

مطالعه خواص خمشی و ارتعاشی آلومینیوم تقویت شده با کامپوزیت اپوکسی / الیاف شیشه

مهدی ابراهیم پور ملک‌شاه^ا، محمدمهدی خطیبی^{ب*}، علیرضا آلبویه^پ، محمد هروی^ت

^ا ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^پ ایران، سمنان، پردیس شماره ۱ دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، دانشیار

^پ ایران، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فنی و مهندسی، ۴۵۶۶۷-۳۶۷۱۶، دانشیار

^ت ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، دانشجوی دکتری

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mmkhatibi@semnan.ac.ir

چکیده

در این مقاله، تأثیر افزودن اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بر خواص خمشی و ارتعاشی آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، اپوکسی و الیاف شیشه با آلومینیوم ۳۱۰۵ ترکیب و نمونه‌هایی براساس استاندارد آزمون‌های خواص مکانیکی شامل آزمون خمش و ارتعاشی ساخته شدند. نتایج آزمون خمش نشان داده است، افزودن اپوکسی و الیاف شیشه موجب افزایش مقادیر مدول و استحکام خمشی آلومینیوم خالص می‌شود؛ بطوریکه میزان استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه آلومینیوم/اپوکسی/الیاف شیشه نسبت به آلومینیوم خالص به ترتیب ۶۱ درصد و ۹۰ درصد افزایش یافته است که این امر می‌تواند بدلیل استحکام بالای الیاف شیشه و چسبندگی قوی این الیاف با ماتریس اپوکسی باشد. همچنین، نتایج آزمون ارتعاشی که از طریق آزمون مودال محیطی بدست آمده است، نیز نشان داده است که فرکانس‌های طبیعی در نمونه آلومینیوم/اپوکسی/الیاف شیشه بیشتر از آلومینیوم خالص می‌باشد. بنابراین، نتایج در مجموع نشان می‌دهند که افزودن اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه می‌تواند برای بهبود خواص خمشی و ارتعاشی آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: الیاف شیشه؛ آلومینیوم؛ خواص خمشی؛ خواص ارتعاشی

۱- مقدمه

ترکیب الیاف/ پلیمر با آلومینیوم می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و ارتعاشی آلومینیوم خالص شود. این الیاف می‌توانند از جنس‌های مختلفی مانند الیاف کربن، شیشه، کولار و ... باشند. طی سال‌های اخیر کامپوزیت‌ها جایگزین مناسبی برای مواد معمول

