



بررسی تجربی و عددی پنل‌های ساندویچی با هسته موجدار دوزنقه‌ای شکل، تحت بارگذاری انفجاری مایل

هادی محمدی هویه^۱، علیرضا نداف اسکوئی^{۲*}، توحید میرزابابای مستوفی^۳، خداداد واحدی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

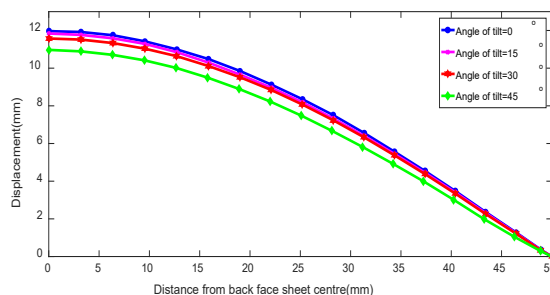
^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران

^۴ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- با افزایش زاویه خرج انفجاری تغییر شکل پنل ساندویچی کاهش می‌یابد.
- انرژی مستهلک‌شده پلاستیک برای جرم خرج با زاویه ۴۵ درجه نسبت به زوایای دیگر کاهش قابل توجهی دارد.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

*نویسنده مسئول:

anadaf@ihu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

هسته موجدار

پنل ساندویچی

انفجار مایل

روش کوپل اویلری-لاگرانژی

چکیده

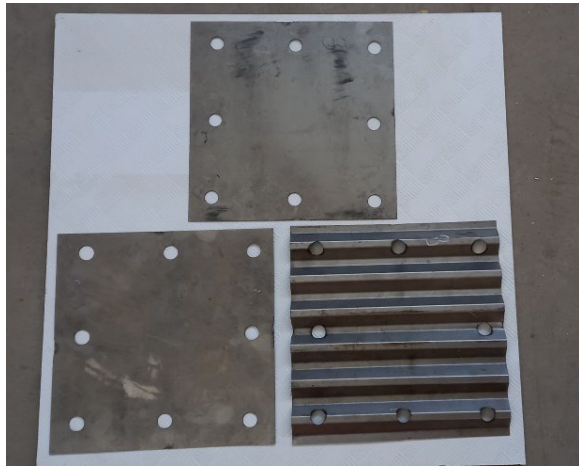
در این تحقیق به بررسی حل تجربی و عددی پنل‌های ساندویچی ST37 با هسته موجدار دوزنقه‌ای شکل تحت انفجار مایل پرداخته شده است. هسته پنل با ضخامت ورق ۰/۷ میلی‌متر به کمک عملیات خم‌کاری و ورق‌های رویی و پشتی به ضخامت ۱ میلی‌متر و طول و عرض ۲۷۰ میلی‌متر تهیه گردیده است. به منظور انجام انفجار مایل، لوله‌های انفجاری در زوایای صفر (موازی پنل هدف)، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به پنل هدف با فاصله استقرار خرج ثابت ۳۰۰ میلی‌متر تهیه گردیده است. از ماده منفجره C4 با جرم ثابت ۱۰ گرم در پروسه‌های انفجار استفاده گردیده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس و با استفاده از تکنیک کوپل اویلری - لاگرانژی به حل عددی مسئله پرداخته شده است. با مقایسه نتایج حل عددی و تجربی قرابت مناسبی بین آن‌ها مشاهده می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب خرج نسبت به پنل هدف از صفر تا ۴۵ درجه، مقادیر تغییر شکل نقطه میانی، کاهش می‌یابد. در جرم خرج‌های بزرگ‌تر، این کاهش تغییر شکل نسبت به جرم خرج‌های کوچک‌تر بیشتر خواهد بود. همچنین به دلیل هدایت بخش زیادی از موج انفجار به خارج از لوله انفجاری میزان انرژی مستهلک‌شده پلاستیک برای جرم خرج با زاویه ۴۵ درجه کاهش قابل توجهی نسبت به سایر زاویه‌ها دارد.

۱- مقدمه

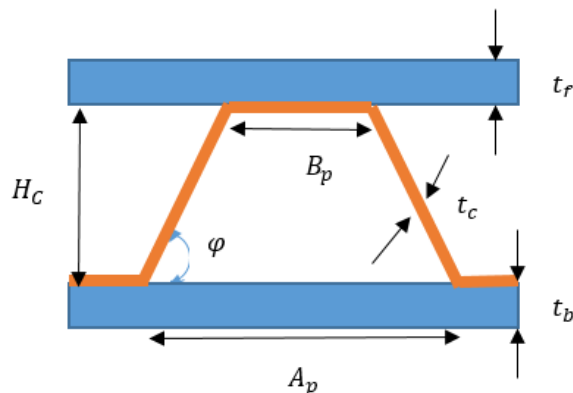
امروزه برای مقابله با مین‌های زمینی، بدنه تانک‌ها و نفربرها به صورت "V" شکل طراحی و ساخته می‌شوند [۱]. این طراحی مهم باعث منحرف ساختن موج انفجار و کاهش آسیب ناشی از آن به افراد و بدنه وسیله نقلیه زرهی می‌گردد. واهاش و کسپیر دو مورد از پیشرفته‌ترین نفربرهای حمل سربازان هستند که در طراحی آن‌ها از بدنه "V" شکل استفاده گردیده است [۲-۴]. در شرایطی که مین یا ماده منفجره در زیر چرخ منفجر شود، در نتیجه یک بار مورب در یک طرف "V" ایجاد می‌گردد. برای مقابله با چنین شرایطی به کمک سازه‌های ساندویچی مقاوم می‌توان آسیب‌های ناشی از اثر موج انفجار را به حداقل رساند. امروزه تحقیقات زیادی در زمینه انفجار مستقیم بر روی پنل‌های ساندویچی و تحقیقات اندکی در زمینه بارگذاری مایل بر روی صفحات فلزی انجام گرفته است. بازیسی و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۴ به صورت تجربی و عددی تأثیر تزیق فوم در داخل هسته موجدار فلزی را، بر روی مقاومت انفجاری پنل‌های ساندویچی، بررسی نمودند. آن‌ها سه نوع پنل با هسته‌های موجدار، فومی و ترکیب موجدار و فومی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که پر کردن فوم در سلول‌های موجدار مقدار ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی را بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. ژنگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ به تحلیل عددی و تجربی سازه ساندویچی با هسته موجدار مثلثی تحت بار انفجار پرداختند. آن‌ها از روش جوشکاری لیزری برای جوش هسته میانی به ورق‌های بالایی و پایینی استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که ماکزیمم تغییرشکل در مرکز، برای صفحه جلویی در مقایسه با صفحه پشتی بیشتر بوده و در اکثر فاصله‌گذاری‌های نزدیک با ماده منفجره، مستعد شکستگی می‌باشد. آن‌ها نتایج عددی خود را با نتایج تجربی مقایسه نمودند. در سال ۲۰۱۸ چنگ و همکاران [۷] پاسخ دینامیکی به موج انفجار را برای سازه مربوط به پژوهش ژنگ و همکاران [۶] با پر کردن هسته با فوم آلومینیومی و فوم PVC آزمون نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سازه پر شده با فوم، مقاومت انفجاری بهتری نسبت به سازه پر شده با آلومینیوم دارد. ژنگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ به

