بررسی تجربی خواص و رفتار کامپوزیتهای هیبریدی پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه و آلومینیم (GLALL)

Properties and Behaviour of Hybrid Composites (FML) of Reinforced Polyester with Glass Fibers and Aluminium (GLALL)- An Experimental Study

سیدمحمدرضا خلیلی*، محسن محمدی شجاع

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵/۳۳۸۱

دریافت: ۸۰/۶/۱۹، پذیرش: ۸۰/۹/۵

چکیده

صنایع هوایی‌سازی برای پاسخ به نیازهای رو به گسترش خطوط هوایی به منظور خدمات بیشتر، نیاز به ساخت هواپیماهایی غول‌پیکر با تعداد بیش از ۴۰۰ نفر سرنشین دارند. علاوه بر این، برای کاهش هزینه‌های سیستم تعمیر و نگهداری، سودده‌ی بالا، انعطاف‌پذیری و توسعه طراحی و همچنین ایجاد قناوری مطرون به صرفه استفاده از مواد جدید کارآمد در ساخت بالها، بدنه و قسمتهای مکانیکی و داخلی هواپیماها ضروری است. این پژوهش درباره دسته جدیدی از مواد کامپوزیت هیبریدی به نام چند لایه‌ای آلومینیم - شیشه (GLALL) است که در آن تاثیر وجود آلومینیم در سازه‌های چند لایه GRP تحت شرایط بارگذاری کششی، ضربه‌ای و همچنین وضعیت بارگذاری ارتعاشی، خرصی و پیچشی بررسی شده است. آزمایش ارتعاش پیچشی در دماهای مختلف نیز انجام شده و نتایج بدست آمده در همه آزمایشها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شده است که وجود لایه آلومینیم باعث افزایش چقرمگی و شکل‌پذیری کامپوزیت و درنتیجه مقاومت بیشتر این مواد در برابر خسارتهای وارده می‌شود. همچنین، فرکانس طبیعی تیرها و لوله‌های کامپوزیتی GLALL بالاتر از مواد کامپوزیت GRP بدون آلومینیم است. در نتیجه ماده GLALL با توجه به خواص مکانیکی ویژه و قیمت کم و راحتی ساخت می‌تواند جایگاه بسیار مهمی را در صنایع هوایی و هواپیمایی در آینده پیدا کند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت الیافی، چندلایه‌ای آلومینیم - شیشه، ضربه، کشش، ارتعاش

Key Words: fibers composite, GLALL, impact, tension, vibration

مقدمه

روشن است که پیشرفت مواد، کلید اصلی پیشرفت فناوری است. امروزه، بشر در اواسط دوره‌ای قرار دارد که در آن انقلاب جدیدی به وسیله کامپوزیتهای پیشرفته ایجاد شده است. کامپوزیتها که از ترکیب مواد متفاوت در مقیاس درشت ساختاری ایجاد می‌شوند، ویژگیهایی دارند که آنها را از مواد متداول مهندسی متمایز می‌کند، خصوصیاتی مانند استحکام و سفتی بالا، وزن کم، مقاومت در برابر خستگی و خزش

* مسئول مکاتبات، پیامنگار: khalili@mail.com

و غیره [۱]. مواد کامپوزیت پایه پلیمری که با الیاف شیشه تقویت شده‌اند (GRP) ظهورخود را با جنگ جهانی دوم به نمایش گذاشته و از آن تاریخ تاکنون در عرصه‌های متفاوت صنعتی مانند صنایع هوافضا، هواپیمایی، دریایی، اتومبیل‌سازی، ورزشی، الکترونیک و پزشکی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۲]. این اهمیت به واسطه ضریب تقویت‌کنندگی بالای این نوع کامپوزیتها در کنار قیمت پایین آنهاست. پلیمرهای ارزان که شکل‌پذیری زیاد، استحکام و سفتی کمی دارند با الیاف شیشه کم قیمت که دارای سفتی و استحکام زیادند، کامپوزیت الیافی پایه پلیمری را تشکیل می‌دهند که از نظر سازه‌های تحمل بار در بارهای نسبتاً زیاد علاوه بر وزن کم، کارایی مناسبی را نیز نشان می‌دهند. سازه‌های چند لایه کامپوزیتی مهمترین سازه‌های مهندسی‌اند که در شرایط مختلف طراحی به کمک مهندسان آمده و ویژگیهای ممتازی را ارائه می‌دهند. اما، قرار دادن الیاف شیشه که شکل‌پذیری کمی دارند در داخل ماتریس پلیمری باعث کاهش انعطاف‌پذیری و جقرمگی سازه می‌شود. هر قدر کسر حجمی الیاف افزایش یابد، سازه مستحکمتر و شکننده‌تر می‌شود و چقرمگی کمتری پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت در برابر ضربه آن نیز تضعیف می‌شود. از نظر ارتعاشی نیز سازه کامپوزیتی کارایی خوبی نداشته و مدول پیچشی پایینی دارد. از دیگر معایب کامپوزیتها کم بودن حد تحمل خسارت وارده نسبت به فلزات است [۳].

