



بررسی رفتار کمانشی صفحات لایه‌ای الیاف- فلز ساخته شده از الیاف جوت- شیشه

مهران جعفری باغجقاز^۱، رضا اسلامی فارسانی^{۲*} و حسین ابراهیم نژاد خالنجیری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

^۳ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۰

چکیده

در این پژوهش، خواص فشاری چند لایه‌های الیاف-فلز شامل ورق آلومینیوم T3-2024 به همراه کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با هیبرید الیاف جوت و الیاف شیشه بررسی شد. به منظور بهبود چسبندگی ورق‌های آلومینیوم با الیاف، این ورق‌ها توسط روش حکاکی شیمیایی اصلاح سطح شدند؛ همچنین به منظور بهبود خواص مکانیکی و رفتار چسبندگی الیاف جوت، اصلاح سطحی به روش بازی انجام و توسط طیف‌سنجی مادون قرمز تایید شد. نمونه‌ها براساس هشت حالت چینش متفاوت الیاف جوت-شیشه به صورت لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. آزمون فشار لبه‌ای روی نمونه‌ها انجام شده و حداکثر بار اعمالی، حداکثر استحکام فشاری، انرژی جذب شده هنگام شکست و انرژی جذب شده ویژه محاسبه شدند. سه حالت شکست شامل، تورق و جدایش یکی از رویه‌ها از الیاف، تخریب ستونی همراه با تورق رویه‌ها در جهات مخالف و حالت کمانش اولبری در نمونه‌ها مشاهده شد. با مقایسه حالات شکست و نتایج آزمون فشار لبه‌ای، پی برده شد که حالت شکست کمانش اولبری مطلوب‌ترین حالت شکست است؛ همچنین بررسی نمودارهای نیرو-جابه‌جایی و حالات شکست نمونه‌ها نشان داد که نمونه هیبریدی با ترتیب چینش الیاف شیشه-جوت-شیشه-جوت-شیشه بیشترین استحکام فشاری (102.1 MPa) و انرژی جذب شده ویژه (1123.6 kJ/kg) را دارا بوده و شکست آن (حالت کمانش اولبری) به صورت چند مرحله‌ای و کنترل شده است.

کلمات کلیدی: چند لایه‌های الیاف-فلز؛ الیاف جوت؛ اصلاح سطحی؛ آزمون فشار لبه‌ای.

Study of the Buckling Behavior of Fiber-Metal Laminates Fabricated by Jute-Glass Fibers

M. Jafari-Baghjehaz¹, R. Eslami-Farsani^{2*}, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri³

¹ M.Sc. Student, Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

³ Ph.D. Student, Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this research, the compression properties of fiber-metal laminates including 2024-T3 aluminum sheet and composite of epoxy reinforced by the hybrid of Jute-glass fibers were investigated. In order to improve the adhesion of aluminum sheets with reinforcement fibers, chemical etching was used for surface modification of this sheets. Also to improve the mechanical properties and adhesion behavior of jute fibers, alkali surface modification was performed and verified by Fourier transform infrared spectroscopy. Samples with eight different stacking sequence of jute-glass fibers were made by hand-laying up technique. Edgewise compression was performed and the maximum applied loading, compression strength, absorbed energy during failure and specific absorbed energy were calculated. Three failure modes including, buckling and debonding one of the facing metals from the fiber, columnar collapse with facing buckling in opposite directions and Euler buckling mode were observed. According to the comparison of the failure modes and the results of the edgewise compression test, it was found that Euler's buckling mode is the most favorable failure mode. Also, investigating the force-displacement and failure modes of the samples showed that hybrid sample with ordering of glass-jute-glass-jute-glass fibers has the highest compressive strength (102.1 MPa) and specific absorbed energy (1123.6 kJ/kg) and its failure (Euler Buckling mode) is multi-step and controlled.

Keywords: Fiber-Metal Laminates; Jute Fibers; Surface Modification; Edgewise Compression Test.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز نسل جدیدی از کامپوزیت‌های هیبریدی هستند که نسبت استحکام به وزن^۱ زیادی دارند. این کامپوزیت‌ها از لایه‌های فلز و لایه‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های پلیمری الیافی تشکیل شده‌اند. خواص مکانیکی مناسب که تلفیقی از خواص فلزات و کامپوزیت‌های الیافی است، باعث شده تا این کامپوزیت‌ها کاربرد گسترده‌ای در صنایع، به ویژه صنایع هواپیماسازی پیدا کنند [۱]. کامپوزیت‌های الیاف-فلز مزایای مواد فلزی و زمینه تقویت شده با الیاف را با هم ترکیب می‌کنند. فلزات قدرت تحمل بار بالایی داشته و مقاوم در مقابل ضربه بوده و به آسانی قابل تعمیرند، در حالی که کامپوزیت‌ها استحکام و سفتی بالا داشته و از ویژگی‌های خستگی عالی برخوردارند. مقاومت به خوردگی و خستگی پایین فلزات و قدرت تحمل بار و مقاومت به ضربه پایین و غیرقابل تعمیر بودن کامپوزیت‌ها را با ترکیب این دو می‌توان از بین برد [۲].

چند لایه‌های الیاف-فلز را می‌توان با استفاده از فلزاتی نظیر آلومینیوم، منیزیم، فولاد و تیتانیوم تولید کرد، اما شناخته‌شده‌ترین انواع این سازه‌ها از ترکیب لایه‌های آلومینیومی و الیاف پر استحکام کربن، شیشه و آرامید در حضور چسبی قوی مانند اپوکسی ساخته می‌شوند [۳ و ۴].

یکی از راه‌های بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به خصوص چند لایه‌های الیاف-فلز استفاده از دو یا چند نوع الیاف متفاوت با خواص متمایز است. این الیاف را می‌توان به صورت تک جهته یا با قرارگیری در جهات مختلف (زویای) متفاوت نسبت به یکدیگر در زمینه پلیمری چینش کرده و کامپوزیتی با خواص بهبود یافته تولید کرد. با ترکیب دو یا چند نوع الیاف در یک زمینه می‌توان خواص کامپوزیت را بهینه کرده و در کاربردهای خاص بکار برد که تنها با استفاده از یک نوع الیاف نمی‌توان به این مقصود دست یافت [۵].

آزمون فشار لبه‌ای اساس و پایه‌ای برای قضاوت حداکثر ظرفیت تحمل بار سازه‌های کامپوزیتی و چند لایه‌های الیاف-فلز است. این روش آزمون استاندارد برای

تعیین استحکام فشار لبه‌ای، مشخصات مواد، تحقیق و گسترش کاربردها و تضمین کیفیت ارائه می‌کند. در این روش آزمون، گزارشی از روش تهیه نمونه، ابعاد نمونه و دقت اندازه‌گیری مرتبط به آن، سرعت آزمون، حالات شکست و محل شکست ارائه می‌شود. از جمله روش‌های آنالیز آزمون فشار لبه‌ای کامپوزیت‌ها استفاده از روش‌های تجربی، عددی و تحلیلی به منظور تعیین خواص مکانیکی و فشاری و شناسایی حالات شکست الیاف و کمانش رویه‌ها است [۶].