بررسی پاسخ دینامیکی پنل ساندویچی با هسته موجدار دوزنقه‌ای تحت بار انفجار پرداختند. هسته موجدار مذکور با فوم PVC پر شده است. آن‌ها نشان دادند که پر کردن هسته با فوم می‌تواند به مقاومت انفجاری پنل کمک کند. همچنین نتایج خود را برای سه حالت هسته بدون فوم، فوم پر شده در صفحه جلویی و فوم پر شده در صفحه پشتی انجام داده و باهم مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سطح بهبود بخشی مقاومت انفجاری کاملاً به استراتژی پر کردن فوم‌ها مرتبط است. به طوری که استراتژی فوم پر شده در صفحه پشتی کمترین کارایی در کاهش سطح شکستگی و تغییرشکل پلاستیک را دارد. یوئن و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۲ به تحلیل تجربی و عددی ورق فلزی "V" شکل تحت بار انفجار پرداختند. آن‌ها برای زاویه تلاقی دو ورق حالت‌های مختلف ۹۰ تا ۱۸۰ درجه و فاصله استقرار خرج را ثابت در نظر گرفتند. همچنین محل استقرار ماده منفجره را در موقعیت مرکزی صفحه در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها روند کلی افزایش تغییرشکل دائمی نقطه میانی با افزایش جرم ماده منفجره در فاصله استقرار ثابت را دارد. همچنین مشاهده می‌گردد که صفحات زاویه‌ای کوچک‌تر فشار گاز بیشتری را منحرف می‌کنند و در نتیجه انحراف صفحه از نقطه وسط کمتر می‌شود. چنامستی و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۵ به تحلیل تجربی و عددی پاسخ دینامیکی ورق ساخته شده از سوپر آلیاژ پایه نیکل تحت موج شوک مایل پرداختند. آن‌ها تست‌های تجربی خود را به کمک دستگاه شوک انفجاری و در زوایای صفر، ۱۵ و ۳۰ درجه صفحه نسبت به ماده منفجره انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرشکل خارج از صفحه صفحات با افزایش زاویه انحراف کاهش می‌یابد. همچنین نزدیکی قبل قبولی در نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌گردد. یوئن و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی به بررسی تأثیر بارگذاری انفجاری مایل بر روی ورق فولادی پرداختند. آن‌ها به کمک پاندول بالستیک افقی برای دو حالت تغییر زاویه ماده منفجره و تغییر زاویه ورق فولادی در حالت‌های صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به یکدیگر، تغییرشکل ورق را به دست آوردند. آن‌ها نتایج حل تجربی خود را با حل عددی مقایسه کرده و نشان دادند که کج شدن بار انفجاری یا

45° می‌باشد. شکل ۲ شمای مقطع عرضی سازه موردنظر و پارامترهای هندسی مربوطه را نشان می‌دهد



شکل (۱): ورق‌های رویی، پشتی و هسته پنل ساندویچی.



شکل (۲): شمای مقطع عرضی پنل ساندویچی.

در فرایندهای انفجار آزاد فقط جبهه موج با نمونه برخورد کرده و سبب شکل‌دهی می‌شود ولی مقدار بسیار زیادی از انرژی انفجاری در محیط تلف می‌شود. گاهی این جبهه موج، انرژی لازم جهت ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در نمونه را ندارد که به‌ناچار برای افزایش انرژی آن باید مقدار جرم خرج انفجاری را افزایش دهند؛ اما افزایش جرم خرج انفجاری مشکلاتی از قبیل شرایط ایمنی، صداهای بسیار بلند به وجود می‌آورد. استفاده کردن از لوله انفجاری (جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه) تا حد بسیار زیادی این مشکلات را برطرف می‌سازد و می‌توان موج‌های انعکاسی از دیواره‌های داخلی لوله را به سمت نمونه هدایت کرده و در نتیجه در مقدار خرج کمتری فرایند شکل‌دهی صورت پذیرد. در این تحقیق از ۴ نوع لوله فولادی که آن‌ها را می‌توان صلب در

صفحه هدف منجر به کاهش خسارت به صفحه هدف شده که نشان می‌دهد بخشی از بار منتهی به صفحه هدف با افزایش زاویه شیب منحرف‌شده است و در نتیجه تغییرشکل ماکزیمم کمتر گردیده است.

ژنگ، چنگ و همکاران [۶ و ۷] در تحقیقات اخیر خود بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف مثلثی، دوزنقه‌ای و پرشده با فوم را موردبررسی و بارگذاری انفجاری قرار دادند لیکن در هیچ‌کدام بارگذاری انفجاری به‌صورت زاویه‌دار در نظر گرفته نشده است. یوئن [۱۱] در تحقیق اخیر خود برای ورق تک لایه فلزی بارگذاری انفجاری را به‌صورت زاویه‌دار در نظر گرفت؛ اما برای سازه ساندویچی با هسته موجدار این موضوع هنوز بررسی نگردیده است. در تمامی تحقیقات صورت گرفته تاکنون بر روی سازه‌های ساندویچی، بررسی تجربی و مطالعه عددی بارگذاری انفجاری مایل انجام پذیرفته است. به‌عبارت‌دیگر برای سازه ساندویچی با هسته موجدار، بارگذاری انفجاری مایل در زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه انجام نگرفته است. هدف این تحقیق، بررسی تغییرشکل پنل‌های ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای تحت بارگذاری انفجاری مایل است.

