

# بررسی و شبیه‌سازی استحکام برشی اتصال چسبی در پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تولید شده به روش ذوبی با عامل فوم‌ساز

مسعود گلستانی پور\*<sup>۱</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۲</sup>، سید مجتبی زبرد<sup>۳</sup>

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

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

۴- استاد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

\*m.golestanipour@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۲۵)

## چکیده

امروزه پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی به عنوان ساختاری سبک با قابلیت جذب انرژی بالا، کاربرد فراوانی در اجزای ضربه‌گیر پیدا نموده‌اند. در این تحقیق ابتدا فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده و پایدارساز کاربیدسیلیسیوم و با استفاده از فوم‌سازی به روش ذوبی توسط عامل فوم‌ساز کربنات کلسیم تولید گردید. چگالی محصولات فومی تولیدی در حدود ۰/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب اندازه‌گیری شد. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بیانگر توزیع یکنواخت سلول‌ها و همچنین توزیع مطلوب ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیوم در دیواره تخلخل‌ها می‌باشد. در ادامه استحکام برشی اتصال چسبی فوم تولیدی به ورق آلومینیومی با استفاده از سه نوع چسب متداول صنعتی از طریق انجام آزمون برش کششی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مقایسه دقیق‌تر، اتصال فوم به فوم و ورق به ورق و مقاومت برشی فوم به تنهایی نیز مورد آزمون قرار گرفت. آزمون برش کششی توسط نرم افزار ABAQUS 6.10.1 تحت شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه گردید. علاوه بر این پایداری حرارتی چسب‌های مصرفی نیز توسط آنالیز ثقل سنجی حرارتی (TGA) بررسی شد و در نهایت بهترین چسب از لحاظ عملکرد مکانیکی و مقاومت حرارتی به منظور استفاده در تولید پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی انتخاب گردید.

## واژه‌های کلیدی:

فوم آلومینیومی، پنل ساندویچی، اتصال چسبی، آزمون برش کششی، استحکام برشی، شبیه‌سازی.

## ۱- مقدمه

است. در میان فلزات مختلف که به منظور فوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن چگالی نسبتاً پایین، در دسترس بودن و سهولت تشکیل فوم بیشترین کاربرد را دارند. روش‌های تولید فوم‌های آلومینیومی بسیار متنوع است [۱-۷].

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به فوم‌های فلزی یا همان فلزات متخلخل به عنوان ساختاری سبک با قابلیت جذب انرژی در کاربردهایی نظیر خودروسازی، صنایع نظامی، هوافضا و... شده

را می‌توان با تمامی انواع چسب‌های مورد استفاده برای چسب-کاری آلومینیوم اتصال داد. اتصالات به آسانی و با روش‌های انعطاف پذیر ایجاد می‌شوند. استحکام این نوع از اتصالات معمولاً بیشتر از استحکام فوم است. اتصال‌دهی به سبب نیروی چسبندگی بین سطح قطعه کار و چسب صورت می‌گیرد. به این ترتیب نمونه‌هایی که به خوبی چسب‌کاری شده‌اند نباید از فصل مشترک جدا شوند و به عبارت دیگر نیروهای چسبندگی باید از نیروهای همدوس داخل چسب یا قطعه کار بالاتر باشند. اتصال بین چسب و قطعه کار هم به دلیل اتصالات یونی و هم در اثر برهمکنش‌های قطبی ایجاد می‌شود. از آنجا که سطح تماس مستقیم اتصال ورق به فوم نسبت به اتصال ورق به ورق کمتر است، در اتصالات فومی گرانیوی چسب باید به اندازه کافی پایین باشد تا تخلخل‌های سطحی را پر نماید. کمبود سطح تماس را نیز می‌توان با روش‌های اتصال مضاعف جبران نمود. با این وجود اتصالات چسبی دارای معایبی نظیر پایداری حرارتی پایین، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و ایجاد لایه عایق الکتریکی و حرارتی می‌باشند [۳-۱۱].

اکثر تحقیقات انجام شده بر روی کیفیت و خواص اتصالات چسبی در پنل‌های ساندویچی، محدود به پنل‌هایی با هسته فوم پلیمری و یا ساختار لانه زنبوری از جنس پلیمر یا آلومینیوم بوده است. به عنوان مثال Imielinska و همکارانش [۱۲]، نیروی آستانه لایه‌لایه شدن<sup>۱</sup> در اتصال هسته PVC و صفحات پلی-استری را با دو نوع چسب رزینی مورد بررسی قرار دادند. Rao و همکارانش [۱۳] نیز استحکام اتصال چسبی و ظرفیت جذب انرژی پنل‌های ساندویچی باز یافتی با هسته پلی‌پروپیلن لانه-زنبوری را بررسی نمودند. استحکام برشی اتصال روی هم آلومینیوم-پلی‌پروپیلن نیز توسط Chen و همکارانش [۱۴] مورد تحقیق قرار گرفت. Ming Jen و همکارانش نیز در دو تحقیق مجزا [۱۵-۱۶] اثر مقدار چسب در استحکام خستگی خمشی پنل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند.

تکنیک‌های فوم‌سازی مستقیم مذاب با استفاده از عامل فوم‌ساز برای تولید فوم‌های آلومینیومی در ابعاد صنعتی مناسب می‌باشد چرا که دسترسی به تجهیزات تولید در آن آسان و هزینه آن به مراتب کمتر از سایر روش‌ها است. با این وجود ساختار سلولی حاصل از این روش نامنظم و اندازه سلول‌ها نیز تا حدودی ناهمگن می‌باشد. برای به حداقل رساندن این عیوب در این روش و نیز ممانعت از خروج و یا پیوستن حباب‌های گازی به یکدیگر، لازم است ویسکوزیته مذاب افزایش یابد. افزودن ذرات سرامیکی نظیر کاربید سیلیسیوم (SiC)، اکسید منگنز (MnO<sub>2</sub>) و اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) به مذاب فلز روشی مناسب برای افزایش ویسکوزیته آن می‌باشد [۸-۱].

