

قابلیت مقاوم سازی و مقابله با تهدیدات ناشی از امواج انفجاری در سازه‌های سبک با رویکرد پدافند غیر عامل

سعید فعلی^۱، محمد حاج حیدری^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰

چکیده

در این مقاله با هدف مقاوم سازی و مقابله با تهدیدات ناشی از انفجار در سازه‌های سبک وزن و ساندویچ پنل‌های مورد استفاده در ساخت سقف سوله‌ها به بررسی اثرات استفاده از روکش تقویت کننده پلی‌حری پولی یوریای در افزایش مقاومت به موج انفجار این ساندویچ پنل‌ها پرداخته شده است. برای این منظور اثر انفجار ماده منفجره روی ساندویچ پنل تقویت شده با روکش پلی‌حری پلی‌یوریای (RSP) با روش شبیه سازی عددی در نرم افزار المان محدود LS-Dyna بررسی شده است. ساندویچ پنل تقویت از ۴ لایه روکش پلی‌یوریای، ورق فلزی موجدار، هسته فوم پلی‌اورتان و ورق زیری فولادی تشکیل شده است. شبیه‌سازی انجام شده به صورت سه‌بعدی و با روش اویلری-لاگرانژی و برای وزن ۲ تا ۴ کیلوگرم ماده منفجره که در فواصل ۱ تا ۲ متری ساندویچ پنل منفجر می‌شوند و برای ضخامت ۲ تا ۴ میلی‌متر روکش پلیمری انجام شده است. انتشار موج انفجار بالای RSP و برآوردی از نحوه انتشار آن در پشت دیواره، تنش حداکثر اعمالی به ساندویچ پنل و ارزیابی تخریب و آسیب در آن بررسی گردیده و برآوردی از میزان تخریب RSP صورت گرفته است، علاوه بر آن ارزیابی از نحوه تخریب تجهیزات سبک قرار داده شده در داخل سوله با تقویت ساندویچ پنل صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: پدافند غیرعامل، مقاوم‌سازی، موج انفجار، سازه‌های سبک، ساندویچ پنل

1 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، Felisaeid@Razi.ac.ir

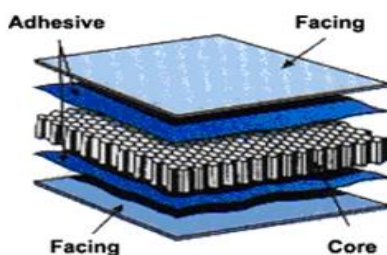
2 پژوهشگر، فناوری‌های نوین دفاعی دانشگاه عالی دفاع ملی M.hajheydari2021@gmail.com

مقدمه

یکی از موضوعات مهم در پدافند غیرعامل یا ناکنش گر اجرای مجموعه اقدامات عملی است که انجام آن خسارت و آسیب را به نیروی انسانی و تجهیزات و تأسیسات حساس نظامی و غیرنظامی حداقل نموده و یا کاهش می‌دهد. این اقدامات صرفاً با انجام فعالیت‌های غیرنظامی، فنی و مدیریتی انجام می‌شود. در این مقاله با تقویت سازه‌های سبک و ساندویچ پنل های دیواره و سقف سوله‌ها توسط روکش‌های پلیمری پلی یورئای به دنبال افزایش مقاومت به موج انفجار در این سازه‌ها هستیم، به نحوی که بتوانیم با تهدیدات ناشی از انفجار در نزدیک این دیواره‌ها مقابله نموده و خسارت و آسیب وارده به نفرات و تجهیزات قرار داده شده در داخل سوله‌ها را حداقل نماییم. برای این منظور شبیه‌سازی از انفجار ماده منفجره با وزن‌های ۲ تا ۴ کیلوگرم روی ساندویچ پنل هایی که توسط روکش پلی یورئای تقویت شده‌اند (RSP) صورت گرفته است و اثرات ضخامت روکش روی میزان خرابی و خسارت وارد بر ساندویچ پنل بررسی شده است. شبیه‌سازی و تحلیل انجام شده با نرم‌افزار المان محدود LS-Dyna صورت گرفته است. برای این منظور کل مجموعه ساندویچ پنل، ماده منفجره و روکش پلی یورئای در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. هدف از این شبیه‌سازی بررسی اثر انفجار ماده منفجره ساندویچ پنل و در ارتفاع ۱ تا ۲ متری و برآورد نحوه تخریب و آسیب وارده به ساندویچ پنل و تجهیزات داخل سوله هست، شبیه‌سازی مسئله با روش اویلری- لاگرانژی صورت گرفته و ماده منفجره و محیط واسط (هوا) به صورت اویلری و سایر اجزا به صورت لاگرانژی سه بعدی شبیه‌سازی شده‌اند. در این مقاله ضمن اشاره‌ای به مشخصات ساندویچ پنل ها، مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار به اختصار آورده شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه گردیده است، در انتها جمع‌بندی نتایج ارائه شده و ارزیابی کلی از اثرات انفجار روی RSP بررسی شده است.

مشخصات ساندویچ پنل ها

ساندویچ پنل نوعی سازه ساختمانی متشکل از چندلایه به هم فشرده است. این محصول در اکثر نمونه‌های موجود از سه لایه تشکیل شده است، که مطابق شکل ۱ دولایه بیرونی و یک لایه هسته بین آن‌ها قرار گرفته است. هسته ساندویچ پنل‌ها از موادی مانند فوم، متال فوم، پشم سنگ، پلی استایرن، پشم شیشه و ... ساخته می‌شوند.



شکل ۱- نمونه‌هایی از پیکره‌بندی ساندویچ پنل

یک نمونه معمول این نوع ساندویچ پنل‌ها که کاربرد صنعتی در ساخت سقف سوله‌ها دارد، متشکل از دولایه ورق فلزی زیری و رویی است که در وسط آن یک هسته فوم پلی اورتان قرار گرفته است.

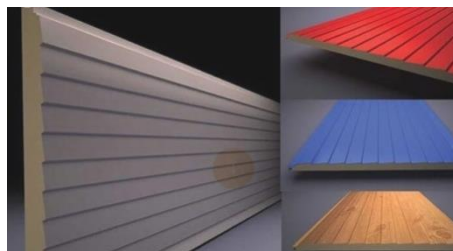
ساندویچ پنل‌ها مزایایی مانند مقاومت بالا در برابر پوسیدگی و خوردگی، متنوع بودن طرح‌ها و رنگ‌ها، وزن سبک، قابلیت استفاده در تمامی اقلیم‌ها، نصب و اجرای آسان، جابجایی و حمل‌ونقل آسان و قابلیت بازیافت یا تعمیر دارند.

انواع ساندویچ پنل‌ها

به‌طور کلی پنل ساندویچی را می‌توان به دو نوع ساندویچ پنل دیواری و ساندویچ پنل سقفی تقسیم‌بندی نمود.

