

بررسی تجربی و عددی عملکرد پانل‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی متغیر در برابر بار انفجاری

رضا خندابی^۱

کارشناسی ارشد

حسین خدارحمی^۲

استاد

روح‌اله حسینی^۳

استادیار

مجتبی ضیاء شمامی^۴

پژوهشگر

پانل‌های ساندویچی معمولاً به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بالا، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند. در این مقاله مقاومت انفجاری سازه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی متغیر (مدرج) بررسی شده است. در این پژوهش، با تهیه فوم‌های پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، با استفاده از دستگاه لوله شک انفجاری تأثیر تغییر تدریجی چگالی هسته فومی و ترتیب لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف، بر روی مقدار جابجایی سطح پشتی سازه‌های ساندویچی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌های تجربی و عددی انجام شده، نشان می‌دهند که جابجایی رویه پشتی پانل ساندویچی با هسته فومی مدرج در حالتی که لایه فوم با چگالی بیش‌تر در سمتی که انفجار رخ می‌دهد قرار دارد، نسبت به پانل ساندویچی با هسته تک‌لایه و جرم یکسان، کم‌تر بوده و به عنوان سازه اصلی مناسب‌تر است. همچنین در حالتی که لایه فوم با چگالی کم‌تر در سمت انفجار قرار داشته باشد، توانایی جذب انرژی پانل افزایش می‌یابد.

DOI: 10.30506/ijmep.2020.90606.1437

واژه‌های کلیدی: بارگذاری انفجاری، پانل ساندویچی، هسته فومی مدرج، جذب انرژی، لوله شک.

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 که موجب تخریب سازه گردد، جذب می‌شود [۱].

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع) rkmondabi@ihu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع) hossein_khodarahmi@yahoo.com

^۳ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

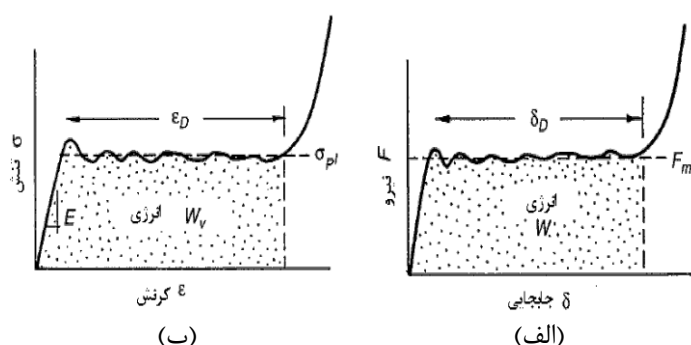
r.hosseini.mech@gmail.com

^۴ پژوهشگر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع) m.z.shamami@chmail.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۱۹

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 (شکل ۱). سطح زیر منحنی بیانگر مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم اولیه است. بنابراین موادی که منحنی‌های کشیده‌تری داشته باشند، مقدار انرژی بیش‌تری را نیز می‌توانند جذب نمایند [۲].

باهی الدین و همکارانش [۳] یک پانل ساندویچی شامل یک لایه نازک پلی‌اوره در بین رویه بیرونی (سمت بارگذاری) و هسته فوم طراحی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت بارگذاری انفجاری سازه ساندویچی اصلاح شده، لهیدگی فوم، کرنش رویه و تغییر شکل کلی را نسبت به طرح سازه معمولی کاهش می‌دهد و همچنین جذب انرژی بهتری خواهد داشت. کاراگیزوا و همکارانش [۴] نتایج تجربی و عددی پژوهش خود بر روی بارگذاری انفجاری سازه‌های ساندویچی دایروی با ورق‌های فولادی و هسته‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی و پلی‌استایرن را گزارش نموده‌اند. مطالعه خیز پوسته پستی و چگونگی تغییر آن با ایمپالس دریافتی، محققین را به این باور رسانده است که برای پانل‌های با جرم برابر، هسته لانه‌زنبوری عملکرد بهتری نسبت به هسته پلی‌استایرن از خود نشان می‌دهد. هاسان و همکارانش به صورت تجربی و عددی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌وینیل کلراید^۲ را در برابر انفجار بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در پانل‌های دارای فوم با چگالی کم، هیچ‌گونه شکست یا جدایشی اتفاق نیفتاده است و انرژی حاصل از انفجار از طریق تغییر شکل پلاستیک در رویه‌ها و لهیدگی هسته فومی صورت گرفته است. در حالی که در پانل‌های دارای فوم با چگالی بالا، آسیب قابل توجهی در هسته و جدایش در سطح بین رویه‌ها و هسته مشاهده می‌شود [۵].



شکل ۱- (الف) منحنی نیرو-جابجایی، (ب) منحنی تنش-کرنش [۲]

^۱ Plateau stress

^۲ Polyvinylchloride (PVC)

یازیزی و همکارانش برای بررسی تأثیر تزریق فوم در داخل هسته لانه زنبوری بر روی مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی، سه نوع پانل با هسته‌های لانه زنبوری، فومی و ترکیب لانه زنبوری و فومی در نظر گرفتند. مطالعات این محققین نشان می‌دهد که مقدار ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی پانل با پر کردن فوم در لانه زنبوری کاهش ۵۰ درصدی خواهد داشت [۶].

اودی و همکارانش بر روی پانل‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف آزمایش انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش چگالی فوم صلیبیت سازه افزایش می‌یابد و برای رسیدن به جابجایی‌های یکسان نیاز به اعمال نیروی بیش‌تری می‌باشد [۷]. داگرا و همکارانش تأثیر پلی‌یورتان ترموپلاستیک تقویت شده با نانو لوله کربنی را بر روی پوتین سربازان بررسی کردند. آن‌ها از پلی‌یورتان به عنوان جاذب انرژی و از کامپوزیت کربن-کولار برای کاهش تأثیر بار انفجاری استفاده کردند. 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 [۸]. ژانگ و همکارانش برای افزایش مقاومت انفجاری سازه‌های انفجاری با هسته لانه زنبوری، سه حالت مختلف برای پر کردن فوم در داخل سلول‌ها را بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داده که پانل‌های با سلول‌های پر شده جلویی و کامل نسبت به پانل‌هایی که سلول‌های پشتی آن‌ها پر شده، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع لهیدگی مناسب فوم پر کننده و افزایش مقاومت خمشی صفحات هسته لانه زنبوری می‌باشد [۹].

مطالعات ثوری و تجربی گسترده‌ای بر روی نحوه ساخت سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مدرج تحت بارگذاری ایمپالسی انجام شده است. برای مثال لی و همکارانش [۱۰] دریافتند که استفاده از لایه مدرج به طور چشمگیری رفتار ایمپالسی کامپوزیت‌های فلز-سرامیک چندلایه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در رابطه با پاسخ سازه‌های ساندویچی دارای هسته مدرج تابعی در برابر ضربه سرعت پایین، آپتری و همکارانش [۱۱] نشان داده‌اند که هسته مدرج تابعی آسیب ناشی از ضربه را کاهش می‌دهد و یا به طور کامل از آن جلوگیری می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود سه بعدی اعتمادی و همکارانش [۱۲] نشان داده‌اند که تیرهای ساندویچی با هسته‌های مدرج تابعی در مقایسه با تیرهای ساندویچی دارای هسته‌های همگن، باعث افزایش ماکزیمم نیروی تماسی و کاهش ماکزیمم کرنش می‌شوند. برای سازه‌های ساندویچی با هسته مدرج چندلایه وانگ و همکارانش [۱۳] به صورت تجربی با استفاده از یک لوله شک انفجاری نشان دادند که چیدمان‌های مختلف هسته منجر به تفاوت چشمگیری در پاسخ دینامیکی می‌شود و باعث تغییر شکل و آسیب متفاوتی خواهد شد. چیتینی و وُلدِسینِبِت [۱۴] به صورت تجربی عملکرد فشاری شبه‌استاتیک کامپوزیت مدرج تابعی چهار لایه ساخته شده از چهار نوع ذره متخلخل مختلف را بررسی کرده و دریافتند که ترتیب لایه‌ها به طور چشمگیری بر روی استحکام فشاری و جذب انرژی کامپوزیت تأثیرگذار است. پاسخ پانل دایروی مدرج تابعی با مرزهای گیردار تحت ضربه یک وزنه دراپ به صورت عددی توسط گانس و آیدین [۱۵] انجام شده است؛ نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که سرعت ضربه و شعاع پانل تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ ضربه‌ای پانل می‌گذارند، در حالی که تعداد لایه در راستای ضخامت پانل اثر ناچیزی دارد. اژدری و همکارانش [۱۶] با استفاده از مدل المان محدود، دینامیک لهیدگی و جذب انرژی دو بعدی هانیکوم با چگالی مدرج تابعی را بررسی کرده‌اند.

آن‌ها نشان داده‌اند که کاهش چگالی نسبی در راستای لهیدگی می‌تواند قابلیت جذب انرژی هانیکوم را در مرحله اول لهیدگی افزایش دهد. با استفاده دستگاه لوله شک انفجاری، وانگ و همکارانش [۱۳]، گاردنر و همکارانش [۱۷] عملکرد تیرهای کامپوزیتی ساندویچی مدرج تابعی را بررسی کرده و دریافتند که افزایش تعداد لایه هسته فوم مدرج به حفظ یکپارچگی سازه کمک می‌کند و مقاومت انفجاری کامپوزیت ساندویچی را افزایش می‌دهد، زیرا عدم تطابق امپدانس صوتی بین لایه‌های مختلف کاهش می‌یابد. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، لی و همکارانش [۱۸] مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی استوانه‌ای با هسته لوله‌ای مدرج را بررسی کردند. هسته پانل‌ها دارای سه ردیف لوله با ضخامت دیواره متفاوت می‌باشد و ترتیب چیدمان‌های مختلف در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که کم‌ترین مقدار جابجایی رویه پشتی مربوط به پانلی است که چیدمان هسته آن کاهشی می‌باشد. این محققین در یک پژوهش دیگر [۱۹] رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری مدرج را در برابر انفجار بررسی کردند و دریافتند که ترتیب چیدمان لایه‌های هسته تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار فشردگی هسته دارد و هسته مدرج بیش‌تر از هسته معمولی فشرده شده و در نتیجه انرژی بیش‌تری را جذب می‌کند. کاظمی و همکارش [۲۰] به صورت تجربی مقاومت بالستیکی پانل‌های ساندویچی با هسته مدرج را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند زمانی که لایه فوم با چگالی کم در سمت ضربه قرار داشته باشد، حد بالستیک و جذب انرژی پانل بیش‌تر خواهد بود.