در کاربردهای سازه‌ای، فوم‌های آلومینیومی معمولاً در ترکیب با ورق‌ها و به شکل پنل ساندویچی استفاده می‌شوند. پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با وجود وزن کم دارای عملکرد عالی در پراکنده کردن انرژی می‌باشند که این امر سبب کاربرد وسیع آن‌ها در جاذب‌های انرژی شده است. ساختار سلولی هسته فومی در این محصولات باعث تغییر شکل پلاستیک زیاد در تنش‌های ثابت شده که جذب انرژی جنبشی زیادی را قبل از تخریب ساختار سبب می‌شود. به سبب اهمیت ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی روش‌های مختلفی جهت تولید آن‌ها ابداع شده است که متداول‌ترین آن‌ها استفاده از چسب‌های پلیمری جهت اتصال‌دهی هسته فومی به صفحات می‌باشد. در این روش ابتدا هسته فومی در ابعاد مناسب و به شکل صفحه‌ای تولید شده و سپس ورق‌هایی از جنس فلزات مختلف نظیر آلومینیوم، فولاد، تیتانیوم و... به کمک چسب و تحت دما و فشار خاص به سطوح آن متصل گردیده و ساختار ساندویچی را شکل می‌دهند [۱-۹].

چسب‌کاری به گروهی از روش‌های اتصال‌دهی تعلق دارد که در آن‌ها از مکانیزم اتصال با ماده واسطه استفاده می‌شود و به عنوان روشی عملی برای اتصال دادن فوم‌های آلومینیومی نیز شناخته می‌شود. برای این منظور سیستم‌های چسب‌کاری مختلفی را می‌توان به کار گرفت. به عبارت دیگر فوم‌های آلومینیومی

مخلوط در دمای ۷۳۰-۷۱۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۳ دقیقه نگه داشته شد تا کربنات کلسیم تجزیه شده و تولید گاز CO<sub>2</sub> و در نتیجه تولید تخلخل نماید. در ادامه، فوم تولید شده از کوره خارج شده و در هوا خنک می شود. در حین تجزیه کربنات کلسیم، اکسیدهای آلومینیوم و منیزیم ایجاد می شوند که این اکسیدها در جداره داخلی سلولها قرار گرفته و به پایداری سلولها کمک می نمایند. علاوه بر این وجود اکسیدهای مذکور مانع از مهاجرت ذرات سرامیکی به این سطوح می شود [۵-۶]. مشخصات فوم آلومینیومی تولید شده و مقادیر چگالی، چگالی نسبی و درصد تخلخل آن در جدول ۱ آمده است. چگالی فوم با تقسیم وزن به حجم محصول تولیدی به دست می آید. چگالی نسبی نیز نسبت چگالی فوم به چگالی توده ماده (۲/۷) گرم بر سانتیمتر مکعب برای آلیاژ آلومینیوم زمینه) می باشد. با کسر عدد چگالی نسبی از عدد یک و درصدگیری از عدد حاصل می توان درصد تخلخل محصول تولیدی را محاسبه نمود. به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع ذرات کاربیدسیلیسیم در فوم آلومینیومی، میکروسکوپی الکترونی فومهای آلومینیومی تولیدی توسط دستگاه SEM مدل LEO 1450VP (35kV) و میکروسکوپی نوری نیز توسط دستگاه مدل Olympus PM3 انجام گرفت.

جدول (۱): فوم آلومینیوم تولید شده و مقادیر چگالی و درصد تخلخل آن

مقدار	خصوصیات
۱۰	کسر حجمی ذرات کاربید سیلیسیم (vol%)
۳	درصد وزنی پودر کربنات کلسیم (wt%)
۰/۶۳	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
۰/۲۳	چگالی نسبی
۷۷	درصد تخلخل (%)

جهت انتخاب چسبی با بالاترین خواص مکانیکی برای استفاده در تولید پنل ساندویچی، استحکام برشی اتصالات روی هم

با توجه به تحقیقات فوق و با وجود تحقیقات وسیع انجام شده در خصوص خواص مکانیکی پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی هنوز مطالعه پارامتری مطلوبی در زمینه خواص و کیفیت اتصال چسبی در این محصولات و نیز شبیه سازی آن صورت نگرفته است. علاوه بر این در این تحقیق، منحصراً از فوم آلومینیومی تولید شده توسط محققین از طریق فرآیند فوم سازی با عامل فوم ساز جهت بررسی اتصالات چسبی استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش ها

