

بررسی و شبیه‌سازی آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک در پنل‌های ساندویچی با هسته فوم

کامپوزیتی Al A356/SiC_p

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

چکیده

پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم یا کامپوزیت زمینه آلومینیومی، 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 این پژوهش از آزمون تجربی سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiC_p، صفحه‌هایی از جنس آلومینیوم 1100، نمونه صفحه‌های بدون هسته فومی و فوم کامپوزیتی بدون حضور صفحه‌ها استفاده شد. فرورونده بکار رفته از جنس فولاد و دارای سر مخروطی شکل با زاویه 60 درجه، قطر 10 میلی‌متر و با سرعت سوراخ‌کاری بسیار پایین و برابر با 0/02 میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. نتایج تجربی نشان دادند که استفاده همزمان از صفحه‌ها و هسته فومی در قالب پنل ساندویچی تأثیری شایان توجه در افزایش مقدار جذب انرژی به وسیله پنل دارد. افزون بر این، مشخص شد که با افزایش ضخامت هسته فومی و صفحه‌ها، بیشینه نیروی سوراخ‌کاری و انرژی جذب شده به وسیله نمونه افزایش می‌یابد. در ادامه آنالیز المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.12 بمنظور شبیه‌سازی آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک با شرایطی مشابه با شرایط آزمون تجربی روی مدل‌هایی از نمونه‌های یاد شده انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی شامل توزیع تنش روی مدل‌ها، منحنی نیرو-جاب‌جایی، بیشینه نیروی سوراخ‌کاری و نیز انرژی جذب شده به وسیله نمونه‌ها ارایه گردید و مشخص شد که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در مدل‌های پنل ساندویچی تطابق مطلوبی با یافته‌های بدست آمده از آزمون تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: پنل ساندویچی، فوم آلومینیومی، سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک، جذب انرژی، آنالیز المان محدود.

1- استادیار گروه پژوهشی مواد و موسسه علمی کاربردی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی.

2- دانشیار گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

3- استاد بخش مهندسی متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول مقاله: m.golestanipour@gmail.com

پیشگفتار

در سال‌های اخیر استفاده از فوم‌های فلزی در سازه‌هایی که نیاز به استحکام ویژه بالا دارند و یا کاربردهایی نظیر عایق حرارتی و صوتی، گسترش یافته است. این مواد سبک و مستحکم، کاربردهای بسزایی در ساختمان سازی، صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و... دارند. خاصیت عمده این مواد متخلخل قابلیت جذب انرژی بالای آن‌ها در تنش‌های فشاری می‌باشد. در این میان، پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی ساختارهایی نوین هستند که با وجود وزن پایین کارکردی عالی در پراکنده کردن انرژی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل، از آن‌ها به عنوان جاذب انرژی در گستره ای از کاربردها استفاده می‌شود. ریزساختار متخلخل این مواد امکان تغییر شکل مومسان زیادی را در تنش نسبتاً ثابت فراهم می‌کند و به این ترتیب پیش از تخریب یا شکست، مقادیر زیادی انرژی جنبشی به وسیله این ساختارها جذب می‌گردد [1-5].

Mohan و همکارانش [6] آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک با فرورونده سرکروی و سرتخت را روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و صفحه‌هایی از جنس آلومینیوم، فولاد و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن انجام دادند. چهار مدل شکست شامل سوراخ شدن هسته، له‌شدن هسته، برش صفحه‌ها و خمش صفحه‌ها در آن پژوهش شناسایی گردید. بررسی و شبیه‌سازی رفتار پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم زیر بارگذاری شبه‌استاتیک و ضربه‌ای با استفاده از فرورونده نیم‌کروی به وسیله Lu و همکارانش [7] انجام گرفت. در این پژوهش چهار مدل تغییر شکل شامل خمش سرتاسری، فرورفتگی موضعی، فرورفتگی موضعی همراه با خمش سرتاسری و فرورفتگی موضعی همراه با خمش در امتداد لبه تثبیت شده ارائه شد. Ruan و همکارانش [8] اثر ضخامت هسته فومی و صفحه‌ها، کیفیت سطحی صفحه‌ها، شرایط مرزی و چسب بکار رفته را بر خواص مکانیکی و جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. از این پژوهش مشخص گردید که صفحه‌ها و هسته فومی ضخیم‌تر، قید و بست بیش‌تر و سمباده‌زنی صفحه‌ها پیش از چسب‌کاری سبب جذب انرژی بیش‌تر

پنل‌های ساندویچی می‌شود. Hou. و همکارانش [5] 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 سلول بسته و صفحه‌های آلیاژ آلومینیوم Al-5005H34 مورد آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک و دینامیک بررسی کردند. مشخص گردید که افزایش ضخامت صفحه‌ها و هسته فومی و نیز افزایش چگالی هسته فومی سبب افزایش مقدار جذب انرژی می‌شود. خواص فرورفتگی موضعی در پنل‌های ساندویچی بر پایه اصل کم‌ترین انرژی پتانسیل به وسیله Xie و همکارانش [9] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل آن‌ها از راه شبیه‌سازی با نرم افزار ABAQUS مورد تایید قرار گرفت. افزون بر این، توزیع کرنش کششی در صفحه بالایی و پراکندگی انرژی فومی نسبت به صفحه بالایی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نویسندگان این مقاله [10] در پژوهش تجربی مشابه، تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحه‌ها بر مقدار انرژی جذب شده، جدایش صفحه پشتی از هسته فومی، نیروی مسطح و انحنای ایجاد شده در صفحه پشتی را مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید که با افزایش ضخامت هسته فومی و صفحه‌ها، مقدار انرژی جذب شده، نیروی مسطح، مقدار جدایش و انحنای ایجاد شده در صفحه پشتی افزایش می‌یابد. در این پژوهش از شبیه‌سازی المان محدود استفاده نشده بود. نویسندگان این مقاله در پژوهشی دیگر [11] وضعیت تغییر شکل پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم سلول بسته را در آزمون سقوط پرتابه مورد بررسی قرار داده و تاثیر پارامترهایی نظیر ضخامت هسته فومی و ضخامت صفحه‌ها را بر عمق نفوذ، جدایش و کرنش صفحه پشتی مشخص کردند. آزمون سقوط پرتابه با سر مخروطی شکل و سرعتی در حدود 11 متر بر ثانیه صورت گرفت که بسیار بیش‌تر از سرعت بکار رفته در این پژوهش است.

با وجود پژوهش‌های ذکر شده تاکنون بررسی المان محدود به همراه آزمون‌های تجربی سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم کامپوزیت آلومینیوم صورت نگرفته است. در این پژوهش

آزمون‌های سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک با استفاده از دستگاه کشش مدل ZWICK Z250، با سرعت حرکت فک برابر با 0/02 میلی‌متر بر ثانیه و با به کارگیری فرورونده‌ای از جنس فولاد st37 با نوک مخروطی 60 درجه و قطر 10 میلی‌متر، روی نمونه‌ها انجام شد. بمنظور ثابت نگه داشتن نمونه و کنترل شرایط مرزی و نیز جلوگیری از بروز خطا در اثر جابه‌جایی، از فیکسچر استفاده شد. فیکسچر یاد شده مربعی شکل به ابعاد 240×240 میلی‌متر دارای سوراخ دایره‌ای وسط با قطر 100 میلی‌متر بود. وضعیت قرارگیری نمونه زیر دستگاه کشش و در داخل فیکسچر جهت انجام آزمون، در شکل 3 مشاهده می‌شود.