۱. ساندویچ پنل دیواری

ساندویچ پنل دیواری مطابق شکل ۲ سازه‌ای است که در پوشش دیوارها استفاده می‌شود و از فوم پلیمری و ورق فولادی تشکیل شده است. در میان انواع پنل ساندویچی، از خواص این سازه می‌توان به مقاومت در برابر آب و اکسیژن یا همان زنگ‌زدگی اشاره کرد.



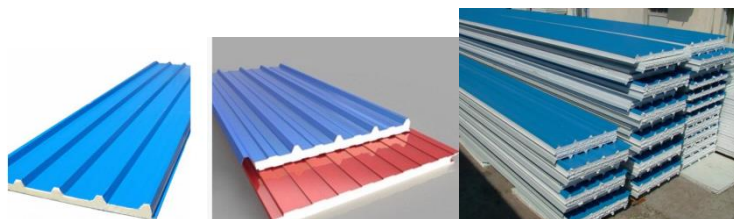
شکل ۲- نمونه‌هایی از ساندویچ پنل دیواری

به دلیل عایق بودن این سازه از هدر رفتن انرژی نیز جلوگیری می‌شود. کاربرد این نوع پنل‌ها در ساخت کانکس‌ها و دیواره‌ها و کارخانه‌های صنعتی و ... هست. در لایه میانی آن به‌طور معمول از فوم پلی یورتان و پلی استایرن استفاده می‌شود که در برابر نم و رطوبت عایق‌های خوبی هستند.

۲. ساندویچ پنل سقفی

ساندویچ پنل سقفی سازه‌ای است که برای پوشش سقف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع پوشش استحکام مناسبی دارد و در آن از ورق فولادی گالوانیزه، آلوزینک و آلومینیوم استفاده شده است. فوم داخلی ساندویچ پنل سقفی از پلی استایرن، پلی یورتان، پشم سنگ یا پشم شیشه ساخته

می‌شود. این فوم‌ها خاصیت ضد حرارت و ضد حریق دارند. ضخامت این نوع ساندویچ پنل بین ۴ الی ۲۰ سانتی‌متر است. این پنل‌ها شبیه پنل‌های دیواری هستند با این تفاوت که ضریب حرارتی پایین‌تری نسبت به پنل‌های دیواری دارند. لایه‌های بیرونی پنل سقفی از جنس آلوزینک و گالوانیزه بوده و میان این لایه‌ها فوم پلی یورتان قرار گرفته که عایق مناسب صوت و حرارت است. در شکل ۳ و ۴ نمونه‌هایی از ساندویچ پنل‌های با رویه‌های فلزی موجدار مورد استفاده در سوله سازی نشان داده شده است.



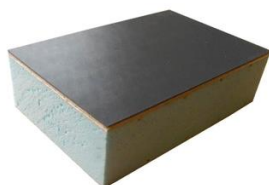
شکل ۳- نمونه‌هایی از ساندویچ پنل با ورق فلزی موجدار مورد استفاده در سقف سوله‌ها



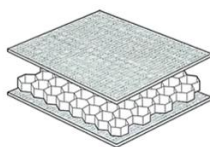
شکل ۴- نمونه‌هایی از کاربرد ساندویچ پنل در سقف سوله‌ها

انواع ساندویچ پنل از نظر جنس لایه میانی

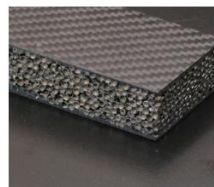
در شکل ۵ نمونه‌هایی از ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های مختلف فوم، لانه‌زنبوری^۱، متال فوم، خرپا و وب شکل نشان داده شده است.



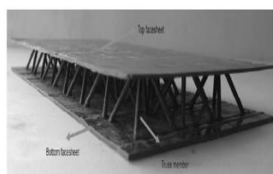
Foam Core



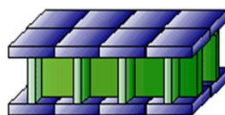
Honeycomb Core



Metal foam



Truss Core



Web Core

شکل ۵ - نمونه‌هایی از ساندویچ پنل با هسته‌های فوم، لانه‌زنبوری، متال فوم، خرپا و وب شکل

^۱ Honeycomb

۱. ساندویچ پنل با هسته پلی یورتان

ساندویچ پنل با هسته پلی یورتان به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند عایق در برابر صوت و حرارت، سبک‌وزنی و مقاومت بالا در برابر رطوبت، بیشتر از ساندویچ پنل‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. ساندویچ پنل با هسته لانه‌زنبوری

ساندویچ پنل با هسته لانه‌زنبوری در میان انواع ساندویچ پنل‌ها سبک‌وزن هست. در پنل لانه‌زنبوری قسمت‌های توخالی لایه میانی جهت استحکام بیشتر با فوم نیز می‌تواند پر شود. این محصول در صنایع هواپیماسازی، خودرو، هوافضا و... کاربرد دارد.

۳. ساندویچ پنل با هسته پشم سنگ

ماده اولیه هسته پشم سنگ بازالت^۱ بوده و اصلی‌ترین ویژگی این پنل ساندویچی ضد حریق بودن آن به دلیل استفاده از الیاف پشم سنگ هست.

¹Basalt (form of ock)

۴. ساندویچ پنل با هسته پشم شیشه^۱

عایق پشم شیشه باسابقه‌ترین و پرکاربردترین عایق حرارتی موجود در بازار است. این عایق از الیاف بسیار نازک و انعطاف‌پذیری تشکیل شده و با اعمال تغییرات فیزیکی بر روی شیشه مذاب به دست می‌آید از این فوم برای تولید ساندویچ پنل پشم شیشه استفاده می‌شود.

۵. ساندویچ پنل با هسته پلی استایرن

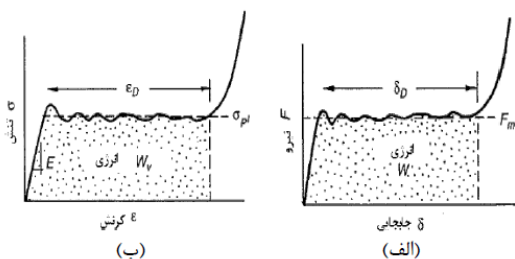
از مهم‌ترین مزایای آن ضد حریق بودن و مقاومت در برابر نفوذ آب و رطوبت است از این نوع ساندویچ پنل در صنعت ساختمان‌سازی و ساخت بلوک‌های دیواری و سقفی و پنل‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود.

پیشینه تحقیق

ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های فوم، لانه‌زنبوری و متال فوم علاوه بر کاربردهای سازه‌ای، به‌عنوان جاذب انرژی در برخورد و انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بحث جذب انرژی سازه‌های ساندویچی، به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بالا، مورد توجه محققان واقع شده است، هسته و رویه‌ها با تغییر شکل زیاد و له‌شدگی مقدار زیادی از انرژی ناشی از موج انفجار یا ضربه را قبل از اینکه تخریب گردد، جذب می‌کند [۱].

