

## بررسی جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ‌کاری

مسعود گلستانی پور<sup>۱\*</sup>، مینو توکلی<sup>۲</sup>، سید مجتبی زبرد<sup>۳</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۴</sup> و بهروز نادری<sup>۵</sup>

### چکیده

پنل‌های ساندویچی متشکل از هسته فوم آلومینیومی و صفحات آلومینیومی، ساختارهایی با قابلیت بالای جذب انرژی می‌باشند. در این پژوهش، آزمون سوراخ‌کاری جهت بررسی انرژی جذب شده، بر روی نمونه‌های گوناگون پنل ساندویچی انجام گرفت. در این آزمایش‌ها، تاثیر پارامترهای گوناگون از جمله ضخامت فوم و صفحات بر مقدار انرژی جذب شده، جدا شدن صفحه پشتی از فوم، نیروی مسطح و انحنا (کرنش) ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که با افزایش ضخامت صفحات، انرژی جذب شده، نیروی مسطح، میزان جدایش و کرنش ایجاد شده در صفحه پشتی افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت هسته فومی نیز مقدار انرژی جذب شده و نیروی مسطح افزایش می‌یابد، اما میزان جدایش و کرنش ایجاد شده در صفحه پشتی به سبب جذب بیش‌تر انرژی به وسیله هسته فومی، کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پنل ساندویچی، فوم آلومینیومی، سوراخ‌کاری، انرژی جذب شده.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد و عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی واحد مشهد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استاد گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

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

۵- کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

\* نویسنده مسئول مقاله: [m.golestanipour@gmail.com](mailto:m.golestanipour@gmail.com)

### پیشگفتار

در دهه اخیر، دسته‌ای از مواد متخلخل به نام فوم‌های فلزی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی ویژه مانند چگالی کم و در عین حال سفتی بالا و عایق بودن صوتی و حرارتی و نفوذپذیری گاز بالا، مطرح شده و جذابیتی بسیار یافته‌اند. این مواد برای ساختارهای سبک، جذب انرژی و نیز مدیریت حرارتی پیشنهاد می‌شوند. از جمله کاربردهای عمده فوم‌های فلزی در صنایع خودرو و هوافضا می‌باشد که علت اصلی آن خاصیت جذب انرژی بسیار بالا در تنش‌های فشاری، در این گروه مواد است. در این میان، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل دارا بودن چگالی پایین نسبت به سایر فلزات و نیز در دسترس بودن و سهولت تبدیل به فوم، به عنوان پرکاربردترین مواد در تولید فوم‌های فلزی بشمار می‌روند. فوم‌های فلزی با روش‌های گوناگونی از جمله متالورژی پودر، دمیدن گاز به درون مذاب، استفاده از عامل فوم‌ساز و... تولید می‌شوند [۱-۸].

روش تولید فوم با استفاده از عامل فوم‌ساز از جمله روش‌های پرکاربرد در تولید فوم‌های آلومینیومی می‌باشد. در این روش برای تولید فوم آلومینیومی ابتدا ماده ویسکوزکننده به مذاب افزوده می‌شود، سپس عامل فوم‌ساز اضافه شده که تحت تاثیر حرارت، گاز آزاد می‌کند. پس از منسب شدن مذاب، به تدریج محفظه فوم‌سازی پر می‌شود. هنگامی که فوم‌سازی کامل شد، پیش از این که گاز تولیدی از داخل مذاب خارج شود و حباب‌ها به هم بپیوندند یا از بین بروند، مذاب سرد می‌شود تا فوم منجمد گردد [۱-۳].

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 تنشی ثابت شده که جذب انرژی جنبشی زیادی را پیش از تخریب ساختار سبب می‌شود [۱].

پژوهش‌های گوناگونی در زمینه جذب انرژی در پنل‌های ساندویچی با هسته فومی تحت بارگذاری شبه استاتیکی صورت گرفته است. پژوهشگری به نام Mohan

و همکارانش پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم آلپوراس را با صفحاتی از مواد گوناگون (آلومینیوم، فولاد زنگ نزن و کامپوزیت زمینه پلیمری با الیاف تقویت کننده کربنی) مورد آزمون فروروندگی شبه استاتیکی با فرورونده سرتخت و سر نیمه کرووی قرار دادند. مشخص گردید که پنل ساندویچی از راه مکانیزم‌های شکست شامل فرورفتگی هسته، خرد شدن هسته، سوراخ کاری و خمش صفحات تخریب می‌گردد که هر کدام به نوبه خود سبب جذب انرژی می‌شود [۹].

پژوهشگر دیگری به نام Lu و همکارانش نیز مطالعات تجربی و المان محدود را بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی ساخت شرکت سایمت مورد آزمون فروروندگی شبه استاتیکی با فرورونده با سر نیمه کرووی انجام دادند. در این پژوهش چهار مکانیزم تغییرشکل و جذب انرژی شامل خمش کلی، فرورفتگی موضعی، خمش کلی همراه با فرورفتگی موضعی و فرورفتگی موضعی همراه با خمش در طول لبه مقید، شناسایی گردید [۱۰].

پژوهشگری به نام Ruan و همکارانش نیز پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی آلپوراس و صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم را مورد آزمون فروروندگی با فرورونده سر کرووی قرار دادند. مشخص گردید که عواملی نظیر افزایش ضخامت هسته فومی و صفحات، افزایش قیدها و سنباذه‌زنی صفحات پیش از اتصال منجر به افزایش مقدار جذب انرژی می‌شود [۱۱].

پژوهشگر دیگری به نام Hou و همکارانش نیز پارامترهایی نظیر سرعت برخورد، ضخامت صفحه، ضخامت و چگالی هسته فومی و شکل پرتابه را روی حد بالستیک و جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی سایمت و صفحات آلیاژ آلومینیوم Al-5005H34 مورد آزمون سوراخ کاری شبه استاتیکی 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 می‌شود [۴].

مرور پژوهش‌های بالا در زمینه جذب انرژی پنل‌های ساندویچی نشان می‌دهد که تاثیر پارامترهایی همچون ضخامت هسته فومی و صفحات بر نیروی مسطح، جدایش و کرنش صفحه پشتی مورد بررسی قرار نگرفته است.

شده از کوره خارج و در هوا خنک شد. مقدار ۳ درصد وزنی از پودر کربنات کلسیم و مقدار ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC برای تولید محصولات فومی استفاده گردید [۱۳، ۱۲].