داده‌های نیرو-جابه‌جایی در کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت شده و با اندازه‌گیری سطح زیر نمودار می‌توان مقدار انرژی جذب شده را محاسبه و گزارش کرد. گفتنی است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون دست‌کم دو بار بر روی هر نمونه انجام گرفت و نتایج ثبت شده نتیجه میانگین‌گیری از داده‌های خروجی از آزمون‌های تکرار شده می‌باشد.

بمنظور شبیه‌سازی آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک از مدل‌سازی ماکرومکانیکی غیرخطی به وسیله نرم‌افزار ABAQUS 6.12 استفاده شد. در مدل‌سازی ماکرومکانیکی با پذیرش مقداری خطا در نتایج بدست آمده، فوم ماده‌ای توده‌ای با خواص همگن و یکنواخت فرض می‌شود. بمنظور انجام مدل‌سازی، خواص مکانیکی فوم آلومینیوم بر اساس آزمون فشار تک‌محوری مشخص شده و به همراه سایر شرایط نظیر هندسه آزمون، شرایط مرزی، روش بارگذاری، مشخصات مکانیکی صفحه‌ها و کیفیت اتصال آن‌ها به هسته فومی، وارد نرم‌افزار گردید. با توجه به فرمت نرم‌افزار ABAQUS نوع مش اعمال شده روی مدل نمونه و فیکسچر¹ C3D8R و روی فرورونده صلب² R3D4 هر دو با اندازه 2 میلی‌متر می‌باشد.

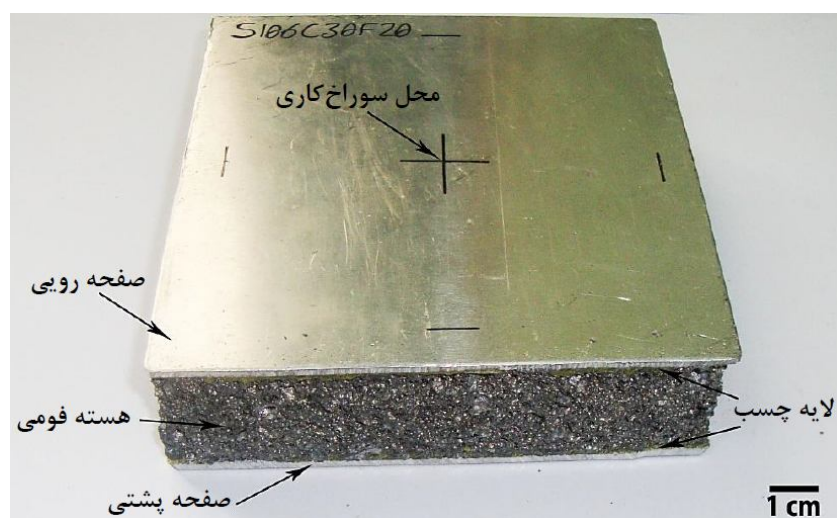
از آنالیز المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.12 بمنظور شبیه‌سازی آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiC_p استفاده شده است. افزون بر این، جهت تایید نتایج شبیه‌سازی، آزمون تجربی سوراخ‌کاری با شرایطی مشابه با شرایط شبیه‌سازی روی نمونه‌های پنل ساندویچی انجام گرفت. توزیع تنش روی مدل‌ها، منحنی نیرو-جابه‌جایی، بیشینه نیروی سوراخ‌کاری و نیز انرژی جذب شده به وسیله پنل از جمله نتایج شبیه‌سازی در این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

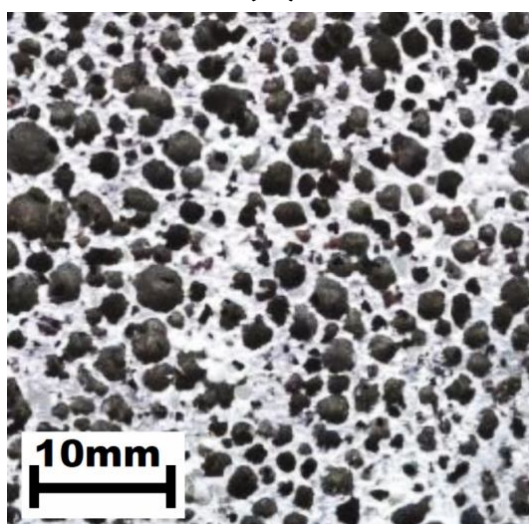
پنل‌های ساندویچی مربعی شکل با طول و عرض 120×120 میلی‌متر بکار رفته در این پژوهش دارای هسته فوم کامپوزیت زمینه آلومینیومی با 10 درصد حجمی ذرات SiC، با ضخامت‌های 10، 20 و 30 میلی‌متر و صفحه‌های رویی از جنس آلومینیوم نوع 1100 با ضخامت‌های 0/6، 1 و 2 میلی‌متر می‌باشد (شکل 1-الف). هسته فوم آلومینیوم بکار رفته دارای ریخت شناسی سلول بسته با توزیع نسبتاً همگن تخلخل‌ها و میانگین چگالی 0/6 گرم بر سانتی متر مکعب بوده که به وسیله گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد تولید شده است (شکل 1-ب). منحنی تنش-کرنش فشاری فوم آلومینیومی بکار رفته که بر اساس استانداردهای JIS H 7902 و DIN 50134 انجام شده، در شکل 2 مشاهده می‌شود. جهت اتصال صفحه‌های آلومینیومی به هسته فومی از چسب پایه پلی‌یورتان در دمای محیط و زیر فشار گیره به مدت 24 ساعت استفاده شد. از نمونه فوم آلومینیوم با ضخامت‌های 10، 20 و 30 میلی‌متر بدون استفاده از صفحه‌های رویی و نمونه‌های صفحه‌های بدون وجود هسته فومی و با فاصله هوایی 30 میلی‌متری نیز به عنوان نمونه شاهد و بمنظور بررسی اثر هسته فومی و صفحه‌ها به صورت مجزا استفاده گردید. برای ساخت نمونه‌های بدون هسته، از یک چارچوب آلومینیومی بین دو صفحه که به وسیله چسب به صفحه‌ها متصل گردید، استفاده شد. جدول 1 ویژگی‌های نمونه‌های آماده شده را نشان می‌دهد [14-12].