۲- آزمایش‌های تجربی

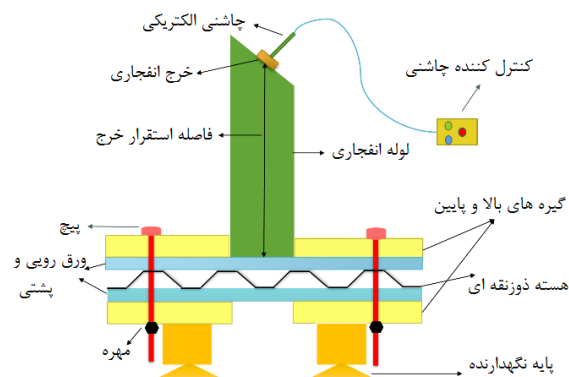
۲-۱- هندسه، لوله انفجاری و گیره‌ها

نمونه تهیه‌شده در این پژوهش پنل‌های ساندویچی فولادی از جنس ST37 می‌باشد. برای تهیه پنل ساندویچی ابتدا به تهیه ورق‌های جلویی و پشتی و سپس هسته با هندسه دوزنقه‌ای شکل پرداخته‌شده است. شکل ۱ این سازه را به‌صورت قطعات مجزا نمایش می‌دهد. هسته پنل ساندویچی به کمک عملیات خم‌کاری و با استفاده از فشار وارده توسط پانچ در قالب تنظیم‌شده توسط دستگاه خم‌کاری انجام گردیده است. اندازه طول و عرض ورق‌های رویی و پشت هرکدام 270 mm در نظر گرفته‌شده است. ضخامت ورق رویی و پشتی $t_f=t_b=1\text{ mm}$ و ضخامت ورق هسته موردنظر $t_c=0.7\text{ mm}$ در نظر گرفته‌شده است. ابعاد هندسی در هسته دوزنقه‌ای، $H_c=14\text{ mm}$ ، $B_p=7\text{ mm}$ و φ



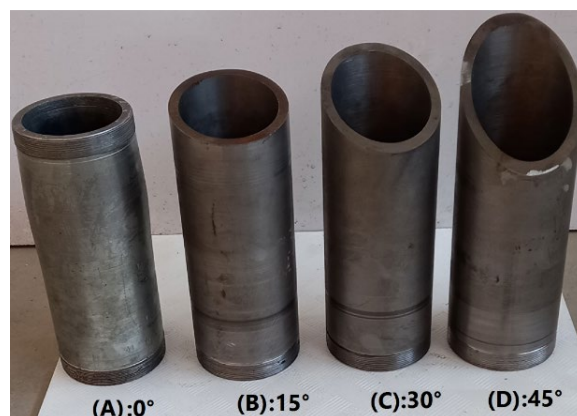
شکل (۴): گیره‌های نگهدارنده پنل ساندویچی.

به منظور جلوگیری از جابجایی یونولیت، به کمک چسب نواری به نگهدارنده محکم بسته می‌شود تا بتواند در مکان خود ثابت باشد. سپس چاشنی به آرامی درون ماده منفجره قرار داده شده است. حال سیم چاشنی الکتریکی به بیرون از محیط اتاقک انفجار کشیده می‌شود و درب اتاقک بسته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی بارگذاری انفجاری مایل بر روی پنل‌های ساندویچی ST37 است. برای بررسی این مهم ۴ نمونه آزمایش، تحت بار انفجاری با میزان ماده انفجاری ثابت ۱۰ گرم انجام پذیرفته است. در این آزمون ابتدا برای نمونه اول از لوله با زاویه صفر درجه (موازی پنل هدف) استفاده شده است. در آزمایش بر روی نمونه دوم، سوم و چهارم نیز به ترتیب بر روی لوله‌های با زاویه شیب خرج ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به پنل ساندویچی استفاده شده است. پس از انجام آزمایش هر نمونه، مجموعه آزمایش به بیرون اتاقک انفجار آورده شده و پنل تغییرشکل یافته از گیره‌ها مربوطه جدا شده و میزان تغییرشکل ورق‌های رویی و پشتی پنل اندازه‌گیری و یادداشت گردیده است. شکل ۵ شمای شماتیک مجموعه آزمون را نمایش می‌دهد.



شکل (۵): شمای شماتیک مجموعه آزمون.

نظر گرفت، استفاده شده است. قطر داخلی لوله‌ها ۱۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی آن‌ها ۱۲۰ میلی‌متر است. انتهای لوله‌ها به گونه‌ای توسط دستگاه وایرکات بریده شده است تا زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به افق (موازی صفحه هدف) تشکیل دهد. ارتفاع لوله‌ها نیز از محل قرارگیری خرج تا صفحه هدف (فاصله استقرار خرج)، برای همه یکسان و برابر ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این لوله‌ها از سمت دیگر به منظور اتصال به گیره بالایی رزوه می‌شوند. شکل ۳ لوله‌های مذکور با ابعاد موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل (۳): لوله انفجاری در زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵.

به منظور ثابت نگه داشتن لوله انفجاری و پنل ساندویچی از دو گیره صلب مطابق شکل ۴ استفاده می‌شود. روی سطح این دو گیره ۸ عدد سوراخ ساده (قطر ۱۷ میلی‌متر) که بر روی یک مقطع مربعی با فاصله یکسان قرار دارند، تعبیه شده است. لوله انفجاری به گیره بالایی رزوه می‌شود و ورق هدف بین دو گیره قرار می‌گیرد. گیره بالایی و پایینی توسط پیچ و مهره (M16) به هم بسته می‌شوند. بدیهی است که در پنل‌های ساندویچی نیز باید ۸ عدد سوراخ به قطر ۱۷ میلی‌متر ایجاد شود. ضخامت گیره‌ها ۲۵ میلی‌متر و با طول و عرض یکسان ۲۷۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. جنس این گیره‌ها نیز از جنس فولاد ساختمانی است.

۲-۲- رویه انجام آزمون انفجار

پس از بسته شدن لوله انفجاری به گیره بالایی، مجموعه موردنظر بر روی فیکسچر در داخل اتاقک انفجار مربوطه استوار می‌گردد. سپس خرج انفجاری C4 به داخل نگهدارنده مخصوص قرار گرفته و روی آن با یونولیت پوشانده می‌شود.

$$\gamma = R / C_v \quad (3)$$

در رابطه (۳) پارامترهای C_v و R به ترتیب گرمای ویژه در حجم ثابت و ثابت جهانی گازها است. معادله حالت یک گاز ایده آل در شرایط یکنواخت و آنتروپی ثابت برای حالتی که فشار به صورت تابعی از انرژی (E) و چگالی (ρ) بیان شود، به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد [۱۶]:

$$P = (\gamma - 1)\rho E \quad (4)$$

جدول ۲ مقادیر ثابت هوا موردنیاز برای شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد:

جدول (۲): مقادیر ثابت ماده برای هوا [۱۷]

ρ (kg/m ³)	R (J/kg K)	C_v (J/kgK)	P(Ambient) (MPa)
۱/۲۲۵	۲۸۷/۰۵۸	۰/۷۱۸	۰/۱۰۱۳۲۵

۳-۳- انتخاب مدل مادی

مدل‌های مادی بیان‌کننده رفتار تنش-کرنش و سیلان ماده می‌باشند. 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. این‌گونه رفتار در برخوردهای با سرعت بالا اتفاق می‌افتد. در این مدل تنش تسلیم با تغییر کرنش، نرخ کرنش و دما تغییر می‌کند. در این مدل تنش سیلان مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸-۲۲]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p\right) \left(1 - T^*m\right) \quad (5)$$

در رابطه (۵) A ، B ، C ، m و n ثوابت ماده و ε ، $\dot{\varepsilon}_p$ به ترتیب نشان‌دهنده تنش، کرنش و نرخ کرنش پلاستیک هستند. T^* دمای مطلق بوده که توسط رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۹]:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (6)$$

که در رابطه (۶) T_{melt} و T_{room} به ترتیب دمای اتاق و نقطه ذوب ماده هستند. ثوابت رابطه (۵) برای فولاد ساختمانی ST37 مطابق جدول ۳ ارائه می‌گردد:

جدول (۳): ثوابت جانسون کوک برای ST37 [۲۳]

A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	m	n
۳۸۰	۱۸۷/۷	۰/۰۲۲	۱	۰/۳۸

۳- حل عددی

برای حل عددی مسئله حاضر نیاز به معرفی معادله حالت ماده منفجره، معادله حالت هوا و مدل مادی انتخاب‌شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی موفق، ارائه روش حل مناسب نیز از اهمیت فراوانی برخوردار است. در ادامه این دو مهم به تفصیل بیان می‌گردد.

