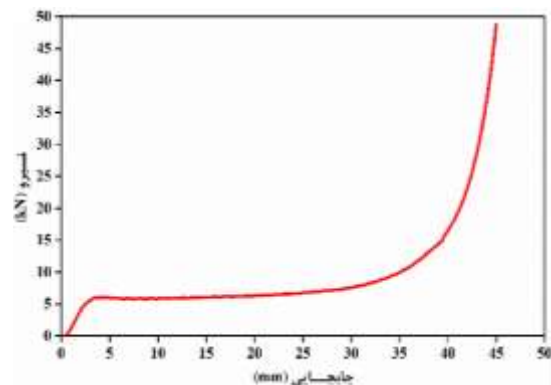
۳- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، برای شبیه‌سازی عددی مسئله از اتوداین^۲ استفاده شده است که یک نرم‌افزار اجزاء محدود غیرخطی صریح با قابلیت‌های دو و سه‌بعدی است. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت و اعمال صحیح شرایط فیزیکی مسئله از قبیل، شرایط مرزی و استفاده از حلگرهای متناسب با نوع مسئله و تعریف برهم‌کنش میان مدل‌های مختلف، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح، به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند.

موسوم به چگالش^۱ فوم آغاز شده که در آن، نزدیک‌تر شدن چگالی فوم به چگالی ماده سازنده خود، باعث افزایش ناگهانی نیرو می‌گردد.



شکل ۳- نمایشی از دستگاه سنتام برای انجام آزمایش فشار محوری و نمونه فوم قرار گرفته در بین دو فک دستگاه



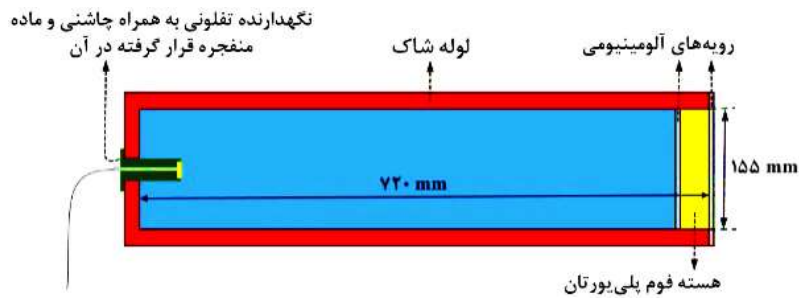
شکل ۴- منحنی فشاری فوم پلی‌یورتان با نسبت چگالی ۸ درصد

۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

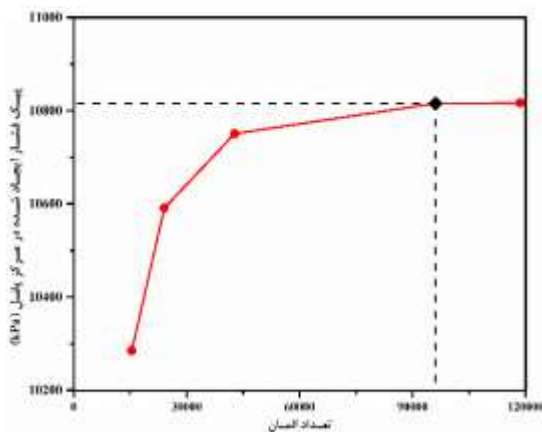
در این تحقیق از دستگاه شاک تیوب انفجاری موجود در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین (ع) جهت تست انفجار استفاده شده است. در شکل ۵ نمایشی از دستگاه لوله شاک انفجاری نشان داده شده است؛ همچنین در شکل ۶ شماتیکی از این دستگاه و نمونه نصب شده روی دهانه آن و نحوه قرارگیری نگهدارنده تفلونی و چاشنی الکتریکی در

² Autodyn

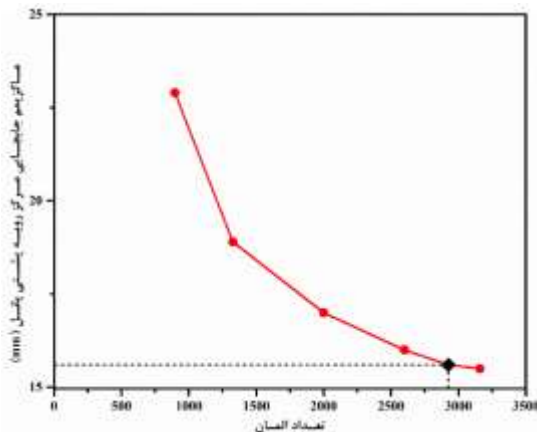
¹ Densification



شکل ۶- شماتیک دستگاه لوله شاک انفجاری و ابعاد هندسی مربوط به آن



شکل ۸- نمودار مقدار پیک فشار ایجاد شده در مرکز پانل بر حسب تعداد انفجارهای هوا



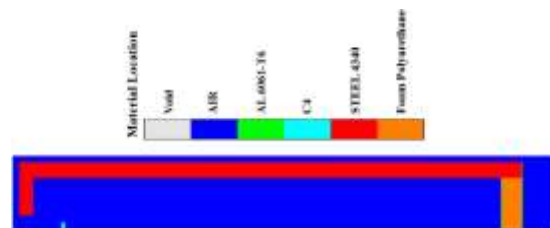
شکل ۹- نمودار مقدار ماکزیمم جابجایی ایجاد شده در مرکز رویه پشتی پانل ساندویچی بر حسب تعداد انفجارهای پانل

حلگرهای استفاده شده برای اجزاء سازه ساندویچی و شاک تیوب از نوع لاگرانژی و برای هوا از نوع اویلری است. یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی، تعریف و اعمال

در گام اول به ایجاد مدل پرداخته شده، سپس به تعریف خصوصیات مواد، ویژگی‌ها، شرایط مرزی و معین کردن ابزارهای کنترلی در محیط نرم‌افزار اتوداین شده است. صحت‌سنجی نتایج عددی نیز، به کمک نتایج تست‌های تجربی انجام شده است.