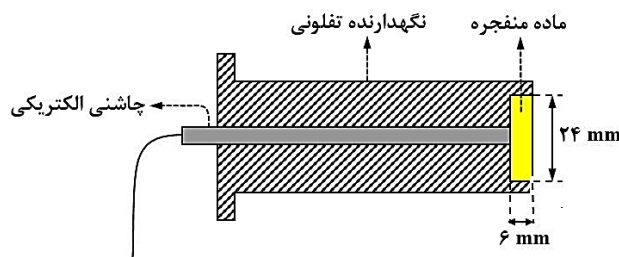
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد خلاء تحقیقاتی در زمینه تأثیر تغییر تدریجی چگالی هسته فومی و ترتیب لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف، بر روی رفتار سازه‌های ساندویچی با وزن و ابعاد یکسان تحت بارگذاری انفجاری به چشم می‌خورد. در این تحقیق، با تهیه فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، به کمک دستگاه لوله شک انفجاری، تعدادی آزمایش‌های انفجاری انجام شده است. همچنین، در این تحقیق، ارائه یک مدل شبیه‌سازی عددی منطبق بر شرایط واقعی مسئله با توجه به نتایج بررسی‌های تجربی نیز دنبال شده است تا در انجام بررسی‌های تجربی صرفه‌جویی گردد. در نهایت با توجه به نتایج تجربی و عددی تأثیر تغییر تدریجی چگالی هسته فومی و ترتیب لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف، بر روی میزان جذب انرژی و مقدار جابجایی عرضی سطح پشتی سازه‌های ساندویچی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- بررسی‌های تجربی

۲-۱- خصوصیات مواد اولیه

ماده منفجره مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی انفجار، از نوع C4 می‌باشد. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. برای ثابت نگه داشتن و همچنین 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 می‌باشد. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است.

این چاشنی در وسط نگهدارنده تفلونی و پشت دیسک خرج قرار می‌گیرد. در شکل (۲) نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته در داخل آن نشان داده شده است. در این پژوهش از رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان جهت ساخت پانل‌های ساندویچی استفاده شده است (شکل ۳). برای اطمینان بهتر از صحت نتایج طبق استاندارد، آزمایش‌ها بر روی هر نمونه باید چهار مرتبه تکرار شود و از میانگین نتایج استفاده نمود. رویه‌های آلومینیومی برای نمونه‌های ساندویچی از سری T6-۶۰۶۱ انتخاب شده و 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 پانل‌های ساندویچی مورد نظر از فوم پلی‌یورتان با سلول‌های بسته و نسبت چگالی‌های ۴، ۸ و ۱۲ درصد (چگالی‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و به صورت تک لایه، دو لایه و سه لایه تهیه شده است. برای اتصال رویه‌ها به هسته از چسب کرافت رازی استفاده شده است. لازم به ذکر است که وزن و ضخامت کلی همه پانل‌ها یکسان می‌باشد. مشخصات مربوط به هسته پانل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. کدگذاری نمونه‌ها به این صورت انجام شده است که حرف P نشان دهنده پانل با هسته پلی‌یورتانی، عدد پس از آن نشان دهنده تعداد لایه‌های هسته فوم و حروف پس از آن نشان دهنده ترتیب قرارگیری لایه‌ها می‌باشد (حروف A، L و H به ترتیب بیانگر لایه با نسبت چگالی کم، میانگین و زیاد هستند). عدد پس از حرف T نیز ضخامت کلی هسته را نشان می‌دهد. شماتیک پانل‌های در نظر گرفته شده در شکل (۴) نشان داده شده است. برای تعیین رفتار مکانیکی فوم پلی‌یورتان از استاندارد ASTM D1621-00 استفاده شده است [۲۱]. پس از آماده‌سازی نمونه‌های فوم پلی‌یورتان (شکل ۵) آزمایش فشار محوری با دستگاه آزمایش فشار سنتام بر روی آن‌ها انجام شده است. شکل (۶) منحنی فشاری برای سه نوع فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف، 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 می‌گردد. کمانش و فروریزش پلاستیک^۱ سلول‌ها باعث تشکیل یک ناحیه وسیع و نسبتاً هموار در ادامه ناحیه الاستیک اولیه می‌گردد. پس از پایان فروریزش پلاستیک سلول‌ها، ناحیه موسوم به چگالش^۲ فوم آغاز شده که در آن، نزدیک‌تر شدن چگالی فوم به چگالی ماده سازنده خود باعث افزایش ناگهانی نیرو می‌گردد.



شکل ۲- شماتیک نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته در داخل آن

¹ Plastic Collapse

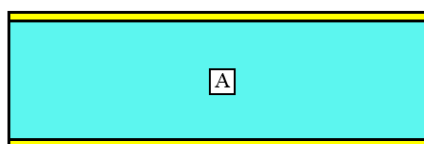
² Densification



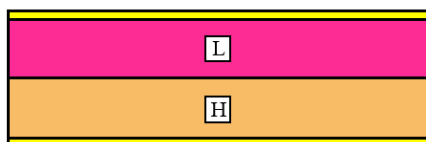
شکل ۳- نمایی ایزومتریک از یکی از نمونه‌های ساندویچی

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های تهیه شده برای بررسی‌های تجربی

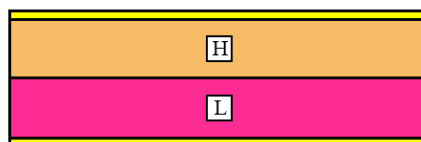
کد نمونه	میانگین نسبت چگالی هسته (%)	نسبت چگالی هر لایه (%)	ضخامت هر لایه فوم (mm)
P3HALT30, P3LAHT30	۸	۴, ۸, ۱۲	۱۰
P2HLT30, P2LHT30	۸	۴, ۱۲	۱۵
P1AT30	۸	۸	۳۰



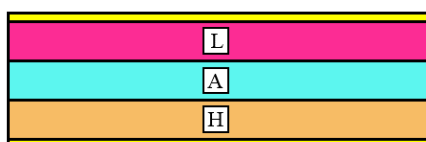
P1AT30



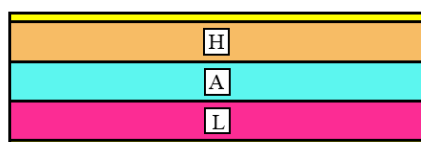
P2LAHT30



P2HALT30



P3LAHT30

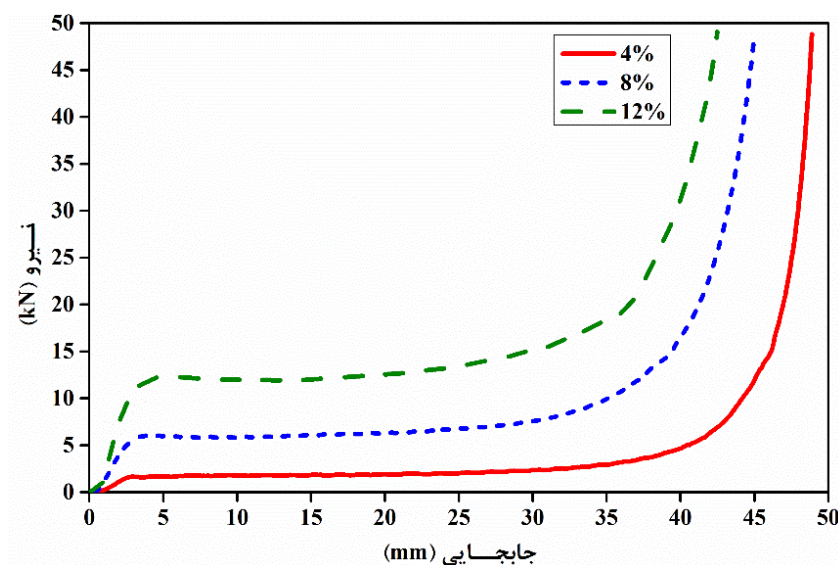


P3HALT30

شکل ۴- شماتیک پانل‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر تغییر تدریجی چگالی هسته فومی



شکل ۵- نمونه‌های مختلف تهیه شده با نسبت چگالی‌های متفاوت برای انجام آزمایش‌های فشار تک محوری



شکل ۶- منحنی فشاری فوم پلی‌یورتان با نسبت چگالی‌های مختلف

۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق از دستگاه لوله شاک انفجاری جهت تست انفجار استفاده شده است (شکل ۷). موج فشاری تولید شده توسط دستگاه لوله شاک انفجاری نسبت به موج انفجار آزاد واقع گرایانه‌تر است و همچنین با استفاده از ماده منفجره کم‌تر، موج شاک شدیدتری را تولید می‌کند. نمونه‌ها بر 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. با انفجار ماده منفجره موج شاک تولید شده از طرق لوله هدایت شده و به پانل برخورد کرده و باعث تغییر شکل آن می‌شود. در شکل (۸) نمایی از نمونه نصب شده بر روی دهانه دستگاه آزمایش و همچنین نحوه قرار گرفتن نگهدارنده تفلونی و چاشنی الکتریکی در بخش پشتی دستگاه آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۷- نمایی از دستگاه لوله شک انفجاری



(ب)



(الف)

شکل ۸- نمایی از دستگاه آزمایش، (الف) نمونه نصب شده بر روی دهانه دستگاه، (ب) نحوه قرارگیری نگهدارنده تفلونی

