

شبیه سازی رفتار جذب انرژی پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت تأثیر آزمون نفوذ پرتابه سرعت بالا

مسعود گلستانی پور^{۱،*}، ابوالفضل باباخانی^۲، سید مجتبی زبرد^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی واحد مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*M.golestanipour@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۷)

چکیده

پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم ساختارهایی سبک با قابلیت جذب انرژی هستند که در کاربردهای حفاظت در برابر ضربه نظیر پنل‌های ساختمانی سبک، مواد بسته‌بندی و جاذب‌های انرژی کاربرد دارند. در تحقیق حاضر از آزمون تجربی نفوذ پرتابه سرعت بالا بر روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم A356 و صفحاتی از جنس آلومینیوم و فولاد و نیز نمونه صفحات بدون هسته فومی و فوم آلومینیوم بدون حضور صفحات استفاده شد. پرتابه‌های مورد استفاده از جنس فولاد با وزن متوسط ۸/۸ گرم و دارای سر مخروطی شکل با قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشند که با سرعتی بین ۲۰۲ تا ۲۳۴ متر بر ثانیه به نمونه پنل ساندویچی برخورد می‌نمایند. نتایج تجربی نشان دادند که استفاده همزمان از صفحات و هسته فومی در قالب پنل ساندویچی تأثیر قابل توجهی در افزایش میزان جذب انرژی توسط پنل و کاهش سرعت پرتابه دارد. آنالیز المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.10 به منظور شبیه‌سازی آزمون نفوذ پرتابه سرعت بالا با شرایطی مشابه با شرایط آزمون تجربی بر روی مدل‌هایی از نمونه‌های مذکور انجام گرفت. توزیع تنش بر روی مدل‌ها، سرعت پرتابه بر حسب زمان و فاصله از سطح برخورد و نیز انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها از جمله نتایج شبیه‌سازی می‌باشند که در این تحقیق ارائه شده است. مشخص گردید که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مدل‌های پنل ساندویچی تطابق مطلوبی با یافته‌های حاصل از آزمون تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی:

پنل ساندویچی، فوم آلومینیومی، نفوذ پرتابه سرعت بالا، جذب انرژی، آنالیز المان محدود.

۱- مقدمه

مستحکم، کاربردهای بسزایی در ساختمان سازی، صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و... یافته‌اند. خاصیت عمده این مواد متخلخل قابلیت جذب انرژی بالای آن‌ها در تنش‌های فشاری

در سال‌های اخیر استفاده از فوم‌های فلزی در سازه‌هایی که نیاز به استحکام ویژه بالا داشته و یا کاربردهایی نظیر عایق حرارتی و صوتی، گسترش یافته است. این مواد سبک و در عین حال

گرفت. آن‌ها نشان دادند که پنل‌هایی با هسته فوم آلومینیوم به همراه لایه‌هایی از کولار در برابر ضربه مستقیم با سرعت بسیار بالا، مقاومت عالی دارد [۱۴].

Radford و همکارانش رفتار دینامیک پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن در برابر گلوله‌های فوم فلزی را مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. از این تحقیق مشخص شد که با افزایش ضخامت هسته فومی مقاومت در برابر شوک ناشی از ضربه افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی این آزمون نیز با یافته‌های تجربی تطابق مناسبی داشت [۱۵].

Zhao و همکارانش نیز رفتار سوراخ‌کاری پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و با صفحات آلایز آلومینیوم را از طریق آزمون میله فشاری Split-Hopkinson مورد بررسی قرار داده و منحنی نیروی سوراخ‌کاری-جابجایی مربوطه را به دست آوردند [۱۶].

مطالعات تجربی و آنالیز محاسباتی بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و ساختار لانه‌زنبوری آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری توسط Zhu و همکارانش انجام شد و تاثیر پارامترهای کلیدی در طراحی نظیر چگالی نسبی هسته فومی و ضخامت آن مورد بررسی قرار گرفت [۱۷].

Hou و همکارانش پارامترهایی نظیر سرعت برخورد، ضخامت صفحه، ضخامت و چگالی هسته فومی و شکل پرتابه را بر روی حد بالستیک و جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و صفحات آلایز آلومینیوم Al-5005H34 تحت آزمون سوراخ‌کاری شبه استاتیک و دینامیک مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید که افزایش ضخامت صفحات و هسته فومی و نیز افزایش چگالی هسته فومی سبب افزایش حد بالستیک و میزان جذب انرژی می‌شود [۵].

تغییر شکل و مدل شکست در تیرهای ساندویچی با هسته فوم سلول باز آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی از طریق آزمون میله فشاری Split-Hopkinson توسط Jing و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه انحراف اندازه‌گیری شده در آزمون-

می‌باشد. در این میان پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی ساختارهای جدیدی هستند که با وجود وزن پایین عملکردی عالی در پراکنده کردن انرژی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل از آن‌ها به عنوان جاذب انرژی در گستره وسیعی از کاربردها تحت بارگذاری شدید نظیر ضربه بالستیک استفاده می‌شود. ریزساختار متخلخل این مواد امکان تغییر شکل مومسان زیادی را در تنش نسبتاً ثابت فراهم می‌کند و به این ترتیب قبل از تخریب یا شکست، مقادیر زیادی انرژی جنبشی توسط این ساختارها جذب می‌گردد [۱-۵].