۳-۱- مدل هندسی

با توجه به تقارن محوری بارگذاری و هندسه مسئله، برای صرفه‌جویی در زمان حل، مدل هندسی به صورت دوبعدی و متقارن محوری در نظر گرفته شده است (شکل ۷). مش مورد نظر در این تحلیل نسبت به ابعاد قطعه و حجم محاسبات به طور مناسب انتخاب گردیده است. برای بررسی همگرایی شبکه از پانل ساندویچی با ضخامت هسته فومی ۳۰ میلی‌متر و در برابر ۴ گرم ماده منفجره استفاده شده است. نتایج به صورت نموداری در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده‌اند. نتایج شکل ۸ حاکی از آن است که برای تعداد انفجارهای ۸۸۰۰۰ و ۱۰۸۶۴۰ پیک فشار ایجاد شده در مرکز پانل تقریباً یکسان‌اند و شیب خط متصل‌کننده این دو نقطه تقریباً صفر است. به همین دلیل تعداد انفجار مناسب برای هوا، ۸۸۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب با توجه به نتایج شکل ۹ تعداد انفجار مناسب برای پانل ساندویچی ۲۹۲۶ انتخاب می‌شود.



شکل ۷- مدل شبیه‌سازی شده

ناخواسته کند، معادله گاز ایده آل در نرم افزار اتوداین به شکل (۲) بازنویسی شده است:

$$p = (\gamma - 1)\rho e + p_{\text{shift}} \quad (2)$$

که در آن p_{shift} مقادیر کوچک فشار به عنوان فشار آغاز است که در این جا فرض شده است که صفر باشد. مقدار γ نیز برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۲- ماده منفجره

برای ماده منفجره از معادله حالت JWL^۴ استفاده شده است. این معادله حالت، انفجار کامل را مدل سازی می کند و به صورت غیر خطی رابطه ای مابین متغیرهای ترمودینامیکی ماده منفجره چه در حالت جامد و چه در حالت تبدیل شده به گازهای حاصل از انفجار ایجاد می کند. هنگام استفاده از این معادله حالت لازم است که زمان شروع انفجار و محل آن توسط کاربر تعریف شود. این معادله حالت فشار حاصل از انفجار را بر اساس حجم نسبی (V) و انرژی داخلی به حجم اولیه (E) تعیین می نماید:

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (3)$$

که A , B , R_1 , R_2 و w پارامترهای ورودی هستند. این معادله حالت معمولاً برای برهم کنش بین فلزات با فشار حاصل از انفجار توصیه می شود. متغیرهای ورودی این معادله حالت برای ماده منفجره C4 در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای معادله حالت JWL

برای ماده منفجره C4 [۱۷]

A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	w
۶۰۹/۷۷	۱۲/۹۵	۴/۵	۱/۴	۰/۲۵

۳-۲-۳- فوم

برای معرفی فوم به نرم افزار، از معادله حالت خطی و معادله استحکام فشردگی فوم^۵ استفاده شده است.

برهم کنش مناسب است. در این شبیه سازی، برای تعیین وضعیت تماس بین اجزاء سازه ساندویچی و شاک تیوب برهم کنش سازه- سازه^۱ و برای برهم کنش هوای محیط اطراف و ماده منفجره با سازه ساندویچی و شاک تیوب از نوع سیال- سازه^۲ استفاده شده است.

با توجه به این که لبه های بیرونی رویه پشتی پانل کاملاً گیردار است، درجات آزادی لبه بیرونی این رویه در تمام جهات، مقید شده است. شرط مرزی لبه های هسته و رویه جلویی پانل به صورت آزاد بوده و دیواره بیرونی لوله شاک به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است؛ همچنین در مرزهای هوا که در تماس با محیط نامتناهی است، از شرط مرزی خروج سیال^۳ استفاده شده است. لازم به ذکر است، در شبیه سازی های انجام شده قدرت چاشنی الکتریکی معادل ۰/۶ گرم ماده منفجره C4 در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۲- انتخاب مدل های مادی و معادلات حالت

برای بدست آوردن نتایج مطلوب در شبیه سازی، انتخاب مدل مادی و معادله حالت مناسب برای تعریف خواص مواد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مدل های مادی رفتار تنش- کرنش و سیلان ماده را بیان می کنند و معادلات حالت ارتباط فشار را با تغییر حجم یا دانسیته نشان می دهند. در اغلب مسائل ضربه از قبیل، نفوذ و انفجار که با انتشار موج شاک همراه است، به دلیل تراکم پذیری مواد، علاوه بر مدل های مادی، معادلات حالت نیز استفاده می شود. در ادامه، معادلات حالت و استحکام به کار رفته به اختصار توضیح داده شده اند.

۳-۲-۱- هوا

برای هوا از معادله حالت گاز ایده آل استفاده شده است. یکی از ساده ترین معادلات حالت برای گاز پلی تروپیک ایده آل در نرم افزار اتوداین معادله بویل- گیلوساک به شکل (۱) است:

$$pV = RT \quad (1)$$

به دلیل مشکلاتی که در مسائل چند ماده ای وجود دارد و مقادیر کوچک فشار ممکن است، ایجاد سرعت های

¹ Lagrange/Lagrange

² Euler/Lagrange

³ Flow-out

⁴ Jons-Wilkins-Lee EOS

⁵ Crushable foam

معادله حالت شوک برای مدل‌سازی شرایط شوک در کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه (۸) است:

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (۸)$$

که در آن فرض شده که $\Gamma \rho = \Gamma_0 \rho_0$ و

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (۹)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (۱۰)$$

متغیرهای ورودی این معادله حالت برای آلومینیوم 6061-T6 در جدول ۲ ارائه شده است.

