

مطالعه تجربی رفتار شبه استاتیکی پانل ساندویچی با هسته دوزنقه ای الیاف فلز / شیشه تحت بارگذاری محوری

هسته های موجدار کامپوزیتی با شکل دوزنقه ای به سازه های ساندویچی این امکان را داده که در مقابل تخریب مقاومت خود را افزایش بدهند. در مقاله حاضر به مطالعه بر روی اثر تغییر پارامتر هندسی زاویه یال های هسته دوزنقه ای و زاویه الیاف در لایه چینی صفحات پانل ساندویچی تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی پرداخته شده است. در ساخت صفحات کامپوزیتی از ترکیبی از الیاف شیشه و فلز استفاده شده است. زاویه یال های هسته در سه حالت ۴۶، ۵۲ و ۵۸ درجه و زاویه الیاف در لایه چینی در سه حالت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه انتخاب شده است. بعد از آزمون فشاری شبه استاتیکی، انرژی جذب شده و نیروی بیشینه به همراه شکل تخریب، در تمامی نمونه ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که افزایش زاویه الیاف از ۳۰ تا ۹۰ درجه می تواند نیروی بیشینه را تا ۱۲۳ درصد و جذب انرژی را تا ۲۶۰ درصد افزایش دهد. مکانیزم تغییر شکل پلاستیک الیاف فلزی و شکست الیاف شیشه در ناحیه تشکیل لولای پلاستیک در یال های هسته، مکانیزم های اصلی تخریب بوده و هیچگونه لایه لایه شدگی در صفحات دیده نشد. همچنین به دلیل چسبندگی بالای هسته و رویه های صفحات کامپوزیتی، جدایش هسته از رویه ها در پانل مشاهده نشده که نشان دهنده کیفیت بالای این پانل ها است.

مجتبی لشکرو^۱

دانشجوی دکتری

علی دادرسی^۳

استادیار

ولی پروانه^۴

استادیار

حسین تقی پور^۵

استادیار

واژه های راهنما: جذب انرژی، الیاف شیشه، الیاف فلزی، بارگذاری شبه استاتیک، پانل ساندویچی

۱- مقدمه

یک پانل ساندویچی با هسته موجدار شامل یک ورقه موجدار است که ما بین دو ورقه نازک محاط شده و باعث شده نسبت وزن به مقاومت بالایی داشته باشد [۱].

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران m.lashgaroo@gmail.com

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران mlashgaroo@tvu.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران Ali.dadrasi@hsu.ac.ir

^۴ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران Vali.parvaneh@iau-shahrood.ac.ir

^۵ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، ایران

H.taghipoor@velayat.ac.ir

زمانی که پانل‌های ساندویچی فلزی با هسته سلولی تحت فشار تک محور شبه استاتیکی یا دینامیکی قرار می‌گیرند، نکته مهم این مطلب است که بتوانند هم مقاومت بالایی در مقابل تخریب و هم جذب انرژی بر واحد جرم بالایی داشته باشند. به عبارت دیگر، پانل ساندویچی ایده آل برای جذب انرژی می‌بایست منحنی تنش بر حسب کرنش آن، دارای تنش پایا باشد که قادر باشد مقدار انرژی زیادی را در یک سطح تنش ثابت جذب کند [۲].

در مورد سازه‌های موجدار می‌توان به بررسی تجربی شبه‌استاتیکی رفتار پانل‌ها با هسته موجدار و بررسی عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس، پارامترهای هندسی سازه، همچنین فروریزش پانل‌های ساندویچی با هسته‌های دوزنقه‌ای، مربعی و مثلثی تحت ضربه کم سرعت محلی و صفحه‌ای اشاره کرد که توسط شوجان هو و همکارانش [۳] انجام شده است. هسته‌های ساخته شده در مطالعه آن‌ها از جنس آلومینیوم بوده است. آن‌ها در ادامه پارامترها را به وسیله بهینه‌سازی چند هدفه بهینه کرده‌اند که از نتایج این پژوهش این بوده که در حالت ضخامت صفحه و چگالی هسته برابر، هسته مثلثی دارای عملکرد بهتری بوده است.

کلیچ اصلان و همکارانش [۴-۶] به بررسی هسته دوزنقه‌ای چند لایه آلومینیومی تحت پاسخ ضربه محلی با هندسه ضربه زنده‌های کروی، مخروطی و تخت پرداخته‌اند. در پژوهشی دیگر ژین لی و همکارانش [۷]، به بررسی پاسخ دینامیکی هسته‌های دوزنقه‌ای آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری هوا با استفاده از یک سیستم پاندول پرداخته‌اند. شینجان هو و همکارانش [۸] هسته‌های دوزنقه‌ای چند لایه آلومینیومی را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار داده که مشاهده شده تعداد لایه‌ها نقش مهمی در مکانیزم تخریب و جذب انرژی داشته است. وین تاو هی و همکارانش [۹] در بررسی خود به مطالعه بر روی رفتار هسته دوزنقه‌ای از جنس آلومینیوم با رویه کامپوزیتی تحت ضربه محلی با نوک ضربه زنده نیمه کروی با تغییر دادن ارتفاع ضربه زنده پرداخته‌اند که نتایج حاکی از آن بوده که تخریب فیبر، تخریب ماتریس و لایه لایه شدگی صفحات رویی و همچنین کمانش اعضای هسته، حالت‌هایی است که تحت انرژی‌های ضربه‌ای مختلف رخ می‌دهد.

مطالعه تجربی صورت گرفته توسط لیو و همکارانش [۱۰] بر روی هسته مثلثی از جنس فیبر کربن که از لایه‌های پیش آغشته شده فیبر کربن تک جهته پیچیده شده اطراف منشور مثلثی ساخته شده بودند نشان داده که در بارگذاری فشار شبه‌استاتیکی که هسته از کناره محدود نبوده، مکانیزم شکست هسته به صورت پارگی پیش‌رونده به دلیل ترک ماتریس در مفاصل هسته وب شکل بوده است. همچنین در بارگذاری دینامیکی هسته‌های کامپوزیتی وابستگی به نرخ کرنش را نشان داده‌اند.

موهود مت رجب و همکارانش [۱۱-۱۵] به بررسی رفتار مکانیکی سازه ساندویچی با هسته‌های موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی در یک زاویه مشخص از جنس آلومینیوم و کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر کربن تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و ضربه سرعت پایین به صورت تجربی و شبیه سازی عددی پرداخته‌اند.

در مقاله حاضر، به مطالعه بر روی اثر تغییر پارامترهای هندسی زاویه یال‌های هسته و همچنین زاویه الیاف در لایه چینی صفحات کامپوزیتی شیشه / فلز پرداخته شده است. کامپوزیت‌های الیاف شیشه / فلز خواص مکانیکی را بهبود بخشیده و مطالعه حاضر را از سایر نمونه‌های پانل ساندویچی متمایز می‌کند. بررسی میزان جذب انرژی و حداکثر نیرو تا تخریب نمونه پانل ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای انجام می‌شود و تأثیر پارامترها در کامپوزیت شیشه / فلز معرفی شده بحث می‌گردد.