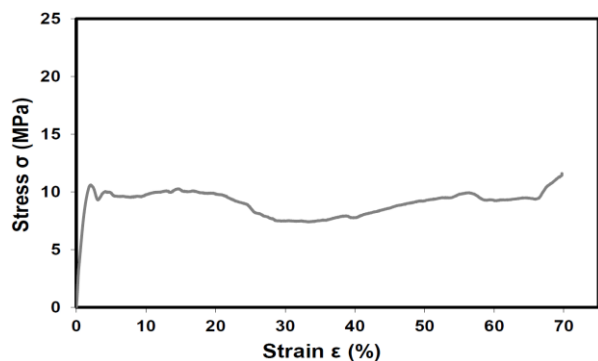
اکثر تحقیقات در زمینه بارگذاری دینامیک و بالستیک ساختارهای کامپوزیتی لایه ای با پایه پلیمر و یا شیشه/کربن صورت گرفته و توجه اندکی به پنل‌های ساندویچی شده است. در میان پنل‌های ساندویچی نیز تمرکز اکثر تحقیقات بر ساختارهایی با هسته فوم پلیمری و یا لانه زنبوری بوده و تحقیقات بسیار کمی در خصوص جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیک صورت گرفته است [۶-۱۱].

Villanueva و Cantwell با انجام آزمون نفوذ با سرعت بالا توسط تفنگ گازی نپروژنی بر روی کامپوزیت‌ها و ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم سه الگوی اصلی برای شکست این سازه‌ها معرفی نمودند و مشخص کردند که پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی انرژی سوراخ‌کاری به مراتب بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های صفحه‌ای ارائه می‌دهند [۱۲].

Hanssen و همکارانش نیز آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی برخورد پرنده به پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و صفحاتی از جنس آلومینیوم انجام دادند. در این آزمون‌ها سوراخ شدن در پنل‌ها مشاهده نگردید و قابلیت مدل آن‌ها در تعیین مکانیزم شکست صفحات و هسته فومی به اثبات رسید [۱۳].

آزمون‌های تفنگ گازی سبک روی سپرهای حاوی فوم آلومینیوم سلول باز توسط Destefanis و همکارانش صورت

ضخامت ۱ میلی متر می باشد. فوم آلومینیوم مورد استفاده دارای مورفولوژی سلول بسته و چگالی تقریبی ۰/۶۷ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده که توسط گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد تولید شده است. منحنی تنش- کرنش فشاری فوم آلومینیومی مورد استفاده که بر اساس استانداردهای JIS H 7902 و DIN 50134 حاصل شده، در شکل ۱ مشاهده می شود. جهت اتصال صفحات آلومینیومی به هسته فومی از چسب پایه پلی یورتان در دمای محیط و تحت فشار گیره به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد. از نمونه فوم آلومینیوم با ضخامت ۳۰ میلی متر بدون استفاده از صفحات رویی و نمونه صفحات بدون وجود هسته فومی و با فاصله هوایی ۳۰ میلی متری نیز به عنوان نمونه شاهد و به منظور بررسی اثر هسته فومی و صفحات به صورت مجزا در جذب انرژی دینامیک استفاده گردید. جدول ۱ مشخصات نمونه های آماده شده و شکل ۲ تصویر آن ها را نشان می دهد [۲۱-۲۳].



شکل (۱): منحنی تنش-کرنش فشاری فوم آلومینیومی مورد استفاده

جدول (۱): مشخصات نمونه های تهیه شده در این تحقیق

شماره نمونه	ضخامت ورق (mm)	جنس ورق	ضخامت فوم (mm)	چگالی سطحی (g/cm ²)
۱	بدون صفحه	-	۳۰	۱/۹۲
۲	۳	Al1100	بدون هسته	۲/۱۳
۳	۳	Al1100	۳۰	۳/۶۳
۴	۱	St37	۳۰	۳/۶۵

های تجربی با پیش بینی حاصل از آنالیز، نشان دهنده تطابق مطلوب این دو بود [۱۸].

شبیه سازی بارگذاری انفجاری پل های کامپوزیتی مشکل از هسته فوم آلومینیوم توسط Qi و همکارانش با استفاده از نرم افزار LS-DYNA صورت گرفت و بهترین چیدمان این پل ها مشخص گردید [۱۹].

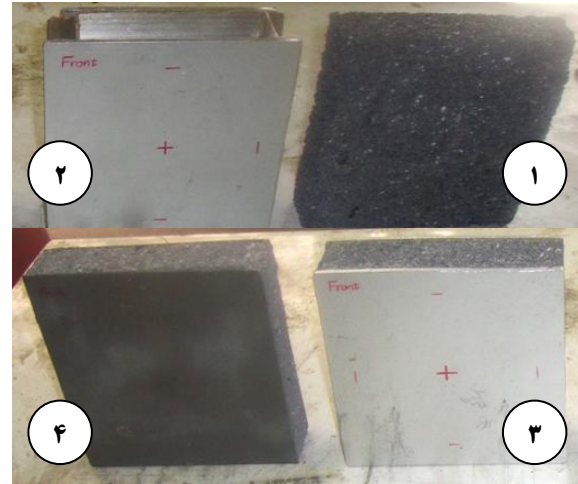
نویسندگان این مقاله در تحقیقی دیگر وضعیت تغییر شکل پل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را تحت آزمون سقوط پرتابه مورد بررسی قرار داده و تاثیر پارامترهایی نظیر ضخامت هسته فومی و ضخامت صفحات را بر روی عمق نفوذ، جدایش و کرنش صفحه پشتی مشخص نمودند. آزمون سقوط پرتابه با سر مخروطی شکل و سرعتی در حدود ۱۱ متر بر ثانیه صورت گرفت که بسیار پایین تر از سرعت مورد استفاده در تحقیق حاضر می باشد [۲۰].