¹- 8-Node linear brick, reduced integration, hourglass control

²-4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

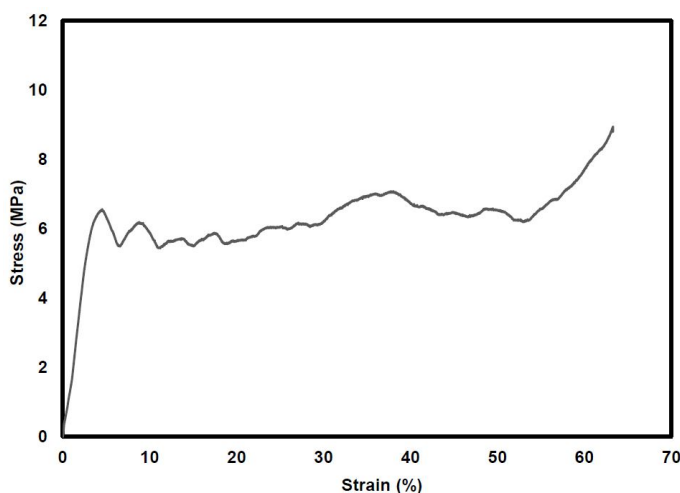


(الف)



(ب)

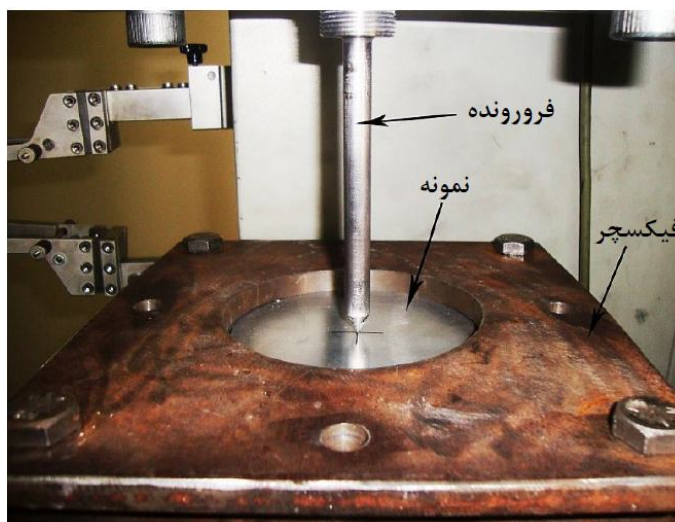
شکل ۱- الف) نمونه ای از پنل ساندویچی بکار رفته در این پژوهش با ضخامت هسته ۳۰ میلی متر و ضخامت صفحه های ۲ میلی متر و ب) ساختار میکروسکوپی هسته فوم آلومینیومی سلول بسته.



شکل ۲- منحنی تنش- کرنش فشاری فوم کامپوزیتی بکار رفته با چگالی ۰/۶ گرم بر سانتی مترمکعب.

جدول ۱- ویژگی های نمونه های تهیه شده در این پژوهش.

جرم نمونه (kg)	ضخامت صفحه ها (mm)	ضخامت هسته فومی (mm)	کد نمونه	ردیف
0/083	بدون صفحه ها	10	C10F00	1
0/154	0/6	10	C10F06	2
0/186	1	10	C10F10	3
0/261	2	10	C10F20	4
0/171	بدون صفحه ها	20	C20F00	5
0/232	0/6	20	C20F06	6
0/277	1	20	C20F10	7
0/355	2	20	C20F20	8
0/258	بدون صفحه ها	30	C30F00	9
0/309	0/6	30	C30F06	10
0/368	1	30	C30F10	11
0/410	2	30	C30F20	12
0/127	0/6	بدون هسته فومی	C00F06	13
0/155	1	بدون هسته فومی	C00F10	14
0/253	2	بدون هسته فومی	C00F20	15



شکل ۳- چگونگی قرارگیری نمونه زیر دستگاه کشش و در داخل فیکسچر.

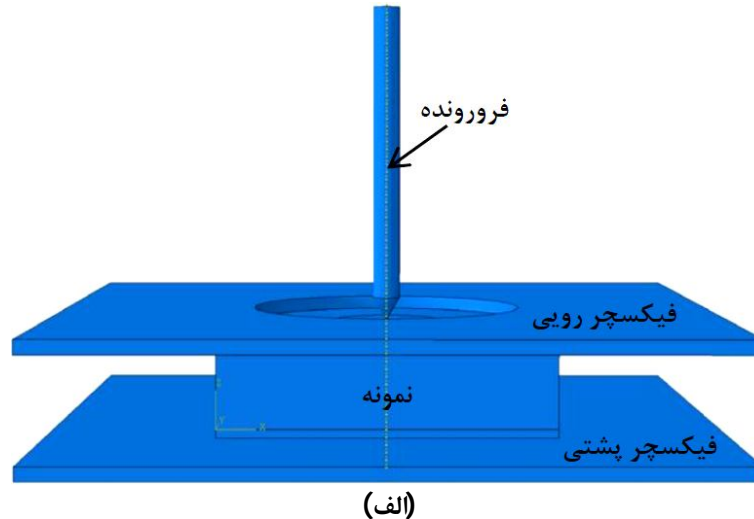
تصویری از مدل طراحی شده جهت انجام شبیه‌سازی و در شکل 4-ب تصویر نمونه مش‌بندی شده به همراه شرایط مرزی، مشاهده می‌شود.

گفتنی است که در فرایند شبیه‌سازی از معیار تسلیم فون‌میزز جهت بررسی تغییرشکل پلاستیک هسته فومی استفاده شد. معیار تسلیم فون‌میزز ساده‌ترین و متداول‌ترین مدل برای پیش‌بینی تغییرشکل پلاستیک در مواد چگال است. سطح تسلیم در این مدل از راه رابطه 1 تعریف می‌شود [3]:

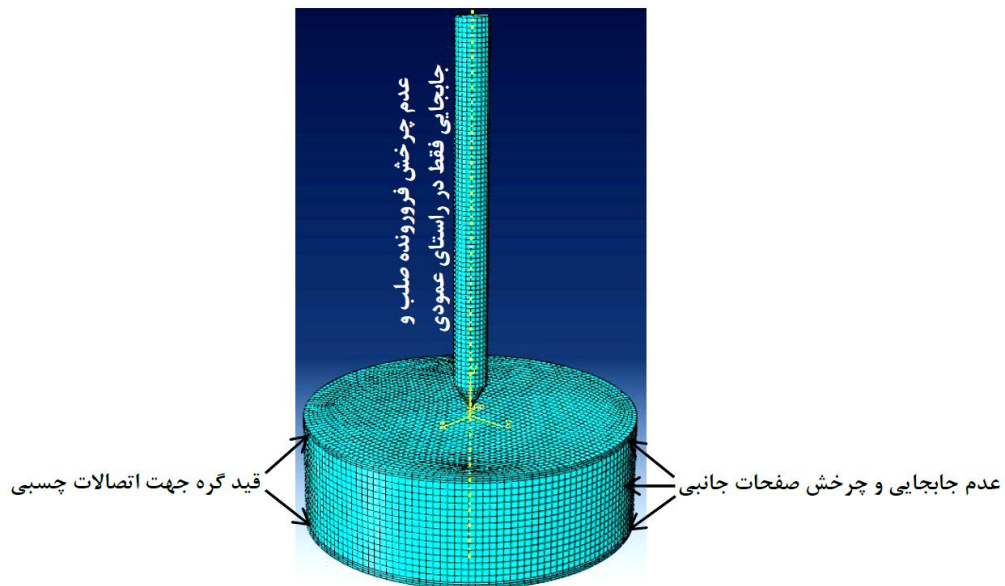
$$f = \sigma_e - Y = 0 \quad (1)$$

که در آن Y استحکام تسلیم ماده زیر بارگذاری تک‌محوری و σ_e تنش موثر فون‌میزز است که به وسیله رابطه 2 تعیین می‌شود [3]:

نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمون تجربی صورت گرفته مقایسه و در صورت لزوم متغیرهای موادی مربوط به مدل‌سازی اصلاح گردید. با توجه به سوراخ دایره‌ای وسط فیکسچر با قطر 100 میلی‌متر، شرایط مرزی برای سطوح جانبی مقطع دیسکی شکل با قطر 100 میلی‌متر از نمونه، به گونه‌ای تعریف گردید که همانند شرایط تجربی، در کل فرایند شبیه‌سازی هیچ‌گونه جابه‌جایی و چرخشی در این سطوح رخ ندهد. همچنین، مشابه با شرایط تجربی، جابه‌جایی فرورونده بدون هرگونه چرخش، فقط در راستای عمودی محدود گردید. با توجه به استحکام بالای اتصالات چسبی که در پژوهشی دیگر به وسیله نویسندگان مقاله مورد بررسی قرار گرفت [15]، برای اتصال هسته فومی به صفحه‌ها، قید از نوع گره استفاده شد. افزون بر این، همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد و با توجه به جنس فولادی فرورونده در مقایسه با نمونه‌های آلومینیومی، فرورونده به صورت صلب و بدون هیچ‌گونه تغییر شکل در فرایند شبیه‌سازی، در نظر گرفته شد. در شکل 4-الف



(الف)



(ب)

شکل 4- الف) مدل طراحی شده جهت انجام شبیه سازی (ب) چگونگی مش بندی و شرایط مرزی شبیه سازی.

دقیق تر، معیار تسلیم فون میز برای توصیف تغییر شکل پلاستیک فومها تحت بارگذاری چند محوری معتبر نیست، اما این مدل در فشار تک محوری یک ماده ناهمگن، زمانی که اثر شرایط فصل مشترکی ناچیز است، می تواند نتایج قابل قبولی در بر داشته باشد. مدل یاد شده از راه رفتار ماده تحت بارگذاری تک محوری کالیبره می شود [3].

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (2)$$

در رابطه بالا s_{ij} تانسور تنش است. چنین ماده ای نمی تواند به سبب بارگذاری هیدرواستاتیک دچار شکست شود و به عبارتی از لحاظ پلاستیک تراکم ناپذیر¹ است. به خاطر تراکم پذیری ساختارهای سلولی، معیار تسلیم فون- میز تنها برای برآورد رفتار مکانیکی فومها در مقادیر کرنش سراسری کم و برای تعیین موقعیت تغییر شکل موضعی برای شروع تشکیل یک باند بکار می رود. به بیان

¹-Incompressible

نتایج و بحث

منحنی نیرو - جابه‌جایی

منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های آزمون شده در شکل 5 و نتایج استخراج شده از آن‌ها شامل بیشینه نیروی سوراخ‌کاری، انرژی جذب شده کل (سطح زیر منحنی) و انرژی جذب شده ویژه (نسبت جذب انرژی نمونه بر وزن آن)، در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی در جدول 2 آمده است. همان‌گونه که از شکل 5 مشخص است، منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی دارای سه منطقه مشخص می‌باشند:

1) تخریب صفحه رویی: در این منطقه نیروی تماسی بین فرورنده و نمونه از صفر تا نخستین بیشینه نیرو به شدت افزایش یافته و سپس بلافاصله کاهش می‌یابد که بیان‌گر گسیختگی نهایی صفحه رویی است.

2) تخریب هسته: در این بخش نیروی سوراخ‌کاری به کمینه خود رسیده و به صورت مسطح ادامه می‌یابد که نمایانگر تخریب هسته فومی با مکانیزم برش و فشار است.

3) تخریب صفحه پشتی: در این منطقه هسته فومی له شده و با تخریب صفحه پشتی نیروی سوراخ‌کاری تا رسیدن به دومین بیشینه نیرو که عموماً کم‌تر از نخستین بیشینه نیرو است، دوباره افزایش می‌یابد. دومین بیشینه نیرو برای پنل‌هایی با صفحه‌ها نازک، وجود نداشته و یا بسیار ناچیز است. در هنگام نفوذ فرورونده به داخل صفحه پشتی نیرو تا رسیدن به نزدیک صفر به تدریج کاهش می‌یابد، اما به دلیل وجود نیروی اصطکاک بین فرورونده و دیواره سوراخ ایجاد شده هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد.

شکل 6 منحنی نیرو-جابه‌جایی در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی را برای نمونه C10F20 نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتاً مطلوب با نتایج تجربی دارد.

بیشینه نیروی سوراخ‌کاری

بیشینه نیروی سوراخ‌کاری ناشی از آزمون تجربی بر حسب ضخامت هسته فومی در ضخامت‌های ثابت صفحه‌ها در شکل 7 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در ضخامت‌های بالای صفحه‌ها به دلیل اثر مقاومتی بیشتر آن‌ها در برابر سوراخ‌کاری، تاثیر ضخامت هسته فومی بر بیشینه نیروی سوراخ‌کاری ناچیز است، اما

در ضخامت‌های کم صفحه‌ها این اثر نسبتاً بیشتر می‌باشد. دلیل این امر تاثیرگذاری بیشتر مقاومت هسته فومی بویژه در ضخامت‌های بالاتر نسبت به صفحه‌های نازک در افزایش نیروی لازم برای سوراخ‌کاری می‌باشد. افزون بر این، بدیهی است که با افزایش ضخامت صفحه‌ها و به تبع آن افزایش مقاومت آن‌ها در برابر نفوذ فرورونده در نمونه در یک ضخامت ثابت از هسته فومی، بیشینه نیروی سوراخ‌کاری افزایش چشمگیری خواهد یافت.

شکل 8 مقایسه‌ای از بیشینه نیروی سوراخ‌کاری در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی را برای کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد. تطابق نسبتاً مطلوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی شایان توجه است.

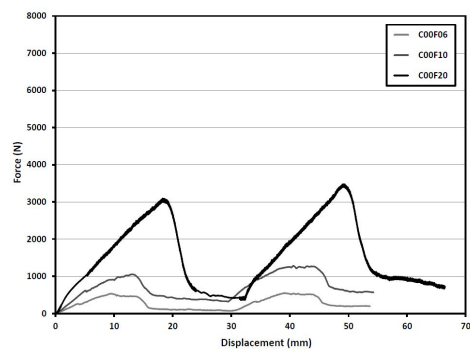
شکل 9 انرژی جذب شده کل حاصل از آزمون تجربی بر حسب ضخامت هسته فومی در ضخامت‌های ثابت صفحه‌ها را نشان می‌دهد. هسته فومی بین دو بیشینه نیرو در منحنی نیرو-جابه‌جایی له شده و فشرده می‌گردد. به این ترتیب افزایش ضخامت هسته فومی در ضخامت ثابتی از صفحه‌ها منجر به افزایش فاصله بین دو بیشینه نیرو شده و در نتیجه، مقدار جذب انرژی کل را می‌افزاید. با افزایش ضخامت صفحه‌ها و در نتیجه ارتقای سطح نیروی مورد نیاز برای سوراخ‌کاری در یک ضخامت ثابت از هسته فومی، مقدار جذب انرژی کل افزایش می‌یابد.