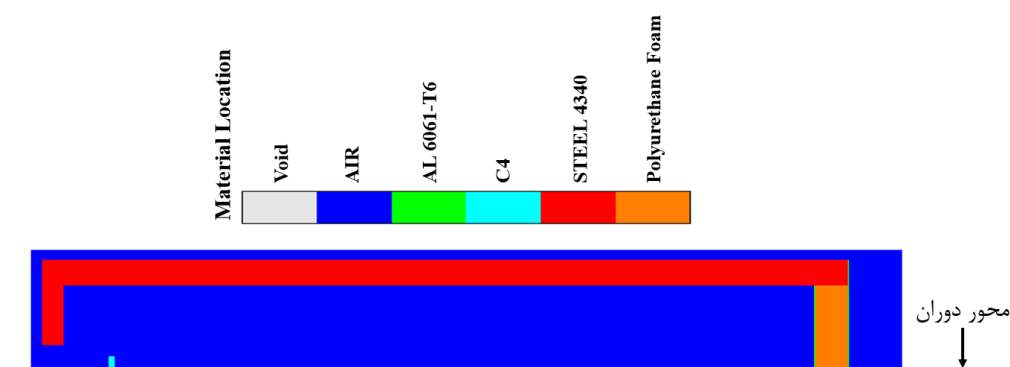
۳- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، برای شبیه‌سازی عددی مسئله از اتوداین^۱ که یک نرم‌افزار اجزاء محدود غیر خطی صریح با قابلیت‌های دو و سه‌بعدی است، استفاده شده است. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت و همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مسئله از قبیل شرایط مرزی و استفاده از حل گرهای متناسب با نوع مسئله و تعریف برهم‌کنش میان مدل‌های مختلف، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح، به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند. در گام اول به ایجاد مدل پرداخته شده و سپس به تعریف خصوصیات مواد، ویژگی‌ها، شرایط مرزی و معین کردن ابزارهای کنترلی در محیط نرم‌افزار اتوداین اقدام شده است. صحت‌سنجی نتایج عددی نیز به کمک نتایج تست‌های تجربی انجام شده است.

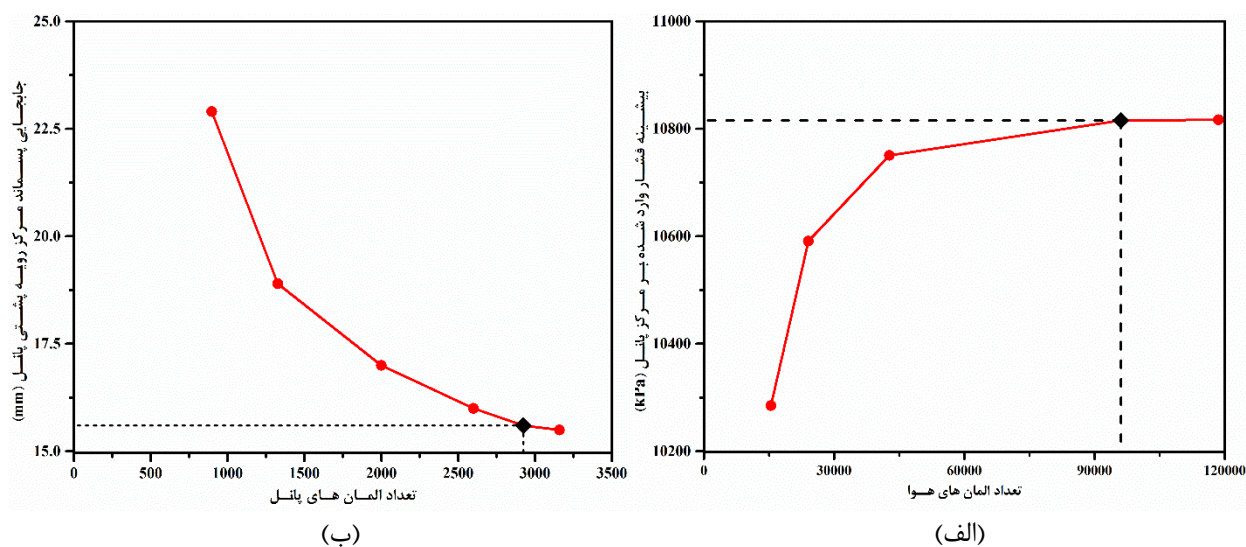
^۱ Autodyn

۳-۱- مدل هندسی

با توجه به تقارن محوری بارگذاری و هندسه مسئله، برای صرفه جویی در زمان حل، مدل هندسی به صورت دوبعدی و متقارن محوری در نظر گرفته شده است (شکل ۹). مش مورد نظر در این تحلیل دو بعدی و چهار گرهی می باشد. برای بررسی همگرایی شبکه از پانل ساندویچی P1AT30 و در برابر ۴ گرم ماده منفجره استفاده شده است. نتایج به صورت نموداری در شکل (۱۰) نمایش داده شده اند. نتایج شکل (۱۰-الف) حاکی از آن است که برای تعداد المان های ۸۸۰۰۰ و ۱۰۸۶۴۰ بیشینه فشار ایجاد شده در مرکز پانل تقریباً یکسان اند و شیب خط متصل کننده این دو نقطه تقریباً صفر است. به همین دلیل تعداد المان مناسب برای هوا، ۸۸۰۰۰ در نظر گرفته می شود. به همین ترتیب با توجه به نتایج شکل (۱۰-ب) تعداد المان مناسب برای پانل ساندویچی ۲۹۲۶ انتخاب می شود.



شکل ۹- مدل شبیه سازی شده



شکل ۱۰-الف) نمودار بیشینه فشار وارد شده بر مرکز پانل برحسب تعداد المان های هوا، ب) نمودار جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل ساندویچی برحسب تعداد المان های پانل

حل گرهای استفاده شده برای اجزاء سازه ساندویچی و لوله شاک از نوع لاگرانژی و برای هوا از نوع اویلری می‌باشد. یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی تعریف و اعمال برهم‌کنش مناسب است. در این شبیه‌سازی، برای تعیین وضعیت تماس بین اجزاء سازه ساندویچی و لوله شاک برهم‌کنش سازه-سازه^۱ و برای برهم‌کنش هوای محیط اطراف و ماده منفجره با سازه ساندویچی و لوله شاک از نوع سیال-سازه^۲ استفاده شده است. با توجه به این که لبه‌های بیرونی رویه پشتی پانل کاملاً گیردار می‌باشد، درجات آزادی لبه بیرونی این رویه در تمام جهات، مقید شده است. شرط مرزی لبه‌های 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 می‌باشد، از شرط مرزی خروج سیال^۳ استفاده شده است. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی‌های انجام شده قدرت چاشنی الکتریکی معادل ۰/۶ گرم ماده منفجره C4 در نظر گرفته شده است.

۳-۲- انتخاب مدل‌های مادی و معادلات حالت

برای بدست آوردن نتایج مطلوب در شبیه‌سازی، انتخاب مدل مادی و معادله حالت مناسب برای تعریف خواص مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌های مادی رفتار تنش- کرنش و سیلان ماده را بیان می‌کنند و معادلات حالت ارتباط فشار را با تغییر حجم یا دانسیته نشان می‌دهند. در اغلب مسائل ضربه از قبیل نفوذ و انفجار که با انتشار موج شاک همراه است، به دلیل تراکم‌پذیری مواد، علاوه بر مدل‌های مادی، معادلات حالت نیز استفاده می‌شود. در ادامه، معادلات حالت و استحکام به کار رفته به اختصار توضیح داده شده‌اند.

۳-۲-۱- هوا

برای هوا از معادله حالت گاز ایده‌آل استفاده شده است که به شکل زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$p = 0.4\rho e \quad (۱)$$

که p فشار، ρ چگالی و e انرژی داخلی و برابر $e = 717.3T$ می‌باشد که T معرف دما است.

۳-۲-۲- ماده منفجره

برای ماده منفجره از معادله حالت JWL^۴ استفاده شده است. این معادله حالت، انفجار کامل را مدل‌سازی می‌کند و به صورت غیر خطی رابطه‌ای مابین متغیرهای ترمودینامیکی ماده منفجره چه در حالت جامد و چه در حالت تبدیل شده به گازهای حاصل از انفجار ایجاد می‌کند. 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 (p) را بر اساس حجم نسبی (V) و انرژی داخلی به حجم اولیه (E) تعیین می‌نماید [۲۲]:

^۱ Lagrange/Lagrange

^۲ Euler/Lagrange

^۳ Flow-out

^۴ Jons-Wilkins-Lee EOS

جدول ۲- پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره C4 [۲۳]

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

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (۲)$$

که A ، B ، R_1 ، R_2 و w پارامترهای ورودی هستند. این معادله حالت معمولاً برای برهم‌کنش بین فلزات با فشار حاصل از انفجار توصیه می‌شود. متغیرهای ورودی این معادله حالت برای ماده منفجره C4 در جدول (۲) ارائه شده است.

۳-۲-۳- ورق آلومینیومی

برای ورق آلومینیومی، از معادله حالت شوک و معادله استحکام جانسون- کوک استفاده شده است. معادله حالت شوک برای مدل‌سازی شرایط شوک در کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه زیر می‌باشد [۲۲]:

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (۳)$$

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

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (۴)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (۵)$$

که Γ پارامتر مای-گرونایزن^۱، $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ ، ρ/ρ_0 نسبت چگالی ثانویه به چگالی اولیه، c_0 سرعت صوت بالک و s شیب نمودار هوگونیوت می‌باشد:

$$U_s = c + s \cdot U_p \quad (۶)$$

که، U_s سرعت موج شوک و U_p سرعت ذره می‌باشد. متغیرهای ورودی این معادله حالت برای آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای معادله حالت شوک برای آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ [۲۴]

Γ	c_0 (m/s)	s
۱/۹۷	۵۲۴۰	۱/۴

^۱ Mie-Gruneisen

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل جانسون- کوک برای آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ [۲۵]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0 (1/s)$
۳۲۴/۱	۱۱۳/۸	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۱/۳۴	۱

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مدل جانسون- کوک برای فولاد ۴۳۴۰ [۲۶]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0 (1/s)$
۳۲۴/۱	۱۱۳/۸	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۱/۳۴	۱

معادله استحکام جانسون- کوک برای بیان رفتار مواد، در حالتی که تحت تأثیر کرنش بالا، تنش بالا و دمای بالا قرار می‌گیرند به کار می‌رود. این گونه رفتار در برخورد های 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 سیلان مطابق رابطه ۷ می‌باشد [۲۲].

$$\sigma = [A + B \epsilon_p^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*] [1 - T^{*m}] \quad (۷)$$

که A ، B ، C و m ثوابت ماده، T^* نرم‌شوندگی حرارتی، ϵ_p کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\epsilon}_p^*$ برابر $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ می‌باشد که $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که ثوابت ماده در آن نرخ کرنش بدست می‌آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع معرفی می‌شود. پارامترهای مدل فوق برای آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ در جدول (۴) ارائه شده است.

