

خواص خمشی تیرهای ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف

مصطفی سبزیکار بروجردی^۱، سهیل داریوشی^۲، مجتبی صدیقی^{۳*}

- ۱- فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزکوه، گروه فنی مهندسی، صندوق پستی ۱۴۸
- ۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۴۳۱۱-۱۵۹۱۶۳

دریافت: ۹۰/۱۱/۳۰، پذیرش: ۹۱/۷/۳

چکیده

کاربرد سازه‌های ساندویچی در سازه‌هایی که وزن در آنها اهمیت زیادی دارد، مثل هواپیماها، قایق‌ها و قطارهای تندرو در حال افزایش است. انتخاب مناسب جنس هسته و رویه‌ها از نکات مهم در طراحی سازه‌های ساندویچی است. امروزه استفاده از رویه‌های فلزی یا کامپوزیتی رایج است. اما، هریک از این مواد معایبی دارند که کاربرد آنها را محدود می‌سازد. از این رو، چندلایه‌های فلز - الیاف با داشتن خواص مکانیکی مناسب که تلفیقی از خواص فلزها و کامپوزیت‌های الیافی است، می‌توانند جایگزینی مناسب برای سازه‌های ساندویچی سنتی باشند. در این پژوهش، رفتار تیرهای ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های آلومینیم - الیاف شیشه زیر بار خمشی بررسی شده است. برای انجام آزمون‌های تجربی سه گروه نمونه با رویه‌های با لایه‌چینی متفاوت شامل $AL/GE(0-90)/(90-0)/AL/GE$ ، $AL/GE(0-90)/AL/GE(90-0)$ و $GE(0-90-0-90-90-0-90-0)$ ساخته و آزمایش شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، سازه‌های ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف توزیع مناسب‌تری از بار را روی کل سازه ایجاد می‌کنند و پیوستگی ساختاری آنها تا پایان مرحله فشردگی کامل هسته به خوبی حفظ می‌شود. اتصال خوب لایه کامپوزیتی و هسته اسفنجی از دیگر نکاتی است که ظرفیت تحمل بار سازه را افزایش می‌دهد. در بخش تحلیلی نیز با استفاده از روش کلاسیک، نمودارهای نیرو - جابه‌جایی در ناحیه کشسان، برای هریک از نمونه‌ها به دست آمده است. مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی نشان می‌دهد، خرابی در تیرهای ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف به دلیل بزرگ‌تر بودن ناحیه کشسانی، دیرتر شروع می‌شود، پیش‌بینی تحلیلی در ناحیه بزرگ‌تر منطبق بر نتایج تجربی است و مدل تحلیلی رفتار این تیرهای ساندویچی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی

تیر ساندویچی،
چندلایه‌های فلز - الیاف،
خمش سه نقطه‌ای،
الیاف شیشه،
لایه چینی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mojtaba@aut.ac.ir

مقدمه

امروزه سازه‌های ساندویچی به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، صنایع دریایی و خودروسازی کاربرد دارند. این مواد به واسطه سفتی و مقاومت ویژه زیاد، عایق‌بودن نسبی در برابر گرما و صدا، قابلیت ساخت و پایداری مناسب مقبولیت ویژه‌ای یافته‌اند. به‌طور کلی، ساختار سازه‌های ساندویچی از رویه بالایی، هسته و رویه پایینی تشکیل می‌شود. سفتی هسته در راستای عمود بر رویه‌ها باید به اندازه‌ای باشد که بتواند رویه‌ها را در فاصله طراحی شده نگه دارد و سفتی خمشی کلی سازه را تأمین کند. استحکام برشی هسته نیز باید به اندازه کافی باشد تا هنگام خمش سازه، رویه‌ها نسبت به یکدیگر لغزش نداشته باشند، در غیر این حالت خاصیت ساندویچی از بین می‌رود و رویه‌ها مانند تیر یا ورق‌های مجزا عمل می‌کنند [۴-۱].

از مسائل مهم در سازه‌های ساندویچی انتخاب مناسب جنس هسته و رویه‌هاست. جنس هسته می‌تواند از مواد مختلفی مانند لانه زنبوری آلومینیمی یا کاغذی، انواع اسفنج‌ها، چوب بالسا یا ورق‌های کرکره‌ای یا چین‌دار (corrugated) باشد. در سازه‌های ساندویچی رویه‌ها معمولاً از صفحات فلزی نازک یا کامپوزیت‌های الیافی ساخته می‌شوند. رویه‌های کامپوزیتی موجب افزایش سفتی خمشی در واحد وزن می‌شوند و می‌توانند تعداد قطعات را نیز در ساخت کاهش دهند. اما، در استفاده از کامپوزیت‌ها، عوامل محدودکننده‌ای مانند کاهش مقاومت سازه در برابر بارهای عرضی و عوامل محیطی نیز مطرح است. رویه‌های فلزی نیز مقاومت در برابر بارهای عرضی را افزایش می‌دهند، ولی موجب افزایش قابل توجه وزن سازه می‌شوند. اما، چندلایه‌های فلز-الیاف با داشتن خواص مکانیکی مناسب که تلفیقی از خواص فلزها و کامپوزیت‌های الیافی است، می‌توانند جایگزینی مناسب برای رویه‌های فلزی یا کامپوزیتی باشند.