پنل‌های ساندویچی مورد استفاده در این پژوهش دارای صفحاتی از جنس آلومینیوم سری 1xxx با ضخامت ۰/۵ و ۲ میلیمتر و هسته فوم آلومینیوم با ضخامت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر می‌باشد. طول و عرض پنل‌های ساندویچی تهیه شده ۱۳۰×۱۳۰ میلیمتر مربع است. شکل ۱ تصویری از پنل‌های ساندویچی تولید شده را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات پنل‌های تهیه شده ذکر گردیده است. دو نمونه بدون هسته فومی و یک نمونه بدون صفحه نیز جهت مقایسه و به عنوان نمونه شاهد در جدول آورده شده است. جهت اتصال صفحات و هسته فومی و تهیه پنل ساندویچی، از چسب آهن در دمای محیط و تحت فشار استفاده شده است. شکل ۲ مراحل تولید پنل ساندویچی را نشان می‌دهد [۴].

فرورونده مورد استفاده در آزمون سوراخ‌کاری دارای نوک مخروطی با زاویه ۶۰ درجه و قطر ۹ میلیمتر می‌باشد (شکل ۳). بمنظور افزایش دقت در آزمون سوراخ‌کاری و نیز اندازه‌گیری کلی تغییرشکل، سطح صفحات پس از

سنباده‌کاری بر حسب سانتی‌متر شبکه‌بندی شدند. جهت انجام آزمون سوراخ‌کاری، نمونه‌ها در فیکسچر طراحی شده قرار گرفته و به وسیله دستگاه آزمون فشار مدل ZWICK 250KN با سرعت ۰/۰۲ mm/s مورد سوراخ‌کاری قرار می‌گیرند (شکل ۴). داده‌های نیرو-جابجایی در کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت می‌شود. گفتنی است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون دست‌کم دو بار روی نمونه‌های مشابه انجام شده و نتایج ثبت شده حاصل میانگین‌گیری از داده‌های خروجی از آزمون‌های تکرار شده می‌باشد.

### نتایج و بحث

نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های ۱۰۲۰ و ۲۰۲۰ در شکل ۵-الف و نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های ۱۰۵ و ۲۰۵ در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که موقعیت بیشینه نیرو در

افزون بر این، در این پژوهش، پنل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تولید شده به وسیله پژوهشگران از راه فرآیند فوم‌سازی با عامل فوم‌ساز مورد آزمون سوراخ‌کاری با فرورونده مخروطی قرار گرفته و رفتار جذب انرژی آن بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 به عنوان فلز پایه انتخاب گردید. ذرات SiC با خلوص ۹۸٪ وزنی و میانگین اندازه ذرات برابر با ۱۰ میکرومتر به عنوان فاز تقویت‌کننده که نقش پایدارساز یا عامل ویسکوزکننده در فرایند تولید فوم را نیز دارد، تهیه شد. حرارت‌دهی ذرات SiC به مدت یک ساعت در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد بمنظور حذف آلودگی‌ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه، بهبود ترشوندگی ذرات SiC به وسیله مذاب آلومینیوم، انجام گردید. پودر کربنات کلسیم با خلوص ۹۹/۵٪ وزنی و اندازه متوسط ۵ میکرومتر به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شد. این پودر نیز بمنظور حذف رطوبت و آلودگی سطحی و افزایش ویژگی‌های ترشوندگی و به تبع آن توزیع بهتر این ذرات در مذاب آلومینیوم به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد.

برای تولید محصول فومی ابتدا شمش کامپوزیتی از زمینه آلومینیومی به همراه مقادیر مشخص از ذرات SiC با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی<sup>۱</sup> در دمای ۶۸۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد تولید و ریخته‌گری شد. این شمش 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 شد. پس از آن، 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 مخلوط در دمای ۷۳۰-۷۱۰ درجه سانتیگراد برای مدت چند دقیقه نگه داشته شد تا کربنات کلسیم تجزیه شده و تولید گاز CO<sub>2</sub> نماید. در ادامه، فوم تولید

<sup>۱</sup>Stir Casting

بیشینه در شکل ۵- الف و میانگین نیرو در قسمت سطح نمودار پس از نقطه بیشینه نخست در نمودارهای شکل ۵-ب) برای تمامی نمونه‌ها استخراج شده که نتایج آن در جدول ۲ آمده و در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر نیروی مسطح ( $F_p$ )

همان‌گونه که در شکل‌های ۶- الف مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت هسته فومی و هم‌چنین، چگالی آن، نیروی مسطح ( $F_p$ ) افزایش می‌یابد. دلیل این امر مقاومت بیش‌تر هسته فومی در برابر سوراخ‌کاری می‌باشد. در شکل ۶- ب نیز تاثیر ضخامت صفحات بر نیروی مسطح ( $F_p$ ) قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش ضخامت صفحات، نیروی مسطح ( $F_p$ ) نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن مقاومت بیش‌تر پنل ساندویچی در برابر نیروی سوراخ‌کاری است.

### تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر انرژی جذب شده

شکل‌های ۷- الف و ۷- ب به ترتیب اثر ضخامت هسته فومی و نیز تاثیر ضخامت صفحات بر میزان انرژی جذب شده به وسیله پنل ساندویچی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت فوم و یا افزایش ضخامت صفحات، انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش ضخامت، سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی افزایش یافته و این امر افزایش انرژی جذب شده به وسیله هسته فومی و به تبع آن پنل ساندویچی را سبب می‌شود.

### تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر میزان جدایش صفحه پشتی

شکل ۸ میزان جدایش صفحه پشتی در نمونه ۲۰۵ و روش اندازه‌گیری آن را نشان می‌دهد. تاثیر ضخامت صفحات و هسته فومی بر میزان جدایش صفحه پشتی در نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش ضخامت فوم، انرژی جذب شده افزایش یافته و این امر موجب کاهش تغییرشکل و میزان

نمودارها از لحاظ جابه‌جایی یکسان می‌باشد که می‌توان آن را به ضخامت یکسان صفحات در نمونه‌های یاد شده ارتباط داد.

با توجه به شکل ۵- الف، در نمودار نیرو- جابه‌جایی دو نمونه ۱۰۲۰ و ۲۰۲۰ می‌توان سه مرحله زیر را تفکیک نمود:

(۱) تخریب صفحه بالایی: در مرحله نخست، نیروی اعمالی بین فرورونده و نمونه از نقطه صفر تا نقطه بیشینه نخست افزایش می‌یابد. پس از آن، نیرو ناگهان کاهش می‌یابد که نشان دهنده خمش و سوراخ شدن صفحه بالایی است.

(۲) تخریب هسته فومی: در این مرحله نیروی سوراخ‌کاری به کم‌ترین مقدار می‌رسد که نشان دهنده سوراخ شدن هسته می‌باشد. در فاصله بین دو نقطه بیشینه، هسته در نیروی ثابت در حال سوراخ شدن است. به این ترتیب، فاصله دو نقطه بیشینه تقریباً برابر با ضخامت هسته فومی است.