^۱ Glass wool

مواد و سازه‌هایی که به‌عنوان جاذبهای انرژی به کار می‌روند عموماً مطابق شکل ۶ دارای منحنی‌های تنش کرنش کشیده و یکنواخت می‌باشند. این جاذبها در تنشی که به تنش پایا معروف است، دچار تغییر شکل پلاستیک شده و انرژی زیادی را جذب می‌کنند. یک قطعه یا سازه هنگامی جاذب انرژی محسوب می‌شود که بتواند بیشترین کرنش و یا تغییر شکل را داشته باشد. سطح زیر منحنی تنش کرنش بیانگر مقدار انرژی جذب‌شده در واحد حجم اولیه بوده و بنابراین موادی که سطح زیر منحنی بیشتری داشته باشند، مقدار انرژی بیشتری را نیز می‌توانند جذب کنند [۲].



شکل ۶- منحنی (الف) نیرو جابجایی و (ب) تنش- کرنش هسته ساندویچ پنل

باهی الدین و همکاران [۳] ساندویچ پنبلی شامل یک لایه نازک پلی اوره در بین رویه بیرونی و هسته فوم طراحی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که تحت بارگذاری انفجاری سازه ساندویچی اصلاح‌شده، 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 را روی اثر بارگذاری انفجار در سازه‌های ساندویچی مدور با

رویه‌های فولادی و هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی و پلی استایرن گزارش نمودند. بررسی خیز لایه زیری و چگونگی تغییر آن با ایمپالس دریافتی، محققین را به این باور رسانده است که برای پنل های با جرم برابر، هسته لانه‌زنبوری عملکرد بهتری نسبت به هسته پلی استایرن از خود نشان می‌دهد.

هاسان و همکارانش [۵] به صورت تجربی و عددی رفتار پنل های ساندویچی با هسته فوم پلیوینیل کلراید را در برابر انفجار بررسی نمودند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در پنل های دارای فوم با چگالی کم، هیچ گونه شکست یا جدایشی به وجود نمی‌آید و انرژی حاصل از انفجار از طریق تغییر شکل پلاستیک در رویه‌ها و لهیدگی هسته فومی صورت گرفته است. در حالی که در پنل های دارای فوم با چگالی بالا، آسیب قابل توجهی در هسته و جدایش در سطح بین رویه‌ها و هسته مشاهده می‌شود.

یازسی و همکارانش [۶] برای بررسی تأثیر تزیق فوم در داخل هسته لانه‌زنبوری بر روی مقاومت انفجاری پنل های ساندویچی، سه نوع پنل با هسته‌های لانه‌زنبوری، فومی و ترکیب لانه‌زنبوری و فومی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات این محققین نشان می‌دهد که مقدار هاکزیم جابجایی رویه جلویی و پشتی پنل با پر کردن فوم در لانه‌زنبوری کاهش ۵۰ درصدی خواهد داشت.

اودی و همکارانش [۷] بر پیل های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی و هسته فوم پلی یورتان با چگالی های مختلف را به صورت تجربی بررسی نمودند و مشاهده کردند که با افزایش چگالی فوم صلیبت سازه افزایش می یابد و برای رسیدن به جابجایی های یکسان نیاز به اع حال نیروی بیشتری هست.

داگرا و همکارانش [۸] تأثیر پلی یورتان ترموپلاستیک تقویت شده با نانولوله کربنی را بر روی کفش سربازان بررسی کردند آن ها از پلی یورتان به عنوان جاذب انرژی و از کامپوزیت کربن کولار برای کاهش تأثیر بار انفجاری استفاده نمودند. بهترین خواص مکانیکی با درصد وزنی یک در صد نانولوله کربنی به دست آمده است. در نتیجه پژوهش آن ها، بهترین کاهش بار انفجار در ۱۲ در صد نانولوله های کربنی مشاهده شد.

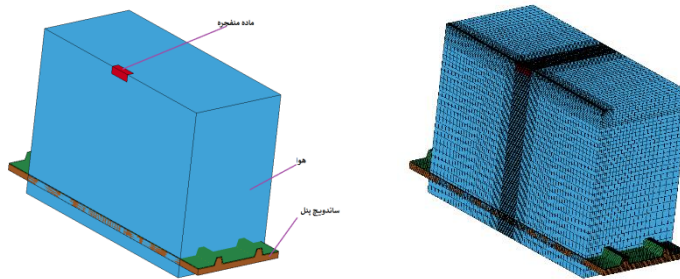
ژانگ و همکارانش [۹] برای افزایش مقاومت انفجاری سازه های انفجاری با هسته لانه زنبوری، سه حالت مختلف پر کردن فوم در هسته را بررسی نمودند. نتایج تجربی آن ها نشان که پیل های هسته پر شده جلویی و کامل نسبت به پیل هایی که سلول های پشتی آن ها پر شده، عمل کرد بهتری را نشان می دهد. دلیل این موضوع لهیدگی مناسب فوم پرکننده و افزایش مقاومت خمشی صفحات هسته لانه زنبوری هست.

در این مقاله با دیدگاه مقاوم سازی و مقابله با تهدیدهای پنهان و آشکار ناشی از انفجار موضعی در نزدیکی دیواره و سقف سوله های ساخته شده از ساندویچ پیل های صنعتی، اثرات هوج انفجار

روی ساندویچ پنل های تقویت شده با روکش پلیمری پلی یورئای پرداخته شده است. به کاربری این روکش پلیمری باعث کاهش خسارت و آسیب به نیروی انسانی و تجهیزات و تأسیسات حساس نظامی و غیرنظامی داخل سوله شده و می تواند به عنوان یک اقدام عملی در پدافند غیرعاهل مورد استفاده قرار گیرد. اجزاء ساندویچ پنل شامل یک ورق موج دار دوزنقه‌ای به ضخامت حدود ۴ میلی متر، فوم پلی اورتان به عنوان هسته و یک ورق فلزی نازک به ضخامت ۰/۴ میلی متر به عنوان صفحه زیری ساندویچ پنل هست. جنس رویه‌های فولادی بالا و پائین St37 است که در بالا و پائین هسته پلی اورتان پرس شده است. رویه بالایی ساندویچ پنل توسط روکش پلیمری با ضخامت ۲ تا ۴ میلی متر پوشش داده شده است.

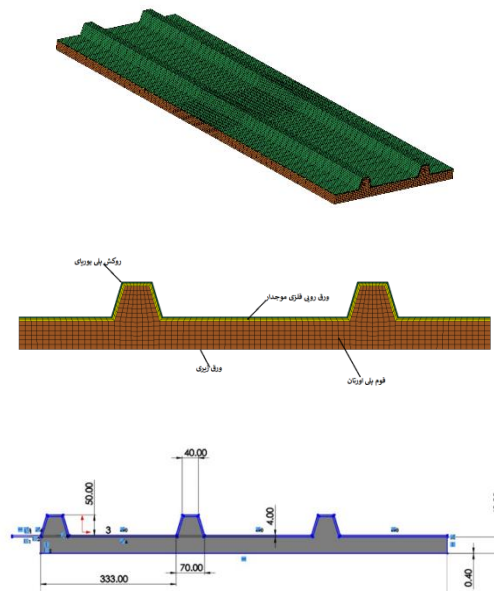
مراحل شبیه سازی و تحلیل

در شکل ۷ شماتیک هندسی شبیه سازی شده ساندویچ پنل و ماده منفجره در نرم افزار LS-Dyna نشان داده شده است. مجموعه شامل ماده منفجره، هوای اطراف مدل و ساندویچ پنل تقویت شده هست.