با وجود تحقیقات فوق الذکر تاکنون بررسی المان محدود به همراه آزمون های تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا بر روی پل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر از آنالیز المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.10 به منظور شبیه سازی آزمون نفوذ پرتابه با سرعت بالا روی نمونه های پل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم A356 استفاده شده است. علاوه بر این جهت تایید نتایج شبیه سازی، آزمون تجربی نفوذ پرتابه با شرایطی مشابه با شرایط شبیه سازی روی نمونه های پل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم انجام گرفت. توزیع تنش روی پل ساندویچی، سرعت پرتابه بر حسب زمان و ضخامت پل و نیز انرژی جذب شده توسط پل از جمله نتایج این تحقیق می باشد.

۲- مواد و روش ها

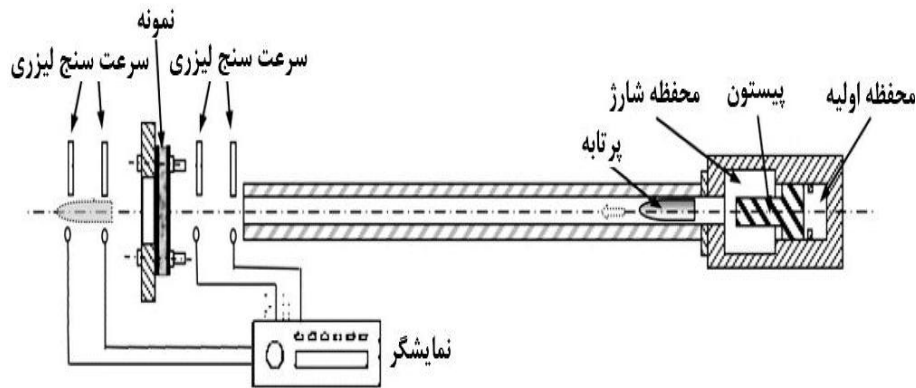
پل های ساندویچی مربعی شکل با طول و عرض ۱۲۰×۱۲۰ میلی متر مورد استفاده در این تحقیق دارای هسته فوم آلومینیوم با ضخامت ۳۰ میلی متر و صفحات رویی از جنس آلومینیوم سری ۱۰۰۰ با ضخامت ۳ میلی متر و نیز فولاد ساختمانی St37 به

وزن متوسط ۸/۸ گرم (شکل ۴)، نفوذ پرتابه یا سوراخ کاری ضربه‌ای با سرعت بالا بر روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور ثابت نگه داشتن نمونه و کنترل شرایط مرزی و نیز جلوگیری از بروز خطا در اثر جابجایی در لحظه برخورد و لذا برخورد مستقیم پرتابه به مرکز نمونه، از فیکسچر استفاده گردید. این فیکسچر مربعی شکل به ابعاد 240×240 میلی‌متر دارای سوراخ دایره‌ای وسط با قطر ۱۰۰ میلی‌متر بود. سرعت برخورد پرتابه از طریق تنظیم فشار گاز محفظه شارژ دستگاه در محدوده ۲۰۲ تا ۲۳۴ متر بر ثانیه کنترل شد. قابل ذکر است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون حداقل دو بار بر روی هر نمونه انجام گرفت و نتایج ثبت شده حاصل میانگین‌گیری از داده‌های خروجی از آزمون‌های تکرار شده می‌باشد.



شکل ۲- نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق.

با استفاده از یک دستگاه تفنگ گازی (شکل ۳) و به کارگیری پرتابه‌های فولادی با نوک مخروطی ۶۰ درجه، قطر ۱۰ میلی‌متر و



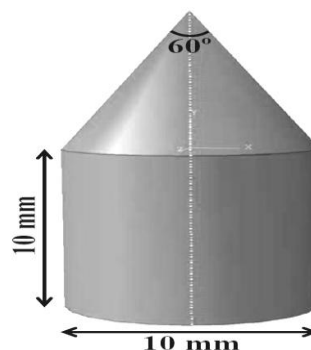
(الف)



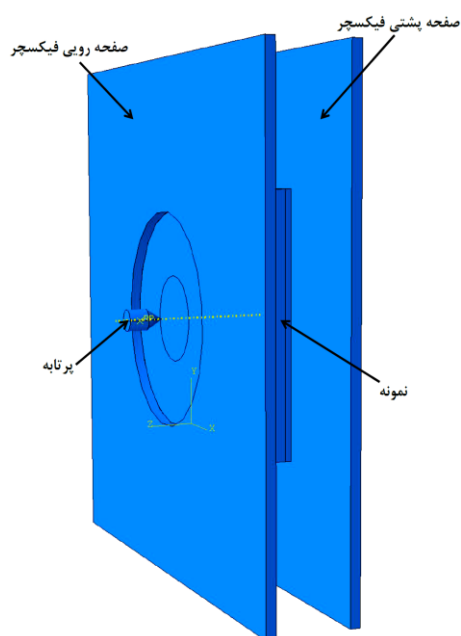
(ب)

شکل (۳): تصویر: (الف): شماتیک و (ب): واقعی از تفنگ گازی مورد استفاده.

صفحات و کیفیت اتصال آن‌ها به هسته فومی، وارد نرم افزار گردید. شکل مش اعمال شده بر روی مدل نمونه و فیکسچر ¹C3D8R و بر روی پرتابه صلب ²R3D4 با اندازه ۲ میلی متر می باشد. نتایج مدل سازی با نتایج آزمون تجربی صورت گرفته مقایسه و در صورت لزوم متغیرهای موادی مربوط به مدل سازی اصلاح گردید. در شکل ۵ تصویری از مدل طراحی شده جهت انجام شبیه سازی، مشاهده می شود.



شکل (۴): تصویر شماتیک از پرتابه فولادی مورد استفاده.