دچکو^۲ و طاهری [۷]، کمانش^۳ کامپوزیت‌های چند لایه الیاف-فلز سه بعدی با رویه منیزیمی را تحت نرخ کرنش‌های متفاوت (۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ s⁻¹) بررسی کردند. اثر طول متفاوت لایه لایه شدگی^۴ اولیه بر خواص مکانیکی چند لایه الیاف-فلز مطالعه شد. بدین منظور، نمونه‌ها بدون لایه لایه شدگی اولیه و با ۵۰٪ لایه لایه شدگی اولیه تهیه شدند. ظرفیت کمانش^۵ حداکثر ظرفیت و میزان بار قابل تحمل و مکانیزم شکست معرفی شده و پاسخ کلی نمونه‌ها به این موارد بحث شد. نتایج نشان داد، نمونه‌های بدون لایه لایه شدگی اولیه میزان بار بیشتری را تحت نرخ کرنش‌های متفاوت می‌توانند تحمل کنند. با این حال طول لایه لایه شدگی اولیه اثر ناچیزی روی حداکثر ظرفیت بار قابل تحمل نمونه‌ها داشت.

هالیوال^۶ و همکارانش [۸]، رفتار فشار پس از ضربه چند لایه الیاف-فلز را بررسی کردند. از جمله پارمترهای تاثیرگذار در این کار پژوهشی رزین اضافه بود. نتایج نشان داد که اضافه کردن رزین اضافه بین لایه‌ها باعث کاهش ۴۰ تا ۵۰ درصدی جدایش بین لایه‌ها به دلیل مکانیزم پدیده پل زنی ترک^۷ می‌شود؛ همچنین میزان استحکام فشاری باقیمانده پس از ضربه این سازه‌ها نیز، حدود ۳۰ درصد افزایش نشان داد.

بشیرزاده و همکارانش [۹]، ساندویچ پنل‌های آلومینیومی را به روش ریخته‌گری نفوذی در فضا ساز سدیم کلرید ساخته و آزمون فشار تک محوری و خمشی سه نقطه‌ای را روی این

² De Cicco

³ Buckling

⁴ Delamination

⁵ Buckling Capacity

⁶ Dhaliwal

⁷ Crack Bridging

¹ Strength to Weight Ratio

(که جذب انرژی بالای شکست دارد)، بود. مهم‌ترین عامل تعیین کننده حالت شکست و فروپاشی صفحات ساندویچی در آزمون فشار لبه‌ای، خواص و استحکام هسته فومی کامپوزیت است. توجه ویژه به مکانیزم‌های تغییر شکل و فروپاشی صفحات ساندویچی در هر یک از سه حالت شکست بر مکانیزم جذب انرژی شکست^۴ طی فشار لبه‌ای توسط صفحات ساندویچی تاکید می‌کند.

با توجه به مطالب بیان شده، تاکنون خواص مکانیکی چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با الیاف هیبریدی چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش سعی شده است تا خواص فشاری چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با الیاف جوت-شیشه با رویه‌های آلومینیوم T۳-۲۰۲۴، مورد بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین نوآوری این کار پژوهشی هیبرید کردن الیاف جوت با الیاف شیشه در چیدمان‌های مختلف به صورت ساختارهای هیبریدی لایه لایه در سازه‌های چند لایه الیاف-فلز می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مورد استفاده

به منظور ساخت کامپوزیت‌های لایه‌های الیاف-فلز از رزین اپوکسی KER 828 با وزن مخصوص 1160 Kg/m^3 و هاردنر HA-11 (محصول شرکت شیمی افسون) با نسبت ۱۰۰ به ۱۰ به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. پارچه‌های الیاف شیشه نوع E و الیاف جوت نیز، به عنوان الیاف تقویت کننده بکار گرفته شدند. پارچه الیاف شیشه مورد استفاده با چگالی سطحی $400 \text{ گرم بر متر مربع}$ (محصول شرکت لیتکس^۵) با بافت ساده و استحکام کششی 240 MPa و وزن مخصوص $2/56 \text{ g/cm}^3$ بود. پارچه الیاف جوت مورد استفاده دارای بافت ساده، چگالی سطحی $360 \text{ گرم بر متر مربع}$ ، دارای استحکام کششی 540 MPa و وزن مخصوص $1/43 \text{ g/cm}^3$ (محصول شرکت تایزو^۶ چین) بود؛ همچنین از ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت $0/5 \text{ mm}$ به عنوان رویه فلزی کامپوزیت چند لایه‌های الیاف-فلز استفاده شد.

نمونه‌ها انجام دادند. نمونه‌ها به منظور انجام تست فشار تک محوری مطابق با استاندارد ASTM C364 تهیه شدند. نمودارهای تست فشار تک محوری شامل، سه قسمت الاستیک، مسطح و فشرده‌گی بود که گستردگی زیاد منطقه مسطح نشان از توانایی بالای نمونه در جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک آن قبل از انهدام کامل دارد.

ده آبدی و رحیمی [۱۰]، رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌هایی از جنس کامپوزیت و هسته‌ای متشکل از فوم و چند لایه کامپوزیتی موج‌دار، تحت بار محوری فشاری به صورت تجربی بررسی کردند. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از چند لایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، خواص مکانیکی نظیر، استحکام فشاری، سفتی محوری و چقرمگی و همچنین نسبت خواص مکانیکی به جرم سازه را تا حد زیادی بهبود می‌دهد؛ همچنین نتایج نشان دادند که این سازه‌ها در طی مراحل بارگذاری دو نوع رفتار متفاوت را از خود نشان می‌دهند؛ به طوری که در مراحل اولیه بارگذاری، رابطه تنش و کرنش به صورت غیرخطی و پس از آن تنش به صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد.

فلک^۱ [۱۱]، سازه‌های ساندویچی متشکل از رویه‌های تقویت شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی و هسته‌های حاوی فوم پی‌وی‌سی را تحت بارگذاری فشاری لبه‌ای آزمایش کرد. حالت‌های شکست مشاهده شده، کماتش برشی، کماتش اولبری و کماتش رویه ساندویچ بودند. بارگذاری‌های پیش بینی شده برای حالت‌های شکست به طور معقولی با استحکام‌های مشاهده شده در توافق بودند. طراحی حداقل وزن سازه به عنوان تابعی از شاخص بار سازه تعیین شد؛ همچنین مدل‌های ساده تحلیلی برای تعیین استحکام محوری بکار رفت که در توافق کامل با مقادیر تجربی هر یک از حالت‌های شکست بود.

مامالیس^۲ و همکارانش [۱۲]، خواص فشاری و مشخصه-های شکست انواع مختلف صفحات ساندویچی را به وسیله آزمون فشار لبه‌ای بررسی کردند. سه حالت شکست و فروپاشی در آزمون‌های فشاری گزارش شد که یکی از آنها شکست و خرد شدن پیش‌رونده انتهای^۳ صفحه ساندویچی

^۴ Crash Energy Absorption

^۵ Lintex

^۶ Tiazhou

^۱ Fleck

^۲ Mamalis

^۳ Progressive End-Crushing

۲-۲- اصلاح سطحی مواد

۲-۲-۱- اصلاح ورق‌های آلومینیوم

روش حکاکی شیمیایی FPL^۱ برای اصلاح سطحی ورق‌های آلومینیوم با ابعاد $18 \times 28 \text{ cm}^2$ بکار رفت. بدین منظور ابتدا سطح ورق‌های آلومینیوم با استفاده از استون چربی-زدایی و شسته شد. سپس محلولی شامل پودر دی‌کرومات پتاسیم و اسید سولفوریک تهیه شد و ورق‌های آلومینیوم درون محلول مذکور قرار گرفته تا سطح آنها به طور کامل سفید شود. در مرحله نهایی نیز ورق‌های آلومینیوم اصلاح سطحی شده با استفاده از آب مقطر به صورت افشانشی شستشو شدند.

