

## بررسی اثر استحکام اتصال چسبی در رفتار خمش سه نقطه‌ای پنل‌های ساندویچی

### با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiC<sub>p</sub>

مسعود گلستانی پور<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۲</sup>، سیدمجتبی زبرد<sup>۳</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴، ش.ص ۹۴-۸۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴)

#### 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 تحقیق حاضر از آزمون تجربی خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiC<sub>p</sub> و صفحاتی از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰ استفاده شد. اتصال هسته فومی به صفحات با استفاده از سه نوع چسب متداول صنعتی با استحکام اتصال متفاوت، صورت گرفت. حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی ناشی از خمش سه نقطه‌ای، انرژی جذب شده، رفتار خمش، مدل تغییرشکل و نحوه پیوستگی اتصال چسبی از جمله نتایج حاصل از این تحقیق می‌باشد. از نتایج این تحقیق مشخص گردید که حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی و نیز میزان انرژی جذب شده برای پنل‌های ساندویچی بسته به نوع چسب مورد استفاده، بسیار بیش‌تر از فوم کامپوزیتی بدون استفاده از صفحات است. علاوه بر این در اتصال چسبی مستحکم به دلیل عملکرد بهتر در اتصال‌دهی و استحکام بالاتر اتصال، تخریب نمونه از فصل مشترک اتصال صورت نمی‌گیرد بلکه از داخل هسته فومی صورت می‌پذیرد. همچنین با توجه به استفاده از صفحات با جنس و ضخامت یکسان و فاصله تکیه‌گاهی مشابه و ثابت در این تحقیق، مشخص گردید که تنها استحکام اتصال در تعیین مدل تغییر شکل و رفتار خمشی پنل‌های ساندویچی نقش داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** فوم آلومینیومی، پنل ساندویچی، اتصال چسبی، آزمون خمش سه نقطه‌ای.

<sup>۱</sup> -استادیار گروه پژوهشی مواد و موسسه علمی کاربردی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

<sup>۲</sup> -دانشیار گروه مواد و متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> -استاد بخش مهندسی متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

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

## پیشگفتار

به کارگیری فوم‌های فلزی در سازه‌هایی که به استحکام ویژه بالا نیاز داشته و یا کاربردهایی نظیر عایق حرارتی و صوتی، در سال‌های اخیر توسعه یافته است. این مواد سبک و در عین حال مقاوم، کاربردهای قابل ملاحظه‌ای در ساختمان‌سازی، صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و... یافته‌اند. خاصیت عمده مواد متخلخل مذکور و قابلیت جذب انرژی بالای آن‌ها، تحت تنش‌های فشاری می‌باشد. در این میان پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی ساختارهای جدیدی هستند که با وجود وزن کم عملکردی عالی در پراکنده کردن انرژی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل از آن‌ها به عنوان جاذب انرژی در گستره وسیعی از کاربردها استفاده می‌شود. ساختار متخلخل این مواد امکان تغییر شکل مومسان زیادی را در تنش نسبتاً ثابت فراهم می‌کند و به این ترتیب قبل از تخریب یا شکست، مقادیر زیادی از انرژی جنبشی را جذب می‌نمایند [۱-۵].

یو<sup>۱</sup> و همکارانش [۶] با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک و ضربه‌ای به ترتیب با سرعت‌های ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و ۵ متر بر ثانیه، بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم با چگالی نسبی ۰/۱۷ و صفحات آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳، سه مکانیزم شکست را شناسایی نمودند. ایشان همچنین نشان دادند که فرایند تغییر شکل در ضربه‌هایی با سرعت کم‌تر از ۵ متر بر ثانیه، مشابه حالت شبه‌استاتیک است؛ اما منحنی نیرو-جابجایی متفاوت می‌باشد. در مطالعه تجربی و تئوری دیگر، کراپی<sup>۲</sup> و همکارانش [۷] آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک را بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تجاری آلولایت و شانک و نیز هسته لانه‌زنبوری<sup>۳</sup> انجام دادند. در این مطالعه دو مکانیزم تخریب نوع یک و دو در آزمون خمش سه نقطه‌ای مشاهده گردید و مشخص شد که نیروهای بحرانی حاصل از این آزمون با نتایج حاصل از بررسی تئوری همخوانی دارد. همچنین مشخص گردید که ظرفیت جذب انرژی در این آزمون وابسته به نوع مکانیزم تخریب، قطر متوسط سلول‌ها و کیفیت اتصال هسته به صفحات است. در تحقیقی دیگر آزمون خمش سه نقطه‌ای