۲- مواد و آزمون

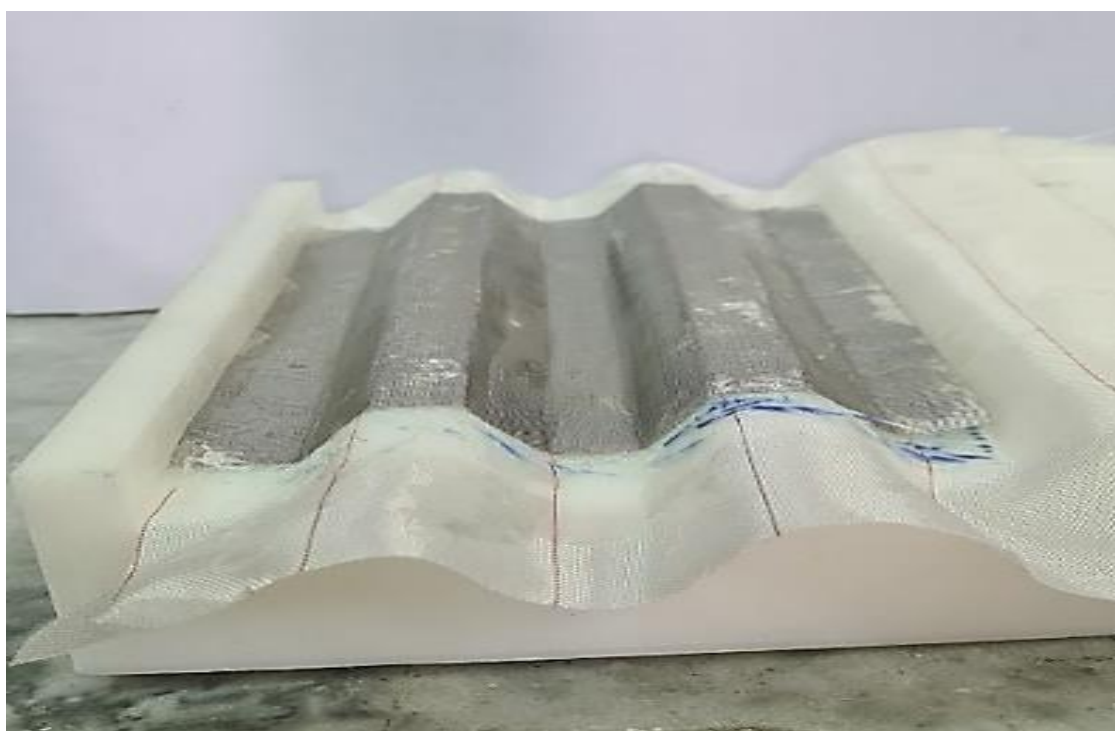
۲-۱- ساخت پانل ساندویچی

در این مقاله برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی با نام تجاری رزین اپوکسی ۲۰۹ شرکت ایران کامپوزیت کاویان با نسبت رزین به سخت کننده ۱۰۰ به ۵۵ در مقیاس وزنی استفاده شده است. زمان ژل شدن رزین در حدود ۱۲۰ دقیقه می باشد. زمان پخت نهایی، ۲۴ ساعت در دمای محیط می باشد. الیاف شیشه تک جهته ۳۵۰ گرم بر مترمربع از کلاس E با دو نوع بافت Plain و Twill ساخت شرکت AMP چین برای تولید نمونه‌های ساندویچی کامپوزیتی استفاده شدند. برای رویه‌های بالا و پایین سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی از چهار لایه الیاف شیشه با زوایای ثابت و برای هسته سلولی دوزنقه‌ای از ترکیب الیاف شیشه و الیاف فلز استفاده شده است. شکل (۱) الیاف شیشه و فلز را نشان می‌دهد. قالب‌های تفلونی بر اساس سایز پانل‌ها و مشخص نمودن پارامتر زاویه هسته در سه سطح ۴۶، ۵۲ و ۵۸ درجه، با استفاده از نرم افزار Solidworks تهیه شده بر اساس این نقشه‌ها، قالب توسط دستگاه CNC به تعداد ۶ عدد در دو فک بالا و پایین، ساخته شده است. تصویر قالب تفلونی ساخته شده در شکل (۲) مشاهده می شود. در چیدمان لایه‌ها به ترتیب یک لایه پارچه داکرون جهت توزیع یکنواخت رزین و به دست آمدن سطح یکنواخت استفاده می‌شود، در ادامه یک لایه الیاف شیشه، دو لایه توری سیمی، مجدداً الیاف شیشه و در نهایت پارچه داکرون بر روی قالب و آغشته سازی کامل آن در هر لایه توسط رزین و سخت کننده انجام می‌شود.

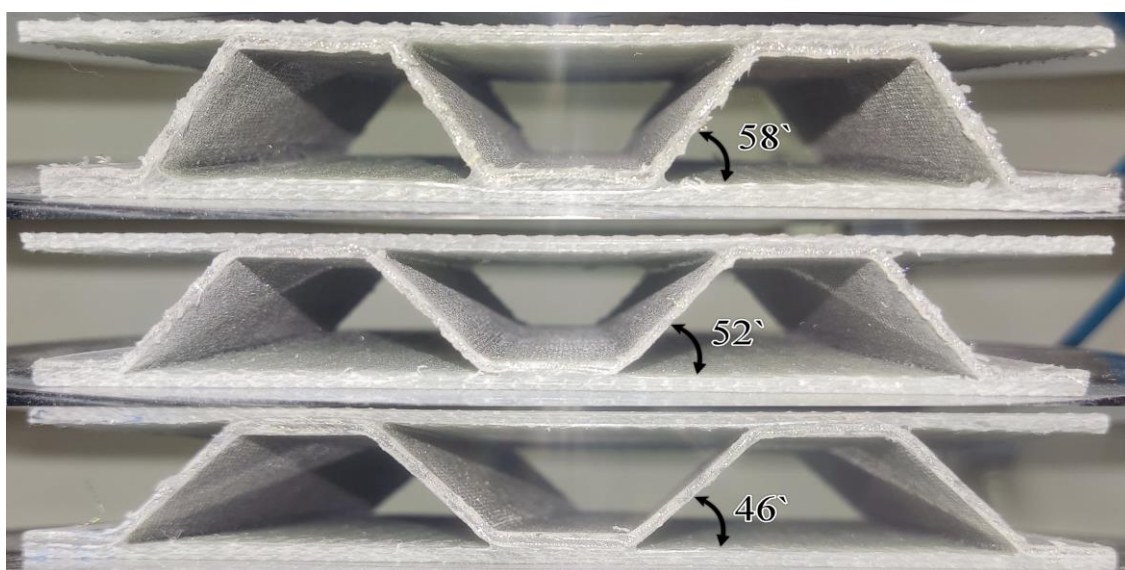


شکل ۱- نمونه الیاف الف) شیشه و ب) فلزی مورد استفاده در ساخت پانل ساندویچ

زاویه لایه چینی بر اساس هر نمونه در جدول (۱) نشان داده شده است. پس از لایه چینی، فک بالایی قالب بر روی لایه‌ها قرار گرفته و زیر دو جک هیدرولیکی دو تنی قرار داده می‌شود. در این مرحله قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت این پرس به منظور پخت کامل رزین قرار می‌گیرند. برای نامگذاری نمونه‌ها از دو عدد استفاده شده است، عدد اول نشان دهنده زاویه یال‌های هسته و عدد دوم نشان دهنده زاویه الیاف به کار گرفته شده در ساخت صفحات پانل است؛ به طور مثال در نمونه CF46-90، عدد ۴۶ نشان دهنده زاویه یال‌ها و عدد ۹۰ نشان دهنده زاویه الیاف در لایه‌چینی برای ساخت صفحات پانل در رویه و هسته است. شکل (۳) نمونه‌های پانل ساندویچی و زاویه یال هسته را نشان می‌دهد.



شکل ۲- قالب تفلونی و چیدمان لایه‌های الیاف شیشه و فلز



شکل ۳- نمای پانل‌های ساندویچی با زاویه هسته‌های ۴۶، ۵۲ و ۵۸ درجه

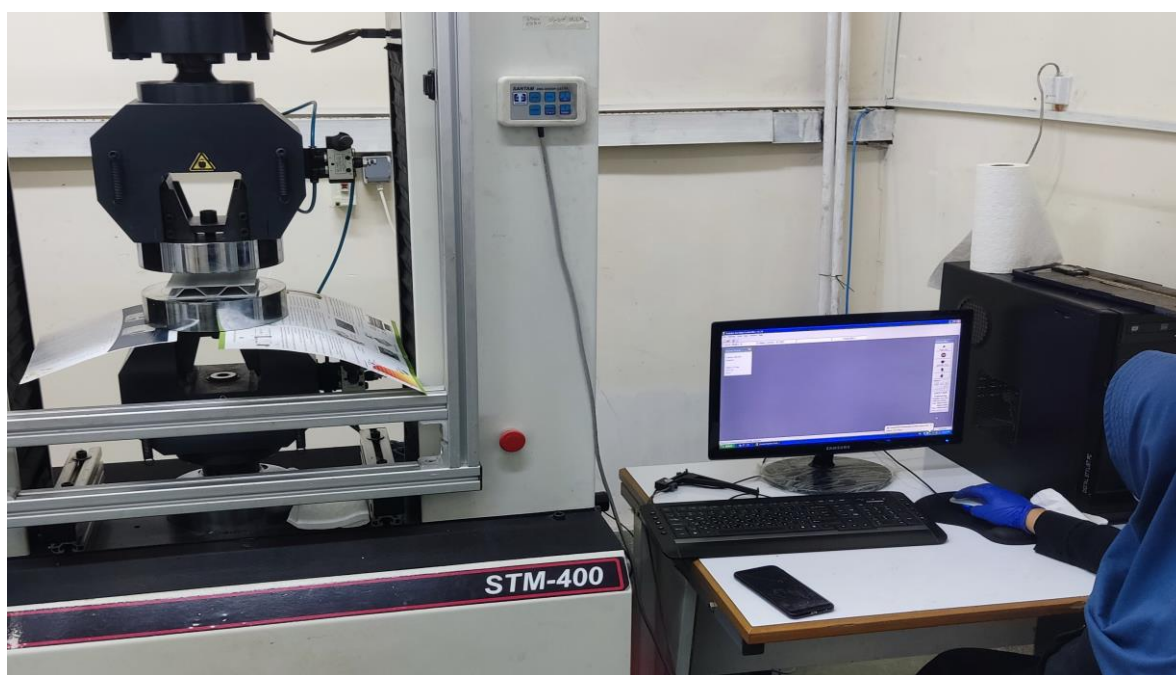
جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات نمونه‌ها تحت آزمون فشار شبه-استاتیک