معادله استحکام جانسون- کوک برای بیان رفتار مواد، در حالتی به کار می‌رود که تحت تأثیر کرنش بالا، تنش بالا و دمای بالا قرار می‌گیرند. این گونه رفتار در برخوردی سرعت بالا و مواد منفجره اتفاق می‌افتد. در این مدل تنش تسلیم با تغییر کرنش، نرخ کرنش و دما تغییر می‌کند. در این مدل تنش تسلیم مطابق رابطه ۱۱ است [۱۸].

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}} \right) \right] [(1 - \hat{\theta}^m)] \quad (۱۱)$$

ثابت‌های A ، B ، C ، n و m مربوط به خواص مواد می‌باشند. پارامترهای مدل فوق برای آلومینیوم 6061-T6 در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای معادله حالت شوک برای آلومینیوم

6061-T6		
Γ	c_0 (m/s)	s
۱/۹۷	۵۲۴۰	۱/۴

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مدل جانسون- کوک برای

آلومینیوم 6061-T6 [۱۹]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\bar{\epsilon}_0$ (1/s)
۳۲۴/۱	۱۱۴/۸	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۱/۳۴	۱

در معادله حالت گاز ایده‌آل فشار تابعی از حجم مخصوص و آنتروپی می‌باشد. در بسیاری از موارد تأثیر تغییرات آنتروپی بسیار کم و قابل صرفنظر کردن است؛ بنابراین فشار، تابعی از دانسیته و یا حجم مخصوص است. این رابطه به شکل رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$p = K \mu \quad (۴)$$

که در آن $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ و K مدول بالک است.

مدل فشردگی فوم معادله‌ای نسبتاً ساده برای مدل نمودن رفتار فوم‌های خردشونده تحت بارهای ضربه‌ای است [۱۸]. در این مدل فشار و تنش بر اساس روابط ۵ و ۶ با توجه به نرخ کرنش اصلاح می‌گردند:

$$p^{n+1} = p^n + K \varepsilon_v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (۵)$$

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^n + 2G(\varepsilon_{ij}^{n+1/2} - \delta_{ij} \varepsilon_v^{n+1/2}) \Delta t^{n+1/2} \quad (۶)$$

در معادلات بالا P فشار، S تنش، K مدول بالک و G مدول برشی است، همچنین ε_v بیانگر نرخ کرنش حجمی است. در این مدل در صورت تجاوز مقدار تنش از تنش پایه در هر المان در یک کرنش حجمی معین، تنش به مقدار مجاز بازگردانده می‌شود. از آنجا که این عمل در هر یک از جهت‌های اصلی به صورت مستقل انجام می‌شود، ضریب پواسون در این مدل برابر صفر فرض می‌گردد و کرنش حجمی از طریق رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\varepsilon_v = \ln \left(\frac{V_0}{V} \right) \quad (۷)$$

در رابطه بالا V_0 حجم اولیه و V حجم پس از انجام تغییر شکل است. چون این مدل ماده معیاری برای خرابی و حذف المان ندارد، از تکنیک فرسایش^۱ المان استفاده شده است.

۳-۲-۴- ورق آلومینیومی

برای ورق آلومینیومی، از معادله حالت شوک و معادله استحکام جانسون- کوک استفاده شده است.

^۱ Erosion

جدول ۶- مقایسه نتایج تجربی و عددی - ماکزیمم جابجایی

درصد اختلاف	ماکزیمم جابجایی مرکز رویه جلویی (mm)		نمونه
	تجربی	عددی	
۱۴/۷	۲۱/۸	۲۵	۱
۱۳/۴	۲۴/۷	۲۸	۲
۲/۸	۲۸/۲	۲۹	۳
۴/۵	۳۰/۸	۲۹/۴	۴

جدول ۷- مقایسه نتایج تجربی و عددی - ماکزیمم

درصد اختلاف	ماکزیمم جابجایی مرکز رویه پشتی (mm)		نمونه
	تجربی	عددی	
۴/۱	۱۹/۴	۱۸/۶	۱
۴/۸	۱۸/۶	۱۷/۷	۲
۸/۲	۱۷	۱۵/۶	۳
۳/۵	۱۴/۳	۱۴/۸	۴

به منظور مقایسه بهتر نتایج تجربی و عددی، نمونه‌های تجربی برش داده شده و سطح مقطع عرضی آن‌ها در کنار مدل‌های شبیه‌سازی قرار داده شده و در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌اند. این شکل نیز نشان دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج تجربی و عددی است.

در شکل ۱۲ نحوه انتشار موج شاک حاصل از انفجار ۴ گرم ماده منفجره C4 در فاصله‌های زمانی ۰/۲ ms نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از انفجار موج حاصل از آن از طریق لوله شاک هدایت شده و در زمان ۰/۴ ms به پانل ساندویچی می‌رسد و باعث تغییر شکل آن می‌شود؛ همچنین پس از برخورد موج شاک به پانل، موج منعکس شده و به سمت مخالف شروع به حرکت کرده و پس از رسیدن به ابتدای لوله شاک مقداری از آن از سوراخ تعبیه شده برای

۳-۲-۵- لوله شاک

برای لوله شاک از معادله حالت خطی و معادله استحکام جانسون- کوک استفاده شده است. پارامترهای ورودی برای فولاد ۴۳۴۰ در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل جانسون- کوک برای فولاد ۴۳۴۰