۳-۲-۴- لوله شاک

برای لوله شاک از معادله حالت خطی و معادله استحکام جانسون- کوک استفاده شده است. در معادله حالت گاز ایده‌آل فشار تابعی از حجم مخصوص و آنتروپی می‌باشد. در بسیاری از موارد تأثیر تغییرات آنتروپی بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است. بنابراین فشار، تابعی از دانسیته و یا حجم مخصوص می‌باشد. این رابطه به شکل زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$p = K[(\rho/\rho_0) - 1] = K\mu \quad (۸)$$

که در آن p فشار، K مدول بالک، $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ و ρ/ρ_0 نسبت چگالی ثانویه به چگالی اولیه است. پارامترهای ورودی برای فولاد ۴۳۴۰ در جدول (۵) ارائه شده است.

۳-۲-۵- فوم

برای معرفی فوم به نرم‌افزار، از معادله حالت خطی و معادله استحکام فشردگی فوم^۱ استفاده شده است. مدل فشردگی فوم معادله‌ای نسبتاً ساده برای مدل نمودن رفتار فوم‌های خردشونده تحت بارهای ضربه‌ای می‌باشد. در این مدل فشار و تنش بر اساس روابط ۹ و ۱۰ با توجه به نرخ کرنش اصلاح می‌گردند [۲۲]:

^۱ Crushable foam

$$P^{n+1} = P^n + K \dot{\epsilon}_v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (9)$$

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + 2G(\dot{\epsilon}_{ij}^{n+1/2} - \delta_{ij} \dot{\epsilon}_v^{n+1/2}) \Delta t^{n+1/2} \quad (10)$$

در معادلات بالا P فشار، σ تنش، K مدول بالک، G مدول برشی، δ_{ij} دلتای کرونکر و $\dot{\epsilon}_v$ نرخ کرنش حجمی می‌باشد. مقدار تنش‌های اصلی بدست آمده در هر المان و در یک کرنش حجمی معین، با تنش فشردگی مجاز مقایسه می‌شود. در صورت تجاوز مقدار تنش اصلی اولیه (در رابطه ۱۱ با علامت ستاره مشخص شده است) از ماکزیمم مقدار مجاز، 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.

$$|\sigma_i^{*,n+1}| > \sigma_i^{compaction}(\epsilon_v) \longrightarrow \sigma_i^{n+1} = \sigma_i^{compaction}(\epsilon_v) \frac{\sigma_i^{*,n+1}}{|\sigma_i^{*,n+1}|} \quad (11)$$

کرنش حجمی نیز از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\epsilon_v = \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \quad (12)$$

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 کرنش هندسی^۲ استفاده شده است. کرنش هندسی مقداری از تغییر شکل المان است که از طریق محاسبه مؤلفه‌های اصلی کرنش بدست می‌آید و عبارتست از:

$$\epsilon_{eff} = \frac{2}{3} \left[\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 - \epsilon_{xx}\epsilon_{yy} + 3\epsilon_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

این نوع تنظیم خوردگی به نرم‌افزار اجازه می‌دهد زمانی که مقدار کرنش هندسی یک المان محلی از یک مقدار خاص بیش‌تر شد برداشته و حذف شود [۲۲].

۴- نتایج و بحث

برای اطمینان بیش‌تر از صحت روند شبیه‌سازی عددی از مرجع [۵] استفاده شده است. در این مطالعه پانل‌های ساندویچی با هسته فومی تحت بار انفجاری حاصل از مقادیر مختلف ماده منفجره قرار گرفته و ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی اندازه‌گیری شده است. چگالی و ضخامت هسته پانل‌ها یکسان می‌باشد. به دلیل تقارن محوری مسئله، مدل‌سازی به صورت دو بعدی و متقارن محوری انجام شده است. در جدول (۶) نتایج تجربی [۵] و نتایج عددی بدست آمده ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تجربی و عددی با خطای نسبتاً کمی هم‌خوانی دارند. اختلاف بین نتایج عددی و تجربی به این دلیل است که خواص فوم‌های استفاده شده مقدار اندکی غیر یکنواختی داشته، و در نتیجه خواص فوم‌های استفاده شده در تست‌های تجربی با خواصی که از آزمایش فشار بر روی نمونه‌های فوم بدست آمده و در شبیه‌سازی استفاده شده، اندکی تفاوت داشته است.

¹ Erosion

² Geometric strain

جدول ۶- مقایسه نتایج تجربی [۵] با نتایج عددی انجام‌شده

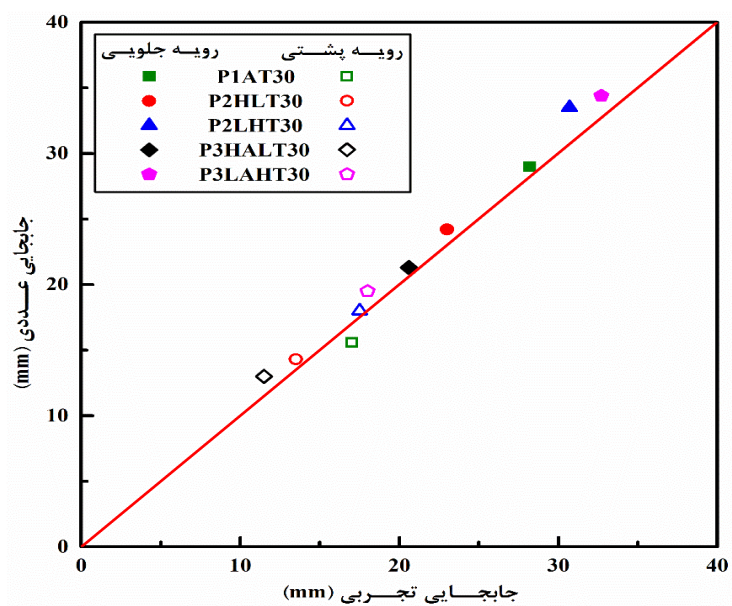
ماکزیمم جابجایی رویه پشتی (mm)			ماکزیمم جابجایی رویه جلویی (mm)			مقدار ماده منفجره (g)
خطا (%)	عددی	تجربی [۵]	خطا (%)	عددی	تجربی [۵]	
۳/۵	۵/۹	۵/۷	۵	۹/۵	۱۰	۲
۵/۲	۹/۱	۹/۶	۶/۱	۱۲/۳	۱۳/۱	۳
۶/۲	۱۲	۱۱/۳	۴/۹	۱۵/۳	۱۶/۱	۵
۷/۷	۱۳/۲	۱۴/۳	۱۵/۴	۱۷/۲	۱۴/۹	۷

در ادامه تأثیر تغییر تدریجی چگالی هسته فومی و ترتیب لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف، بر روی رفتار سازه ساندویچی تحت ایمپالس حاصل از انفجار ۴ گرم ماده منفجره داخل لوله شاک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، برای ماکزیمم جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی در جدول (۷) ارائه شده است. داده‌های این جدول در شکل (۱۱) مقایسه شده‌اند. به وضوح پیداست که داده‌ها در اطراف خط با شیب مساوی ۱ متمرکز شده‌اند که این، به معنی وجود همبستگی و نزدیکی بسیار مطلوب بین نتایج تجربی و عددی می‌باشد.

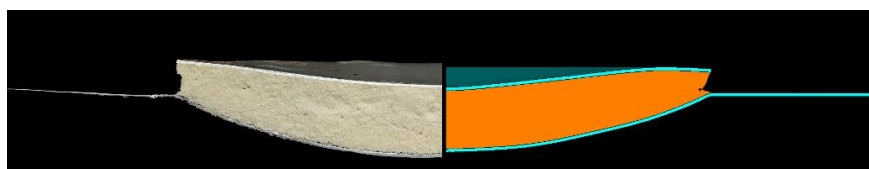
به منظور مقایسه بهتر نتایج تجربی و عددی، نمونه‌های تجربی برش داده شده و سطح مقطع عرضی آن‌ها در کنار مدل‌های شبیه‌سازی قرار داده شده و در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند؛ این شکل نیز نشان دهنده تطابق خوب بین نتایج تجربی و عددی می‌باشد.