شکل ۷- مدل شبیه سازی شده در نرم افزار

در این بررسی ها مدل به صورت یک چهارم و فاصله ماده منفجره تا ساندویچ پنل بین ۱ تا ۲ متر در نظر گرفته شده است. مدل مش بندی شده ساندویچ پنل ۴ لایه (RSP) و ابعاد هندسی آن در شکل های ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- ابعاد هندسی ساندویچ پنل شبیه سازی شده در نرم افزار

شبیه‌سازی به صورت سه‌بعدی صورت گرفته است. برای المان بندی مدل از المان‌های Solid سه‌بعدی هشت گره‌ای استفاده شده است. از آنجاکه روش حل مسئله MMALE (چند ماده‌ای لاگرانژی - اویلری) انتخاب شده، برای افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی اندازه المان‌های هوا (اویلری) کمتر از اندازه المان‌های لاگرانژی در نظر گرفته شده است. در این روش حل المان‌های هوا و ماده منفجره به صورت اویلری و ساندویچ پنل تقویت شده باروکش پلی یورپای به صورت لاگرانژی در نظر گرفته شده است. هر محدوده از المان‌های اویلری در ابتدای حل مربوط به یک ماده بوده ولی مواد در طی حل به المان‌های مواد دیگر نیز می‌توانند بروند و یا به عبارت دیگر مواد می‌توانند باهم مخلوط شوند. در روش حل ALE چند ماده‌ای، امکان کوپل سازه و سیال وجود دارد. کوپل سازه (لاگرانژی) با سیال (اویلری) مشابه در نظر گرفتن برخورد بین دو مش لاگرانژی هست. برای جلوگیری از پدیده نشتی بایستی نقاط کوپلینگ بین سازه و سیال به تعداد مکفی در نظر گرفته شود. برای تعامل بین المان‌های اویلری با المان‌های لاگرانژی باید قیود تماس بین آن‌ها تعریف شود، با استفاده از قید `Constrained_Lagrange_In_Solid` این تعامل برقرار شده است. تنها شرط اولیه حاکم بر مسئله تعریف موقعیت شروع انفجار هست. این موقعیت محرک انفجار در خرج بوده که با استفاده از دستور `Initial Detonation` در مدل در نظر گرفته شده است.

مدل رفتار ماده و معادلات حالت اجزاء ساندویچ پنل

برای مدل‌سازی اجزاء فلزی ساندویچ پنل که شامل ورق موجدار رویی و ورق فلزی زیری است، از مدل رفتار ماده جانسون کوک استفاده شده است. این مدل رفتار ماده در تحلیل مسائل ضربه‌ای، نفوذ و موج تنش مدل مناسبی بوده و اثرات نرخ کرنش و دما را در نظر می‌گیرد. معادله تنش کرنش جریان جانسون کوک به صورت زیر هست [۱۲]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}]$$

که A, B, C, n, m ثوابت ماده و $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ که T دمای کاری، T_{room} درجه حرارت محیط، T_{melt} دمای ذوب ماده است. علاوه بر معادله فوق معادله دیگری برای تعیین کرنش شکست ماده توسط جانسون و کوک به صورت زیر ارائه شده است [۱]:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*]$$

ضرایب D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 ضرایب کرنش شکست برای هر جنس خواص می‌باشند.

علاوه بر آن مقادیر مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی، دانسیته، درجه حرارت محیط و دمای ذوب و ضریب گرمای ویژه باید برای پوسته به صورت جداگانه به نرم‌افزار داده می‌شود. مدل رفتار ماده جانسون کوک به علت فشار بالای حاصل از ضربه نیاز به تعریف معادله حالت دارد. معادله حالت می‌گرونایزن^۱ معادله حالتی مناسب برای فلزات است که این معادله حالت در

^۱ Mie-Gruneisen

نرم‌افزار موجود بوده و از آن استفاده می‌شود. معادله حالت می‌گرونایزن به صورت زیر در نرم‌افزار استفاده شده است [۱۲]:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2}]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E$$

که P فشار یا تنش هیدروستاتیکی حاصل بوده، E انرژی بر واحد حجم، C سرعت صوت یا موج الاستیک در فلز، S_1, S_2, S_3, a ضرایب ثابت برای هر ماده، γ_0 گاهای گرونایزن و μ برحسب حجم V برابر است با:

$$\mu = \frac{1}{V} - 1$$

مدل رفتار ماده روکش پلی یوربای

برای شبیه‌سازی روکش فوم پلی یوربای از مدل رفتار ماده MAT_PLASTIC_KINEMATIC استفاده شده است. در این مدل رفتار ماده پارامترهایی مانند دانسیته، مدول یانگ، تنش تسلیم، شیب منحنی در ناحیه پلاستیک و کرنش نهایی پاره شدن روکش داده می‌شود.

مدل رفتار ماده، ماده منفجره

برای مدل‌سازی ماده منفجره بعد از تعریف و اطمینان بندی هندسی آن باید مدل رفتار ماده مناسبی انتخاب گردد. بر اساس مدل رفتار مواد موجود در نرم‌افزار مدل رفتار ماده شماره ۸ تحت

عنوان (Mat_High_Explosive_Burn) برای ماده باروت آنتی‌خواب می‌گردد. پارامترهای ورودی

موردنیاز برای این مدل رفتار ماده شامل، دانسیته سرعت انفجار، فشار چاپمن جوگت هست.

برای شبیه‌سازی رابطه فشار حجم برای ماده منفجره نرم‌افزار نیاز به تعریف معادله حالت برای

ماده منفجره دارد. معادله حالت مناسب برای ماده منفجره معادله حالت JWL هست. این معادله

حالت به صورت زیر برای ماده باروت تعریف می‌گردد. [۱۲]

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

در این معادله A, B, R_1, R_2, ω ضرایب معادله حالت، V حجم و E انرژی داخلی ماده

منفجره هست. مقادیر این ضرایب برای مواد منفجره مختلف و نیز باروت در جداول موجود است.