نام اختصاصی	زاویه یال‌های هسته	زاویه الیاف
CF46-30	۴۶	۳۰
CF46-60	۴۶	۶۰
CF46-90	۴۶	۹۰
CF52-30	۵۲	۳۰
CF52-60	۵۲	۶۰
CF52-90	۵۲	۹۰
CF58-30	۵۸	۳۰
CF58-60	۵۸	۶۰
CF58-90	۵۸	۹۰

۲-۲- دستگاه آزمون شبه-استاتیکی

برای انجام آزمایش‌های فشاری شبه استاتیکی از دستگاه آزمایش کشش و فشار SANTM STM 400 با ظرفیت ۴۰ تن، استفاده شده است. نمایی از این دستگاه در شکل (۴) آمده است. دستگاه از نوع جابه‌جایی کنترل می‌باشد و به وسیله کامپیوتری که به آن متصل است کنترل می‌گردد. با دستوری که تکنسین از طریق کامپیوتر به دستگاه می‌دهد، آزمایش آغاز می‌گردد.

دستگاه آزمایش کشش و فشار از دو فک تشکیل شده است، فک پایینی آن ثابت و فک بالایی آن متحرک می‌باشد. در حین فرآیند جابه‌جایی مقدار نیروی وارده به نمونه توسط کامپیوتر ترسیم شده و نمودار نیرو - جابه‌جایی را رسم می‌کند.



شکل ۴- نمایی از دستگاه تست فشار سنتام

۳- پارامترهای مهم در جذب انرژی

نیروی بیشینه اولیه، ظرفیت جذب انرژی (E_a)، و انرژی جذب شده بر واحد وزن (SEA)، پارامترهایی هستند که برای سنجش خواص جذب استفاده می‌شوند و در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده اند. این پارامترها، در سیستم طراحی بسیار مهم هستند. مقدار انرژی جذب شده، در واقع همان سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است [۱۶، ۱۷].

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

$$SEA = \frac{E_a}{M_s} \quad (2)$$

در معادلات بالا δ_{max} حداکثر میزان فروریزش و M_s وزن نمونه می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج بدست آمده از تست‌های فشاری شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های پانل ساندویچی با توجه به دو پارامتر زاویه هسته و جهت‌گیری الیاف آورده شده است. شکل (۵) تعدادی از نمونه‌های ساخته شده قبل از تست را نشان می‌دهد. همچنین وزن نمونه‌ها به همراه نتایج نیروی بیشینه و جذب انرژی در جدول (۲) آورده شده است.



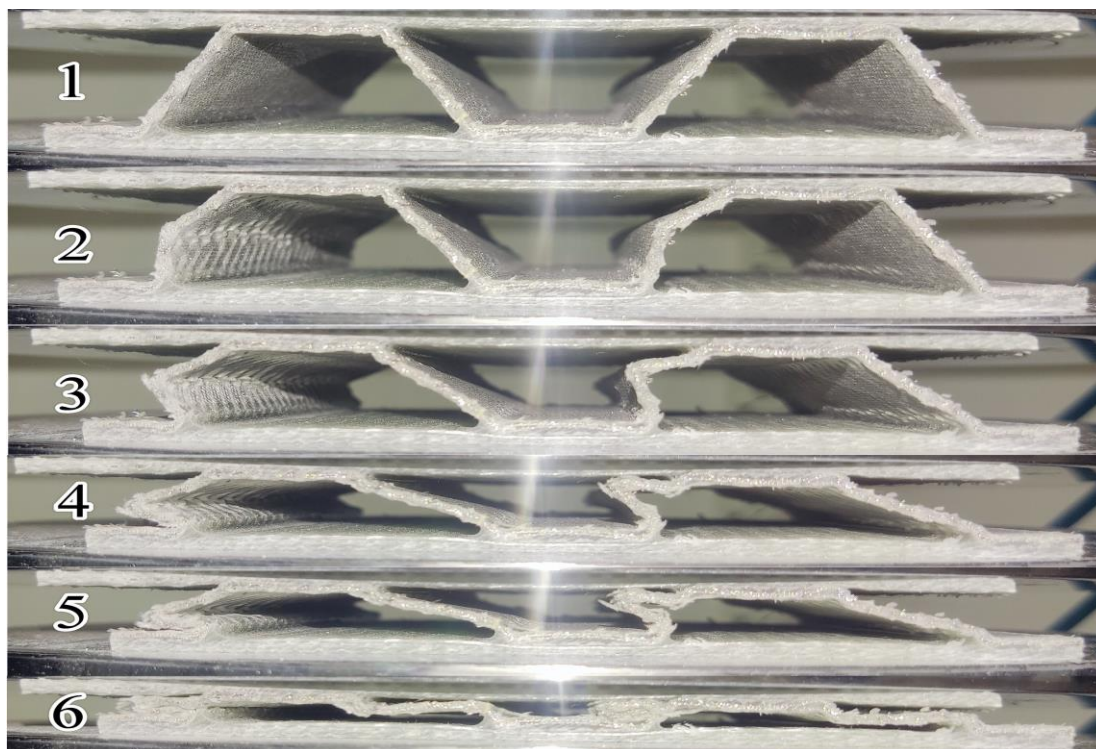
شکل ۵- نمای کلی از پانل‌های ساندویچی

جدول ۲- نتایج بدست آمده از تست شبه- استاتیکی

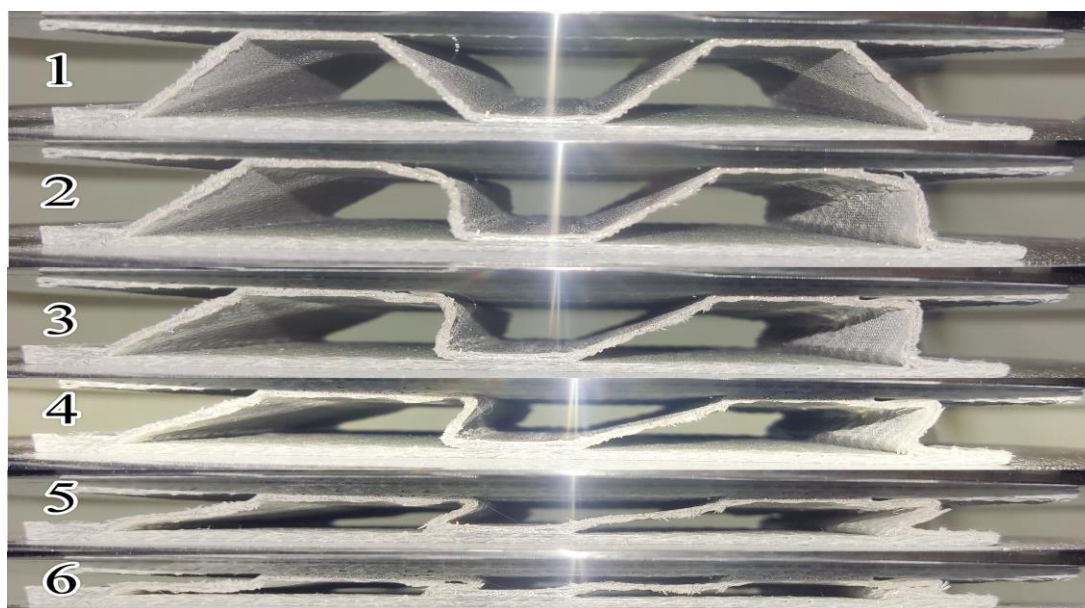
نام اختصاصی	وزن نمونه (g)	انرژی جذب شده (J)	نیروی بیشینه (N)	ظرفیت جذب انرژی (J/kg)
CF46-30	۱۳۹/۴	۷۵/۷	۱۶۱۶۷	۵۴/۳
CF46-60	۱۴۴	۱۲۰/۲۸	۲۲۳۳۷	۸۳/۵
CF46-90	۱۴۲	۱۵۲/۷	۲۶۷۴۲	۱۰۷/۵
CF52-30	۱۱۳/۶	۴۱/۶	۱۰۸۹۹	۳۶/۶
CF52-60	۱۱۲/۴	۵۴/۸	۱۶۵۸۴	۴۸/۷
CF52-90	۱۱۳/۷۴	۱۳۱/۲	۲۴۲۹۹	۱۱۵/۳
CF58-30	۹۸/۶	۳۴/۰۹	۱۱۸۷۰	۳۴/۵
CF58-60	۹۷/۷	۸۲/۶	۱۷۳۸۳	۸۴/۶
CF58-90	۱۰۲/۱	۱۲۲/۳	۲۱۲۸۸	۱۱۷/۷۹