(۳) تخریب صفحه پشتی: در این مرحله، بار دیگر نیرو تا نقطه بیشینه دوم افزایش می‌یابد تا جایی که هسته متراکم شده و صفحه پشتی سوراخ می‌شود. هنگامی که فرورونده به داخل صفحه پشتی نفوذ کرد، نیرو به سمت صفر کاهش می‌یابد، اما به دلیل اثر اصطکاک هیچ‌گاه صفر نمی‌شود.

با توجه به شکل ۵- ب و نمودارهای نیرو-جابه‌جایی دو نمونه ۱۰۵ و ۲۰۵ مشخص است که در نمونه ۲۰۵ با افزایش ضخامت فوم، سطح زیر نمودار نسبت به نمونه ۱۰۵ افزایش یافته و نیروی بیشینه نیز بیش‌تر شده است. در این دو نمودار مرحله سوم یعنی تخریب صفحه پشتی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن ضخامت کم صفحه پشتی و نیروی اندک مورد نیاز جهت سوراخ‌کاری آن می‌باشد. این در حالی است که نقطه بیشینه نخست و افزایش نیرو برای سوراخ‌کاری صفحه بالایی وجود دارد که این امر به خاطر مقاومت هسته فومی در برابر سوراخ‌کاری صفحه بالایی است که این پشتیبانی برای صفحه پشتی موجود نیست.

از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی بدست آمده، انرژی جذب شده (سطح زیر منحنی) و نیروی مسطح  $F_p$  (متوسط نیرو در قسمت مسطح نمودار بین دو نقطه

افزایش مقاومت در برابر نیروی سوراخ‌کاری است که موجب می‌شود تمایل به خمش در صفحه پستی بیش‌تر از سوراخ شدن باشد (شکل ۱۰-ب).

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمون سوراخ‌کاری بر روی پنل‌های ساندویچی تولیدشده با ضخامت‌های متفاوت هسته فومی و صفحات انجام شد. مشاهده گردید که افزایش ضخامت هسته فومی و صفحات باعث گسترش سطح زیر نمودار می‌شود. در نتیجه، انرژی جذب شده و نیروی مسطح نیز افزایش می‌یابد. افزون بر این، تاثیر ضخامت صفحات بر میزان جداشدن صفحه پستی از هسته فومی و کرنش صفحه پستی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با افزایش ضخامت صفحات، میزان جداشدن صفحه پستی و کرنش آن نیز افزایش می‌یابد. افزون بر این، مشخص شد که با افزایش ضخامت هسته فومی، انرژی جذب شده و نیروی مسطح افزایش یافته و به سبب این افزایش در جذب انرژی، میزان جداشدن و کرنش صفحه پستی کاهش می‌یابد.

### سپاسگزاری

نویسندگان از اعضای گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی واحد مشهد به جهت تولید نمونه‌های پنل ساندویچی و کارشناس محترم آزمایشگاه مکانیکی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد جناب آقای مهندس جعفری به خاطر انجام آزمون‌های سوراخ‌کاری، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### References

- 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, and H.N.G. Wadley, "Metal Foams-A Design Guide", Butterworth-Heinemann, London, 2000.
- 3- H.P. Degischer, and B. Kriszt, "Handbook of cellular metals", Weinheim, Wiley-VCH, 2002.

جدایش صفحه پستی می‌شود (شکل ۹-الف). افزون بر این، با افزایش ضخامت صفحات، به دلیل افزایش مقاومت در برابر نیروی سوراخ‌کاری، تمایل به خمش بیش‌تر از سوراخ‌شدن می‌گردد که این امر سبب افزایش میزان جدایش در صفحه پستی می‌شود (شکل ۹-ب). در واقع، با افزایش ضخامت صفحات، انحنای حفره ایجاد شده در اثر سوراخ‌کاری افزایش یافته و موجب افزایش فاصله بین صفحه پستی و هسته فومی شده است.

### تاثیر ضخامت هسته فومی و صفحات بر میزان کرنش صفحه پستی

برای محاسبه کرنش صفحه پستی از رابطه (۱) استفاده شده است:

$$\varphi_{back} = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (1)$$

در این رابطه،  $l_1$  طول تغییر فرم یافته صفحه پستی در راستای مقطع برش خورده پنل ساندویچی و  $l_0$  طول اولیه صفحه در همان راستا می‌باشد. گفتنی است که راستای اندازه‌گیری از قطر اصلی سوراخ ایجاد شده، در صفحه پستی عبور می‌کند.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت هسته فومی، میزان کرنش صفحه پستی ( $\varphi_{back}$ ) کاهش و با افزایش ضخامت صفحات این مقدار افزایش می‌یابد. مشخص گردید که با افزایش ضخامت هسته فومی، انرژی جذب شده افزایش می‌یابد که این امر موجب کاهش کرنش صفحه پستی ( $\varphi_{back}$ ) می‌شود (شکل ۱۰-الف). افزون بر این، با افزایش ضخامت صفحات، کرنش صفحه پستی ( $\varphi_{back}$ ) افزایش می‌یابد که دلیل این امر 4- W. Hou, F. Zhu, G. Lu, and D.N. Fang, "Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core", International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, pp. 1045-1055, 2010.  
5- J. Banhart, and 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", Miskolc Materials Science

- and Technology Ph.D. School, Kerpely Antal, 2003.
- 7- 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.
- ۸--۱. زنده باد و ح. دانش منش، "بررسی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیومی تولید شده با استفاده از فرایند اتصال نوردی تجمعی (ARB)", مجله مواد نوین، جلد ۱، شماره ۴، صفحه ۱۲-۱، تابستان ۱۳۹۰.
- 9- K. Mohan, H.P. Seow, I. Sridhar, and T.H. Yip, "Effects of face sheet material in the indentation response of metallic foams", Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 42, pp. 3714-3723, 2007.
10. G. Lu, J. Shen, W. Hou, D. Ruan, and L.S. Ong, "Dynamic indentation and penetration of aluminum foams", International Journal of Mechanical Science, Vol. 50, pp. 932-943, 2008.
- 11- D. Ruan, G. Lu, and Y.C. Wong, "Quasi-static indentation tests on aluminum foam sandwich panels", Composite Structures, Vol. 92, pp. 2039-2046, 2010.
- 12- V. Gergely, D.C. Curran, and 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, and M. H. Sadeghian, "Manufacturing of Al/SiCp composite foams using calcium carbonate as foaming agent", Materials Science and Technology, Vol. 27, pp. 923-927, 2011.