جدول ۱ مدل مادی و معادله حالت مربوط به آن را برای هر یک از قسمت‌های مجموعه

شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

معادله حالت	مدل مادی	جنس	نوع المان‌ها
JWL	Mat_High_Explosive_Burn	H6	اویلری
Gruneisen	Johnson-Cook	فولادی St37	لاگرانژی
Linear Polynomial	Null	هوا	اویلری
--	MAT_Elastic*	پلی اورتان	لاگرانژی
--	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	پلی یورپای	لاگرانژی

جدول ۱- مدل رفتار ماده و معادلات حالت استفاده شده در شبیه‌سازی

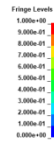
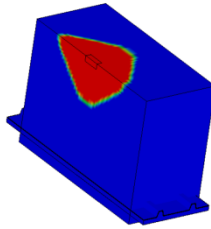
نتایج شبیه‌سازی

در بررسی اول، ضخامت روکش ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و اثر انفجار ماده منفجره به وزن ۲ کیلوگرم و در فاصله یک متری از ساندویچ پنل تقویت شده با روکش پلی‌یورپای ۲ میلی‌متر بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی در ادامه آورده شده است.

نحوه انتشار موج انفجار در مجاورت ساندویچ پنل

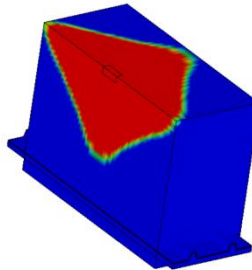
در شکل ۹ چند مرحله زمانی از انتشار موج انفجار بالای ساندویچ پنل نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با انفجار ماده منفجره موج حاصل در محیط اطراف منتشر شده و نواحی اطراف محل انفجار را تحت تأثیر قرار داده است. ۴۰۰ میکروثانیه بعد از شروع انفجار موج انفجار به RSP رسیده است. همچنین ۳ میلی‌ثانیه بعد از انفجار موج انفجار RSP را دچار تغییر شکل و خمش کرده ولیکن موج انفجار از ساندویچ پنل عبور ننموده است.

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
 Time = 0.09966
 Contours of Volume Fraction Mas#1
 min=0, at elem# 82130
 max=1, at elem# 2677



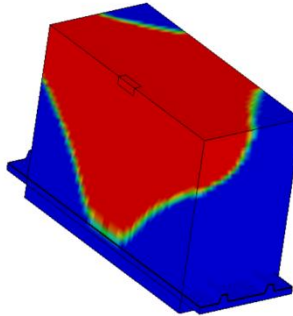
Time=99 MicoS

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
 Time = 0.19968
 Contours of Volume Fraction Mas#1
 min=0, at elem# 69472
 max=1, at elem# 2677



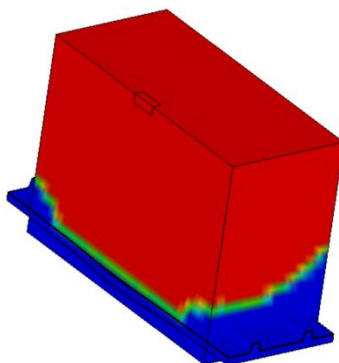
Time=200 MicoS

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
 Time = 0.39999
 Contours of Volume Fraction Mas#1
 min=0, at elem# 69495
 max=1, at elem# 2677



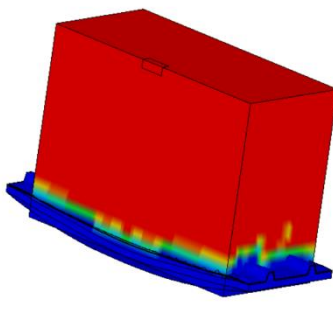
Time=400 MicoS

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
Time = 0.99999
Contours of Volume Fraction Mat#1
min=0, at elem# 701342
max=1, at elem# 2677



Time=1000 MicoS

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
Time = 3
Contours of Volume Fraction Mat#1
min=0, at elem# 703621
max=1, at elem# 2677



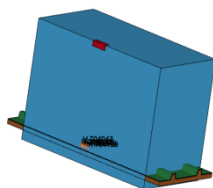
Time=3000 MicoS

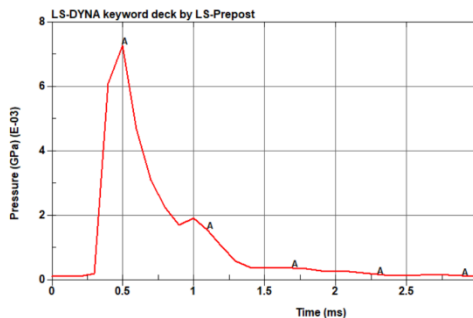
شکل ۹- انفجار ماده منفجره در ارتفاع یک متری ساندویچ پنل و انتشار موج انفجار بالای RSP

برآورد میزان فشار ماکزیمم موج انفجار قبل و بعد از برخورد به RSP در ادامه به برآورد میزان فشار موج انفجار قبل و بعد از برخورد به RSP پرداخته می‌شود. با تعیین ماکزیمم فشار موج انفجار در موقعیت‌های مختلف قبل و بعد از برخورد به RSP می‌توان به برآوردی از میزان آسیب و تخریب تجهیزات قرار داده‌شده، قبل و بعد از عبور از RSP

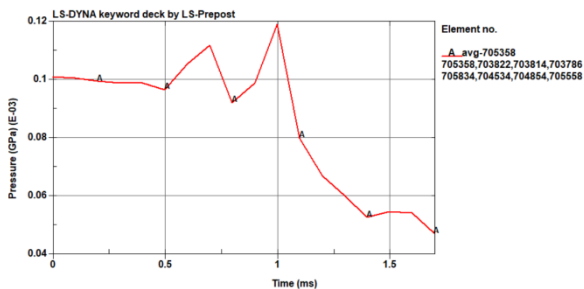
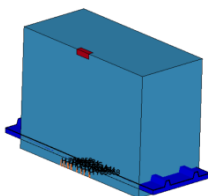
پرداخت، به گونه‌ای که بر اساس معیارهایی که برای ارائه شده است، می‌توان نحوه تخریب نفرات، تأسیسات و تجهیزات قرار داده شده در پشت ساندویچ پنل را برآورد نمود. برای این منظور با تعریف یک سری نقاط (Tracer) در موقعیت‌های مختلف منحنی فشار - زمان رسم شده و پیک فشار برای هر موقعیت تعیین شده است. در شکل ۱۰ تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان برای نقاط نشان داده شده در شکل که بالای RSP قرار دارند، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که حداکثر فشار ماده منفجره و در این موقعیت حدود $7/7 \text{ MPa}$ هست و در زمان حدود $1/5 \text{ ms}$ به صفر می‌رسد.

در شکل ۱۱ تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان برای نقاط نشان داده شده در شکل که زیر RSP قرار دارند، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که حداکثر فشار ماده منفجره و در این موقعیت حدود 120 KPa هست و در زمان حدود $1/5 \text{ ms}$ به صفر می‌رسد. همچنین فشار اتمسفر حدود $0/1 \text{ MPa}$ بوده و مقادیر فشار کمتر از $0/1 \text{ MPa}$ باعث ایجاد خلأ در ناحیه انتخابی می‌گردد، فشار منفی یا فشار کمتر از فشار اتمسفر باعث تخریب ثانویه‌ای در قطعات و تجهیزات قرار داده شده در سوله می‌شود.