۴-۱- شکل تخریب هسته‌های موجدار تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیک

در نمودارهای نیرو- جابه‌جایی فروریزش پانل‌های ساندویچی دیده می‌شود. در ابتدا سطح نیرو به صورت خطی تا میزان بیشینه افزایش می‌یابد. این نقطه نشان دهنده‌ی استحکام نهایی سازه تحت بار فشاری بوده و ناحیه الاستیک را شامل می‌شود. با شروع تغییر شکل پلاستیک سطح نمودار نیرو-جابه‌جایی ناگهان افت زیادی را تجربه کرده و این ناحیه که در شکل‌های (۶) و (۷) بخش (۲) نشان داده شده است، همراه با شروع کمانش پانل‌ها در هسته پانل ساندویچی است.



شکل ۶- فروریزش پیش‌رونده نمونه CF58-60 تحت بارگذاری محوری فشاری



شکل ۷- فروریزش پیش‌رونده نمونه CF52-60 تحت بارگذاری محوری فشاری

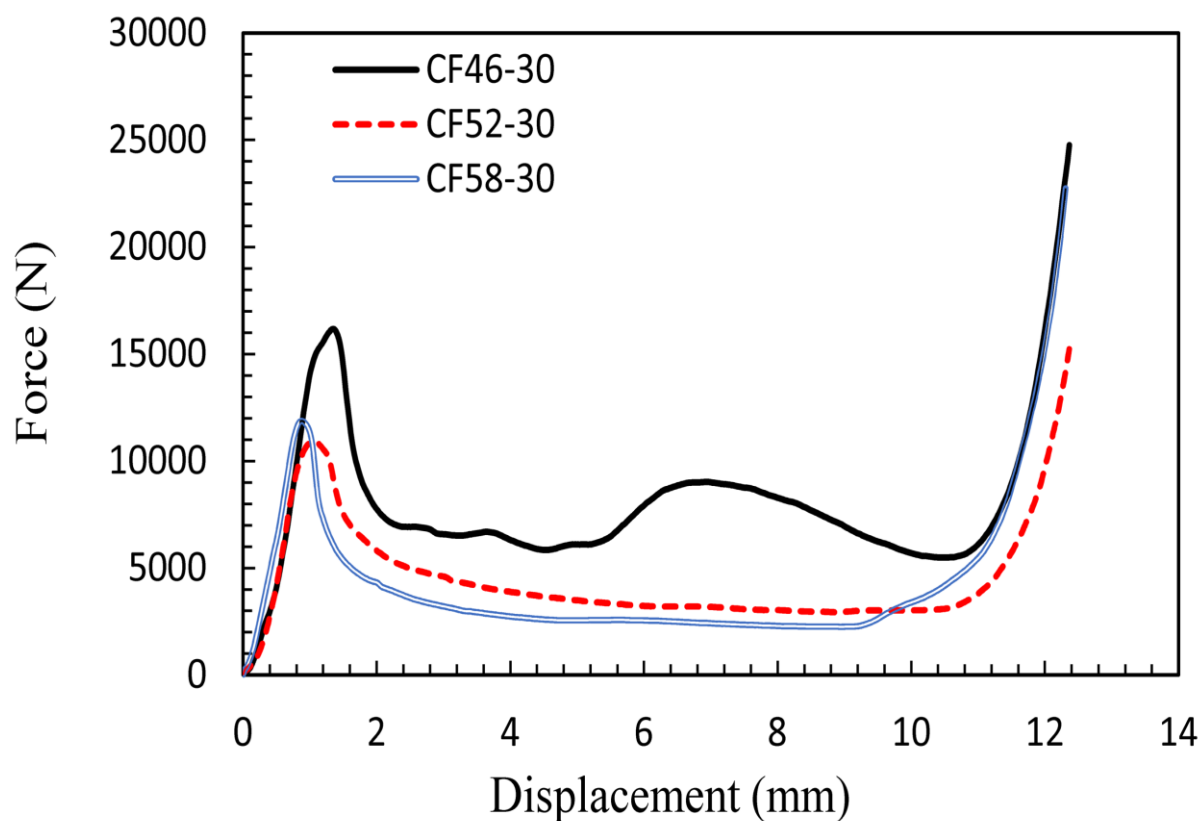
در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب روند تغییر شکل پیش‌رونده نمونه‌های CF52-60 و CF58-60 را تحت بارگذاری فشاری را نشان می‌دهد. شکل تخریب تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد در ابتدا نمونه دچار یک کمانش در یال‌های هسته به یک سمت شده، سپس هسته شروع به تخریب می‌کند و به آرامی روی همان یال شروع به فروریزش می‌کند بطوری که بعد از مدتی همان یال خود یک ستون تشکیل داده و باعث افزایش دوباره مقاومت سازه می‌شود (بخش‌های (۵) و (۶)) [۱۵].

شکل‌های تخریب نشان داد، مکانیزم‌های جدایش لایه‌ها در محل تشکیل لولا و کمانش موضعی در یال‌ها، عامل افزایش استحکام و جذب انرژی در ساختار پانل ساندویچی است. وجود الیاف فلزی، شکنندگی و تردی الیاف شیشه را کاهش داده و در شکل تخریب نمونه‌ها شکست و پارگی دیده نشده است. از طرفی تخریب و جدایش هسته از صفحات رویی که ضعف اصلی ساختار پانل‌های ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای است در این نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

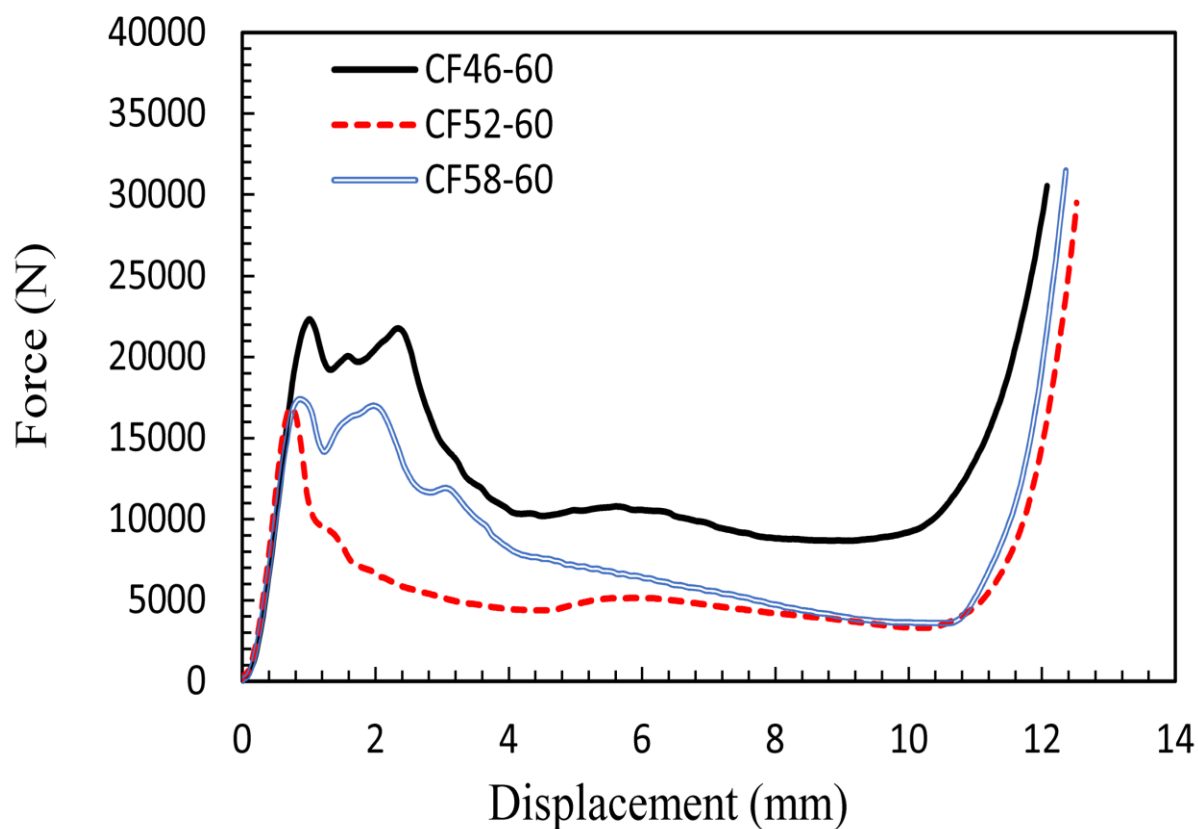
۴-۲- بررسی تأثیر زاویه یال هسته در پانل ساندویچی با الیاف فلز/شیشه