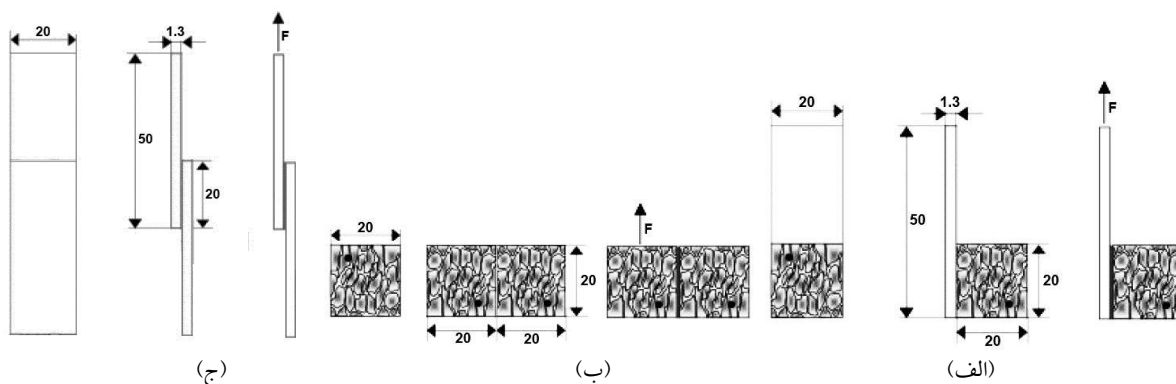
در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 به عنوان فلز پایه استفاده شد. فاز تقویت کننده و عامل ویسکوزکننده مذاب شامل ذرات SiC با خلوص ۹۸٪ وزنی و اندازه متوسط ذرات برابر با ۱۰ میکرومتر می باشد. حرارت دهی ذرات SiC به مدت یک ساعت در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، به منظور حذف آلودگی ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیوم انجام گرفت. پودر کربنات کلسیم با خلوص ۹۹/۵٪ وزنی و اندازه متوسط ۵ میکرومتر، به عنوان عامل فوم ساز استفاده شد. این پودر نیز به منظور حذف رطوبت و آلودگی سطحی و افزایش خصوصیات ترشوندگی و به تبع آن توزیع بهتر در مذاب آلومینیوم، به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. برای تولید محصول فومی ابتدا شمش کامپوزیتی با زمینه آلومینیومی به همراه مقدار ۱۰ درصد حجمی از ذرات SiC، با استفاده از تکنیک ریخته گری گردابی در دمای ۶۸۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد تولید و ریخته گری شد. شمش مذکور در مرحله بعد در دمای ۷۰۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد ذوب مجدد شده و در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه هم زده شد. در این مرحله مقدار ۱ درصد وزنی منیزیم به مذاب افزوده گردید. پس از آن مقدار ۳ درصد وزنی پودر CaCO<sub>3</sub> به مذاب در حال اغتشاش اضافه شده و مخلوط بلافاصله برای مدت کمتر از ۱ دقیقه هم زده شد. سپس

با شرایطی مشابه با استاندارد ASTM D1002 جهت انجام آزمون برش کششی آماده گردید. شکل ۱ شماتیک نمونه-های آماده شده جهت آزمون را نشان می‌دهد. با توجه به دستورالعمل سازنده، چسب‌کاری بر روی سطوح فوم و صفحه آلومینیومی انجام شد. قبل از چسب‌کاری آماده‌سازی سطح و چربی‌زدایی مطابق با استاندارد ASTM E864 بر روی سطوح مورد نظر صورت گرفت [۱۷،۳-۱۹].

چسبی بین فوم آلومینیومی تولیدی و صفحاتی از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰ با استفاده از سه نوع چسب متداول صنعتی، از طریق آزمون برش کششی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه دقیق‌تر، اتصال فوم به فوم و ورق به ورق و مقاومت برشی فوم به تنهایی نیز مورد آزمون قرار گرفت. مشخصات چسب‌های مورد استفاده جهت چسب‌کاری پنل‌های ساندویچی و طریقه اعمال آن‌ها به شرح جدول ۲ می‌باشد. اتصالات روی هم ساده

جدول (۲): مشخصات چسب‌های مورد استفاده جهت چسب‌کاری پنل‌های ساندویچی

نحوه اتصال دهی	استحکام برشی (MPa)	پایه	نوع	سازنده	نام	کد
مخلوط کردن دو جزء به میزان مساوی و سپس اعمال آن بر روی دو سطح و اتصال دهی تحت دمای محیط و اعمال فشار به مدت ۳۰ دقیقه تا اتصال کامل	۴/۸	اپوکسی	دو جزئی	AGC ایران	Aluminium Glue	A
اعمال بر روی دو سطح و اتصال دهی تحت دمای محیط و اعمال فشار به مدت ۲۰-۱۵ دقیقه تا اتصال کامل	۶/۹	پلی یورتان	تک جزئی	Akfix ترکیه	610 Express PU montage adhesive	M
مخلوط کردن دو جزء به میزان مساوی و سپس اعمال آن بر روی دو سطح و اتصال دهی تحت دمای محیط و اعمال فشار به مدت ۳۰ دقیقه تا اتصال کامل	۸/۳	اپوکسی	دو جزئی	Persheng چین	Pershengmana	P



شکل (۱): شکل شماتیک و ابعاد نمونه‌های آماده شده جهت آزمون برش کششی (ابعاد بر حسب میلی‌متر): (الف): فوم-ورق، (ب): فوم-فوم و (ج): ورق-ورق

کشش مستقیم در راستای فصل مشترک طراحی و ساخته شد (شکل ۲). داده‌های نیرو-جابجایی در کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت شده و با تقسیم نیرو به مساحت فصل مشترک اولیه می‌توان تنش برشی را محاسبه و گزارش نمود. قابل ذکر است که جهت