## پیوست‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های پنل‌های ساندویچی تهیه شده در این پژوهش.

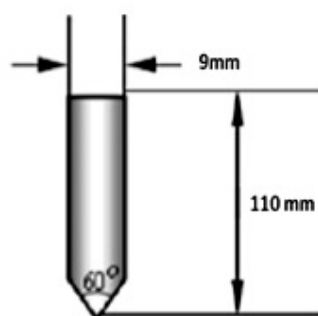
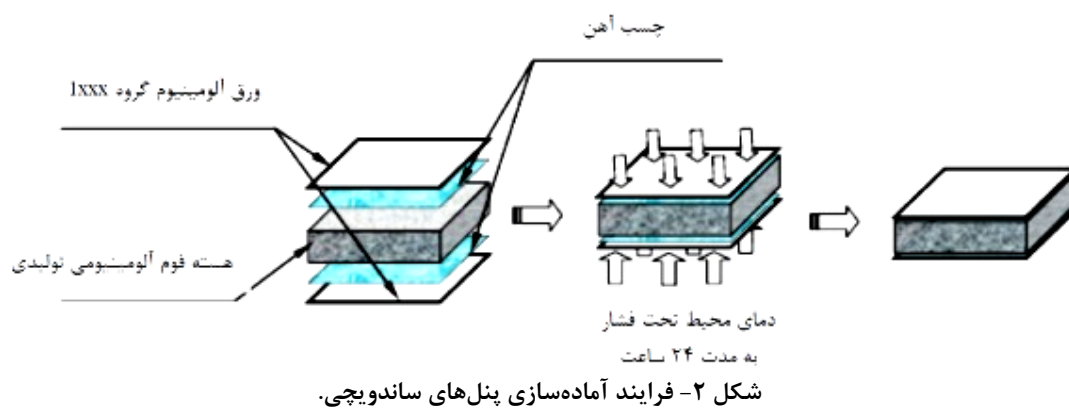
کد نمونه	ضخامت ورق (mm)	ضخامت فوم (mm)	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )
۰۰۵	۰/۵	۰	-
۱۰۵	۰/۵	۱۰	۰/۷
۲۰۵	۰/۵	۲۰	۰/۷
۳۰۵	۰/۵	۳۰	۰/۷
۰۰۲۰	۲	۰	-
۱۰۲۰	۲	۱۰	۰/۹
۲۰۲۰	۲	۲۰	۰/۹
۳۰۲۰	۲	۳۰	۰/۷
۳۰۰	۰	۳۰	۰/۷

جدول ۲- نتایج بدست آمده از آزمون سوراخ کاری.

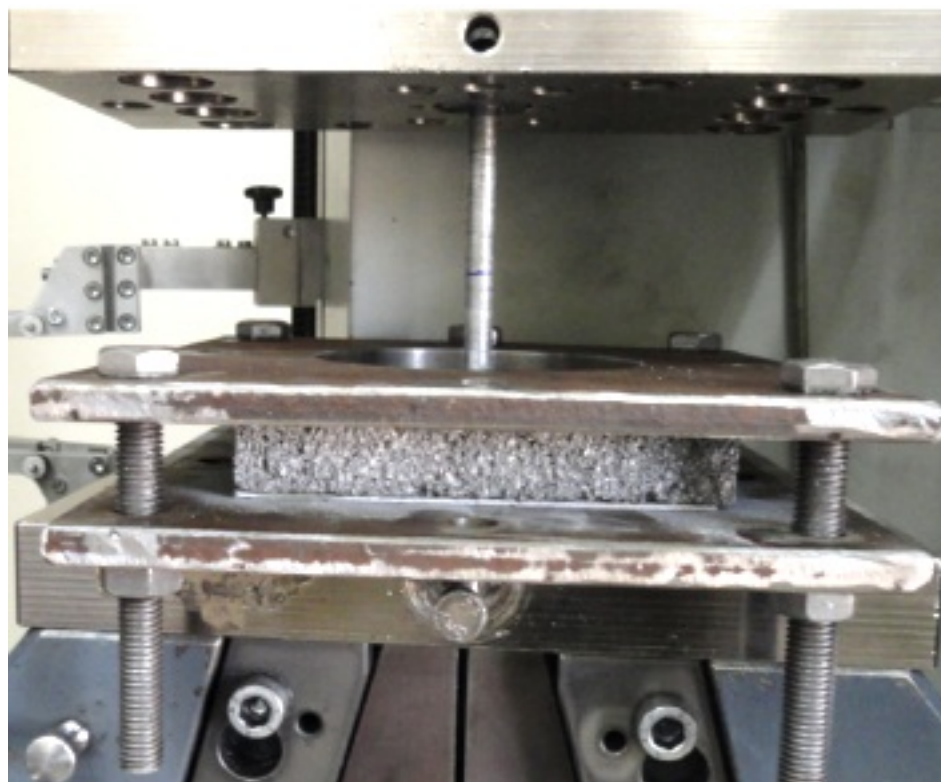
میزان جدایش صفحه پشت (cm)	میزان کرنش صفحه پشت $\Phi_{back}$	انرژی جذب شده (N.mm)	نیروی مسطح (Fp) (N)	کد نمونه
۸/۲	۰/۰۷	۹۳۷۴	۶۰۴	۰۰۵
۹	۰/۰۵۶	۳۲۵۱۵	۳۷۹	۱۰۵
۷/۷	۰/۰۷۴	۶۸۱۴۷	۱۱۶۷	۲۰۵
۷/۷	۰/۰۶	۹۷۰۵۹	۲۱۵۰	۳۰۵
۱۱/۱	۰/۰۴	۷۲۴۸۸	۱۲۵۴	۰۰۲۰
۱۰/۵	۰/۰۹	۱۲۴۲۲۶	۴۱۳۴	۱۰۲۰
۸	۰/۰۷۷	۱۹۵۶۸۴	۴۷۲۱	۲۰۲۰
۹/۷	۰/۰۸	۱۵۸۶۵۲	۲۸۵۷	۳۰۲۰
-	-	۲۰۹۱۶	۸۱۹	۳۰۰



شکل ۱- پنل های ساندویچی تولید شده.