جدول ۷- مقایسه نتایج تجربی و عددی ماکزیمم جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی

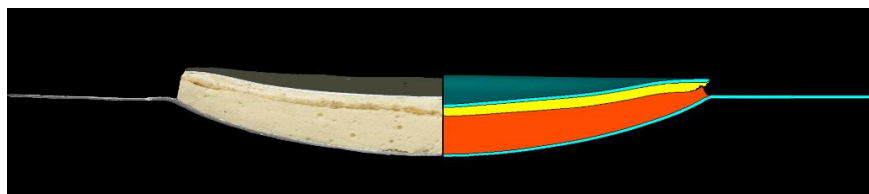
ماکزیمم جابجایی رویه جلویی (mm)			ماکزیمم جابجایی رویه پشتی (mm)			کد نمونه
خطا (%)	عددی	تجربی	خطا (%)	عددی	تجربی	
۸/۲	۱۵/۶	۱۷	۲/۸	۲۹	۲۸/۲	P1AT30
۲/۸	۱۸	۱۷/۵	۹/۱	۳۳/۵	۳۰/۷	P2LHT30
۵/۹	۱۴/۳	۱۳/۵	۵/۲	۲۴/۲	۲۳	P2HLT30
۸/۳	۱۹/۵	۱۸	۵/۲	۳۴/۴	۳۲/۷	P3LAHT30
۱۳	۱۳	۱۱/۵	۳/۴	۲۱/۳	۲۰/۶	P3HALT30



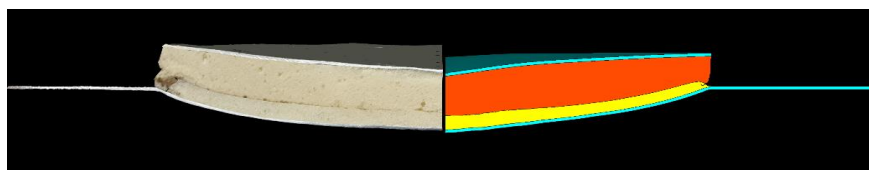
شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی‌های عددی



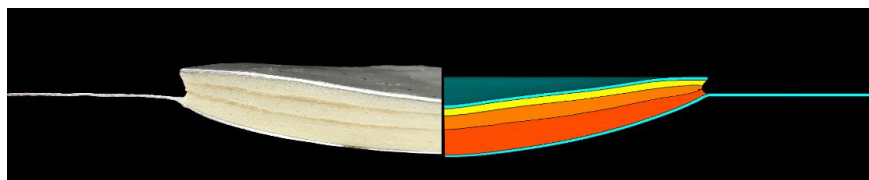
P1AT30



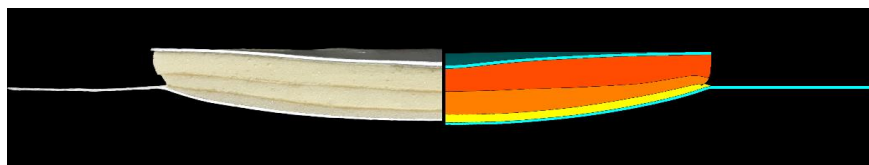
P2LHT30



P2HLT30

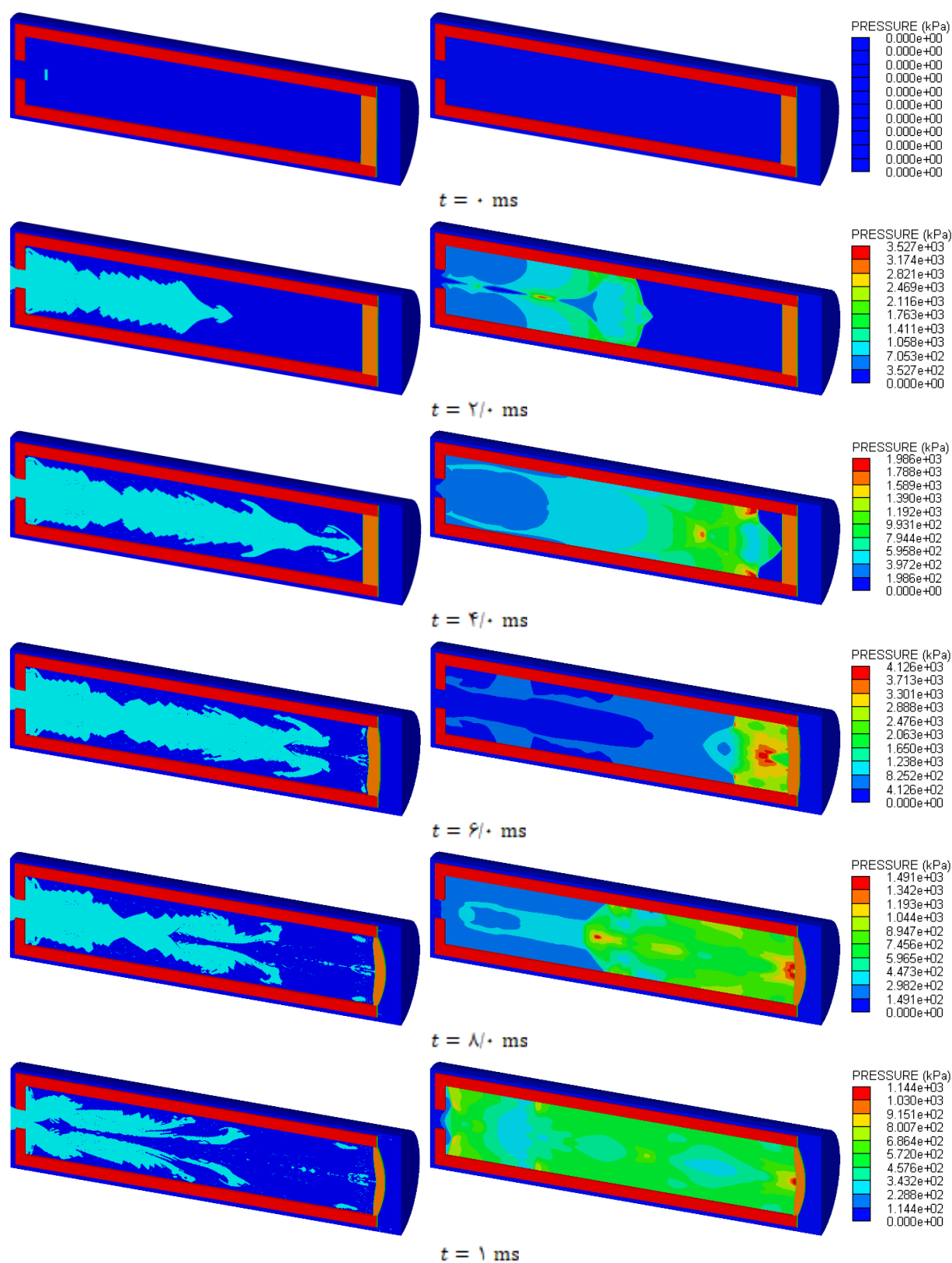


P3LAHT30



P3HALT30

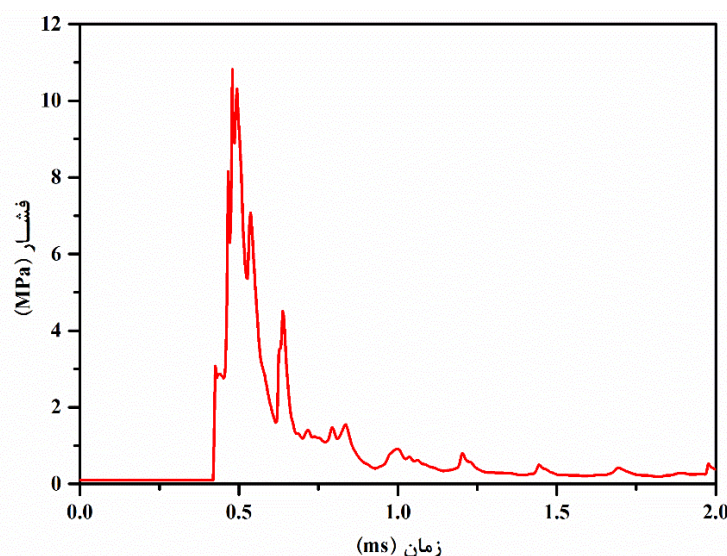
شکل ۱۲- مقایسه سطح مقطع عرضی نمونه‌های تجربی با مدل‌های شبیه‌سازی عددی



شکل ۱۳- توزیع فشار (سمت راست) و نحوه انتشار محصولات (سمت چپ) حاصل از انفجار

در شکل (۱۳) توزیع فشار و نحوه انتشار محصولات حاصل از انفجار ۴ گرم ماده منفجره C4 در فاصله‌های زمانی ۰/۲ میلی‌ثانیه و تا زمان ۱ میلی‌ثانیه 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 میلی‌ثانیه 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 قرارگیری ماده منفجره خارج شده 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 (۱۴) نمودار فشار-زمان حاصل از ۴ گرم ماده منفجره C4 را نشان می‌دهد که بر مرکز پانل ساندویچی وارد می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشینه فشار ناشی از موج انفجار در مرکز پانل برابر با ۱۰/۸ مگاپاسکال می‌باشد و در زمان ۰/۴۸ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد.

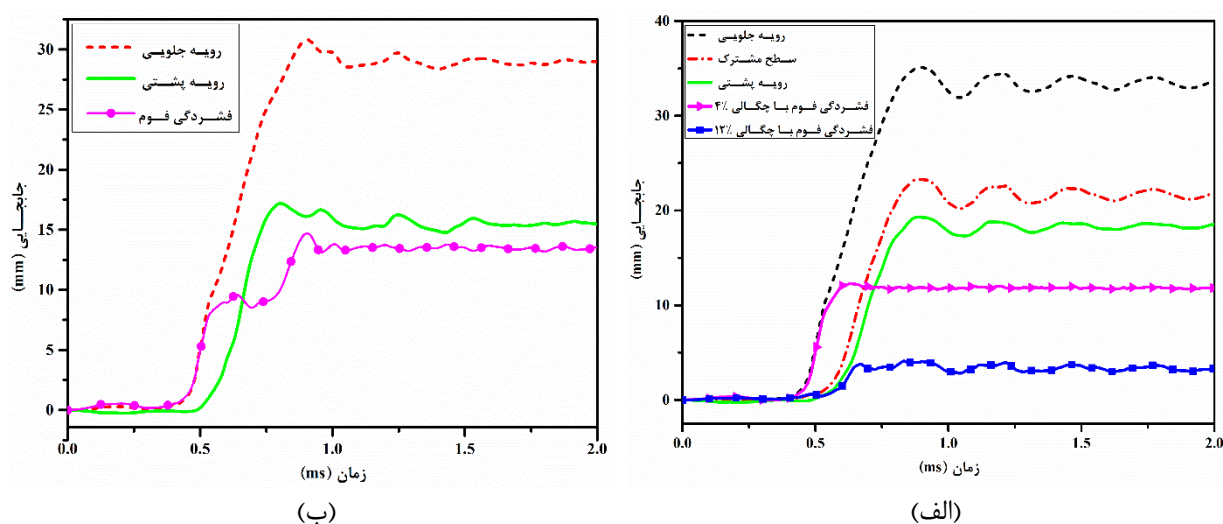
در شکل (۱۵-الف) تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و همچنین فشردگی هسته بر حسب زمان برای پانل P2LHT30 نشان داده شده است. فشردگی لایه‌های فوم از اختلاف بین جابجایی رویه جلویی، پشتی و سطح مشترک بین لایه‌های فوم محاسبه شده است. مرکز رویه پشتی دارای حداقل مقدار جابجایی پسماند (۱۸ میلی‌متر) است، که خیلی کمتر از جابجایی پسماند مرکز رویه جلویی (۳۳/۵ میلی‌متر) می‌باشد. به دلیل اثرات مستهلک کننده فوم، جابجایی دینامیکی همه اجزاء پانل ساندویچی در طول انفجار نوسانات کم و ناچیزی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لایه فوم جلویی (فوم با چگالی نسبی ۰/۴) بیش‌تر از لایه فوم پشتی (فوم با چگالی نسبی ۰/۱۲) فشرده شده و در زمان ۰/۶۳ میلی‌ثانیه به فشردگی پایای خودش یعنی ۱۲/۳ میلی‌متر رسیده است. از طرفی، لایه فوم پشتی به دلیل فاصله بیش‌تر از مبدأ انفجار و متحمل شدن بارضربه‌ای کمتر، فشردگی کامل در آن با تأخیر زمانی و در زمان ۰/۸۳ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد.



