



تحلیل و بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی کنگره‌ای تحت اثر بارهای انفجاری

سهیل سبزواری^۱، فرزاد شهابیان^{۲*}، یونس نوری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۶۷-۱۴۸۸۸، shahabf@um.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳)

چکیده

در عمل، احتمال وقوع انفجار در مجاورت سازه‌ها وجود دارد و باید رفتار سازه‌های مختلف در برابر اثرات بارهای ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گیرد. در ساخت برخی سازه‌های صنعتی و نظامی از پانل‌های ساندویچی استفاده می‌شود. این پانل‌ها از دو ورق و یک سازه میانی به عنوان هسته پانل تشکیل شده‌اند. هسته پانل در کاهش تغییرشکل و افزایش توانایی جذب انرژی سازه نقش به‌سزایی دارد. در این پژوهش، رفتار پانل‌های ساندویچی از جنس آلومینیوم و فولاد در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند تحلیل، سه نوع پروفیل مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی برای هسته پانل‌ها در نظر گرفته شد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که پانل‌هایی که جنس هسته آن‌ها از فولاد است، مقدار کمتری انرژی توسط هسته جذب و مستهلک می‌شود. در پانل‌هایی که تماماً از جنس آلومینیوم است و پانل‌هایی که فقط هسته آن‌ها از فولاد می‌باشد، ورق پشتی متحمل کرنش‌های بیشتری می‌گردد. پانل‌هایی که تماماً از جنس آلومینیوم می‌باشند نسبت به نمونه‌های دیگر انرژی بیشتری مستهلک کرده‌اند. پانل‌هایی که فقط ورق‌های آن‌ها از جنس آلومینیوم است و پانل‌هایی که فقط هسته آن‌ها از جنس آلومینیوم می‌باشد، به ترتیب در مرتبه بعدی استهلاک انرژی قرار می‌گیرند. پانل‌های مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی به ترتیب، بیشترین مقدار انرژی جنبشی را دارند. بیش‌ترین تغییرشکل در پانل‌های تمام آلومینیومی و پانل‌هایی که فقط هسته آن‌ها از فولاد می‌باشند، متعلق به هسته پانل با پروفیل مثلثی و کمترین تغییرشکل مربوط به پروفیل مستطیلی است. در پانل‌هایی که فقط ورق‌های آن‌ها از فولاد است، برخلاف پانل‌های دیگر، بیش‌ترین تغییرشکل را پروفیل مستطیلی و کمترین تغییرشکل را پروفیل مثلثی دارد.

واژگان کلیدی

پانل ساندویچی، بار انفجار، انرژی مستهلک شده، تغییر شکل بیشینه

The Analysis of Corrugated Panels Subjected to Blast Loadings

S. Sabzevari, F. Shahabian, Y. Nouri

Abstract

Practically there is a risk of explosion, and different structures' behavior should be examined against the effects of blast loadings. Sandwich panels are used for making some industrial and military structures. These panels are made of two sheets and an intermediate core. The core has a significant role in reducing the deflection and enhancing energy absorb of structure. In this study, sandwich panels' behaviors, which are made of aluminum and steel, are examined against the blast loadings. In the process of analysis, three kinds of profiles, which are: rectangular, trapezoidal and triangular, are considered as panel cores. The results show that the panels with steel core, absorb less energy and damp by their core. Those panels which are completely made of aluminum or the panels with steel core can sustain more strain energy by their back sheets. all the panels that are completely made of aluminum have more damped energy than others. Those panels which have only aluminum sheets or aluminum core are placed next to whole aluminum panels in order to damped energy level. Most of the deflections in panels that are whole aluminum made and steel core panels were belong to panel core with triangular profiles and the least deflection were for rectangular shaped profiles. In panels that only have steel sheets, unlike the other panels, the most deflection was for rectangular profiles and the least deflection was for triangular ones.

Keywords

Sandwich Panel, Blast Loading, Damped Energy, Maximum Deflection

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۶۱



پیشینه تحقیق درباره اثرات انفجار بر صفحات به زمان جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که نیاز به مقاوم‌سازی بدنه کشتی‌های جنگی نسبت به انفجارهای زیر آب احساس می‌شد. در ابتدا با روش‌های آزمایشگاهی به تعیین رفتار صفحات پرداخته شد. به مرور زمان با پیدایش و گسترش نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای قوی، امکان مدل‌سازی کامل این آزمایش‌ها فراهم گردید.

ورق‌های معمولی در برابر بارهای انفجاری، تغییرشکل زیادی از خود نشان می‌دهند. محققان به دنبال پژوهش در این زمینه، استفاده از پانل‌ها با سازه میانی را پیشنهاد نمودند. این پانل‌ها از یک ورق رو، یک ورق پشت و یک هسته میانی تشکیل می‌گردند. هسته این پانل‌ها نقش کاهش تغییرشکل و افزایش استهلاک انرژی را بر عهده دارد. پانل‌های ساندویچی به دلیل چگالی پایین، مقاومت بالا و توانایی استهلاک انرژی بالا، در بسیاری از سازه‌های هوا-فضا، دریایی و سیستم‌های حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲]. این پانل‌ها با رفع نواقص ورق‌های معمولی عملکرد مناسبی در مقابل بارهای انفجاری دارند.