شبه‌استاتیک با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه، بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تجاری آلپوراس با صفحات کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن به همراه الیاف کوتاه آرامیدی، توسط سان<sup>۴</sup> و همکارانش [۸] انجام گرفت. در این تحقیق محصولات ساندویچی با بالاترین چقرمگی، جذب انرژی و نیروی شکست خمشی شناسایی گردید. در مطالعه تحقیقاتی دیگر، زو<sup>۵</sup> و همکارانش [۹] آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه را بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و صفحات فولادی انجام دادند. ایشان نشان دادند که افزایش ضخامت هسته و صفحات، سبب افزایش بیشینه نیروی لازم برای خمش پنل می‌شود. در این تحقیق مدل شکست پنل ساندویچی شامل له‌شدگی ابتدایی، آسیب برشی هسته فومی و لایه‌لایه شدن اتصال چسبی در نیروهای خمشی بالا شناسایی شد و بهینه‌ترین استحکام خمشی ویژه پنل‌های ساندویچی نیز با هسته فومی ضخیم و صفحات فولادی نازک حاصل گردید. کبیر<sup>۶</sup> و همکارانش [۱۰] نیز با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک با سرعت ۶ میلی‌متر بر دقیقه بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تجاری آلپوراس و صفحات آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ و ۳۱۰۴ بسیار نازک، مشخص نمودند که با استفاده از صفحات با استحکام بالاتر، تسلیم هسته فومی رخ داده و با به کارگیری صفحات با استحکام کم‌تر، تسلیم صفحات مکانیزم جذب انرژی ناشی از خمش خواهد بود. همچنین مشخص گردید که استفاده از صفحات با استحکام بسیار بالا، اثر اندکی در افزایش استحکام خمشی پنل ساندویچی دارد چرا که در صورت استفاده از صفحات با استحکام کم، مدل‌های دیگری از تسلیم صفحات ملاحظه می‌گردد که استحکام مضاعف به سازه ساندویچی می‌بخشد. علاوه بر این، ایشان نشان دادند که هنگام استفاده از صفحات با استحکام بالاتر، رفتار تغییر شکل در پنل‌هایی که فاصله تکیه‌گاهی کم‌تری دارند به دلیل وجود تنش بالا در هسته و ترک خوردگی برشی هسته بر روی یکی از دو تکیه‌گاه، از حالت تقارن خارج شده و از یک سمت خم می‌شود. در تحقیقی دیگر، یان<sup>۷</sup>

<sup>۴</sup>- Z. Sun

<sup>۵</sup>- G. Zu

<sup>۶</sup>- K. Kabir

<sup>۷</sup>- L. L. Yan

<sup>۱</sup>- J. Yu

<sup>۲</sup>- V. Crupi

<sup>۳</sup>- Honeycomb

ذرات برابر با ۱۰ میکرومتر به عنوان فاز تقویت‌کننده کامپوزیت و همچنین عامل ویسکوزکننده مذاب انتخاب گردید. برای این منظور، ابتدا حرارت‌دهی 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 آلودگی‌ها، گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیوم انجام گرفت. از پودر کربنات کلسیم با خلوص ۹۹/۵٪ وزنی و اندازه متوسط ۵ میکرومتر نیز به عنوان عامل فوم‌ساز<sup>۳</sup> استفاده شد. این پودر نیز به منظور حذف رطوبت، آلودگی سطحی، 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 ریخته‌گری گردابی<sup>۴</sup> در دمای ۶۸۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد تولید و ریخته‌گری 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 ۵ درصد وزنی پودر  $\text{CaCO}_3$  به مذاب در حال اغتشاش اضافه شده و مخلوط بلافاصله برای مدت کم‌تر از ۱ دقیقه هم زده شد. سپس مخلوط در دمای ۷۳۰-۷۱۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۳ دقیقه نگه داشته شد تا کربنات کلسیم تجزیه شده و تولید گاز  $\text{CO}_2$  و در نتیجه تولید تخلخل نماید. در ادامه، فوم تولید شده از کوره خارج شده و در هوا خنک می‌شود. با توجه به ترکیب آلیاژ پایه، در حین تجزیه کربنات کلسیم، اکسیدهای کلسیم، آلومینیوم و منیزیم ایجاد و در جداره داخلی سلول‌ها قرار می‌گیرند و از این طریق به پایداری سلول‌ها کمک می‌نمایند. علاوه بر این وجود اکسیدهای مذکور مانع از مهاجرت ذرات سرامیکی به این سطوح می‌شود [۱۳].