کامپوزیتهای هیبریدی دسته جدیدی از مواد مرکب چندلایه‌ای بوده که از ترکیب لایه‌های مختلف کامپوزیتها با مواد دیگر ایجاد می‌شوند و بواسطه جدید بودن این مواد و ویژگیهای برجسته آنها، پژوهش روی این کامپوزیتها هم اکنون در حال توسعه است [۴-۹]. انتخاب صحیح مواد تشکیل دهنده کامپوزیتهای هیبریدی می‌تواند بسیاری از مزایای کامپوزیتهای الیافی لایه‌ای مانند استحکام و سفتی ویژه (استحکام و سفتی به وزن)، راحتی ساخت، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر ضربه و خستگی را در کنار قیمت نسبتاً کم و بازدهی موثر ارائه دهد [۴]. یکی از فناوریهای جدید، بکارگیری کامپوزیتهای هیبریدی چند لایه الیاف - فلز است. این مواد پیشرفته از ترکیب ورقه‌های فلزات مستحکم با پلیمرهای تقویت شده با الیاف بوجود آمده [۹] و در حال حاضر جایگاه ویژه‌ای را در صنایع هوافضا و هواپیمایی پیدا کرده‌اند.

آلومینیم یکی از متداولترین مواد غیرآهنی بوده که دارای سفتی و استحکام نسبتاً مناسب در حد الیاف شیشه ولی کمی سنگینتر از آن است و به واسطه شکل‌پذیری خوب، دارای چقرمگی، ضربه‌پذیری و همچنین مقاومت خستگی مناسب است. از ترکیب لایه‌های آلومینیم با لایه‌های GRP کامپوزیت هیبریدی اپوکسی تقویت شده با آلومینیم و شیشه (GLARE) یا چند لایه‌ای آلومینیم - شیشه (GLALL) و با لایه‌های پلیمر تقویت شده با آرامید (ARP) کامپوزیت هیبریدی چند لایه‌ای آلومینیم و آرامید (ARALL) و با لایه‌های پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) کامپوزیت هیبریدی چند لایه‌ای آلومینیم و کربن (CARALL) ایجاد می‌گردند [۱۱-۹].

شرکتهای هواپیمایی پیش‌بینی کرده‌اند که در سال ۲۰۱۶ میلادی تعداد مسافران نسبت به وضع موجود ۳ برابر خواهد شد. از این رو، صنایع هواپیماسازی و سازندگان اتوبوسهای هوایی مطالعاتی را برای قبول طرحهای اقتصادی و فنی برای توسعه انواع هواپیماهای خود اختصاص داده است تا خانواده جدیدی از هواپیماهای با ظرفیت بسیار زیاد را جایگزین آنها کنند [۱۲]. در نتیجه، به همراه افزایش تعداد پروازهای بدون توقف برای مسیرهای طولانی، تقاضای ساخت هواپیماهای بسیار بزرگ با تعداد سرنشینان بیش از ۴۰۰ نفر افزایش یافته است. تعدادی از صنایع هواپیماسازی سهم خود را در این بازار با طراحی هواپیمای بسیار بزرگی به نام A3XX ارائه خواهند کرد [۱۵-۱۳]. دسته‌ای از این هواپیماهای غول‌پیکر برای ماموریتهای باربری، جنگی و کاملاً مسافربری با گستره کوتاه یا طولانی طراحی می‌شوند، اما برای پاسخگویی به نیازهای خطوط هوایی در جهت کاهش هزینه‌های سیستم تعمیر و نگهداری، فناوریهای مقرون به صرفه، سود دهی بالا، انعطاف‌پذیری و توسعه طراحی استفاده از مواد جدید کارآمد برای ساخت بالها، بدنه، و قسمتهای مکانیکی ضروری است.

