

بررسی تغییر شکل پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت آزمون سقوط پرتابه

- مسعود گلستانی پور^{۱*}، سیمین دوراندیش^۳، سهیلا تدینی^۳، ابوالفضل باباخانی^۴، سید مجتبی زبرجد^۵، بهروز نادری^۶
- 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- کارشناس مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۴- دانشیار گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۵- استاد گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
 - ۶- کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- *m.golestanipour@gmail.com
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۰۵)

چکیده

همواره ایجاد ساختارهایی با قابلیت جذب انرژی از موارد حائز اهمیت در صنعت امروز به شمار رفته است و در این میان استفاده از پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم به عنوان ساختاری سبک، دسته مهمی از تولیدات این حوزه را تشکیل می دهد. در این پژوهش با استفاده از روش فوم سازی مستقیم مذاب و به کارگیری مقادیر مختلف از عامل فوم ساز کربنات کلسیم و عامل پایدارکننده کاربید سیلیسیوم، محصولات فوم آلومینیومی تولید گردید. با توجه به پارامترهای تولید، دانسیته فوم های تولیدی بین ۰/۳۸ تا ۰/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب اندازه گیری شد. در ادامه، بررسی های ریزساختاری و خواص فشاری محصولات نیز انجام گرفت. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بیانگر توزیع یکنواخت سلول ها می باشد. با توجه به خواص فشاری محصولات و اندازه گیری ظرفیت جذب انرژی فشاری از روی سطح زیر منحنی تنش- کرنش حاصل، بهترین محصول از نقطه نظر میزان جذب انرژی استاتیک انتخاب و آزمون های سقوط پرتابه بر روی آن محصول ادامه یافت. آزمون سقوط پرتابه به منظور بررسی تغییر شکل پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تولیدی و صفحات رویی آلومینیومی با میزان انرژی اعمالی ۹۷/۳ ژول انجام شد. در این آزمون تاثیر ضخامت هسته فوم آلومینیوم و ضخامت صفحات رویی بر عمق نفوذ پرتابه، طول جدایش صفحه پشتی از هسته فومی و کرنش ایجاد شده در صفحه پشتی مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخص گردید که با افزایش ضخامت صفحات، عمق نفوذ پرتابه، طول جدایش صفحه پشتی و کرنش صفحه پشتی کاهش می یابد. علاوه بر این با افزایش ضخامت هسته فومی عمق نفوذ پرتابه افزایش یافته اما طول جدایش صفحه پشتی و کرنش صفحه پشتی کاهش می یابد.

واژه های کلیدی:

فوم آلومینیومی، ذرات کاربید سیلیسیوم، کربنات کلسیم، خواص فشاری، پنل ساندویچی، سقوط پرتابه.

در سال های اخیر استفاده از مواد متخلخل در ساختارهایی که نیاز به نسبت استحکام به وزن بالا داشته و یا کاربردهایی نظیر

۱- مقدمه

تحقیقات در زمینه بارگذاری دینامیک و بالستیک ساختارهای کامپوزیتی لایه ای با پایه پلیمر و یا شیشه/کربن صورت گرفته و توجه کمتری به پنل های ساندویچی شده است. در میان پنل های ساندویچی نیز تمرکز بیشتر تحقیقات بر روی ساختارهایی با هسته فوم PVC و یا لانه زنبوری بوده و تحقیقات بسیار محدودی در خصوص تغییرشکل پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیک صورت گرفته است [۴].

دو محقق به نام های Villanueva و Cantwell بر روی ضربه با سرعت بالا روی کامپوزیت ها و ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحقیق نمودند. این محققان سه الگوی اصلی برای شکست معرفی نمودند و مشخص کردند که پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی انرژی سوراخ کاری به مراتب بالاتری نسبت به کامپوزیت های صفحه ای ارائه می دهند [۹].

Hanssen و همکارانش نیز آزمون های تجربی و شبیه سازی عددی برخورد پرنده به پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و صفحاتی از جنس آلومینیوم انجام دادند. در این آزمون ها سوراخ شدن در پنل ها مشاهده نگردید [۱۰].

Zhao و همکارانش نیز رفتار سوراخ کاری پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و با صفحات آلایژ آلومینیوم را از طریق آزمون میله فشاری Split-Hopkinson مورد بررسی قرار داده و منحنی نیروی سوراخ کاری-جابجایی مربوطه را به دست آوردند [۱۱].

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 پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و صفحات آلایژ آلومینیوم Al-5005H34 تحت آزمون سوراخ کاری 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 می شود [۴].

عایق حرارتی و صوتی، گسترش یافته است. این مواد با ساختاری سبک و در عین حال مستحکم کاربردهای بسزایی در ساختمان سازی، صنایع نظامی، هوافضا و مصارف تحقیقاتی و آزمایشگاهی پیدا نموده اند. خاصیت عمده این مواد متخلخل قابلیت جذب انرژی بالای آنها در تنش های فشاری می باشد. در میان فلزات مختلف که به منظور فوم سازی مورد استفاده قرار می گیرند، آلومینیوم و آلایژهای آن به دلیل داشتن چگالی نسبتاً پایین، در دسترس بودن و سهولت تشکیل فوم بیشترین کاربرد را دارند. فوم های آلومینیومی با روش های متعددی از جمله متالورژی پودر، دمیدن گاز به درون مذاب، استفاده از عامل فوم ساز و تولید می شوند [۱-۸].

یکی از روش های پر کاربرد در تولید فوم آلومینیومی استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فوم ساز می باشد که عملاً از سال ۱۹۸۶ در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید فوم آلومینیومی در این روش ابتدا مذاب فلز آماده شده و سپس توسط افزودنی های سرامیکی پایدار و ویسکوز می گردد تا پس افزودن ماده فوم ساز و آزاد شدن گاز، حباب های گازی حاصل، بهتر درون مذاب محبوس گردند. بعد از اضافه کردن عامل فوم ساز، مذاب شروع به منبسط شدن نموده و به تدریج محفظه فوم سازی را پر می نماید. پس از اینکه عملیات فوم سازی کامل شد و پیش از اینکه حباب های گازی از مذاب خارج شوند یا به یکدیگر بپیوندند مذاب سرد شده و فوم منجمد می گردد [۱-۳].

پنل های ساندویچی با هسته فوم فلزی (به خصوص آلومینیومی) ساختارهای ترکیبی نوینی هستند که با وجود وزن پایین عملکردی عالی در پراکنده کردن انرژی از خود نشان می دهند. به همین دلیل از چنین ساختارهایی به عنوان جاذب انرژی در گستره وسیعی از کاربردها تحت شرایط بارگذاری شدید نظیر ضربه بالستیک استفاده می شود. ریزساختار سلولی این مواد امکان تغییرشکل پلاستیک زیادی را در تنشی نسبتاً ثابت فراهم می نماید و به این ترتیب قبل از تخریب یا شکست، مقادیر زیادی انرژی جنبشی توسط این ساختارها جذب می گردد. اکثر

درجه سانتیگراد حرارت دهی می شوند تا حذف آلودگی ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود تر شوندگی ذرات SiC صورت گیرد. عامل فوم ساز در این فرایند ذرات کربنات کلسیم با خلوص ۹۹/۵٪ وزنی و اندازه ذرات ۵ میکرومتر می باشد. این پودر نیز به منظور حذف آلودگی و گازهای جذب سطحی شده و بهبود تر شوندگی و توزیع یکنواخت درون مذاب به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دهی می شود.

جهت تولید فوم آلومینیومی مورد نظر در این تحقیق ابتدا شمش کامپوزیتی با زمینه آلومینیومی و ذرات فاز تقویت کننده کاربید سیلیسیوم در دمای ۶۷۰-۶۹۰ درجه سانتیگراد و به روش ریخته گری گردابی طی مدت زمان ۲۰ دقیقه و با سرعت همزن معادل با ۹۰۰ دور در دقیقه تهیه شد. شمش مذکور در دمای ۶۵۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد مجدداً ذوب شده و در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد با سرعتی معادل ۱۴۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. مقدار یک درصد وزنی منیزیم در این مرحله به مذاب افزوده گردید و سپس پودر کربنات کلسیم به مذاب در حال تلاطم اضافه و بلافاصله مخلوط به مدت کمتر از ۱ دقیقه هم زده شد. پس از آن برای این که عامل فوم ساز تجزیه شده و تولید گاز دی اکسید کربن نماید مخلوط چند دقیقه در دمای ۷۳۰-۷۱۰ درجه سانتیگراد نگهداری شد و سپس فوم تولید شده از کوره خارج شده و در هوا خنک گردید. مقادیر ۳ و ۵ درصد وزنی پودر کربنات کلسیم و مقادیر ۳، ۶ و ۱۰ درصد حجمی ذرات کاربید سیلیسیوم برای تولید محصولات استفاده شد. فوم های آلومینیومی تولید شده و مقادیر چگالی نسبی و درصد تخلخل آن ها در جدول ۱ آمده است [۱۳-۱۴].

به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع ذرات کاربید سیلیسیوم در فوم آلومینیومی، مطالعات میکروسکوپی الکترونی محصولات فومی توسط دستگاه SEM مدل LEO 1450VP (35kV) و مطالعات میکروسکوپی نوری نیز توسط دستگاه مدل Olympus PM3 انجام گرفت. نمونه هایی با ابعاد تقریبی ۳۵×۳۵×۴۰ میلی متر نیز برای انجام آزمون فشار توسط دستگاه

نگارندگان این مقاله در تحقیقی دیگر جذب انرژی پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را تحت آزمون سوراخ کاری شبه استاتیک مورد بررسی قرار دادند که با توجه به انجام آزمون در شرایط شبه استاتیک، نتایج قابل تعمیم به شرایط دینامیک نمی باشد. در این تحقیق مشاهده گردید که افزایش ضخامت هسته فومی و صفحات باعث گسترش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی شده و در نتیجه انرژی جذب شده و نیروی مسطح افزایش می یابد. علاوه بر این مشخص شد که با افزایش ضخامت صفحات، میزان جدایش و کرنش صفحه پشتی افزایش می یابد. همچنین با افزایش ضخامت هسته فومی، انرژی جذب شده و نیروی مسطح افزایش یافته و به سبب این افزایش در جذب انرژی، میزان جدایش و کرنش صفحه پشتی کاهش می یابد [۱۲].

با وجود تحقیقات محدود انجام شده هنوز مطالعه پارامتری مناسبی در زمینه تغییر شکل پنل های ساندویچی تحت آزمون های دینامیک صورت نگرفته است. مرور تحقیقات فوق در این زمینه نشان می دهد که تاثیر پارامترهایی نظیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر روی عمق نفوذ، جدایش و کرنش صفحه پشتی که هدف از تحقیق حاضر می باشد، مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این در این تحقیق، منحصراً پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تولید شده توسط محققین از طریق فرآیند فوم سازی با عامل فوم ساز، تحت آزمون سقوط پرتابه با سر مخروطی شکل و سرعتی معادل با ۱۱/۱۲ متر بر ثانیه قرار گرفته و رفتار تغییر شکل آن بررسی شده است.

۲- مواد و روش ها

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 به عنوان فلز پایه استفاده شده است. عامل پایدارکننده و در عین حال فاز تقویت کننده سرامیکی که در این بررسی مورد استفاده قرار گرفته، ذرات کاربید سیلیسیوم با خلوص ۹۸٪ وزنی و اندازه متوسط ذرات ۱۰ میکرومتر می باشد. ذرات به مدت ۱ ساعت در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵۰

متر و صفحات رویی از جنس آلومینیوم از سری ۱۰۰۰ با ضخامت های ۰/۵ و ۲ میلی متر می باشد. جهت اتصال صفحات آلومینیومی به فوم های تولید شده از چسب آهن در دمای محیط و تحت فشار گیره به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد (شکل ۱).

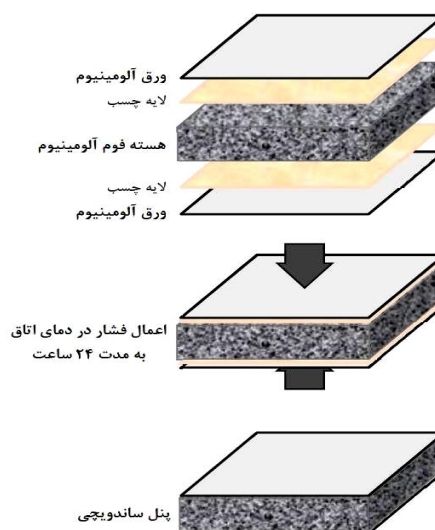
Zwick Z250 با نرخ کرنش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه تهیه شد. این آزمون بر اساس استانداردهای JIS H 7902 و DIN 50134 انجام گردید [۱۵-۱۶].

پنل های ساندویچی مورد استفاده در این تحقیق دارای هسته فوم آلومینیوم (انتخاب شده از محصولات فوق با توجه به نتایج آزمون فشار تک محوری) با ضخامت های ۱۰، ۲۰، ۳۰ میلی

جدول (۱): فوم های آلومینیومی تولید شده و مقادیر چگالی و درصد تخلخل آن ها.

شماره محصول فوم آلومینیوم تولیدی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کسر حجمی ذرات کاربید سیلیسیوم (Vol%)	۳	۳	۶	۶	۱۰	۱۰
درصد وزنی پودر کربنات کلسیم (wt%)	۵	۳	۵	۳	۵	۳
چگالی (g/cm ³)	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۶۳
درصد تخلخل (%)	۸۶	۸۴	۸۳	۷۹	۸۲	۷۷

F نشان دهنده فوم بوده که عدد مقابل آن ضخامت فوم را نشان داده و حرف S نشان دهنده صفحات بوده که با تقسیم عدد مقابل آن بر ده ضخامت صفحات مشخص می شود. به عنوان مثال F10S05 پنل ساندویچی می باشد که ضخامت هسته فومی در آن ۱۰ میلی متر و ضخامت صفحات در آن ۰/۵ میلی متر است.



شکل (۱): مراحل آماده سازی پنل های ساندویچی.

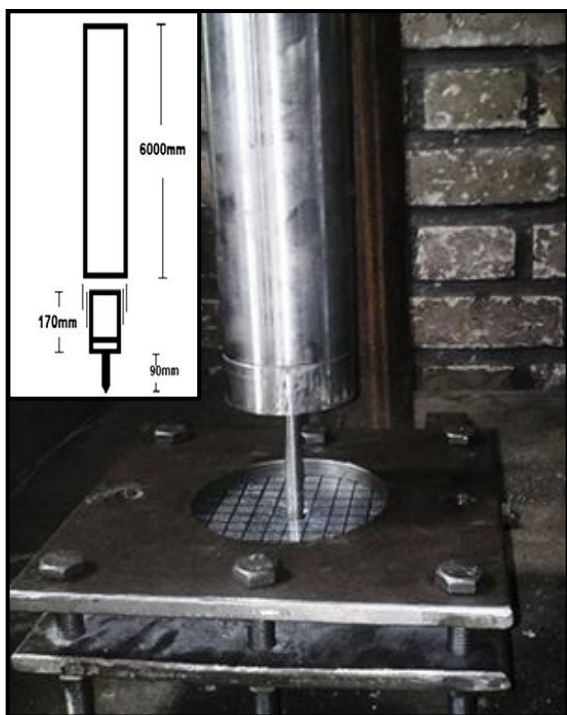


شکل (۲): پنل های ساندویچی تولید شده در این تحقیق.

طول و عرض پنل های ساندویچی تولید شده ۱۳۰×۱۳۰ میلی متر مربع می باشد. شکل ۲ نمونه ای از پنل های ساندویچی تولید شده را نشان می دهد. در جدول ۲ مشخصات پنل های ساندویچی مورد آزمایش به همراه چگالی سطحی (وزن به ازای واحد سطح) آن ها آورده شده است. با توجه به جدول اساس کدگذاری نمونه ها به صورت کد ۶ قسمتی می باشد که در آن

$$P = mgh \quad (۱)$$

$$K = 1/2 mv^2 \quad (۲)$$



شکل (۳): فیکسچر طراحی شده جهت ثابت نگه داشتن نمونه ها حین آزمون سقوط پرتابه و تصویر شماتیک از نحوه انجام آزمون سقوط پرتابه

از برابری این دو رابطه با توجه به مقادیر ارتفاع و وزن پرتابه و با در نظر گرفتن $g=9/81$ ، مقدار انرژی جنبشی پرتابه در لحظه برخورد که برابر با مقدار انرژی پتانسیل بوده محاسبه شده و لذا سرعت پرتابه در لحظه برخورد با توجه به رابطه (۲) برابر با $11/12$ متر بر ثانیه به دست خواهد آمد که مستقل از جرم پرتابه می باشد. با توجه به جرم پرتابه به میزان $1/575$ کیلوگرم و ارتفاع $6/3$ متر، انرژی برخورد برابر با $97/3$ ژول است.

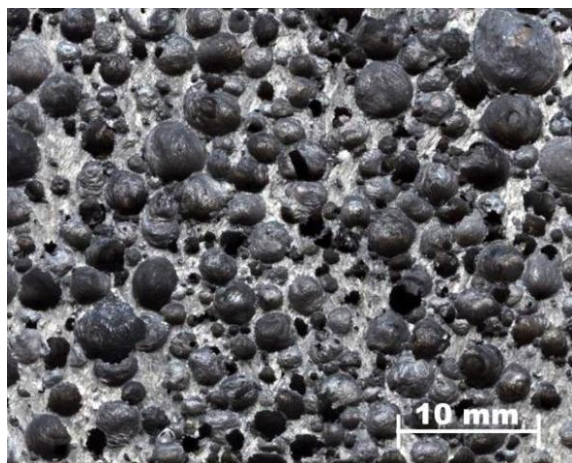
نمونه های مورد آزمون با محاسبه طول جدایش صفحه پشتی و مقدار کرنش صفحه پشتی (P) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. جهت محاسبه طول جدایش صفحه پشتی ابتدا نمونه ها از محل برخورد پرتابه برش زده شد و سپس تصاویری از سطح مقطع برش خورده تهیه گردید. با استفاده از نرم افزار اتوکد، طول ناحیه ای از صفحه پشتی که از فوم جدا شده بود به دقت اندازه

جدول (۲): مشخصات پنل های ساندویچی تهیه شده در این تحقیق.

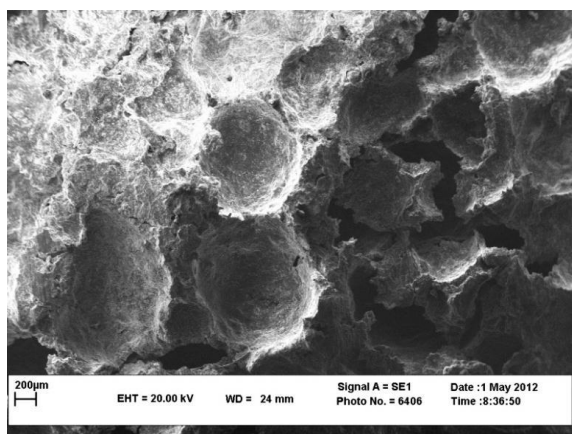
کد نمونه	ضخامت ورق (mm)	ضخامت فوم (mm)	چگالی سطحی (g/cm ²)
F00S05	۰/۵	۰	۰/۲۷
F10S05	۰/۵	۱۰	۰/۹۰
F20S05	۰/۵	۲۰	۱/۵۳
F30S05	۰/۵	۳۰	۲/۱۶
F00S20	۲	۰	۱/۰۸
F10S20	۲	۱۰	۱/۷۱
F20S20	۲	۲۰	۲/۳۴
F30S20	۲	۳۰	۲/۹۷

برای انجام آزمون سقوط پرتابه از پرتابه ای فولادی با وزن $1/575$ کیلوگرم و ارتفاع 260 میلی متر استفاده شد که پرتابه مذکور دارای قطر 9 میلی متر و سر مخروطی شکل با زاویه نوک 60 درجه بود. به منظور هدایت مستقیم پرتابه از لوله فولادی عمودی به طول 6 متر استفاده گردید که در فاصله 300 میلی متری از سطح نمونه قرار داشت. قبل از انجام آزمون، نمونه ها در داخل یک فیکسچر طراحی شده قرار گرفته و محکم می شوند (شکل ۳). علت استفاده از فیکسچر، ثابت نگه داشتن نمونه ها و کنترل شرایط مرزی و نیز جلوگیری از بروز خطا در اثر جابجایی در لحظه برخورد و لذا برخورد مستقیم پرتابه به مرکز نمونه بوده است. پس از آن پرتابه مورد نظر از ارتفاع $6/3$ متری و بدون سرعت اولیه به سمت مرکز پنل های ساندویچی رها شد. شکل ۳ تصویر شماتیک طرح انجام آزمون را نیز نشان می دهد. قابل ذکر است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون حداقل دو بار بر روی نمونه های مشابه انجام شده و نتایج ثبت شده حاصل میانگین گیری از داده های خروجی از آزمون های تکرار شده می باشد.

با توجه به روابط (۱) و (۲) که به ترتیب انرژی پتانسیل و جنبشی در لحظه برخورد پرتابه به نمونه را نشان می دهند، مقدار انرژی و سرعت در این آزمون قابل محاسبه است:



(الف)



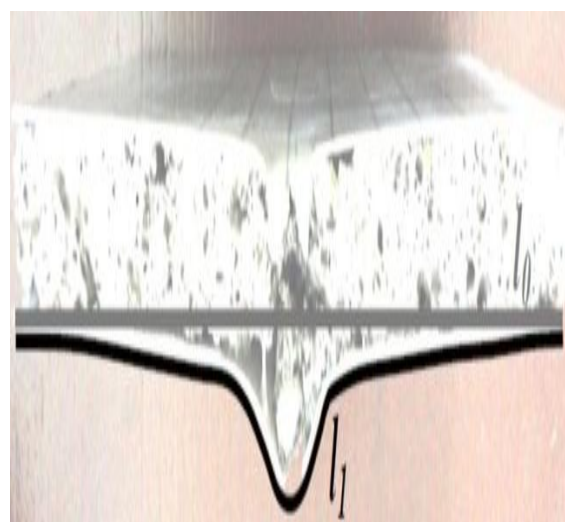
(ب)

شکل (۵): (الف) تصویر میکروسکوپ نوری و (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فوم تولید شده به روش ریخته گری ذوبی با عامل فوم ساز در این تحقیق.

۳-۲- آزمون فشار تک محوری و میزان جذب انرژی
 منحنی های تنش- کرنش فشاری فوم های آلومینیومی تولیدی با مقادیر چگالی و محتوای کاربید سیلیسیوم متفاوت در شکل ۶ مشاهده می شود. از این منحنی ها مشخص است که رفتار فشاری تابعی از چگالی و محتوای کاربید سیلیسیوم محصولات می باشد. مقادیر تنش مسطح، کرنش تراکم و ظرفیت جذب انرژی فشاری محصولات فومی با توجه به استانداردهای JIS H 7902 و DIN 50134 از روی منحنی های تنش-کرنش فشاری (شکل ۶) محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است. مشخص است که با افزایش چگالی و محتوای کاربید سیلیسیوم

گیری شد. جهت به دست آوردن مقدار کرنش صفحه پستی (φ)، برای هر یک از نمونه ها طول ناحیه ای از صفحه پستی که در اثر برخورد پرتابه تحت تاثیر قرار گرفته و تغییر شکل پیدا کرده (I_1) و طول همان ناحیه پیش از برخورد (I_0) به طور دقیق اندازه گیری شد (شکل ۴) و سپس با توجه به رابطه (۳) مقدار φ یا همان کرنش ایجاد شده در صفحه پستی محاسبه گردید:

$$\varphi = \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (3)$$



شکل (۴): طریقه اندازه گیری مقادیر I_0 و I_1 مورد استفاده در محاسبه میزان کرنش صفحه پستی.

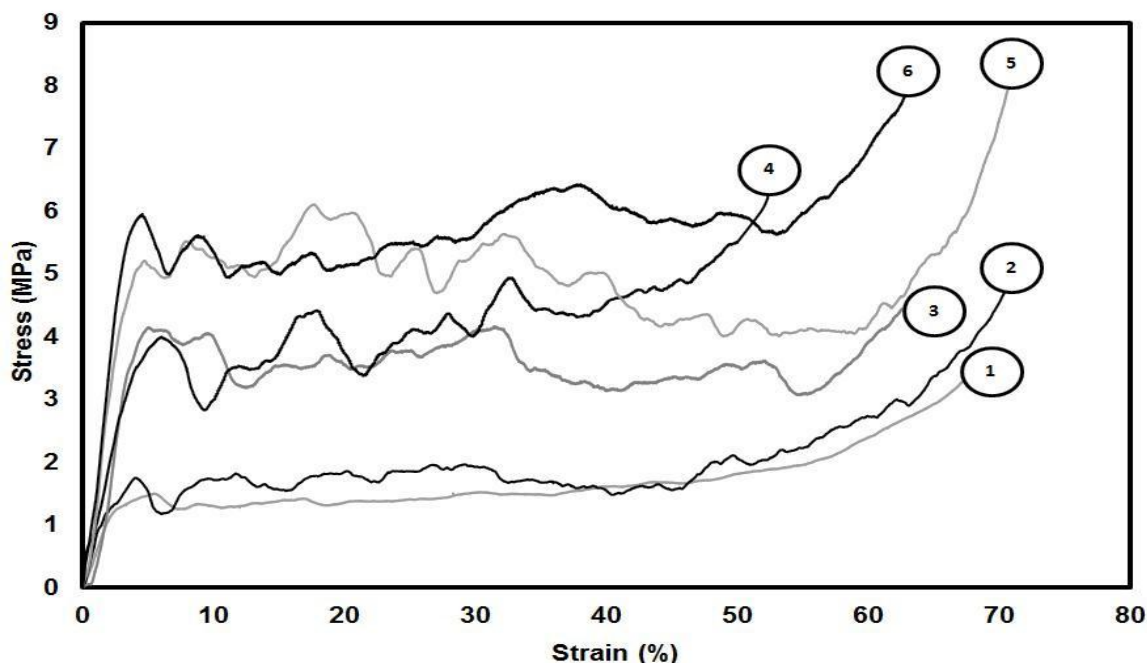
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری

شکل ۵ تصویر نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه فوم آلومینیوم شماره ۶ با چگالی ۰/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب را نشان می دهد که در آن توزیع یکنواخت اندازه سلول ها مشهود است. قابل ذکر است که در فرایند تولید و در حین تجزیه کرنات کلسیم، اکسیدهای آلومینیوم و منیزیم ایجاد می شوند که این اکسیدها در جداره داخلی سلول ها قرار گرفته و به پایداری سلول ها کمک می نمایند. علاوه بر این وجود اکسیدهای مذکور مانع از مهاجرت ذرات سرامیکی به این سطوح می شود.

سطح بالاتری قرار داشته و انتخاب مناسبی برای ادامه تحقیق و انجام آزمون های سقوط پرتابه محسوب می شود.

محصولات، مقدار تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی افزایش می یابد اما به طور کلی کاهش در کرنش تراکم ملاحظه می شود. با توجه به ظرفیت جذب انرژی محصولات، نمونه شماره ۶ با چگالی ۰/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب از لحاظ جذب انرژی در



شکل (۶): منحنی تنش-کرنش فشاری نمونه های فوم آلومینیومی تولیدی

۳-۳- آزمون سقوط پرتابه

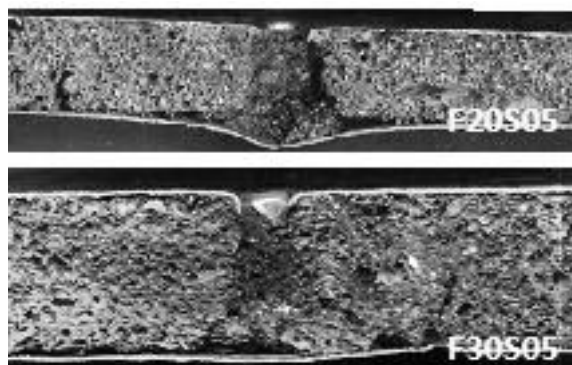
درصد کرنش ایجاد شده در صفحه پشتی (ϕ) قابل مشاهده است. نتایج حاصل از آزمون سقوط پرتابه بر روی پنل های ساندویچی در موارد زیر خلاصه می شود:

در جدول ۴ نتایج حاصل شده از آزمون سقوط پرتابه بر روی پنل های ساندویچی تولیدی با هسته فوم آلومینیوم از نوع شماره ۶ با چگالی ۰/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب به صورت عددی ارائه گردیده که در آن عمق نفوذ پرتابه، طول جدایش صفحه پشتی و

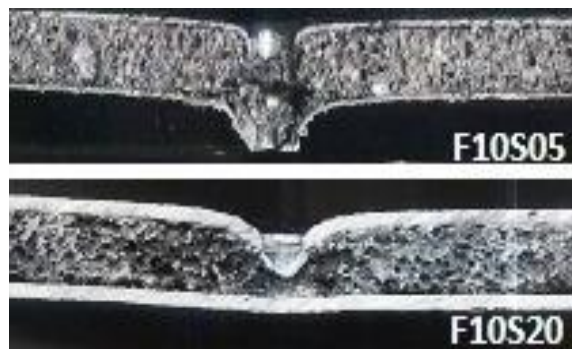
جدول (۳): خواص فشاری فوم های آلومینیومی تولید شده.

شماره محصول فوم آلومینیوم تولیدی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
چگالی (g/cm^3)	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۶۳
تنش مسطح (MPa)	۱/۴۱	۱/۸۵	۳/۷۴	۳/۹۲	۵/۲۶	۵/۴۳
کرنش تراکم (mm/mm)	۰/۵۱	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۴۷	۰/۶۹	۰/۶۰
ظرفیت جذب انرژی (kJ/mm^3)	۰/۷۱	۰/۸۳	۱/۷۲	۲/۰۰	۲/۴۵	۲/۷۳

پرتابه به میزان کمتری در نمونه فرو می رود. ملاحظه می شود کمترین عمق نفوذ پرتابه مربوط به نمونه F10S20 با چگالی سطحی ۱/۷۱ گرم بر سانتی متر مربع است که ترکیبی مناسب با وزن کم از ضخامت صفحات و هسته فومی را دارا است.



(الف)



(ب)

شکل (۷): (الف) تاثیر ضخامت هسته فومی و (ب) تاثیر ضخامت صفحات بر عمق نفوذ پرتابه و میزان کرنش صفحه پشتی.

۳-۳-۲- تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر طول جدایش صفحه پشتی

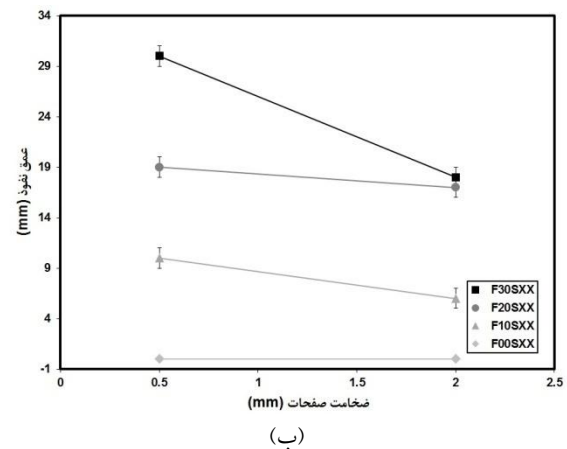
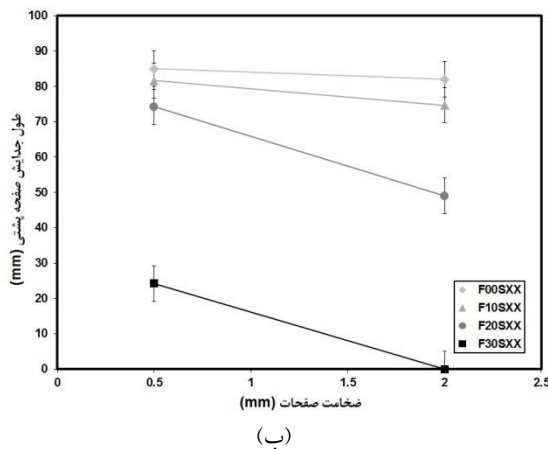
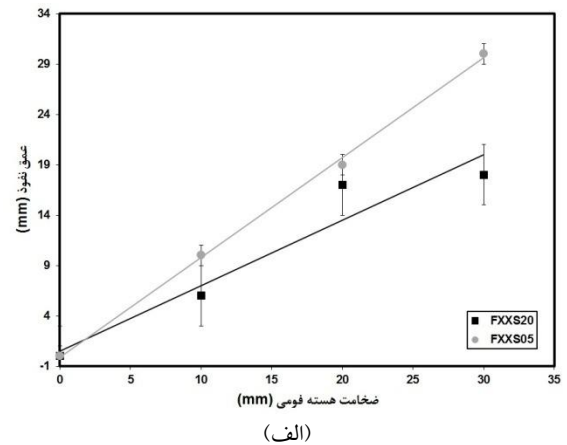
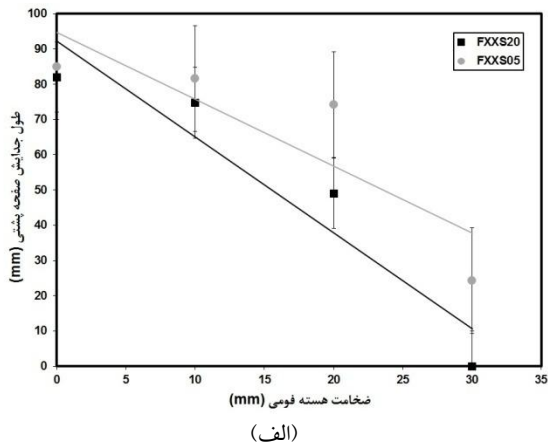
شکل ۹ نمودار تاثیر ضخامت هسته فومی و ضخامت صفحات را بر طول جدایش صفحه پشتی نشان می دهد. با توجه به شکل ۹-الف ملاحظه می شود که میزان جدایش صفحه پشتی با ضخامت هسته فومی رابطه عکس دارد یعنی هر چه ضخامت هسته فومی افزایش بیشتری پیدا کند طول جدایش صفحه پشتی کمتر خواهد بود که دلیل آن واضح بوده و به جذب انرژی بیشتر توسط هسته فومی با ضخامت بالاتر بر می گردد.

جدول (۴): نتایج به دست آمده از آزمون سقوط پرتابه.

کد نمونه	عمق نفوذ (mm)	طول جدایش صفحه پشتی (mm)	میزان کرنش صفحه پشتی (%)
F00S05	۰	۸۵	۶/۵
F10S05	۱۰	۸۱/۶	۵/۸
F20S05	۱۹	۷۴/۲	۱/۱
F30S05	۳۰	۲۴/۲	۰/۱۲
F00S20	۰	۸۲	۱/۸
F10S20	۶	۷۴/۷	۰/۳
F20S20	۱۷	۴۹	۰/۰۱۴
F30S20	۱۸	۰	۰/۰۱۵

۳-۳-۱- تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر عمق نفوذ پرتابه

با ملاحظه شکل ۷-الف که نشان دهنده وضعیت عمق نفوذ پرتابه بر حسب ضخامت هسته فومی می باشد، مشخص است که با افزایش ضخامت هسته فومی در نمونه های دارای صفحات با ضخامت ۰/۵ میلی متر، عمق نفوذ پرتابه در پنل های ساندویچی افزایش می یابد. با مقایسه مقطع برش خورده نمونه های F10S05 و F10S20 در شکل ۷-ب نیز می توان ملاحظه نمود که با افزایش ضخامت صفحات طبق انتظار عمق نفوذ کاهش پیدا می کند. همان گونه که از نمودارهای شکل ۸-الف مشخص است با افزایش ضخامت هسته فومی میزان نفوذ پرتابه به داخل نمونه بیشتر شده چرا که صفحه پشتیبان یا همان صفحه پشتی در فاصله دورتری قرار گرفته و عملکرد آن در ممانعت از نفوذ پرتابه و پشتیبانی از هسته فومی در عمق بیشتر انجام می پذیرد. از شکل ۸-ب نیز مشخص می شود که کمتر بودن عمق نفوذ پرتابه در نمونه های دارای صفحات ۲ میلی متر به دلیل اثرگذاری بیشتر صفحات به نسبت هسته فومی در جذب انرژی و تغییر شکل است. واضح است که در نمونه های دارای صفحات ضخیم تر، غالب انرژی پرتابه توسط صفحات جذب گردیده و



شکل (۹): (الف): تاثیر ضخامت هسته فومی و (ب): تاثیر ضخامت صفحات بر طول جدایش صفحه پشتی.

شکل (۸): (الف): تاثیر ضخامت هسته فومی و (ب): تاثیر ضخامت صفحات بر عمق نفوذ پرتابه.

۳-۳-۳- تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر میزان کرنش صفحه پشتی

با توجه به شکل ۱۰-الف ملاحظه می شود که میزان کرنش صفحه پشتی با افزایش ضخامت هسته فومی کاهش پیدا کرده است. با افزایش ضخامت هسته فومی به دلیل افزایش حجم ماده برای مهار تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه جذب انرژی بیشتر، پرتابه اثر بسیار اندکی در ایجاد کرنش بر روی صفحه پشتی خواهد داشت. این رفتار در شکل ۷-الف نیز مشهود است. مشاهده نمودارهای شکل ۱۰-ب و همچنین شکل ۷-ب نیز مشخص می نماید که افزایش ضخامت صفحات اثر عکس بر میزان کرنش صفحه پشتی دارد. با افزایش ضخامت صفحات و به تبع آن افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل و جذب بیشتر

همین عملکرد در افزایش ضخامت صفحات نیز مشهود است. همان گونه که از شکل ۹-ب مشخص است با افزایش ضخامت صفحات میزان جدایش صفحه پشتی کاهش یافته و جذب انرژی بیشتری صورت گرفته است. از مقایسه عملکرد و ظاهر کل نمونه ها از لحاظ میزان جدایش صفحه پشتی و به تبع آن مقدار جذب انرژی ملاحظه می شود که در نمونه F30S20 با چگالی سطحی ۲/۹۷ گرم بر سانتی متر مربع هیچ گونه تغییر شکل و جدایشی در صفحه پشتی قابل مشاهده نبوده و تغییر شکل به طور قابل ملاحظه ای تنها به صفحه بالایی محدود شده است.

با توجه به تحقیق انجام شده می توان نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:

۱- در این تحقیق فوم های آلومینیومی با ساختاری یکنواخت و توزیع اندازه مطلوب سلول ها تولید گردید.

۲- تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی با افزایش چگالی و محتوای کاربید سیلیسیوم محصولات افزایش و کرنش تراکم کاهش می یابد.

۳- در پنل های ساندویچی با افزایش ضخامت هسته فومی عمق نفوذ پرتابه افزایش می یابد. در نمونه های دارای صفحات ضخیم تر نیز غالب انرژی پرتابه توسط صفحات جذب و پرتابه به میزان کمتری در نمونه فرو می رود.

۴- با افزایش ضخامت هسته فومی و جذب انرژی بیشتر توسط آن، طول جدایش صفحه پشتی کمتر می گردد. با افزایش ضخامت صفحات نیز میزان جدایش صفحه پشتی کاهش یافته و جذب انرژی بیشتری صورت می گیرد.

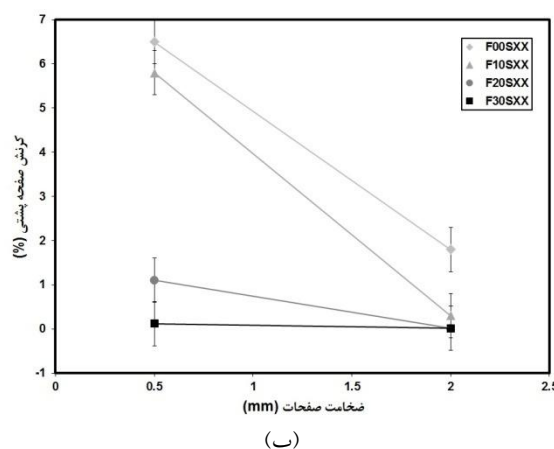
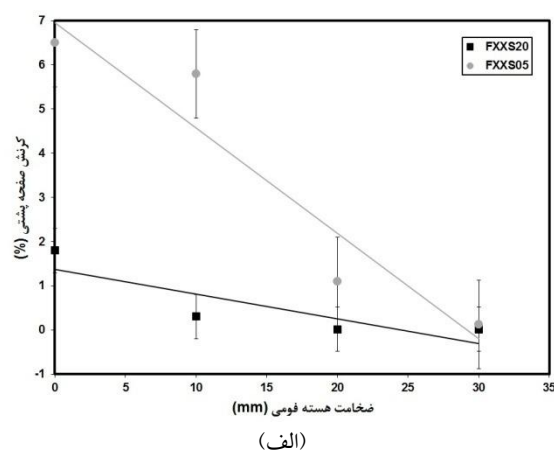
۵- با افزایش ضخامت هسته فومی به دلیل افزایش حجم ماده برای مهار تغییرشکل پلاستیک و در نتیجه جذب انرژی بیشتر، پرتابه اثر بسیار اندکی در ایجاد کرنش بر روی صفحه پشتی خواهد داشت و در نتیجه میزان کرنش صفحه پشتی کاهش می یابد.

۶- با افزایش ضخامت صفحات و به تبع آن افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل و جذب بیشتر انرژی حاصل از برخورد پرتابه، اثر پرتابه در ایجاد کرنش در صفحه پشتی کاهش خواهد یافت و لذا ایجاد تغییرشکل و کرنش در صفحه پشتی دشوارتر می گردد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اعضای محترم گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد به خاطر همکاری در تولید نمونه های پنل ساندویچی و اجرای آزمون سقوط پرتابه و کارشناس محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد سرکار خانم

انرژی حاصل از برخورد پرتابه، اثر پرتابه در ایجاد کرنش در صفحه پشتی کاهش چشمگیری خواهد داشت و لذا ایجاد تغییرشکل و کرنش در صفحه پشتی دشوارتر می گردد. مقایسه عملکرد نمونه ها از لحاظ میزان کرنش صفحه پشتی و به تبع آن مقدار انرژی جذب شده مشخص می نماید که در نمونه های F20S20 و F30S20 به ترتیب با چگالی سطحی ۲/۳۴ و ۲/۹۷ گرم بر سانتی متر مربع، کرنش و تغییرشکل قابل ملاحظه ای در صفحه پشتی مشهود نبوده و عملکرد بهتری از لحاظ جذب انرژی در این دو نمونه وجود دارد.



شکل (۱۰): (الف): تاثیر ضخامت هسته فومی و (ب): تاثیر ضخامت صفحات بر میزان کرنش صفحه پشتی.

۴- نتیجه گیری

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[۱۱] م. گلستانی پور، م. توکلی، س.م. زبرجد، ا. باباخانی و ب. نادری،

بررسی جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم

تحت آزمون سوراخ‌کاری، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲، ص

۲۵-۳۸، زمستان ۱۳۹۱.

[12] V. Gergely, D.C. Curran & T.W. Clyne, "The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2301-2310, 2003.

[13] 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.

[14] H.JIS 7902 Standard, "Method for compressive test of porous metals", 2008.

[15] DIN 50134 Standard, "Testing of metallic materials-Compression test of metallic cellular materials", 2008.

مهندس هوشیارصادقیان به جهت انجام مطالعات میکروسکوپی الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می نمایند.

۶- منابع

[1] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metallic foams", *Progress in Material Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.

[2] 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.

[3] H.P. Degischer, B. Kriszt, "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.

[4] 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.

[5] J. Banhart, H.W. Seeliger, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, pp. 793-802, 2008.

[6] N. Babcsan, "Ceramic Particles Stabilized Aluminum Foams", Ph.D. Thesis, Materials Science and Technology Ph.D. School Kerpely Antal, University of Miskolc, 2003.

I. Akseli, "The application of aluminium foam for the heat and noise reduction in automobiles", MSc. Thesis, School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, 2005.

[۷] ا. زنده باد، ح. دانش منش، بررسی رفتار فشاری فوم های

آلومینیومی تولید شده با استفاده از فرایند اتصال نوردی تجمعی

(ARB)، مجله مواد نوین، جلد ۱، شماره ۴، ص ۱-۱۲، تابستان

۱۳۹۰.