در تحقیقات مختلف در زمینه‌های علمی و کاربردی شده‌اند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده در صنایع مختلف مانند خودروسازی، سازه‌های دریایی و نظامی، ساختمان‌سازی و ... کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند. این مواد باید دارای خواصی از قبیل وزن سبک و درعین حال استحکام بالا برای جذب بارها در شرایط دشوار باشند. کامپوزیت‌ها دارای دسته‌بندی‌های مختلفی هستند، از دیدگاه زیستی شامل کامپوزیت‌های طبیعی و مصنوعی و از نظر فاز زمینه به سه نوع زمینه پلیمری، زمینه سرامیکی و زمینه فلزی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌بندی دیگر کامپوزیت‌ها براساس نوع تقویت‌کننده است که شامل تقویت‌شده با الیاف، تقویت‌شده با ذرات و تقویت‌شده با ترکیبات ویسکوز هستند [۱]. مرزوک (Merzuki) و همکاران [۲]، آلیاژهای آلومینیوم T۲۰۲۴ و سه ماده کامپوزیتی مختلف تولید شده با روش چیدمان دستی را برای ارزیابی خواص مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، با وجود صفحات آلیاژ آلومینیوم در لایه‌های کامپوزیت، فرکانس طبیعی با افزایش مقدار سفتی افزایش یافته است. مالینگام (Malingam) و همکاران [۳]، به بررسی خواص کششی و ضربه‌ای ورق آلومینیوم H-۵۰۵۲ تقویت‌شده با الیاف شیشه، کولار و کناف پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، نمونه‌های فلزی تقویت‌شده با الیاف ترکیبی شیشه و کولار در مقایسه با ورق‌های فلزی تقویت‌شده با الیاف کناف، استحکام کششی و ضربه‌ای بالاتری داشتند. ماراس (Maras) و همکاران [۴]، ورق فلزی آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف کربن، شیشه و آرامید را به صورت کامپوزیت‌های ورق‌ی الیاف فلزی با ۶ و ۸ لایه که لایه‌های پایینی و بالایی آلومینیوم و لایه‌های داخلی کربن بودند، باهم ترکیب کردند. نتایج آزمون ارتعاشی نشان داد، با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیوم، فرکانس طبیعی کاهش یافته است. همچنین هرچه موقعیت لایه‌های آلومینیوم از سطح به سمت وسط تغییر کرد، فرکانس طبیعی افزایش یافته است. خلیلی و همکاران [۵]، ورق‌های فلزی الیافی متشکل از ورق‌های نازک آلومینیوم و لایه‌های الیاف و چسب را به روش تجربی با آزمون‌های کشش، خمش سه نقطه‌ای و ضربه شاریبی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند، حد آسیب کامپوزیت‌های ورق فلزی الیافی در مقایسه با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه بالاتر است. وجود لایه‌های فولادی در نمونه ورقه‌های فلزی الیافی به افزایش جذب انرژی و سختی کمک کرده است. همچنین، سفتی کامپوزیت با لایه فولادی، ۱۶ برابر و جابجایی زیر نقطه بارگیری پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه ۴ برابر افزایش یافت. کالسوران (Kaleeswaran) و همکاران [۶]، ورق‌های نازک فلز و لایه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با شیشه را با آزمون کشش و خمش سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نمونه با الیاف شیشه از لایه‌های آلومینیوم دارای استحکام کششی بالاتر و مقاومت خمشی بیشتری بوده است. ژیا (Xia) و همکاران [۷]، در تحقیقی دیگر، رفتار کششی ورقه‌های آلومینیومی تقویت‌شده با الیاف کربن را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ورقه آلومینیومی تقویت‌شده با الیاف کربن یک ماده وابسته به نرخ کرنش است. استحکام کششی و کرنش شکست ورقه‌های آلومینیومی تقویت‌شده با الیاف کربن هر دو با افزایش نرخ کرنش افزایش یافت. موکش (Mukesh) و هاینس (Hynes) [۸]، ورق‌های فلزی کامپوزیتی آلومینیومی تقویت‌شده با الیاف کولار، کامپوزیت آلومینیومی تقویت‌شده با الیاف کربن، کامپوزیت شیشه-اپوکسی و لایه‌های نازک آلومینیوم را با روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الیاف کربن در مقایسه با سایر مواد صنعتی، از مقاومت کششی و مقاومت ویژه بیشتری برخوردارند. خرمی شاد و همکاران [۹]، رفتار ضربه سرعت بالای هیبریدهای فلز/کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله کربن را مورد مطالعه قرار دادند. ترکیب ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربن در لایه کامپوزیتی منجر به افزایش ۱۸/۹ درصدی انرژی جذب‌شده گردید. فلی و جلیلیان [۱۰]، اثر افزودن نانوسیلیس بر خواص مکانیکی اپوکسی خالص و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزودن ۱ درصد وزنی نانوسیلیس در هر دو نوع کامپوزیت مقادیر مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام کششی کاهش و ازدیاد طول در لحظه شکست افزایش یافت. آل‌بویه [۱۱]، تأثیر افزایش الیاف شیشه و نانولوله کربنی بر خواص ارتعاشی پلی‌پروپیلن و فوم پلی‌پروپیلن را مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد، افزایش الیاف شیشه و نانولوله کربنی باعث بهبود فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی پلی‌پروپیلن خالص و فوم پلی‌پروپیلن شد. در تحقیقی دیگر آل‌بویه و فریدون [۱۲]، به بررسی تأثیر افزایش نانوذرات متخلخل مزوپروس سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت بر خواص ارتعاشی پلی‌پروپیلن پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند، افزایش نانوذرات ترکیبی مزوپروس سیلیکا-هیدروکسی آپاتیت باعث بهبود قابل توجه خواص ارتعاشی پلی‌پروپیلن شد. تیاگراجان (Thiagarajan) و همکاران [۱۳]، به بررسی تأثیر ذرات پوست پسته بر رفتار مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه خردشده/پلیمر اپوکسی پرداختند. افزودن ذرات پوست پسته استحکام کششی و خمشی ورقه‌های تهیه‌شده را افزایش داد، به طوری که استحکام خمشی با افزودن ۱ درصد وزنی ذرات پوست پسته، ۱۴ درصد افزایش یافت. واسودوان (Vasudevan) و همکاران [۱۴]، خواص کششی و خمشی پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه و لایه ورقه فلزی آلومینیوم را در ۵ نمونه بررسی کردند. نتایج نشان داد، به طور میانگین استحکام کششی، کشیدگی و