۳-۱- معادله حالت ماده منفجره

معادله حالات مختلفی برای توصیف فشار و انبساط محصولات گازی تولیدشده در اثر انفجار مواد منفجره پیشنهادشده است؛ اما معادله حالت JWL به دلیل سادگی در محاسبات و بیشترین تطبیق با نتایج آزمایش تجربی، در بسیاری از کدهای استاندارد برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. معادله حالت JWL که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است به شرح زیر است [۱۲-۱۵]:

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

که در رابطه (۱) P فشار انفجار، E انرژی داخلی بر واحد حجم، V حجم نسبی محصول انفجار، A و B ضرایب فشار و R_1 ، R_2 مقادیر ویژه اصلی و ثانویه هستند که به ترتیب رفتار محدوده کوتاه و دور محصولات انفجاری را به تصویر می‌کشند. پارامتر " ω " بخش کسری انرژی داخلی است که در فشار انفجاری سهیم است [۱۲]. ضرایب رابطه (۱) برای ماده منفجره C4 در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی معادله حالت JWL [۱۲].

A (GPa)	B (GPa)	R1	R2	ω	E (MJ/kg)
۶۰۹/۸	۱۲/۹۵	۴/۵	۱/۴	۰/۲۵	۵/۶۲۱

۳-۲- معادله حالت برای هوا

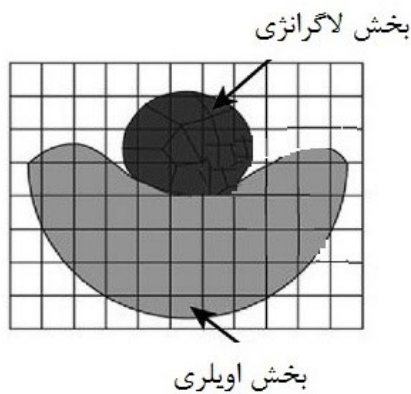
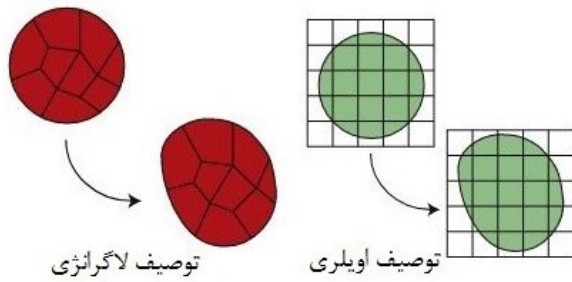
معادله آنتروپی مربوط به گاز ایده آل بصورت زیر نشان داده می‌شود [۱۶]:

$$P V^\gamma = F(S) \quad (2)$$

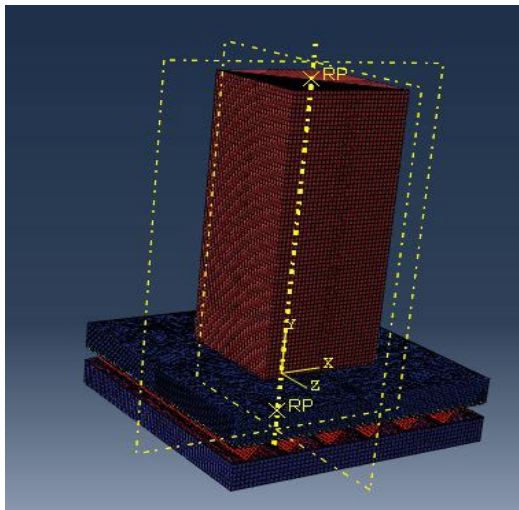
که در رابطه (۲)، P فشار، V حجم مخصوص، S آنتروپی ویژه و γ توان آدیباتیک بوده که دارای مقداری ثابت و برابر رابطه (۳) می‌باشد.

۳-۴- روش کوپل اویلری - لاگرانژی

مجموعه تست شبیه‌سازی شده برای حالتی که لوله انفجار، هوا و ماده منفجره در داخل محیط اویلری قرار گرفته‌اند را به همراه دستگاه مختصات نمایش می‌دهد. به کمک نرم‌افزار آباکوس و استفاده از روش کسر حجمی Eulerian volume fraction حجم ماده منفجره از حجم هوای داخل لوله انفجاری کسر خواهد شد. در این حالت در المان‌های هوا هیچ المانی از ماده منفجره وجود نخواهد داشت.



شکل (۶): تغییر شکل عنصر پیوسته در توصیف اویلری و لاگرانژی و ترکیب این دو توصیف.



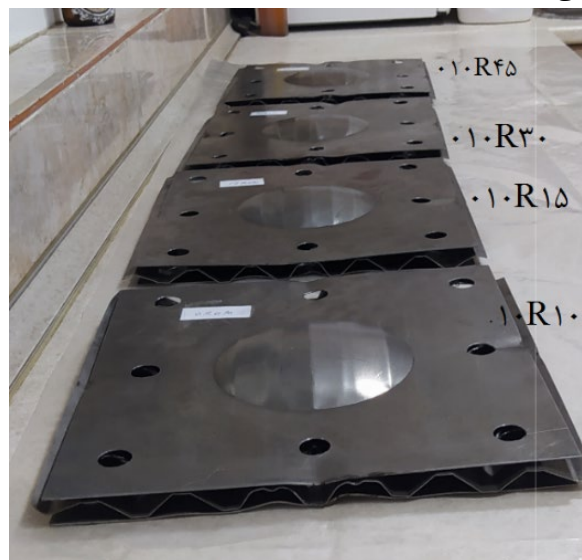
شکل (۷): مجموعه تست شبیه‌سازی شده.