۲-۲-۲- اصلاح الیاف جوت

به منظور بهبود رفتار ترشوندگی و کاهش خاصیت آبدوستی الیاف جوت، اصلاح سطحی با استفاده از محلول بازی هیدروکسید سدیم انجام شد. محلول ۵٪ وزنی هیدروکسید سدیم تهیه شده و الیاف جوت به مدت ۹۰ دقیقه درون محلول قرار گرفتند. در نهایت الیاف با استفاده از آب مقطر شستشو شده و در دمای محیط خشک شدند.

۲-۳- ساخت نمونه‌های الیاف-فلز

پس از اصلاح سطحی ورق‌های آلومینیوم و الیاف جوت، ساخت نمونه‌های کامپوزیتی به صورت لایه‌گذاری دستی انجام شد. در ابتدا، تمام سطح قالب فولادی برای جلوگیری از چسبندگی با پوشش واکسی آغشته شدند. در گام بعدی، هر دو لایه آلومینیوم به رزین آغشته شدند و تقریباً ۳ دقیقه زمان داده شد تا رزین به داخل آلومینیوم نفوذ کند. در ادامه، الیاف جوت و شیشه با زاویه صفر درجه روی صفحه آلومینیومی قرار داده شدند. در انتها، لایه بالایی آلومینیوم روی نمونه قرار داده شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با فشار ۱۰ bar پرس شدند. مطابق با چینش الیاف جوت-شیشه، ۸ حالت لایه‌گذاری انتخاب شدند که در جدول ۱ آورده شده است. نسبت رزین به الیاف نیز به دلیل جذب بالای رزین توسط جوت، ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد.

به منظور تکمیل فرآیند پخت نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 100°C در آون قرار داده شدند. در نهایت نیز نمونه‌ها جهت انجام آزمون فشار لبه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C364-16 با استفاده از دستگاه واترجت در ابعاد مورد نظر برش داده شدند. در شکل ۱، نمایی از نمونه ساخته شده به صورت یک تکه و در شکل ۲، نمونه‌های برش داده در ابعاد مورد نظر مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است، برای هر چیدمان مطابق استاندارد، تعداد ۵ نمونه برش داده شده و پس از انجام آزمون فشار لبه‌ای، میانگین داده‌ها گزارش شد.

۲-۴- تجهیزات مورد استفاده

آزمون فشار لبه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C364-16 [۶] روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. بارگذاری به صورت موازی در جهت روبه‌های فلزی بوده و به صورت افزایشی به انتها و سطح مقطع نمونه وارد شد. سرعت بارگذاری و حرکت عمودی فک‌ها مطابق با استاندارد، 0.5 mm/min بود. دستگاه هانسفیلد^۲ مدل H25KS، جهت انجام آزمون فشار لبه‌ای با ظرفیت بار ۲۵۰۰۰ نیوتن استفاده شد. نتایج به صورت نمودارهای نیرو- جابه جایی نمایش داده شده و میزان حداکثر تنش فشاری اعمالی به سطح مقطع موثر نمونه‌ها مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

جدول ۱- نحوه نام‌گذاری نمونه‌های الیاف-فلز

| نام‌گذاری نمونه‌ها براساس چینش الیاف* | ضخامت میانگین نمونه‌ها (mm) |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| ggggg | ۲/۴ |
| ggjgg | ۲/۸ |
| gjjgg | ۳/۳ |
| gjijg | ۳/۶ |
| jgggj | ۳/۳ |
| jzgj | ۴/۰ |
| jjgj | ۴/۲ |
| jjjj | ۳/۴ |

*g: الیاف شیشه، z: الیاف جوت.

^۲ Hounsfield

^۱ Forest Products Laboratory

دستگاه طیف سنجی استفاده شده، مدل Spectrum RXI ساخت شرکت پرکین‌المر^۳ آمریکا بوده و طیف‌سنجی در گستره طول موج $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اصلاح ورق‌های آلومینیوم و الیاف جوت

در شکل ۳، تصویر میکروسکوپ نوری ورق آلومینیوم اصلاح شده مشاهده می‌شود. بررسی‌های میکروسکوپ نوری ورق‌های آلومینیوم اصلاح شده به روش FPL تشکیل یک لایه اکسیدی [۱۳] روی سطح ورق‌ها را نشان داد. این لایه، سطحی مناسب برای عمل اتصال و پیوند ایجاد کرده که به صورت مکانیکی همانند قفل‌هایی برای بهبود عمل چسبندگی و اتصال با لایه‌های دیگر عمل می‌کند.

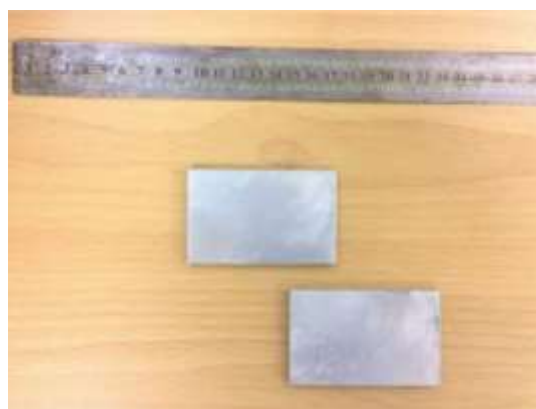
ترکیب شیمیایی الیاف جوت شامل، سلولز^۴، همی سلولز^۵، پکتین^۶، لیگنین^۷، ترکیبات محلول آبی و چربی است [۱۴]. مطالعه FTIR به منظور بررسی پیوندهای تشکیل شده در الیاف جوت اصلاح شده و اصلاح نشده بکار رفت (شکل ۴). طیف گسترده در ناحیه $3600-3200 \text{ cm}^{-1}$ مشخصه پیوندهای هیدروژنی کششی OH- است. این طیف در الیاف اصلاح شده جوت ناپدید و به صورت ارتعاش‌ها و پیک‌هایی با شدت‌های بسیار کم درآمدند (شکل ۴-b).

اصلاح بازی از طریق کاهش پیوند هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی بین گروه‌های هیدروکسیل سلولز و همی سلولز الیاف، باعث کاهش شدت این پیک و حتی در این مورد ناپدید شدن آن می‌شود. گروه هیدروکسیل همچنین در پکتین و همی سلولز موجود است. اصلاح سطحی باعث از بین رفتن درصدی از همی سلولز و پکتین می‌شود؛ در نتیجه شدت پیک حالت ارتعاشی کششی O-H بر اثر اصلاح سطحی کاهش می‌یابد.