Hutchinson [۳] و Xue [۴ و ۵] رفتار ورق‌های فولادی و پانل‌های فولادی را مورد بررسی قرار دادند. Martin و Nurik [۶] به بررسی آزمایشگاهی و نظری اثرات انفجار بر صفحه‌های نازک فولادی با و بدون سخت‌کننده پرداختند. Li و همکارانش [۷] پانل‌های ساندویچی مربع شکل با هسته لانه زنبوری شش گوشه آلومینیومی را در برابر بارهای انفجاری قرار دادند. در این آزمایش، ارتفاع و طول‌های متفاوتی از سلول‌ها در هسته لانه زنبوری در نظر گرفته شد. اندرکنش بین موج ضربه و پانل و میزان مودهای تغییرشکل و شکست ورق رویی و هسته، مورد بحث قرار گرفت. Zhang و همکارانش [۸] پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار مثلثی، تحت بار انفجاری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها، سه نوع انفجار را در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که پیشینه تغییر مکان، کماتش جان هسته و فشردگی هسته با کاهش فاصله انفجار، افزایش می‌یابد. Yaziki و همکارانش [۹]، به بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی موجدار با هسته فومی در اثر انفجار پرداختند. مطالعه آن‌ها به طور تجربی با استفاده از لوله شوک و عکس برداری با سرعت بالا و هم چنین به طور عددی از طریق روش اجزای محدود انجام گردید. Shen و همکارانش [۱۰] رفتار فوم‌های آلومینیومی که در داخل پانل‌های خمیده قرار گرفته بودند را بررسی کردند. آن‌ها از این فوم‌ها به منظور

افزایش جذب انرژی سیستم استفاده کردند. Jing و همکارانش [۱۱] تغییرشکل و مودهای خرابی پانل‌ها را مطالعه نمودند و رفتار آن‌ها را به صورت تغییرشکل‌های بزرگ، چروکیدگی ورق رویی، برش سازه میانی پانل و جداسازی ورق رویی دسته‌بندی نمودند. Rubino و همکارانش [۱۲] نوع جدیدی از پانل‌ها با سازه میانی Y شکل را در برابر بارهای ضربه‌ای دینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند.

در این پژوهش، رفتار پانل‌های ساندویچی تحت اثر بار انفجاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار، عامل‌های موثر در کاهش تغییرشکل و افزایش انرژی مستهلک شده به وسیله پانل مورد توجه قرار می‌گیرد. این عامل‌ها شامل مشخصه‌های هندسی و مواد سازه می‌باشند. در فرآیند تحلیل، سه نوع پروفیل مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی برای هسته پانل‌ها به کار رفته است. جنس هسته و ورق‌های پانل‌ها، آلومینیوم و فولاد در نظر گرفته شده است.

۲- پارامترهای موج انفجاری

برای تعیین مشخصات هر انفجار، نیاز به پارامترهای مستقل ضربه^۱، مدت انفجار^۲ و اضافه فشار حداکثر^۳ است. رابطه (۱) نشان‌دهنده رابطه فشار-زمان بار انفجاری می‌باشد.

$$P = P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-\frac{at}{t_0}} \quad (1)$$

در این رابطه t زمان انفجار، P فشار انفجار، P_{s0} مقدار اضافه فشار حداکثر انفجار، t_0 مدت زمان انفجار و ضریب a یک مقدار ثابت است. برای به دست آوردن اضافه فشار حداکثر انفجار یک ماده منفجره، روش‌های گوناگونی ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های تجربی-تحلیلی که با استفاده از اصول علم ترمودینامیک، دینامیک سیالات و علم مواد پایه‌گذاری شده‌اند، اشاره نمود.

به منظور تعیین اضافه فشار حداکثر انفجار، موسسه DOD^۴ نموداری را ارائه کرده است (شکل (۱)). نمودار تجربی ارائه شده بر حسب فاصله مقیاس شده^۵ (رابطه (۲))، رسم شده است.

$$Z = \frac{R}{\sqrt{W}} \quad (2)$$

در این رابطه، R فاصله مرکز انفجار تا نقطه مورد بررسی بر حسب متر و W جرم ماده انفجار بر حسب کیلوگرم است. با استفاده از فاصله مقیاس شده می‌توان از شکل (۱)، مقدار اضافه فشار حداکثر (P_{s0}) و نسبت مدت زمان انفجار به جرم انفجار ($t_0/W^{1/3}$) را تعیین نمود. با در دست داشتن مقادیر اضافه فشار



مرتبط هستند، استفاده شده است. این مدل توسط رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^{Pl})^n] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{Pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot [1 - (T^*)^m] \quad (5)$$

که در آن

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

در رابطه (۵)، s تنش، e^{-pl} کرنش پلاستیک، $\bar{\epsilon}^{Pl} / \dot{\epsilon}_0$ پارامتر بدون بعد نرخ کرنش برای نرخ کرنش مینا $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ است. در رابطه (۶)، T_{room} دمای محیط بر حسب کلونین و T_{melt} دمای ذوب مصالح بر حسب کلونین است. ضرایب A ، B ، C و m مقادیر ثابتی هستند که به نوع مواد وابسته می‌باشند. این مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی را در نظر می‌گیرد که خود تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و حرارت می‌باشد. این مدل به طور تجربی و حاصل برازش نتایج بسیاری از آزمایش‌ها است. جمله اول رابطه (۵) اثر کرنش، جمله دوم اثر نرخ کرنش و جمله سوم اثر حرارت را بر جریان تنش مشخص می‌سازد. در جدول (۱) پارامترهای مربوط به معادله جانسون-کوک برای دو ماده آلومینیوم و فولاد آورده شده است.

علاوه بر معادله رفتاری مصالح که در واقع رابطه بین تنش و کرنش می‌باشد، مدل خرابی مصالح نیز مورد نیاز است تا اثرات نرخ کرنش، حرارت و اثرات تنش‌های سه جانبه را بر کرنش شکست در نظر بگیرد. این رابطه به صورت رابطه (۷) توسط جانسون و کوک [۱۵] ارائه شده است.