برای انجام حل عددی مسئله از نرم‌افزار تجاری آباکوس ورژن ۲۰۱۷ به کمک روش اویلری - لاگرانژی استفاده گردیده است. برای توصیف حرکت یک عنصر حجمی به‌عنوان تابعی از زمان دو توصیف لاگرانژی و اویلری ارائه می‌گردد [۲۸-۲۴]. در توصیف لاگرانژی حرکت پیوستار به‌عنوان تابعی از مختصات زمان و مکان مواد تعریف می‌گردد. این توصیف اغلب برای مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی به کمک توصیف لاگرانژی، گره‌های مش لاگرانژی همراه با مواد حرکت می‌کنند؛ بنابراین رابط بین دو بخش دقیقاً ردیابی و شناسایی می‌گردد [۲۹]. این توصیف در تغییر شکل‌های بزرگ ممکن است منجر به گسستگی شبکه‌ها و اعوجاج المان‌ها گردد. در توصیف اویلری حرکت پیوستار به‌عنوان تابعی از مختصات فضایی و زمان تعریف گردیده است. این توصیف اغلب برای مکانیک سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ردیابی حرکت ماده در حوزه اویلری به یک مش مرجع اویلری که دچار اعوجاج نگردد، نیاز است. مزیت روش اویلری این است که در آن هیچ‌گونه اعوجاج المان رخ نمی‌دهد [۲۹]. شکل ۶ تغییر شکل یک عنصر پیوسته را در این دو توصیف و ترکیب این دو را نشان می‌دهد. در روش کوپل اویلری-لاگرانژی ماده منفجره و محیط واسطه به‌عنوان جسم‌های جداگانه مدل‌سازی می‌شوند و متناسب با معادله حاکم، فشار درون جسم تشریح می‌شود. به‌عبارتی دیگر در روش کوپل اویلری-لاگرانژی حل اجزا محدود صورت می‌گیرد و فشار از گره ابتدایی به گره‌های بعدی مطابق رفتار معادله حاکم منتشر می‌شود. به همین سبب در این روش اندرکنش سازه و سیال در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق محیط اویلری به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است تا لوله انفجاری، پنل ساندویچی و گیره‌ها را پوشش دهد. لذا مربوطه $304 \times 120 \times 120$ میلی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. هوا با استوانه‌ای توپر با ابعاد 300×100 میلی‌متر و ماده منفجره نیز به‌صورت دیسکی با قطر ۲۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۰/۵ مدل‌سازی شده است. شکل ۷

۴- نتایج و بحث

است که بار انفجاری به صورت یکنواخت بر سطح پنل وارد می‌گردد.



شکل (۸): پنل‌های ساندویچی پس از انفجار

در این بخش ابتدا به بررسی نتایج تجربی مسئله پرداخته شده است. سپس نتایج حل عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در انتها نیز نتایج مطالعه عددی ارائه می‌گردد.

۴-۱- نتایج مطالعه تجربی

نتایج تغییرشکل مربوط به ماکزیمم تغییرشکل عرضی ورق رویی و پشتی (بیشترین آسیب) پنل‌های ساندویچی در جدول ۴ ارائه گردیده است.

ماکزیمم تغییرشکل پنل ساندویچی در زوایای مختلف هنگامی رخ می‌دهد که خرج انفجاری موازی پنل هدف قرار گیرد، به عبارت دیگر زاویه خرج انفجاری نسبت به پنل هدف صفر درجه باشد. همچنین کمترین تغییرشکل عرضی نیز هنگامی به وقوع می‌پیوندد که ماده منفجره نسبت به پنل هدف در زاویه ۴۵ درجه قرار گیرد.

به عبارت دیگر به وضوح می‌توان مشاهده کرد که برای فاصله استقرار خرج یکسان، با افزایش زاویه انحراف ماده منفجره نسبت به پنل هدف، از صفر تا ۴۵ درجه، ماکزیمم تغییرشکل عرضی ورق رویی و پشتی پنل‌های ساندویچی کاهش می‌یابد. این نتایج بدین سبب است که هنگامی ماده منفجره نسبت به پنل هدف کج می‌گردد جبهه موج ابتدا به دیواره لوله انفجاری برخورد می‌کند و بخشی از انرژی موج انفجار متشکله توسط آن جذب می‌گردد و سپس به پنل ساندویچی برخورد می‌نماید. هر چه زاویه خرج افزایش یابد جبهه موج به دیواره‌ها زودتر برخورد کرده و جذب انرژی بیشتری را نتیجه می‌دهد. همچنین با مشاهده نتایج می‌توان دریافت که برای جرم خرج ۱۰ گرم میزان تغییرشکل ورق پشتی در زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به حالت صفر درجه به ترتیب ۴/۶۸٪، ۵/۸۶٪ و ۹/۷۷٪ کاهش تغییرشکل و برای ورق رویی ۱/۲۱٪، ۲/۶۶٪ و ۸/۷۱٪ کاهش تغییرشکل را در پی دارد. هندسه تغییرشکل یافته پنل‌های پشتی سازه ساندویچی از یک پروفیل مسطح شکل به هندسه‌ای گنبدی مانند در ورق پشتی مطابق شکل ۸، در تمامی تست‌ها تغییرشکل می‌دهند. این نشان‌دهنده آن

۴-۲- مقایسه نتایج مطالعه تجربی و عددی

جدول ۵ نتایج حل عددی و تجربی را برای تغییرشکل نقطه میانی ورق‌های رویی و پشتی پنل ساندویچی را در یک نگاه به نمایش می‌گذارد. همان‌گونه که از نتایج مشخص است قرابت خوبی بین نتایج حل عددی و تجربی وجود دارد. از نتایج عددی نیز این مهم اثبات می‌گردد که با افزایش زاویه جرم خرج مقدار جابجایی نقطه میانی کاهش می‌یابد.

در شکل ۹ و ۱۰ نیز مقایسه کیفی پروفیل تغییرشکل ورق پشتی در مطالعه تجربی و حل عددی برای زاویه ۱۵ درجه به ترتیب در راستای Z و X نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییرشکل ورق در راستای محور X به صورت مخروطی و در راستای محور Z به صورت گنبدی شکل می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی شباهت قابل توجهی را با مطالعه تجربی نشان می‌دهند و اختلاف قابل توجهی بین آن‌ها وجود ندارد.

۴-۳- نتایج مطالعه عددی

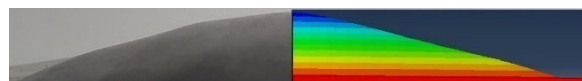
در ابتدا و پیش از بررسی نتایج عددی به مطالعه همگرایی و بررسی حساسیت مش برای مجموعه تست پرداخته خواهد شد.