ارتعاش‌های کششی C-H گروه‌های متیلن^۸ و متیل^۹ در سلولز و همی سلولز در طول موج‌های 2898 cm^{-1} (الیاف اصلاح نشده) و 2916 cm^{-1} (الیاف اصلاح شده) مشاهده



شکل ۱- نمایی از نمونه ساخته شده به صورت یک تکه با ابعاد $28 \times 18 \text{ cm}^2$



شکل ۲- نمونه‌های برش داده شده با دستگاه واتر جت.

$$A = b \times d \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (2)$$

در روابط مذکور، A، سطح مقطع موثر نمونه، b، عرض نمونه، d، ضخامت نمونه، σ_{max} ، حداکثر تنش فشاری وارده و P_{max} ، حداکثر نیروی وارده به نمونه‌ها است.

به منظور بررسی و مشاهده ریز ساختار سطح ورق‌های آلومینیوم اصلاح سطحی شده از میکروسکوپ نوری میجی تکنو^۱ مدل IM 7200 با بزرگنمایی ۲۰۰ استفاده شد؛ همچنین به منظور بررسی بهبود رفتار چسبندگی و تعیین گروه‌های عاملی الیاف جوت (اصلاح شده و اصلاح نشده)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)^۲ بکار رفت.

^۱ Meiji Techno

^۲ Fourier Transform Infrared

^۳ PerkinElmer

^۴ Cellulose

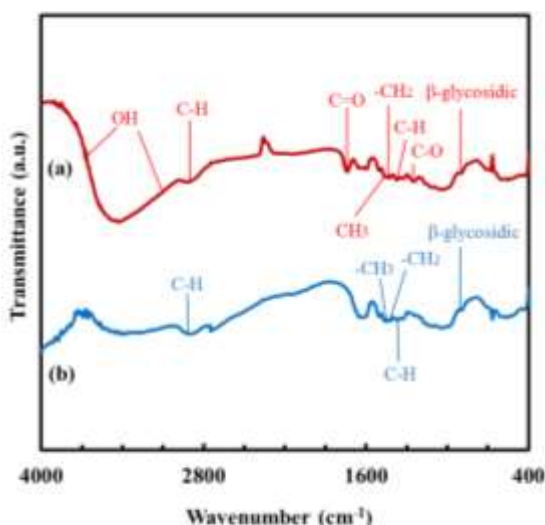
^۵ Hemicellulose

^۶ Pectin

^۷ Lignin

^۸ Methylene

^۹ Methyl



شکل ۴- طیف FTIR، (a) الیاف جوت اصلاح نشده، (b) الیاف جوت اصلاح شده.

۳-۲- بررسی آزمون فشار لایه‌ای

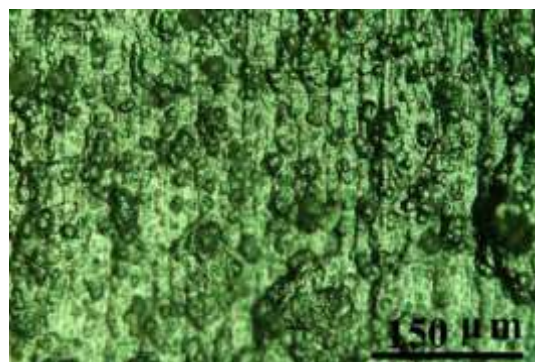
۳-۲-۱- مطالعه حالات شکست

در شکل ۵ تصاویر شکست نمونه‌ها مشاهده می‌شود. به طور کلی سه حالت شکست در نمونه‌های تحت بار فشار لایه‌ای قرار گرفته، مشاهده شد. حالت ۱ شکست شامل، کمانش و جدایش^۶ یکی از رویه‌های آلومینیومی از الیاف بوده [۶ و ۱۸] و بر اثر کمانش رویه، جدایش بین رویه فلزی و الیاف هیبریدی صورت می‌گیرد. این حالت شکست نزدیک به سطح و در فصل مشترک الیاف-فلز اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های ggggg (شکل ۵-ا) و ggjgg (شکل ۵-ب) این حالت شکست مشاهده شد.

حالت ۲ شکست، تخریب ناپایدار ستونی کامپوزیت همراه با کمانش رویه‌ها در جهات مخالف است [۱۲ و ۱۸]. در این نوع حالت فروپاشی، با اعمال بار فشاری جدایش بین الیاف و رویه در جهات مخالف اتفاق افتاده و با گستردگی منطقه کمانش و جدایش بین لایه‌ها^۷، جدایش بین هسته و رویه تا شکست کامل ادامه می‌یابد. ناپایداری ابتدا به صورت فشار الاستیک رویه‌ها و الیاف شروع شده و با آسیب‌های خمشی و موجی شکل به الیاف ادامه یافته و در نهایت با شکست کامل کامپوزیت، تغییر شکل پلاستیک دائمی در الیاف به وجود

می‌شوند. پیک مشاهده شده در طول موج 1740 cm^{-1} مربوط به حالت ارتعاشی کششی پیوند $\text{C}=\text{O}$ در ترکیبات کربوکسیلیک^۱ و استر^۲ در همی سلولز و لیگنین است. همی سلولز و لیگنین بر اثر اصلاح سطحی در محلول بازی حل شده و به همین دلیل این پیک مشخصه در الیاف جوت اصلاح شده قابل مشاهده نمی‌باشد. باند جذبی در cm^{-1} ۱۴۵۸ مربوط به حالت نامتقارن کششی $\text{C}-\text{H}_3$ و طول موج-های cm^{-1} ۱۳۷۵ (اصلاح نشده) و cm^{-1} ۱۳۷۳ (اصلاح شده) مربوط به تغییر شکل متقارن کششی $\text{C}-\text{H}$ در لیگنین است. لازم به ذکر است که شدت این پیک‌ها در الیاف جوت اصلاح شده و نشده، تفاوت چندانی ندارند.

پیک مشاهده شده در طول موج 1245 cm^{-1} مربوط به حالت کششی $\text{C}-\text{O}$ در گروه‌های استیل^۳ همی سلولز است. این پیک در طیف FTIR الیاف اصلاح شده جوت ناپدید شده که بیانگر حذف همی سلولز است. پیک مشخصه 1428 cm^{-1} مربوط به حالت خمشی $\text{C}-\text{H}_2$ است که شدت آن پس از اصلاح سطحی نیز بدون تغییر باقی ماند. پیک مشخصه در طول موج 897 cm^{-1} را می‌توان به وجود حلقه‌های زنجیره‌ای بتاگلیکوسیدیک^۴ در بین مونوساکاریدها^۵ نسبت داد [۱۵]. نتایج حاصل از طیف‌های FTIR الیاف جوت اصلاح نشده و اصلاح شده در این مطالعه با نتایج مطالعات قبلی در توافق کامل است [۱۶ و ۱۷].