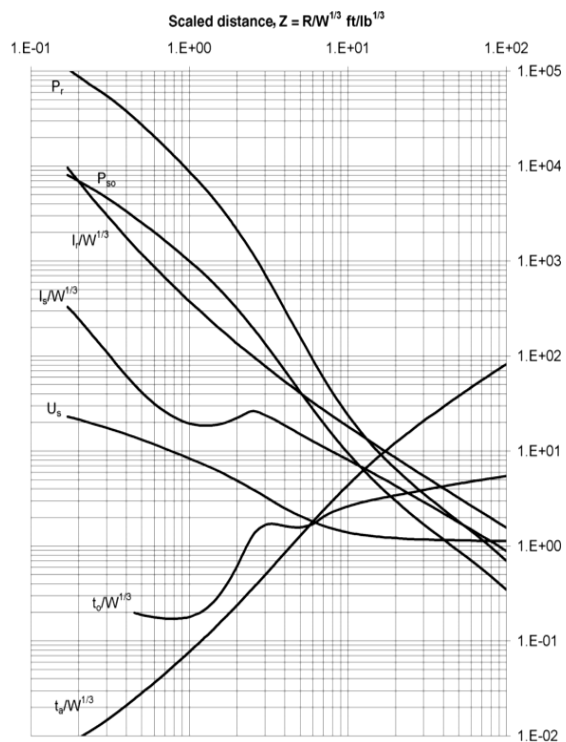
$$\bar{\epsilon}_f^{Pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}})] \cdot \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{Pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot [1 - D_5 T^*] \quad (7)$$

در این رابطه، e_f^{-Pl} کرنش شکست، مقادیر ضرایب D_1 تا D_5 پارامترهای ثابت ماده و $\sigma_m / \bar{\sigma}$ اثر تنش‌های سه جانبه می‌باشند [۱۶ و ۱۷]. در جدول (۲) پارامترهای کرنش شکست مدل جانسون-کوک برای دو ماده آلومینیوم و فولاد نشان داده شده است.

۴- صحت‌سنجی و مدل‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS [۱۸] به منظور مطالعه عددی استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل، یک نمونه از پانل‌های آزمایش شده در مرجع [۱۹] مدل‌سازی گردیده است. پانل آزمایش شده، دارای ابعاد 300×300 میلی‌متر است. هسته این پانل دارای ارتفاع (H_c)

حداکثر و مدت زمان انفجار، رابطه (۱) که نشان‌دهنده رابطه فشار-زمان بار انفجاری می‌باشد، تبیین می‌گردد.



شکل ۱- دیاگرام پارامترهای انفجار در سطح زمین [۱۳]

علاوه بر استفاده از نمودار، می‌توان از روابط (۳) و (۴) برای به دست آوردن اضافه فشار حداکثر و مدت زمان انفجار استفاده نمود.

$$\frac{P_{s0}}{P_{atm}} = \frac{808 \left(1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (3)$$

$$\frac{t_o}{W^{1/3}} = \frac{980 \left(1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right)}{\left(1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right) \left(1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2} \right)} \quad (4)$$

در رابطه (۳)، P_{atm} فشار محیط می‌باشد.

۳- معادله‌های تنش-کرنش

در مسائل ضربه و انفجار از معادلات تنش-کرنش جانسون-کوک [۱۴] که با دما، نرخ کرنش و سخت‌شوندگی

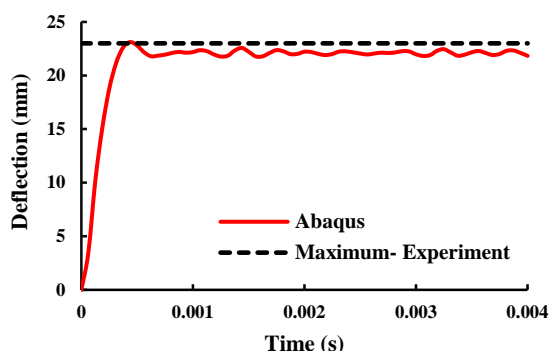


جدول ۱- پارامترهای مربوط به معادله جانسون-کوک [۱۷ و ۱۹]

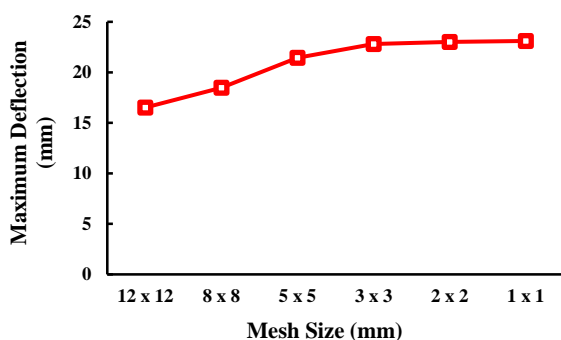
| نرم‌شوندگی حرارتی | | نرخ کرنش | | سخت‌شوندگی کرنش | | تنش تسلیم | خاصیت | |
|-------------------|--------------|--------------|--|-----------------|------|--------------|--------------|--------------------|
| m | T_m (K) | T_r (K) | $\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹) | C | n | B (MPa) | A (MPa) | مواد |
| ۱/۰ | ۹۱۸ | ۲۹۳ | 1×10^{-3} | ۰/۰۱۴ | ۰/۳۶ | ۱۵۰ | ۱۱۰ | Al-1200H18 |
| ۰/۹۴ | ۱۸۰۰ | ۲۹۳ | 1×10^{-3} | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۴۵ | ۳۸۳ | ۴۹۰ | Weldox 460 E Steel |

جدول ۲- پارامترهای مربوط به کرنش شکست معادله جانسون-کوک [۱۷ و ۱۹]

| D_5 | D_4 | D_3 | D_2 | D_1 | مواد |
|-------|-------|--------|-------|--------|--------------------|
| ۰/۰ | -۰/۰۱ | -۰/۰۵۴ | ۱/۷۳۲ | ۰/۰۷۰۵ | Al-1200H18 |
| ۱/۶ | ۰/۰ | ۰/۴۷ | ۱/۴۵ | -۰/۷۷ | Weldox 460 E Steel |



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار و آزمایش



شکل ۵- حساسیت تغییر شکل مدل صحت‌سنجی به ابعاد شبکه‌بندی

۵- معرفی مدل‌های مورد بررسی

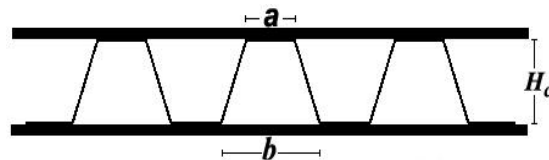
مشخصات هندسی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول (۳) و شکل (۶) آورده شده است. جنس نمونه‌های مورد بررسی، آلومینیوم (AL) و فولاد (ST) در نظر گرفته شده است