جدول (۴): ماکزیمم تغییرشکل ورق‌های رویی و پشتی پنل‌های ساندویچی برحسب زاویه انحراف ماده منفجره

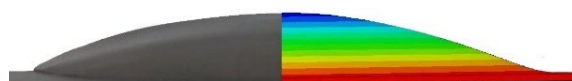
ردیف	کد پنل ساندویچی	زاویه انحراف ماده منفجره نسبت به پنل هدف (درجه)	میزان ماده منفجره (گرم)	ماکزیمم تغییرشکل عرضی ورق رویی (میلی‌متر)	ماکزیمم تغییرشکل عرضی ورق پشتی (برحسب میلی‌متر)
۱	۱۰R۰۱۰	۰	۱۰	۲۰/۶۵	۱۲/۸۰
۲	۱۵R۰۱۰	۱۵	۱۰	۲۰/۴۰	۱۲/۲۰
۳	۳۰R۰۱۰	۳۰	۱۰	۲۰/۱۰	۱۲/۰۵
۴	۴۵R۰۱۰	۴۵	۱۰	۱۸/۸۵	۱۱/۵۵

جدول (۵): مقایسه حل عددی و نتایج تجربی

زاویه شیب خرج	ورق پشتی		ورق رویی		درصد خطا ورق پشتی
	حل عددی	تست تجربی	حل عددی	تست تجربی	
۰	۱۱/۸۵	۱۲/۸۰	۲۰/۱۸	۲۰/۶۵	۷/۴۲
۱۵	۱۱/۷۶	۱۲/۲۰	۱۹/۵۶	۲۰/۴۰	۳/۶۰
۳۰	۱۱/۴۳	۱۲/۰۵	۱۹/۱۳	۲۰/۱۰	۵/۱۴
۴۵	۱۰/۸۹	۱۱/۵۵	۱۷/۹۶	۱۸/۸۵	۵/۷۱



شکل (۱۰): مقایسه کیفی پروفیل تغییرشکل ورق پشتی در حالت تجربی و عددی برای زاویه ۱۵ درجه در راستای محور X.



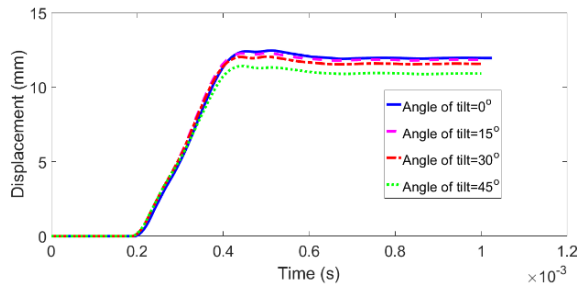
شکل (۹): مقایسه کیفی پروفیل تغییرشکل ورق پشتی در حالت تجربی و عددی برای زاویه ۱۵ درجه در راستای محور Z.

شبكة اولیری تعیین می‌گردد. برای ابعاد مش اولیری نیز ۴ حل با ابعاد ۳، ۲، ۱ و ۴ انجام شده است و جابجایی ورق پشتی برابر ۸/۵، ۱۱/۱، ۱۱/۸۵ و ۱۱/۹۵ حاصل گردیده است که در این حالت نیز به منظور استفاده مناسب از زمان و انرژی از ابعاد شبکه اولیری ۳ میلی‌متر استفاده گردیده است.

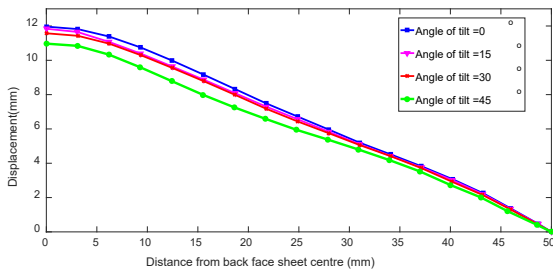
شکل ۱۱ پروفیل‌های تغییرشکل و تحولات جابجایی در مرکز ورق پشتی باگذشت زمان را نشان می‌دهد. باگذشت زمان تغییرشکل نقطه میانی از نقطه صفر رو به افزایش بوده و بعد از گذشت زمان و تغییرشکل به حالت پایدار می‌رسد. همان‌گونه که مشخص است بیشترین تغییرشکل مربوط به ورق در حالت موازی با خرج انفجاری است (زاویه خرج صفر

ابتدا در نرم‌افزار آباکوس ضخامت المان ورق‌های پنل ساندویچی ثابت و برابر ۱ میلی‌متر و اندازه طول و عرض مش در چهار حالت ۱، ۲، ۳ و ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای حالات مذکور تغییرشکل‌های ورق پشتی به ترتیب ۷، ۷/۵، ۷/۸ و ۷/۹ میلی‌متر حاصل گردیده است. برای بهینه بودن زمان حل، اندازه طول و عرض المان برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ادامه با داشتن ابعاد طول و عرض المان، برای چهار مورد تعداد المان در راستای ضخامت ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب جابجایی ورق پشتی برابر ۷/۸، ۸/۳، ۸/۵ و ۸/۵۳ میلی‌متر حاصل می‌گردد. در این حالت نیز به منظور کمتر شدن زمان حل از تعداد ۳ المان استفاده خواهد شد. با داشتن ابعاد شبکه پنل ابعاد

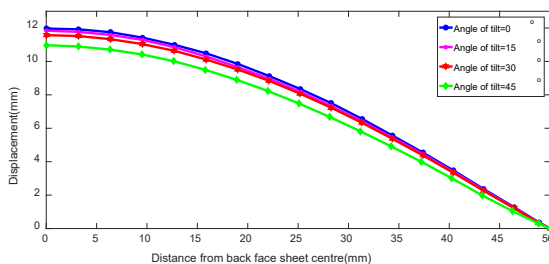
مستهلك می‌گردد. در هنگام انفجار مقدار کمی از انرژی جنبشی می‌تواند توسط خمش و کشش به وجود آمده در سازه جذب گردد. از سوی دیگر نسبت زیادی از انرژی جنبشی به وسیله تغییر شکل‌های پلاستیک جذب می‌شوند [۳۰ و ۳۱].



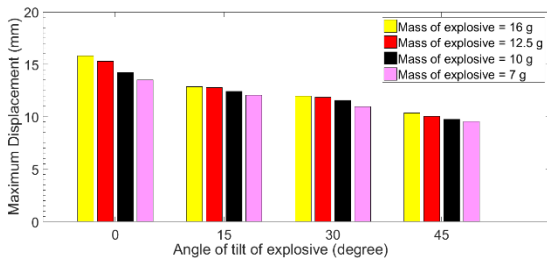
شکل (۱۱): پروفیل تغییر شکل نقطه میانی ورق پشتی باگذشت زمان



شکل (۱۲): پروفیل تغییر شکل ورق پشتی نسبت به فاصله واقعی از مرکز ورق در راستای محور Z.



شکل (۱۳): پروفیل تغییر شکل ورق پشتی نسبت به فاصله واقعی از مرکز ورق در راستای محور X.