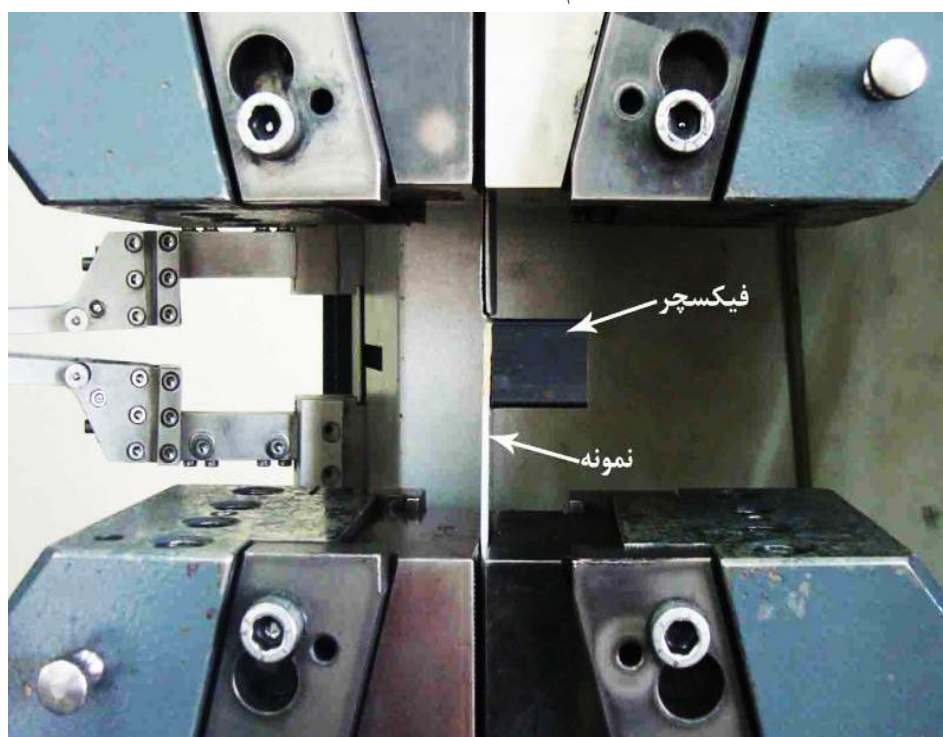
آزمون برش کششی با استفاده از دستگاه آزمون کشش مدل ZWICK 250KN و با سرعت ۵ mm/min بر روی نمونه‌های چسب‌کاری شده صورت گرفت. جهت حصول اطمینان از انجام برش خالص، فیکسچری با ابعاد مشخص جهت نگه داشتن فوم و

گردید. مش اعمال شده بر روی مدل فوم و صفحه با توجه به کدینگ نرم افزار از نوع C3D8R<sup>۲</sup> و به شکل مکعب مستطیل به ترتیب با اندازه های ۱/۲۵ و ۲/۵ میلی متر می باشد.

پایداری حرارتی چسب های مورد استفاده نیز توسط آنالیز ثقل-سنجی حرارتی (TGA) بررسی شد و در نهایت بهترین چسب از لحاظ عملکرد مکانیکی و مقاومت حرارتی به منظور استفاده در تولید پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی، انتخاب گردید.

اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون حداقل دو بار بر روی نمونه های مشابه انجام شده و نتایج نهایی حاصل میانگین گیری از داده های خروجی از آزمون های تکرار شده می باشد.

در ادامه شرایط آزمون کشش برشی توسط نرم افزار ABAQUS نسخه 6.10.1 مورد شبیه سازی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج حاصل از آزمون های تجربی مقایسه شد. به منظور انجام شبیه 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 صفحه و کیفیت اتصال آن به هسته فومی، وارد نرم افزار



شکل (۲): نحوه انجام آزمون برش کششی بر روی اتصال فوم-ورق

رویشی از الکترونهای برگشتی حاصل از مقطع پولیش شده دیواره سلول ها در نمونه (شکل ۳-ب) نیز توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات SiC را نشان می دهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از الکترونهای ثانویه حاصل از مقطع شکست نمونه (شکل ۳-ج) نیز بیانگر توزیع مطلوب ذرات SiC است که به صورت برجسته بر روی دیواره سلول ها مشاهده می شوند.

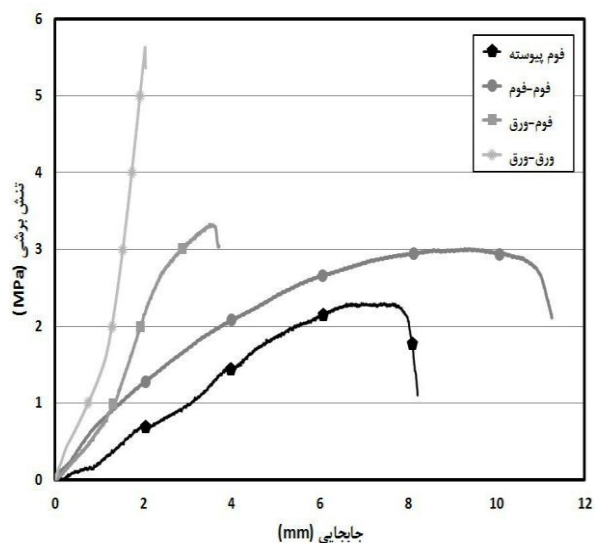
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریزساختاری

ریزساختار حاصل از میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی رویشی (SEM) نمونه های فوم آلومینیومی تولید شده در این تحقیق، در شکل ۳ قابل مشاهده است. ریزساختار نوری نمونه فوم تولیدی (شکل ۳-الف) گویای ساختار نسبتاً یکنواخت سلول ها در محصول بوده و تصویر میکروسکوپ الکترونی