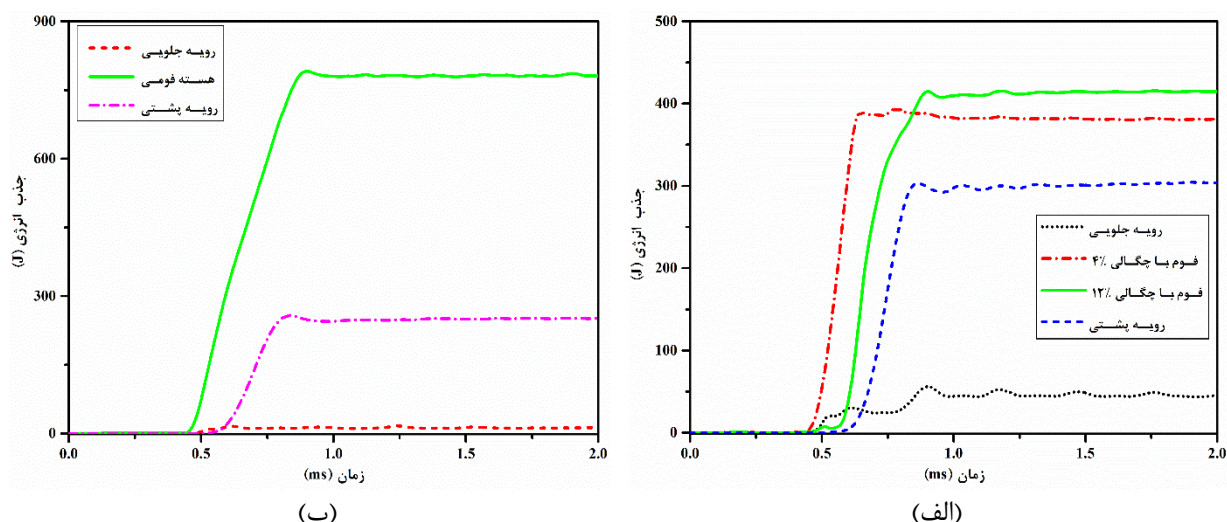
شکل ۱۴- نمودار فشار-زمان حاصل از ۴ گرم ماده منفجره C4 در مرکز پانل ساندویچی

برای مقایسه در شکل (۱۵-ب) جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و همچنین فشردگی هسته برحسب زمان برای پانل ساندویچی معمولی P1AT30 نشان داده شده است. مانند حالت قبل در این پانل ساندویچی نیز قابلیت فشردگی هسته به طور قابل توجهی جابجایی رویه پشتی را کاهش داده است. در شکل (۱۶-الف) تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و لایه‌های هسته برحسب زمان برای پانل P2LHT30 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 می‌باشد. 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 زمان $0/6$ میلی‌ثانیه رویه جلو و لایه‌های 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 $0/6$ میلی‌ثانیه آغاز می‌شود. لایه فوم جلویی (فوم با چگالی نسبی $0/4$) نسبت به لایه فوم پشتی (فوم با چگالی نسبی $0/12$) به دلیل فاصله کم‌تر از مبدأ انفجار و متحمل شدن بار ضربه‌ای بیش‌تر، جذب انرژی در آن به سرعت افزایش یافته و در زمان $0/66$ میلی‌ثانیه به حداکثر مقدار خود، تقریباً 34% کل انرژی جذب شده توسط پانل، می‌رسد. برای مقایسه در شکل (۱۶-ب) تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته برحسب زمان برای پانل ساندویچی معمولی P1AT30 نشان داده شده است. مانند حالت قبل در این پانل ساندویچی نیز قابلیت جذب انرژی هسته به طور قابل توجهی جذب انرژی پانل ساندویچی را افزایش داده است.



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و فشردگی هسته: (الف) پانل ساندویچی مدرج P2LHT30، (ب) پانل ساندویچی معمولی P1AT30

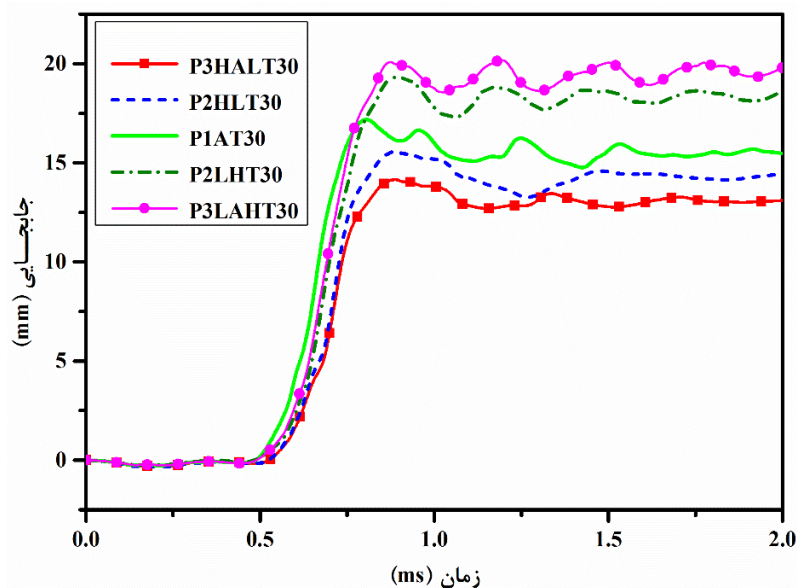


شکل ۱۶- تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته: الف) پانل ساندویچی مدرج P2LHT30.

ب) پانل ساندویچی معمولی P1AT30

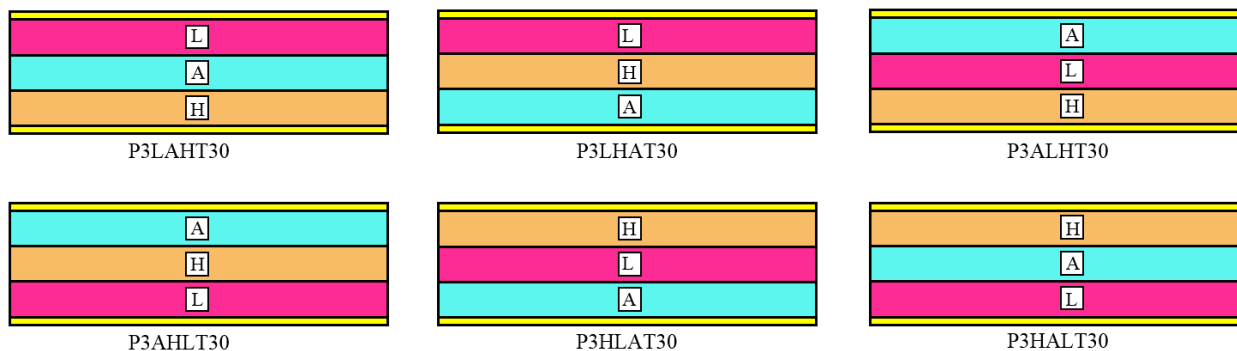
شکل (۱۷) تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف با جرم و ابعاد هندسی برابر را تحت بار انفجاری یکسان نشان می‌دهد. پانل ساندویچی P3LAHT30 دارای بیشینه جابجایی بزرگ‌تری (۲۰/۱ میلی‌متر) در زمان ۰/۸۷ میلی‌ثانیه، حدوداً ۴۲٪ بیش‌تر از مقدار متناظر برای پانل ساندویچی P3HALT30 که به مقدار کمتری (۱۴/۲ میلی‌متر) در زمان ۰/۸۹ میلی‌ثانیه رسیده، می‌باشد. ضمناً جابجایی پسماند رویه پشتی در پانل ساندویچی P3LAHT30 برابر ۱۹/۵ میلی‌متر است، که ۵۰٪ بیش‌تر از مقدار متناظر در پانل ساندویچی P3HALT30 می‌باشد. ماکزیمم جابجایی و جابجایی پسماند هر دو نشان می‌دهند که در صورتی که هدف، کاهش تغییر شکل رویه پشتی باشد پانل ساندویچی P3HALT30 بهترین حالت در بین چهار پانل ساندویچی مدرج می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که یک پانل ساندویچی مدرج با اندکی تغییر در چیدمان هسته‌اش، پاسخ‌های کاملاً متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ماکزیمم جابجایی مهم‌تر از جابجایی پسماند است، زیرا بیشینه واقعی عملکرد حفاظتی پانل ساندویچی را در طول فرآیند انفجار نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده عملکرد پانل ساندویچی P2HLT30 مشابه پانل ساندویچی P3HALT30 می‌باشد، زیرا در هر دوی این پانل‌ها لایه فوم با چگالی ۴٪ که بهترین قابلیت فشردگی را دارد، به عنوان لایه پشتی قرار گرفته است، بنابراین جابجایی و نوسانات رویه پشتی کاهش می‌یابد. بالعکس در پانل‌های ساندویچی P2LHT30 و P3LAHT30 لایه فوم با چگالی نسبی ۱۲٪ که در برابر فشردگی سخت‌تر است، به عنوان لایه بالا قرار گرفته که منجر به جابجایی و نوسانات نسبتاً زیاد رویه پشتی شده است. با مقایسه پانل‌های ساندویچی P1AT30، P2HLT30 و P3HALT30 مشخص می‌شود که افزایش تعداد لایه هسته جابجایی رویه پشتی پانل را کاهش می‌دهد. جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی P2HLT30 و P3HALT30 به ترتیب برابر ۱۴/۳ میلی‌متر و ۱۳ میلی‌متر می‌باشد که به ترتیب ۸٪ و ۱۷٪ از مقدار متناظر در پانل ساندویچی معمولی P1AT30 (۱۵/۶ میلی‌متر) کم‌تر می‌باشد.