چندلایه‌های فلز-الیاف نسل جدیدی از کامپوزیت‌های هیبریدی‌اند که نسبت مقاومت به وزن زیادی دارند. این چندلایه‌ها از لایه‌های فلز و لایه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های الیافی تشکیل شده‌اند. در دهه‌های اخیر، چندلایه‌های مزبور کاربرد گسترده‌ای در صنایع، به‌ویژه صنایع هوایما سازی پیدا کرده‌اند. از مجموعه خواص منحصر به فرد چندلایه‌ها می‌توان به مقاومت خستگی خوب، مقاومت ضربه عالی، مقاومت باقی مانده و حساسیت به ترک خوب، مقاومت در برابر آتش و خوردگی مناسب را نام برد [۱۰-۵].

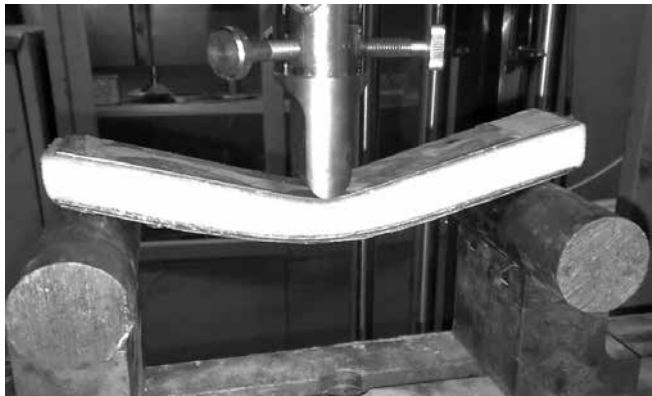
مطالعه خواص خمشی سازه‌های ساندویچی موضوعی است که در مقالات فراوانی از دیدگاه‌های مختلف بررسی شده است. Manalo و همکاران [۱۱] رفتار خمشی نسل جدیدی از تیرهای ساندویچی با رویه‌هایی از جنس کامپوزیت‌های الیافی و هسته فنولی

اصلاح شده را بررسی کردند. آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای در دو حالت در راستای عرضی (حالت عادی) و در راستای ضخامت تیرها انجام شد. تیرهای بارگذاری شده در راستای ضخامت در حد بالاتری از نیرو و با تغییر شکل‌های کمتری دچار شکست شدند. در این راستا علت اصلی شکست، شکستن تدریجی رویه‌ها بود. در حالی که تیرهای بارگذاری شده در راستای عرضی دچار شکست برشی هسته، شکست هسته و در نهایت جدایی رویه از هسته شدند. در این مطالعه، نتایج روش‌های تحلیلی و عددی از توافق مناسبی با نتایج تجربی برخوردار بوده است.

Tagarielli و همکاران [۱۲] خرابی تیرهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته PVC را در شرایط تکیه‌گاه ساده و گیردار مطالعه کردند. در این پژوهش، اولین شیوه شکست هر یک از تیرهای ساندویچی و عوامل مؤثر بر تنش نهایی برای شکست کامل، مطالعه شد. کماتش موضعی رویه‌ها، شکست برشی هسته و نفوذ، اولین شیوه‌های شکست بودند. با به‌کار گرفتن یک روش تحلیلی ساده و نیز استفاده از یک نرم‌افزار اجزای محدود، نیروی لازم برای شروع خرابی تیر پیش‌بینی شد که با نتایج تجربی توافق خوبی نشان داده است.

Hahn و Dai [۱۳] رفتار تیرهای ساندویچی ساخته‌شده به روش قالب‌گیری و انتقال رزین را به کمک خلأ در برابر بارهای ایستا و خستگی ارزیابی کردند. رویه تیرها از جنس کامپوزیت شیشه-وینیل استر و هسته از دو جنس چوب بالسا یا اسفنج PVC انتخاب شد. برای هر نمونه، شیوه شکست اولیه در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای معین شده است. در تمام تیرهای کوتاه شکست هسته موجب از بین رفتن قابلیت حمل بار شد. در تیرهای بلند هر چند شکست هسته وجود داشت، ولی علت اصلی از بین رفتن قابلیت حمل بار سازه، شکست رویه‌ها بود. در آزمون‌های خستگی که فقط روی تیرهای با هسته چوب بالسا انجام شد، شیوه شکست هم در نمونه‌های کوتاه و هم در نمونه‌های بلند، مانند همان شیوه شکستی بود که تحت بار ایستا نشان داده بودند.