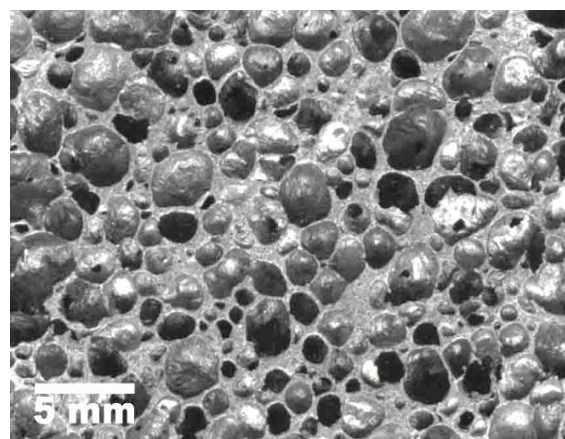
منحنی‌های تنش برشی-جابجایی اتصالات چسبی فوم-فوم، فوم-ورق و ورق-ورق برای چسب نوع P در شکل ۴ مشاهده می‌شود. منحنی تنش برشی-جابجایی فوم پیوسته نیز جهت مقایسه، در این شکل قابل مشاهده است. مقادیر متوسط استحکام برشی انواع اتصالات چسبی در جدول ۳ خلاصه شده است. همان‌گونه که از داده‌های این جدول مشخص است، برای چسب‌های نوع P و M که استحکام اتصال فوم-ورق به طور قابل ملاحظه‌ای از فوم پیوسته بالاتر می‌باشد، شکست از داخل فوم و نه از سطح تماس انجام می‌گیرد (شکل ۵-الف و ۵-ب) اما برای چسب نوع A که استحکام اتصال فوم-ورق در حدود استحکام فوم پیوسته است، شکست از سطح تماس صورت می‌گیرد (شکل ۵-ج).

در جدول ۳، سطح تماس کامل ورق-ورق با عدد ۱۰۰٪ مشخص شده و سطح تماس اتصالات فوم-ورق و فوم-فوم با توجه به درصد تخلخل نمونه‌های فومی که برابر با ۷۷٪ (درصد جامد ۲۳٪) می‌باشد، محاسبه شده است. به این ترتیب سطح تماس در نمونه‌های فوم-ورق برابر با ۲۳٪ و در نمونه‌های فوم-فوم برابر با ۵/۳٪ (۲۳٪ ضرب در ۲۳٪) می‌باشد.

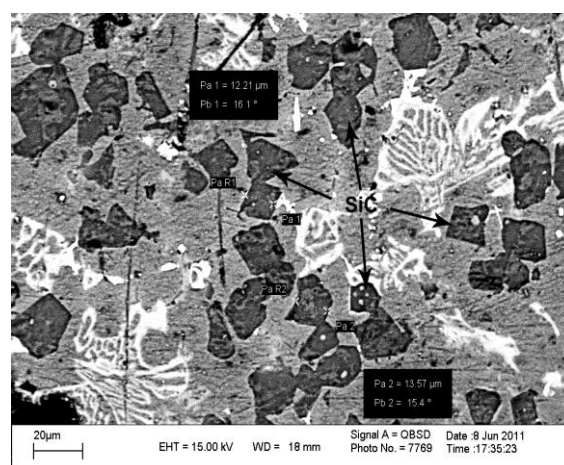


شکل (۴): منحنی‌های تنش برشی-جابجایی اتصالات چسبی فوم-فوم، فوم-ورق و ورق-ورق برای چسب نوع P

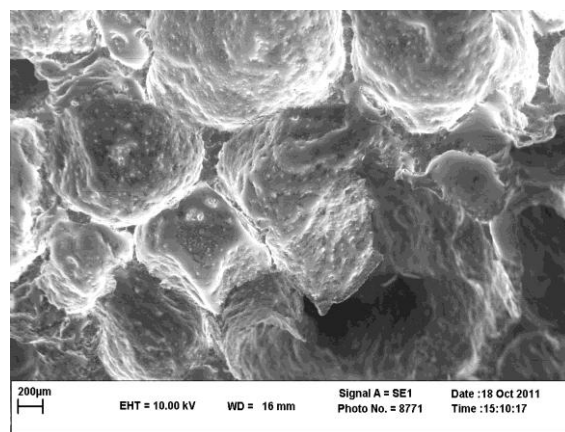
جدول (۳): استحکام برشی و سطح تماس در انواع اتصالات چسبی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳): (الف): تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه، (ب): تصویر

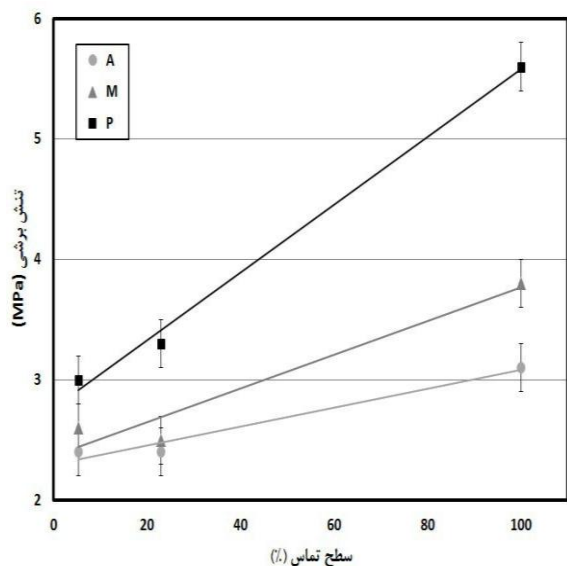
SEM الکترونیهای برگشتی از مقطع پولیش شده دیواره سلول ها و (ج):

تصویر SEM الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه

### ۳-۲- آزمون برش کشی

شکل ۶ تاثیر سطح تماس بر روی استحکام برشی اتصالات چسبی را برای سه نوع چسب مورد استفاده نشان می دهد. از این شکل مشخص است که با افزایش سطح تماس، استحکام برشی افزایش می یابد. علاوه بر این مشخص است که عملکرد مکانیکی و استحکام برشی به ترتیب از چسب نوع P به M و در نهایت A کاهش می یابد. استحکام بالاتر چسب P نسبت به چسب A که هر دو پایه اپوکسی دارند به دلیل استحکام برشی بیشتر این چسب مطابق با جدول ۲ می باشد. اما در خصوص چسب M با توجه به خاصیت فومی این چسب و انبساط آن پس از اتصال، در صورتی که در زمان چسب کاری فشار مناسب به سطح مقطع اتصال وارد شود چسب انبساط یافته به داخل تخلخل ها نفوذ کرده و سبب ایجاد قفل های مکانیکی در سطح اتصال می شود و به این ترتیب استحکام برشی را افزایش می دهد.