۶- تحلیل مدل‌ها

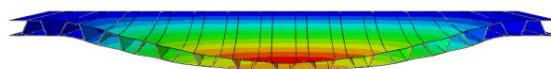
در این پژوهش، مقدار انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده، انرژی جنبشی و انرژی کل سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

برابر ۸ میلی‌متر، عرض بالای کنگره (a) ۷ میلی‌متر و عرض پایین (b) ۱۴ میلی‌متر می‌باشد. جنس این پانل از آلومینیوم Al-1200H18 است که ضریب الاستیسته آن ۷۰ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۱۴۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳۳ و چگالی ۲۷۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. مدل تنش-کرنش مصالح، جانسون-کوک انتخاب شده است. مقدار ماده منفجره ۱۵ گرم در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری ورق رویی پانل بوده است. مشخصات هندسی این پانل در شکل (۲) نشان داده شده است. ضخامت ورق‌های رو و پشت به انفجار پانل، ۰/۸ میلی‌متر و ضخامت هسته پانل برابر ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در صحت‌سنجی تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار مدل شده است.

در شکل (۳) تغییر شکل پانل مدل شده بعد از فرآیند تحلیل، مشاهده می‌گردد. در شکل (۴) نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه تغییر شکل مرکز ورق پشتی پانل در آزمایش و تحلیل عددی یکسان است. مقدار پاسخ به ابعاد شبکه‌بندی وابسته است. نتایج تحلیل نشان داد که ابعاد شبکه ۳ mm × ۳ mm مناسب می‌باشد (شکل (۵)).



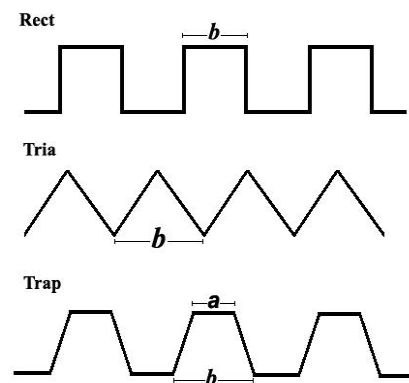
شکل ۲- شکل هندسی پانل کنگره‌ای مورد استفاده برای صحت‌سنجی و پارامترهای هندسی آن



شکل ۳- تغییر شکل پانل بعد از فرآیند تحلیل

جدول ۳- مشخصات هندسی نمونه‌های مورد بررسی

| نمونه | a (mm) | b (mm) | مصالح ورق رو و پشت | مصالح هسته |
|----------|--------|--------|--------------------|------------|
| Rect | ۱۰/۵ | ۱۰/۵ | آلومینیوم | آلومینیوم |
| Rect-F-S | ۱۰/۵ | ۱۰/۵ | فولاد | آلومینیوم |
| Rect-C-S | ۱۰/۵ | ۱۰/۵ | آلومینیوم | فولاد |
| Tria | ۲۱ | ۲۱ | آلومینیوم | آلومینیوم |
| Tria-F-S | ۲۱ | ۲۱ | فولاد | آلومینیوم |
| Tria-C-S | ۲۱ | ۲۱ | آلومینیوم | فولاد |
| Trap | ۷ | ۱۴ | آلومینیوم | آلومینیوم |
| Trap-F-S | ۷ | ۱۴ | فولاد | آلومینیوم |
| Trap-C-S | ۷ | ۱۴ | آلومینیوم | فولاد |



شکل ۶- مدل‌های مورد بررسی در تحلیل

کل (E_U)، انرژی درونی (E_I) و انرژی ویسکوز (E_V) را نمایان می‌سازد. در رابطه (۱۰) ارتباط بین انرژی درونی، انرژی کرنشی الاستیک (E_S)، انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده (E_P) و انرژی‌های مدل وابسته به زمان همانند خزش (E_C) آمده است. رابطه (۱۱) با جایگذاری رابطه‌های (۹) و (۱۰) در رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$E_U + E_K + E_F - E_W - E_{QB} = \text{Constant} \quad (8)$$

$$E_U = E_I + E_V \quad (9)$$

$$E_I = E_S + E_P + E_C \quad (10)$$

$$(E_S + E_P + E_V) + E_K = E_W \quad (11)$$

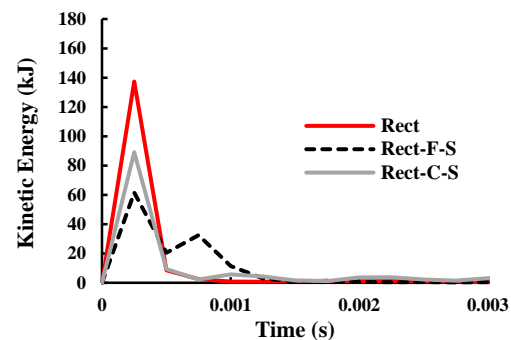
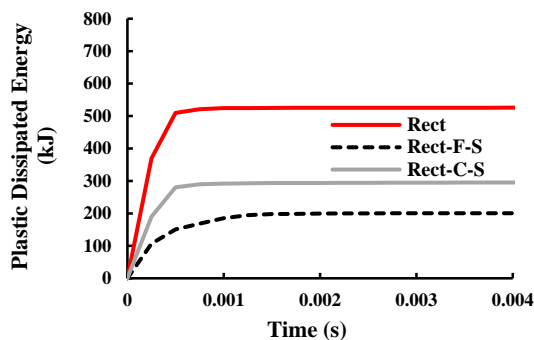
در بین انرژی‌های نام‌برده انرژی ناشی از خزش (E_C)، انرژی مستهلک شده توسط میرایی (E_{QB}) و تماسی (E_F) تقریباً صفر می‌باشند. علاوه بر این به دلیل این که کرنش‌های پلاستیک زیادی در پانل ایجاد می‌گردد، سهم انرژی کرنشی الاستیک بسیار کم بوده و در مقابل انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده، از آن صرف نظر می‌گردد. به همین دلیل بنا بر رابطه (۱۰)، انرژی داخلی با انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده برابر می‌باشد.