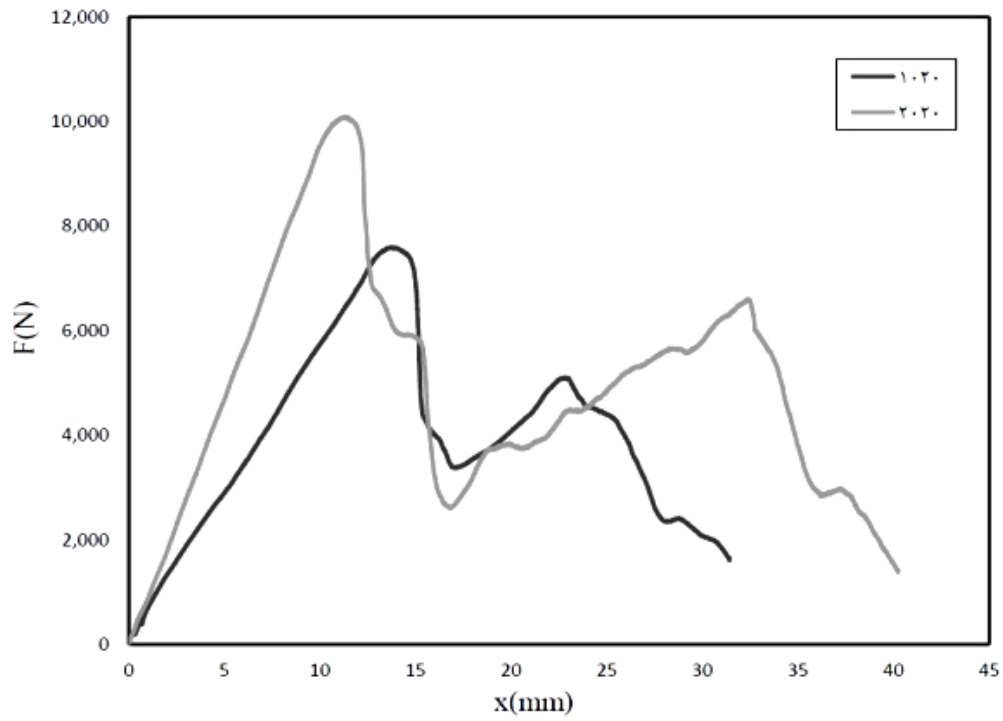


شکل ۳- شکل و ابعاد فرورونده مخروطی مورد استفاده برای آزمون سوراخ کاری.

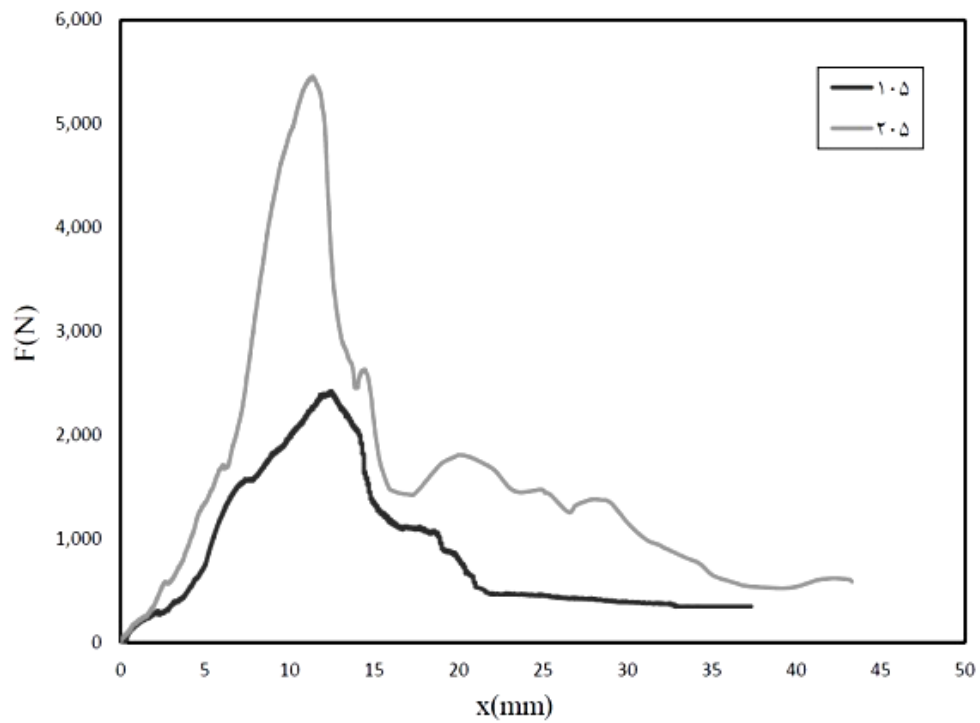


شکل ۴- تصویری از نمونه حین آزمون سوراخ کاری.



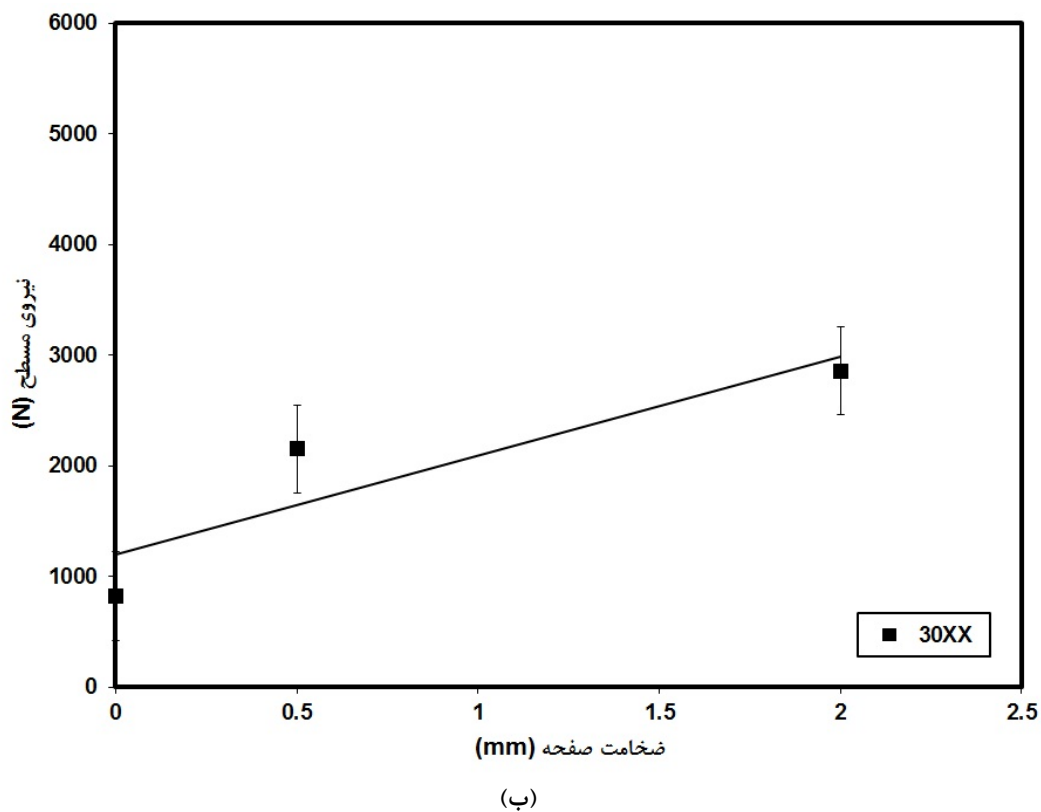
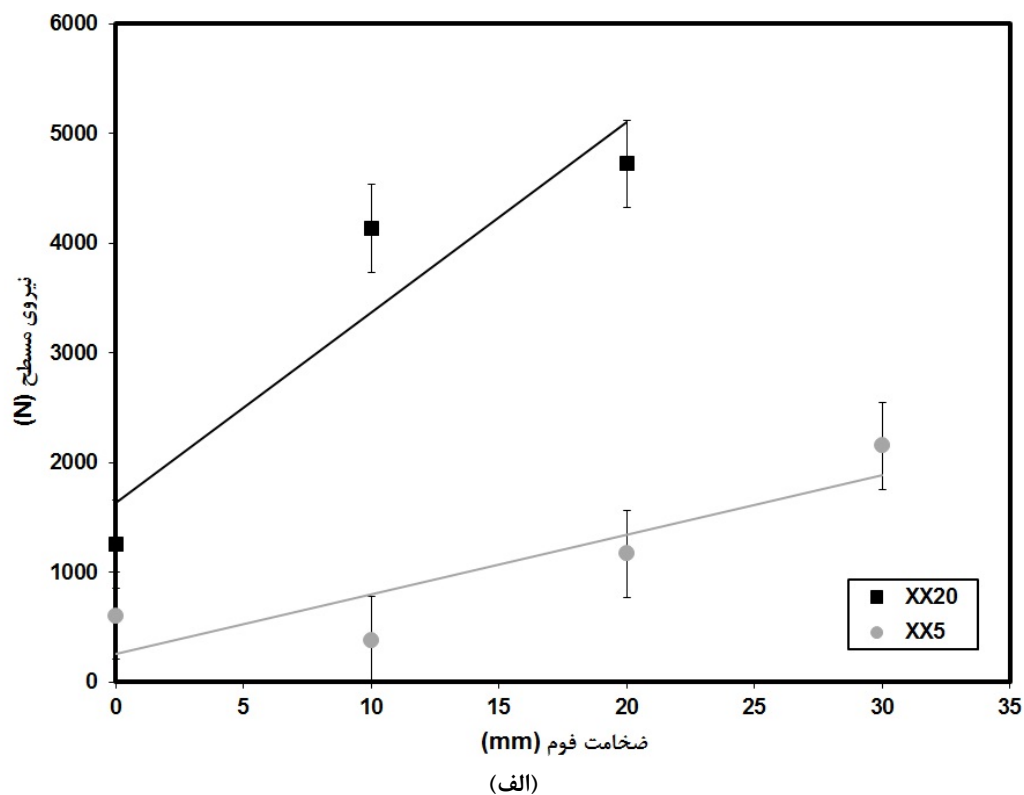