مدول کششی به ترتیب ۶۳/۵۱۸ مگاپاسکال، ۳/۸۷ درصد و ۳/۸۸۸ گیگاپاسکال و همچنین استحکام خمشی، خم‌شدگی و مدول خمشی به ترتیب ۱۱۹/۳۸ مگاپاسکال، ۴/۱۷ میلی‌متر و ۶/۱۵۴ گیگاپاسکال بود. در تحقیقی دیگر توسط ولت (Vlot) [۱۵]، به‌منظور تعیین ویژگی‌های ضربه لایه‌های فلزی الیافی، آزمایش‌های ضربه‌ای انجام شد. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های ضربه‌ای مقایسه‌ای با سرعت کم و بالا بر روی آلومینیوم یکپارچه، ورقه‌های فلزی الیاف و کامپوزیت‌های ترموپلاستیک کربنی بود. نتایج نشان داد، کامپوزیت الیاف‌شیشه در مقایسه با سایر مواد، عملکرد بهتری دارد.

تحقیقات متعددی به منظور بررسی خواص خمشی و ارتعاشات آزاد تیر کامپوزیتی و هیبرید فلز/کامپوزیت انجام شده است، اما مطالعه بر روی تیر هیبریدی فلز/کامپوزیت با استفاده از آزمون مودال محیطی و محاسبه خواص خمشی آن تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است؛ لذا، در پژوهش حاضر، خواص خمشی شامل استحکام خمشی، مدول خمشی و کرنش نهایی خمشی و خواص ارتعاشی شامل فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی تیر آلومینیوم تقویت شده با کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به مشکلات فلز پایه (آلومینیوم) در ترکیبات فلز/کامپوزیت معمول، مانند استحکام، سختی و خواص ارتعاشی پائین، در این تحقیق از کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه در جهت بهبود خواص آلومینیوم خالص استفاده شده است.

۲- مواد

الیاف شیشه مورد استفاده در این تحقیق بصورت پارچه‌ای با مقاومت مکانیکی بالا، منافذ ریز و ترد، دارای وزن ۲۰۰ گرم با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر است که از شرکت نانوصدرا تهیه شده است. رزین اپوکسی مخصوص لایه چینی کامپوزیت با کد PC105 با چسبندگی مناسب، محصول شرکت پلی کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است که با سخت‌کننده نوع ۵۱۵ محصول همان شرکت ترکیب شده است. چگالی رزین اپوکسی مذکور ۱/۱۷ گرم بر سانتی مترمکعب و آلومینیوم مورد استفاده نیز از نوع ۳۱۰۵ است که بدلیل مقاومت بالا، شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری مناسب مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- روش ساخت