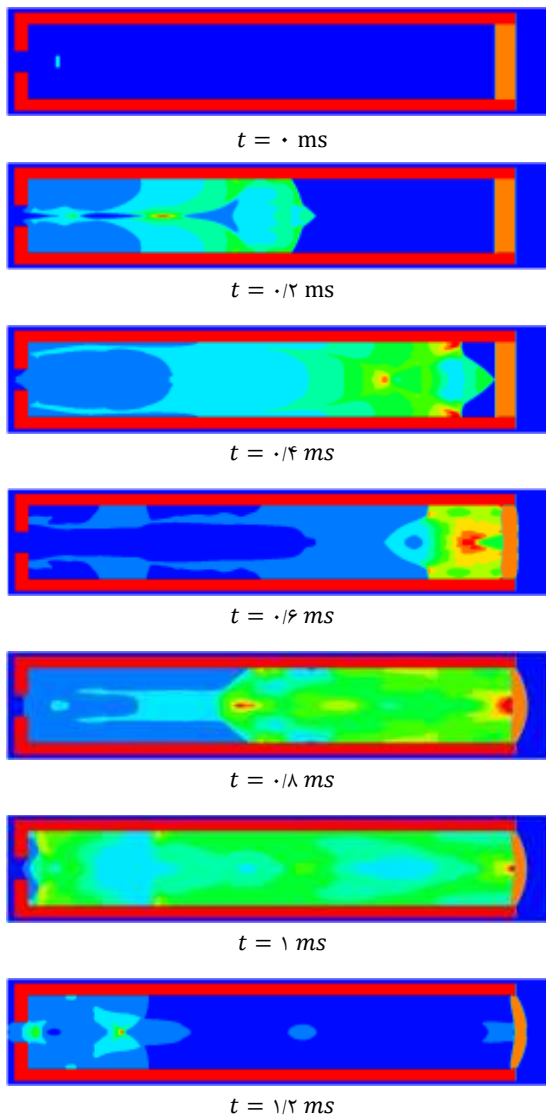
A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\epsilon_0(1/s)$
۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳	۱

۴- نتایج و بحث

در این قسمت تأثیر ضخامت هسته فوم پلی‌یورتان بر میزان جذب انرژی و مقدار جابجایی سطح پشتی سازه ساندویچی تحت ایمپالس حاصل از انفجار ۴ گرم ماده منفجره داخل لوله شاک، مورد مطالعه قرار گرفته است؛ همچنین میزان جذب انرژی توسط اجزای مختلف سازه و نیز انرژی جذب شده بر واحد وزن که بیانگر کارایی سازه در برابر بار انفجاری است استخراج شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بررسی‌های تجربی سازه ساندویچی تحت بار انفجار، در چهار ضخامت متفاوت برای فوم پلی‌یورتان انجام شده که در جدول ۵ مقادیر آن‌ها آمده است. نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، برای ماکزیمم جابجایی مرکز رویه جلویی و پشتی، به ترتیب در جداول ۶ و ۷ ارائه و مقایسه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج تجربی و عددی همخوانی خوبی برقرار است.

جدول ۵- مشخصات نمونه‌های تهیه شده برای بررسی‌های تجربی

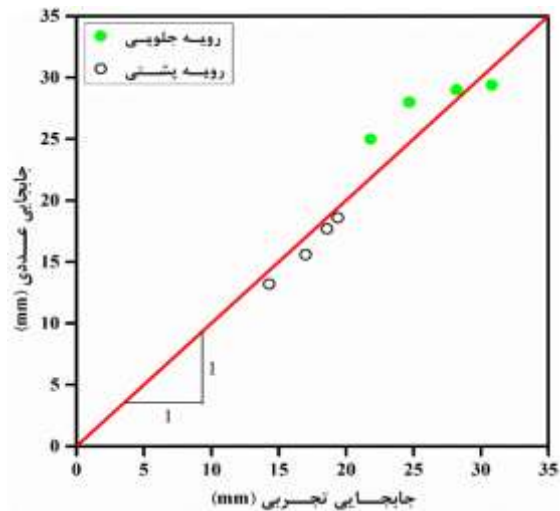
نمونه	ضخامت هسته (mm)
۱	۱۰
۲	۲۰
۳	۳۰
۴	۴۰



شکل ۱۲- نحوه انتقال موج شاک در داخل لوله شاک انفجاری و برخورد آن به پانل ساندویچی

در شکل ۱۳ تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و فشردگی هسته برای یک نمونه از پانل‌ها (پانل شماره ۳) نشان داده شده است. فشردگی هسته فوم از اختلاف بین جابجایی عرضی مرکز رویه جلویی و پشتی محاسبه شده است. با توجه به شکل، قابلیت فشردگی هسته فومی به طور قابل توجهی جابجایی عرضی رویه پشتی را کاهش داده است؛ همچنین پس از اولین پیک جابجایی، نوساناتی جزئی در رویه‌های جلویی و پشتی مشاهده می‌شود، که در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌گردند. لازم بذکر

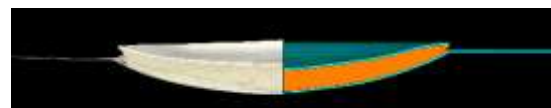
قرارگیری ماده منفجره خارج و مابقی دوباره منعکس شده و به سمت پانل ساندویچی حرکت کرده است. پس از چندین بار رفت و برگشت موج، فشار آن کاهش یافته و در نهایت مستهلک می‌شود.



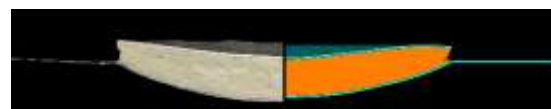
شکل ۱۰- مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با بررسی‌های تجربی



نمونه ۱



نمونه ۲



نمونه ۳



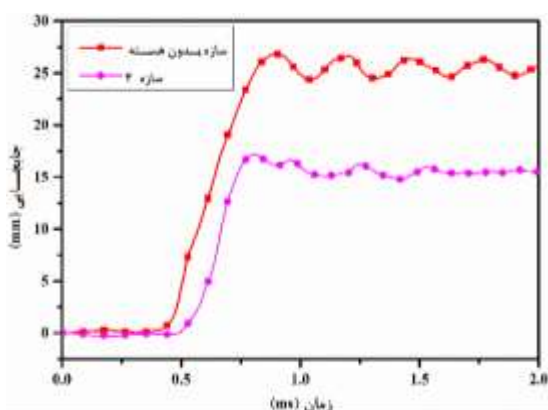
نمونه ۴

شکل ۱۱- مقایسه سطح مقطع عرضی نمونه‌های تجربی با مدل‌های شبیه‌سازی عددی

زمان $0/6ms$ رویه جلو و هسته مقداری از انرژی را جذب کرده‌اند، در حالی که رویه پشتی تقریباً هیچ سهمی در جذب انرژی ندارد و جذب انرژی در آن پس از زمان $0/6ms$ آغاز می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار انرژی جذب شده در هر سه جزء پانل با گذشت زمان افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌گردد. لازم بذکر است که چنین نموداری برای سایر پانل‌ها نیز روند مشابهی دارد و به همین دلیل از آوردن نمودار برای بقیه پانل‌ها صرفنظر شده و در ادامه برای مقایسه جذب انرژی در اجزاء پانل‌های ساندویچی مختلف از مقدار نهایی انرژی جذب شده در هر جزء استفاده شده است.