Steeves و Fleck [۱۴، ۱۵] تیرهای ساندویچی ساخته‌شده از رویه‌های شیشه-اپوکسی و هسته اسفنج PVC را زیربارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای مورد آزمون قرار دادند و سازوکار خرابی را برحسب تغییر ابعاد هندسی مشخص کردند. آنها رفتار تیرهای ساندویچی را با استفاده از روش اجزای محدود و نیز تحلیل براساس نظریه کلاسیک مدل‌سازی کرده و نشان دادند که نظریه کلاسیک با وجود سادگی، نیروی بیشینه تحمل تیر را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. Mamalis و همکاران [۱۶] خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچی



شکل ۱- نمونه زیر بارگذاری خمش سه نقطه‌ای.

پلی‌یورتان با چگالی 40 kg/m^3 بود. اپوکسی مورد استفاده با چگالی 1.14 g/cm^3 ، گرانی 1700 MPa.s و با نسبت وزنی $12:100$ با سخت‌کننده مخلوط شده و به مدت 24 h در دمای محیط و زیر فشار 0.5 MPa پخت شد. با توجه به محاسبات و معادله‌های آمده در مرجع [۱۹]، درصد حجمی الیاف برای صفحات کامپوزیتی ساخته شده محاسبه شد که درصد حجمی الیاف به‌طور میانگین 55% بود. نمونه‌ها به شکل صفحاتی در اندازه $250 \times 300 \text{ mm}^2$ با لایه‌چینی‌های مختلف تهیه شد. سپس، این لایه‌ها در اندازه‌های $250 \times 35 \text{ mm}^2$ بریده شده و به‌وسیله رزین اپوکسی از همان نوع ذکر شده، به سطح بالایی و پایینی اسفنج‌های از جنس پلی‌یورتان با ضخامت 20 mm چسبانده شد. برای ایجاد شرایط اتصال بهتر، نمونه‌ها در دمای 60°C و فشار 0.5 MPa به مدت 6 h در کوره پخت شدند. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C393 با سرعت بارگذاری 5 mm/min در 3 نوع، با زاویه الیاف متفاوت در رویه تیرهای ساندویچی تهیه شدند تا بررسی دقیقی روی اثر لایه‌چینی و جنس لایه‌ها بر خواص خمشی این دسته از سازه‌های ساندویچی و مقایسه آنها با سازه‌های ساخته شده با رویه‌های کامپوزیتی انجام شود. ابعاد نمونه‌ها $250 \times 35 \times 23 \text{ mm}$ بود که به وسیله دستگاه کشش Zwick با ظرفیت 60 تن مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۱). برای بررسی تکرارپذیری آزمون‌ها از هر نوع 3 نمونه کاملاً در شرایط مشابه آزمایش شد. نام‌گذاری، نحوه لایه‌چینی و زاویه الیاف هر نمونه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- نام‌گذاری نمونه‌ها، نحوه لایه‌چینی و زاویه الیاف لایه‌های کامپوزیتی.

نحوه لایه‌چینی و زاویه الیاف	کد نمونه
AL/GE(0-90)/GE(90-0)/AL/CORE/ AL/GE(0-90)/GE(90-0)/AL	A
AL/GE(0-90)/AL/GE(90-0)/CORE/GE(0-90)/AL/GE(90-0)/AL	B
GE(0-90-0-90-0-90-0)/CORE/ GE(0-90-0-90-0-90-0)	C

ساخته شده با رویه‌های فلزی و هسته اسفنجی را زیر بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بررسی کردند. آنها ساختار جدیدی با ویژگی‌های مثبت سازه‌های ساندویچی تمام فلزی (فلز - لانه زنبوری) و تمام پلاستیک (کامپوزیت - اسفنج) ارائه کردند. این ساختارها معایب این دو گونه سازه را نیز تا حدود زیادی برطرف کرده بود و به همین منظور از رویه‌های فلزی آلومینیومی و فولادی روی هسته PVC استفاده شد. البته برای بهبود خواص مکانیکی پیشنهاد شد، بین رویه‌ها و هسته یک میان‌لایه کامپوزیتی یا چوبی قرار داده شود. شایان ذکر است، اثر به‌کارگیری این روش، به‌ویژه در افزایش مقاومت به ضربه این سازه‌ها به کمک آزمون‌های تجربی نشان داده شده است.