تصویر SEM از ریزساختار فوم کامپوزیتی مورد استفاده نیز در شکل ۱ ب و ج به ترتیب در بزرگنمایی‌های پایین و بالا قابل مشاهده است. در تصویر شکل ۱ ج توزیع نسبتاً

و همکارانش [۱۱] با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم و صفحات از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴، نشان دادند که استفاده از پنل ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم سبب افزایش سخت‌پایی<sup>۱</sup> خمشی، نیروی شکست اولیه، نیروی بیشینه و ظرفیت جذب انرژی می‌شود. گلستانی و همکاران [۱۲] در تحقیق تجربی بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی  $\text{Al A356/SiC}_p$ ، تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر میزان انرژی جذب شده، جدایش صفحه پشتی از هسته فومی، نیروی مسطح و انحنا ایجاد شده در صفحه پشتی را مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید که با افزایش ضخامت هسته فومی و صفحات، میزان انرژی جذب شده، نیروی مسطح، میزان جدایش و انحنا ایجاد شده در صفحه پشتی افزایش می‌یابد.

با وجود تحقیقات فوق‌الذکر تاکنون مطالعه‌ای در راستای بررسی اثر استحکام اتصال در رفتار خمشی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم کامپوزیت آلومینیوم انجام نگرفته است. در تحقیق حاضر از آزمون خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیک بر روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی  $\text{Al A356/SiC}_p$  استفاده شده است. حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی ناشی از خمش سه نقطه‌ای، انرژی جذب شده، رفتار خمش، مدل تغییر شکل و نحوه پیوستگی اتصال چسبی از جمله نتایج این تحقیق می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

پنل‌های ساندویچی مورد استفاده در این تحقیق دارای هسته فوم کامپوزیتی  $\text{Al A356/SiC}_p$  با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC و صفحات رویی از جنس آلومینیوم نوع ۱۱۰۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. هسته فوم آلومینیوم مورد استفاده دارای مورفولوژی سلول بسته<sup>۲</sup> با توزیع نسبتاً همگن تخلخل‌ها (شکل ۱ الف) و چگالی متوسط ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بود که توسط گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد تولید گردیده بود.

به منظور تولید هسته فوم کامپوزیتی، از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 به عنوان فلز پایه استفاده شد. ذرات کاربیدسیلیسیوم با خلوص ۹۸٪ وزنی و اندازه متوسط

<sup>۳</sup>- Foaming Agent

<sup>۴</sup>- Stir Casting

<sup>۱</sup>- Stiffness

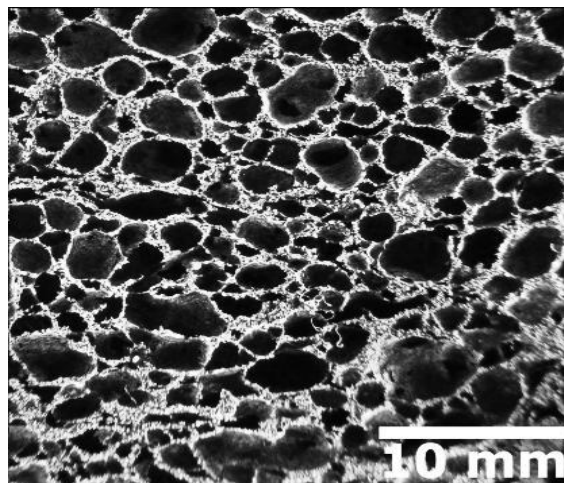
<sup>۲</sup>- Closed-Cell

به منظور بررسی استحکام اتصال در پنل ساندویچی مذکور، رفتار خمشی اتصالات چسبی بین فوم کامپوزیتی و صفحات با استفاده از سه نوع چسب متداول صنعتی، از طریق آزمون خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

یکنواخت ذرات SiC در ضخامت دیواره‌ها مشهود است. مشخصات هسته فوم کامپوزیتی تولید شده و صفحات مورد استفاده در ساخت پنل‌های ساندویچی نیز در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات هسته فوم کامپوزیتی و صفحات مورد استفاده در ساخت پنل‌های ساندویچی

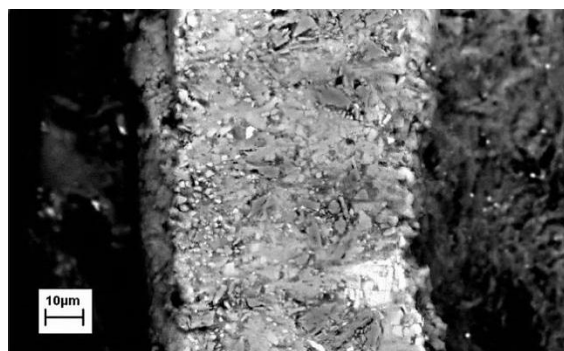
مقدار	خصوصیات	جزء
Al A356	فلز پایه	هسته فوم کامپوزیتی
۱۰	کسر حجمی ذرات کاربید سیلیسیوم (vol%)	
۵	درصد وزنی پودر کربنات کلسیم (wt%)	
۰/۵	چگالی ( $g/cm^3$ )	
۸۱	درصد تخلخل (%)	
۱۰	ضخامت (mm)	
۴/۷	تنش مسطح (MPa)	
۶۹	کرنش تراکم (%)	
۲/۲	ظرفیت جذب انرژی ( $kJ/mm^3$ )	
۰/۲	مدول یانگ (GPa)	
۰/۳	ضریب پواسون	
Al 1100	جنس	صفحات
۲/۷	چگالی ( $g/cm^3$ )	
۳	ضخامت (mm)	
۱۸۰/۵	استحکام کششی (MPa)	
۹۲/۸	مدول یانگ (GPa)	
۰/۳۳	ضریب پواسون	