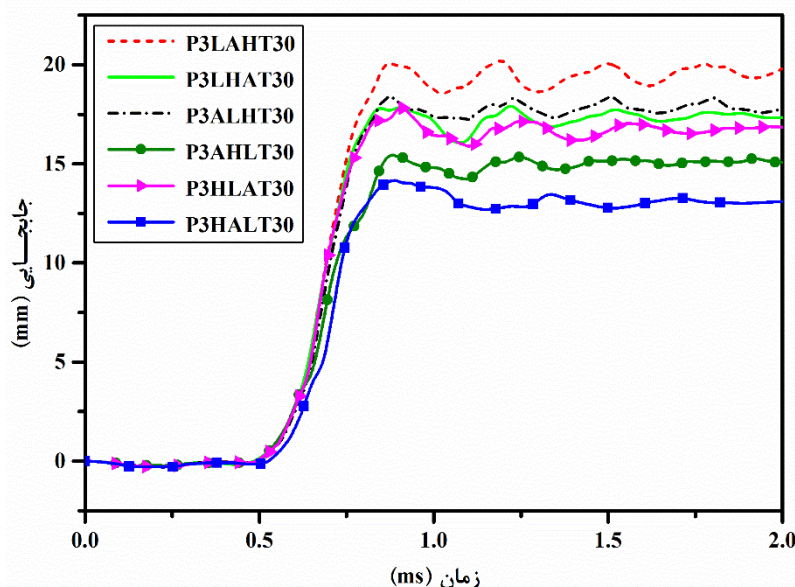


شکل ۱۷- تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف

با این حال باید توجه کرد انتخاب چیدمان برای پانل ساندویچی مهم می‌باشد، زیرا یک چیدمان نامناسب مانند پانل ساندویچی P3LAHT30، حتی با وجود بیش‌تر بودن تعداد لایه‌های آن نسبت به پانل‌های P2HLT30 و P2LHT30، منجر به جابجایی رویه پشتی بزرگ‌تری در بین چهار پانل ساندویچی مدرج بررسی شده می‌شود. واضح است که در حالت پانل با هسته سه لایه به جزء موارد بررسی شده در بالا، چیدمان‌های دیگری نیز می‌توان در نظر گرفت. تمامی چیدمان‌های ممکن در حالت هسته سه لایه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در شکل (۱۹) نیز تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی این حالت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد در بین حالت‌های مختلف کم‌ترین مقدار جابجایی پسماند مربوط به پانل ساندویچی P3HALT30 با چیدمان هسته کاهشی و بیش‌ترین مقدار مربوط به پانل P3LAHT30 می‌باشد.

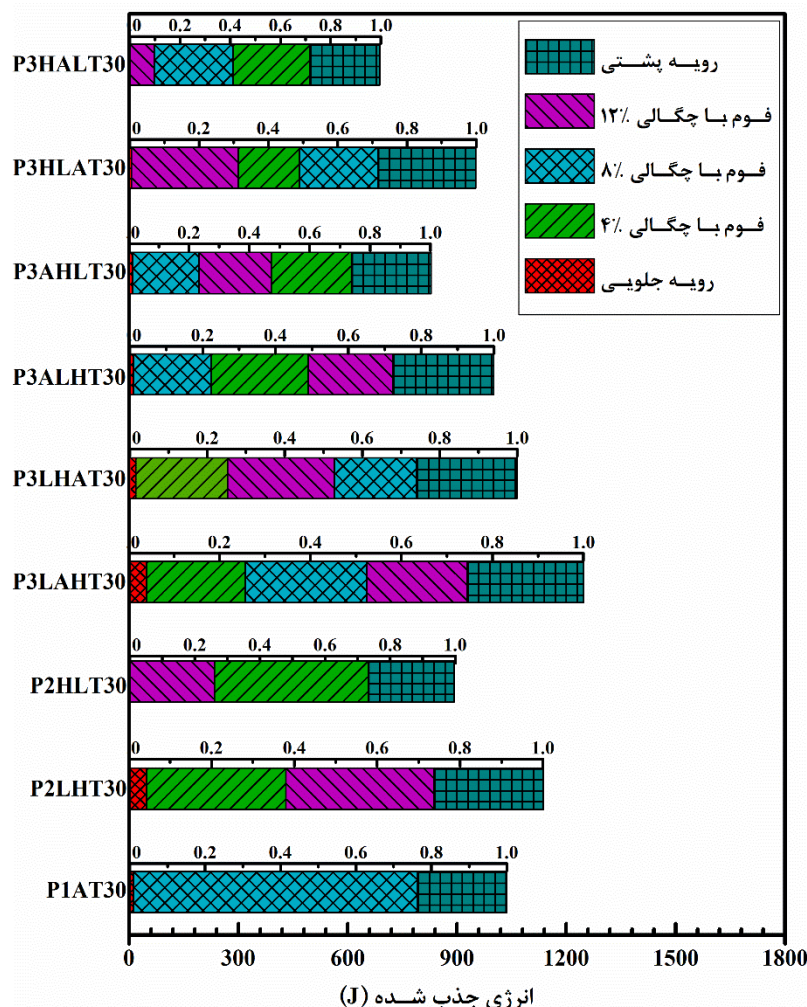


شکل ۱۸- شماتیک پانل‌های با چیدمان مختلف هسته در حالت سه لایه



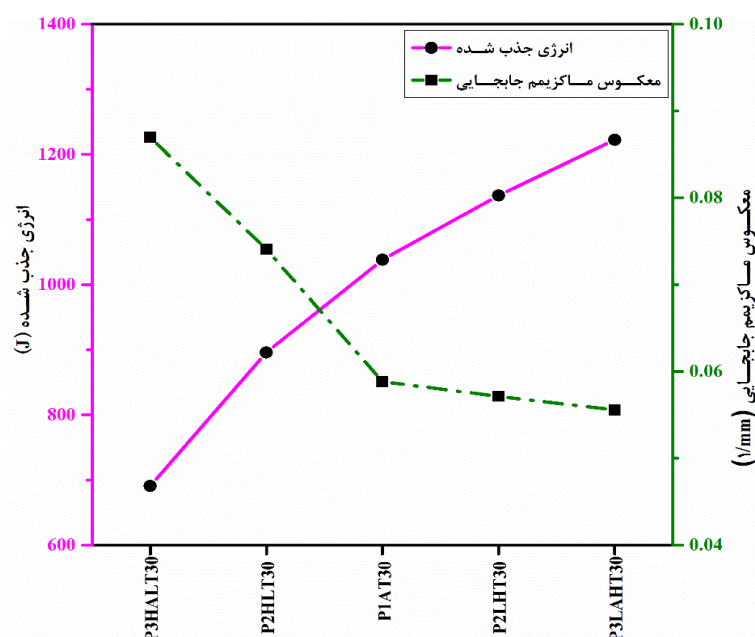
شکل ۱۹- تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی سازه‌های با چیدمان مختلف هسته در حالت سه لایه

در شکل (۲۰) میزان انرژی جذب شده در اجزاء مختلف پانل‌های ساندویچی مختلف با جرم و ابعاد هندسی برابر تحت بار انفجاری یکسان گزارش شده است. با توجه به شکل مشخص است که بیش‌ترین مقدار جذب انرژی مربوط به پانل ساندویچی P3LAHT30 و کم‌ترین مقدار مربوط به پانل P3HALT30 می‌باشد. انرژی کلی جذب شده توسط پانل ساندویچی P3LAHT30 (۱۲۴۷/۳ ژول) حدوداً ۸۰٪ بیش‌تر از مقدار متناظر در پانل ساندویچی P3HALT30 (۶۹۰/۸ ژول) می‌باشد. ضمناً انرژی کلی جذب شده توسط هسته پانل ساندویچی P3LAHT30 (۸۷۹/۷ ژول) حدوداً ۷۷٪ بیش‌تر از مقدار متناظر در پانل ساندویچی P3HALT30 (۴۹۷ ژول) می‌باشد. انرژی کلی جذب شده توسط پانل ساندویچی و همچنین هسته آن نشان می‌دهد که در صورتی که هدف، افزایش انرژی جذب شده و کاربرد پانل به عنوان سازه محافظ باشد پانل ساندویچی P3LAHT30 بهترین حالت در بین پانل‌های ساندویچی مدرج می‌باشد. با مقایسه پانل‌های ساندویچی P1AT30، P2LHT30 و P3LAHT30 مشخص می‌شود که افزایش تعداد لایه هسته میزان انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی را افزایش می‌دهد. انرژی کلی جذب شده توسط پانل‌های ساندویچی P2LHT30 و P3LAHT30 به ترتیب برابر ۱۱۳۷/۴ و ۱۲۴۷/۳ ژول است که به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ از مقدار متناظر در پانل ساندویچی تک‌لایه معمولی P1AT30 (۱۰۳۷/۱ ژول) بیش‌تر می‌باشد. باید توجه کرد که انتخاب یک چیدمان نامناسب مانند پانل ساندویچی P3HALT30، حتی با وجود بیش‌تر بودن تعداد لایه‌های آن نسبت به پانل‌های P2LHT30 و P2HLT30، منجر به کاهش میزان انرژی جذب شده می‌شود.