برای آماده‌سازی نمونه‌ها از روش لایه چینی دستی استفاده شده است. در ابتدا، ورق آلومینیوم با گیوتین با اندازه دلخواه بریده و سپس یک سطح آن بر روی کامپوزیت قرار داده شد. روش کار به این صورت است که با استفاده از سمباده یا فرچه سیمی خط و خش‌های بر روی آلومینیوم ایجاد شد تا از حالت صاف و صیقلی خارج شود و رزین در آن نفوذ کند و موجب چسبندگی آلومینیوم و رزین گردد. در مرحله بعد، صفحه فلزی به‌عنوان قالب در نظر گرفته شد. الیاف روی صفحه فلزی قرار داده شدند و رزین با سخت‌کننده ترکیب و با استفاده از قلم مو به آن ضربه وارد می‌شود تا رزین در الیاف نفوذ کند. سپس نمونه‌ها در دستگاه وکیوم قرار گرفتند تا حباب‌گیری شوند. در گام بعدی، سخت‌کننده به ترکیب اضافه شد و بار دیگر ترکیب حاصله در دستگاه وکیوم قرار داده شد تا برای آخرین مرحله، حباب زدایی شود. با استفاده از قلم مو، رزین بر روی لایه‌های الیاف زده شد و تا ۱۰ مرتبه تکرار شد. در مرحله آخر، برای ایجاد اتصال قوی ورق آلومینیوم به کامپوزیت، ورق آلومینیوم آغشته به رزین شد و بر روی کامپوزیت قرار گرفت و توسط وزنه، نیرویی همگن به آن وارد گردید. در نهایت، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه واترجت طبق ابعاد مورد نیاز جهت آزمون‌های خمشی و ارتعاشی، برش داده شدند. در جدول ۱ نامگذاری نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول ۱. نامگذاری نمونه‌ها

نام نمونه	جنس
AL	آلومینیوم
GF	اپوکسی - الیاف شیشه
FML	آلومینیوم/اپوکسی - الیاف شیشه

۴- آزمون‌ها

۴-۱ آزمون خواص خمشی

ساخت نمونه‌ها و استخراج خواص خمشی شامل؛ استحکام خمشی، مدول خمشی و کرنش خمشی براساس استاندارد ASTM D3039 انجام شده است.

۴-۲ آزمون خواص ارتعاشی

خواص ارتعاشی نمونه‌ها شامل فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی با انجام آزمون مودال محیطی بر روی یک صفحه با ابعاد ۱۰۰*۴۰ میلی‌متر در آزمایشگاه مودال دانشگاه سمنان استخراج شده‌اند. شکل‌های (۱) و (۲) تصاویری از تجهیزات مورد استفاده در این آزمون را نشان می‌دهند. در این آزمون با استفاده از یک آچار آلن کوچک، ضرباتی دلخواه به نمونه وارد شده است تا نمونه تحریک شود. سپس با استفاده از ارتعاش سنج لیزری و نرم‌افزار Pulse، پاسخ ارتعاشی برای هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با استفاده از این آزمون، مقادیر فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی بدست آمده‌اند.