(الف)



(ب)



(ج)

به منظور مقایسه دقیق‌تر، رفتار خمشی فوم بدون استفاده از صفحات نیز ارزیابی گردید. قبل از چسب کاری، آماده‌سازی سطح و چربی‌زدایی مطابق با پیشنهادات سازنده چسب و استاندارد ASTM E864 [۱۴] بر روی سطوح مورد نظر صورت گرفت. برای این منظور ابتدا و در مرحله پیش‌تمیزکاری، چربی‌های ظاهری توسط برس کاری و سنگ‌زنی نرم حذف شده و سطوحی نسبتاً خشن برای چسب کاری ایجاد گردید. سپس تمیزکاری با شوینده‌های قلیایی به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه انجام شد و پس از غوطه‌وری سطوح در آب و شستشوی نهایی به مدت ۱ تا ۲ دقیقه، خشک کردن در هوا در مدت زمان ۱ ساعت صورت پذیرفت. در نهایت با توجه به دستورالعمل سازنده، چسب کاری بر روی سطوح فوم و صفحات آلومینیومی انجام

شکل ۱- ساختار میکروسکوپی (الف) نوری و (ب و ج) الکترونی به ترتیب در بزرگنمایی پایین و بالا از هسته فوم آلومینیومی سلول بسته مورد استفاده در این تحقیق با چگالی ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب

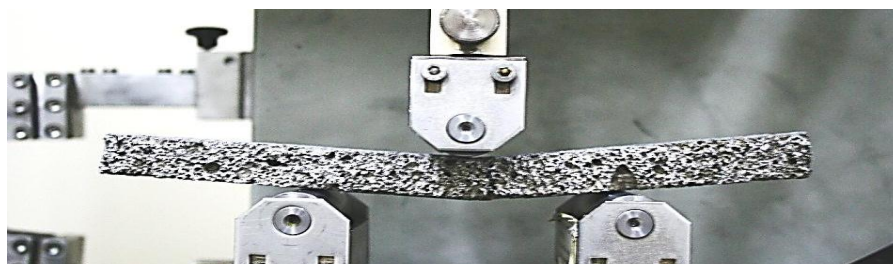
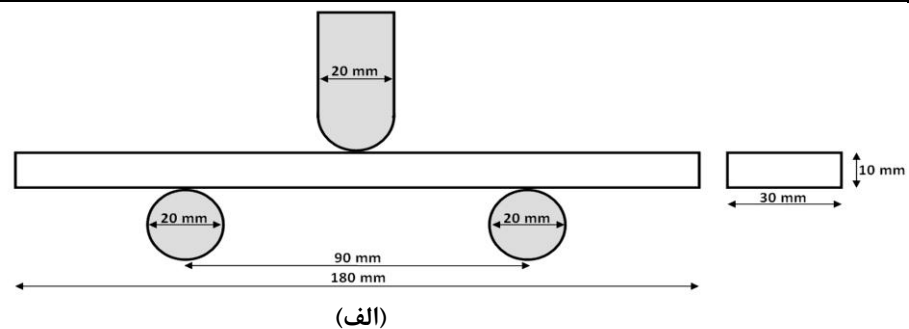
نیرو-جابجایی مطابق با استاندارد ASTM D790 [۱۶] در کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت و در قالب نمودار گزارش گردید. در این آزمون میزان حرکت فک بالای دستگاه در راستای عمودی به عنوان جابجایی تعریف شد. قابل ذکر است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج آزمایش، هر آزمون حداقل سه بار بر روی نمونه‌های مشابه انجام و نتیجه با مقادیر میانگین انتخاب و گزارش شد. تصویر SEM از مقطع اتصال نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450VP (35 kV) تهیه و از لحاظ نحوه و کیفیت اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

شد. مشخصات چسب‌های مورد استفاده به همراه نحوه اعمال آن‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است.

نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM E290 [۱۵] آماده گردید. شکل ۲ الف شماتیک انجام آزمون و ابعاد کلی نمونه مورد استفاده را نشان می‌دهد. آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه آزمون کشش مدل Zwick Z250 و با سرعت حرکت فک ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه بر روی نمونه‌های چسب‌کاری شده و نمونه فوم کامپوزیتی بدون صفحه محافظ (نمونه شاهد) صورت گرفت (شکل ۲ ب). داده‌های

جدول ۲- مشخصات و نحوه اعمال چسب‌های مورد استفاده جهت تولید پنل ساندویچی

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



(ب)

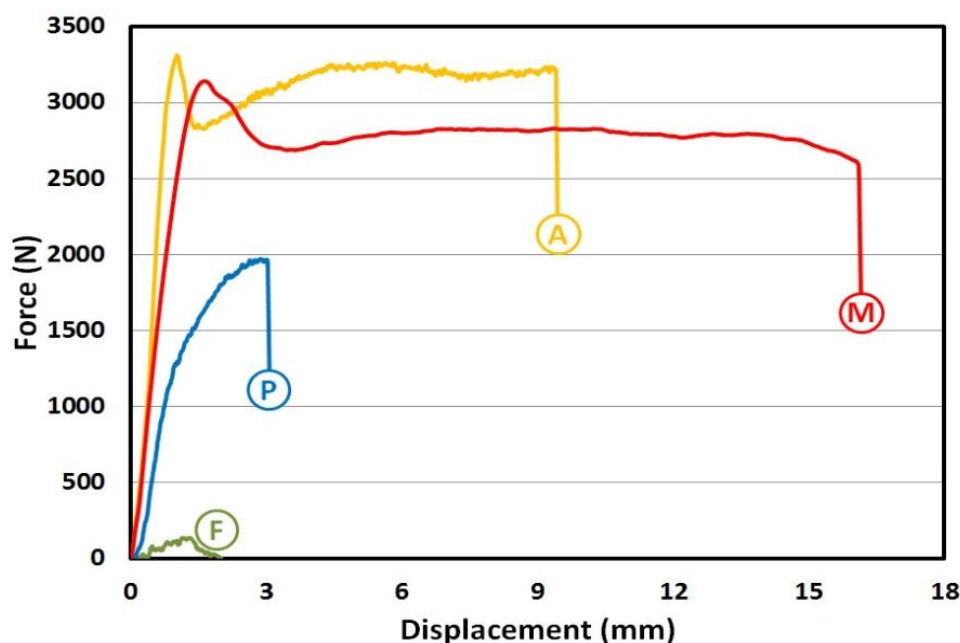
شکل ۲- الف) شکل شماتیک و ابعاد نمونه‌های آماده شده و ب) نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای

## نتایج و بحث

### منحنی نیرو-جابجایی

منحنی‌های نیرو-جابجایی فک حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های فوم و پنل ساندویچی اتصال یافته با سه نوع چسب مورد استفاده، در شکل ۳ و نتایج کمی مستخرج از منحنی‌های مذکور در جدول ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به داده‌های جدول ۳، حداکثر نیروی لازم جهت گسیختگی ناشی از خمش سه نقطه‌ای برای پنل‌های ساندویچی بسته به نوع چسب مورد استفاده، به طور متوسط حدود ۱۴ تا ۲۴ برابر بیش‌تر از فوم کامپوزیتی بدون استفاده از صفحات می‌باشد. حداکثر این نیرو با

استفاده از چسب‌های M، A و P به ترتیب ۳۱۴۲، ۳۳۱۱ و ۱۹۷۲ نیوتن می‌باشد. مقدار جذب انرژی خمشی که از اندازه‌گیری سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای به دست می‌آید، برای چسب M برابر با ۴۳/۶۴ ژول، برای چسب A برابر با ۲۸/۲۶ ژول و برای چسب P برابر با ۴/۱۹ ژول است. این مقدار برای فوم کامپوزیتی بدون استفاده از صفحات (نمونه F)، بسیار اندک و در حدود ۰/۱۲ ژول می‌باشد.