در این پژوهش انرژی برای کل سیستم پانل و اجزای آن، جداگانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

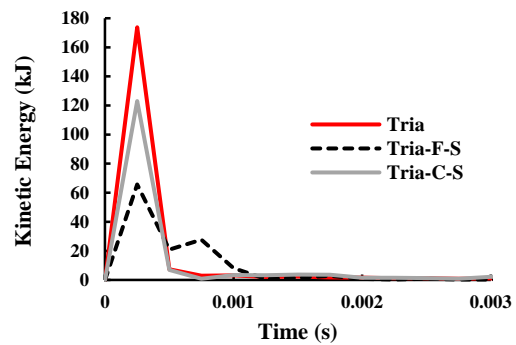
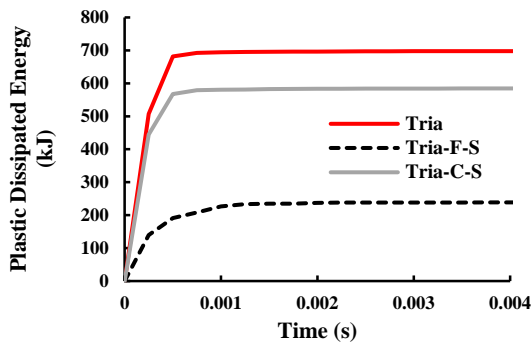
۷- انرژی جنبشی و انرژی مستهلک شده

در شکل‌های (۷) تا (۹) مقدار کل انرژی جنبشی و انرژی مستهلک شده نشان داده شده است. انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده به انرژی مستهلک شده توسط کرنش‌های پلاستیک در کلیه اجزای پانل اطلاق می‌گردد. این مقدار انرژی در کل پانل اعم از جان، ورق رویی و پشتی طی انفجار توسط کرنش‌های پلاستیک مستهلک می‌گردند.

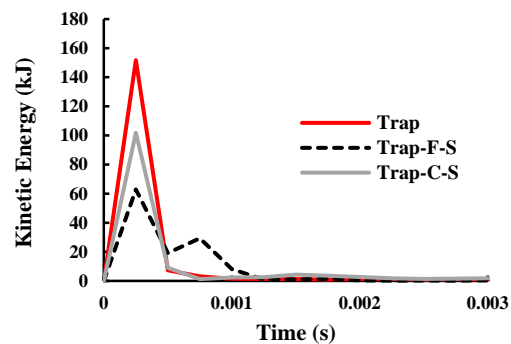
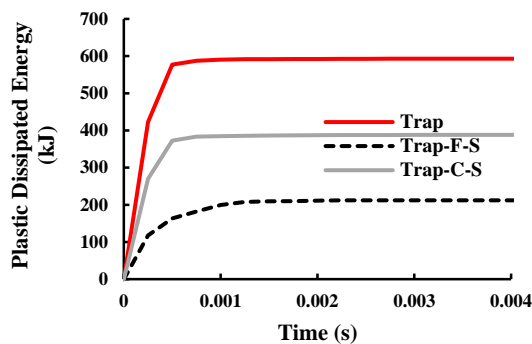
در این پژوهش، مقدار انرژی مستهلک شده در حین رفتار پلاستیک ماده، انرژی جنبشی و انرژی کل سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه (۸) تعادل بین انرژی‌های درونی کل (E_U)، انرژی جنبشی (E_K)، انرژی مستهلک شده تماسی توسط سطوحی که با هم تماس دارند (E_F)، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی (E_W) و انرژی مستهلک شده توسط میرایی (E_{QB}) را نشان می‌دهد [۱۴]. رابطه (۹) ارتباط بین انرژی درونی



شکل ۷- انرژی جنبشی و مستهلک شده در کل پانل مستطیل شکل



شکل ۸- انرژی جنبشی و مستهلک شده در کل پانل مثلثی شکل



شکل ۹- انرژی جنبشی و مستهلک شده در کل پانل دوزنقه‌ای شکل

روی، اجازه تغییر شکل چندانی به هسته پانل داده نمی‌شود. بنابراین با ایجاد کرنش‌های کمتر در آن، مقدار انرژی کمتری مستهلک می‌گردد. در نتیجه در پانل‌های با ورق روی فولادی، شکل هندسی هسته پانل در مستهلک نمودن انرژی تاثیرگذار نیست و کلیه انرژی‌ها تقریباً در یک محدوده می‌باشند. در ادامه روند تحلیل، مشاهده می‌شود که پانل با هسته مثلثی بیش‌ترین و بعد از آن پروفیل‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی، به ترتیب، انرژی را مستهلک نموده‌اند. در بررسی انرژی جنبشی‌های پانل‌ها دیده می‌شود که، پانل‌های مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی به ترتیب، بیش‌ترین مقدار انرژی جنبشی را دارند.

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) مقدار انرژی مستهلک شده توسط هر یک از ورق‌های روی، پستی و هسته به تفکیک نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) دیده می‌شود، ورق رویی و هسته بیش‌ترین بخش انرژی را مستهلک می‌نمایند. در هر پانلی که جنس هسته از فولاد است، مقدار کمتری انرژی توسط آن جذب و مستهلک می‌شود. در پانلی که جنس هسته آن از آلومینیوم است، انرژی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها مستهلک می‌گردد. در نمونه‌هایی که تماماً از آلومینیوم و نمونه‌هایی که فقط هسته آن‌ها از فولاد است، ورق پستی متحمل

در جدول (۴) مقدار حداکثر انرژی مستهلک شده و انرژی جنبشی برای کل پانل نشان داده شده است.