نوع چسب	نوع اتصال	سطح تماس	استحکام برشی (MPa)
-	فوم پیوسته	-	۲/۳
A	فوم-فوم	%۵/۳	۲/۴
	فوم-ورق	%۲۳	۲/۴
	ورق-ورق	%۱۰۰	۳/۱
M	فوم-فوم	%۵/۳	۲/۶
	فوم-ورق	%۲۳	۲/۵
	ورق-ورق	%۱۰۰	۳/۸
P	فوم-فوم	%۵/۳	۳/۰
	فوم-ورق	%۲۳	۳/۳
	ورق-ورق	%۱۰۰	۵/۶



شکل (۶): تاثیر سطح تماس بر روی استحکام برشی اتصالات چسبی برای سه نوع چسب مورد استفاده

### ۳-۳- شبیه سازی آزمون برش کششی

شکل ۷ توزیع و سطوح تنش حاصل از شبیه سازی آزمون برش کششی بر روی اتصال فوم-ورق را از نماهای مختلف به همراه تصویر نمونه واقعی آزمون شده، نشان می دهد. همان گونه که



(الف)



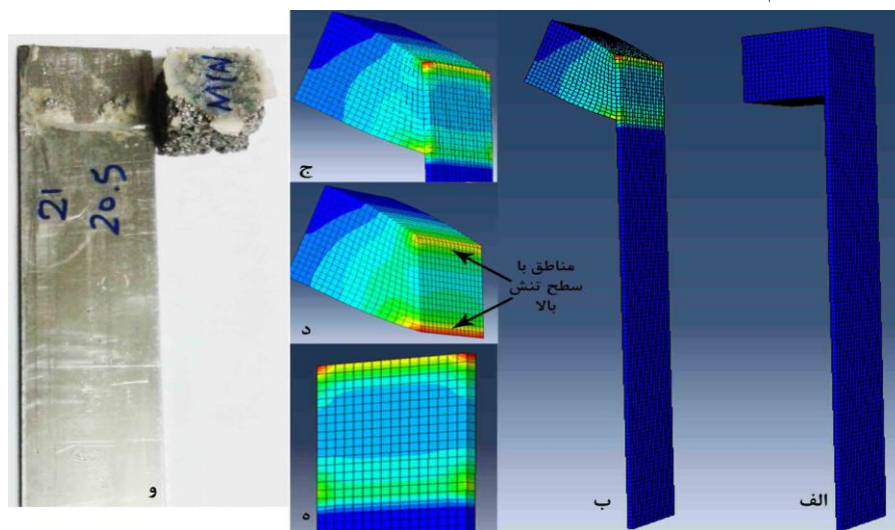
(ب)



(ج)

شکل (۵): (الف) شکست از داخل فوم برای چسب P، (ب): شکست از داخل فوم برای چسب M و (ج): شکست از سطح تماس برای چسب A

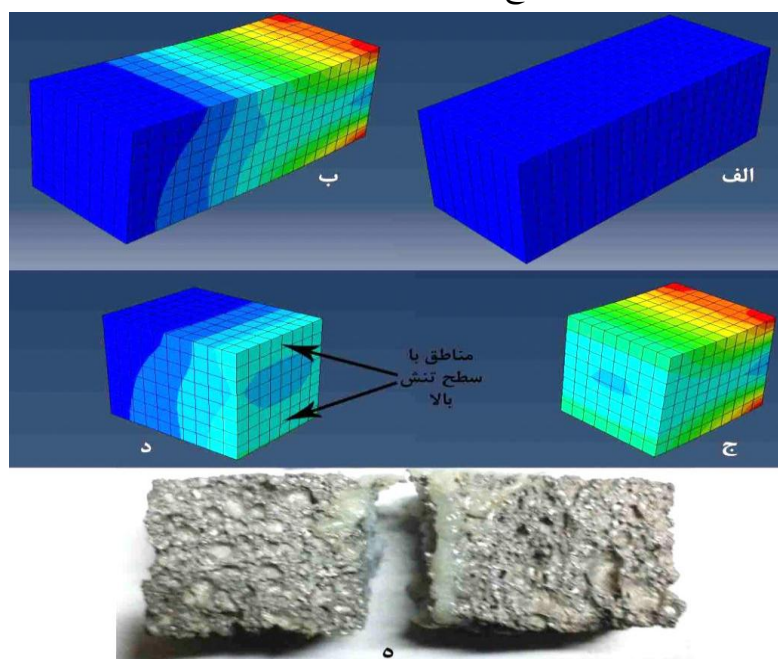
مشخص است مناطق تنش بالا در شبیه‌سازی (بالا و پایین سطح اتصال چسبی فوم-ورق) با موقعیت شکست فوم در نمونه آزمون شده، منطبق می‌باشند.