شکل ۳- نمودار نیرو-جابجایی فک در آزمون خمش سه نقطه‌ای برای فوم آلومینیمی (F) و پنل‌های ساندویچی تولید شده با سه نوع چسب A، M و P مورد استفاده

جدول ۳- نتایج کمی مستخرج از منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها

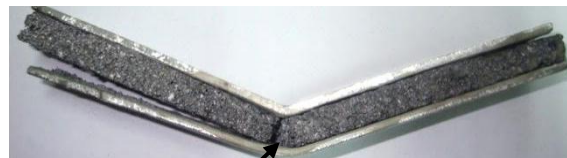
کد نمونه	نیروی لازم برای گسیختگی (N)	جذب انرژی خمشی (J)	میزان افزایش نیروی گسیختگی نسبت به هسته	میزان افزایش جذب انرژی خمشی نسبت به هسته
F	۱۳۸	۰/۱۲	-	-
A	۳۳۱۱	۲۸/۲۶	۲۴ برابر	۲۳۵/۵ برابر
M	۳۱۴۲	۴۳/۶۴	۲۳ برابر	۳۶۳/۶ برابر
P	۱۹۷۲	۴/۱۹	۱۴ برابر	۳۴/۹ برابر

### رفتار خمشی و مدل تغییر شکل

شکل ۴، تصویر نمونه‌های آزمون شده را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که در اتصال حاصل از چسب‌های M و A به دلیل عملکرد بهتر در اتصال دهی و استحکام بالاتر اتصال، تخریب نمونه از داخل هسته فومی و نه از فصل مشترک اتصال صورت گرفته است. (شکل ۴ ج و ۴ د) در حالی که در اتصال حاصل از چسب P، گسستگی در فصل مشترک اتصال رخ داده است (شکل ۴ ب).



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴- رفتار خمشی فوم کامپوزیت آلومینیوم و پنل‌های ساندویچی، (الف) بدون صفحات، (ب) صفحات با اتصال توسط چسب P، (ج) صفحات با اتصال توسط چسب A و (د) صفحات با اتصال توسط چسب M

با توجه به شکل ۳ برای نمونه فوم بدون استفاده از صفحات (F) و نمونه پنل ساندویچی با چسب P مشاهده می‌شود که در ابتدای بارگذاری نیرو به صورت خطی با جابجایی افزایش یافته و پس از آن این افزایش غیرخطی می‌شود. افزایش سطح نیرو تا رسیدن به مقدار بیشینه

ادامه یافته و پس از آن کاهش نیرو با جابجایی ملاحظه می‌شود. مطابق با یافته‌های کبیر و همکارانش [۱۰] در مورد نمونه‌های فومی بدون صفحات، شکست با جوانه‌زنی ترک در سمت کششی نمونه رخ می‌دهد (محل مشخص شده با فلش در شکل ۴ الف). ایشان با استفاده از تصویربرداری ویدیویی هم‌زمان با آزمون خمشی، نشان دادند که اولین ترک در مرکز نمونه (با کمی انحراف احتمالی بسته به عیوب داخلی نمونه نظیر دیواره‌های نازک یا سلول‌های بزرگ) و در بیشینه نیرو در نمودار نیرو-جابجایی رخ می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۴ ب مشخص است، برای نمونه پنل اتصال یافته با چسب P، به دلیل ضعف اتصال چسبی، این اتصال گسسته شده و پس از آن نمونه با لغزش در محل اتصال گسسته شده، مشابه با نمونه فوم بدون صفحات (F) عمل نموده و از سمت بارگذاری کششی دچار ترک خوردگی و تخریب شده است (محل مشخص شده با فلش در شکل ۴ ب). پس از شکل‌گیری ترک اولیه، نیرو کاهش یافته و رشد ترک در امتداد ضخامت نمونه تا ایجاد تغییرشکل V شکل و متقارن در پنل ادامه می‌یابد.

با ملاحظه شکل ۴ ج و د مشخص می‌شود که تغییرشکل در نمونه‌های پنل اتصال یافته با چسب M و A نامتقارن بوده و در منحنی نیرو-جابجایی خمشی نیز تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. شکل ۳ برای نمونه‌های پنل ساندویچی با چسب‌های M و A، رفتار الاستیک و خطی در گستره کوچکی از جابجایی را نشان می‌دهد. بعد از آن افزایش غیرخطی سطح نیرو تا رسیدن به مقدار بیشینه ادامه یافته و سپس کاهش نیرو با جابجایی ملاحظه می‌شود. تا به اینجای کار رفتار مشابه با نمونه بدون صفحات اما با سطح نیروی بالاتر است. با ادامه بارگذاری روند کاهش سطح نیرو کند شده و مجدداً افزایش نیرو با جابجایی ملاحظه می‌شود [۹، ۱۰، ۱۷].