Tan و Akil [۱۷] به روش تجربی خواص ضربه تیرهای ساندویچی با رویه فلز - کامپوزیت و هسته از جنس لانه زنبوری‌های پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. آنها نشان دادند، اولین شیوه‌های خرابی سازه زیر ضربه سرعت کم، لایه‌لایه شدگی در رویه‌ها و خمش کلی سازه است.

Kiratisaevve و Cantwell [۱۸] با بررسی خواص ضربه سرعت کم سازه‌های ساندویچی با هسته‌های از جنس اسفنج‌های آلومینیومی و رویه‌های از جنس آلومینیم و کامپوزیت شیشه - پلی‌پروپیلن نشان دادند، این سازه‌ها قابلیت جذب انرژی زیاد دارند. همچنین، خرابی ایجاد شده در یک تیر ساندویچی یک سرگردار، پیدایش و رشد ترک در ناحیه اتصال رویه به هسته و ادامه یافتن ترک در هسته و نیز له‌شدن هسته و شکست الیاف رویه در ناحیه برخورد ضربه زنده است.

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از ایده کاربرد مناسب سازه‌های هیبریدی، ساختار ساندویچی جدیدی با به‌کارگیری رویه‌هایی از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف به جای رویه‌های تمام فلزی یا کامپوزیتی معرفی و اثر تغییر لایه‌چینی روی خواص خمشی تیرهای ساندویچی با ساختار مزبور بررسی شد. به این منظور، 3 دسته نمونه مطابق با استانداردهای موجود ساخته و آزمایش شد. نتایج به‌دست آمده با استفاده از یک روش تحلیلی براساس نظریه کلاسیک بررسی و مقایسه دقیق شد.

تجربی

مواد و روش‌ها

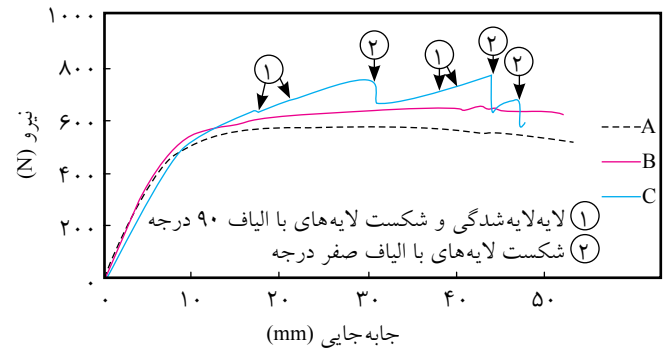
مواد استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها شامل الیاف شیشه تک‌جهتی نوع E-glass با چگالی 2.5 g/cm^3 ، رزین اپوکسی و سخت‌کننده نوع EPOLAM2002 تولید شده در شرکت AXSON فرانسه و اسفنج

جدول ۲- انرژی جذب شده و بیشترین نیروی قابل تحمل برای هر نمونه.

کد نمونه	انرژی جذب شده (N.m)	بیشترین نیروی قابل تحمل (N)
A	$29/36 \pm 0/4$	580 ± 5
B	$30/21 \pm 1/1$	650 ± 29
C	$28/12 \pm 1/4$	770 ± 46

مناسب نیروی روی اجزای مختلف این نوع از سازه‌های ساندویچی است. زیرا بدون اینکه از ظرفیت رویه پایینی برای جذب انرژی یا افزایش مقاومت استفاده شود، سازه به شکست رسیده است. سقوط‌هایی هم که در تغییر شکل ۳۱ و ۴۴ mm در منحنی نیرو - تغییر شکل این سازه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده شکست لایه‌های مختلف رویه بالایی است.

برای بررسی وضعیت آسیب در هر یک از اجزای تیرهای ساندویچی، شیوه‌های شکست قابل مشاهده در هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است. در نمونه‌های A و B تا پایان بارگذاری در رویه‌ها هیچ نوع خرابی ظاهری مشاهده نشد. البته همان‌طور که در شکل ۲ و جدول ۲ آمده، جذب انرژی نمونه B به مقدار ۱۱٪ بیشتر از نمونه A است. این مسئله را می‌توان به اتصال مناسب لایه کامپوزیتی مجاور هسته، به هسته نسبت داد. استفاده از لایه کامپوزیتی در بین لایه فلزی و هسته باعث شده تا توزیع مناسب‌تری از بار روی هسته ایجاد شود، درحالی‌که رویه‌ها از نظر تعداد لایه‌های فلزی و کامپوزیتی یکسان‌اند، در بارهای برابر، نمونه B تغییر شکل کمتری نشان می‌دهد. با مقایسه رفتار خمشی تیرهای A، B و C می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف موجب افزایش یک‌پارچگی سازه و پیشرفت همسان خرابی در دو رویه و نیز توزیع یکنواخت بار روی کل طول تیر می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط گفته