شکل (۵): مدل طراحی شده جهت انجام شبیه سازی

سرعت ورود و خروج پرتابه به عنوان نتایج آزمون، توسط سرعت سنج‌های لیزری دستگاه اندازه گیری می شوند. به این ترتیب از طریق رابطه ۱ می توان انرژی جذب شده توسط نمونه را محاسبه نمود:

$$\frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 = E_p \quad (1)$$

در این رابطه m_p جرم پرتابه، V_i سرعت برخورد پرتابه با نمونه، V_r سرعت خروج پرتابه از نمونه و E_p کل انرژی جنبشی جذب شده توسط نمونه است. حال می توان از طریق رابطه ۲ انرژی جذب شده (E_p) را معادل با انرژی جنبشی حاصل از سرعت حدی خاصی قرار داد:

$$E_p = \frac{1}{2} m_p v_b^2 \quad (2)$$

در این رابطه V_b حد بالستیک نامیده می شود و برابر با حداکثر سرعت برخوردی است که پرتابه از سوی دیگر نمونه خارج نشده و وظیفه حفاظت کنندگی پل ساندویچی به طور مطلوب انجام شود.

به منظور شبیه سازی آزمون نفوذ پرتابه سرعت بالا از مدل سازی ماکرو مکانیکی غیرخطی توسط نرم افزار ABAQUS 6.10 استفاده شد. در مدل سازی ماکرو مکانیکی، فوم ماده ای توده ای با خواص همگن فرض می شود. به منظور انجام مدل سازی، خواص مکانیکی فوم آلومینیوم بر اساس آزمون فشار تک-محوری مشخص شده و به همراه سایر شرایط نظیر هندسه آزمون، شرایط مرزی، نحوه بارگذاری، مشخصات مکانیکی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون نفوذ پرتابه سرعت بالا

سرعت ورود پرتابه به نمونه و خروج آن به همراه میزان انرژی جنبشی جذب شده توسط نمونه و حد بالستیک در جدول ۲ گزارش شده است. مشخص است که پل های ساندویچی با صفحات آلومینیومی و فولادی دارای سطح انرژی جنبشی جذب شده و حد بالستیک نزدیک به هم (به دلیل چگالی سطحی مشابه) و بالاتر نسبت به نمونه پل توخالی و نمونه فوم بدون صفحه می باشند. دلیل این امر بهبود عملکرد جذب انرژی به دلیل اثر توام هسته فومی و صفحات می باشد. در واقع صفحات

انرژی برخوردی را پخش نموده و هسته فومی این انرژی گسترده شده را جذب می‌نماید.

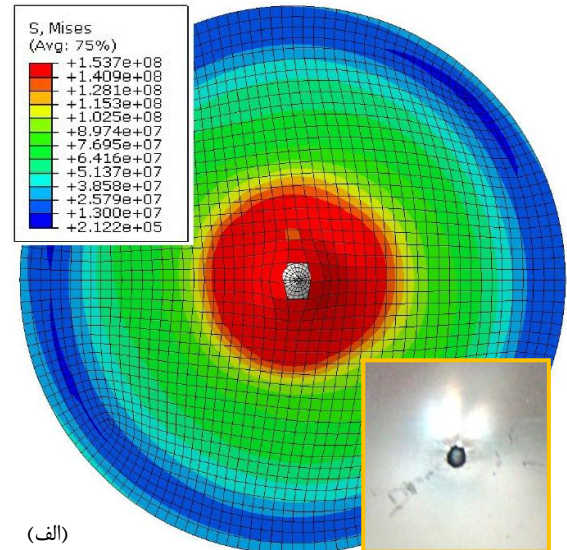
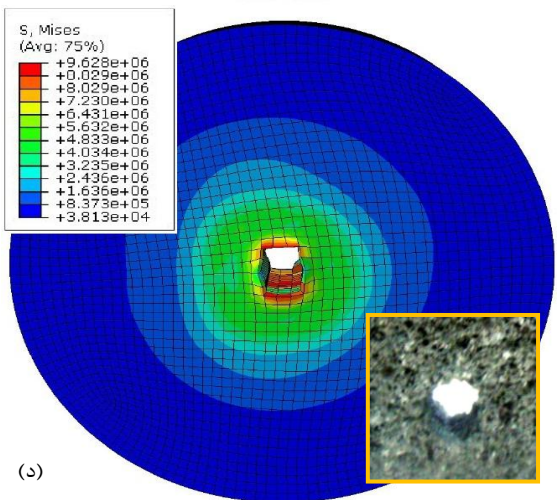
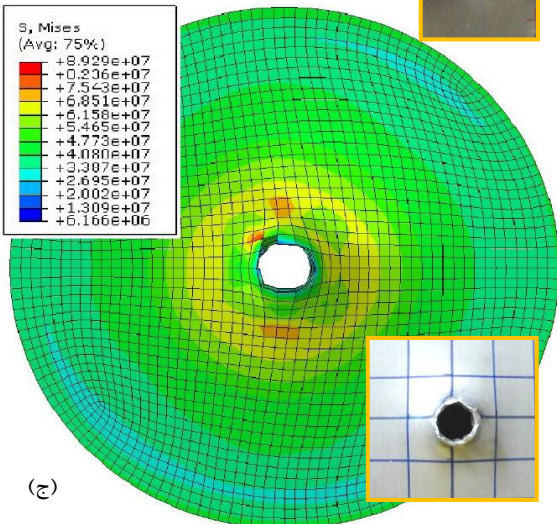
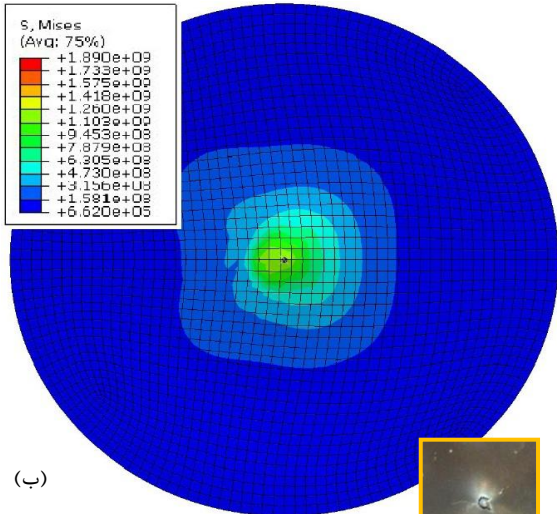
جدول ۲- نتایج به دست آمده از آزمون تجربی نفوذ پرتابه سرعت بالا