کراپی و مونتانی <sup>۱</sup> [۱۷] دو رفتار تغییرشکل پس از تخریب، برای نمونه‌های تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای ارائه نمودند. این دو رفتار شامل تغییرشکل مدل I و مدل II، به ترتیب با نام‌های متقارن و نامتقارن توسط کبیر و همکارانش [۱۰] نیز بیان گردید که در شکل ۵ الف و ب

<sup>۱</sup> - Crupi and Montanini

فومی، در دو صفحه بالا و پایین پنل تشکیل می‌شوند. با ادامه بارگذاری، به سبب استحکام اتصال قوی، تنش برشی بالاتری به هسته فومی منتقل شده و لولای اضافی E در صفحه پایینی و به طور اتفاقی در روی یکی از تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌شود. به این ترتیب ترک خوردگی هسته فومی در راستای طول نمونه (محل‌های مشخص شده با فلش در شکل‌های ۴ ج و د)، رخ می‌دهد. این شرایط بر روی نمودار نیرو-جابجایی (نمونه‌های A و M در شکل ۳) با افزایش سطح نیرو و ایجاد نقطه بیشینه نیروی دوم نمایان می‌شود [۹،۱۰،۱۷].

با مقایسه رفتار نمونه‌های A و M در شکل ۴، با وجود نیروی بیشینه تقریباً مشابه، چسب M با پایه پلی‌اورتان علاوه بر مقاومت خمشی و چقرمگی بالا، به سبب قابلیت فوم‌شوندگی که دارا است، به درون تخلخل‌های هسته فومی فرو رفته و پس از فوم شدن و قفل کردن اتصال (شکل ۶)، پیوستگی مطلوبی را ایجاد می‌نماید. به این ترتیب پیوستگی اتصال تا مقادیر بالای جابجایی حفظ شده و میزان جذب انرژی بالایی برای پنل ساندویچی حاصل می‌شود.

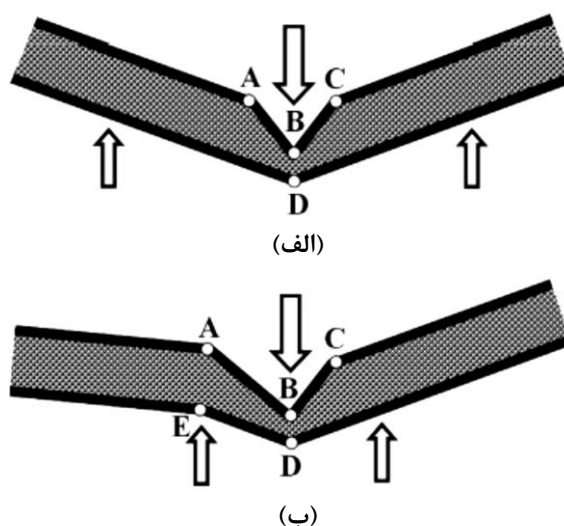


شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم شدن چسب M در داخل حفرات هسته فومی و قفل شدن و پیوستگی مطلوب اتصال

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al<sub>3</sub>SiC<sub>p</sub> با ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC و صفحات رویی از جنس آلومینیوم نوع ۱۱۰۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر و فوم کامپوزیتی بدون حضور صفحات استفاده شد. با توجه

مشاهده می‌شود. ایشان نشان دادند که نوع تغییرشکل ارتباطی به کیفیت و ابعاد هسته فومی نداشته و شرایط متقارن برای پنل‌هایی با صفحات کم استحکام، اتصال ضعیف و یا فاصله تکیه‌گاهی زیاد رخ می‌دهد (مشابه با شرایط نمونه‌های P و F). این در حالی است که تغییرشکل نامتقارن در پنل‌هایی با صفحات با استحکام بالا، اتصال قوی و یا فاصله تکیه‌گاهی کم صورت می‌پذیرد (مشابه با شرایط نمونه‌های A و M). در تحقیق حاضر با توجه به استفاده از صفحات با جنس و ضخامت یکسان و فاصله تکیه‌گاهی مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که تنها استحکام اتصال در تعیین مدل تغییرشکل نقش داشته است.



شکل ۵- رفتار تغییرشکل (الف) مدل I (متقارن) و (ب) مدل II (نامتقارن) در آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی پنل‌های ساندویچی [۱۷]

رفتار متقارن تغییرشکل پس از تخریب (شکل ۵ الف)، با فرورفتگی پنل زیر نقطه بارگذاری مرکزی و تشکیل دو لولای B و D به ترتیب در دو صفحه بالا و پایین پنل و دو لولای A و C در صفحه بالایی و در طرفین نقطه بارگذاری آغاز می‌شود. با ادامه تخریب و کاهش سطح نیرو، پنل حول نقاط B و D چرخیده و جابجایی افزایش می‌یابد (نمونه‌های P و F در شکل ۳).

در مورد رفتار نامتقارن تغییرشکل پس از تخریب (شکل ۵ ب)، فرورفتگی پنل در نقطه بارگذاری مرکزی باعث شکل‌گیری دو لولای A و C در صفحه بالایی می‌شوند. دو لولای دیگر یعنی B و D نیز با له شدن هسته



فوم‌شوندگی خود، بهترین عملکرد را در اتصال‌دهی اجزای پنل ساندویچی نشان داد.