جدول ۴- انرژی مستهلک شده و انرژی جنبشی در نمونه‌ها

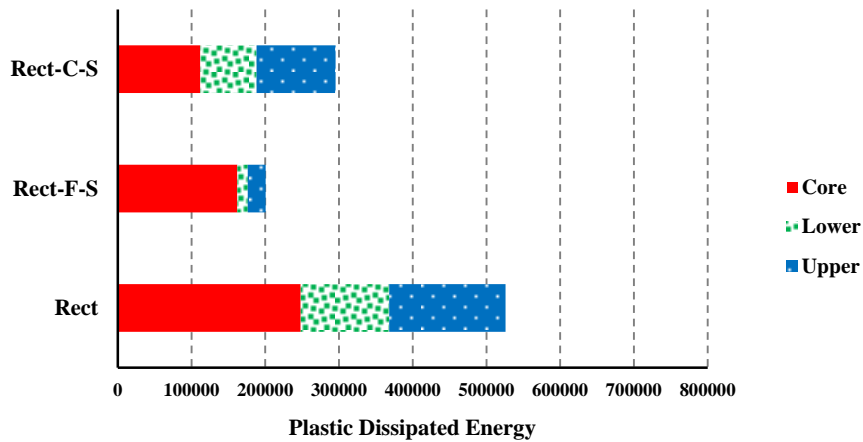
| انرژی جنبشی (J) | انرژی مستهلک شده (J) | نمونه |
|-----------------|----------------------|----------|
| ۱۳۷۳۴۱ | ۵۲۵۸۵۲ | Rect |
| ۶۱۵۴۴ | ۲۰۰۴۶۸ | Rect-F-S |
| ۸۹۰۶۸ | ۲۹۵۵۰۳ | Rect-C-S |
| ۲۳۹۵ | ۶۹۷۸۸۵ | Tria |
| ۸۴۸ | ۲۳۸۴۷۳ | Tria-F-S |
| ۲۲۱۸ | ۵۸۴۸۲۶ | Tria-C-S |
| ۱۵۱۷۳۱ | ۵۹۳۳۶۹ | Trap |
| ۶۲۹۱۹ | ۲۱۲۳۳۶ | Trap-F-S |
| ۱۰۱۷۸۵ | ۳۸۸۵۰۱ | Trap-C-S |

مطابق جدول (۴) و شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌گردد که پانل‌هایی که تماماً از آلومینیوم می‌باشند نسبت به نمونه‌های دیگر انرژی بیش‌تری مستهلک کرده‌اند. در ادامه، پانل‌هایی که فقط ورق‌های آن‌ها از جنس آلومینیوم و سپس پانلی که فقط هسته آن از جنس آلومینیوم است، انرژی بیش‌تری به ترتیب مستهلک نموده‌اند. علاوه بر این به دلیل استفاده از فولاد در ورق

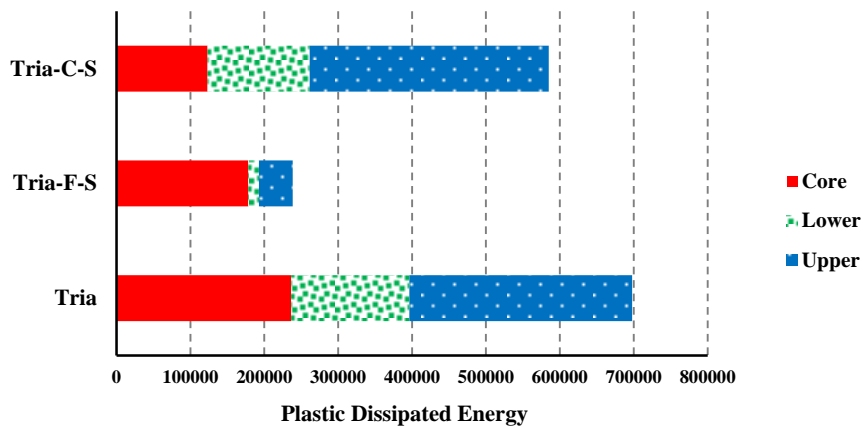


می‌بینند. در نمونه‌های Tria، Tria-C-S و Trap-C-S به دلیل این‌که ورق رویی این نمونه‌ها از آلومینیوم است، مقدار انرژی که توسط ورق رویی مستهلک می‌شود از جان پانل بیش‌تر است.

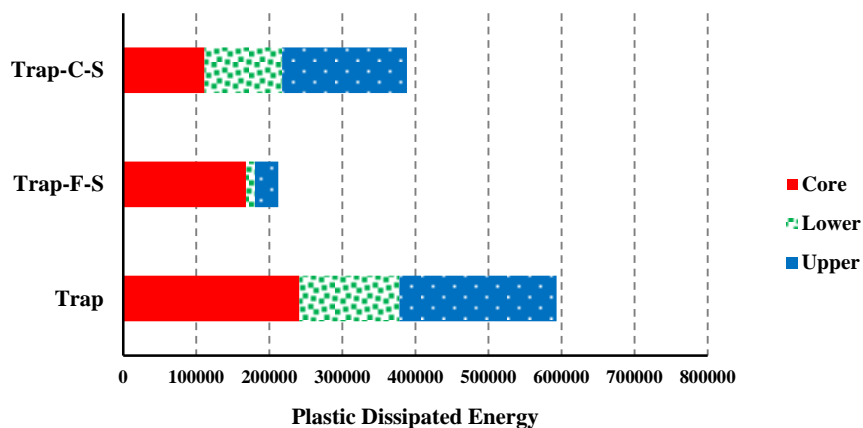
کرنش‌های بیش‌تری شده و در نتیجه تغییرشکل‌های ماندگار زیادی را تجربه می‌کند. به همین دلیل در ساخت پانل هرچه ورق رو به انفجار سخت‌تر باشد، انرژی کمتری توسط ورق‌های رو و پشت به انفجار مستهلک می‌گردد و ورق‌ها آسیب کمتری



شکل ۱۰- انرژی مستهلک شده در اجزای پانل به صورت جداگانه برای پانل مستطیل شکل



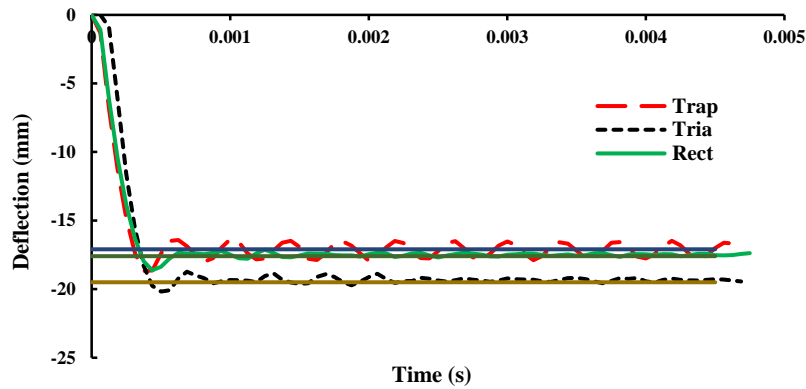
شکل ۱۱- انرژی مستهلک شده در اجزای پانل به صورت جداگانه برای پانل مثلثی شکل