(الف)

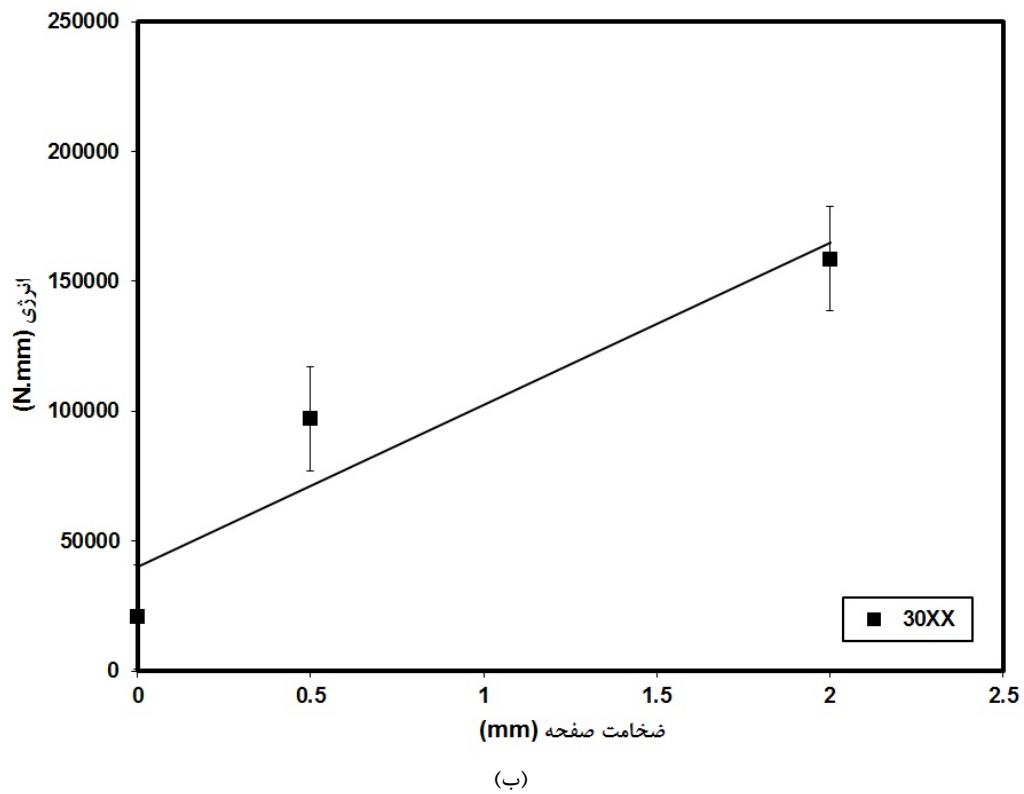
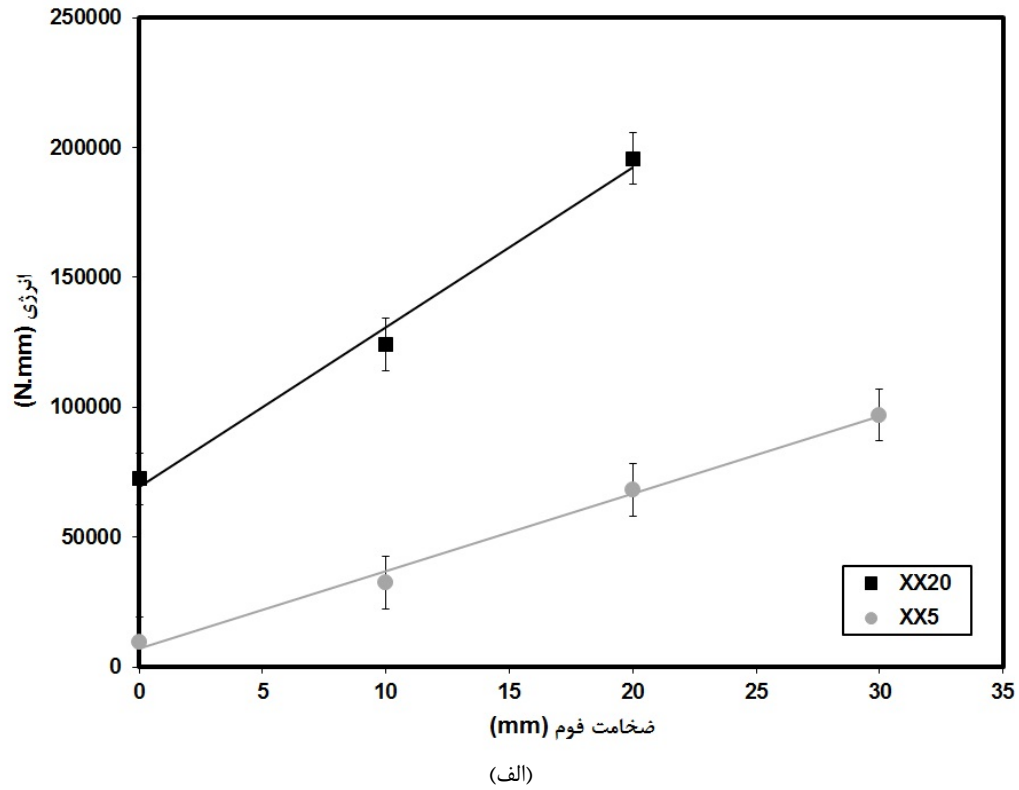