- به طور کلی پیشنهاد می‌شود به منظور اتصال‌دهی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم از چسب‌های فوم‌شونده ترجیحاً با پایه پلی‌اورتان و با انعطاف‌پذیری بالا استفاده شود تا چسب مذکور به درون تخلخل‌های هسته فومی نفوذ نموده و پس از فوم شدن و قفل کردن اتصال، پیوستگی مطلوبی را ایجاد نماید. به این ترتیب پیوستگی اتصال تا مقادیر بالای جابجایی حفظ شده و میزان جذب انرژی بالایی برای پنل ساندویچی حاصل می‌شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اعضای محترم گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی خراسان رضوی به دلیل همکاری در تولید فوم‌های آلومینیومی زمینه کامپوزیتی، کارشناس محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای مهندس جعفری به دلیل انجام آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و کارشناس محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد سرکار خانم مهندس هوشیارصادقیان به جهت انجام میکروسکوپی الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### References

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

به تحقیق انجام شده می‌توان نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:

- حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی ناشی از خمش سه نقطه‌ای برای پنل‌های ساندویچی بسته به نوع چسب مورد استفاده، به طور متوسط حدود ۱۴ تا ۲۴ برابر بیش‌تر از فوم کامپوزیتی بدون استفاده از صفحات است.
- مقدار جذب انرژی خمشی برای چسب M برابر با ۴۳/۶۴ ژول، برای چسب A برابر با ۲۸/۲۶ ژول و برای چسب P برابر با ۴/۱۹ ژول است. این مقدار برای فوم کامپوزیتی بدون استفاده از صفحات، بسیار اندک و در حدود ۰/۱۲ ژول است.
- در اتصال حاصل از چسب‌های M و A به دلیل عملکرد بهتر در اتصال‌دهی و استحکام بالاتر اتصال، تخریب نمونه از داخل هسته فومی و نه از فصل مشترک اتصال صورت گرفته در حالی که در اتصال حاصل از چسب P، گسستگی در فصل مشترک اتصال رخ داده است.
- در تحقیق حاضر با توجه به استفاده از صفحات با جنس و ضخامت یکسان و فاصله تکیه‌گاهی مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که تنها استحکام اتصال در تعیین مدل تغییرشکل نقش اساسی داشته است.
- چسب M با پایه پلی‌اورتانی و انعطاف‌پذیر خود علاوه بر مقاومت خمشی و چقرمگی بالا، به سبب قابلیت

Engineering Materials, Vol. 10, pp. 793-802, 2008.

- 5-W. Hou, F. Zhu, G. Lu, D.N. Fang, "Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core", International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, pp. 1045-1055, 2010.
- 6-J. Yu, E. Wang, J. Li and Z. Zheng, "Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending", International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 885-894, 2008.
- 7-V. Crupi, G. Epasto and E. Guglielmino, "Comparison of aluminium sandwiches for

lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam”, *Marine Structures*, Vol. 30, pp. 74-96, 2013.

8-Z. Sun, X. Hu, S. Sun and H. Chen, “Energy-absorption enhancement in carbon-fiber aluminum-foam sandwich structures from short aramid-fiber interfacial reinforcement”, *Composites Science and Technology*, Vol. 77, pp. 14-21, 2013.

9-G. Zu, R. Lu, X. Li, Z. Zhong, X. Ma, M. Han and G. Yao, “Three-point bending behavior of aluminum foam sandwich with steel panel”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, pp. 2491-2495, 2013.

10-K. Kabir, T. Vodenitcharova and M. Hoffman, “Response of aluminium foam-cored sandwich panels to bending load”, *Composites: Part B*, Vol. 64, pp. 24-32, 2014.

11-L. L. Yan, B. Han, B. Yu, C. Q. Chen, Q. C. Zhang and T. J. Lu, “Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores”, *Materials and Design*, Vol. 60, pp. 510-519, 2014.

۱۲-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 ۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۲۵، زمستان ۱۳۹۱.

13-M. Golestanipour, H. Amini Mashhadi, M. S. Abravi, M. Malekjafarian, M. H. Sadeghian, “Manufacturing of Al/SiC<sub>p</sub> composite foams using calcium carbonate as foaming agent”, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 923-927, 2011.

14-ASTM E864 Standard, “Standard practice for surface preparation of aluminum alloys to be adhesively bonded in honeycomb shelter panels”, 2003.

15-ASTM E290 Standard, “Standard test method for Bend Testing of Material for Ductility”, 1997.

16-ASTM D790 Standard, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, 2003.

17-V. Crupi and R. Montanini, “Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 509-521, 2007.