شماره نمونه	سرعت ورود پرتابه (m/s)	سرعت خروج پرتابه (m/s)	انرژی جذب شده (J)	حد بالستیک (m/s)
۱	۲۰۲	۱۷۵	۴۵	۱۰۱
۲	۲۲۴	۱۶۳	۱۰۴	۱۵۴
۳	۲۳۴	۰	۲۴۱	۲۳۴
۴	۲۱۶	۰	۲۰۵	۲۱۶

۲-۳- شبیه سازی آزمون نفوذ پرتابه سرعت بالا

۱-۲-۳- توزیع تنش

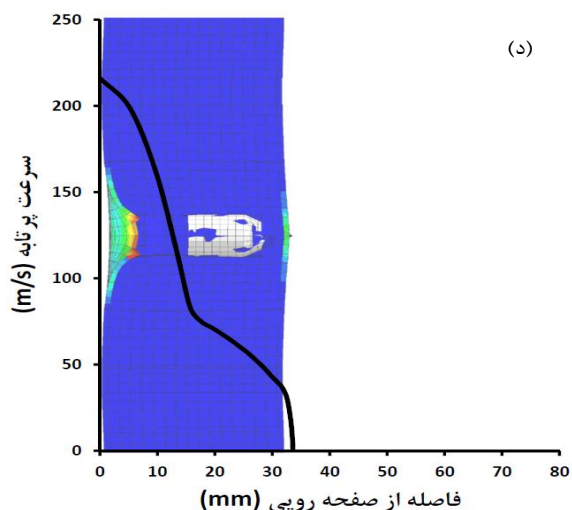
توزیع تنش بر حسب پاسکال روی صفحه پشتی نمونه‌های شبیه‌سازی شده به همراه تصویری از نمونه واقعی آزمون شده، در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مطابق با نتایج شبیه‌سازی حداکثر تنش بر روی صفحه پشتی برای نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب ۹/۶، ۶۸، ۱۵۴ و ۱۱۰۰ مگاپاسکال و در نواحی نزدیک به موقعیت خروج پرتابه می‌باشد.



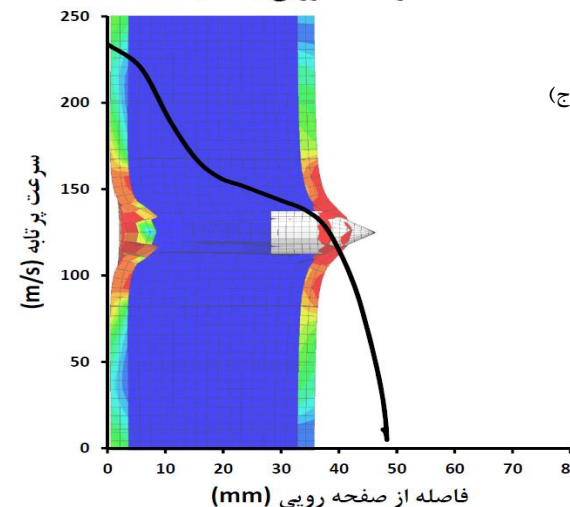
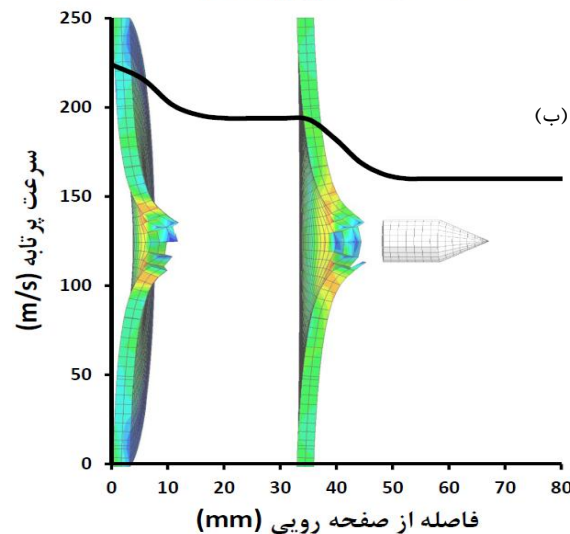
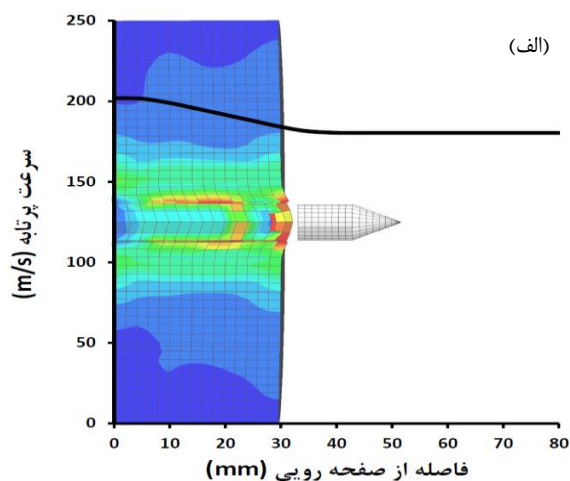
شکل (۶): توزیع تنش بر حسب پاسکال روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده به همراه تصویر واقعی از نمونه آزمون شده الف تا د به ترتیب برای نمونه‌های ۱