درجه). کمترین تغییر شکل نیز باگذشت زمان برای خرج انفجاری با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. شکل ۱۲ و ۱۳ نیز پروفیل تغییر شکل ورق پشتی نسبت به فاصله واقعی از مرکز ورق را به ترتیب در دو راستای محور Z و X به نمایش می‌گذارد. در منحنی‌های شکل ۱۲ و در فاصله ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر از مرکز ورق تورفتگی مشاهده می‌گردد. علت آن وجود مقاومت در برابر موج انفجاری در راستای محور X توسط سلول هسته دوزنقه‌ای شکل می‌باشد در حالی که در راستای محور Z با آن مواجه نیست. به عبارت دیگر در لحظه برخورد موج انفجار بر روی پنل، در راستای محور X با بخشی از سلول هسته که به صورت مورب (با زاویه ۴۵ درجه) است درگیر خواهد شد. از طرف دیگر عدم وجود تقارن هندسی هسته در راستای محور Z و X باعث این مهم می‌گردد. در راستای محور Z آرایش هسته در امتداد محور است اما در راستای X آرایش هسته در راستای عمود بر محور می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که الگوی یکسانی برای پروفیل تغییر شکل وجود نداشته باشد. تغییر شکل صفحه رویی در شکل ۱۲ و ۱۳ نیز همچون شکل ۱۱ مشهود است که اختلاف مشهودی در جابجایی در زاویه شیب خرج ۴۵ درجه نسبت به صفحه هدف رخ داده است. علت این روی داد در زاویه ۴۵ درجه خروج بخش زیادی از موج انفجار از لوله به واسطه قرارگیری ماده منفجره به صورت ۴۵ درجه است. در این حالت موج انفجاری که به داخل لوله حرکت می‌کند با جداره لوله انفجاری برخورد کرده و انرژی زیادی از آن مستهلک می‌گردد و در نهایت به پنل ساندویچی برخورد می‌نماید.

شکل ۱۴ به بررسی اثر افزایش جرم ماده انفجاری بر روی ماکزیمم تغییر شکل میانی ورق پشتی پنل ساندویچی می‌پردازد. با افزایش جرم در تمامی زاویه‌ها افزایش تغییر شکل مشهود است. با افزایش زاویه ماده منفجره، تغییر شکل نقطه میانی ورق پشتی پنل در جرم خرج‌های بزرگتر نسبت به جرم خرج‌های کوچکتر کاهش محسوس دارد. در این حالات نیمی از ماده منفجره در سمت بیرون لوله انفجار قرار دارد و موج انفجار ناشی از آن به بیرون هدایت می‌شود. در پنل ساندویچی بیشتر فشار ناشی از موج انفجار توسط کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در هسته

علت این مهم خروج بخش زیادی از موج انفجار به بیرون از لوله به واسطه زاویه‌دار بودن خرج انفجاری است. همچنین موج انفجاری ورودی به لوله در برخورد با جداره داخلی لوله انفجاری نسبت به سایر زوایا استهلاک بیشتری دارد.

(۳) به علت اینکه در زوایای بزرگ‌تر ماده منفجره نسبت به ورق هدف، نیمی از ماده منفجره در سمت بیرون لوله انفجار قرار می‌گیرد، بخشی از موج انفجار به بیرون هدایت می‌شود و لذا در ماده منفجره با جرم بیشتر کاهش تغییرشکل نقطه میانی محسوس‌تر خواهد بود.

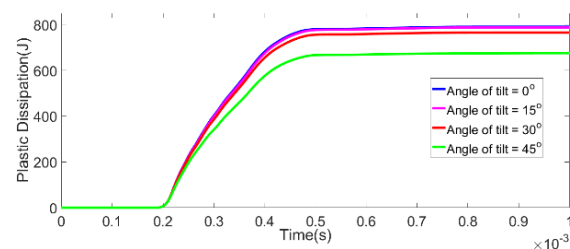
(۴) انرژی مستهلک‌شده پلاستیک برای زاویه ۴۵ درجه جرم خرج به دلیل کاهش قدرت موج انفجار در برخورد با پنل هدف کمتر است.

۶- مراجع

- [1] Anderson Jr CE, Behner T, Weiss CE. Mine blast loading experiments. *International Journal of Impact Engineering*. 2011; 38(8-9):697-706.
- [2] Erdik A, Kilic SA, Kilic N, Bedir S. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts. *Shock waves* 2016; 26(4):449-64.
- [3] Langdon GS, Yuen SC, Nurick GN, Naidoo K. Some insights into the response of shallow V shape structures to air blast loading. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013; 79(4):695-703.
- [4] Markose A, Rao CL. Mechanical response of V shaped plates under blast loading. *Thin-Walled Structures*. 2017; 115:12-20.
- [5] Yazici M, Wright J, Bertin D, Shukla A. Experimental and numerical study of foam filled corrugated core steel sandwich structures subjected to blast loading. *Composite structures*. 2014; 110:98-109.
- [6] Zhang P, Cheng Y, Liu J, Wang C, Hou H, Li Y. Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading. *Marine Structures*. 2015; 40:225-46.
- [7] Cheng Y, Liu M, Zhang P, Xiao W, Zhang C, Liu J, Hou H. The effects of foam filling on the dynamic response of metallic corrugated core sandwich panel under air blast loading-Experimental

شکل (۱۴): بررسی اثر افزایش جرم بر روی تغییرشکل ورق پشتی پنل ساندویچی.

شکل ۱۵ این انرژی را برای زوایای مختلف جرم خرج در طول زمان نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشهود است بیشترین جذب انرژی با مقدار ۷۸۰/۷ ژول در زاویه صفر درجه، سپس به مقدار ۷۷۷/۴ و ۷۵۶/۷ به ترتیب برای زاویه ۱۵ درجه و ۳۰ درجه و کمترین آن به مقدار ۶۶۷/۷ در زاویه ۴۵ درجه خواهد بود. علت وجود اختلاف چشمگیر در زاویه ۴۵ درجه خروج بخش زیادی از موج انفجار از لوله به محیط پیرامون می‌باشد.



شکل (۱۵): بررسی میزان انرژی استهلاک شده پلاستیک در زوایای مختلف ماده منفجره.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه تجربی پنل‌های ساندویچی ST37 تحت بارگذاری انفجاری مایل در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. به کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس و به کمک تکنیک کوپل اویلری - لاگرانژی به حل عددی مسئله تجربی و شبیه‌سازی آن پرداخته شد. نتایج حاصله از پژوهش به صورت زیر ارائه می‌گردد:

(۱) با افزایش زاویه شیب خرج انفجاری میزان تغییرشکل نقطه میانی ورق پشتی پنل ساندویچی کاهش می‌یابد. به علت وجود مقاومت سلول هسته دوزنقه‌ای شکل در برابر موج انفجاری در راستای محور X پروفیل تغییرشکل ناحیه میانی در تمامی زوایا در این راستا به صورت مخروطی شکل و در راستای محور Z به صورت گنبدی شکل ایجاد می‌گردد.