۴-۱- تأثیر وجود هسته فومی

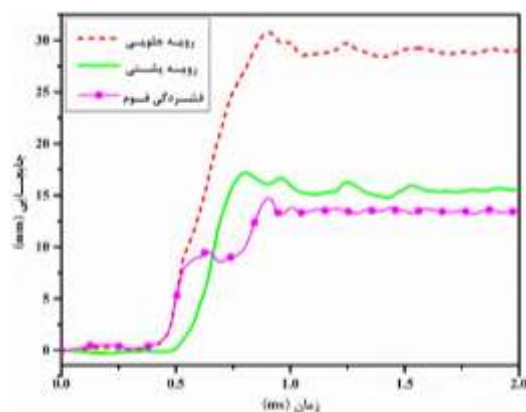
اگر هسته فوم از سازه ساندویچی حذف شود، تنها دو صفحه باقی می‌ماند. با بررسی جابجایی رویه پشتی و جذب انرژی این دو صفحه و مقایسه آن با یک سازه ساندویچی می‌توان تأثیر هسته را مشاهده کرد. در این جا از پانل ساندویچی ۳ برای مقایسه استفاده می‌شود. نتایج عددی مربوط به تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی و میزان انرژی جذب شده به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با دقت در این شکل‌ها می‌توان متوجه شد که هسته در مقدار جابجایی رویه پشتی و میزان جذب انرژی اثر بسزایی دارد، به طوری که مقدار ماکزیمم جابجایی رویه پشتی سازه ساندویچی کاهش $38/6$ درصدی جذب انرژی آن افزایش



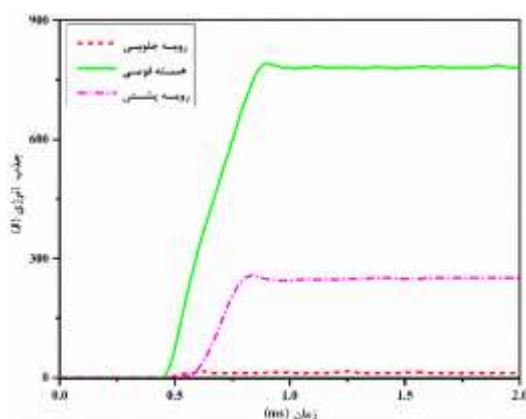
شکل ۱۵- تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۳

است که چنین نموداری برای سایر پانل‌ها نیز روند مشابهی را دارد و به همین دلیل از آوردن نمودار برای بقیه پانل‌ها صرفنظر شده است.

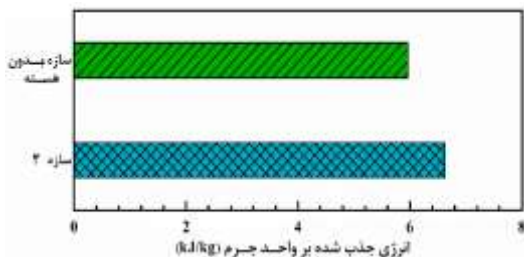
در شکل ۱۴ تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته فومی برای پانل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سهم جذب انرژی رویه جلویی کمتر از رویه پشتی است که دلیل آن متفاوت بودن شرط مرزی آن‌ها است. شرط مرزی رویه جلویی آزاد است و می‌تواند آزادانه به همراه هسته به سمت عقب حرکت کند و به همین دلیل تغییر شکل کمتری در آن رخ داده و در نتیجه جذب انرژی آن کمتر خواهد بود. با توجه به شکل، تا قبل از



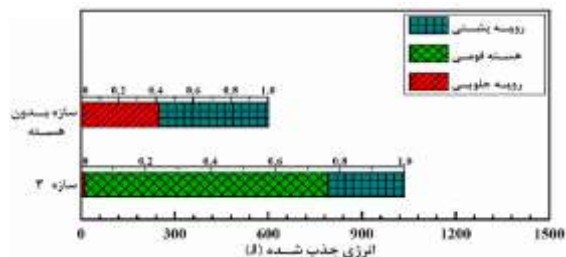
شکل ۱۳- تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و فشردگی هسته پانل ساندویچی شماره ۳



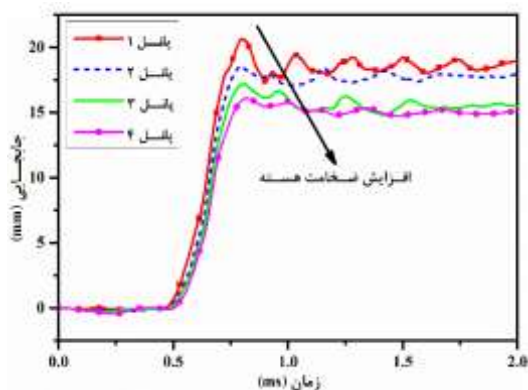
شکل ۱۴- تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته پانل ساندویچی شماره ۳



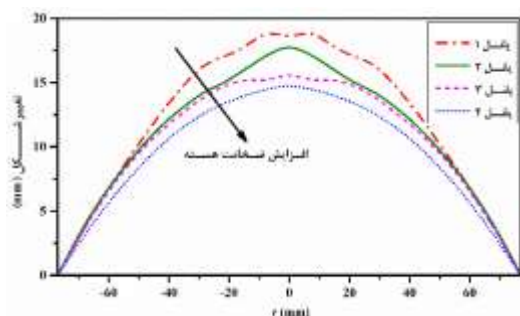
شکل ۱۷- میزان کلی انرژی جذب شده بر واحد جرم در سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۳



شکل ۱۶- میزان جذب انرژی در اجزاء سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۳



شکل ۱۸- مقایسه بین تاریخچه زمانی جابجایی عرضی مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف



شکل ۱۹- پروفیل تغییر شکل پسماند رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف نسبت به فاصله از مرکز پانل

که پروفیل تغییر شکل برای نمونه‌های ۱ و ۲ دارای یکنواختی کم‌تری است که این موضوع نشان دهنده افزایش جذب انرژی در کل سطح پانل با افزایش ضخامت هسته است.