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری ورق آلومینیوم اصلاح شده به روش FPL (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

¹ Carboxylic

² Ester

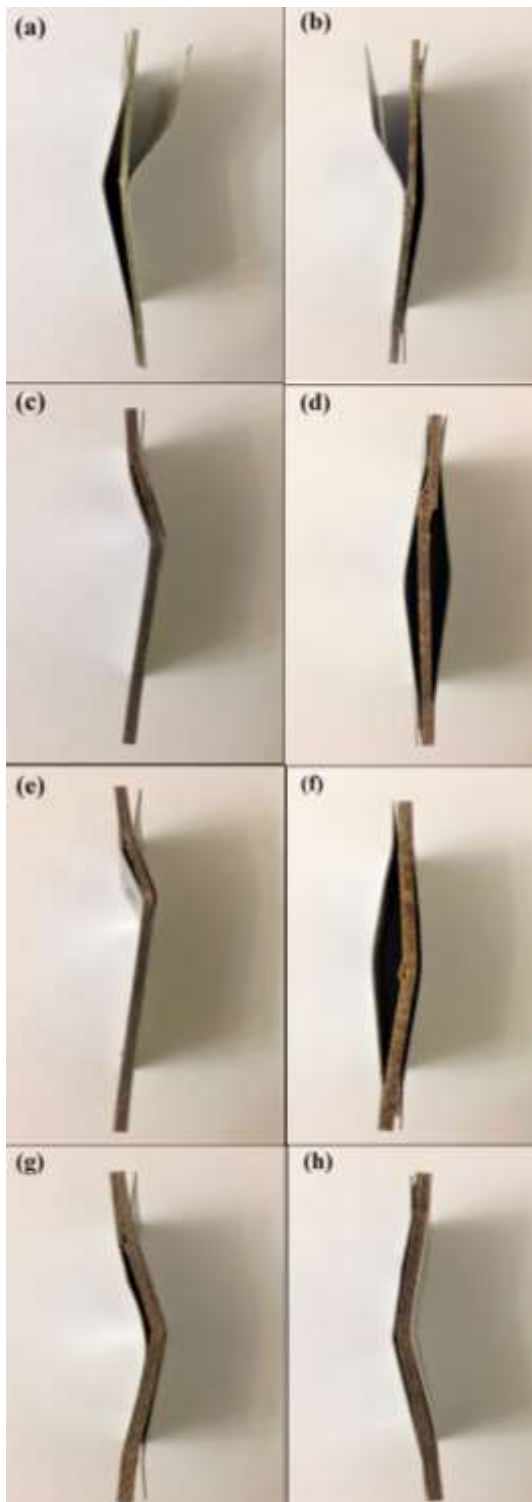
³ Acetyl

⁴ β -glycosidic

⁵ Monosaccharides

⁶ Debonding

⁷ Delamination



شکل ۵- تصویری از حالات شکست سازه‌های هیبریدی الیاف-فلز، (a) .ggggg (b) .ggggg (c) .ggggg (d) .zzzzz، (e) .jzzzz (f) .jzzzz (g) .jzzzz (h) .zzzzz.

می‌آید. نمونه‌های هیبریدی (شکل ۵-d) و (شکل ۵-g) دارای شکست حالت ۲ بودند.

حالت ۳ شکست در نمونه‌های (شکل ۵-c)، (شکل ۵-e)، (شکل ۵-g) و (شکل ۵-h) مشاهده شد. این نوع حالت تخریب به حالت کمانش اولیه^۱ [۱۱] نیز شناخته شده که به دو صورت خمش ستونی و برشی هسته در نمونه های ذکر شده مشخص است. این نوع ناپایداری به صورت خم شدن چند لایه الیاف-فلز تحت بار فشار لبه‌ای اعمالی [۱۲] بوده و کمانش و تورق کامل لایه در آن مشاهده نمی‌شود؛ همچنین شکست با جدایش بین رویه و الیاف شروع شده و با اعمال بار بیشتر در سمت تحت فشار قرار گرفته شده، به صورت خم شدن کامل چند لایه الیاف-فلز و ایجاد شکست برشی در مرکز الیاف ادامه می‌یابد.

۳-۲-۲- نمودارهای نیرو-جابجایی

نتایج آزمون فشار لبه‌ای به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل ۶ نشان داده شده است. تمامی نمودارها دارای یک مرحله الاستیک قبل از رسیدن به نیروی بحرانی و شروع ناپایداری بوده که این ناحیه به صورت خطی است. پس از رسیدن به نقطه بحرانی و با شروع شکست، نیرو به صورت ناگهانی افت کرده و تا شکست کامل و ایجاد نیروی پسماند ادامه می‌یابد [۱۷].

نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه‌های دارای حالت ۱ شکست، ابتدا دارای مرحله الاستیک بوده و با رسیدن به بیشترین میزان نیروی اعمالی یکی از رویه‌ها (ورق آلومینیوم)، شروع به کمانش و جدا شدن از الیاف می‌کند. کاهش ناگهانی نیرو، به علت ایجاد کمانش و تورق رویه آلومینیومی و گسترش میزان تورق است. با جابجایی بیشتر و اعمال بار فشاری، دومین رویه آلومینیوم خم شده و از الیاف جدا می‌شود. گستردگی کمانش این رویه تا شکست کامل (ایجاد شکست برشی در الیاف) و ایجاد نیروی پسماند ادامه می‌یابد. در حالت ۲ شکست، نمودار نیرو-جابجایی دارای مرحله خطی (الاستیک) بوده و پس از رسیدن به مقدار بیشینه نیروی اعمالی، یکی از رویه‌های آلومینیومی شروع به جدا شدن از الیاف و تورق می‌کند. با افت نیرو و گسترش

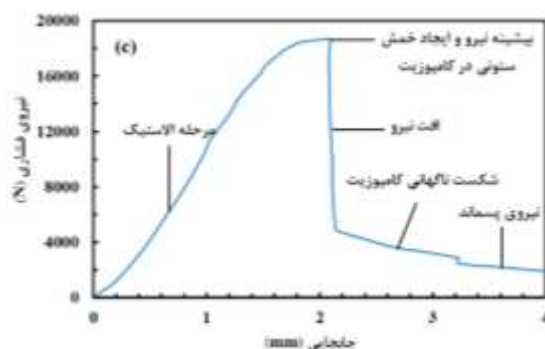
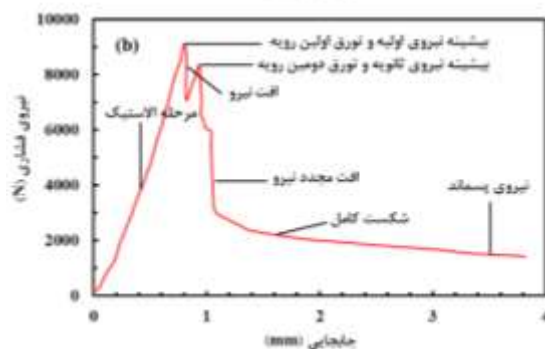
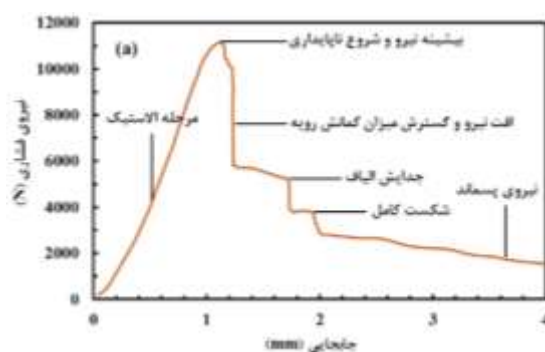
^۱ Euler Buckling Mode

دلیل این رفتار را می‌توان براساس پژوهش‌های انجام گرفته توسط دیگر محققان این گونه بیان کرد که با اعمال بار فشار لبه‌ای در ناحیه الاستیک، رویه‌های آلومینیومی و هسته کامپوزیتی تحت تنش‌های کششی و فشاری قرار می‌گیرند تا بتواند برآیند نیروهای وارده در سازه را خنثی کنند. وجود تنش‌های فشاری و کششی در سازه باعث می‌شود که تنش برشی در فصل مشترک ایجاد شود. با رسیدن به بیشینه بار یکی از رویه‌های آلومینیومی از سطح هسته کامپوزیتی جدا می‌شود که به صورت افت نیرو در نمودار شکل ۶-b قابل مشاهده است. با ادامه بارگذاری، سازه همچنان قابلیت تحمل بار را دارد. به همین دلیل رفتار افزایش نیرو در نمودار قابل مشاهده است. در این حالت نیز رویه آلومینیومی و سازه کامپوزیتی تحت تنش‌های کششی و فشاری قرار می‌گیرند. این اختلاف تنش ایجاد شده، باعث ایجاد یک نیروی برشی و جدایش بین رویه آلومینیومی و کامپوزیتی می‌شود که با افت دوباره نیرو در شکل ۶-b قابل مشاهده است [۱۹ و ۲۰].