شکل 10 مقایسه بین انرژی جذب شده کل در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که گویای تطابق نسبتاً مطلوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی می‌باشد.

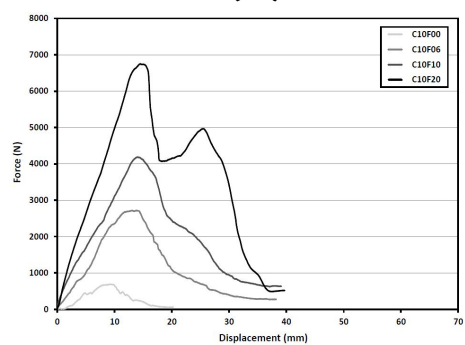
انرژی جذب شده ویژه

نمودار ستونی انرژی جذب شده ویژه برای نمونه‌های مورد آزمون در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی در شکل 11 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است نمونه C10F20 بیش‌ترین مقدار نسبت جذب انرژی به وزن را دارا می‌باشد.

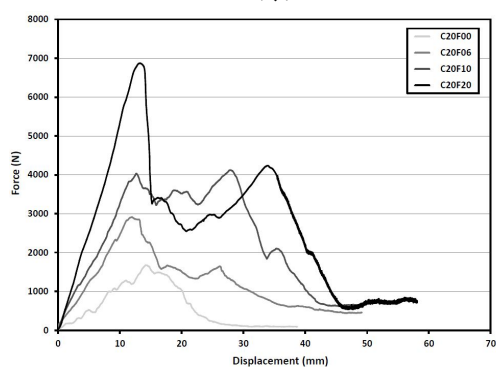
شکل 12 مقایسه‌ای از انرژی جذب شده ویژه در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. از این شکل تطابق نسبتاً مطلوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی ملاحظه می‌شود.



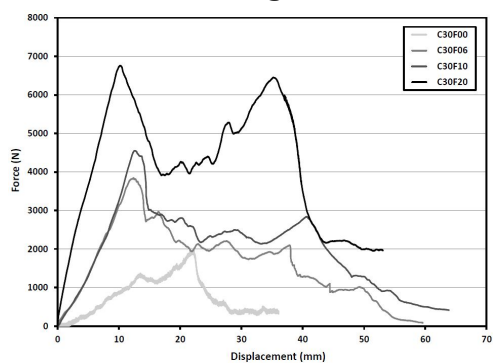
(الف)



(ب)



(ج)

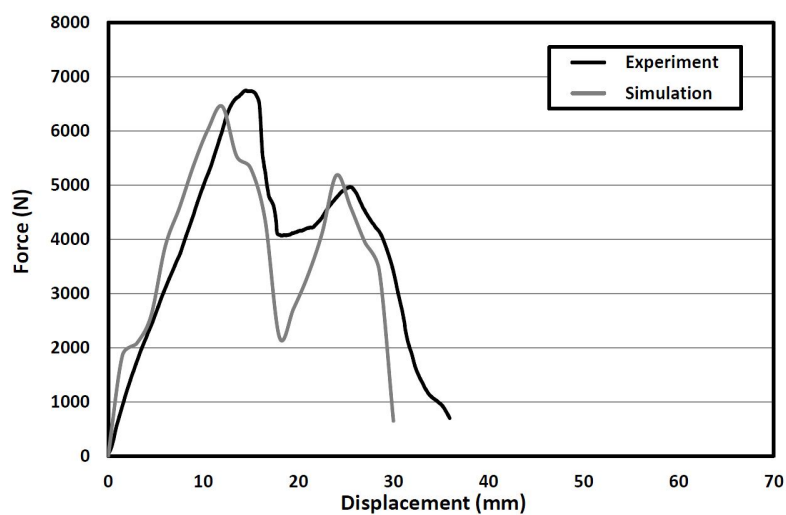


(د)

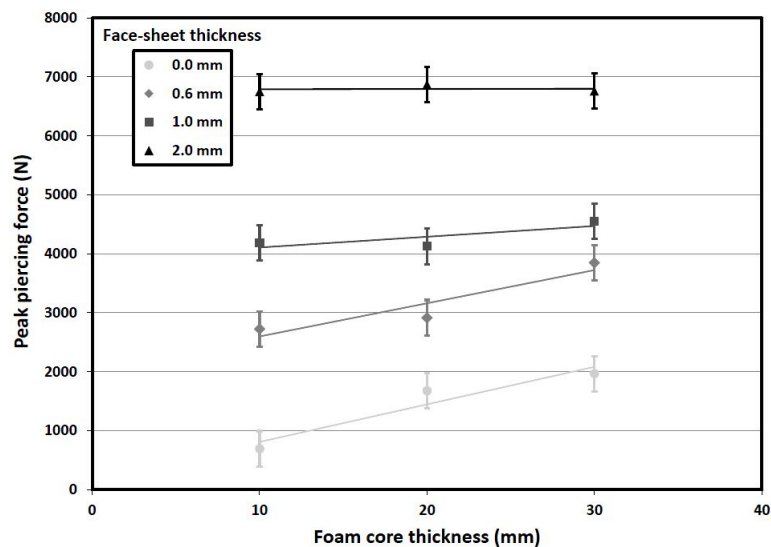
شکل ۵- منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه‌های الف) صفحه‌های بدون هسته فومی ب) پنل‌های ساندویچی با هسته فومی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، ج) پنل‌های ساندویچی با هسته فومی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر د) پنل‌های ساندویچی با هسته فومی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر.

جدول ۲- نتایج تجربی و شبیه‌سازی بدست آمده از آزمون سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک.