شکل (۷): توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون برش کششی بر روی اتصال فوم-ورق: (الف): قبل از بارگذاری، (ب): پس از بارگذاری، (ج): پس از بارگذاری از نمای نزدیک‌تر، (د): توزیع تنش در فوم به تنهایی، (ه): توزیع تنش در ورق به تنهایی و (و): نمونه واقعی آزمون شده

چسبی فوم-فوم) با موقعیت شکست فوم در نمونه آزمون شده، منطبق است.

در شکل ۸ نیز توزیع و سطوح تنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون برش کششی بر روی اتصال فوم-فوم به همراه تصویر نمونه واقعی آزمون شده، نمایش داده شده است. در این شرایط نیز مناطق با سطح تنش بالا در شبیه‌سازی (بالا و پایین سطح اتصال



شکل (۸): توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون برش کششی بر روی اتصال فوم-فوم: (الف): قبل از بارگذاری، (ب): پس از بارگذاری، (ج): توزیع تنش در فوم ثابت به تنهایی، (د): توزیع تنش در فوم تحت بارگذاری به تنهایی و (ه): نمونه واقعی آزمون شده

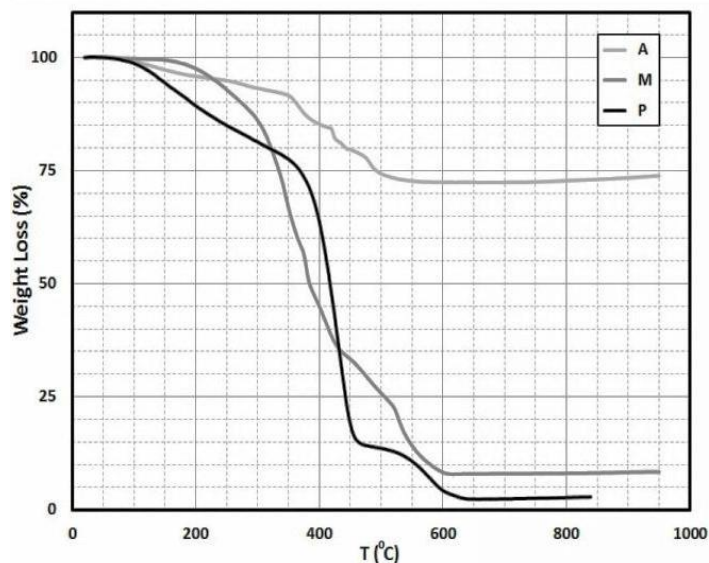


### ۳-۴- آنالیز ثقل سنجی حرارتی چسب

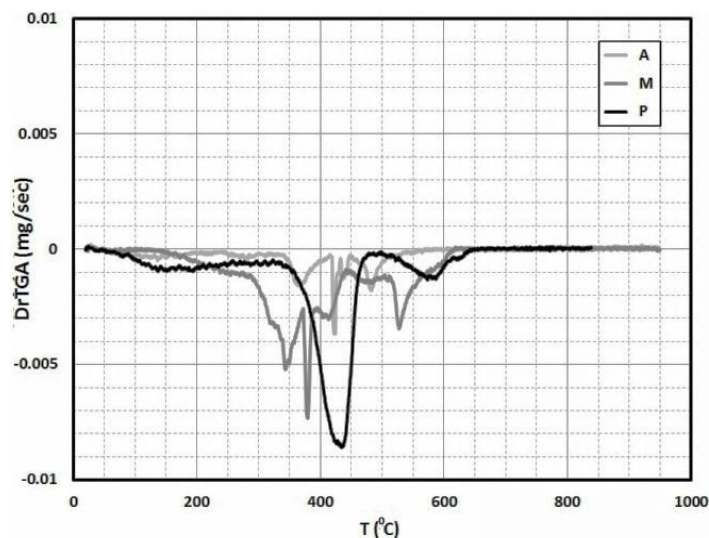
نتایج آنالیز ثقل سنجی حرارتی (TGA) سه نوع چسب مورد استفاده، در قالب منحنی درصد وزن از دست رفته بر حسب دما و مشتق وزن از دست رفته نسبت به زمان بر حسب دما، در شکل ۹ قابل مشاهده است.

داده های تحلیلی حاصل از شکل ۹-الف و ۹-ب شامل دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۱۰٪، دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۵۰٪ و سطح زیر منحنی مشتق وزن از دست رفته نسبت به زمان بر حسب دما، در جدول ۴ آمده است.

با توجه به این جدول، دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۱۰٪ برای چسب های A، M و P به ترتیب ۱۴۵، ۲۶۷ و ۱۹۰ درجه سانتیگراد می باشد و در این محدوده دما، چسب M بهترین عملکرد و پایداری حرارتی را دارد. این در حالی است که دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۵۰٪ برای چسب های A، M و P به ترتیب ۳۸۶، ۳۷۸ و ۴۱۶ درجه سانتیگراد است که به این ترتیب در این گستره دمایی، چسب P بالاترین پایداری حرارتی را دارا بوده و در رتبه بعدی چسب نوع M قرار دارد.



(الف)



(ب)

شکل (۹): (الف): درصد وزن از دست رفته بر حسب دما و (ب): مشتق وزن از دست رفته نسبت به زمان بر حسب دما

رویشی نیز توزیع یکنواخت ذرات SiC در دیواره سلولها را نشان می‌دهد.

۲- برای چسب‌های نوع P و M که استحکام اتصال فوم-ورق به طور قابل ملاحظه‌ای از فوم پیوسته بالاتر می‌باشد، شکست از داخل فوم و نه از سطح تماس انجام می‌گیرد اما برای چسب نوع A که استحکام اتصال فوم-ورق در حدود استحکام فوم پیوسته است، شکست از سطح تماس صورت می‌گیرد.