علت مشاهده این رفتار در دو سازه هیبریدی gjzjg (شکل ۵-d) و jzjzjg (شکل ۵-f) در مقایسه با دیگر سازه‌ها را می‌توان تحت تاثیر دو عامل بیان کرد. یکی از عوامل تاثیرگذار، یکنواختی چیدمان الیاف تقویت‌کننده در قسمت کامپوزیتی سازه است که باعث می‌شود تا قسمت کامپوزیتی رفتاری یکنواخت در برابر تنش‌های اعمال شده داشته باشد. اگر این تقارن کاهش یابد، بین لایه‌های الیاف جوت و شیشه به دلیل افزایش تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند تولید، نیروی برشی ایجاد و باعث جدایش بین لایه‌های الیاف تقویت‌کننده می‌شود. عامل دوم، چسبندگی الیاف شیشه و جوت با رویه آلومینیومی است. شایان ذکر است که چسبندگی بین الیاف جوت و رویه آلومینیومی نسبت به الیاف شیشه به دلیل جذب رزین توسط الیاف جوت از سطح آلومینیوم در فرآیند پخت ضعیف‌تر است.

در سازه jzjzjg تقارن بین لایه‌ها مناسب است، اما به دلیل تماس الیاف جوت با رویه آلومینیومی و ضعیف بودن فصل مشترک آنها، جدایش بین آلومینیوم و سازه کامپوزیتی ایجاد شده و رفتار فشاری آن به صورت حالت شکل ۶-b است؛ اما در سازه gjzjg، تقارن بین دو تقویت‌کننده الیاف شیشه و

میزان تورق رویه، مجدداً میزان نیرو افزایش یافته و به حد بحرانی می‌رسد که این امر موجب تورق و جدایش کامل رویه دوم در جهت مخالف رویه اول می‌شود. در نهایت با افت مجدد نیرو و گسترش میزان تورق و کمانش لایه دوم، شکست کامل شده و نیروی پسماند در نمونه ایجاد می‌شود. این نوع رفتار به ندرت مشاهده می‌شود که در این پژوهش در نمونه‌های هیبریدی gjzjg (شکل ۵-d) و jzjzjg (شکل ۵-f) مشاهده شد.



شکل ۶- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای، (a) حالت ۱ شکست (نمونه gjzjg)، (b) حالت ۲ شکست (نمونه jzjzjg)، (c) حالت ۳ شکست (نمونه gjzjg)

جدول ۲- نتایج آزمون فشار لبه‌ای نمونه‌های هیبریدی الیاف-فلز

| نمونه | F_{max} (kN) | σ_{max} (MPa) | E_{abc} (kJ) | E_s (kJ/kg) |
|-------|-------------------|-------------------------|-------------------|------------------|
| ggggg | ۱۱/۱۷ | ۹۳/۱ | ۱۴/۹۵ | ۷۵۸/۸ |
| ggjgg | ۱۲/۶ | ۹۰ | ۱۵/۵۴۳ | ۷۳۳/۲ |
| gjjgg | ۱۶/۸۵ | ۱۰۲/۱ | ۲۶/۶۳۰ | ۱۱۲۳/۶ |
| gjjjg | ۸/۷ | ۴۸/۲۳ | ۱۵/۰۵۵ | ۶۴۳/۴ |
| jgggj | ۱۳/۵۶ | ۸۲/۲۲ | ۱۶/۴۳۰ | ۷۱۷/۵ |
| jgjgj | ۹/۲ | ۴۶ | ۱۰/۲۸۲ | ۴۲۶/۶ |
| jjjjj | ۱۷/۱ | ۸۵/۳ | ۲۷/۳۷۹ | ۱۰۴۵ |
| jjjjj | ۱۸/۶ | ۸۶/۷ | ۲۸/۲۷۰ | ۱۱۰۸/۶ |

با توجه به نتایج عددی حاصل از آزمون فشار لبه‌ای و همچنین شکل ۷، نمونه ggjgj از بیشترین استحکام فشاری (۱۰۲/۱ MPa) نسبت به نمونه‌های دیگر برخوردار بوده و کمترین استحکام فشاری (۴۶ MPa)، مربوط به نمونه jgggj است. اثر هیبریدی متفاوت نمونه‌ها، مربوط به تنش وارده و انتقال تنش از طریق الیاف جوت است، چرا که الیاف جوت نسبت به تنش برشی حساس‌تر بوده و با اعمال تنش، شکست الیاف در تنش و نیروی کمتری اتفاق افتاده و استحکام فشاری نمونه کاهش می‌یابد [۲۲]؛ همچنین از آنجا که الیاف جوت تمایل به جذب رزین بیشتر دارد، چسبندگی الیاف جوت در فصل مشترک با ورق آلومینیوم کاهش یافته و استحکام کلی نمونه کاهش می‌یابد [۲۳]. قابل ذکر است که نمونه هیبریدی ggjgj، افزایش ۹/۷ و ۱۷/۸ درصدی استحکام فشاری را به ترتیب نسبت به نمونه‌های غیرهیبریدی ggggg (۹۳/۱ MPa) و jjjjj (۸۶/۷ MPa) نشان داد. این بدین معنی است که هیبرید کردن الیاف شیشه و جوت در چیدمان ggjgj موثر بوده که باعث بهبود استحکام فشاری نسبت به نمونه‌های غیرهیبریدی شده است. علاوه بر چسبندگی مناسب‌تر الیاف شیشه نسبت به الیاف جوت، عامل تاثیرگذار دیگر تقارن در لایه‌چینی الیاف تقویت‌کننده در سازه چند لایه-الیاف فلز ggjgj است. شایان ذکر است که الیاف تقویت‌کننده دارای ضریب انبساط طولی متفاوت هستند که