شکل ۱. ارتعاش سنج لیزری مورد استفاده در آزمون مودال محیطی

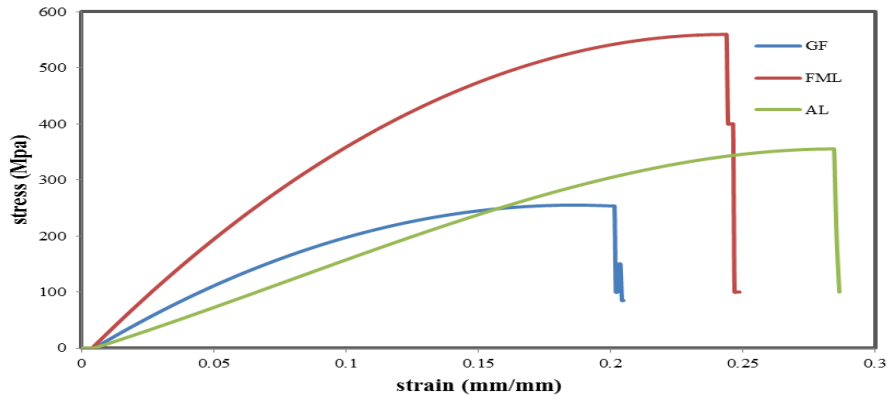


شکل ۲. تجهیزات آزمون مودال

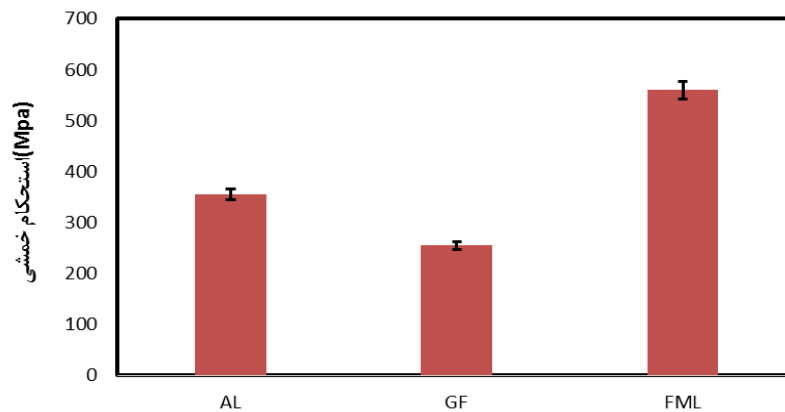
۵- نتایج

۱-۵ نتایج آزمون خمش

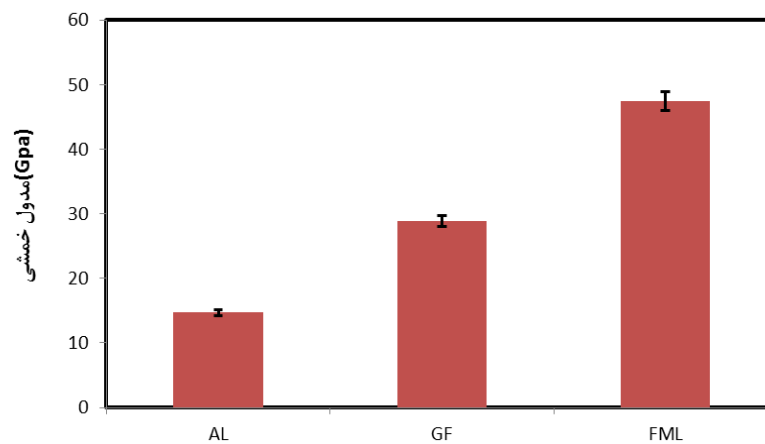
شکل (۳) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های AL، GF و FML را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر استحکام و مدول خمشی و کرنش نهایی نیز از دیاگرام تنش - کرنش استخراج و در اشکال (۴) تا (۶) به ترتیب ارائه شده‌اند.