۳- با افزایش سطح تماس به ترتیب برای اتصالات چسبی فوم-فوم، فوم-ورق و ورق-ورق، استحکام برشی افزایش می‌یابد.

۴- با توجه به خصوصیات چسب‌های مورد استفاده، عملکرد مکانیکی و استحکام برشی به ترتیب از چسب نوع P به M و در نهایت A کاهش می‌یابد.

۵- مناطق با سطح تنش بالا در شبیه‌سازی (بالا و پایین سطح اتصال چسبی فوم-ورق و فوم-فوم) با موقعیت شکست فوم در نمونه‌های آزمون شده، منطبق است.

۶- چسب‌های نوع M و P به طور نسبتاً یکسان دارای پایداری حرارتی بیشتری در مقایسه با چسب نوع A می‌باشند.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اعضای محترم گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد به خاطر همکاری در تولید فوم‌های آلومینیومی، کارشناس محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای مهندس جعفری به خاطر انجام آزمون‌های کشش برشی و کارشناس محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد سرکار خانم مهندس هوشیارصادقیان به جهت انجام مطالعات میکروسکوپی الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## 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.

به منظور بررسی نسبی میزان انرژی حرارتی جذب شده توسط سه نوع چسب در حین افزایش دما، می‌توان از سطح زیر منحنی مشتق وزن از دست رفته نسبت به زمان بر حسب دما (شکل ۹-ب) که در جدول ۴ آمده است، استفاده نمود. همان‌گونه که مشخص است سطح مذکور برای چسب‌های A، M و P به ترتیب ۰/۲۲۲، ۰/۷۹۳ و ۰/۸۱۰ میلی‌گرم در درجه سانتیگراد بر ثانیه است که نشان می‌دهد انرژی حرارتی جذب شده تا تجزیه کامل، برای چسب‌های M و P نسبت به چسب نوع A به مراتب بالاتر می‌باشد.

جدول (۴): داده‌های حاصل از نتایج آزمون TGA بر روی سه نوع چسب.

نوع چسب	دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۱۰٪ (°C)	دمای مربوط به وزن از دست رفته به میزان ۵۰٪ (°C)	سطح زیر منحنی مشتق وزن از دست رفته نسبت به زمان بر حسب دما (mg. °C/sec)
A	۱۴۵	۳۸۶	۰/۲۲۲
M	۲۶۷	۳۷۸	۰/۷۹۳
P	۱۹۰	۴۱۶	۰/۸۱۰

با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که چسب‌های نوع M و P به طور نسبتاً یکسان، دارای پایداری حرارتی بیشتری نسبت به چسب نوع A می‌باشند.

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های ریزساختاری انجام شده بر روی فوم‌های آلومینیومی تولید شده در این تحقیق، آزمون برش کششی انجام شده بر روی اتصالات چسبی فوم-فوم، فوم-ورق و ورق-ورق و شبیه‌سازی این آزمون و نیز آزمون ثقل‌سنجی حرارتی که در این تحقیق صورت گرفت، می‌توان نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:

۱- ریزساختار نوری نمونه فوم تولیدی گویای ساختار یکنواخت سلولها در محصول بوده و تصویر میکروسکوپ الکترونی

- [12] K. Imielinska, L. Guillaumat, R. Wojtyra & M. Castaigns, "Effects of manufacturing and face/core bonding on impact damage in glass/polyester-PVC foam core sandwich panels", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, pp. 1034-1041, 2008.
- [13] S. Rao, R. Das & D. Bhattacharyya, "Investigation of bond strength and energy absorption capabilities in recyclable sandwich panels", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 45, pp. 6-13, 2013.
- [14] M-A. Chen, H-Zh. Li & X-M. Zhang, "Improvement of shear strength of aluminium-polypropylene lap joints by grafting maleic anhydride onto polypropylene", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, pp. 175-187, 2007.
- [15] Y-M. Jen, Ch-W. Ko & H-B. Lin, "Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams", *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 455-462, 2009.
- [16] Y-M. Jen, F-L. Teng & T-Ch. Teng, "Two-stage cumulative bending fatigue behavior for the adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich panels", *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 805-813, 2014.
- [17] ASTM D1002, "Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (Metal-to-Metal)", 2001.
- [18] ASTM E864, "Standard practice for surface preparation of aluminum alloys to be adhesively bonded in honeycomb shelter panels", 2003.
- [19] Hexcel Corporation, "REDUX Bonding Technology", Publication No. RGU 034c, 2003.
- [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] N. Babcsan, "Ceramic Particles Stabilized Aluminum Foams", Miskolc Materials Science and Technology Ph.D. School, Kerpely Antal, 2003.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [۷] ۱. 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، صفحه ۱۲-۱، تابستان ۱۳۹۰.
- [۸] م. د. گلستانی پور، م. توکلی، س. م. زبرجد، ا. باباخانی، ب. نادری "بررسی جذب انرژی پنل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، *مجله مواد نوین*، جلد ۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۲۵، زمستان ۱۳۹۱.
- [9] J. Banhart & H. W. Seeliger, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, pp. 793-802, 2008.
- [10] N. Sedliakova, F. Simancik, J. Kovacik & P. Minar, "Joining of Aluminium Foams", *Proceeding of Symposium Metallschaume*, MIT Verlag, Bremen, pp. 177-185, 1997.
- [11] Charles A. Harper, "Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites", 4th edition, McGraw-Hill, 2004.

#### ۷- پی نوشت

- [1] Delamination threshold load (DTL)
- [2] 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control