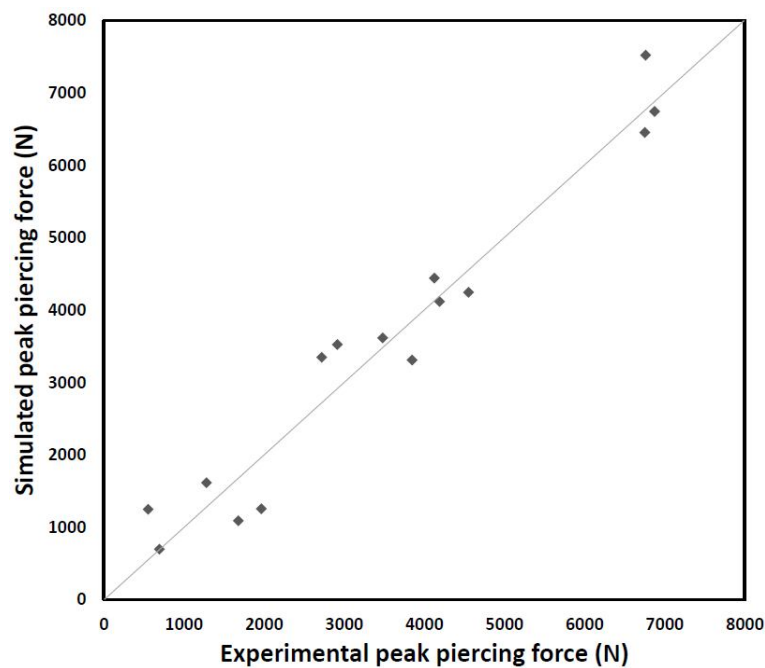
کد نمونه	بیشینه نیروی سوراخ‌کاری (N)		انرژی جذب شده کل (J)		انرژی جذب شده ویژه (J/kg)	
	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی
C10F00	692	695	6/27	6/98	75/52	84/10
C10F06	2720	3347	41/65	48/42	270/45	314/42
C10F10	4190	4117	74/18	63/63	398/82	342/10
C10F20	6752	6453	136/11	111/29	521/49	426/40
C20F00	1678	1089	22/94	17/65	134/52	103/52
C20F06	2915	3524	60/07	59/82	258/92	257/84
C20F10	4124	4441	110/12	76/17	398/26	275/48
C20F20	6873	6743	144/62	125/53	407/95	354/10
C30F00	1966	1253	27/65	28/60	107/37	111/07
C30F06	3847	3308	96/61	73/22	312/65	236/96
C30F10	4553	4245	124/13	90/57	337/31	246/11
C30F20	6763	7521	195/43	143/71	476/66	350/51
C00F06	552	1247	14/99	25/35	118/55	200/40
C00F10	1280	1613	40/09	39/07	259/54	252/88
C00F20	3480	3615	104/08	96/04	411/38	379/60



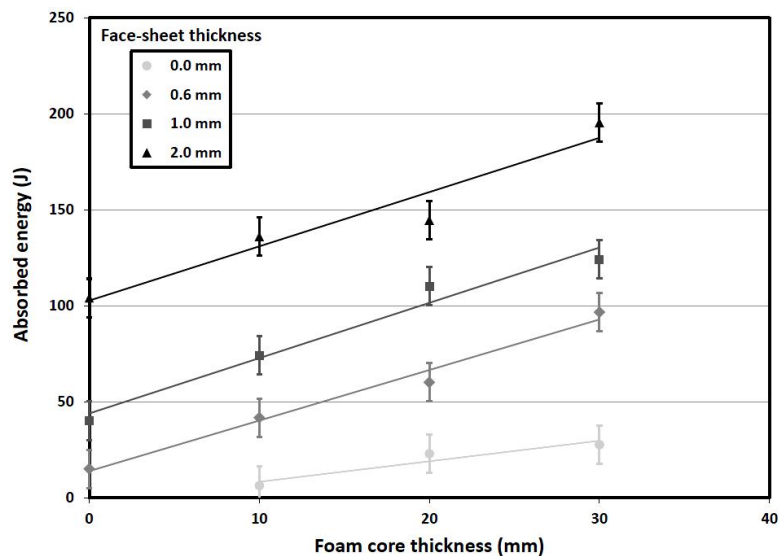
شکل 6- منحنی نیرو-جاب‌جایی برای نمونه C10F20 در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی.



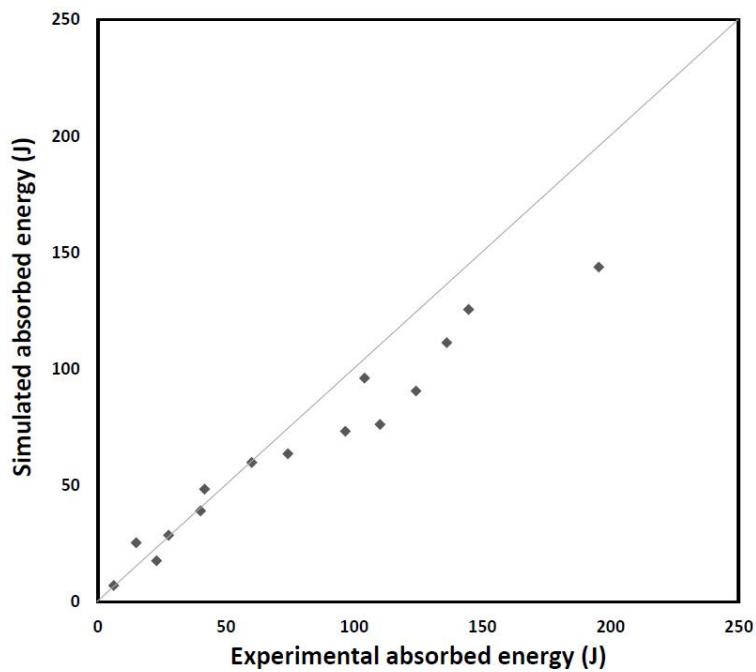
شکل ۷- بیشینه نیروی سوراخ کاری بدست آمده از آزمون تجربی بر حسب ضخامت هسته فومی و ضخامت صفحه ها.



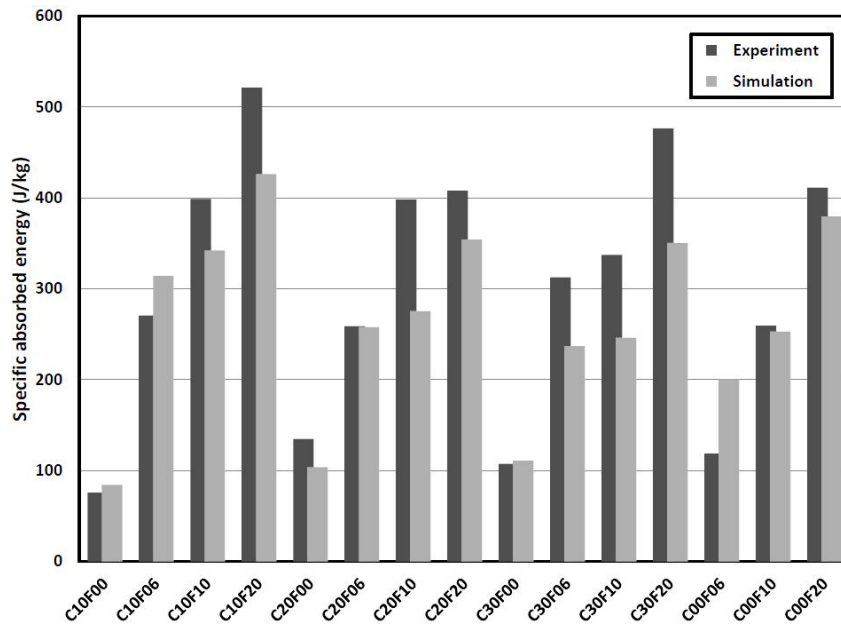
شکل ۸- مقایسه بین مقدار بیشینه نیروی سوراخ کاری در دو حالت تجربی و شبیه سازی (نقاط مربوط به تطابق داده های تجربی و شبیه سازی).