شکل ۲۰- تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی پانل‌های با چیدمان مختلف هسته در حالت سه لایه

در شکل (۲۱) روند تغییرات مقدار انرژی جذب شده و معکوس ماکزیمم جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل، هسته با چگالی کاهشی، جابجایی رویه پشتی را کاهش داده، ولیکن توانایی آن در جذب انرژی ناشی از انفجار را نیز کاهش می‌دهد. بالعکس هسته با چگالی افزایشی، توانایی جذب انرژی پانل را افزایش داده، ولیکن جابجایی رویه پشتی آن نیز بیش‌تر می‌شود. بنابراین باید با توجه به نوع کاربرد پانل ساندویچی، چیدمان مناسب را برای هسته انتخاب کرد. به این صورت که اگر پانل ساندویچی به عنوان سازه اصلی باشد، مقدار تغییر شکل کم‌تر رویه پشتی اهمیت داشته و بهتر است که از هسته با چیدمان کاهشی استفاده گردد و در صورتی که نیاز است پانل به عنوان سازه محافظ بر روی یک سازه دیگر نصب شود، مقدار انرژی جذب شده بیش‌تر توسط پانل مهم بوده و باید از هسته با چیدمان افزایشی استفاده گردد تا فشار منتقل شده به پشت پانل کاهش یابد.



شکل ۲۱- روند تغییرات مقدار انرژی جذب شده و معکوس ماکزیمم جابجایی مرکز رویه پشتی پانل‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با تعریف تعدادی آزمایش انفجاری بر روی پانل ساندویچی با رویه ورق آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، مطالعاتی بر روی تأثیر تدریجی چگالی هسته فومی و ترتیب لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف، بر مقدار جابجایی سطح پشتی و جلویی سازه ساندویچی انجام شده است. همچنین، به کمک آزمایش‌های فشار محوری بر روی فوم، خواص مکانیکی فوم استخراج شده و مطالعه عددی صورت گرفته است که نتایج عددی بدست آمده تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند. بعلاوه با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی میزان جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- در پانل‌های ساندویچی مدرج با جرم و ابعاد هندسی برابر، می‌توان گفت لایه‌ای کردن هسته عملکرد پانل ساندویچی را در برابر بارگذاری انفجاری به طور چشمگیری تغییر می‌دهد.
- ۲- در میان پانل‌های ساندویچی مدرج چیدمانی که منجر به ایجاد هسته با چگالی کاهشی می‌شود جابجایی رویه پشتی پانل ساندویچی را کاهش داده، ولیکن توانایی آن در جذب انرژی ناشی از انفجار را نیز کاهش می‌دهد. بالعکس هسته با چگالی افزایشی، توانایی جذب انرژی پانل را افزایش داده، ولیکن جابجایی رویه پشتی آن نیز بیش‌تر می‌شود. این موضوع نشان دهنده این نکته است که در صورت استفاده پانل ساندویچی به عنوان سازه اصلی، استفاده از هسته با چیدمان کاهشی نتیجه‌ای مثبت خواهد داشت؛ ولی اگر قرار است که پانل به عنوان جاذب بر روی یک سازه اصلی نصب شود و نقش سازه محافظ را داشته باشد، بهتر است که از هسته با چیدمان افزایشی استفاده گردد.
- ۳- افزایش تعداد لایه‌های هسته در چیدمان کاهشی هسته، جابجایی رویه پشتی پانل را کاهش و در چیدمان افزایشی، میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد.

مراجع

- [1] Hou, W., Zhu, F., Lu, G., and Fang, D. N., "Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminium Foam Core", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 10, pp. 1045-1055, (2010).
- [2] Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J., Wadley, H., and Gibson, L., *"Metal Foams: A Design Guide"*, Elsevier, (2000).
- [3] Bahei-El-Din, Y. A., Dvorak, G. J., and Fredricksen, O. J., "A Blast-tolerant Sandwich Plate Design with a Polyurea Interlayer", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 25-26, pp. 7644-7658, (2006).
- [4] Karagiozova, D., Nurick, G., Langdon, G., Yuen, S. C. K., Chi, Y., and Bartle, S., "Response of Flexible Sandwich-type Panels to Blast Loading", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 6, pp. 754-763, (2009).
- [5] Hassan, M., Guan, Z., Cantwell, W., Langdon, G., and Nurick, G., "The Influence of Core Density on the Blast Resistance of Foam-based Sandwich Structures", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 50, pp. 9-16, (2012).
- [6] Yazici, M., Wright, J., Bertin, D., and Shukla, A., "Experimental and Numerical Study of Foam Filled Corrugated Core Steel Sandwich Structures Subjected to Blast Loading", *Composite Structures*, Vol. 110, pp. 98-109, (2014).
- [7] Uday, C., Varma, C. S. T., Varma, B. N. K., Ramya, M., and Padmanabhan, K., "The Influence of Rigid Foam Density on the Flexural Properties of Glass Fabric/epoxy-polyurethane Foam Sandwich Composites", *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 3314-3317, (2014).
- [8] Doğru, M., and Güzelbey, İ., "Investigation of the Impact Effects of Thermoplastic Polyurethane Reinforced with Multi-walled Carbon Nanotube for Soldier Boot under the Blast Load", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, pp. 0892705717734599, (2018).
- [9] Zhang, P., Cheng, Y., Liu, J., Li, Y., Zhang, C., Hou, H., and Wang, C., "Experimental Study on the Dynamic Response of Foam-filled Corrugated Core Sandwich Panels Subjected to Air Blast Loading", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 105, pp. 67-81, (2016).
- [10] Li, Y., Ramesh, K., and Chin, E., "Dynamic Characterization of Layered and Graded Structures under Impulsive Loading", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 34-35, pp. 6045-6061, (2001).
- [11] Apetre, N., Sankar, B., and Ambur, D., "Low-velocity Impact Response of Sandwich Beams with Functionally Graded Core", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 9, pp. 2479-2496, (2006).
- [12] Etemadi, E., Khatibi, A. A., and Takaffoli, M., "3D Finite Element Simulation of Sandwich Panels with a Functionally Graded Core Subjected to Low Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 89, No. 1, pp. 28-34, (2009).

- [13] Wang, E., Gardner, N., and Shukla, A., "The Blast Resistance of Sandwich Composites with Stepwise Graded Cores", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 18-19, pp. 3492-3502, (2009).
- [14] Chittineni, K., and Woldeesenbet, E., "Characterization of Integrated Functionally Gradient Syntactic Foams", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 132, No. 1, pp. 011005, (2010).
- [15] Gunes, R., and Aydin, M., "Elastic Response of Functionally Graded Circular Plates under a Drop-weight", *Composite Structures*, Vol. 92, No. 10, pp. 2445-2456, (2010).
- [16] Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., and Vaziri, A., "Dynamic Crushing and Energy Absorption of Regular, Irregular and Functionally Graded Cellular Structures", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 3-4, pp. 506-516, (2011).
- [17] Gardner, N., Wang, E., and Shukla, A., "Performance of Functionally Graded Sandwich Composite Beams under Shock Wave Loading", *Composite Structures*, Vol. 94, No. 5, pp. 1755-1770, (2012).
- [18] Li, S., Lu, G., Wang, Z., Zhao, L., and Wu, G., "Finite Element Simulation of Metallic Cylindrical Sandwich Shells with Graded Aluminum Tubular Cores Subjected to Internal Blast Loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 96, pp. 1-12, (2015).
- [19] Li, S., Li, X., Wang, Z., Wu, G., Lu, G., and Zhao, L., "Sandwich Panels with Layered Graded Aluminum Honeycomb Cores under Blast Loading", *Composite Structures*, Vol. 173, pp. 242-254, (2017).
- [20] Nia, A. A., and Kazemi, M., "Experimental Study of Ballistic Resistance of Sandwich Targets with Aluminum Face-sheet and Graded Foam Core", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, pp. 1099636218757669, (2018).
- [21] A. International, *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*: ASTM International, (2010).
- [22] Autodyn, T., "Theory Manual Revision 4.3, Concord, CA: Century Dynamics", Inc, (2003).
- [23] Dobratz, B.M., "*LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosives and Explosive Simulants*", Lawrence Livermore National Lab., CA, USA, (1981).
- [24] Steinberg, D., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, (1996).
- [25] Sharma, A., Mishra, R., Jain, S., Padhee, S.S., and Agnihotri, P.K., "Deformation Behavior of Single and Multi-layered Materials under Impact Loading", *Thin-walled Structures*, Vol. 126, pp. 193-204, (2018).
- [26] Mabrouki, T., and Rigal, J.F., "A Contribution to a Qualitative under Standing of Thermo-Mechanical Effects During Chip Formation in Hard Turning", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, No. 1-3, pp. 214-221, (2006).

Abstrac

Sandwich panels, due to high strength to weight ratio and energy absorption properties, are widely used in various fields including aerospace, marine and automotive industries. This study has explored the blast resistance of sandwich structures with aluminum face-sheets and variable density polyurethane foam core (graded). In this article, several aluminum sandwich panels with polyurethane foam core having different densities is designed and have been tested. Using a blast shock tube facility, the effects of graded changes of core foam density and foam layers sequence with different densities on transverse deflection of back face-sheet are studied. Also using the compression test results performed on the foam, numerical simulations are performed using Autodyn software.

The results show that there is a good agreement between numerical and experimental results with a maximum error of 13%. Experimental and numerical investigations indicate that deformation of back face-sheet of the sandwich panel with graded foam core, when the foam layer with higher density is placed in the blast side, is less than a single layer sandwich panel and equivalent mass. So it is better to use it as the main structure. Also, in case the foam layer with less density is placed in the blast side, the energy absorption of the panel increases and so the use of this panel is suggested as a protective structure.