در شکل ۲۰ میزان انرژی جذب شده در اجزاء پانل‌های مورد بررسی گزارش شده است. با توجه به شکل با افزایش

۷۲/۸ درصدی را نشان می‌دهد؛ همچنین همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، نوسانات رویه پس از اولین پیک جابجایی، در حالتی که دارای هسته است، کم‌تر از حالتی است که فاقد هسته می‌باشد که به دلیل اثرات مستهمل کننده فوم است. در شکل ۱۷ نیز جذب انرژی بر واحد جرم دو سازه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جذب انرژی بر واحد جرم سازه دارای هسته ۱/۱۱۲٪ نسبت به سازه بدون هسته افزایش یافته است.

۴-۲- تأثیر ضخامت هسته

در این قسمت به بررسی اثر ضخامت هسته بر جابجایی رویه پشتی و میزان جذب انرژی سازه پرداخته می‌شود. شکل ۱۸ تاریخچه زمانی جابجایی عرضی مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت هسته مقدار ماکزیمم جابجایی و جابجایی پسماند رویه پشتی هر دو کاهش می‌یابند. به عنوان مثال ماکزیمم جابجایی و جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل ساندویچی ۴ به ترتیب ۲۸٪ و ۲۶٪ کم‌تر از مقادیر متناظر برای پانل ساندویچی ۱ می‌باشند. ماکزیمم جابجایی و جابجایی پسماند هر دو نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت، مقاومت انفجاری پانل ساندویچی بهبود می‌یابد؛ همچنین همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نوسانات رویه‌ها با افزایش ضخامت هسته کاهش می‌یابند که به دلیل افزایش اثر مستهمل کننده فوم است.

در شکل ۱۹ پروفیل تغییر شکل پسماند رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف نسبت به فاصله از مرکز پانل به نمایش درآمده است. با توجه به شکل، در پانل ۴ پروفیل تغییر شکل، یکنواخت‌تر از سه حالت دیگر است، در صورتی

آن کاهش یافته است که نشان‌دهنده این است که در هسته با ضخامت بیش‌تر از ۳۰mm مقدار فشردگی نسبت به جرم آن کاهش می‌یابد؛ در نتیجه مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم آن کاهش می‌یابد.

۴-۲- تأثیر ضخامت رویه‌ها

در این قسمت به بررسی اثر تغییر ضخامت رویه‌ها بر جابجایی رویه پشتی و میزان جذب انرژی سازه پرداخته می‌شود. مجموع ضخامت دو رویه ۲ میلی‌متر است. با فرض ثابت بودن ضخامت کل، ضخامت رویه‌ها تغییر داده می‌شود و چند سازه به صورتی که در جدول ۸ نشان داده شده، در نظر گرفته می‌شود. در این حالت از سازه ساندویچی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج حاصل مربوط به تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی و میزان انرژی جذب شده به ترتیب در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است.

با دقت در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ می‌توان متوجه شد که در حالتی که ضخامت رویه پشتی بیش‌تر است، جابجایی رویه پشتی کم‌تر بوده و جذب انرژی آن نیز بیش‌تر است و این به این معنی است که پانل ساندویچی SP1، دارای عملکرد بهتری نسبت به SP2 است؛ همچنین پانل SP3 که در آن ضخامت رویه جلویی از پشتی بیش‌تر است، بدترین عملکرد را در برابر انفجار دارد. ماکزیمم جابجایی رویه پشتی پانل ساندویچی SP1 نسبت به پانل‌های ساندویچی SP2 و SP3 به ترتیب ۱۳/۸٪ و ۳۶/۷٪ کم‌تر است. همچنین مقدار جذب انرژی آن نسبت به پانل‌های SP2 و SP3 به ترتیب ۱۶/۲٪ و ۲۹/۸٪ بیش‌تر است. این نشان می‌دهد که یک رویه پشتی

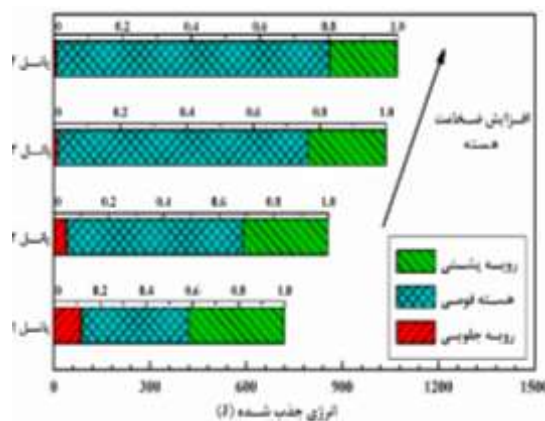
جدول ۸- مشخصات سازه‌های ساندویچی در نظر گرفته