(ب)

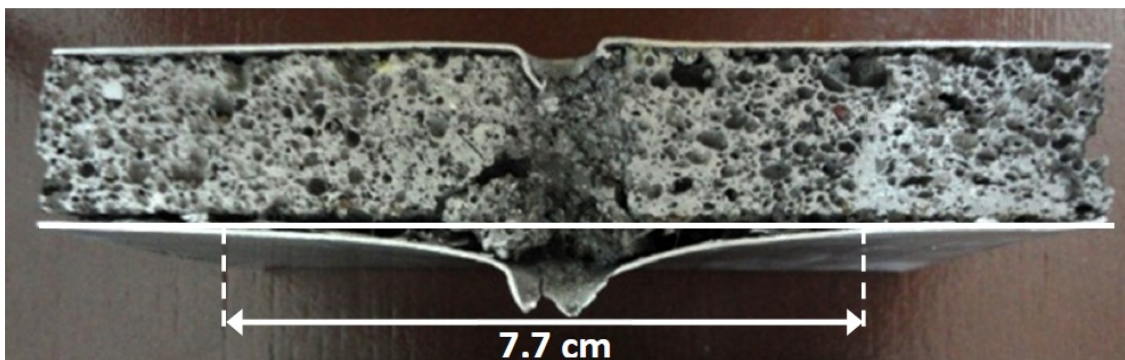
شکل ۵- منحنی نیرو-جابجایی (الف) نمونه‌های ۱۰۲۰ و ۲۰۲۰ (ب) نمونه‌های ۱۰۵ و ۲۰۵.



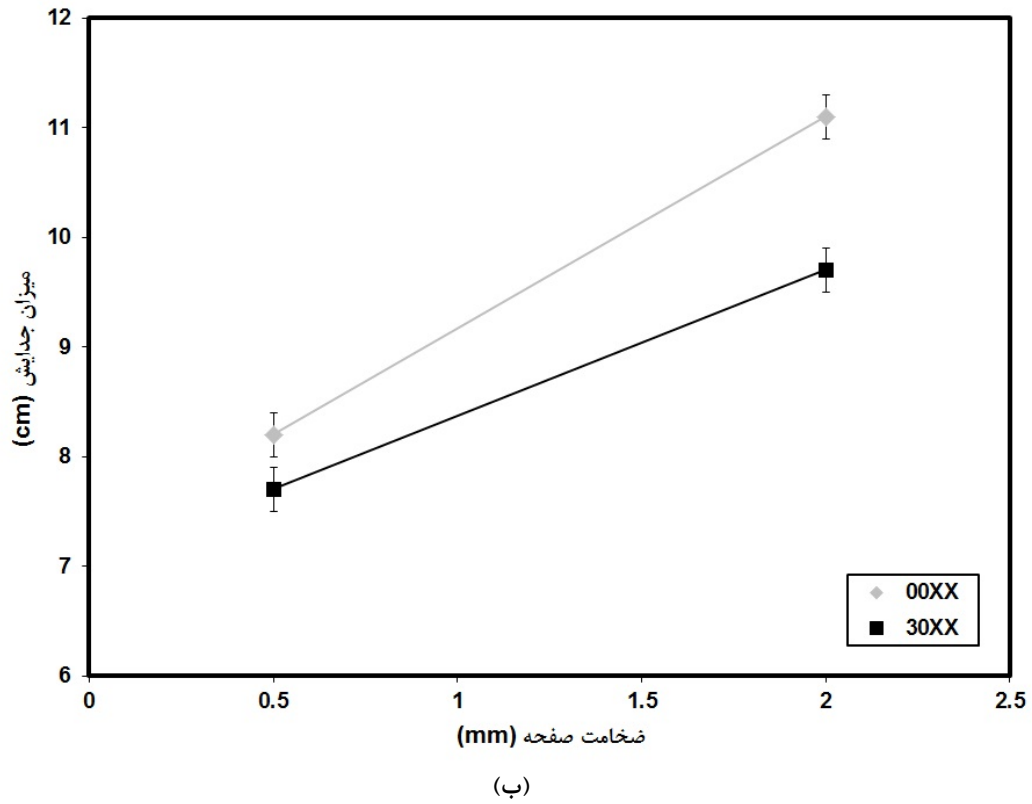
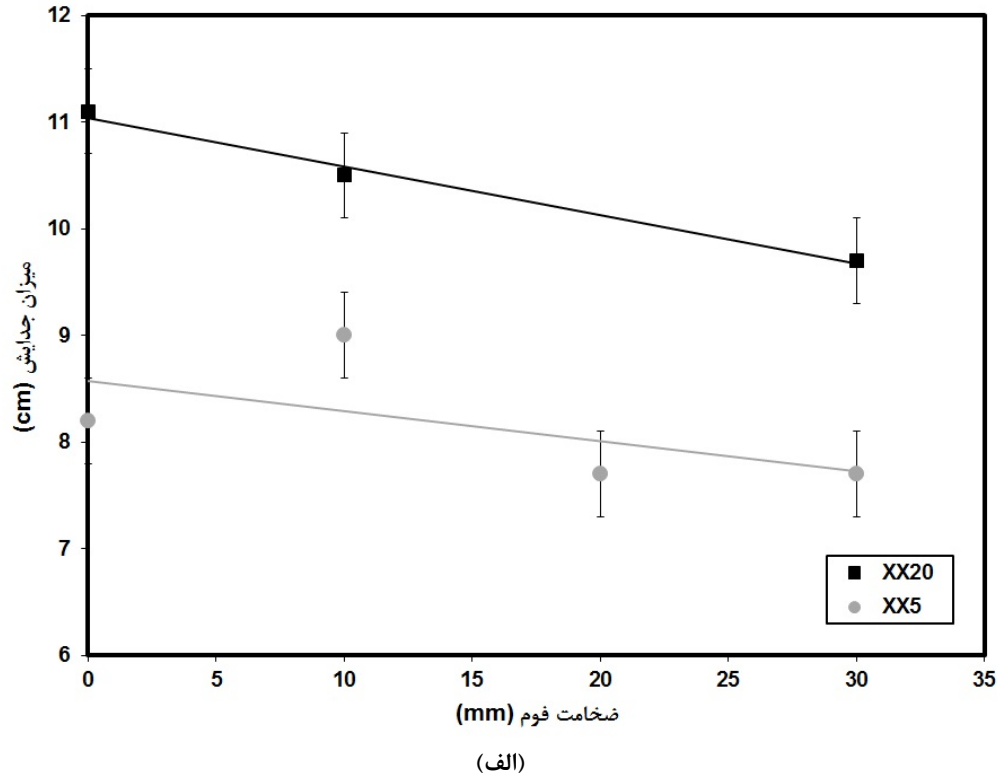
شکل ۶- الف) تاثیر ضخامت هسته فومی و ب) تاثیر ضخامت صفحات بر نیروی مسطح ( $F_p$ ).