منحنی‌های نیرو-جابجایی به تفکیک زاویه الیاف ثابت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه برای مقایسه بهتر در تغییر زاویه یال‌های هسته به ترتیب در شکل (۸-الف)، (۸-ب) و (۸-ج) آورده شده است. در شکل (۸-الف) دیده می‌شود با افزایش زاویه یال‌ها از ۴۶ به ۵۸ درجه در هسته با زاویه الیاف ۳۰ درجه، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی، کاهش می‌یابد.

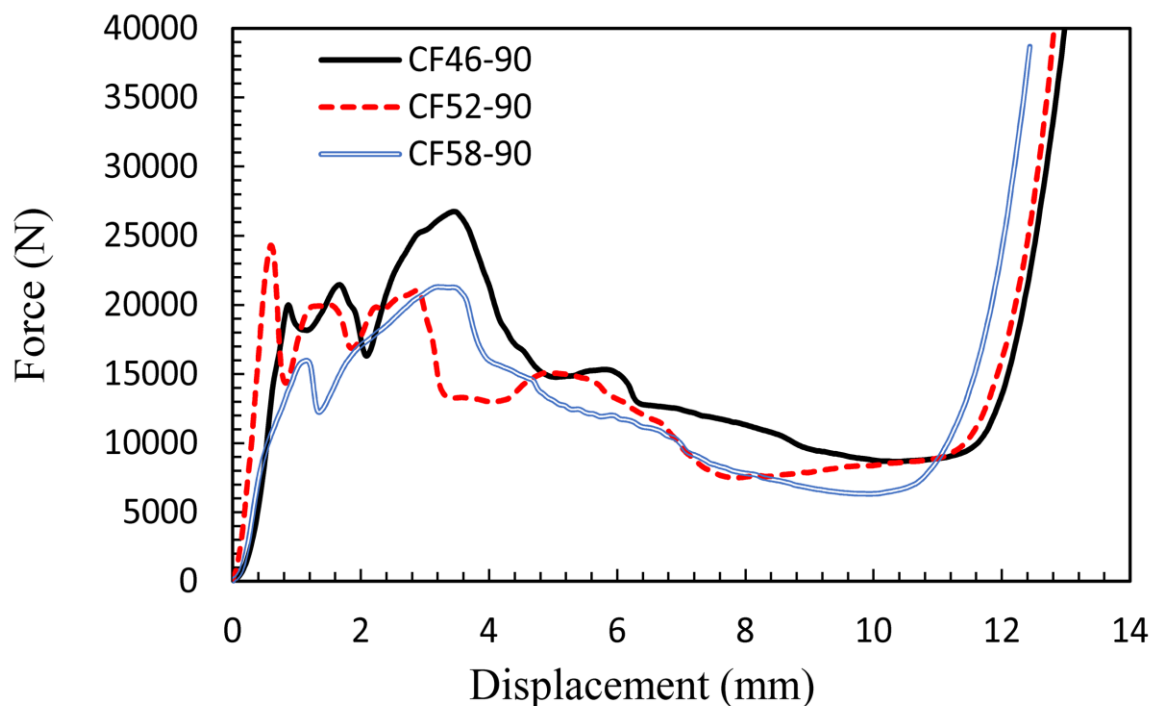
با توجه به شکل (۹) می‌توان دید که نمونه CF64-30 در مقایسه با نمونه‌های CF52-30 و CF58-30 در میزان نیروی بیشینه به ترتیب ۴۸ و ۳۷ درصد افزایش داشته است. این رفتار در نمونه با زاویه الیاف ۶۰ درجه نیز دیده می‌شود؛ به طوریکه نمونه با زاویه یال ۴۶ درجه نیروی بیشینه بالایی داشته و در ادامه با افزایش زاویه یال‌های هسته تا ۵۲ درجه کاهش پیدا می‌کند ولی در ادامه با افزایش زاویه یال‌ها تا ۵۸ درجه مجدداً کمی افزایش پیدا می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

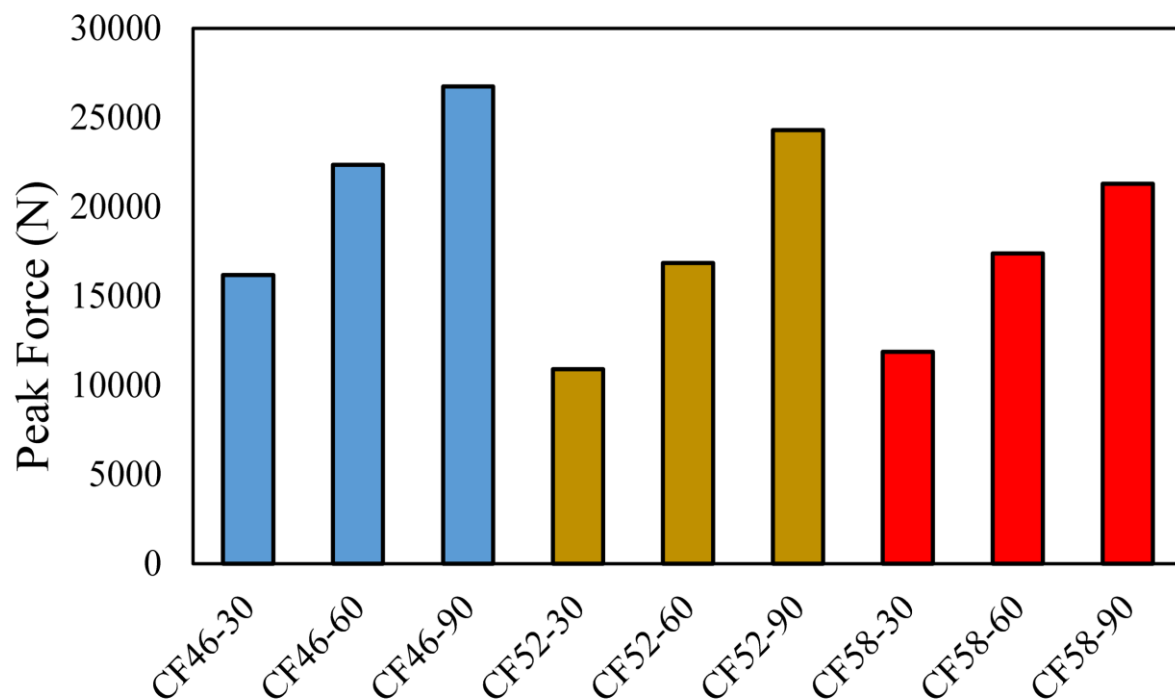
شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی برای نمونه با زاویه الیاف ثابت، الف) ۳۰ درجه، ب) ۶۰ درجه و ج) ۹۰ درجه