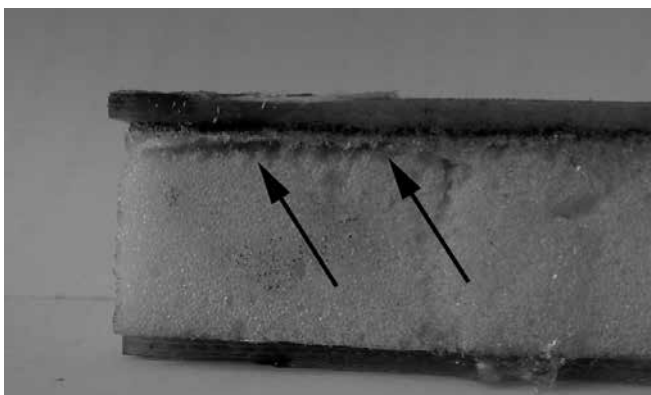


شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای نیرو - تغییر شکل براساس نتایج تجربی.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای به صورت منحنی‌های نیرو - تغییر شکل به دست آمد. مقایسه این منحنی‌ها با یکدیگر در شکل ۲ و انرژی جذب شده و همچنین بیشترین نیروی تحمل شده به وسیله هر نمونه در جدول ۲ آمده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، نمونه C با رویه‌های کامپوزیتی بیشترین مقدار جذب انرژی را دارد. علت این موضوع را می‌توان به شکست تدریجی رویه بالایی در تمام طول بارگذاری نسبت داد. در این نمونه ناحیه کشسان کوچک است و با اعمال نیروی کوچکی شکست ماتریس و سپس لایه‌لایه‌شدگی رویه بالایی آغاز می‌شود. با ادامه روند بارگذاری، شکست الیاف نیز رخ داده و رویه بالایی پیوستگی ساختاری را از دست می‌دهد و کاملاً می‌شکند. شیوه‌های شکست مشابهی برای تیرهای ساندویچی با هسته PVC و رویه‌های کامپوزیتی در مرجع ۱۲ گزارش شده است. به علاوه در مرجع ۱۳ نیز نتایج مشابهی گزارش شده است که نشان می‌دهد، اولین شیوه شکست برای رویه‌های کامپوزیتی ایجاد ترک در ماتریس و سپس لایه‌لایه‌شدگی رویه‌ها بوده است.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای نمونه C ناحیه خطی افقی که مربوط به فشردگی هسته است، وجود ندارد. زیرا، هم‌زمان با فشردگی هسته، شکست تدریجی رویه نیز رخ داده و بخشی از نیرو که صرف این شکست شده با نیروی ثابتی که برای فشردگی هسته لازم است، جمع می‌شود و روندی افزایشی را نشان می‌دهد. نکته دیگر درباره نمونه مزبور این است که به دلیل تغییر شکل زیاد رویه بالایی و شکست سریع آن در زیر بار، اولاً فرورفتگی رویه در هسته در زیر محل بارگذاری ایجاد می‌شود. ثانیاً، نیروی برشی بین هسته و رویه بالایی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده جدایش رویه بالایی از هسته رخ داده است. در نمونه C، رویه پایینی کاملاً سالم مانده و هیچ خرابی در آن مشاهده نمی‌شود، این موضوع نشان‌دهنده عدم توزیع



شکل ۳- جدایش رویه از هسته در نمونه C.

جدول ۳- خرابی‌های قابل مشاهده در هریک از اجزای تیرهای ساندویچی پس از انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

کد نمونه	رویه بالایی	هسته	رویه پایینی
A	تغییر شکل پلاستیک کلی، جدایش جزئی از هسته در اطراف ناحیه بارگذاری	له‌شدگی در زیر محل بارگذاری، پارگی برشی جزئی در محل تکیه‌گاه‌ها	تغییر شکل پلاستیک کلی کمتر از لایه بالایی
B	تغییر شکل پلاستیک کلی	له‌شدگی در زیر محل بارگذاری، پارگی برشی جزئی در محل تکیه‌گاه‌ها	تغییر شکل پلاستیک کلی تقریباً معادل لایه بالایی
C	رشد ترک در ماتریس، لایه‌لایه‌شدگی و شکست الیاف، جدایش رویه از هسته در محل نزدیک به تکیه‌گاه‌ها	له‌شدگی در زیر محل بارگذاری، پارگی برشی، نفوذ رویه در هسته	سالم

در معادله‌های گفته شده E_c مدول کشسانی هسته، G_c مدول برشی هسته، t_f ضخامت رویه‌ها، b عرض نمونه و c ارتفاع هسته است. همچنین، E_f مدول کشسانی رویه‌هاست که با استفاده از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$E_f = \frac{1}{t_f} \left(\sum_{i=1}^n E_i t_i \right) \quad (5)$$

در این معادله n تعداد لایه‌های رویه و E_i و t_i به ترتیب مدول کشسانی و ضخامت هر لایه است.

نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش از نظر اندازه و جنس اجزای تشکیل‌دهنده، کاملاً مشابه هستند. هندسه و اندازه نمونه‌ها در شکل ۴ و خواص مکانیکی هریک از اجزا در جدول ۴ آمده است. بیشینه تغییر شکل وسط تیر برای تمام نمونه‌ها، با استفاده از معادله (۱) به دست آمد. مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر شکل تحلیلی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمون در شکل‌های ۵-الف و ب آمده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، در روش تحلیلی ترتیب قرارگرفتن لایه‌ها اثری روی نتایج ندارد و برای هر دو نمونه A و B یک نمودار تحلیلی به دست آمده است. نمودار تحلیلی مقاومت نمونه را بیش از آنچه در نمودار تجربی به دست آمده نشان می‌دهد (بیشینه خطا ۱۵٪). علت این موضوع را می‌توان وجود عیوب ساختاری در نمونه‌ها، ایده‌آل نبودن شرایط آزمون‌ها و همچنین فرض‌های ساده‌کننده‌ای دانست که در مدل تحلیلی به کار رفته است.

جدول ۴- خواص مکانیکی مواد استفاده شده.

خواص مکانیکی	مواد
$E = 70 \text{ GPa}$ $E = 39 \text{ GPa}$ $E = 14 \text{ GPa}$	آلومینیم ۱۰۵۰ ورق کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با زاویه الیاف صفر درجه ورق کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با زاویه الیاف ۹۰ درجه
$E = 12 \text{ MPa}$ $G = 4 \text{ MPa}$	اسفنج پلی‌یورتان

شده و نیز دانستن این مسئله که رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز-الیاف از رویه‌های تمام فلزی سبک‌ترند، می‌توان گفت، استفاده از این ساختار جدید در صنایع مختلف می‌تواند جایگزینی مناسب برای رویه‌های تمام کامپوزیتی و تمام فلزی باشد.

برای مقایسه نتایج تجربی به دست آمده با نتایج تحلیلی، از روش ساده برای پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای ساندویچی در ناحیه کشسان، بر پایه تحلیل کلاسیک استفاده شده است. براساس این مدل، بیشینه تغییر مکان در وسط تیر بر اثر تغییر شکل برشی و تغییر شکل خمشی رخ می‌دهد. طبق نظریه ساده تیرها، تغییر مکان بیشینه تیرهای ساندویچی متقارن از معادله (۱) به دست می‌آید [۲۰]:

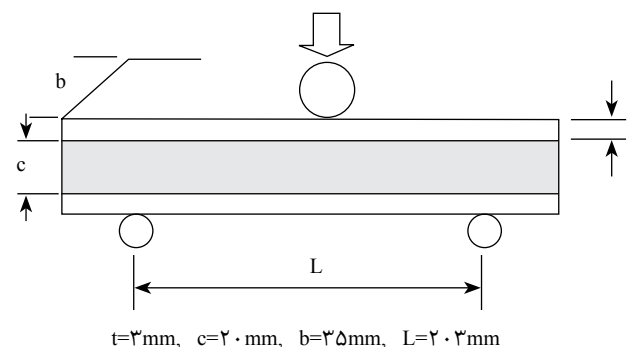
$$w = \left(\frac{Pl^3}{48D} \right) + \left(\frac{Pl}{4S} \right) \quad (1)$$

که در آن، w بیشینه تغییر مکان تیر، P نیروی اعمال شده، l طول تیر، D سفتی خمشی و S سفتی برشی تیر است که به کمک معادله (۲) معین می‌شود:

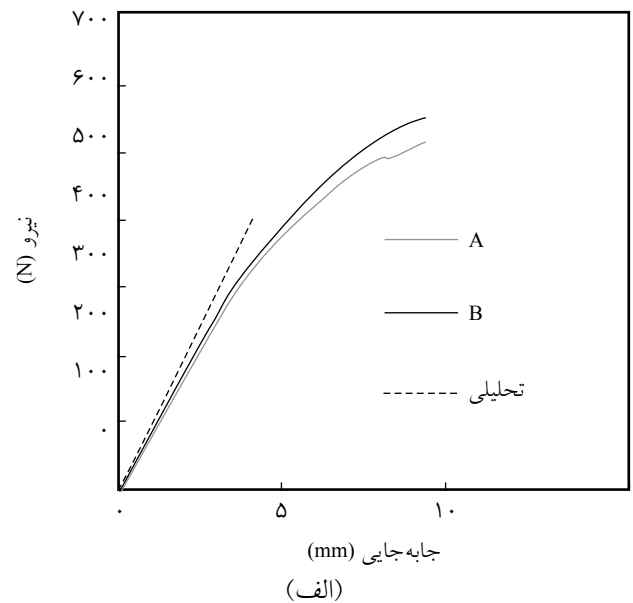
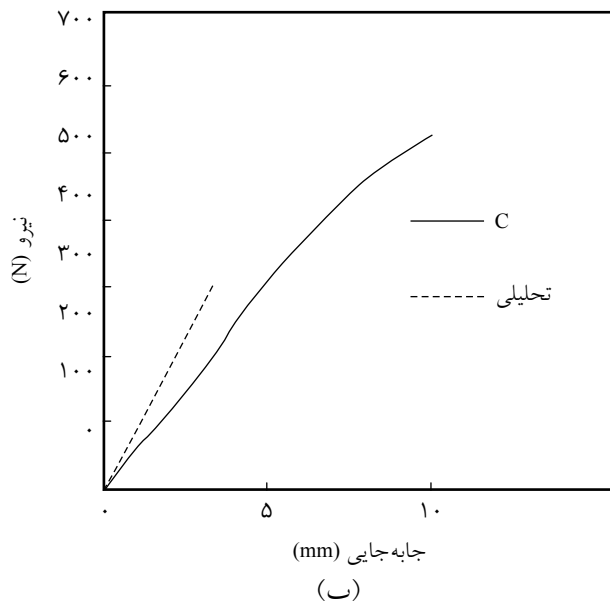
$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (2)$$

$$S = G_c \frac{bd^2}{c} \quad (3)$$

$$d = t + c \quad (4)$$



شکل ۴- هندسه و ابعاد نمونه.



شکل ۵- نمودار نیرو - تغییر شکل برای مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی: (الف) نمونه‌های A و B و (ب) نمونه C.

شد. بررسی تجربی نتایج نمونه‌های ساخته‌شده در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد، در نمونه‌های با رویه از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف (نمونه A و B) توزیع نسبتاً یکنواختی از بار روی کل سازه انجام می‌شود. این مسئله باعث می‌شود، از کل ظرفیت تحمل بار سازه استفاده شده و حتی تا پایان مرحله فشردگی هسته، در رویه‌ها خرابی قابل مشاهده‌ای ایجاد نشود. درحالی‌که در نمونه با رویه کامپوزیتی (نمونه C) شکست رویه که شامل شکست ماتریس و لایه‌لایه‌شدگی است، خیلی زود شروع شده و در ادامه جدایش بین رویه و هسته اتفاق می‌افتد. در پایان بارگذاری نیز با شکست الیاف رویه بالایی پیوستگی ساختاری آن از بین رفته و قابلیت تحمل بار را از دست می‌دهد. نکته شایان توجه در نمونه‌های از نوع C آن است که در هیچ یک از آزمون‌های انجام شده روی این نمونه‌ها آسیب قابل مشاهده‌ای به رویه پایینی وارد نمی‌شود و این موضوع نشان‌دهنده توزیع نامناسب بار در سازه است. مقایسه نمونه‌های A و B که فقط در ترتیب قرارگرفتن لایه‌های رویه‌ها با هم اختلاف داشتند نشان داد، اتصال لایه کامپوزیتی به هسته اسفنجی بهتر از اتصال لایه فلزی به هسته انجام می‌شود. بنابراین، رویه‌های چندلایه‌های فلز - الیاف علاوه بر سبک‌تر بودن از رویه‌های تمام فلزی مزیت اتصال بهتر به هسته را نیز دارد. بررسی رفتار خمشی نمونه‌ها با استفاده از روش تحلیلی ساده در محدوده کشسان و مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و نتایج تجربی نمایانگر آن است که برای نمونه‌های A و B به دلیل شروع دیرتر خرابی‌ها و بزرگ‌تر بودن منطقه کشسان با استفاده از همین مدل ساده هم می‌توان

افزون بر موارد ذکر شده، در نمونه C شکست در رویه بالایی خیلی زود شروع می‌شود و بخش کشسان بسیار کوچک است. از این رو، اختلاف نمودارهای تجربی و تحلیلی برای نمونه C (شکل ۵-ب) بیشتر از دو نمونه A و B است. البته با توجه به کامپوزیتی بودن رویه در نمونه C مرز مشخصی را نمی‌توان برای محدوده کشسان مشخص کرد، زیرا با شروع بارگذاری شکل‌گیری ترک‌ها در ماتریس شروع شده و خیلی سریع رشد این ترک‌ها موجب ورود به فاز پلاستیک می‌شود، با توجه به این نکته در محدوده خطی اولیه بیشینه خطا ۲۳٪ محاسبه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش تحلیلی و نتایج به‌دست آمده از آزمون روی نمونه‌ها در مواردی که نمونه‌ها ناحیه کشسان بزرگ‌تری دارند، توافق مناسبی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مزایای استفاده از رویه‌های فلز-الیاف نسبت به رویه‌های کامپوزیتی در سازه‌های ساندویچی به شرح زیر است:

- ۱- به تعویق انداختن شروع خرابی (ناحیه کشسان بزرگ‌تر)،
- ۲- مقاومت زیاد در برابر بارگذاری‌های محلی،
- ۳- افزایش قابلیت تغییر شکل عرضی در سازه و
- ۴- حفظ یک پارچگی سازه حتی پس از شکست نمونه.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار سازه‌های ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های آلومینیم - الیاف شیشه در برابر بارهای خمشی بررسی

رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز - الیاف به‌شمار رود.

پیش‌بینی مناسبی از رفتار خمشی این سازه‌ها انجام داد. این موضوع هم می‌تواند به عنوان یکی دیگر از مزایای سازه‌های ساندویچی با

مراجع

- Vinson J.R., *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic, USA, 1999.
- Zenkert, D., *An Introduction to Sandwich Construction*, Chameleon, UK, 1995.
- Nemati S., Jam J.E., and Beheshty M.H., Effect of Rigid Polyurethane Foam Core Density on Flexural and Compressive Properties of Sandwich Panels with Glass/Epoxy Faces, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **23**, 3-16, 2010.
- Sadighi M. and Saadati M., Unequal Faces Effect on Fracture of Composite Sandwich Beam with Flexible Core, *Appl. Compos. Mater.*, **17**, 111-120, 2010.
- Wu G. and Yang J.M., The Mechanical Behavior of Glare Laminates for Aircraft Structures, *JOM*, **57**, 72-79, 2005.
- Sinmazcelik T., Avcu E., Bora M., and Coban O., A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods, *Mater. Design*, **32**, 3671-3685, 2011.
- Vermeeren C., An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates, *Appl. Compos. Mater.*, **10**, 189-200, 2003.
- Vogeslang L.B. and Volt A., Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Materials, *J. Mater. Proc. Technol.*, **103**, 1-5, 2000.
- Botelho EC., Silva RA., Pardini LC., and Rezende MC., A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Mater. Res.*, **9**, 247-256, 2006.
- Sadighi M., Tajdari M., and Dariushi S., An Investigation on Tensile Properties of Glass Fiber/Aluminum Laminates, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **22**, 31-39, 2009.
- Manalo A.C., Aravinthan T., Karunasena W., and Islam M.M., Flexural Behaviour of Structural Fibre Composite Sandwich Beams in Flatwise and Edgewise Positions, *Compos. Struct.*, **92**, 984-995, 2010.
- Tagarielli V.L., Fleck N.A., and Deshpande V.S., Collapse of Clamped and Simply Supported Composite Sandwich Beams in Three-Point Bending, *Composites, B*, **35**, 523-534, 2004.
- Dai J. and Hahn H.T., Flexural Behavior of Sandwich Beams Fabricated by Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding, *Compos. Struct.*, **61**, 247-253, 2003.
- Steeves C.A. and Fleck N.A., Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded Three-Point Bending. Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design, *Int. J. Mech. Sci.*, **46**, 561-583, 2004.
- Steeves C.A. and Fleck N.A., Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and A Foam Core, Loading Three-Point Bending. Part II: Experimental Investigation and Numerical Modelling, *Int. J. Mech. Sci.*, **46**, 583- 608, 2004.
- Mamalis A.G., Spentzas K.N., Pantelelis N.G., Manolakos D.E., and Ioannidis M.B., A New Hybrid Concept for Sandwich Structures, *Compos. Struct.*, **83**, 335-340, 2008.
- Tan C.Y. and Akil H.M., Impact Response of Fiber Metal Laminate Sandwich Composite Structure with Polypropylene Honeycomb Core, *Composites, B*, **43**, 1433-1438, 2012.
- Kiratisaevee H. and Cantwell W.J., The Impact Response of Aluminum Foam Sandwich Structures Based on a Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Fiber-Metal Laminate, *Polym. Compos.*, **25**, 499-509, 2004.
- Sabzikar Boroujerdy M., Dariushi S., and Sadighi M., Fiber Metal Laminates under Low Velocity Impact: An Experimental/Analytical Approach, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **24**, 69-78, 2011.
- Zenkert D., *The Handbook of Sandwich Construction*, Emas, UK, 1997.