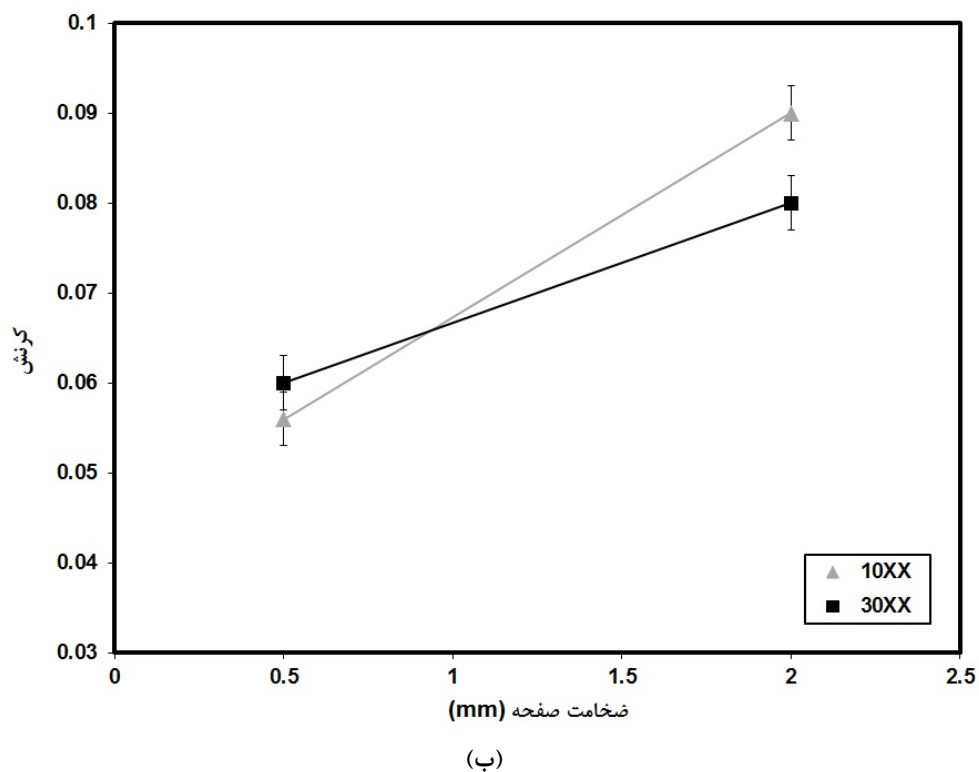
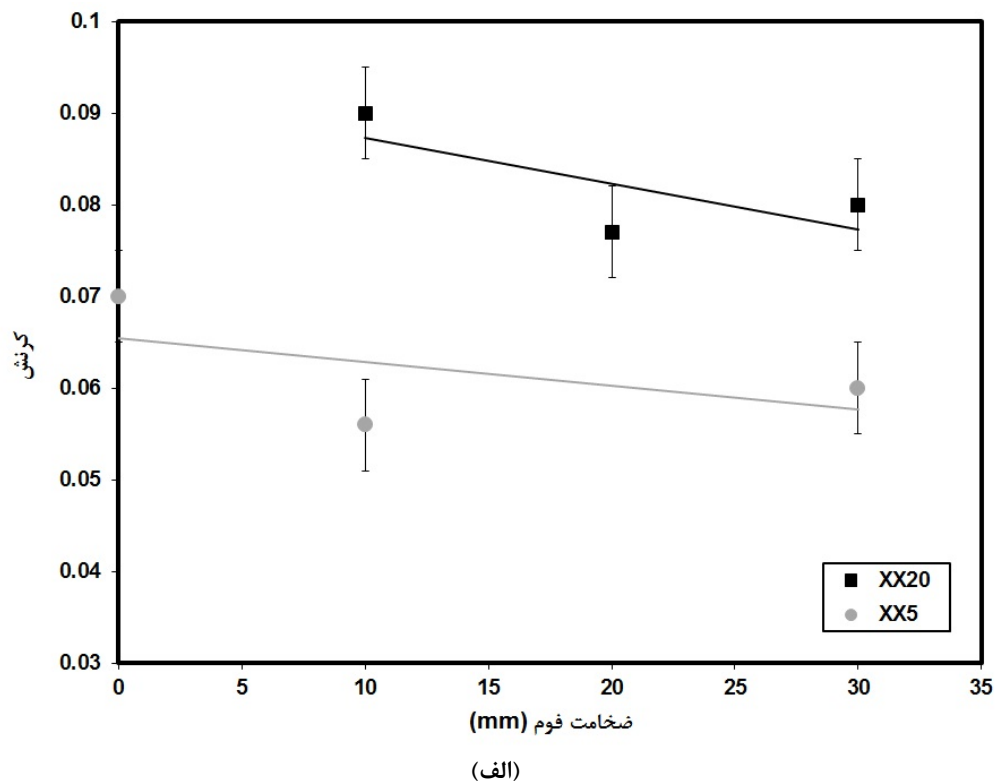
شکل ۷- الف) تاثیر ضخامت هسته فومی و ب) تاثیر ضخامت صفحات بر میزان انرژی جذب شده.



شکل ۸- نحوه اندازه گیری و میزان جدایش صفحه پشتی در نمونه ۲۰۵.



شکل ۹- الف) تاثیر ضخامت هسته فومی و ب) تاثیر ضخامت صفحات بر میزان جدایش صفحه پشتی.



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