نتایج جذب انرژی که در شکل (۱۰) با یکدیگر مقایسه شده اند، نشان می‌دهد افزایش زاویه الیاف هسته در پانلهایی که زاویه الیاف آن‌ها ۳۰ درجه است (شکل ۸-الف) باعث کاهش جذب انرژی می‌گردد، به طوریکه با افزایش زاویه الیاف هسته از ۴۶ به ۵۲ درجه، ۴۵ درصد انرژی جذب شده کاهش می‌یابد و در ادامه با افزایش زاویه الیاف از ۵۲ تا ۵۸ درجه، ۱۹ درصد جذب انرژی کم می‌شود. این کاهش جذب انرژی، از ۴۵ درصد به ۱۹ درصد، نشان می‌دهد با افزایش بیشتر زاویه الیاف هسته از شدت کاهش انرژی جذب شده کاسته شده و درصد تغییرات کمتر می‌شود. در نمونه با زاویه الیاف ۶۰ درجه رفتار به نوعی است که در افزایش زاویه الیاف هسته از ۴۶ به ۵۲ درجه شاهد کاهش ۵۵ درصدی میزان جذب انرژی هستیم ولی در ادامه با افزایش زاویه الیاف هسته از ۵۲ تا ۵۸ درجه، انرژی جذب شده مجدداً ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. نمونه‌ها با زاویه الیاف ۹۰ درجه (CF...-90) مشابه نمونه‌ها با زاویه الیاف ۳۰ درجه (CF...-30) عمل کرده و با افزایش زاویه الیاف هسته از ۴۶ تا ۵۸ درجه، حدود ۲۰ درصد میزان جذب انرژی کاهش پیدا کرده است.

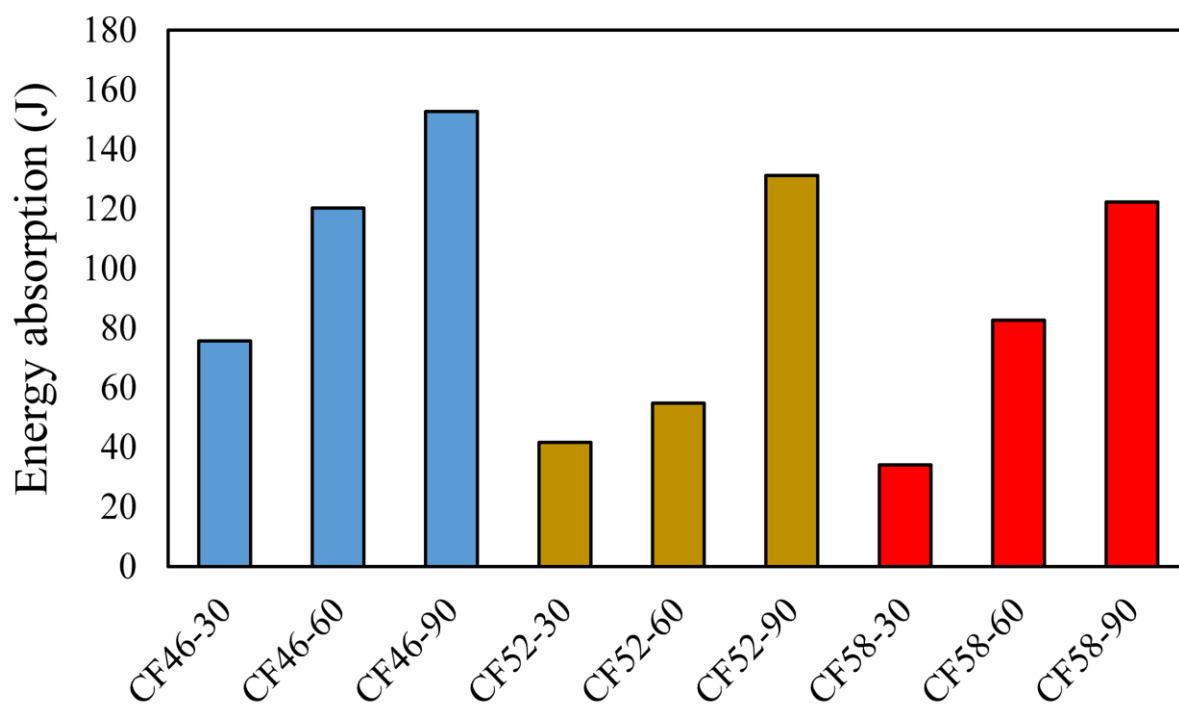
نتایج میزان جذب انرژی ویژه (SEA) در نمودار میله‌ای شکل (۱۱)، برای تمامی نمونه‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در نمونه با زاویه الیاف ۹۰ درجه با تغییرات زاویه الیاف هسته از ۴۶ تا ۵۸ درجه، بر خلاف نتایج جذب انرژی (E_a) که روندی کاهشی دارد، نتایج جذب انرژی ویژه روندی صعودی داشته و میزان جذب انرژی ویژه تا ۱۱/۵ درصد افزایش پیدا کرده است.

دلیل افزایش میزان SEA هم با توجه به کاهش وزن پانل‌های ساندویچی در نمونه با زاویه الیاف ۵۸ درجه نسبت به نمونه با زاویه الیاف ۴۶ درجه قابل توجیح است؛ با تغییر زاویه الیاف هسته از ۴۶ تا ۵۸ درجه وزن نمونه به طور میانگین ۳۰ درصد کاهش می‌یابد در نتیجه در نمونه با زاویه الیاف ۹۰ درجه، شاهد افزایش SEA هستیم.

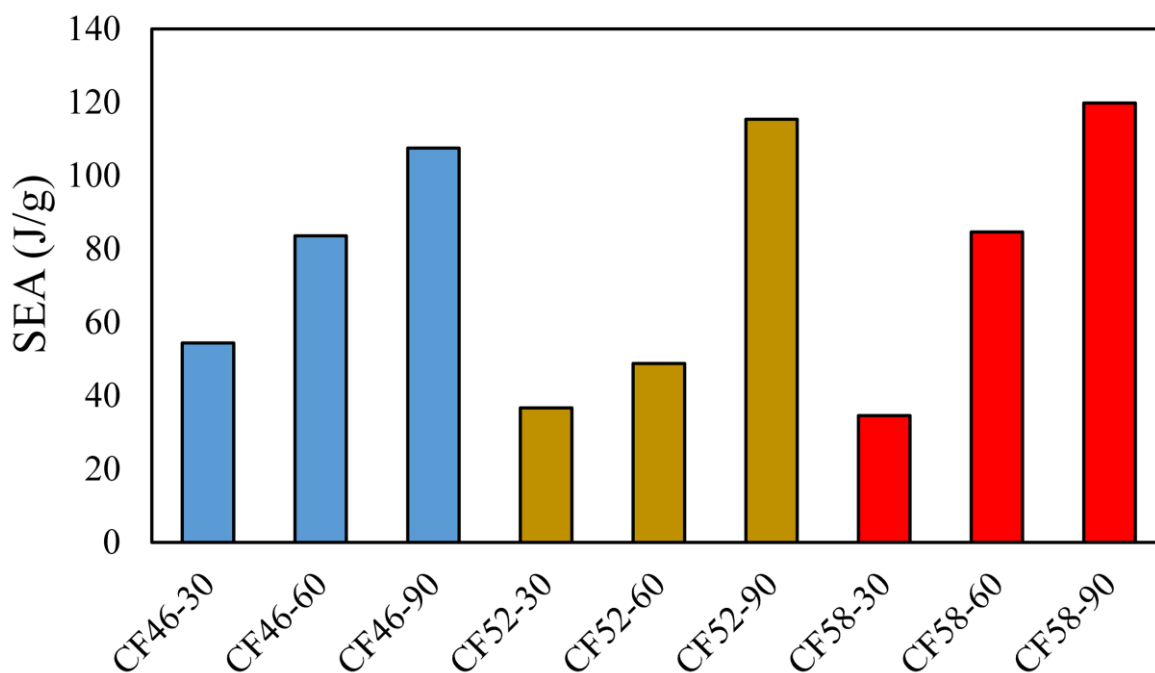
در نمونه‌ها با زاویه الیاف ۶۰ هم دیده می‌شود نمونه با زاویه الیاف ۵۸ درجه نسبت به نمونه با زاویه الیاف ۴۶ درجه در میزان SEA، حدود ۲ درصد رشد داشته است در صورتی که در میزان جذب انرژی (E_a) حدود ۳۲ درصد کاهش داشته است. در نمونه با زاویه الیاف ۳۰ درجه اگر چه با افزایش زاویه الیاف هسته، میزان SEA مشابه E_a کاهش یافته ولی اختلاف نتایج کاسته شده است و نتایج به یکدیگر نزدیک‌تر هستند.