۳-۲-۲- سرعت ورود و خروج پرتابه

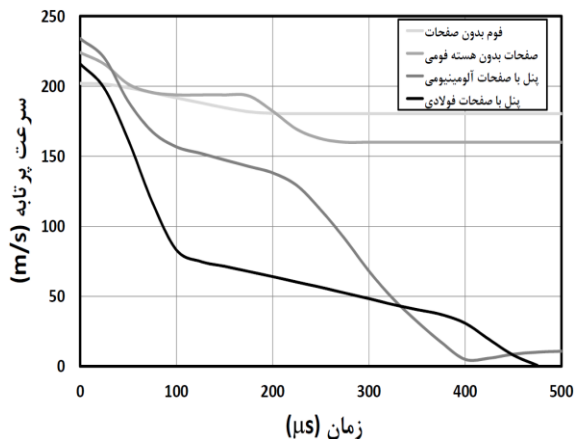
شکل ۷ منحنی های سرعت پرتابه بر حسب فاصله از سطح برخورد یا همان صفحه رویی حاصل از شبیه سازی نفوذ پرتابه در نمونه های مورد آزمون را نشان می دهد.



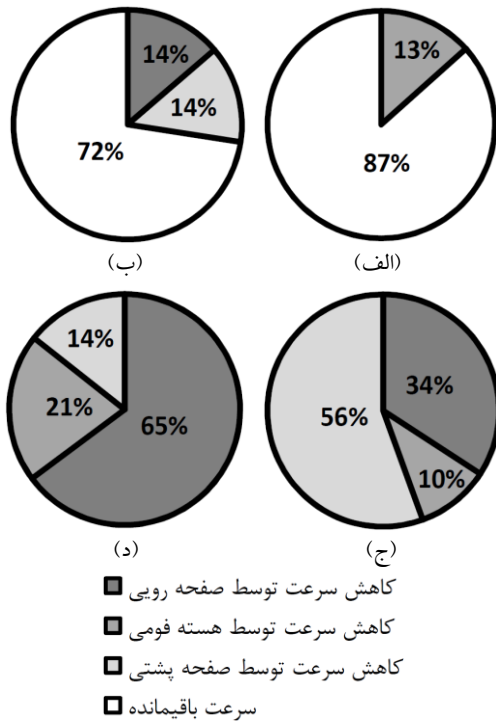
شکل (۷): سرعت پرتابه بر حسب فاصله از سطح برخورد الف تا د به ترتیب برای نمونه های ۱ تا ۴



علاوه بر ملاحظه توزیع تنش در مقطع عرضی نمونه های شبیه سازی شده در شکل ۷، مشخص است که سرعت پرتابه در لایه های مختلف پیل ساندویچی بسته به جنس و ضخامت لایه، با شیب های متفاوتی کاهش می یابد. در نمونه پیل ساندویچی با صفحات آلومینیومی، پرتابه در نیمه مسیر خود دارای سرعتی در حدود ۱۵۷ متر بر ثانیه معادل با ۶۷٪ از سرعت اولیه می باشد اما در نمونه پیل ساندویچی با صفحات فولادی، پرتابه در نیمه مسیر خود سرعتی در حدود ۷۵ متر بر ثانیه معادل با ۳۵٪ از سرعت اولیه را دارا است. در شکل ۸ تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان برای نمونه های شبیه سازی شده نمایش داده شده است.



شکل (۸): سرعت پرتابه بر حسب زمان



شکل (۹): درصد کاهش در سرعت اولیه الف تا د به ترتیب برای نمونه‌های ۱ تا ۴

۳-۲-۳- انرژی جذب شده

شکل ۱۰ الف میزان انرژی جنبشی پرتابه بر حسب زمان و کاهش آن در اثر برخورد با نمونه‌های مورد آزمون و شکل ۱۰ ب انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها بر حسب زمان را که از نتایج شبیه‌سازی آزمون نفوذ پرتابه حاصل شده است، نشان می‌دهد.

مشخص است که پرتابه با برخورد به نمونه‌های پنل ساندویچی با صفحات آلومینیومی و فولادی تمامی انرژی جنبشی خود را که به ترتیب ۲۴۱ و ۲۰۵ ژول می‌باشد، از دست داده و به عبارت دیگر تمامی انرژی برخوردی توسط این دو نمونه جذب شده است. این در حالی است که حدود ۳۲ ژول یعنی تنها ۱۸٪ از انرژی جنبشی پرتابه توسط نمونه فوم بدون صفحات جذب شده است. نمونه صفحات بدون هسته فومی نیز در حدود ۱۰۶ ژول یعنی ۴۸٪ از انرژی جنبشی پرتابه را جذب کرده است.