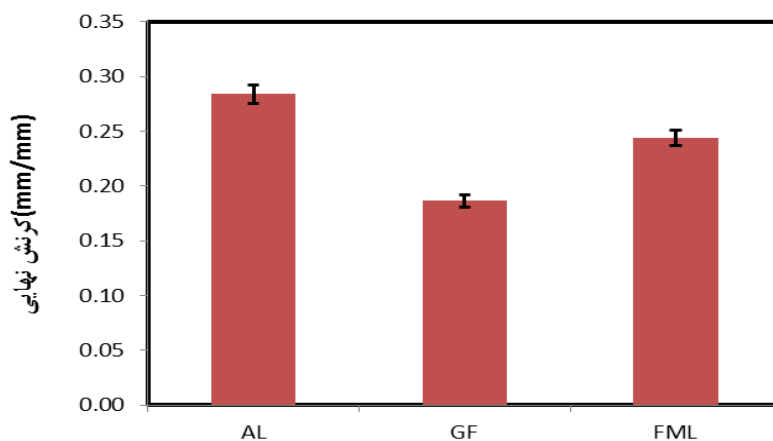
شکل ۳. دیاگرام تنش-کرنش خمشی نمونه‌ها



شکل ۴. استحکام خمشی نمونه‌ها



شکل ۵. مدول خمشی نمونه‌ها

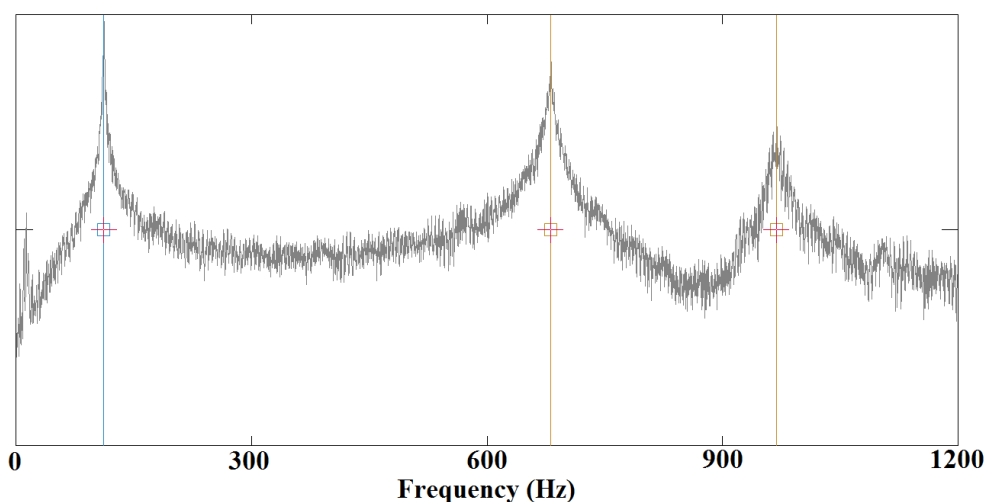


شکل ۶. مقادیر کرنش نهایی نمونه‌ها

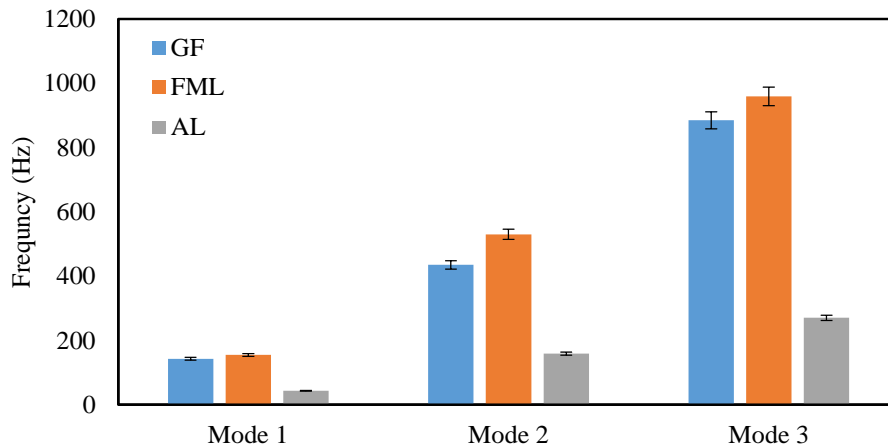
همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، استحکام خمشی نمونه GF نسبت به AL کاهش ۲۸ درصدی یافته است؛ اما با استفاده از ترکیب آلومینیوم با اپوکسی /الیاف شیشه (FML)، استحکام ۶۱ درصد نسبت به AL افزایش یافته است. افزایش استحکام در FML به استحکام بالای الیاف شیشه و چسبندگی قوی این الیاف با ماتریس اپوکسی نسبت داده می‌شود. نتایج بدست آمده در شکل (۵) نشان می‌دهد که افزودن اپوکسی و الیاف شیشه/اپوکسی به آلومینیوم خالص، باعث افزایش ۹۰ درصدی مدول آن نسبت به GF می‌شود. دلیل این افزایش مدول، می‌تواند به افزایش سفتی الیاف شیشه و ترکیب با آلومینیوم نسبت داده شود. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که میزان کرنش نمونه AL، ۰/۲۸ است و کرنش نمونه GF با کاهش ۲۳ درصدی نسبت به AL مواجه می‌شود. سپس در ترکیب آلومینیوم با اپوکسی/الیاف شیشه (FML)، کرنش به میزان ۲۷ درصد نسبت به GF افزایش می‌یابد؛ که دلیل افزایش کرنش، می‌تواند به نرمی آلومینیوم و ترکیب با الیاف شیشه باشد.