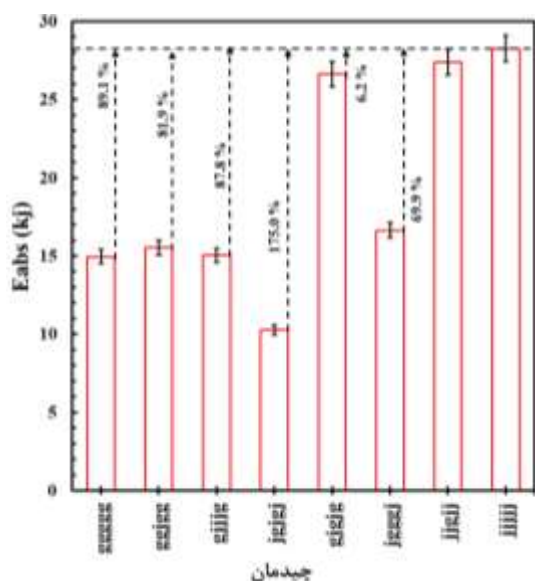
جوت کاهش می‌یابد، به همین دلیل تنش‌های پسماند در فصل مشترک الیاف جوت و شیشه افزایش می‌یابد. هنگامی که این نمونه تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، رویه آلومینیومی تحت تنش‌های فشاری، الیاف شیشه تحت تنش‌های کششی و الیاف جوت تحت تنش‌های فشاری قرار می‌گیرند تا بتوانند برآیند تنش‌های وارد شده در ناحیه الاستیک را خنثی کنند. برآیند این نیروهای کششی و فشاری به گونه‌ای است که باعث جدایش الیاف شیشه از سطح رویه آلومینیومی می‌شود. شایان ذکر است که در هر دو سازه jgggj و ggjgj پس از جدایش اولیه هنوز سازه دچار کمناش نشده است. به همین دلیل هنوز سازه قابلیت تحمل بار فشاری را دارد تا هنگامی که رویه دوم آلومینیومی از سازه جدا شود و پس از جدایش، سازه تحت گسترش تورق و کمناش دچار شکست کامل می‌شود [۲۱].

در حالت ۳ شکست، پس از مرحله الاستیک و رسیدن به حد بحرانی نیرو، جدایش الیاف از یکدیگر اتفاق افتاده و تورق رویه مشاهده نمی‌شود. در این حالت پس از رسیدن به بیشینه نیرو، جدایش الیاف از رویه در سمتی که چند لایه الیاف-فلز تحت نیروی فشاری است، اتفاق افتاده و با افت ناگهانی نیرو شکست کامل می‌شود.

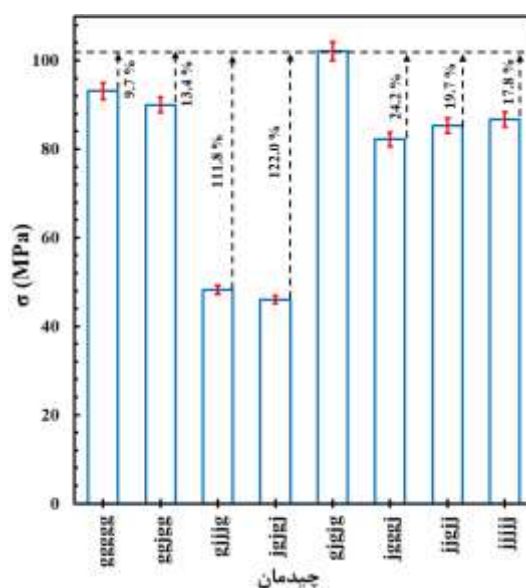
۳-۲-۳- نتایج آزمون فشار لبه‌ای

به منظور درک بهتر رفتار شکست نمونه‌ها و بررسی خواص فشاری آنها، با استفاده از نمودار نیرو- جابه‌جایی، پارامترهای F_{max} (حداکثر نیروی اعمالی)، σ_{max} (حداکثر تنش اعمالی)، E_{abc} انرژی جذب شده شکست^۱ (برابر با سطح زیر نمودار) و E_s انرژی جذب شده ویژه^۲ (نسبت انرژی جذب شده شکست به جرم نمونه) بدست آمد [۱۲]. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ آمده است؛ همچنین برای درک صحیح‌تر و انجام تحلیل بیشتر شکل‌های ۹-۷ رسم شدند که به ترتیب حداکثر تنش اعمالی، انرژی جذب شده شکست و انرژی جذب شده ویژه برحسب نوع چیدمان را نشان می‌دهند.

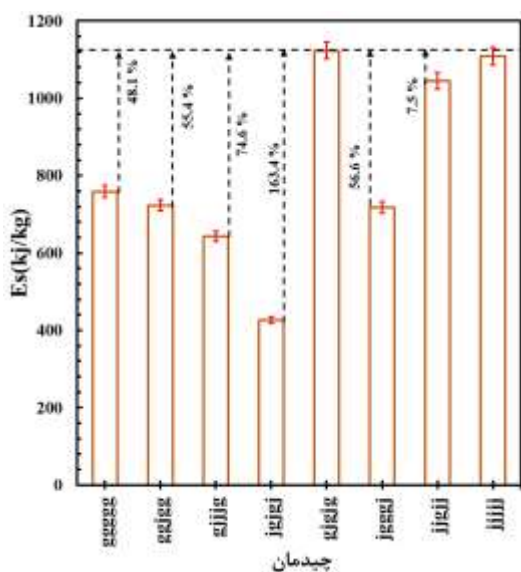
^۱ Absorbed Crash Energy
^۲ Specific Energy



شکل ۸- مقایسه انرژی جذب شده در چیدمان‌های مختلف الیاف جوت و شیشه



شکل ۷- مقایسه حداکثر تنش اعمالی در چیدمان‌های مختلف الیاف جوت و شیشه



شکل ۹- مقایسه انرژی جذب ویژه در چیدمان‌های مختلف الیاف جوت و شیشه

و ۱ درصدی نسبت به نمونه jzzzzj (۱۱۰۸/۶ kJ/kg) را نشان می‌دهد؛ همچنین نتایج بیانگر آن است که نمونه‌های دارای حالت ۳ شکست، بیشترین انرژی جذب شده را هنگام فروپاشی داشته و به طور کلی این نمونه‌ها بیشترین مقاومت را هنگام اعمال بار فشاری از خود نشان می‌دهند. به طور

در حین عمل پخت کامپوزیت، باعث ایجاد تنش‌های پسماند در سازه کامپوزیتی می‌شوند. در سازه‌های هیبریدی، هرچه تقارن در چیدمان الیاف تقویت‌کننده بیشتر باشد، این اختلاف ضریب انبساط طولی کاهش می‌یابد که باعث کاهش تنش‌های پسماند در سازه و بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۲۴ و ۲۵]. به همین دلیل سازه هیبریدی ggjjgg استحکام فشاری بیشتری در مقایسه با دیگر سازه‌های هیبریدی دارد.