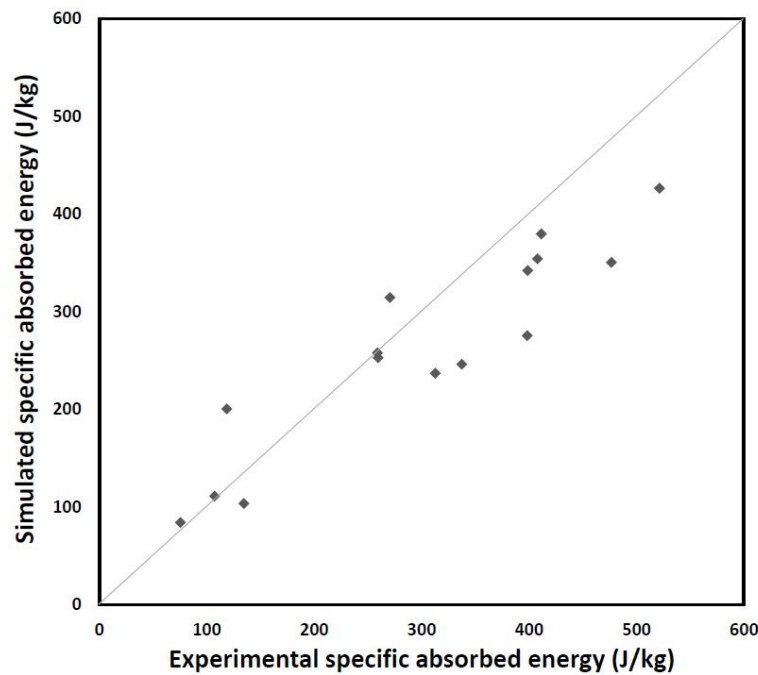
شکل ۹- انرژی جذب شده کل حاصل از آزمون تجربی بر حسب ضخامت هسته فومی و ضخامت صفحه‌ها.



شکل ۱۰- مقایسه بین مقدار انرژی جذب شده کل در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی.



شکل ۱۱- انرژی جذب شده ویژه برای نمونه‌های مورد آزمون در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی.

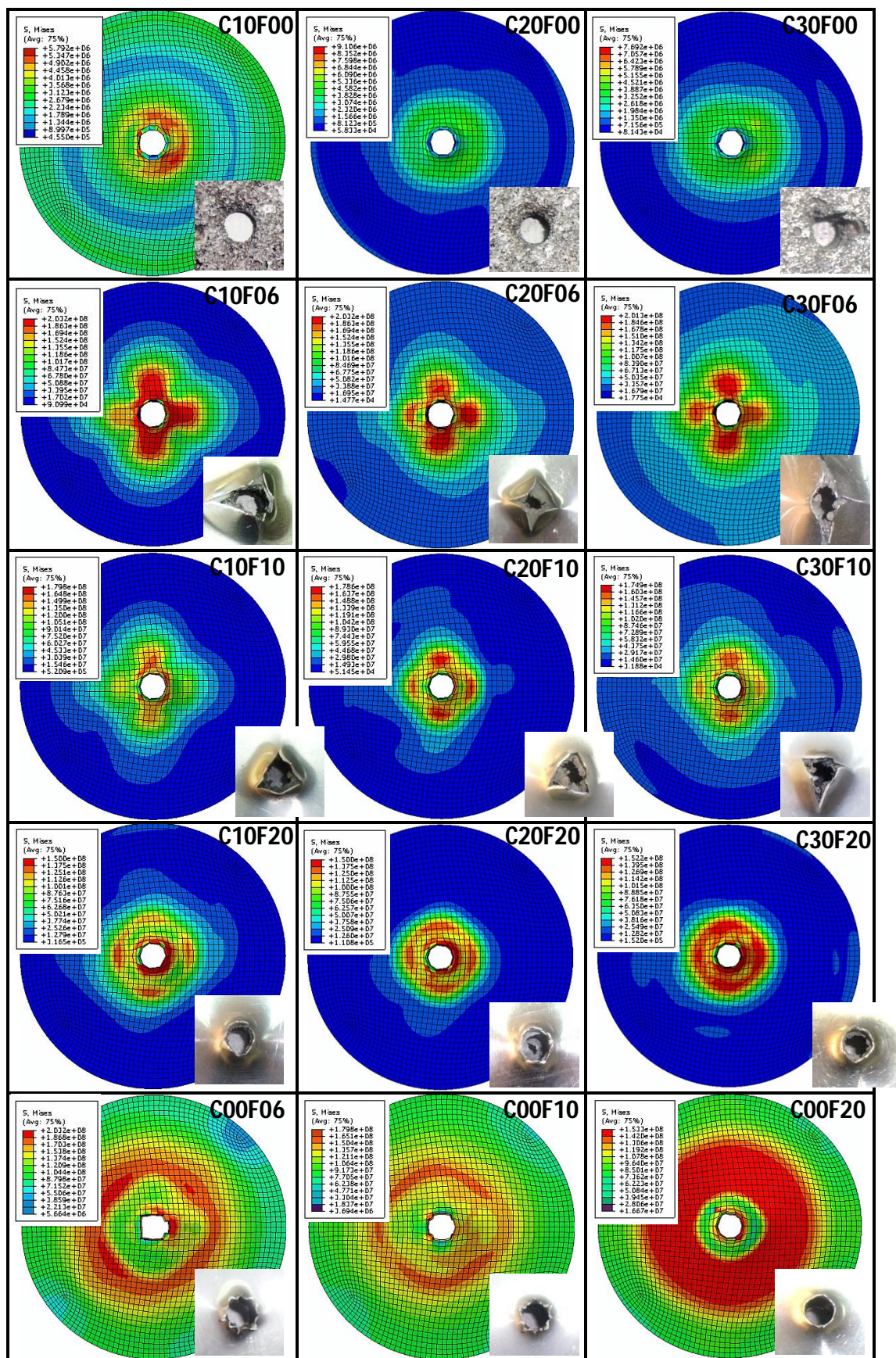


شکل ۱۲- مقایسه بین مقدار انرژی جذب شده ویژه در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی.

با ایجاد سه ترک شعاعی و گسترش آن‌ها رخ داده و برای نمونه‌هایی با صفحه‌های ۲ میلی‌متری سوراخ‌کاری کامل بدون ایجاد ترک شعاعی رخ داده است. دلیل این مسئله افزایش ضخامت صفحه‌ها و تبدیل شرایط تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای می‌باشد. این مکانیزم برای نمونه‌های بدون هسته فومی با تعداد ترک‌های متعدد شعاعی برای صفحه‌های ۰/۶ و ۱ میلی‌متر و بدون ترک شعاعی برای نمونه با صفحه‌های ۲ میلی‌متری نیز صادق است.

توزیع تنش

توزیع تنش برحسب پاسکال روی صفحه پشتی نمونه‌های شبیه‌سازی شده به همراه تصویری از نمونه آزمون شده، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. از تصاویر نمونه‌های آزمون شده مشخص است که برای نمونه‌هایی با صفحه‌های ۰/۶ میلی‌متری سوراخ‌کاری از راه ایجاد چهار ترک شعاعی و اشاعه آن‌ها صورت گرفته است. این امر برای نمونه‌هایی با صفحه‌های ۱ میلی‌متری



شکل ۱۳- توزیع تنش بر حسب پاسکال روی صفحه پشتی نمونه‌های شبیه‌سازی شده به همراه تصویر نمونه واقعی.

- در ضخامت‌های بالای صفحه‌ها تاثیر ضخامت هسته فومی بر بیشینه نیروی سوراخ‌کاری ناچیز است اما در ضخامت‌های کم صفحه‌ها، این اثر نسبتاً بیش‌تر است.
- با افزایش ضخامت صفحه‌ها در یک ضخامت ثابت از هسته فومی، بیشینه نیروی سوراخ‌کاری افزایش خواهد یافت.
- افزایش ضخامت هسته فومی در ضخامت ثابتی از صفحه‌ها مقدار جذب انرژی کل را می‌افزاید.
- با افزایش ضخامت صفحه‌ها در یک ضخامت ثابت از هسته فومی، مقدار جذب انرژی کل افزایش می‌یابد.
- نتایج شبیه‌سازی در خصوص بیشینه نیروی سوراخ‌کاری، انرژی جذب شده کل و انرژی جذب شده ویژه با نتایج ناشی از آزمون تجربی، تطابق نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهد.
- برای نمونه‌هایی با ضخامت‌های 0/6 و 1 میلی‌متر سوراخ‌کاری از راه ایجاد سه یا چهار ترک شعاعی و اشاعه آن‌ها صورت گرفته و برای نمونه‌هایی با صفحه‌های 2 میلی‌متری سوراخ‌کاری کامل بدون ایجاد ترک شعاعی رخ داده است.
- ضخامت هسته فومی در نمونه‌هایی با ضخامت صفحه‌های 2 میلی‌متر تاثیر چندانی در توزیع تنش و مکانیزم سوراخ‌کاری صفحه پستی ندارد، اما در نمونه‌هایی با ضخامت‌های 0/6 و 1 میلی‌متر افزایش ضخامت هسته فومی از شدت تنش وارد بر صفحه پستی تا حدودی کاسته است.
- وجود هسته فومی به دلیل اثر مقاومتی خود مانع از توزیع وسیع تنش و خمش گسترده در سطح صفحه‌ها شده و تنش و خمش را در اطراف سوراخ ایجاد شده، محدود می‌کند.

سپاسگزاری و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اعضای محترم گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد به خاطر همکاری در تولید نمونه‌های پنل ساندویچی و کارشناس محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای مهندس جعفری به جهت انجام آزمون‌های سوراخ‌کاری، سپاسگزاری می‌نمایند.

از نتایج توزیع تنش در شبیه‌سازی نیز تمرکز تنش در سه یا چهار جهت شعاعی در اطراف سوراخ ایجاد شده در نمونه‌هایی با صفحه‌های 0/6 و 1 میلی‌متر مشخص است. این در حالی است که برای نمونه‌هایی با صفحه‌ها 2 میلی‌متری تنش به صورت متقارن و هم‌مرکز در تمامی جهات شعاعی توزیع گردیده است. توزیع تنش برای نمونه‌های فومی بدون صفحه‌ها نیز به صورت متقارن و هم‌مرکز می‌باشد.

افزون بر این، با توجه به نیمرخ توزیع تنش در صفحه پستی نمونه‌ها و نتایج عددی شبیه‌سازی مشخص است که ضخامت هسته فومی در نمونه‌هایی با ضخامت صفحه‌های 2 میلی‌متر تاثیر چندانی در توزیع تنش و مکانیزم سوراخ‌کاری صفحه پستی نداشته، اما در نمونه‌هایی با ضخامت صفحه‌های 0/6 و 1 میلی‌متر افزایش ضخامت هسته فومی از شدت تنش وارد بر صفحه پستی تا حدودی کاسته است.

افزایش ضخامت هسته فومی اگر چه در بیشینه تنش وارد شده به نمونه تاثیر چندانی ندارد، اما با این حال، سبب افزایش جابه‌جایی فرورونده در نمودار نیرو-جابه‌جایی شده و به این ترتیب سطح زیر نمودار و در پی آن انرژی لازم برای سوراخ‌کاری را به گونه‌ای چشمگیر افزایش می‌دهد. هم‌چنین، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های دارای هسته فومی و نمونه‌های بدون هسته فومی مشخص می‌شود که وجود هسته فومی به دلیل اثر مقاومتی خود مانع از توزیع وسیع تنش و خمش گسترده در سطح صفحه‌ها شده و توزیع تنش و خمش و در نتیجه تخریب سازه را در اطراف سوراخ ایجاد شده، محدود می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از آزمون تجربی و آنالیز المان محدود سوراخ‌کاری شبه‌استاتیک روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiC_p و صفحه‌هایی از جنس آلومینیوم و نیز نمونه‌های صفحه‌های بدون هسته فومی و فوم کامپوزیتی بدون حضور صفحه‌ها استفاده شد. با توجه به پژوهش انجام شده می‌توان نتایج زیر را به گونه خلاصه بیان کرد:

References

- 1- M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, and 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, and B. Kriszt, "Handbook of Cellular Metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.
- 4- J. Banhart, and H.W. Seeliger, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications", Advanced Engineering Materials, Vol. 10, pp. 793-802, 2008.
- 5- W. Hou, F. Zhu, G. Lu, and 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- K. Mohan, H. P. Seow, I. Sridhar, and T. H. Yip, "Effects of Face Sheet Material in the Indentation Response of Metallic Foams", Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 42, pp.3714-3723, 2007.
- 7- G. Lu, J. Shen, W. Hou, D. Ruan, and L. S. Ong, "Dynamic Indentation and Penetration of Aluminum Foams", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50, pp.932-943, 2008.
- 8- D. Ruan, G. Lu, and Y. C. Wong, "Quasi-Static Indentation Tests on Aluminum Foam Sandwich Panels", Composite Structures, Vol. 92, pp.2039-2046, 2010.
- 9- Z. Xie, Z. Zheng, and J. Yu, "Localized Indentation of Sandwich Panels with Metallic Foam Core: Analytical Models for Two Types of Indenters", Composites: Part B, Vol. 44, pp. 212-217, 2013.
- 10- مسعود گلستانی پور، مینو توکلی، سید مجتبی زبرجد، ابوالفضل باباخانی، بهروز نادری "بررسی جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ‌کاری"، مجله مواد نوین، جلد 3، شماره 2، صفحه 25-38، زمستان 1391.
- 11- مسعود گلستانی پور، سیمین دوراندیش، سهیلا تدینی، ابوالفضل باباخانی، سید مجتبی زبرجد، بهروز نادری، "بررسی تغییرشکل پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت آزمون سقوط پرتابه"، فصلنامه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، شماره 2، صفحه 87-97، تابستان 1393.
- 12- M. Golestanipour, H. AminiMashhadi, M. S. Abravi, M. Malekjafarian, and 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.
- 13- JIS H 7902 Standard, "Method for Compressive Test of Porous Metals", 2008.
- 14- DIN 50134 Standard, "Testing of Metallic Materials-Compression Test of Metallic Cellular Materials", 2008.
- 15- مسعود گلستانی پور، ابوالفضل باباخانی، سید مجتبی زبرجد، "بررسی و شبیه‌سازی استحکام برشی اتصال چسبی در پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تولید شده به روش ذوبی با عامل فوم‌ساز"، فصلنامه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، پذیرفته شده و در نوبت چاپ.