شده برای بررسی ضخامت رویه

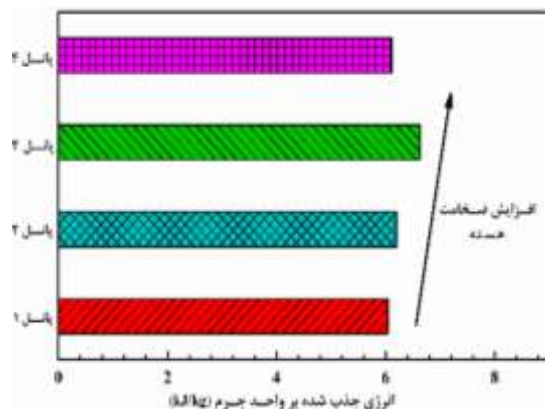
سازه ساندویچی	ضخامت رویه جلویی (mm)	ضخامت رویه پشتی (mm)
SP1	۰/۵	۱/۵
SP2	۱	۱
SP3	۱/۵	۰/۵

ضخامت هسته مقدار کلی انرژی جذب شده افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش ضخامت هسته، میزان جذب انرژی توسط رویه جلویی و پشتی کاهش یافته، در حالی که جذب انرژی توسط هسته فوم افزایش یافته است. در پانل ۱ سهم جذب انرژی توسط هسته فوم ۴۶٪، رویه جلویی ۱۲٪ و رویه پشتی ۴۲٪ از کل انرژی جذب شده بوده، در حالی که برای پانل ۴ جذب انرژی توسط هسته فوم ۷۹٪، رویه جلویی ۱٪ و رویه پشتی ۲۰٪ است.

در شکل ۲۱ نیز جذب انرژی بر واحد جرم در پانل‌های مورد نظر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت هسته تا ضخامت ۳۰mm، جذب انرژی بر واحد جرم سازه افزایش، ولی پس از



شکل ۲۰- میزان انرژی جذب شده در اجزاء پانل‌های ساندویچی مختلف



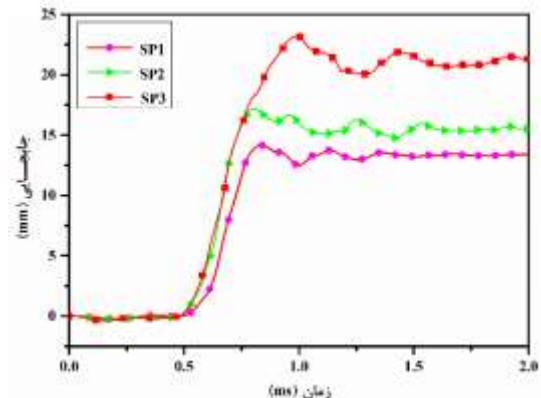
شکل ۲۱- میزان کلی انرژی جذب شده بر واحد جرم در پانل‌های ساندویچی مختلف

نیز انجام تحلیل‌های اجزاء محدود، مطالعاتی روی تأثیر ضخامت فوم و مقدار ایمپالس وارد شده بر میزان جذب انرژی و مقدار جابجایی سطح پشتی سازه ساندویچی انجام شد. خواص مکانیکی فوم با کمک آزمایش‌های فشار محوری استخراج شده و مطالعات پارامتریک عددی صورت گرفته است و ملاحظه شد، نتایج بدست آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند. با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی میزان جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در سازه ساندویچی دارای هسته نسبت به سازه بدون هسته، ماکزیمم جابجایی رویه پشتی به طور چشمگیری کاهش یافته و جذب انرژی آن افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش ضخامت هسته فوم پلی‌یورتان در سازه ساندویچی به مکانیزم رفتاری ساختار فوم پلی‌یورتان در بیش‌تر فشرده‌شدن آن کمک کرده و مقدار ماکزیمم جابجایی رویه پشتی را کاهش و مقدار جذب انرژی را افزایش می‌دهد. به علاوه زمانی که ضخامت رویه پشتی پانل بیش‌تر باشد، جابجایی رویه پشتی کم‌تر بوده و جذب انرژی آن نیز بیش‌تر است و پانل عملکرد بهتری خواهد داشت.

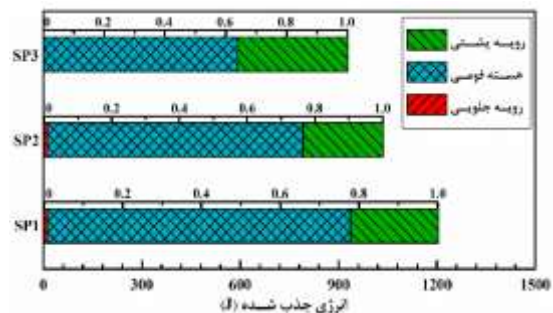
لازم به ذکر است از این تیم تحقیقاتی در زمینه‌های مرتبط با اعمال بارگذاری‌های دینامیکی بر روی سازه‌های مختلف، کارهای پژوهشی مختلفی به ثبت رسیده [۲۰-۳۴] که علاقمندان می‌توانند در صورت نیاز از آن‌ها نیز استفاده نمایند.

۶- مراجع

- [1] Hou W, Zhu F, Lu G, Fang DN (2010) Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. Int J Impact Eng 37(10): 1045-1055.
- [2] Ashby MF, Evans T, Fleck NA, Hutchinson J, Wadley H, Gibson L (2000) Metal foams: a design guide. Elsevier.
- [3] Guruprasad S, Mukherjee A (2000) Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies. Int J Impact Eng 24(9): 957-973.
- [4] Guruprasad S, Mukherjee A (2000) Layered sacrificial claddings under blast loading Part II—experimental studies. Int J Impact Eng 24(9): 975-984.
- [5] Hanssen A, Enstock L, Langseth M (2002) Close-range blast loading of aluminium foam panels. Int J Impact Eng 27(6): 593-618.