شکل ۸، انرژی جذب شده شکست در چیدمان‌های متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان فهمید که چند لایه الیاف فلز تقویت شده تنها با الیاف جوت دارای بیشترین مقدار انرژی جذب شده است. به طوری که ۶/۲ درصد انرژی جذب شده بیشتری نسبت به نمونه هیبریدی ggjjgg دارد. دلیل این پدیده می‌تواند ضخیم‌تر بودن نمونه jzzzzj بیان کرد. چون نمونه با ضخامت بیشتر می‌تواند نیروی فشاری بیشتری تحمل می‌کند؛ بنابراین نیاز است که انرژی جذب شده ویژه تعریف شود تا معیار مناسب‌تری برای مقایسه خواص باشد که در شکل ۹ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۹، نمونه ggjjgg بیشترین مقدار انرژی جذب شده ویژه (۱۱۲۳/۶ kJ/kg) را دارا بوده، به طوری که افزایش ۴۸ درصدی نسبت به نمونه gggggg (۷۵۸/۸ kJ/kg)

۵- مراجع

- [1] Majerski K, Surowska B, Bienias J (2018) The comparison of effects of hygrothermal conditioning on mechanical properties of fibre metal laminates and fibre reinforced polymers. *Compos Part B* (In Press).
- [2] Bahari-Sambran F, Eslami-Farsani R, Ebrahimnezhad-Khaljiri H (2018) Experimental investigation of flexural behavior of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites containing nanoclay particles. *Iran J Manuf Eng* 5(1): 45-54. (In Persian)
- [3] Mirzaee Sisan M, Eslami-Farsani R (2016) An experimental study on srop weight impact properties of composite laminates aluminum/epoxy resin with fibers reinforcement. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(4): 97-104. (In Persian)
- [4] Zhang J, Wang, Fang YG, Zhao Y, Zhang J, Zhou Z (2017) Application of energy dissipation approach for notched behavior in fiber metal laminates. *Compos Struct* 180: 809-820.
- [5] Wanhill RJH (2017) Glare: A versatile fibre metal laminate (FML) concept. In: Prasad NE, Wanhill RJH (eds) *Aerospace materials and material technologies, Volume 1: Aerospace materials*.
- [6] ASTM C364 (2016) Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [7] De Cicco D, Taeri F (2016) Delamination buckling response of 3D fiber-metal laminates subjected to different loading rates. *Am Soc for Compos 31th TechConf*. Williamsburg, Virginia.
- [8] Dhaliwal GS, Newaz GM (2017) Compression after impact characteristics of carbon fiber reinforced aluminum laminates. *Compos Struct* 160: 1212-1224.
- [9] Bashirzadeh F, Saeid T, Milani JM (2015) Manufacturing of aluminum foam sandwich panels by infiltration of NaCl space holders. *4th Int Cof 9th Congr Iran Metall Mater Eng Soc (IMAT)*, Iran University of Science and Technology, Tehran.
- [10] Dehabadi AM, Rahimi GH, Rahmani R (2015) Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins, corrugated composite core and foam. *Modares Mech Eng* 15(4): 51-57. (In Persian)
- [11] Fleck NA, Sridhar I (2002) End compression of sandwich columns. *Compos Part A* 33 (3): 353-359.
- [12] Mamalis AG, Manolakos DE, Ioannidis MB, Papapostolou DP (2005) On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental. *Compos Struct* 71(2): 246-257.

خلاصه می‌توان بیان کرد که در ساختار هیبریدی zigzag نسبت به ساختار لایه‌ای، استحکام فشاری، افزایش و جذب انرژی اندکی کاهش یافته، اما از طرفی وزن سازه نیز کم شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر هیبریدی لایه‌های الیاف جوت-الیاف شیشه با زمینه پلیمری رزین اپوکسی در چندلایه‌های الیاف-فلز با رویه‌های آلومینیومی تحت آزمون فشار لبه‌ای بررسی شد. نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

- ۱- نمونه با چینش الیاف شیشه-جوت-شیشه-جوت-شیشه با استحکام فشاری ۱۰۲/۱ MPa و نمونه با ترتیب چینش الیاف جوت-شیشه-جوت-شیشه با استحکام فشاری ۴۶ MPa به ترتیب، بیشترین و کمترین استحکام فشاری را در مقایسه با دیگر چینش‌ها داشتند.
- ۲- استحکام فشاری در نمونه با چینش الیاف شیشه-جوت-شیشه-جوت-شیشه نسبت به سازه‌های غیرهیبریدی تقویت‌شده تنها با الیاف شیشه و الیاف جوت به ترتیب ۹/۷ و ۱۷/۸ درصد افزایش یافت.
- ۳- نمونه با چینش الیاف شیشه-جوت-شیشه-جوت-شیشه با انرژی جذب ویژه ۱۲۳/۶ kJ/kg و نمونه با چینش الیاف جوت-شیشه-جوت-شیشه-جوت با انرژی جذب ویژه ۴۲۶/۶ kJ/kg به ترتیب، بیشترین و کمترین انرژی جذب ویژه را در مقایسه با دیگر چیدمان‌ها داشتند.
- ۴- جذب انرژی ویژه در نمونه با چینش الیاف شیشه-جوت-شیشه-جوت-شیشه نسبت به نمونه غیرهیبریدی تقویت‌شده با الیاف شیشه ۴۸/۱ درصد افزایش داشت، در حالی که نسبت به نمونه غیرهیبریدی تقویت شده با الیاف جوت تغییری مشاهده نشد.

۵- بررسی‌ها نمونه‌ها پس از انجام آزمون، سه حالت شکست شامل، تورق و جدایش یکی از رویه‌ها از الیاف، تخریب ستونی همراه با تورق رویه‌ها در جهات مخالف و حالت کمانش اوپلری را نشان داد.

- [19] Remmers JJC, Borst R (2001) Delamination buckling of fibre-metal laminates. *Compos Sci Technol* 61(15): 2207-2213.
- [20] Kim L-K, Yu T-X (1997) Forming and failure behaviour of coated, laminated and sandwiched sheet metals: a review. *J Mater Process Technol* 63(1-3): 33-42.
- [21] Chandrasekar M, Ishak MR, Jawaid M, Leman Z, Sapuan SM (2016) An experimental review on the mechanical properties and hygrothermal behaviour of fibre metal laminates. *J Reinf Plast Compos* 36(1): 72-82.
- [22] Shridhar MK, Rao RM (1983) Compressive strength of jute-glass hybrid fibre composites. *J Mater Sci Lett* 2(3): 99-102.
- [23] Clark RA, Ansel MP (1986) Jute and glass fibre hybrid laminates. *J Mater Sci* 21(1): 269-276.
- [14] Fiore V, Scalici T, Badagliacco D, Enea D, Alaimo G, Valenza A (2017) Aging resistance of bio-epoxy jute-basalt hybrid composites as novel multilayer structures for cladding. *Compos Struct* 160: 1319-1328.
- [25] Fiore V, Scalici T, Sarasini F, Tirilló J, Calabrese L (2017) Salt-fog spray aging of jute-basalt reinforced hybrid structures: Flexural and low velocity impact response. *Compos Part B Eng* 116: 99-112.
- [13] Raymond FW, James VT (2013) Surface preparation techniques for adhesive bonding, second edn. Elsevier, Kidlington.
- [14] Razera IAT, Frollini E (2004) Composites based on jute fibers and phenolic matrices: properties of fibers and composites. *J Appl Polym Sci* 91(2): 1077-1085.
- [15] Portella EH, Romanzini D, Angrizani CC, Amico SC, Zattera AJ (2016) Influence of stacking sequence on the mechanical and dynamic mechanical properties of cotton/glass fiber reinforced polyester composites. *Mater Res* 19(3): 542-547.
- [16] Rasel SM, G. B. Nam Byeon JM, Kim BS, Song JI (2011) Effect of Coupling Agent and Fiber Loading on Mechanical Behavior of Chopped Jute Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *Elastomers Compos* 46(3): 204-210.
- [17] Prosenjit S, Manna S, Chowdhury SR, Sen R, Roy D, Adhikari B (2010) Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment. *Bioresource Technol* 101 (9): 3182-3187.
- [18] Mohamed M, Anandan S, Huo Z, Birman V, Volz J, Chandrashekhara K (2015) Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures. *Compos Struct* 123:169-179.