شکل ۹- نمودار میله‌ای مقایسه میزان نیروی بیشینه در پانل‌های ساندویچی



شکل ۱۰- نمودار میله‌ای مقایسه میزان جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی

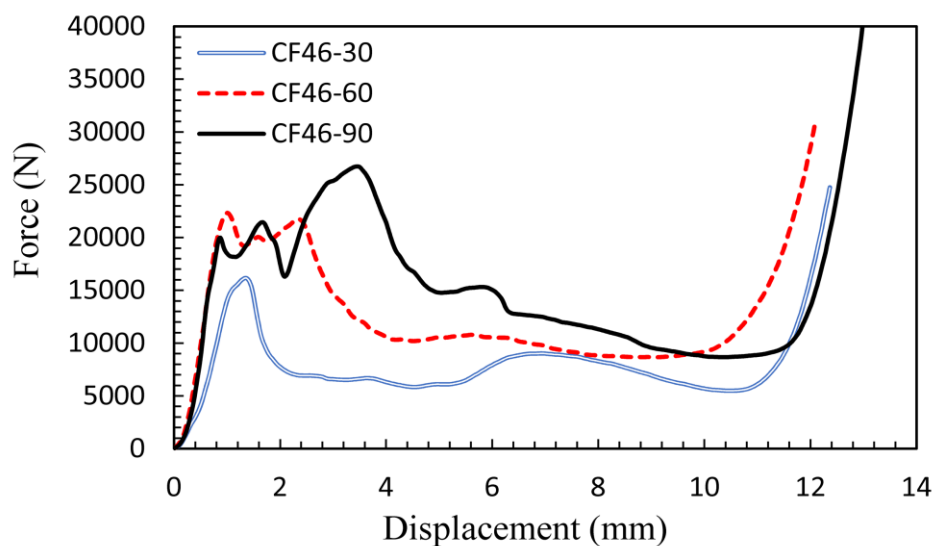


شکل ۱۱- نمودار میله‌ای مقایسه میزان جذب انرژی ویژه در پانل‌های ساندویچی

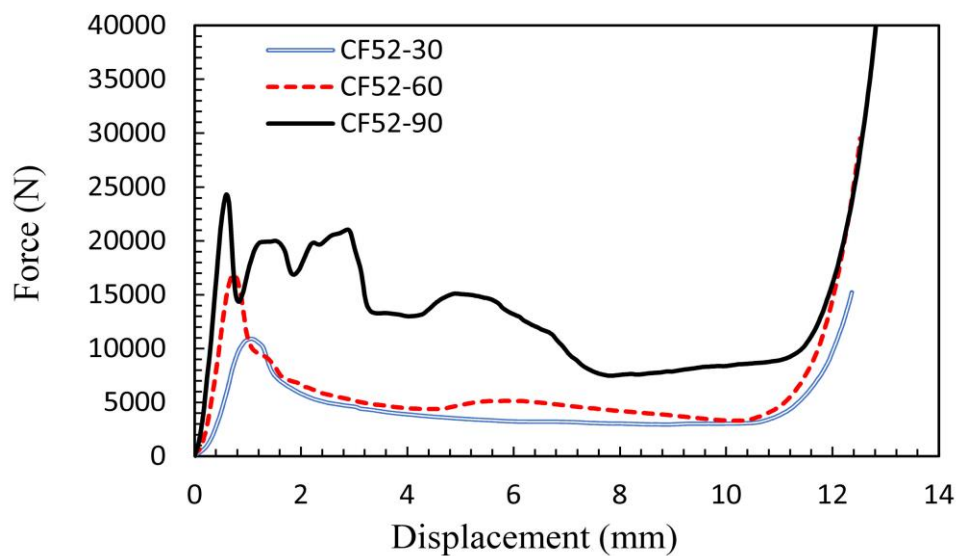
۳-۴- بررسی تأثیر زاویه الیاف در پانل ساندویچی فلز/شیشه

در این بخش تغییرات زاویه الیاف در لایه‌چینی صفحات پانل ساندویچی بر رفتار فروریزش شبه-استاتیکی بررسی و تحلیل می‌گردد. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی با ثابت نگه داشتن زاویه الیاف هسته و تغییرات در زاویه الیاف برای زاویه الیاف ۴۶، ۵۲ و ۵۸ درجه به ترتیب در شکل (۱۲-الف)، (۱۲-ب) و (۱۲-ج)، آورده شده است. با یک نگاه و به طور کلی دیده می‌شود با تغییر زاویه الیاف از ۳۰ تا ۹۰، سطح نمودار نیز افزایش می‌یابد. نتایج میزان نیروی بیشینه نشان می‌دهد در نمونه‌ها با زاویه الیاف ۴۶ درجه، با افزایش زاویه الیاف، از ۳۰ تا ۶۰ و از ۶۰ تا ۹۰ به ترتیب، ۳۸ و ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است؛ همچنین در نمونه‌ها با زاویه الیاف ۵۲ درجه به ترتیب ۵۴/۶ و ۴۴ درصد و برای نمونه با زاویه الیاف ۵۸ درجه، به ترتیب ۴۶/۴ و ۲۲/۴ درصد افزایش دیده شده است. مقایسه درصد رشد بین نتایج نشان می‌دهد افزایش نیروی بیشینه با افزایش زاویه الیاف از ۳۰ تا ۶۰ درجه بیشتر از افزایش آن از ۶۰ تا ۹۰ درجه است.

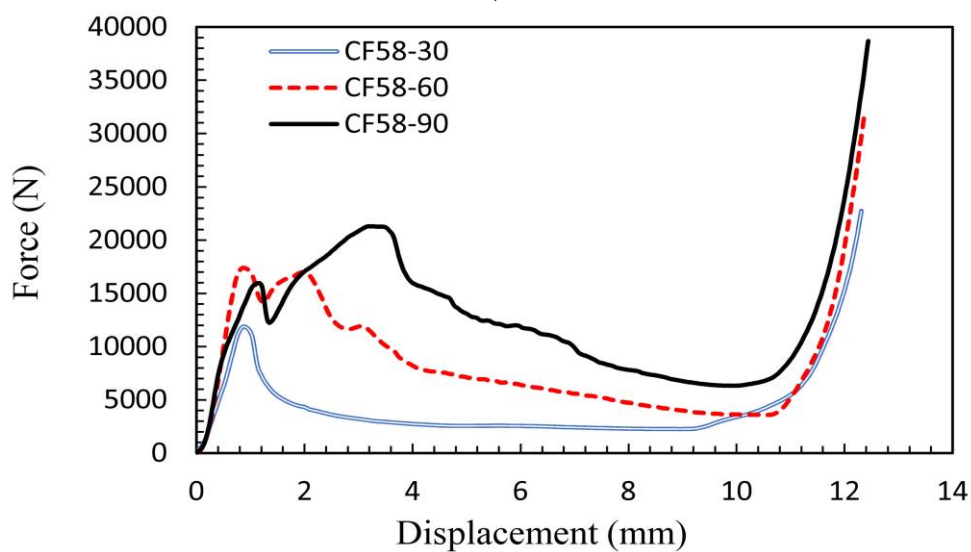
نتایج جذب انرژی که در نمودار میله‌ای شکل (۱۰) نشان داده شده، روند افزایش جذب انرژی با افزایش زاویه الیاف را تایید می‌کند. نمونه CF58-30 با میزان ۳۴ ژول جذب انرژی کمترین میزان را به خود اختصاص داده و در مقایسه با نمونه CF46-90 با میزان ۱۵۲/۷ ژول که بیشترین میزان جذب انرژی را داشته ۴/۵ برابر کمتر شده است. دلیل این افزایش جذب انرژی در تمامی نمونه‌ها با زاویه الیاف ۹۰ درجه به خاطر سطح تخریب بیشتر در محل تشکیل لولا در الیافها است، که دیده می‌شود با افزایش زاویه الیاف نمودارهای نیرو-جابجایی در قسمت نیروی بیشینه نوسانات بیشتری داشته و مانند نمونه‌ها با زاویه الیاف ۳۰ درجه از حالت تک قله‌ای خارج شده است. از آنجا که تغییر در زاویه الیاف تغییر چندانی در وزن نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند دیده می‌شود در مقادیر SEA مطابق شکل (۱۱) نیز تغییر چندانی ایجاد نشده و رفتاری مشابه با میزان جذب انرژی (E_a) نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی برای نمونه با زاویه یال‌های هسته ثابت، (الف) ۴۶ درجه، (ب) ۵۲ درجه و (ج) ۵۸ درجه