۲-۵ نتایج آزمون ارتعاش

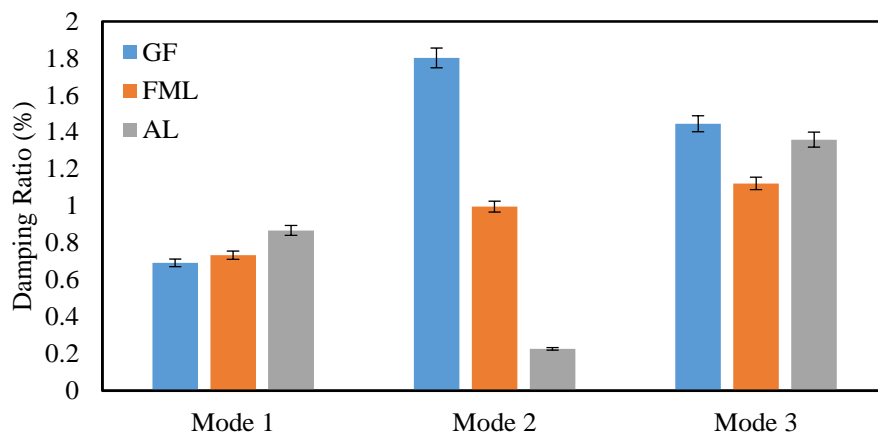
در شکل (۷)، دیاگرام طیف پاسخ فرکانسی مربوط به FML ارائه شده است که از آزمون ارتعاشی و تحلیل مودال محیطی استخراج شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، سه مود اول در این نمودار قابل مشاهده هستند. همچنین، مقادیر سه فرکانس طبیعی و ضرایب میرایی استخراج شده از این آزمون در اشکال (۸) و (۹) ارائه شده‌اند.



شکل ۷. دیاگرام طیف پاسخ فرکانسی نمونه FML



شکل ۸. فرکانس‌های طبیعی مدهای اول تا سوم



شکل ۹. ضرایب میرایی مدهای اول تا سوم

همانطور که در شکل (۸) مشخص است، نمونه AL فرکانس کمتری نسبت به نمونه های GF و FML دارد. در هر مود، افزایش فرکانس رخ می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش سفتی در هر مرحله است. در واقع، افزایش الیاف شیشه با مدول بالا، افزایش فرکانس‌های طبیعی را به همراه دارد. در شکل (۹) ضریب میرایی نمونه‌های GF، FML و AL مورد بررسی قرار گرفته است. در مدهای اول و سوم شکل مود خمشی است و ضریب دمپینگ AL نسبت به FML افزایشی بوده است؛ اما در شکل مود دوم با توجه به پیچشی بودن شکل مود، نمونه AL نسبت به GF ضریب میرایی کمتری داشته است که در واقع، الیاف پارچه‌ای شیشه نقش موثری در جذب ارتعاش و انرژی دارند و باعث بهبود ضریب میرایی در مدهای پیچشی می‌شوند.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- در این تحقیق خواص خمشی و ارتعاشی نمونه‌های آلومینیوم خالص، الیاف شیشه-اپوکسی و آلومینیوم/اپوکسی-الیاف شیشه به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفتند و دستاوردهای تحقیق به شرح زیر می‌باشند:
- ۱- استحکام خمشی و مدول خمشی FML نسبت به AL به ترتیب افزایش ۶۱ و ۹۰ درصدی داشته است.
 - ۲- بیشترین مقدار کرنش در نمونه آلومینیوم خالص مشاهده شده است.
 - ۳- فرکانس طبیعی FML بیشتر از نمونه های AL و GF می‌باشد.
 - ۴- پخش همگن الیاف شیشه درون ماتریس اپوکسی به افزایش قابل توجه خواص مکانیکی و ارتعاشی کمک می‌کند.
 - ۵- در مود دوم (پیچشی)، ترکیب آلومینیوم با الیاف شیشه باعث افزایش چشمگیر ضریب میرایی شده است.

- [1] A. Fereidoon, S. Memarian, A. Albooyeh, and S. Tarahomi, "Influence of mesoporous silica and hydroxyapatite nanoparticles on the mechanical and morphological properties of polypropylene," *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 201–210, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.046.
- [2] M. N. M. Merzuki, Q. Ma, M. R. M. Rejab, M. S. M. Sani, and B. Zhang, "Experimental and numerical investigation of fibre-metal-laminates (FMLs) under free vibration analysis," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 2–8, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.409.
- [3] S. Dhar Malingam, F. A. Jumaat, L. F. Ng, K. Subramaniam, and A. F. Ab Ghani, "Tensile and impact properties of cost-effective hybrid fiber metal laminate sandwich structures," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 37, no. 7, pp. 2385–2393, 2018, doi: 10.1002/adv.21913.
- [4] S. Maraş, M. Yaman, M. F. Şansveren, and S. K. Reyhan, "Free Vibration Analysis of Fiber Metal Laminated Straight Beam," pp. 944–948, 2018.
- [5] S. M. R. Khalili, R. K. Mittal, and S. G. Kalibar, "A study of the mechanical properties of steel/aluminium/GRP laminates," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 412, no. 1–2, pp. 137–140, 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.08.016.
- [6] P. Kaleeswaran, K. M. Kiranbabu, and B. S. Kumar, "Fabrication of Fibre Metal Laminate (FML) and Evaluation of Its Mechanical Properties," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 9, no. 26, pp. 8872–8874, 2014, [Online]. Available: <http://www.ripublication.com/ijaer.htm>.
- [7] Y. Xia, Y. Wang, Y. Zhou, and S. Jeelani, "Effect of strain rate on tensile behavior of carbon fiber reinforced aluminum laminates," *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 1, pp. 213–215, 2007, doi: 10.1016/j.matlet.2006.04.043.
- [8] A. M. Mukesh and N. Rajesh Jesudoss Hynes, "Mechanical properties and applications of fibre metal laminates," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2142, no. August, 2019, doi: 10.1063/1.5122456.
- [9] H. Khoramishad, H. Alikhani, and S. Dariushi, "An experimental study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on high-velocity impact behavior of fiber metal laminates," *Compos. Struct.*, vol. 201, no. March, pp. 561–569, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.085.
- [10] S. Feli and M. M. Jalilian, "Experimental and optimization of mechanical properties of epoxy/nanosilica and hybrid epoxy/fiberglass/nanosilica composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 28, pp. 3891–3903, 2016, doi: 10.1177/0021998315627198.
- [11] A. R. Albooyeh, "The effect of addition of Multiwall Carbon Nanotubes on the vibration properties of Short Glass Fiber reinforced polypropylene and polypropylene foam composites," *Polym. Test.*, vol. 74, pp. 86–98, 2019, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.12.014.
- [12] A. Albooyeh and A. Fereidoon, "The effect of mesoporous silica and carbon nanotube addition on the vibration properties of polypropylene," vol. 14, no. 1, 2014.
- [13] A. Thiagarajan, K. Velmurugan, and P. P. Sangeeth, "Synthesis and mechanical properties of pistachio shell filler on glass fiber polymer composites by VARIM process," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, no. xxxx, pp. 610–614, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.001.
- [14] A. Vasudevan, B. N. Kumar, M. V. Depoures, T. Maridurai, and V. Mohanavel, "Tensile and flexural behaviour of glass fibre reinforced plastic - Aluminium hybrid laminate manufactured by vacuum resin transfer moulding technique (VARTM)," *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no. Part 2, pp. 2132–2140, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.573.
- [15] A. Vlot, "Impact properties of Fibre Metal Laminates," *Compos. Eng.*, vol. 3, no. 10, pp. 911–927, 1993, doi: 10.1016/0961-9526(93)90001-Z.