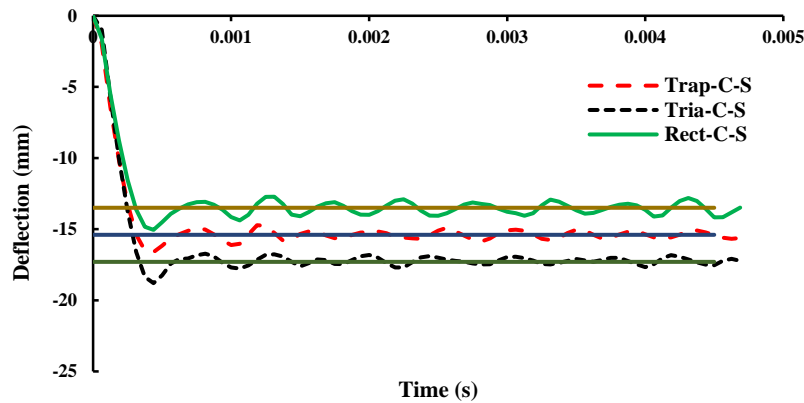
شکل ۱۲- انرژی مستهلک شده در اجزای پانل به صورت جداگانه برای پانل ذوزنقه‌ای شکل

و تغییرشکل ماندگار کمی دارند. دیده می‌شود که ورق پشتی این گونه پانل‌ها، تقریباً رفتاری الاستیک دارد. پانل‌هایی که از آلومینیوم ساخته شده‌اند دارای بیش‌ترین تغییرشکل و پانل‌هایی که ورق رویی آن‌ها از فولاد است دارای کمترین تغییرشکل می‌باشند.

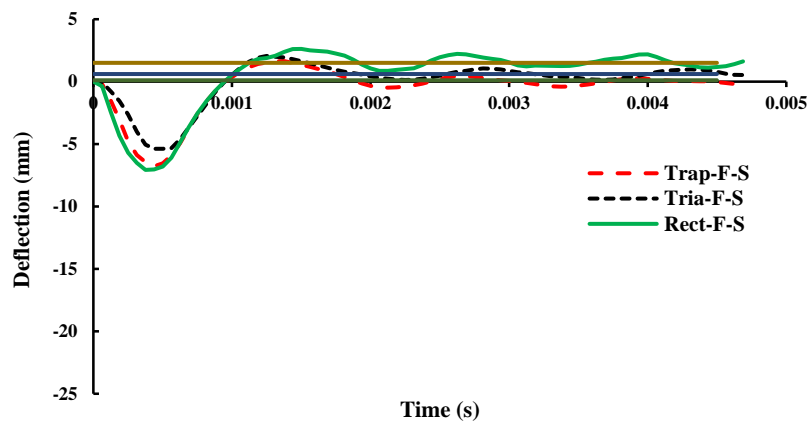
در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) تغییرشکل مرکز ورق پشتی پانل، برای کلیه نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که ورق رویی و پشتی آن‌ها از آلومینیوم می‌باشد، دارای رفتار پلاستیک بیش‌تری هستند و دارای تغییرشکل ماندگار می‌باشند. نمونه‌هایی که ورق رویی و پشتی آن‌ها از فولاد است تقریباً الاستیکی از خود نشان می‌دهند



شکل ۱۳- تغییرشکل مرکز ورق پشتی پانل، در پانل‌های تمام آلومینیومی



شکل ۱۴- تغییرشکل مرکز ورق پشتی پانل، در پانل‌های با هسته فولادی و رویه آلومینیومی



شکل ۱۵- تغییرشکل مرکز ورق پشتی پانل، در پانل‌های با رویه فولادی و هسته آلومینیومی

در جدول (۵) مقدار حداکثر تغییر شکل مرکز ورق پشتی پانل آورده شده است.

جدول ۵- تغییر شکل مرکز ورق پشت در پانل‌ها

| نمونه | تغییر شکل حداکثر ورق پشتی پانل (mm) |
|----------|-------------------------------------|
| Rect | ۱۸/۶۲ |
| Rect-F-S | ۷/۰۷ |
| Rect-C-S | ۱۵/۰۵ |
| Tria | ۲۰/۱۷ |
| Tria-F-S | ۵/۳۷ |
| Tria-C-S | ۱۸/۸۰ |
| Trap | ۱۸/۶۸ |
| Trap-F-S | ۶/۷۷ |
| Trap-C-S | ۱۶/۶۲ |

همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود در بین پروفیل‌های در نظر گرفته شده، بیش‌ترین تغییر شکل بین پروفیل‌هایی که تماماً از آلومینیوم می‌باشند، پروفیل مثلی و کمترین را پروفیل مستطیلی دارد. البته تفاوت بین پروفیل مستطیلی و دوزنقه‌ای بسیار کم است. در بین پانل‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است، پروفیل مثلی بیش‌ترین و پروفیل مستطیلی کم‌ترین تغییر شکل را دارد. در پانل‌هایی که ورق‌های آن‌ها از فولاد است، بر خلاف پانل‌های دیگر، بیش‌ترین تغییر شکل را پروفیل مستطیلی و کمترین تغییر شکل را پروفیل مثلی دارد. با تغییر مصالح ورق‌های روی و پشتی از آلومینیوم به فولاد، مقدار تغییر شکل حدود ۶۶٪ و با تغییر مصالح هسته از آلومینیوم به فولاد، مقدار تغییر شکل حدود ۱۳٪ کاهش می‌یابد.