شکل ۱۰- تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان قبل از برخورد به RSP



شکل ۱۱- تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان در نقاط واقع شده زیر RSP

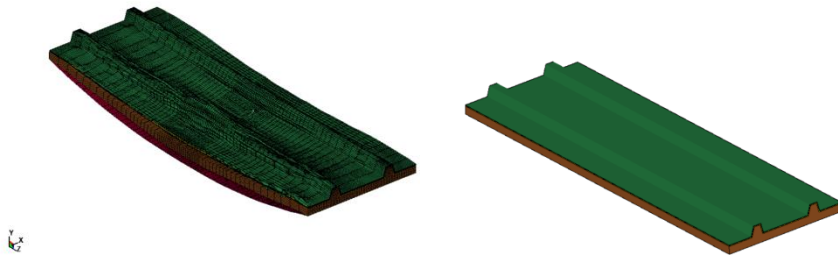
به‌طور متوسط اگر فشار موج انفجار بالای ۶۳ کیلو پاسکال باشد نفرت و اگر بالای ۱۰۰ KPa باشد تجهیزات سبک دچار تخریب می‌شوند. فشار موج انفجار محاسبه شده بعد از نشان RSP می‌دهد که حداکثر فشار مثبت نسبی موج انفجار ۲۰ KPa است. این میزان فشار از مقدار

است و لذا تجهیزات داخل سوله سالم می ماند. برای تخریب نفرات و سازه های سبک قرار داده شده در اتاقک کمتر 63KPa و 100KPa که

برآورد نحوه تخریب ساندویچ پنل

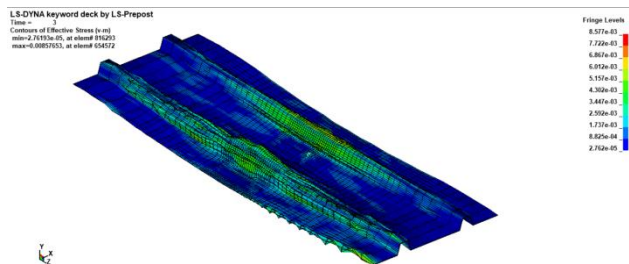
در شکل ۱۲ شکل اولیه و تغییر شکل یافته RSP در زمان ۳ میلی ثانیه بعد از انفجار نشان داده شده است، مشاهده می گردد که روکش پلی یوریمی بعد از برخورد موج انفجار دچار تغییر شکل شدید شده است ولیکن اثر پارگی و تغییر شکل در آن مشاهده نمی شود.

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost
Time = 3

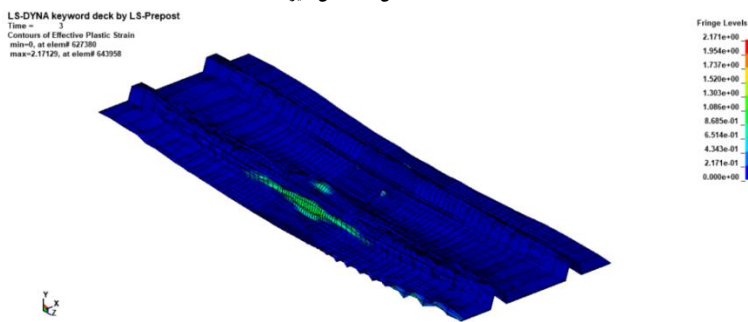


شکل ۱۲ - شکل اولیه و تغییر شکل یافته RSP بعد از برخورد موج انفجار

در شکل ۱۳ کانتورهای توزیع تنش فون مایز و کرنش پلاستیک ایجاد شده در روکش ۲ میلی متر پلی یوریمی نشان داده شده است. تنش معادل ماکزیمم در آن حدود 10MPa هست و افزایش طول حداکثر ۲۱۷ درصدی در زمان 3ms بعد از انفجار در آن ایجاد شده است.



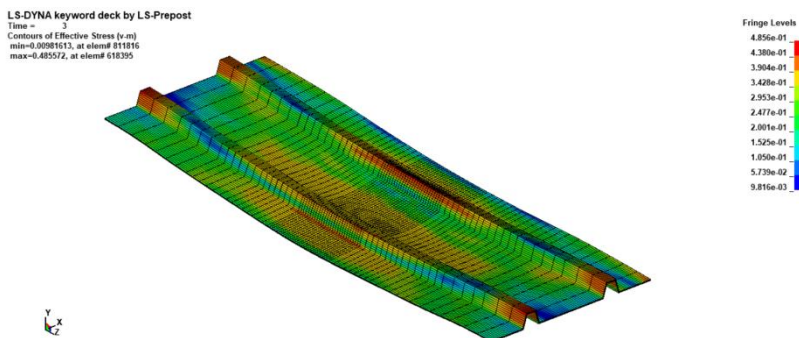
الف - تنش معادل فن مایز



ب - کرنش پلاستیک

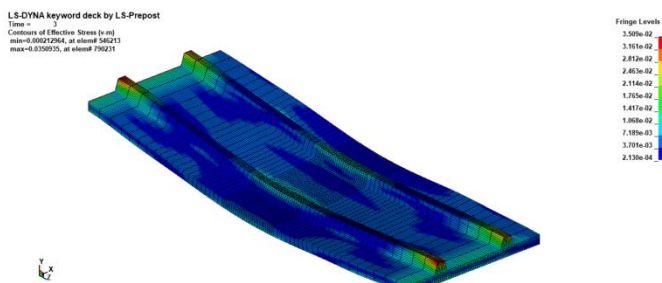
شکل ۱۳ - کانتور تنش معادل فن مایز و کرنش پلاستیک ایجاد شده در روکش با ضخامت ۲ میلی متر

در شکل ۱۴ کانتور توزیع تنش فون مایز در ورق موجدار فولادی ۴ میلی متر نشان داده شده است، بیشترین تنش فون مایز حدود 80 MPa است و دچار تغییر شکل پلاستیک شده ولیکن شکست و پارگی در آن ایجاد نشده است.



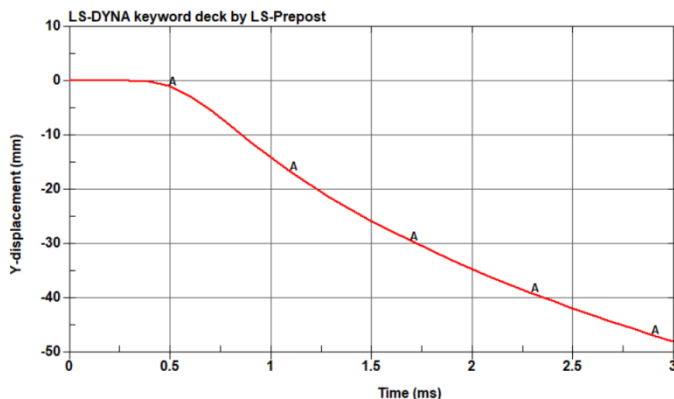
شکل ۱۴- کانتور تنش معادل فن مایز در ورق موجدار با ضخامت ۴ میلی متر

در شکل ۱۵ کانتور توزیع تنش فون مایز در فوم پلی اورتان آورده شده است، بیشترین تنش فون مایز در فوم پلی اورتان حدود ۳۵MPa است و پارگی در آن مشاهده نمی گردد.



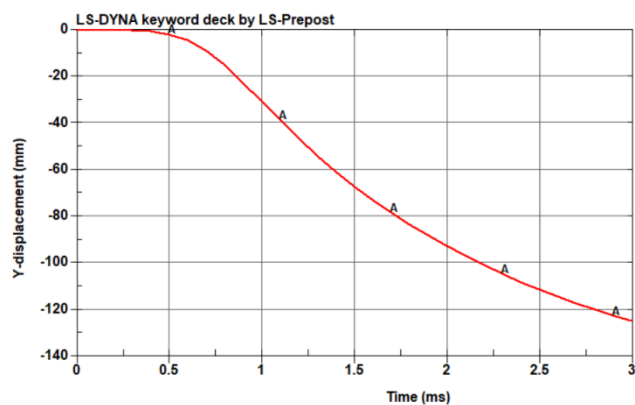
شکل ۱۵- کانتور تنش معادل فن مایز در فوم پلی اورتان و ورق زیری با ضخامت ۰.۴ میلی متر

در شکل ۱۶ نمودار جابجایی وسط ورق موجدار تا زمان ۳۵۰۰ MicroS بعد از انفجار نشان داده شده است، حداکثر تغییر شکل در ورق حدود ۵۰ میلی متر است.



شکل ۱۶- نمودار جابجایی عمودی روکش RSP برحسب زمان

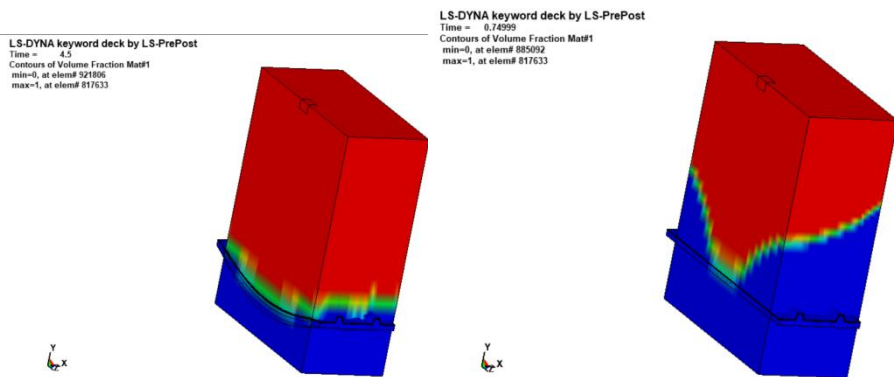
در شکل ۱۷ نمودار جابجایی ورق زیرین برحسب نشان داده شده است، حداکثر تغییر شکل در ورق حدود ۱۲۰ میلی‌متر است. ورق زیری ساندویچ پل حدود ۱۲۰ میلی‌متر جابجا شده ولیکن دچار پارگی و شکست نشده است.



شکل ۱۷- نمودار تغییر مکان عمودی ورق زیرین RSP برحسب زمان

در بررسی بعدی، ضخامت روکش ۲ میلی متر در نظر گرفته شده و اثر انفجار ماده منفجره به وزن ۴ Kg و در فاصله ۱/۵ متر از ساندویچ پنل تقویت شده بررسی شده است، نتایج به طور خلاصه مطابق شکل های ۱۸ تا ۲۳ است.

در شکل ۱۸ انتشار موج انفجار مجاور ساندویچ پنل نشان داده شده است ۷۰۰ میکروثانیه بعد از شروع انفجار موج انفجار به RSP رسیده است. همچنین ۴/۵ میلی ثانیه بعد از انفجار، RSP دچار تغییر شکل و خمش شده است ولیکن موج انفجار از ساندویچ پنل عبور ندهوده است.

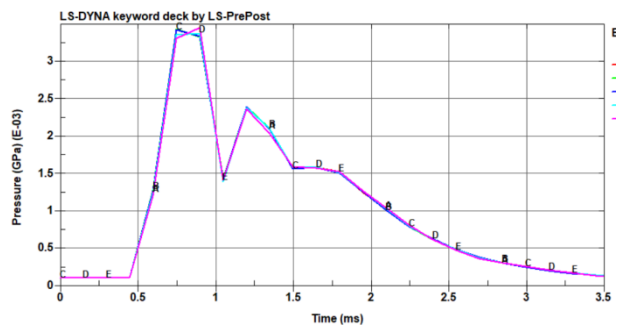


Time=4500 MicoS Time=750 MicoS

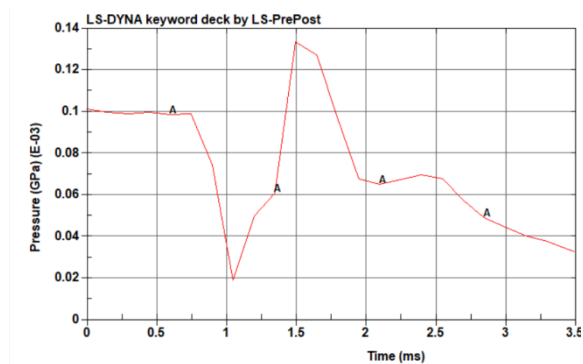
شکل ۱۸- انفجار 4Kg ماده منفجره در ارتفاع 1.5 متری ساندویچ پنل و انتشار موج انفجار بالای RSP، زمان برخورد موج

انفجار 750MicroS

در شکل ۱۹ و ۲۰ تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان قبل و بعد از برخورد به RSP، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که حداکثر فشار ماده منفجره قبل از برخورد به ساندویچ پنل حدود ۴GPa بوده و در سمت پشتی ساندویچ پنل فشار هوا به حدود ۳۷ کیلوپاسکال رسیده است. این فشار کمتر از فشار لازم برای تخریب تجهیزات و نفوذات واقع شده در پشت دیواره ساندویچ پنل است.