شکل ۲۲- تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی سازه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر ضخامت رویه



شکل ۲۳- میزان انرژی جذب شده در اجزاء سازه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر ضخامت رویه

ضخیم‌تر بهتر است، زیرا رویه پشتی ضخیم‌تر، پشتیبان و قید محکم‌تری برای پانل ساندویچی است و باعث می‌شود در اثر فشار موج، فوم مجبور به تغییر شکل و لهیدگی شود؛ در حالی که چنانچه لایه پشتی نازک باشد با تغییر فرم و حرکت به عقب، فوم نیز به همراه آن حرکت کرده و به جای لهیدگی و جذب انرژی به سمت عقب جابجا می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه چینش رویه‌ها تأثیر قابل توجهی روی عملکرد پانل ساندویچی دارد و با در نظرگیری قید حجم و جرم یکسان، می‌توان با تغییری ساده در نحوه چینش رویه‌ها عملکرد آن‌ها را در برابر انفجار بهبود داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با تعریف آزمایش‌های انفجاری روی پانل ساندویچی با رویه ورق آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان و

- [20] Forouzan MR, Hoseini R (2010) Dynamic Analysis of a Modified Truck Chassis. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 3(4): 31-36.
- [21] Hoseini R, Salehipoor H (2012) Optimum design process of vibration absorber via imperialist competitive algorithm. *Int J Struct Stab Dy* 12(03): 1250019.
- [22] Hosseini R, Firoozbakhsh K, Naseri H (2014) Optimal design of a vibration absorber for tremor control of arm in Parkinson's disease. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)* 3(2): 85-94.
- [23] Hosseini R, Hamed M (2015) Study of the resonant frequency of unimorph triangular V-shaped piezoelectric cantilever energy harvester. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 8(4).
- [24] Hosseini R, Hamed M (2016) An investigation into resonant frequency of triangular V-shaped cantilever piezoelectric vibration energy harvester. *Journal of Solid Mechanics* 8(3): 560-567.
- [25] Hosseini R, Hamed M (2016) Resonant frequency of bimorph triangular V-shaped piezoelectric cantilever energy harvester. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)* 6(1): 65-73.
- [26] Hosseini R, Hamed M, Ebrahimi Mamaghani A, Kim HC, Kim J, Dayou J (2017) Parameter identification of partially covered piezoelectric cantilever power scavenger based on the coupled distributed parameter solution. *International Journal of Smart and Nano Materials* 8(2-3): 110-124.
- [27] Hosseini R, Hamed M, Im J, Kim J, Dayou J (2017) Analytical and experimental investigation of partially covered piezoelectric cantilever energy harvester. *Int J Pr Eng Man-Gt* 18(3): 415-424.
- [28] Hosseini R, Nouri M (2016) Shape design optimization of unimorph piezoelectric cantilever energy harvester. *Journal of Computational Applied Mechanics* 47(2): 247-259.
- [29] Hosseini R, Zargar O, Hamed M (2018) Improving power density of piezoelectric vibration-based energy scavengers. *Journal of Solid Mechanics* 10(1): 98-109.
- [30] Nejad RM, Marghmaleki IS, Hoseini R, Alaei P (2011) Effects of irreversible different parameters on performance of air standard Otto cycle. *J Am Sci* 7(3): 248-254.
- [31] Salehipour H, Hosseini R, Firoozbakhsh K (2015) Exact 3-D solution for free bending vibration of thick FG plates and homogeneous plate coated by a single FG layer on elastic foundations. *Journal of Solid Mechanics* 7(1):28-40.
- [6] Ma G, Ye Z (2007) Energy absorption of double-layer foam cladding for blast alleviation. *Int J Impact Eng* 34(2): 329-347.
- [7] Karagiozova D, Nurick G, Langdon G, Yuen SCK, Chi Y, Bartle S (2009) Response of flexible sandwich-type panels to blast loading. *Compos Sci Technol* 69(6): 754-763.
- [8] Shen J, Lu G, Wang Z, Zhao L (2010) Experiments on curved sandwich panels under blast loading. *Int J Impact Eng* 37(9): 960-970.
- [9] Theobald M, Langdon G, Nurick G, Pillay S, Heys A, Merrett R (2010) Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading. *Compos Struct* 92(10): 2465-2475.
- [10] 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.
- [11] Qi C, Remennikov A, Pei LZ, Yang S, Yu ZH, Ngo TD (2017) Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: experimental tests and numerical simulations. *Compos Struct* 180: 161-178.
- [12] Doğru M, Güzelbey İ (2018) Investigation of the impact effects of thermoplastic polyurethane reinforced with multi-walled carbon nanotube for soldier boot under the blast load. *J Thermoplast Compos* 0892705717734599.
- [13] Bahei-El-Din YA, Dvorak GJ (2007) Behavior of sandwich plates reinforced with polyurethane/polyurea interlayers under blast loads. *J Sandw Struct Mater* 9(3): 261-281.
- [14] Raman SN, Somarathna HCC, Mutalib AA, Badri KH, Taha MR (2018) Bio-based polyurethane elastomer for strengthening application of concrete structures under dynamic loadings. *International Congress on Polymers in Concrete* 751-757.
- [15] Imbalzano G, Linforth S, Ngo TD, Lee PVS, Tran P (2018) Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: comparisons and parametric designs. *Compos Struct* 183: 242-261.
- [16] A. International, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. *ASTM International*, 2010.
- [17] Dobratz B (1981) *LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants*. Lawrence Livermore National Lab, CA (USA).
- [18] AUTODYN. Theory Manual. *Century Dynamics* (2006).
- [19] Fish J, Oskay C, Fan R, Barsoum R (2005) Al 6061-T6-elastomer impact simulations. *Electronic Document*.

ارتعاشی پیزوپلیمری. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۵۲-۴۱: ۷(۳).

[۳۴] حسینی ر، فاتحی ناراب هـ (۱۳۹۶) برداشت انرژی ارتعاشی با استفاده از تیر یک‌سر درگیر با دو لایه پیزوالکتریک. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۹-۱: ۷(۱).

[۳۲] حسینی ر، فاتحی ناراب هـ (۱۳۹۶) بررسی تجربی برداشت انرژی از راه رفتن انسان. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۸۱-۱۷۳: ۷(۴).

[۳۳] حسینی ر، ابراهیمی ممقانی ع، نوری م (۱۳۹۶) بررسی تجربی اثر کاهش عرض تیر بر بازده برداشت کننده انرژی