(۲) در زاویه ۴۵ درجه ماده منفجره نسبت به پنل هدف، کاهش مشهود تغییرشکل اتفاق افتاده است.

- International Journal of Plasticity. 2006; 22(11):2118-45.
- [20] Henchie TF, Yuen SC, Nurick GN, Ranwaha N, Balden VH. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*. 2014; 74:36-45.
- [21] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019; 144:106332.
- [22] Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*. 1985; 21(1):31-48.
- [23] Thimmesh T, Shirbhate PA, Mandal J, Sandhu IS, Goel MD. Numerical investigation on the blast resistance of a door panel. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 44:659-66.
- [24] Qiu G, Henke S, Grabe J. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computer Geotechnics*. 2011; 38(1):30-9.
- [25] Mougeotte C, Carlucci P, Recchia S, Ji H. Novel approach to conducting blast load analyses using Abaqus/Explicit-CEL. Army, Armament, Research, Development and Engineering Center. 2010
- [26] Zaid M, Rehan Sadique M. A simple approximate simulation using coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) simulation in investigating effects of internal blast in rock tunnel. *Indian Geotechnical Journal*. 2021; 51(5):1038-55.
- [27] Botez MD, Bredean LA. Numerical Study of a RC Slab Subjected to Blast: A Coupled Eulerian-Lagrangian Approach. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2019; 471(5):052036.
- [28] Moosabeiki V, Zamani J. The Study of Various Clamped Isotropic Square Plate Simulating Methods and Compare with Experimental Results under Explosion Loads. *Modares Mechanical Engineering* 2015; 14 (13) :315-22.
- [29] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mousavi SM, Ziya-Shamami M, Mostofi TM. Repeated underwater explosive forming: Experimental investigation and numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian approach. *Thin-Walled Structures*, 2022; 172:108860.
- [30] Dharmasena KP, Wadley HN, Xue Z, Hutchinson JW. Mechanical response of metallic investigations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018; 145:378-88.
- [8] Zhang P, Cheng Y, Liu J, Li Y, Zhang C, Hou H, Wang C. Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading. *Composites Part B: Engineering*. 2015; 105:67-81.
- [9] Yuen SCK, Langdon GS, Nurick GN, Pickering EG, Balden VH. Response of V-shape plates to localised blast load: Experiments and numerical simulation. *International journal of impact engineering*. 2012; 46: 97-109.
- [10] Chennamsetty AR, LeBlanc J, Abotula S, Parrikar PN, Shukla A. Dynamic response of Hastelloy® X plates under oblique shocks: Experimental and numerical studies. *International Journal of Impact Engineering*. 2015; 85:97-109.
- [11] Yuen SCK, Butler A, Bornstein H, Cholet A. The influence of orientation of blast loading on quadrangular plates. *Thin-Walled Structures*. 2019; 131: 827-37.
- [12] Jing L, Wang Z, Zhao L. Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading: Numerical simulations. *Composite structures*. 2013; 99:213-23.
- [13] Li S, Li X, Wang Z, Wu G, Lu G, Zhao L. Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading. *Composite structures*. 2017; 173:242-54.
- [14] An H, Hou S, Liu L. Experimental and Numerical Study of the Concrete Stress and Fracture Propagation Processes by Blast. *Engineering Letters*. 2019; 27(4).
- [15] Li S, Li X, Wang Z, Wu G, Lu G, Zhao L. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*. 2016; 80:1-2.
- [16] Zhang P, Cheng Y, Liu J. Numerical analysis of dynamic response of corrugated core sandwich panels subjected to near-field air blast loading. *Shock Vibration*. 2014; 1-17.
- [17] UTODYN. Theory Manual Revision 4.3. Century Dynamics, Concord, Mass, USA. 2005
- [18] Cai S, Zhang P, Dai W, Cheng Y, Liu J. Multi-objective optimization for designing metallic corrugated core sandwich panels under air blast loading. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2021; 23(4):1192-220.
- [19] Lee S, Barthelat F, Hutchinson JW, Espinosa HD. Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials-experiments and modeling.

honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008; 35(9):1063-74.

[31] Peyman S, Ebrahimzadeh A. Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading. *Scientific Journal of Advanced Defense Science Technology*. 2021; 11(4):347-55.



Experimental and Numerical Investigation of Trapezoidal Corrugated Core Sandwich Panels Under Oblique Blast Loading

Hadi Mohammadi Hooyeh¹, Alireza Naddaf Oskouei^{2*}, Tohid Mirzababaie Mostofi³, Khodadad Vahedi⁴

¹ Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

⁴ Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- With increasing the angle of the explosive charge deformation of the sandwich panel decreases.
- Plastic energy of the plate for the mass of the charge with an angle of 45 degrees is significantly reduced compared to other angles.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 8 April 2022

Received in revised form: 22 April 2022

Accepted: 14 May 2022

Available online: 28 June 2022

*Correspondence:

anadaf@ihu.ac.ir

How to cite this article:

H.M. Hooyeh, A.N. Oskouei T.M. Mostofi, K. Vahedi. Experimental and numerical investigation of trapezoidal corrugated core sandwich panels under oblique blast loading. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(2):11-23.

Keywords:

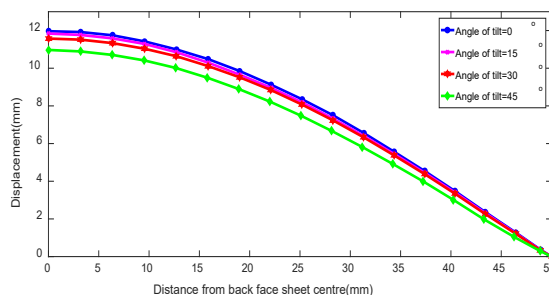
Corrugated core

Sandwich panels

Oblique blast loading

Coupled Eulerian-Lagrangian method

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This study deals with experimental and numerical response of trapezoidal corrugated core sandwich panels made of ST37 subjected to oblique blast loading. Sandwich target plate is 270*270 mm that consist of front/ back plate with 1 mm and trapezoidal corrugated core with 0.7mm thickness. The experimental explosive was done at the end of four different blast tube with angle of 0°, 15°, 30° and 45° respect to sandwich target plate. The mass of explosive (C4) was 10g and the stand-off distance was constant at 300 mm. The results of numerical simulation, obtained using coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) model at commercial ABAQUS/Explicit software. The results show good agreement between the numerical and the experimental values. The results show that with increasing angle of tilt from 0° up to 45°, the maximum displacement decreases. At the higher masses of explosive, this reduction in deformation will be greater than the lower masses of explosive. Also, due to directing a large part of the blast wave to out of the blast tube, the amount of plastic dissipation energy at the angle of 45 degrees is significantly reduced compared to other angles.