با توجه به شکل ۸ و نمودارهای دیسکی شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه فوم بدون صفحات، شیب کاهش سرعت با زمان اندک بوده و کاهش سرعت کمی در حدود ۲۷ متر بر ثانیه معادل ۱۳٪ از سرعت اولیه در مدت زمان کمتر از ۲۰۰ میکروثانیه حاصل می‌شود. این در حالی است که مسلح نمودن فوم با صفحات آلومینیومی و فولادی بسته به جنس و ضخامت، عملکرد جذب انرژی را بهبود بخشیده و مدت زمان جذب انرژی پرتابه را نیز می‌افزاید. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شیب کاهش سرعت ناشی از هسته فومی برای سه نمونه حاوی فوم یکسان بوده و کاهش شدید سرعت ناشی از استفاده توام از صفحات و هسته فومی در کنار هم بوده است. در نمونه پنل ساندویچی با صفحات آلومینیومی حدود ۸۰ متر بر ثانیه معادل ۳۴٪ از سرعت اولیه توسط صفحه رویی، حدود ۲۴ متر بر ثانیه معادل ۱۰٪ از سرعت اولیه توسط هسته فومی و غالب سرعت یعنی حدود ۱۳۰ متر بر ثانیه معادل ۵۶٪ از سرعت اولیه، توسط صفحه پشتی جذب شده است. حدود ۴۰۰ میکروثانیه مدت زمان ثبت شده برای فرایند نفوذ پرتابه در نمونه می‌باشد. در نمونه پنل ساندویچی با صفحات فولادی غالب سرعت یعنی حدود ۱۴۰ متر بر ثانیه معادل ۶۵٪ از سرعت اولیه توسط صفحه رویی، حدود ۴۵ متر بر ثانیه معادل ۲۱٪ از سرعت اولیه توسط هسته فومی و حدود ۳۱ متر بر ثانیه معادل ۱۴٪ از سرعت اولیه، توسط صفحه پشتی جذب شده است. کل فرایند نفوذ پرتابه در این نمونه کمتر از ۵۰۰ میکروثانیه است. نمونه صفحات بدون هسته فومی نیز بهتر از فوم به تنهایی عمل می‌نماید اما عملکرد بسیار ضعیف‌تری نسبت به پنل‌های ساندویچی در جذب انرژی و کاهش سرعت پرتابه دارد. مشاهده می‌شود که در این نمونه هر دو صفحه به یک میزان و هر کدام در حدود ۳۰ متر بر ثانیه معادل ۱۴٪ از سرعت اولیه و در مجموع ۶۰ متر بر ثانیه در کاهش سرعت پرتابه نقش داشته و سرعت در فاصله هوایی بین دو صفحه ثابت بوده است. مشخص است که مدت زمان نفوذ پرتابه در نمونه مذکور کمتر از ۳۰۰ میکروثانیه می‌باشد.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمون تجربی نفوذ پرتابه در خصوص انرژی جذب شده در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول (۳): مقایسه انرژی جذب شده حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمون تجربی نفوذ پرتابه

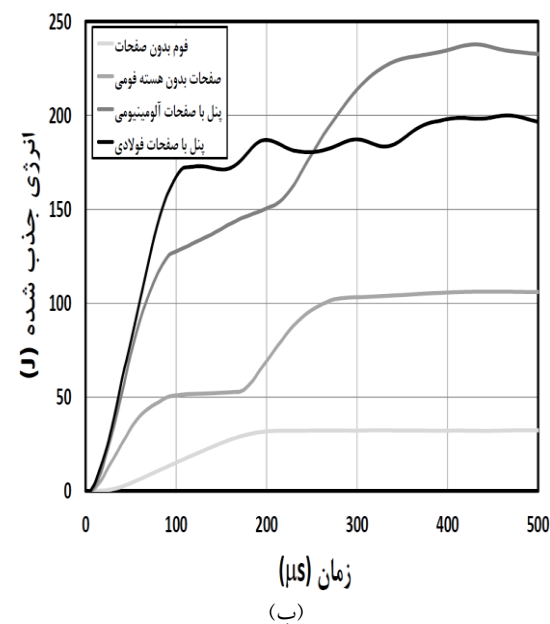
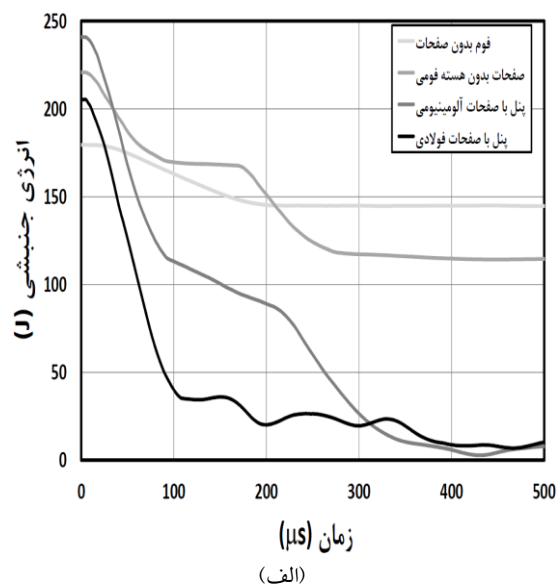
شماره نمونه	انرژی برخورد (J)	انرژی جذب شده حاصل از آزمون تجربی (J)	انرژی جذب شده حاصل از شبیه سازی (%)	اختلاف
۱	۱۸۰	۴۵	۳۲/۲۹	۲۷/۸۹
۲	۲۲۱	۱۰۴	۱۰۶/۱۸	۲/۲۲
۳	۲۴۱	۲۴۱	۲۳۷/۹	۱/۲۷
۴	۲۰۵	۲۰۵	۲۰۰/۰۳	۲/۵۶

مشاهده می شود که میزان اختلاف نتایج شبیه سازی با نتایج حاصل از آزمون تجربی نفوذ پرتابه برای نمونه های پنل ساندویچی با صفحات آلومینیومی و فولادی و نیز نمونه صفحات بدون هسته فومی اندک و قابل قبول می باشد. این در حالی است که میزان خطا در نمونه فوم بدون صفحات، بالا است. دلیل این امر عدم تعریف دقیق فوم آلومینیومی برای نرم افزار و نقص در مدل های موجود می باشد که لزوم تحقیق و بررسی بیشتر جهت تعریف دقیق تر فوم آلومینیومی را بیان می دارد. در نمونه های پنل ساندویچی این مشکل به دلیل تعریف دقیق صفحات و اثر چشمگیر آنها در کاهش سرعت و جذب انرژی پرتابه کمتر خود را نشان داده است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق از آزمون تجربی و آنالیز المان محدود نفوذ پرتابه سرعت بالا بر روی نمونه های پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم A356 و صفحاتی از جنس آلومینیوم و فولاد و نیز نمونه صفحات بدون هسته فومی و فوم آلومینیوم بدون حضور صفحات استفاده شد. با توجه به تحقیق انجام شده می توان نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:

۱- حداکثر تنش بر روی صفحه پشتی برای نمونه های فوم آلومینیومی بدون صفحات، صفحات آلومینیومی بدون هسته فومی، پنل ساندویچی با صفحات آلومینیومی و پنل ساندویچی با



شکل (۱۰): (الف): انرژی جنبشی پرتابه و (ب): انرژی جذب شده توسط نمونه ها بر حسب زمان

- [5] W. Hou, F. Zhu, G. Lu & D. N. Fang, "Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 1045-1055, 2010.
- [6] M. Grujicic, B. Pandurangan, C. L. Zhao, S. B. Biggers & D.R. Morgan, "Hypervelocity impact resistance of reinforced carbon-carbon/carbon-foam thermal protection systems", *Applied Surface Science*, Vol. 252, pp. 5035-5050, 2006.
- [7] B. L. Buitrago, S. K. Garcia-Castillo & E. Barbero, "Experimental analysis of perforation of glass/polyester structures subjected to high-velocity impact", *Materials Letters*, Vol. 64, pp. 1052-1054, 2010.
- [8] Ivanez, C. Santiuste, E. Barbero & S. Sanchez-Saez, "Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact", *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 2392-2399, 2011.
- [9] M. Z. Hassan & W. J. Cantwell, "The influence of core properties on the perforation resistance of sandwich structures – An experimental study", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, pp. 3231-3238, 2012.
- [10] A. A. Ramadhan, A. R. Abu Talib, A. S. Mohd Rafie & R. Zahari, "High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels", *Materials & Design*, Vol. 43, pp. 307-321, 2013.
- [11] R. Nasirzadeh & A. R. Sabet, "Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 63, pp. 129-139, 2014.
- [12] G. R. Villanueva & W. J. Cantwell, "The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 35-54, 2004.
- [13] A. G. Hanssen, Y. Girard, L. Olovsson, T. Berstad & M. Langseth, "A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 1127-1144, 2006.
- [14] R. Destefanis, F. Schafer, M. Lambert & M. Faraud, "Selecting enhanced space debris shields

صفحات فولادی به ترتیب ۹/۶، ۶۸، ۱۵۴ و ۱۱۰۰ مگاپاسکال و در نواحی نزدیک به موقعیت خروج پرتابه می‌باشد.

۲- شیب کاهش سرعت ناشی از هسته فومی برای سه نمونه حاوی فوم یکسان بوده و کاهش شدید سرعت پرتابه و نیز افزایش انرژی جذب شده حاصل استفاده توام از صفحات و هسته فومی در کنار هم و در قالب پنل ساندویچی است.

۳- نمونه صفحات بدون هسته فومی در جذب انرژی و کاهش سرعت پرتابه بهتر از فوم به تنهایی عمل می‌نماید اما عملکرد بسیار ضعیف‌تری نسبت به پنل‌های ساندویچی دارد.

۴- نتایج شبیه‌سازی در خصوص انرژی جذب شده توسط نمونه ها با نتایج حاصل از آزمون تجربی نفوذ پرتابه، تطابق نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اعضای محترم گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد به خاطر همکاری در تولید نمونه‌های پنل ساندویچی و مسئول محترم آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه تربیت مدرس جناب آقای دکتر پل به جهت انجام آزمون‌های نفوذ پرتابه سرعت بالا، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- منابع

- [1] M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson & H. N. G. Wadley, "Metal Foams-A Design Guide", Butterworth-Heinemann, London, 2000.
- [2] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metallic foams", *Progress in Material Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [3] H. P. Degischer & B. Kriszt, "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.
- [4] J. Banhart & H.W. Seeliger, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, pp. 793-802, 2008.

- [19] C. Qi, S. Yang, L. J. Yang, Z. Y. Wei & Z. H. Lu, "Blast resistance and multi-objective optimization of aluminum foam-cored sandwich panels", *Composite Structures*, Vol. 105, pp. 45-57, 2013.
- [۲۰] م. گلستانی پور، س. دورانیش، س. تدینی، ا. باباخانی، س. م. زبرجد و ب. نادری، "بررسی تغییر شکل پل ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت آزمون سقوط پرتابه"، فصلنامه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، در نوبت چاپ.
- [21] M. Golestanipour, H. Amini Mashhadi, M. S. Abravi, M. Malekjafarian & M. H. Sadeghian, "Manufacturing of Al/SiCp composite foams using calcium carbonate as foaming agent", *Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 923-927, 2011.
- [22] JIS H 7902 Standard, "Method for compressive test of porous metals", 2008.
- [23] DIN 50134 Standard, "Testing of metallic materials-Compression test of metallic cellular materials", 2008.
- for manned spacecraft", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, pp. 219-230, 2006.
- [15] D. D. Radford, G. J. McShane, V. S. Deshpande & N. A. Fleck, "The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 2243-2259, 2006.
- [16] H. Zhao, I. Elnasri & Y. Girard, "Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading: an experimental study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1246-1257, 2007.
- [17] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu & L. Zhao, "Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 91-100, 2009.
- [18] L. Jing, Z. Wang, J. Ning & L. Zhao, "The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores", *Composites: Part B*, Vol. 42, pp. 1-10, 2011.

۷- پی نوشت

-
- [1] 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control
- [2] 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral