

بررسی رفتار تغییر شکل فشاری تک محوره و خمش سه نقطه ای ساندویچ پنل آلومینیمی با هسته فوم سلول بسته A356

سواک مکر تپچیانس^۱ و سید محمد حسین میرباقری^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷، ش.ص: ۱۴۴-۱۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳)

چکیده

امروزه فوم‌های فلزی سلول بسته به عنوان یک ماده پیشرفته در حال توسعه هستند. در پژوهش حاضر از فوم سلول بسته آلیاژ آلومینیم A356 به عنوان هسته ساندویچ پنل با ورق‌های آلومینیم، استفاده شده است. سپس رفتار تغییر شکل پلاستیک فشاری تک محوره و همچنین خمش ۳ نقطه، تختال فومی و ساندویچ پنل فومی به روش ریخته‌گری بررسی شدند. بر اساس منحنی‌های نیرو-جابجایی بدست آمده از هر دو آزمون، انرژی جذب تغییر شکل فشاری و خمشی اندازه‌گیری شده و با بررسی استریوگراف و متالوگرافی دیواره‌های سلولی فوم‌ها، مکانیزم تغییر شکل تعیین شد. ساختار فوم؛ طی آزمون فشار؛ برای ساندویچ پنل‌ها و تختال‌های فومی، رفتار یکسان خرد شدن دیواره سلولی را نشان دادند؛ اما ساندویچ پنل‌ها طی خمش، دو رفتار متفاوت بسته به ساختار هسته فومی از خود نشان دادند. یک از رفتارها لولای پلاستیک و خم شدن یو شکل آن‌ها حول میله افقی اعمال فشار در آزمون خمش و دیگری پاره شدن ورق پایینی ساندویچ پنل بود. از این‌رو انرژی ساندویچ پنل‌ها و تختال‌ها در کرنش تخریب سازه‌ها، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد، استحکام فشاری ساندویچ پنل فومی تقریباً برابر تختال فومی است. همچنین تنش خمشی ساندویچ پنل ۳/۵ برابر بیش‌تر از تختال آن است. منتهی انرژی جذب ویژه طی تغییر شکل پلاستیک محوری تا کرنش ۳۸/۷ درصد، در تختال بیش‌تر از تمام ساندویچ پنل‌ها است، اما مقادیر انرژی جذب ویژه طی آزمون خمش باتوجه به مد تخریب ساختار پنل‌ها نشان داد، انرژی جذب ویژه ساندویچ پنل‌ها با تخریب از نوع لولای پلاستیک، از همه بیش‌تر است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، بسته به نوع تخریب ساختار سلولی هسته فومی، میزان جذب انرژی متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: فوم آلومینیم A356 ریخته‌گری، ساندویچ پنل فومی، آزمون فشار تک محوره، آزمون خمش سه نقطه، رفتار تغییر شکل، انرژی جذب.

^۱-کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

^۲-دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

*- نویسنده مسئول مقاله: smhmirbagherii@aut.ac.ir

پیشگفتار

فوم‌های فلزی در دسته‌بندی مواد مهندسی، جزو گروه مواد پیشرفته یا نوین، قرار گرفته‌اند. این مواد پیشرفته به دو گروه سلول باز و بسته تقسیم می‌شود [۱-۲]. فوم‌های فلزی سلول بسته، از توزیع حباب در زمینه مذاب و سپس سریع منجمد نمودن مذاب و تبدیل آن به جامد تشکیل می‌شوند (توزیع حباب در فاز جامد). این فوم‌ها بیش‌تر به دو روش متالورژی پودر و ذوبی تهیه می‌شوند [۲]. چگالی این فوم‌ها آنقدر پایین است که روی آب شناور می‌شوند. لذا به علت داشتن خواص مکانیکی و فیزیکی بالا، نسبت به دانسیته خود، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. ساندویچ پنل‌های با هسته فوم آلومینیومی، از دو صفحه فلزی و هسته فوم آلومینیوم ساخته شده‌اند. آن‌ها به دلیل داشتن خواصی مانند: وزن کم، استحکام خمشی و جذب انرژی ضربه‌ای زیاد نسبت به دانسیته نمونه چگال خودشان، امروزه در بسیاری از صنایع پیشرفته از جمله صنایع ساختمانی، خودروسازی، هوایی، حمل و نقل ریلی، پل سازی و نظامی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۳]. ساندویچ پنل‌های فومی، با چسباندن ورقه‌های نازک فلزی یا پلیمری، بر سطح رویی و زیری یک تختال ساده فوم فلزی به عنوان هسته، ساخته می‌شوند، برخلاف نمونه ورق چگال مصرفی و حتی فوم خالص (بدون صفحه رویی و زیری) دارای استحکام خمشی بیشتری هستند. همچنین منحنی‌های آزمون فشار آن‌ها، دارای ناحیه تنش پایای بزرگتری نسبت به نمونه‌های غیر فومی (چگال) است. این ناحیه پایا تا مرحله چگال شدن فوم پیش می‌رود. بنابراین هرچه این ناحیه بزرگ‌تر باشد، مقدار انرژی جذب پنل نیز در مدت زمان اعمال فشار بیش‌تر خواهد شد. این امر، زمینه ساز استفاده از مواد فومی در سپرهای وسایل نقلیه شده است تا از وارد شدن خسارت‌های زیاد به سرنشینان خودرو جلوگیری شود [۴].

استحکام ساندویچ پنل‌های فومی، وابسته به ضخامت هسته فومی، ضخامت صفحه رویی، استحکام ماده چسبنده و نوع آلیاژ بکار رفته در ساخت هسته فومی است. بنابراین در هنگام خمش پنل‌ها با چقرمگی کم، در اثر کنده و خم شدن لایه رویی و یا ایجاد ترک برشی در

هسته فوم و یا فرورفتگی، دچار تسلیم و شکست می‌شوند [۶-۷].

در هنگام خمش هسته فوم آلومینیومی مچاله و چگال‌تر شده. نیروی خمشی با افزایش مقدار جابجایی، افزایش می‌یابد. مشخص شده است، تغییرات ضخامت ساندویچ پنل، تحمل تنش ناشی از نیروی خمشی را افزایش داده؛ ولی مقدار انحراف آن تناسب کمی با ضخامت هسته فومی دارد. این پدیده به خاصیت جذب نیروی خمشی فوم آلومینیومی باز می‌گردد که باعث به تاخیر افتادن تسلیم و پدیده کارسختی می‌شود [۸-۱۰].

عموما پدیده لایه‌ای شدن (ایجاد ترک‌های طولی) در ساندویچ پنل با ضخامت کم، مطرح است. برای نمونه‌های ضخیم‌تر، نیروی خمشی در هسته فوم پخش شده، این نیرو باید از شبکه متخلخل فوم به صفحه پایینی منتقل شود. بنابراین تفاوت نسبتا زیادی بین نیروی (ورق) بالایی و پایینی ساندویچ پنل وجود دارد. در هنگام خمش، نیروی نقطه‌ای در وسط سطح بالایی ساندویچ پنل وجود دارد؛ ولی در سطح پایینی آن دو نیروی نقطه‌ای به وجود می‌آید (شکل ۱-الف). زمانی که هسته فومی استحکام لازم را داشته باشد و بتواند تغییر شکل را تحمل کند، می‌تواند نیروی خمشی را انتقال دهد و ساندویچ پنل به صورت یکپارچه شروع به خم شدن از هر دو طرف می‌کند. در این حالت، ورق‌های تقویتی بالا و پایین ساندویچ پنل از هسته فومی جدا نمی‌شوند؛ اما هنگامی که خمش با نیروی زیادی اعمال شود، تنش کششی در فصل مشترک چسب کاری شده بین ورق فلزی و هسته فومی به وجود آمده که باعث جدا شدن لایه بالایی (ورق رویی ساندویچ پنل) می‌شود و ورق زیری همچنان به هسته فومی پانل می‌چسبد. بنابراین تسلیم بیش‌تر از طریق شکست یا له شدن هسته فوم آلومینیومی، تحت تنش کششی و برشی صورت گرفته است. در صورتی که فوم فلزی دارای حباب‌های یکنواخت نباشد، هرگونه عیب ساختاری در چیدمان یا توزیع حباب‌ها از جمله پارگی، تغییر فاحش در اندازه قطر متوسط حباب‌ها و وجود آخال‌ها در دیواره سلولی می‌توانند به عنوان مراکز تمرکز تنش و اشعاع ترک تلقی شوند. لذا مورفولوژی حباب‌ها طی فرایند انجماد فوم

محوره و بارگذاری خمش سه نقطه بررسی شدند تا استحکام و جذب انرژی این ساندویچ پنل A356 و تختال ساده آن در بارگذاری‌های مختلف بر حسب کاربردشان بدست آید، به گونه‌ای که بتواند به عنوان رقیبی با خواص مکانیکی بالاتر در کنار فوم آلومینیم خالص محسوب شود.

مواد و روش‌ها

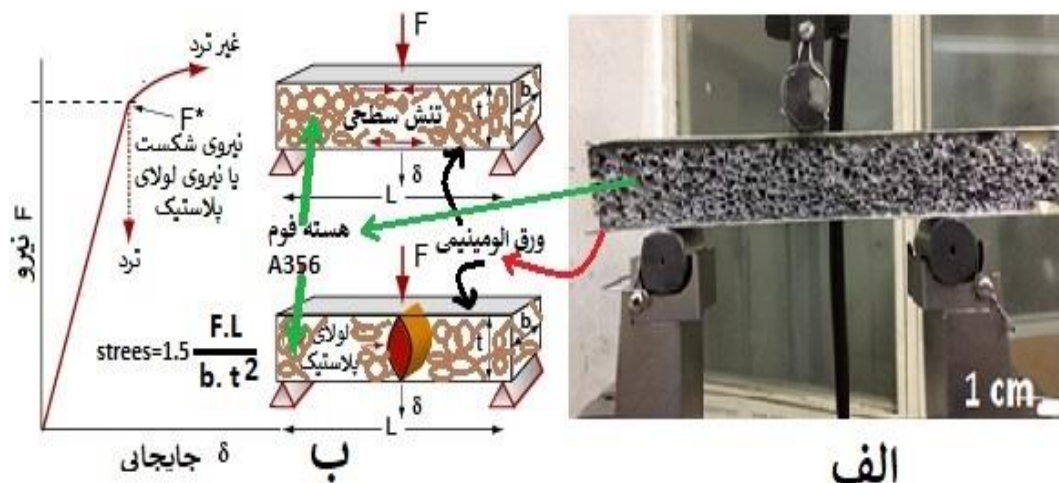
در پژوهش حاضر، از شمش A356 تجارتي به کمک عامل حباب زای TiH₂ برشته (عملیات حرارتی) شده، با اندازه مش زیر ۴۵ میکرون و خلوص ۹۸٪ وزنی برای تولید فوم A356 به روش ریخته‌گری استفاده شد. ترکیب شیمیایی مواد مصرفی طی ریخته‌گری فوم A356 و ساخت ساندویچ پنل فومی A356 در جدول ۱ ارایه شده است.

فلزی در رفتار تغییر شکل پلاستیک فوم‌ها، بسیار حایز اهمیت است [۷،۹].

بررسی نتایج محققین شان می‌دهد، رفتار ساندویچ پنل با هسته آلیاژ A356 به علت تکنولوژی پیچیده تولید فوم این آلیاژ، زیاد مطرح نشده و بیش‌تر تحقیقات در زمینه هسته‌های فوم آلومینیم خالص متمرکز شده است. بنابراین جا دارد به این موضوع پرداخته شود و رفتار تغییر شکل ساندویچ پنل A356 در کنار فوم آلومینیم خالص نیز بررسی شود. از آنجایی که استحکام فوم آلومینیم عموماً کم‌تر از فوم‌های آلیاژی خصوصاً آلیاژ A356 است. همچنین تهیه فوم آلومینیم خالص راحت‌تر از نوع آلیاژی آن است. در پژوهش پیش رو ابتدا، فوم A356 به روش ذوبی و ریخته‌گری با مواد حباب‌زا تهیه شد. سپس با برش آن‌ها، تختال فوم A356 و ساندویچ پنل آن به کمک ورق‌های آلومینیم تهیه شد. در مرحله بعد، رفتار هر دو محصول تحت بارگذاری فشاری تک

جدول ۱- آنالیز فلزات مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

ترکیب	Cu	Ca	Mg	Si	Ti	Mn	Zn	Fe
A356	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۳۰	۶/۵۰	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۰
Pure Al	-	۰/۵۰	-	۰/۰۸	۰/۰۵	-	-	۰/۰۷
Ca-Al	-	۷۰	-	۰/۵۰	-	-	-	۰/۱۰



شکل ۱- نمایی از آزمون خمش سه نقطه با فاصله فک ۱۵ سانتیمتر و سرعت حرکت فک متحرک ۰/۰۳ میلیمتر بر ثانیه الف: نمای دستگاه. ب: آنالیز نمودار نیرو-جابجایی و نوع انعطاف پذیری طی اعمال نیرو

فومی (به عنوان هسته) ساندویچ پنل با هسته فومی تهیه می‌شود. چسب بکار رفته در پژوهش حاضر، چسب پایه رزین با نام تجاری Araldite است. پس از خودگیری چسب، تختال و ساندویچ پنل‌های مورد نظر تمیزکاری و آماده آزمون شدند. جدول ۲ ابعاد نهایی آن‌ها را به تفکیک تختال و ورق‌های آلومینیومی نشان می‌دهد. این ابعاد به نحوی طراحی شده که اثر حداقل تعداد حفره در کوچک‌ترین بعد نمونه را با ضریب بیش از ۵ برابر پوشش دهد (حداقل ۲۰۰۰ سلول یا حباب در سطح نمونه استاندارد خمش).

در جدول ۲ کد گذاری نمونه‌ها بر اساس نوع محصول یعنی: تختال فومی (F) یا ساندویچ پنل فومی (SF) نوع آزمون (B: خمش و P: فشار) ارائه شده است. همچنین عدد انتهایی کد نامگذاری تعداد حباب در واحد اینچ مربع را بیان می‌کند. در جدول ۲ جلوی کد هر نمونه، مشخصات ابعادی و فیزیکی نمونه‌ها ارائه شده است.

برای تهیه فوم ابتدا مذاب آلیاژ آلومینیوم A356 به دمای ۶۹۰ رسانده می‌شود. سپس با ورود یک پروانه همزن فولادی با چهار تیغه عمود بر هم (با قطر ۰/۶۰ قطر بوته ذوب)، مذاب با دور ۸۰۰ rpm همزده شد. طی هم زدن آمیزان کلسیم-آلومینیوم ۷۰ درصد وزنی به صورت تکه‌های خرد شده، با ابعاد تقریبی ۴-۶ میلی‌متر به مذاب افزوده می‌شود. همزدن به مدت ۱۰ دقیقه ادامه یافته، سپس ۱ درصد وزنی پودر TiH₂ به آن اضافه و دور همزن به ۱۴۰۰ rpm می‌رسد. همزدن به مدت ۵۰ ثانیه انجام و مذاب، سریع در قالب از پیش گرم شده به دما ۶۵۰ سلسیوس ریخته‌گری شده و قالب در کوره پف کننده المنتی به دمای ۶۵۰ سلسیوس به مدت ۸ دقیقه نگه داشته می‌شود تا سطح مذاب در قالب پف کرده و بالا بیاید. در این مرحله قالب فلزی سریع وارد محفظه خنک کن شده و با دمش هوا خنک می‌شود. با خروج فوم آلومینیوم آلیاژی A356 جامد شده از قالب نمونه‌های به صورت تختال مکعب مستطیل بریده و با چسباندن صفحات نازک آلومینیوم خالص سری ۱۱۰۰ به تختال

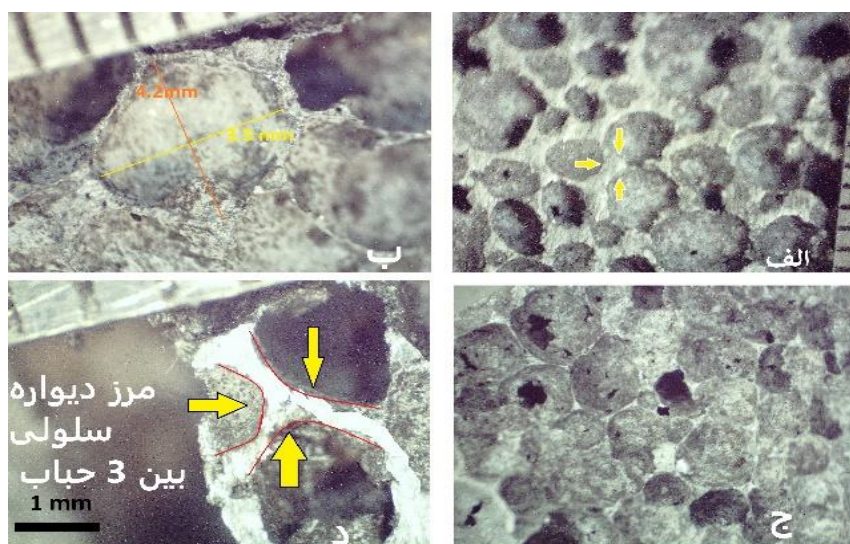
جدول ۲- خصوصیات نمونه های فومی تهیه شده برای آزمون های خمش ۳ نقطه و فشار تک محوره							
کد نمونه	چگالی (g.cm-3)	وزن (g)	حجم نمونه (cm3)	ضخامت (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	تعداد حفرات (in ²)
آزمون خمش ۳ نقطه طبق استاندارد ASTM D7250							
A356-SFB-85	۰/۸۴۸	۳۱۸	۳۷۵	۳/۵	۵	۲۵	۸۵
A356-SFB-90	۰/۹۳۳	۳۵۰	۳۷۵	۳/۵	۵	۲۵	۹۰
A356-FB-87	۰/۸۳۲	۳۱۲	۳۷۵	۳/۵	۵	۲۵	۸۷
آزمون فشار تک محوره طبق استاندارد DIN50134							
A356-SFP-85	۰/۶۵۱	۵۷	۸۷/۵	۳/۵	۵	۵	۸۵
A356-SFP-90	۰/۷۳۱	۶۴	۸۷/۵	۳/۵	۵	۵	۹۰
A356-FP-87	۰/۶۷۵	۵۹	۸۷/۵	۳/۵	۵	۵	۸۷
فاصله دو تکیه گاه آزمون خمش، طبق استاندارد ISO178 برابر ۱۰ سانتیمتر و طول نمونه ها ۲۵ سانتیمتر طراحی شد							

(حباب‌های برش خورده)، ایفامد را کنده و عملاً نمند را از بین می‌برند. برای رفع این مشکل، نیاز به سرعت پایین و نیروی کم طی فرایند پولیش است که منجر به زمان بسیار طولانی (حدود ۴ ساعت برای هر نمونه) می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌ها پس از نمند زنی و پولیش نهایی در محلول ۰/۵٪ HF قرار داده شدند. برای مشاهده تصاویر، از میکروسکوپ نوری با قابلیت بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و مجهز به دوربین عکس‌برداری دیجیتال، استفاده شد.

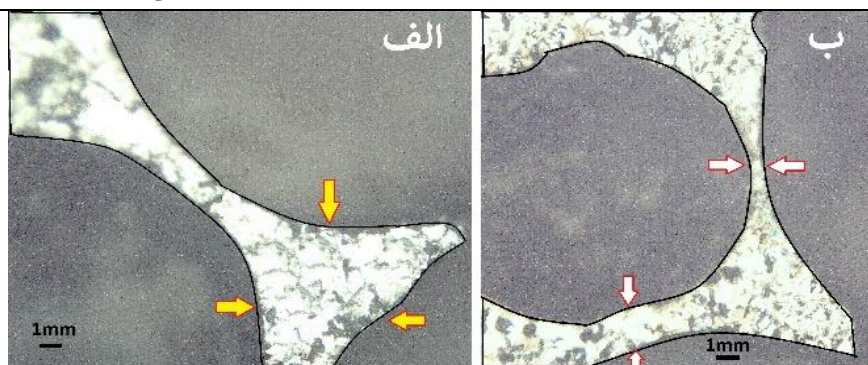
نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر استریوگراف حباب فوم‌ها را نشان می‌دهد. تصاویر (الف) و (ج) نمای ظاهری ساختار متخلخل فوم و منطقه سه گانه آن‌ها را نشان می‌دهد؛ اما تصاویر (ب) و (د) از شکل ۲، اندازه حباب‌ها، مرزهای دوتایی و سه‌گانه بین دو یا سه حباب را نشان می‌دهند. این مرزهای دوتایی (دیواره نازک بین دو حباب) و سه‌تایی (ناحیه‌های تقریباً مثلثی در برش ۲ بعدی بین سه حباب)، نقش اصلی تحمل تنش طی تغییر شکل پلاستیک را به عهده دارند. شکل ۳ بزرگنمایی استریوگراف ۸۰ برابری دیواره سلولی و منطقه مثلثی سه‌تایی را نشان می‌دهد.

ابعاد نمونه‌های تهیه شده برای آزمون فشار تک محوره طبق استاندارد DIN50134 و آزمون خمش سه نقطه طبق استاندارد ASTM D7250 طراحی و برشکاری شده‌اند. در آزمون فشار بوسیله دستگاه Instron 8502 ۳۰ تن، نمونه‌ها بصورت محوری با سرعت حرکت فک ۰/۰۳ میلیمتر بر ثانیه تحت فشار قرار گرفتند و منحنی نیرو جابجایی آن‌ها رسم شد. آزمون خمش سه نقطه مطابق شکل ۱ به کمک همین دستگاه و با سرعت ۰/۰۳ میلیمتر بر ثانیه روی ساندویچ پنل فومی صورت گرفت. در آزمون خمش، فاصله فک‌های ثابت از یکدیگر ۱۵۰ میلیمتر، تنظیم شد و اعمال نیرو توسط ماندربل فک متحرک، در وسط این فاصله انجام گرفت. ماکروگرافی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM A561 با بزرگنمایی ۳ الی ۸۰ برابر صورت گرفت و کیفیت ساختاری، اندازه و شکل دیواره سلولی حباب‌های فوم، پس از ماکرو اچ بررسی شد. همچنین متالوگرافی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E3 پس از سنباده زنی با سنباده ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ صورت گرفت. از محلول پولیش آلومینا و دستگاه پولیش نمندی برای صافی سطح نمونه‌های فومی استفاده شد. لازم به ذکر است که پولیش فوم فلزی به علت حفره‌های زیاد که در برش لبه‌های آن‌ها بسیار برنده می‌شوند، کار بسیار سختی است؛ زیرا لبه‌های تیز آن‌ها



شکل ۲- تصاویر استریوگراف حباب‌های فوم A356 ریخته‌گری. (الف) ساختار ظاهری، (ب) اندازه بزرگترین حفره‌ها، (ج) ساختار عمود بر جهت تصویر (الف، د) مرز سه‌گانه در محل برخورد حباب‌ها که تنش را تحمل می‌کند



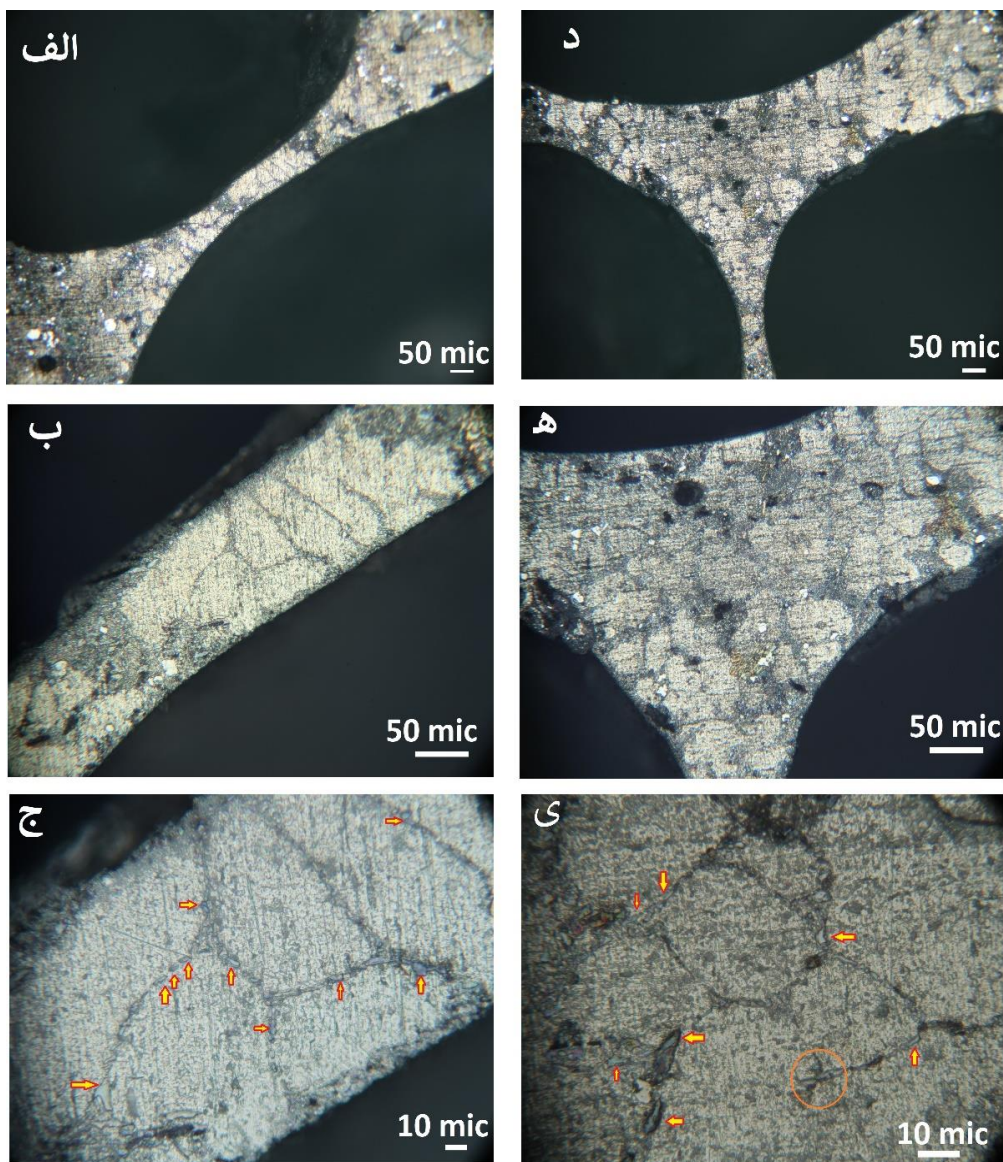
شکل ۳- تصاویر استریوگراف حباب های فوم A356 بعد از پولیش نهایی و آنالیز تصاویر:
الف) منطقه صلب سگانه مثلثی. ب) دیوارهای بین دو سلول یا مرز دو تایی

پاره شده و ترک در ضخامت نمونه رشد کرده است؛ اما تصاویر ستون سمت چپ شکل ۶ نشان می‌دهد که نمونه ساندویچ پنل فومی A356-SFB-85 از ورق زیری اصلا پاره نشده و گویا تمایل به خم شدن حول ماندلر بالایی آزمون خمش دارد. در ادامه، فوم قرار گرفته بین دو ورق در منطقه خم شده شروع به ترک و خرد شدن نموده و ترک به علت وجود تنش برشی، موازی صفحه پایینی ساندویچ پنل فومی رشد کرده است. این مطلب با خط-های زرد رنگ روی تصاویر ردیف بالای شکل ۶ که از ردیابی رشد ترک بدست آمده، بطور شماتیک نشان داده شده است.

شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های ساندویچ پنل‌های شکل ۶ را نشان می‌دهد. نمونه ساندویچ پنل A356-SFB-90 پس گذر از ناحیه الاستیک، وارد ناحیه پلاستیک شده و شروع به کارسختی می‌نمایند و به محض پاره شدن ورق پایینی افت ناگهانی تحمل نیرو دیده می‌شود؛ اما نمونه پنل A356-SFB-85 با وارد شدن به منطقه پلاستیک، کارسختی کمتری را نشان می‌دهد؛ زیرا به نظر می‌رسد، حباب‌های فوم در سطح پایینی ساندویچ پنل (در مجاورت با ورق آلومینیومی)، استحکام کمتری در تحمل تنش داشته و مسیر رشد ترک ایجاد شده در ضخامت هسته فومی را به سمت ورق پایینی هدایت نموده است در این صورت رشد ترک، جلوی نرخ کارسختی را گرفته و در منحنی نمونه مذکور یک نوسان سینوسی با دامنه بسیار کوتاه ایجاد می‌شود؛ اما به محض اینکه ورق بالایی ناگهان دوچار لولای پلاستیک شود، یک افت شدید در کارسختی دیده می‌شود.

شکل ۴ تصاویر متالوگرافی فوم A356 را بعد از پولیش نهایی و اچ در محلول HF در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. در ستون سمت چپ شکل ۴، تصاویر مربوط به دیواره بین ۲ حباب را نشان می‌دهد که ذرات Si در مرز دانه‌ها رسوب نموده است؛ اما تصاویر ستون سمت راست، مربوط به مناطق مثلثی یا سفت (Stiff)، بین ۳ حباب هستند.

در این مناطق مثلثی به علت باریک شدن دیواره‌های بین دو حباب در اثر پدیده مارگونی و کشش سطحی، جریان مذاب در لحظات پایان انجماد به طرف این مناطق مثلثی کشیده خواهد شد. لذا ذرات تیغه‌ای یا سوزنی شکل Si شناور در مذاب آلیاژ A356 به این مناطق سرازیر شده و توزیع Si در آنجا بیش‌تر از سایر مناطق (خصوصا دیواره‌های نازک بین دو حباب) خواهد بود. در شکل ۵ آنالیز عنصری ذراتی که با پیکان در شکل ۴ مشخص شده، ارایه شده است. این ذرات، همان‌گونه که پیش بینی می‌شد، Si آزاد از آلیاژ A356 هستند (مطابق جدول ۱، آلیاژ آلومینیوم A356، حدود ۶/۵ درصد وزنی Si دارد). نتایج نشان می‌دهد، عموماً ترک، طی تغییر شکل پلاستیک از این نواحی به علت تمرکز تنش بالا در مرز بین تیغه‌های Si و زمینه فلزی شروع و ادامه می‌یابد. لذا فوم آلومینیوم A356 به همراه توزیعی از حباب‌ها با دیواره فلزی، ذاتاً مستعد به ترک است و تافنس شکست آن بسیار پایین خواهد بود [۸-۹]. شکل ۶ مراحل تغییر شکل نمونه‌های ساندویچ پنل فومی A356-SFB-85 و A456-SFB-90 را در آزمون خمش نشان می‌دهد. در تصاویر ستون راست شکل ۶ مشاهده می‌شود که نمونه A356-SFB-90 طی خم شدن از ورق آلومینیومی زیر آن،



شکل ۴- تصاویر متالوگرافی فوم A356 بعد از پولیش نهایی و اچ در محلول HF: تصاویر (الف) الی (ج) مربوط به مرز بین دو حباب. تصاویر (هـ) الی (ی) مربوط به منطقه سه گانه مثلثی (بین سه حباب). پیکان‌ها ذرات Si را نشان می‌دهند.

ماهیت این پدیده بسیار شبیه به پدیده کماتش پلاستیک در لوله‌های جداره نازک است [۱۱-۱۲]. مقایسه دو مکانیزم متفاوت: ۱- رشد ترک و شکست، ۲- لولای پلاستیک و شکست. در ساندویچ پنل‌های فومی A356-SFB-85 و A456-SFB-90 در شکل ۱-ب نیز به طور شماتیک نشان داده شده است.

با توجه به معادله ۱، تبدیل نیرو خمشی (F) به تنش خمشی (σ_{MOR}) که معروف به استحکام انعطاف پذیری است، به راحتی انجام پذیر است. همچنین

در ادامه با خم شدن مجموعه دو ورق پنل و هسته فومی به دور ماندلر آزمون خمش، نرخ کارسختی به علت خرد شدن دیواره‌های نازک حباب‌ها در مرزهای دوتایی (به- خصوص نزدیک ناحیه مثلثی سه تایی) در هسته فومی تقریباً بصورت یکنواخت با شیب بسیار کم پیش می‌رود و تقریباً کارسختی پس از ایجاد لولای پلاستیک در نمونه A356-SFB-90 دیده نمی‌شود. از این رو وجود پارگی در ورق زیری ساندویچ پنل یا ایجاد لولای پلاستیک ناگهانی در ورق رویی ساندویچ پنل (بجز عامل غیرهمگنی ساختار سلولی هسته فومی)، یک پدیده کاملاً راندم است.

تنش-کرنش (۹-ب)، مربوط به تختال فومی ساده A356-FB-87، را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۹-ج تصاویری از رشد ترک از دیواره پایینی تختال فومی و رشد آن در ضخامت تختال به طرف زیر ماندردل دستگاه خمش را نشان می‌دهد. پرش‌های ریز دندان‌های که روی نمودار تنش-کرنش ظاهر شده نشان می‌دهد که این تختال، رفتاری ترد (منظور غیر چقرمه) از خود نشان می‌دهد. تنش تسلیم افست این تختال فومی تقریباً برابر ۵ MPa است که در مقابل ساندویچ پنل آن (در هر دو حالت شکست ترد و لولای پلاستیک)، حدود ۶ برابر کم‌تر است. افزایش ۶ برابر استحکام تسلیم ساندویچ پنل‌ها، مدیون ممان اینرسی مقطع مستطیلی فوم A356 است که به ممان مقطع نازک دو ورق آلومینیومی افزوده شده است.

در ادامه رفتار فشاری تک محوره ساندویچ پنل‌های آلومینیومی با هسته A356 ارایه می‌شود. برای این منظور، دو نمونه به ابعاد ۵۰*۵۰*۳۵ میلی‌متر (جدول ۲) تهیه و تحت فشار تک محوره قرار گرفتند. شکل ۱۰ نمایی از این تغییرشکل تک محوره نمونه‌ها را قبل و بعد از فشار نشان می‌دهد. از آنجا که رفتار تغییرشکل تک محوره ساندویچ پنل‌های آلومینیومی با هسته A356 و خود تختال فومی، تفاوت چندانی (برعکس رفتار خمشی آن‌ها که بین تختال و ساندویچ پنل آن‌ها ۶ برابر است) با هم ندارند.

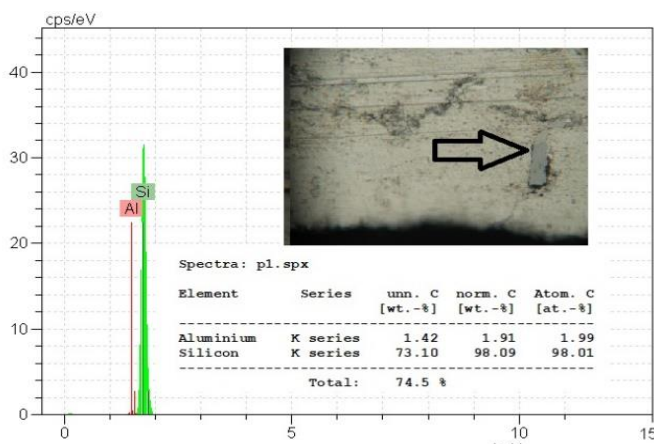
جابجایی عمود بر راستای طولی ساندویچ پنل (d) معروف به شکم‌دادگی، به کمک معادله ۲ قابل تبدیل به کرنش ناشی از خمش (ϵ) است. لذا با رسم هر دو پارامتر F و σ_{MOR} بر حسب کرنش، می‌توان با تکنیک اندازه-گیری سطح زیر منحنی، مقدار انرژی جذب طی تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل‌ها و تختال‌های آن‌ها را به دست آورد [۱۲].

$$\sigma_{MOR} = 1.5 \frac{F.L}{b.t^2} \quad (1)$$

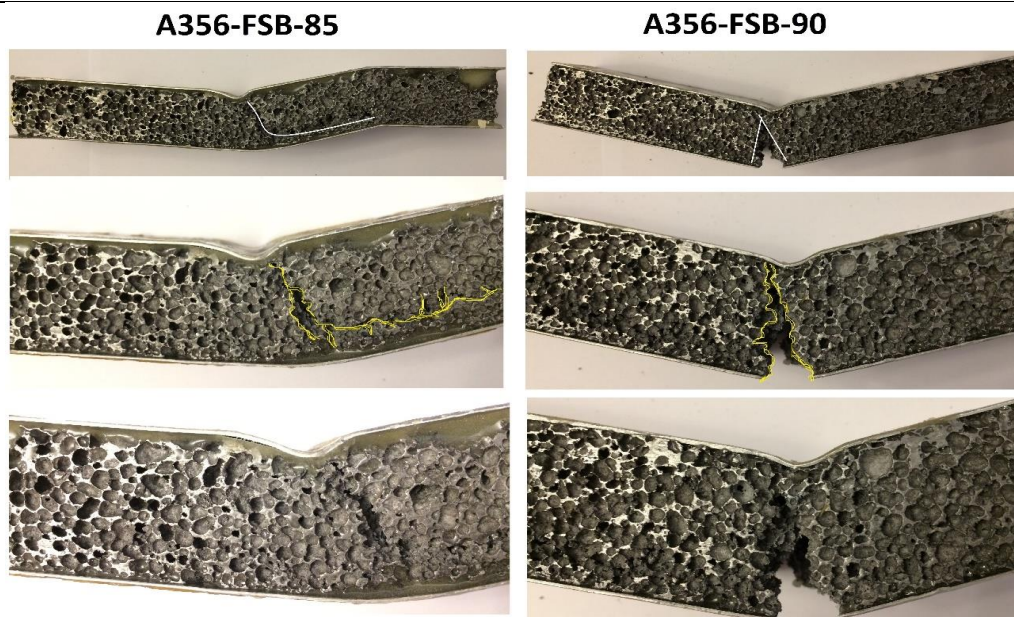
$$\epsilon = \frac{6.d.t}{L^2} \quad (2)$$

متغیرهای معادله ۱ و چگونگی رفتار نیرو-جابجایی به تنش-کرنش، در شکل ۱-ب ارایه شده است. شکل ۸ رفتار تنش-کرنش ساندویچ پنل‌های فوم A356 را به کمک معادلات ۱ و ۲ نشان می‌دهد. با دقت در این نمودار دیده می‌شود، مقدار تنش تسلیم بر اساس کرنش ۰/۰۲ افست در نمونه‌های ساندویچ پنل‌های فومی A356-SFB-85 و A456-SFB-90 به ترتیب برابر ۲۸ و ۳۳ MPa هستند. این اختلاف اندک استحکام با توجه به اختلاف پارامتر ppsi (تعداد حفره بر واحد اینچ) این دو نمونه به ترتیب ۸۵ و ۹۰ ppsi هم خوانی دارد.

برای مقایسه رفتار ساندویچ پنل فوم A356 با حذف ورق‌های آلومینیومی از آن، تختال ساده فومی (همان هسته A356 تنها) بدون ورق رویی و زیری مورد آزمون خمش سه نقطه قرار گرفت. شکل ۹ نتایج داده‌های بدست آمده برای هر دو نمودار نیرو-جابجایی (۹-الف) و



شکل ۵- آنالیز EDS یکی از ذرات شکل ۴ که با پیکان مشخص شده است



شکل ۶- تغییر فرم دو نمونه از ساندویچ پنل های A356 طی آزمون خمش ۳ نقطه

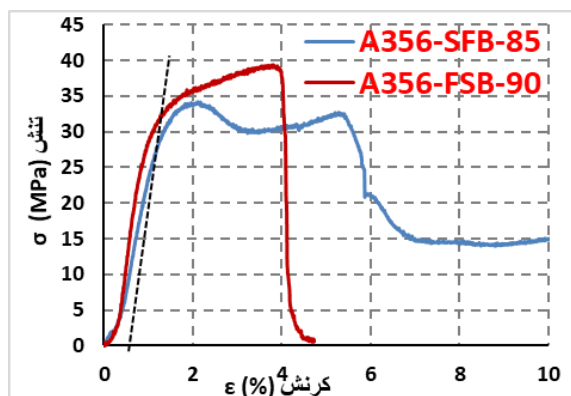
دیگر، مقادیر راندمان انرژی جذب طی تغییر شکل، به کمک رابطه ۳ بدست می آید [۱۱-۱۵]:

$$E = 100 \times \frac{\sum_{i=0}^{L_f} 0.5(F_i + F_{i+1}) \times (L_{i+1} - L_i)}{\sum_{i=0}^{L_f} F_{i+1} \times L_i} \quad (3)$$

در این رابطه صورت کسر، جمع المان‌های ذورنقه‌ای زیر منحنی نیرو-جابجایی است و L_f : جمع المان‌های طولی است که در آن خسارت (ترک یا لولای پلاستیک) در سازه ساندویچ پنل یا تختال فومی، رخ داده است و پارامتر L_f : طول لحظه‌ای سازه طی تغییر شکل است.

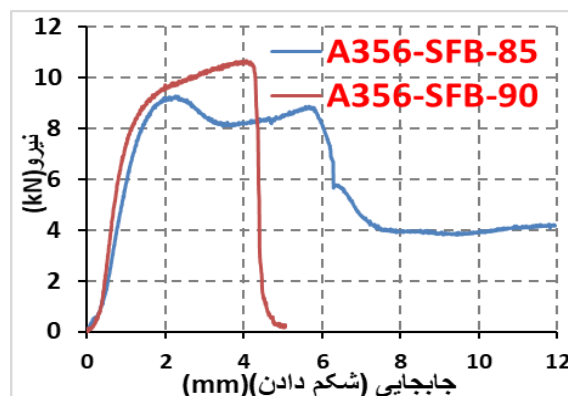
از این‌رو، نتایج داده‌های تغییر شکل پلاستیک فشار تک محوره نمونه‌های ساندویچ پنل فومی، یعنی نمونه‌های A356-SFP-90، A356-SFP-85 و نمونه تختال فومی A356-FP-87 در یک نمودار در شکل ۱۱، به دو صورت منحنی نیرو-جابجایی و تنش-کرنش رسم شده است.

برای آشکار شدن مقاومت به تغییر شکل اولیه، ناحیه الاستیک هر سه نمونه فوق (این منطقه با کادر مربع خط چین؛ در پایین شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ج نشان داده شده است) بزرگنمایی شده و در زیر آن‌ها نشان داده شده است. به نظر می‌رسد، تنش تسلیم نمونه تختال فومی با ۸۷ ppsi حد فاصله بین دو نمونه ساندویچ پنل با تخلخل‌های ۸۵ و ۹۰ ppsi، قرار گرفته است. از سوی

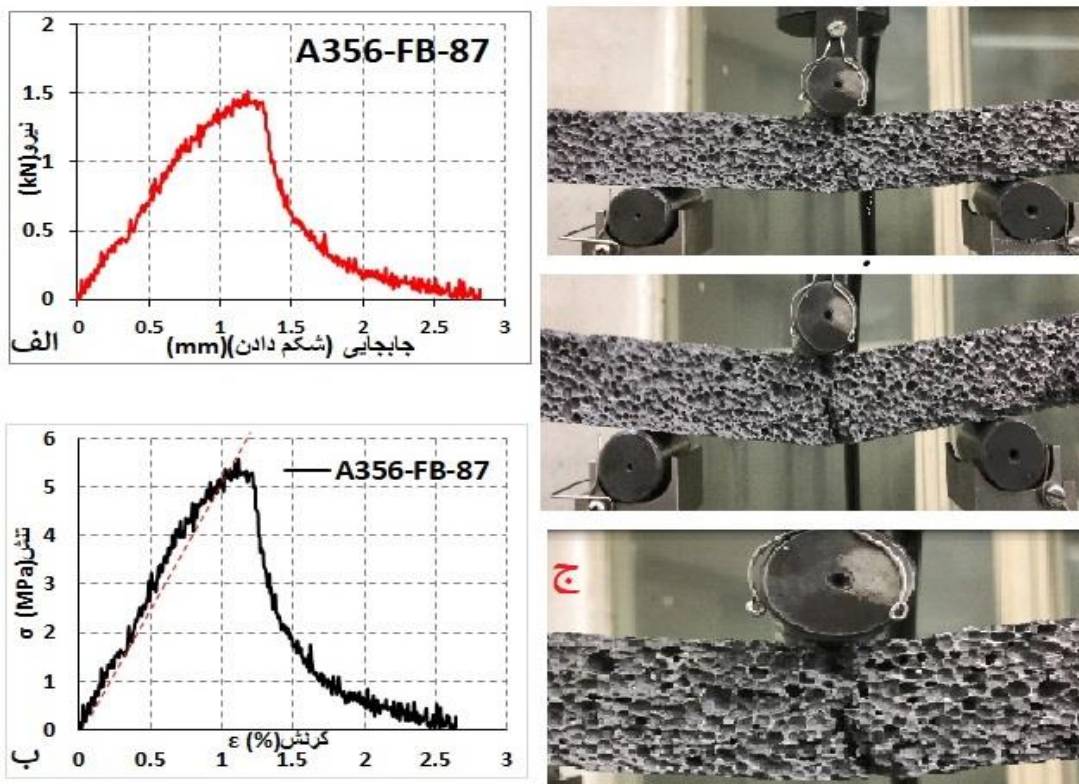


شکل ۸- نمودار تنش-کرنش آزمون خمش دو نمونه

شکل ۶



شکل ۷- نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش دو نمونه شکل ۶

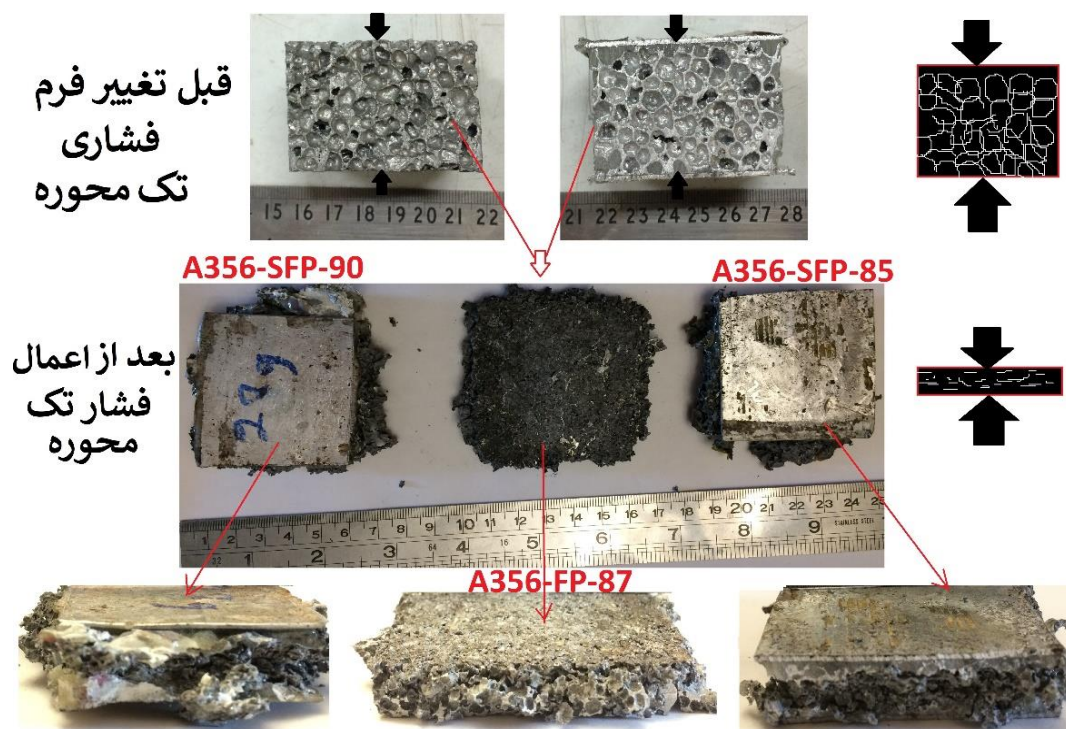


شکل ۹- تغییر شکل نمونه تختال فومی A356 طی آزمون خمش ۳ نقطه. الف) منحنی نیرو+جابجایی، ب) منحنی تنش-کرنش، ج) توسعه ترک در تختال فومی A356-FB-87

شکل قرار داد.

همچنین تغییرات راندمان انرژی جذب-کرنش و تنش-کرنش طی آزمون خمش ۳ نقطه برای هر دو نمونه ساندویچ پنل A356-SFP-90، A356-SFP-85 و همچنین نمونه تختال فومی A356-FP-87 همانند آنچه در بالا ذکر شد، هر دو در کنار هم در شکل ۱۳ رسم شده است. مشاهده می شود (در منحنی های خط چین)، مقدار درصد راندمان انرژی بعد از کرنش شکست (حدود ۴٪ کرنش) در ساندویچ پنل A356-SFP-90 بصورت ناگهانی شیب صعودی پیدا می کند. در نمونه A356-SFP-85 در کرنش ۵/۸ درصد (مکان ایجاد لولای پلاستیک) این تغییر شیب رخ داده؛ اما برای نمونه تختال فومی در کرنش ۱/۳ درصد، این پدیده رخ داده است. لذا اگر از این کرنش ها موسوم به کرنش خسارت، خط عمودی رسم شود، می تواند به راحتی معیار مقایسه جذب انرژی تا مکان ایجاد خسارت قرار گیرد و مقایسه خوبی انجام گیرد.

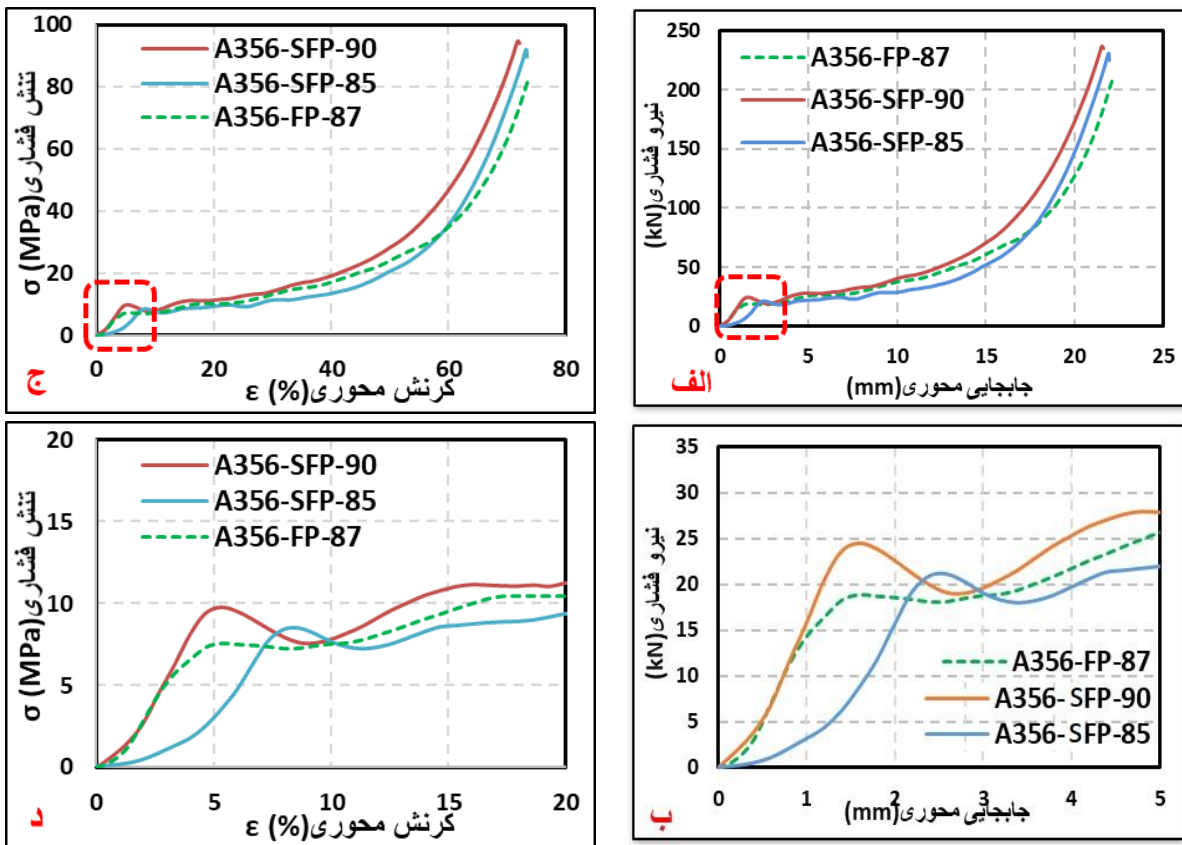
نتایج حاصل از آزمون فشار تک محوره به صورت منحنی های تنش-کرنش (σ - ϵ) و همچنین منحنی های راندمان انرژی جذب، بر حسب کرنش (E - ϵ) هر دو در یک نمودار مطابق شکل ۱۲ رسم شده اند. محور عمودی سمت راست شکل ۱۲، مقادیر راندمان انرژی جذب-تغییر شکل پلاستیک طی فشرده شدن را نشان می دهد. لذا مقادیر عددی تمام منحنی های خط چین، باید از روی محور عمودی سمت راست قرائت شوند. محور عمودی سمت چپ، مقادیر تنش طی فشرده شدن را نشان می دهد و مقادیر منحنی ها باید از روی محور عمودی سمت چپ قرائت شود. مشاهده می شود در هر دو نمونه ساندویچ پنل با هسته فومی آلیاژ آلومینیوم A356-SFP-90، A356-SFP-85 و همچنین نمونه تختال فومی A356-FP-87 فروریزی ساختار فوم A356 و مچاله شدن آن تا آستانه چگال شدن فوم، در کرنش حدود ۳۸/۷ درصد رخ داده است (محل برخورد نزولی منحنی-های خط چین). لذا از این محل (موسوم به کرنش چگالش) اگر خط عمودی رسم شود، می توان آن را معیار مقایسه جذب انرژی در نمونه های مختلف طی تغییر



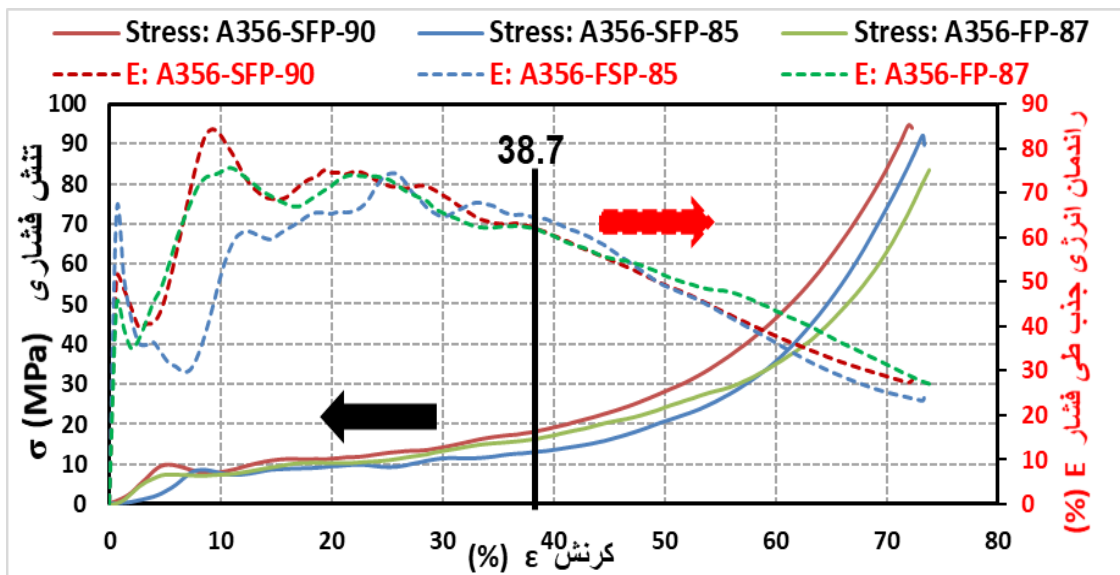
شکل ۱۰- تغییر فرم فشاری تک محوره ساندویچ پنل فومی A356 و تختال فومی A356

دانسیتته) هر سه نمونه فوق در شکل ۱۵ ارایه شده است. با توجه به اینکه در آزمون خمش، شکست و فروریزی ساختار فومی برای هر نمونه در کرنش‌های متفاوتی (بر خلاف نمونه‌های فشار) رخ داده بود (شکل‌های ۶ و ۹ و نمودارهای شکل ۱۳ مشاهده شود)، سعی شد در این کرنش‌های خسارت، مقادیر پارامترهای: راندمان جذب، انرژی جذب و انرژی جذب ویژه برای هر سازه بر اساس داده‌های آزمون خمش محاسبه شود تا با مقایسه آن‌ها مقاومت هر سازه قبل از تخریب بدست آید. شکل ۱۵- الف، نتایج پارامتر راندمان جذب این سه نمونه را طی خمش نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که مجدداً ساندویچ پنل A356-SFP-85 با راندمان ۱۳۰٪ از همه بالاتر است. همچنین در شکل ۱۵-ب دیده می‌شود که همین نمونه بالاترین انرژی جذب ویژه را دارد. در صورتی که انرژی جذب معمولی ساندویچ پنل طراحی‌های مهندسی، جایی که سفتی یا حداقل شکم- دادگی مطرح باشد، معیار انتخاب ساندویچ پنل فومی انرژی جذب ویژه است نه انرژی جذب ساده و این مطلب، لزوم استفاده از ساندویچ پنل‌ها با هسته فوم آلومینیومی را اثبات می‌نماید [۱۴-۱۶].

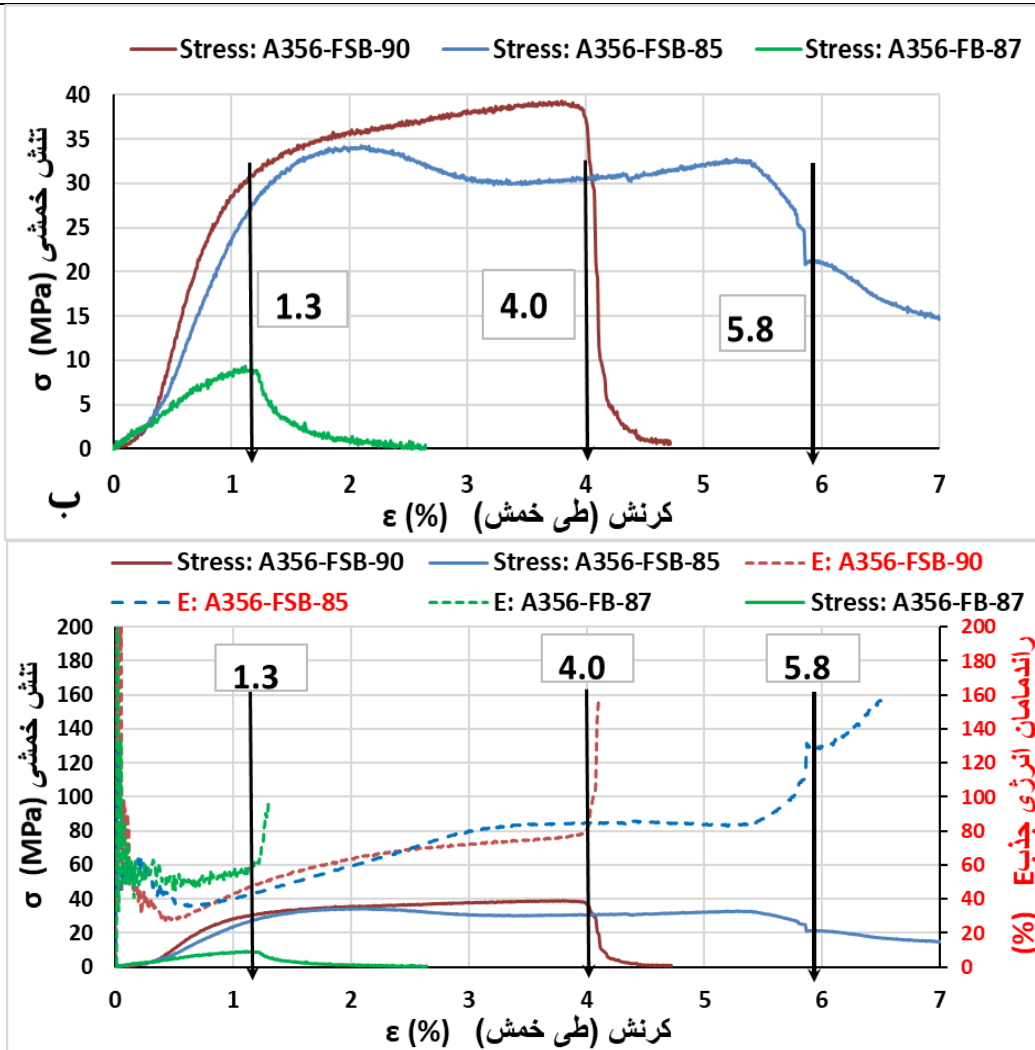
شکل ۱۴ نتایج مقایسه درصد راندمان انرژی جذب را طی آزمون فشار تک محوره، برای هر سه نمونه مورد بحث در کرنش چگالش یا تخریب ۳۸/۷ درصد نشان می‌دهد (شکل ۱۴-الف). در این نمودار دیده می‌شود که متوسط راندمان انرژی جذب (با تقریب ۳ درصد انحراف) طی بازگذرای فشاری، تقریباً حدود ۶۲٪ خواهد بود؛ اما بصورت نسبی، درصد راندمان جذب انرژی نمونه ساندویچ پنل A356-SFP-85 از دو نمونه دیگر (حدود ۴ درصد) بالاتر است؛ اما در نمودار شکل ۱۴-ب، مقایسه مقدار جذب انرژی و مقدار جذب انرژی بر دانسیته سازه که به جذب انرژی ویژه معروف است، ارایه شده است. انرژی جذب ویژه تختال فومی A356-FP-85، با مقدار ۵۲۵ کیلو ژول بر گرم سانتیمتر مکعب، از هر دو ساندویچ پنل فومی دیگر بالاتر است (ستون‌های قرمز رنگ شکل ۱۴-ب). در صورتی که انرژی جذب معمولی نمونه ساندویچ پنل فومی A356-SFP-90 از دو نمونه دیگر بالاتر است (ستون‌های خاکستری شکل ۱۴-ب) و این مدیون دانسیته پایین‌تر این سازه است (چگالی‌های جدول ۲ مشاهده شود). اما طی آزمون خمش نیز درصد راندمان انرژی جذب و مقدار انرژی جذب ساده و انرژی جذب ویژه (تقسیم بر



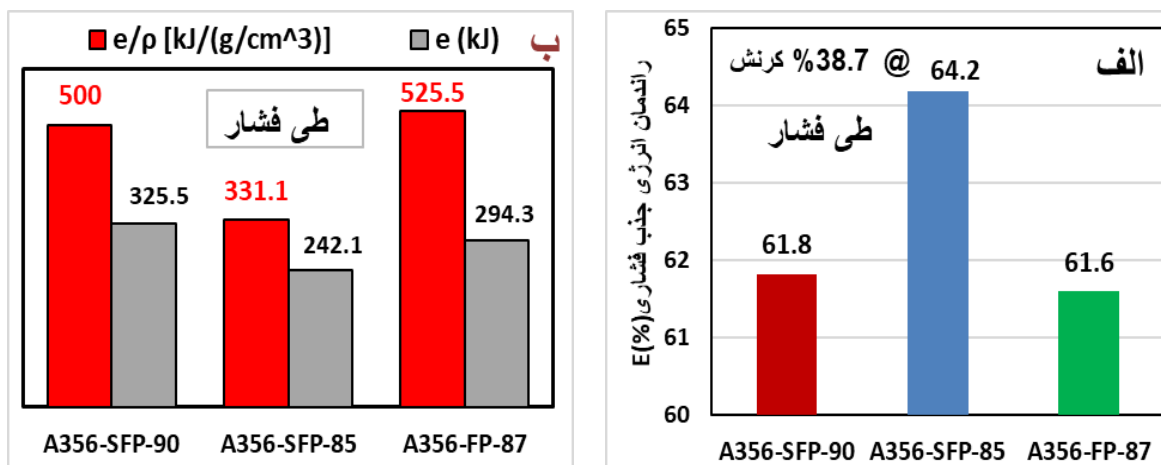
شکل ۱۱- نمودارهای تغییر شکل نمونه های ساندویچ پنل و تختال فومی A356 در آزمون فشار تک محوره. الف) نیرو-فاصله (ب) بزرگنمایی منطقه مربع قرمز (الف)، ج) تنش-کرنش، د) بزرگنمایی منطقه مربع قرمز (ج)



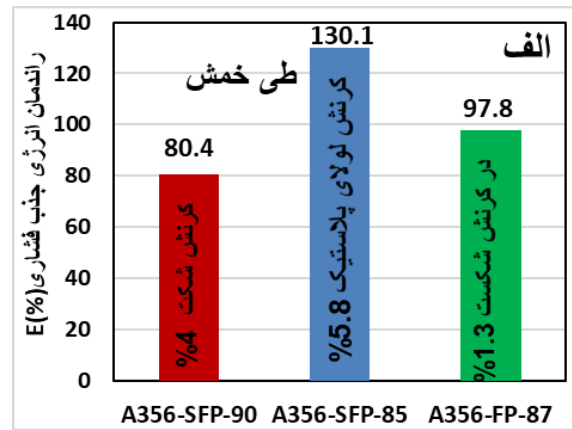
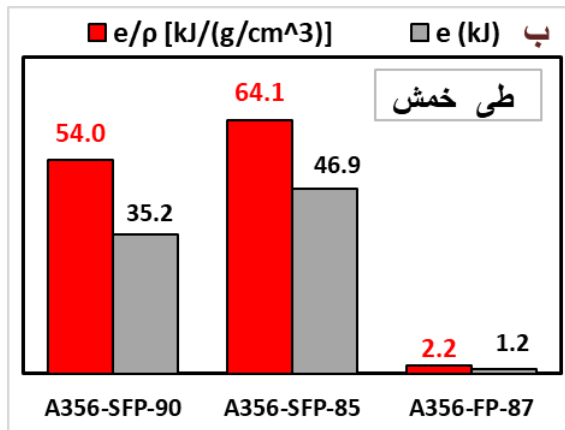
شکل ۱۲- نمودار جذب انرژی-کرنش (محور عمودی سمت راست)؛ در کنار نمودار تنش-کرنش طی فشاری تک محوره (محور عمودی سمت چپ)



شکل ۱۳- رفتار خمشی. الف) نمودار راندمان انرژی جذب خمش- کرنش (محور عمودی سمت راست): در کنار نمودار تنش-کرنش خمشی (محور عمودی سمت چپ) ب) بزرگنمایی نمودار تنش کرنش خمشی



شکل ۱۴- تغییرات انرژی جذب و راندمان آن تا کرنش چکاش ۳۸/۷٪. طی آزمون فشار الف) درصد راندمان انرژی جذب، ب) انرژی جذب و انرژی جذب حسب دانسیته



شکل ۱۵- تغییرات انرژی جذب تا کرنش یا شکست طی آزمون خمش الف) درصد راندمان انرژی جذب، ب) مقدار انرژی جذب و انرژی جذب بر حسب دانسیته

هر نمونه مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهد که تابع عیوب ذاتی در ساختار سلولی هسته فومی است؛ اما کرنش خسارت تختال فومی بسیار پایین‌تر (حدود یک پنجم) از ساندویچ پنل‌های فومی است. در ساندویچ پنل‌های A356، بسته به نوع عیوب ذاتی در ساختار سلولی هسته فومی، عموماً دو نوع مکانیزم تخریب طی آزمون خمش رخ می‌دهد. یکی تخریب هم‌زمان ساختار سلولی از مرز بین دیواره حباب‌ها به گونه‌ای که کل ساندویچ به همراه هر دو ورق زیری و رویی، دور محور فک اعمال نیرو خم می‌شوند (لولای کاملاً پلاستیک). مکانیزم دیگر، انتقال بیش‌ترین نیروی کششی به ورق پایینی ساندویچ پنل و پاره شدن آن و سپس توسعه سریع ترک در ضخامت هسته فومی (تغییر شکل پلاستیک موضعی در ورق و رشد ترک در هسته فومی).

نتیجه‌گیری

۱- درصد پارامتر راندمان انرژی جذب، طی تغییر شکل فشاری تک محوره برای همه ساندویچ پنل‌های فومی A356 و همچنین تختال ساده فومی A356 تقریباً یکسان و حدود ۶۲٪ است.

۲- درصد پارامتر راندمان انرژی جذب، طی تغییر شکل خمشی برای ساندویچ پنل فومی با خسارت از نوع لولای کاملاً پلاستیک با مقدار ۱۳۰٪، از سایر ساندویچ پنل‌ها و تختال‌های فومی A356، حدود ۱/۵ برابر بیش‌تر است.

۳- مقدار انرژی جذب ویژه (تقسیم بر دانسیته) ساندویچ پنل‌های فومی A356 طی خمش، نسبت به نمونه تختال ساده فومی، بین ۲۵ الی ۳۰ برابر، بیش‌تر است.

۴- کرنش‌های خسارت، برای تختال ساده فومی و ساندویچ پنل‌های فومی A356 طی آزمون فشار تک محوره، تقریباً یکسان و حدود ۳۸ درصد یا همان کرنش چگالش است. منتهی در آزمون خمش، کرنش خسارت

References:

1- M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth-Heinemann, 2000.

۲- م. شاهسون، س.م.ح. میرباقری، ساخت فوم سلول باز مسی و بررسی ریزساختار آن، مجله علمی پژوهشی مواد نوین، جلد ۸ شماره ۳، ۱۳۹۷.

3- L.J. Gibson, M.F. Ashby, "Cellular Solids: Structure and Properties",

Butterworth-Heinemann, 2nd edition, Cambridge University Press, 1999.

4- M. Maurer, E. Lugscheider, M. Matwiss. Werkstofftechn., No:31, P:523, 2000.

5- K. Kabir, T. Vodenitcharova, Hoffman M. Response of aluminum foam-cored sandwich panels to bending load. Composites Part B: Engineering., Aug 1; 64:24-32, 2014.

6- Zu GY, Lu RH, Li XB, Zhong ZY, HAN MB, YAO GC. Three-point bending behavior of aluminum foam sandwich with steel panel. Transactions of Nonferrous Metals Society of Chin, Sep 1;23(9):2491-5, 2013.

۷-م گلستانی پور ، ا. باباخانی، س. م. زبرجد، بررسی و شبیه سازی آزمون سوراخ کاری شبه استاتیک در پنل های ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiCp فصلنامه مواد نوین، زمستان ۱۳۹۴، دوره ۶، شماره ۲ (پیاپی ۲۲)، صفحه ۱۳-۲۸.

8- S.M.H. Mirbagheri, H. Vali, H. Soltani, Heat Treatment of Closed-Cell A356+ 4 wt.% Cu+2 wt.%Ca Foam and Its Effect on the Foam Mechanical Behavior, Volume 26, Issue 1, pp.14-27, 2017.

9-M. Nouri-Damghani, A. Mohammadzadeh Gonabadi, "Investigation of Energy Absorption in Aluminum Foam Sandwich Panels: By Drop Hammer Test: Experimental Results" Mechanics, Materials Science & Engineering, December 2016-ISSN 2412-5954.

10- H. Bayani, S.M.H. Mirbagheri, Strain-hardening during compression of closed-cell Al/Si/SiC+(TiB2& Mg) foam, pp:168-179, 2016.

11- R. Florek, F. Simančík et al. compression test evaluation method for aluminum foam different alloys and densities, Powder Metallurgy Progress, No 4, Vol.10 (2010).

۱۲- س. مکرتیچیانس، ساخت و ارزیابی رفتار تغییر شکل ساندویچ پنل فوم آلومینیم در آزمون خمش سه نقطه، پایان نامه کارشناسی ارشد مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۷.

۱۳- س. م. ح. میرباقری، ح. سلطان؛ ح. والی، "تعیین سیکل عملیات پیرسازی فوم کامپوزیتی پایه آلومینیم A356+4%wt.Cu و مقایسه آن با خواص مکانیکی فوم A356، فصلنامه مواد نوین، دوره ۶، شماره ۱ (پیاپی ۲۱)، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۳۷-۵۲.

14- J.L. Yu, X. Wang, Z.G. Wei, et al., Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core. Int. J Impact Eng., 28(3), 2003, pp:331-347.

15- Z.P. Bazant, Y. Zhou, I.M. Daniel, et al., Size effect on strength of laminate-foam sandwich plates. J Eng. Mater Tech, 128(3), 2006, pp:366-374.

16- C. Tekoglu, L.J. Gibson, T. Pardoen, et al., Size effects in foams: experiments and modeling Prog. Mater Sci., 56(2), 2011, pp:109-138.