شکل ۱۹- تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان در نقاط بالای RSP، فشار ماکزیمم 4MPa



شکل ۲۰- تغییرات فشار موج انفجار برحسب زمان در نقاط زیر RSP، فشار ماکزیمم 37KPa

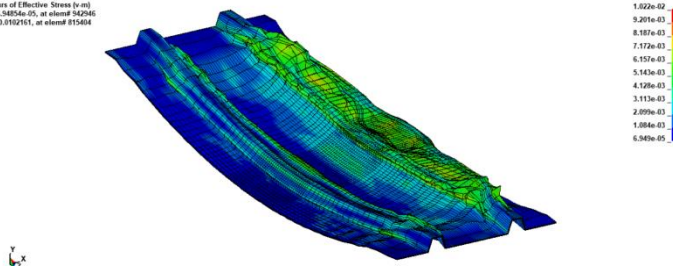
در شکل ۲۱ وضعیت اولیه و تغییر شکل یافته RSP، ۴/۵ میلی ثانیه بعد از انفجار نشان داده شده است، مطابق شکل ۲۲ روکش پلیمر بعد از برخورد موج انفجار دچار تغییر شکل و اعوجاج شده است ولیکن اثر پارگی و در آن مشاهده نمی شود.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 4.5



شکل ۲۱- شکل تغییر شکل یافته RSP بعد از برخورد موج انفجار

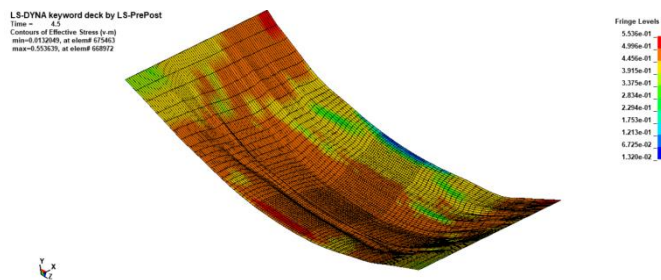
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 4.5
Contours of Effective Stress (s) [m]
min=6.54854e-05, at element 542946
max=0.0192761, at element 815404



شکل ۲۲ - کانتور توزیع تنش و شکل تغییر شکل یافته روکش RSP بعد از برخورد موج انفجار

در شکل ۲۳ کانتور توزیع تنش فون مایز ورق زیرین ۰/۴ میلی متر ساندویچ پنل نشان داده شده است بیشترین تنش فون مایز در فوم پلی اورتان وسط حدود MPa550 است، این

مقدار تنش از تنش نهایی فولاد St37 بیشتر بوده ولیکن به دلیل افزایش تنش نهایی فلزات در بارگذاری ضربه‌ای و انفجار فولاد St37، توانایی تحمل این میزان تنش را داشته است و تغییر مکان حدود ۲۵۰ میلی‌متر در مرکز ورق ایجاد نموده است.



شکل ۲۳ - کانتور توزیع تنش و شکل تغییر شکل یافته روکش پلی یورپای و ورق زیری RSP بعد از برخورد موج انفجار

آزمایش‌های تجربی انجام شده

جهت صحه‌گذاری شبیه‌سازی‌های انجام شده، چندین تست تجربی انجام شده است. در این تست‌ها ضخامت روکشی RSP پلی یورپای ۲ تا ۳ میلی‌متر در فاصله ۱ تا ۲ متر از پنل ساندویچی با ماده منفجره ۲ کیلوگرمی در نظر گرفته شده است. در این تست‌ها مشاهده گردیده است که موج انفجار با برخورد به ساندویچ پنل مورد بررسی فقط باعث تغییر شکل آن شده و پارگی یا عبور موج انفجار در قسمت پشت ساندویچ پنل مشاهده نگردیده است. در شبیه‌سازی و تست‌های انجام شده مشاهده گردیده که در هر دو حالت روکش RSP، جلوی موج انفجار را گرفته و خود دچار تغییر شکل شده است. لازم به

ذکر است که به دلیل طولانی بودن زمان اجرای شبیه‌سازی در زمان $3(m.s)$ بعد از انفجار نشان داده شده و حرکت ارتعاشی ورق بعد از برخورد موج بررسی نگردیده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله برای وزن ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم ماده منفجره و برای انفجار در فواصل ۱ تا ۲ متری ساندویچ پنل تقویت‌شده با روکش پلیمری پلی یورئای با ضخامت ۲ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر بررسی و شبیه‌هایی عددی از انفجار ماده منفجره صورت گرفته و میزان فشار موج انفجار، توزیع تنش در ساندویچ پنل، میزان تغییر شکل یا شکست اجزای ساندویچ پنل با برخورد موج و میزان آسیب و خسارت وارده به نفرات و تجهیزات پشت آن بررسی و تعیین شده است. در ادامه نتایج دو مورد شبیه‌سازی آورده شده است، بر اساس بررسی و تحلیل انجام‌شده نتایج به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

- انفجار ۲ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱ تا ۲ متری ساندویچ پنل تقویت‌شده با روکش پلیمری با ضخامت ۲ و ۴ میلی‌متر پلی یورئای هیچ‌گونه آسیبی به نفرات و تجهیزات داخل سوله ایجاد نمی‌کند و نفرات و تجهیزات داخل سوله سالم می‌مانند.

- موج انفجار حاصل از انفجار ۳ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱ تا ۲ متری ساندویچ پنل تقویت‌شده با روکش پلیمری با ضخامت ۲ و ۴ میلی‌متر آسیبی برای نفرات و تجهیزات

ندارد. ولیکن شکست قسمت‌هایی از ورق زیر و برخورد آن‌ها به نفرات و تجهیزات آسیب جزئی ممکن است ایجاد کند.

- موج انفجار حاصل از انفجار ۴ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱ متری ساندویچ پنل تقویت‌شده با روکش پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر تخریبی روی نفرات و تجهیزات ندارند ولیکن آسیب جزئی به علت برخورد ذرات ورق زیری ایجاد می‌گردد. برای ضخامت ۴ میلی‌متر روکش و در فاصله ۱ متری انفجار ماده منفجره از ساندویچ پنل تجهیزات و نفرات دچار آسیب بسیار جزئی به علت موج انفجار و برخورد ذرات ورق زیری می‌شوند. برای ضخامت ۴ میلی‌متر روکش و در فاصله ۲ متری، انفجار ماده منفجره تخریب جزئی برای تجهیزات و نفرات ممکن است به علت برخورد ذرات ورق زیری ایجاد کند.

- در هیچ‌یک از موارد تحلیل‌شده فشار پشت ساندویچ پنل به ۶۳ کیلوپاسکال یا کیلوپاسکال ۱۰۰ نرسیده و حداکثر فشار زیر ساندویچ پنل و در فاصله نزدیک ساندویچ پنل در تحلیل‌های انجام‌شده ۴۰ کیلوپاسکال هست که باعث تخریب خیلی جزئی در تجهیزات و نفراتی که ممکن است در نزدیکی ساندویچ پنل باشند ایجاد کند و در صورت استفاده از ساندویچ پنل به‌عنوان سقف سوله‌ها با توجه به اینکه ارتفاع سوله‌ها عموماً بیشتر از ۱۰ متر

است، لذا در کف زمین که محل قرارگیری تجهیزات و نفرات است میزان فشار خیلی کم و قابل صرف نظر کردن است.

- در کل با ایجاد روکش ۲ تا ۴ میلی متری پلیمر پلی یورئای در ساندویچ پنل های صنعتی موجود در بازار می توان این ساندویچ پنل ها را در برابر موج انفجار تقویت نمود و خسارات وارد به نفرات و تجهیزات را حداقل نمود.

منابع:

- [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] Dođru, 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).

11- Hallquist J.O., *LS-DYNA keywords user's Manual-Volume II (version 971)*, Livermore software technology corp. Livermore, 2001.

12- Carleone J., Tactical missile warhead, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA Tactical Missile Series V. 155, pp 246, 1993.