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش پانل‌های کنگره‌ای در اثر بار انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شد و از مدل غیرخطی مصالح جانسون-کوک برای مصالح استفاده گردید. جنس هسته و ورق‌های پانل‌ها، آلومینیوم و فولاد در نظر گرفته شد و از سه نوع پروفیل مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلی در هسته پانل‌ها استفاده گردید. نتایج حاصل به قرار زیر است:

- اگر جنس پانل تماماً از آلومینیوم باشد، انرژی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها مستهلک می‌کند. سپس پانل‌هایی که ورق‌های آن‌ها از جنس آلومینیوم و پانل‌هایی

که فقط هسته آن از جنس آلومینیوم است در رده‌های دیگر قرار می‌گیرند.

- در پانل‌های با ورق فولادی، شکل هندسی هسته چندان تاثیر گذار نیست و کلیه انرژی‌های مستهلک شده ماده تقریباً در یک محدوده می‌باشند.

- پانل با هسته مثلثی بیش‌ترین و در مرتبه بعد پروفیل‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی، به ترتیب، انرژی را مستهلک نموده‌اند.

- در بررسی تفکیک انرژی مستهلک شده توسط هر جز از پانل دیده شد که، ورق رویی و هسته بیش‌ترین بخش انرژی را مستهلک می‌نمایند.

- در هر پانلی که جنس هسته از فولاد است، مقدار کمتری انرژی توسط آن جذب و مستهلک می‌شود و در صورتی که جنس هسته از آلومینیوم باشد، انرژی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها مستهلک می‌نماید.

- در نمونه‌های Tria، Tria-C-S و Trap-C-S به دلیل این‌که ورق رویی این نمونه‌ها از آلومینیوم است، مقدار انرژی که توسط ورق رویی مستهلک می‌شود از هسته پانل بیش‌تر است.

- بیش‌ترین تغییر شکل را بین پروفیل‌هایی که تماماً از آلومینیوم می‌باشند، پروفیل مثلی و کمترین را پروفیل مستطیلی دارد. البته تفاوت بین پروفیل مستطیلی و دوزنقه‌ای بسیار کم است.

- در بین پانل‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد می‌باشد، پروفیل مثلی بیش‌ترین و پروفیل مستطیلی کم‌ترین تغییر شکل را دارد.

- در پانل‌هایی که ورق‌های آن‌ها از فولاد است، بر خلاف پانل‌های دیگر، بیش‌ترین تغییر شکل را پروفیل مستطیلی و کمترین تغییر شکل را پروفیل مثلی دارد.

۹- مراجع

- [1] Guoxing, L. and Tongxi, Y. (2003), "Energy Absorption of Structures and Materials", Cambridge, Wood head Publishing Ltd.
- [2] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997), "Cellular Solids, Structure and Properties, 2nded", Cambridge, Cambridge University Press.
- [3] Hutchinson, J.W. and Xue, Z. (2005), "Metal Sandwich Plates Optimized for Pressure Impulses", International Journal of Mechanic Science, Vol. 47, pp. 545-569.
- [4] Xue, Z. and Hutchinson, J.W. (2003), "Preliminary Assessments of Sandwich Plates Subject to Blast Loads", International Journal of Mechanic Science, Vol. 45, No. 4, pp. 687-705.



- Subjected to Distributed and Local Loading”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50, No. 2, pp. 233-46.
- [13] Dusenberry, O. D. (2010), “Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings”, John Wiley & Sons Inc, Canada.
- [14] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983), “A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures”, In Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, Vol. 21, pp. 541-547.
- [15] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1985), “Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48.
- [16] Borvik, T., Hopperstad, O. S., Berstad, T. and Langseth, M. (2001), “Numerical Simulation of Plugging Failure in Ballistic Penetration”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, No. 34-35, pp. 6241-6264.
- [17] Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S. (2006), “Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Thin Aluminum Plates Subjected to Impact by Blunt- and Hemispherical Nosed Projectiles”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 12, pp. 1921-1944.
- [18] ABAQUS version 6.12. (2012), ABAQUS User’s Manual, SIMULIA World Headquarters, 166 Valley Street, Providence, RI 02909, USA.
- [19] Li, X., Wang, Z. Zhu, F., Wu, G. and Zhao, L. (2014), “Response of Aluminium Corrugated Sandwich Panels under Air Blast Loadings: Experiment And Numerical Simulation”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 65, pp. 79-88.
- [5] Xue, Z. and Hutchinson, J.W. (2004), “A Comparative Study of Impulse-Resistant Metal Sandwich Plates”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 30, No. 10, pp. 1283-1305.
- [6] Nurick, G.N. and Martin, J.B. (1989), “Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading-a Review, Part II: Experimental Studies”, International journal of Impact Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 171-186.
- [7] Li, X., Zhang, P., Wang, Z., Wu, G. and Zhao, L. (2014), “Dynamic Behavior of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels under Air Blast: Experiment and Numerical Analysis”, Composite Structures, Vol. 108, pp. 1001-1008.
- [8] Zhang, P., Cheng, Y., Liu, J., Wang, C., Hou, H. and Li, Y. (2015), “Experimental and Numerical Investigations on Laser-Welded Corrugated-Core Sandwich Panels Subjected to Air Blast Loading”, Marine Structures, Vol. 40, pp. 225-246.
- [9] Yazici, M., Wright, J., Bertin, D. and Shukla, A. (2014), “Experimental and Numerical Study of Foam Filled Corrugated Core Steel Sandwich Structures Subjected to Blast Loading”, Composite Structures, Vol. 110, pp. 98-109.
- [10] Shen, J., Lu, G., Wang, Z. and Zhao, L. (2010), “Experiments on Curved Sandwich Panels under Blast Loading”, International journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 9, pp. 960-70.
- [11] Jing, L., Wang, Z., Ning, J. and Zhao, L. (2011), “The Dynamic Response of Sandwich Beams with Open Cell Metal Foam Cores”, Composite Part B Engineering, Vol. 42, No. 1, pp. 1-10.
- [12] Rubino, V., Deshpande, V.S. and Fleck, N.A. (2008), “The Collapse Response of Sandwich Beams with a Y-Frame Core

پی نوشت

- ¹ Impulse
² Duration
³ Peak Overpressure
⁴ U.S. Department of Defense
⁵ Scaled Distance