۵- نتیجه‌گیری

بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی مرکب از الیاف فلز / شیشه تحت بارگذاری فشاری شبه / استاتیکی انجام شد. دو پارامتر تأثیرگذار زاویه یال‌های هسته و زاویه الیاف بر میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج کلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- نتایج نشان داد ظرفیت جذب انرژی ویژه سازه‌ها با افزایش زاویه یال‌های هسته به واسطه کاهش ۳۰ درصدی وزن، می‌تواند تا ۱۱/۵ درصد افزایش یابد.
- شکل تخریب نمونه‌ها نشان داد، وجود لایه‌های الیاف فلزی از تردی و شکنندگی صفحات کامپوزیتی کاسته است؛ همچنین اتصال صفحات بالایی و پایینی پانل به هسته بسیار عالی بوده و هیچ گونه جدایشی دیده نشد.
- بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه با کمترین زاویه یال‌های هسته (۴۶ درجه) و بیشترین زاویه الیاف در لایه چینی صفحات کامپوزیتی (۹۰ درجه) است که تقریباً ۴/۵ برابر بیشتر از کمترین مقدار (۳۴ ژول، CF58-30) است.
- نمونه‌ها با زاویه الیاف ۳۰ درجه ناحیه تخریب کمتری نسبت به نمونه‌ها با زاویه الیاف ۹۰ درجه دارند.
- مکانیزم‌های اصلی در تخریب، شکست الیاف شیشه و ترک در یال‌های هسته بود و نشانی از لایه‌لایه شدن و جدایش هسته از صفحات رویین، در نمونه‌های تخریب شده نبود.

مراجع

- [1] R. Ogorkiewicz, "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels: Howard G. Allen Pergamon Press, Oxford (1969) 283 pp., 45s Hard Cover, 35s Soft Cover," Ed: Elsevier, 1970, doi: 10.1016/C2013-0-02134-2.
- [2] C. R. Calladine and R. W. English, "Strain-rate and Inertia Effects in the Collapse of Two Types of Energy-absorbing Structure," *Int J Mech Sci*, Vol. 26, No. 11-12, pp. 689-701, Jan. 1984, doi: 10.1016/0020-7403(84)90021-3.
- [3] S. Hou, S. Zhao, L. Ren, X. Han, and Q. Li, "Crashworthiness Optimization of Corrugated Sandwich Panels," *Mater Des*, Vol. 51, pp. 1071-1084, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.086.
- [4] C. Kılıçaslan, İ. K. Odacı, A. Taşdemirci, and M. Güden, "Experimental Testing and Full and Homogenized Numerical Models of the Low Velocity and Dynamic Deformation of the Trapezoidal Aluminium Corrugated Core Sandwich," *Strain*, Vol. 50, No. 3, pp. 236-249, Jun. 2014, doi: 10.1111/str.12085.
- [5] C. Kılıçaslan, M. Güden, İ. K. Odacı, and A. Taşdemirci, "Experimental and Numerical Studies on the Quasi-static and Dynamic Crushing Responses of Multi-layer Trapezoidal Aluminum Corrugated Sandwiches," *Thin-Walled Structures*, Vol. 78, pp. 70-78, May 2014, doi: 10.1016/j.tws.2014.01.017.
- [6] C. Kılıçaslan, M. Güden, İ. K. Odacı, and A. Taşdemirci, "The Impact Responses and the Finite Element Modeling of Layered Trapezoidal Corrugated Aluminum Core and

Aluminum Sheet Interlayer Sandwich Structures,” *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 46, pp. 121–133, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.059.

[7] X. Li, Z. Wang, F. Zhu, G. Wu, and L. Zhao, “Response of Aluminium Corrugated Sandwich Panels under Air Blast Loadings: Experiment and Numerical Simulation,” *Int J Impact Eng*, Vol. 65, pp. 79–88, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.002.

[8] S. Hou, C. Shu, S. Zhao, T. Liu, X. Han, and Q. Li, “Experimental and Numerical Studies on Multi-layered Corrugated Sandwich Panels under Crushing Loading,” *Compos Struct*, Vol. 126, pp. 371–385, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.02.039.

[9] W. He, J. Liu, B. Tao, D. Xie, J. Liu, and M. Zhang, “Experimental and Numerical Research on the Low Velocity Impact Behavior of Hybrid Corrugated Core Sandwich Structures,” *Compos Struct*, Vol. 158, pp. 30–43, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.009.

[10] T. Liu and P. Turner, “Dynamic Compressive Response of Wrapped Carbon Fibre Composite Corrugated Cores,” *Compos Struct*, Vol. 165, pp. 266–272, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.080.

[11] N. Z. M. Zaid, M. R. M. Rejab, A. F. Jusoh, D. Bachtiar, and J. P. Siregar, “Effect of Varying Geometrical Parameters of Trapezoidal Corrugated-core Sandwich Structure,” *MATEC Web of Conferences*, Vol. 90, p. 01018, Dec. 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179001018.

[12] N. Z. M. Zaid, M. R. M. Rejab, A. F. Jusoh, D. Bachtiar, J. P. Siregar, and Z. Dian Ping, “Fracture Behaviours in Compression-loaded Triangular Corrugated Core Sandwich Panels,” *MATEC Web of Conferences*, Vol. 78, p. 01041, Oct. 2016, doi: 10.1051/mateconf/20167801041.

[13] M. R. Mat Rejab, N. Z. M. Zaid, J. P. Siregar, and D. Bachtiar, “Scaling Effects for Compression Loaded of Corrugated-core Sandwich Panels,” *Adv Mat Res*, Vol. 1133, pp. 241–245, Jan. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1133.241.

[14] M. R. M. Rejab and W. J. Cantwell, “The Mechanical Behaviour of Corrugated-core Sandwich Panels,” *Compos B Eng*, Vol. 47, pp. 267–277, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.10.031.

[15] M.R.M Rejab and M. Ruzaimi, “The Mechanical Properties of Novel Lightweight Structures Based on Corrugated-cores,” Doctoral Dissertation, University of Liverpool, 2013, <https://core.ac.uk/download/80771600.pdf>.

[16] H. Taghipoor and M. Damghani Nouri, “Experimental and Numerical Investigation of Lattice Core Sandwich Beams under Low-velocity Bending Impact,” *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 21, No. 6, pp. 2154–2177, Sep. 2019, doi: 10.1177/1099636218761315.

[17] H. Taghipoor and M. Sefidi, “Energy Absorption of Foam-filled Corrugated Core Sandwich Panels under Quasi-static Loading,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 237, No. 1, pp. 234–246, Jan. 2023, doi: 10.1177/14644207221110483.

Experimental Study of Behavior of Sandwich Panel with Metal/Glass Fiber Trapezoidal Core under Quasi-static Axial Loading

Mojtaba Lashgaroo

Ph.D. Students, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Shahrood, Shahrood, Iran

m.lashgaroo@gmail.com

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran
mlashgaroo@tvu.ac.ir

*Corresponding author: **Ali Dadrasi**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ali.dadrasi@hsu.ac.ir

Vali Parvaneh

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Shahrood Branch, Shahrood, Iran

Hossein Taghipoor

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran
h.taghipoor@velayat.ac.ir

Abstract

The trapezoidal shape of composite corrugated cores has made it possible to increase their resistance against destruction. In this article, the effect of changing the geometric parameters of trapezoidal core edge angle and fiber angle in the porcelain layer of sandwich panels under quasi-static compressive loading has been studied. In the construction of composite panels used a combination of glass and metal fibers. The angle of the edges of the core is 46, 52, and 58 degrees, and the angle of the fibers in the porcelain layer is 30, 60, and 90 degrees are chosen. The absorbed energy and maximum force in the form of destruction samples were discussed after the quasi-static compression test. The results have shown that increasing the fiber angle from 30 to 90 degrees can increase the maximum force by 123% and energy absorption by 260%. The mechanism of plastic deformation of metal fibers and breakage of glass fibers in the area of plastic hinge formation at the edges of the core are the main mechanisms of destruction, and no delamination was seen in the plates. Also, the separation of the core from the top of the composite was not observed in the panel due to the high adhesion of the core and the tops of the plates, which indicates the high quality of these panels.

Keywords: Energy absorption, Glass fibers, Metal fibers, Quasi-static loading, Sandwich panel