اکثر سازندگان هواپیماهای غیرنظامی معمولاً از پوسته‌های تقویت شده آلومینیمی با آلیاژهای شناخته شده برای ساخت همه سازه‌های اولیه این نوع هواپیماها استفاده می‌کنند. اما، پژوهش در این زمینه به منظور شناخت و ایجاد سازه‌های سبکتر، کاربرد مواد دیگری را طلب می‌کند. کامپوزیتهای تقویت شده با لایه‌های آلومینیم و GRP به نام GLARE مواد پیشرفته جدیدند که برای پوسته و اجزای داخلی هواپیماها از آنها استفاده می‌شود و هم اکنون نیز پژوهش روی این مواد ادامه دارد [۱۴]. در واقع، کاهش وزن و افزایش مقاومت در برابر خسارت، عامل اصلی ایجاد این مواد جدید بوده است [۱۷-۱۴]، در نتیجه می‌توان ایمنی و دوام بیشتری را از این سازه‌ها انتظار داشت. ترکیب این ویژگیها در یک ماده دستاوردی بسیار چشمگیر است. GLARE یکی از مواد انتخاب شده در ساخت بدنه برای استفاده در تولید انواع جدید هواپیماهای غیر نظامی است [۱۸]. پژوهشهای جدیدی در زمینه خواص و رفتار این مواد انجام گرفته است. مطالعاتی در زمینه اشتعال‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر خستگی و ضربه با سرعت کم و زیاد و بعضی از خواص مکانیکی دیگر مانند کشش و فشار انجام شده است [۲۱-۱۹،۱۶،۱۴]. همه نتایج حاصل از این مطالعات نشان دهنده این مطلب است که ماده GLARE دارای ویژگیهای مناسب و مطلوبی از جمله وزن کم، مقاومت خستگی

جدول ۱ - خواص مواد تشکیل دهنده کامپوزیت.

ماده / خواص	رزین پلی‌استر	الیاف شیشه E	ورق آلومینیم
ضریب انبساط گرمایی ($10^{-6}/^{\circ}C$)	۱۰۵	۵/۵	۲۳
چگالی (g/cm^3)	۱/۳	۲/۵۵	۲/۷۵
سفتی (Gpa)	۵	۷۳	۷۱
استحکام کششی نهایی (Mpa)	۸۰	۲۴۰۰	۴۵۰

خوب، مقاومت خوب در برابر ضربه با سرعت کم و راحتی ساخت است.

در این مقاله، که قسمتی از طرح تعیین خواص کامپوزیتهای هیبریدی (FML) است، خواص مهم مهندسی مواد کامپوزیتی GLALL که نوعی کامپوزیت FML است و در آن رزین پلی‌استر بکار رفته مطالعه شده است، یعنی اثر تقویت‌کنندگی لایه آلومینیم در کامپوزیتهای الیافی تحت شرایط مختلف بارگذاری بررسی و با حالت ماتریس تقویت نشده و همچنین تقویت شده با الیاف شیشه مقایسه شده است.

تجربی

مواد

مواد مورد استفاده عبارتند از: الیاف شیشه نوع E به شکل الیاف خرد شده سوزنی (CSM) با وزن واحد سطح $300 g/m^2$ و الیاف حصیری (WR) با وزن واحد سطح $350 g/m^2$ محصول شرکت FGP هند، رزین پلی‌استر معمولی از شرکت Reichhold آمریکا و ورق آلومینیم با ضخامت ۰/۵ mm ساخت داخل. مشخصات مواد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.

دستگاهها

دستگاههای مورد استفاده در این پژوهش به قرار زیر است: دستگاه آزمون کشش-فشار مدل SM-۱۰۰، دستگاه آزمایش ارتعاش عرضی مدل TM۱۶۸، دستگاه آزمون ارتعاش پیچشی مدل TM۱۶ که هر سه ساخت شرکت Teoquipment انگلستان و دستگاه آزمون ضربه مدل ۶۷۰-۵U ساخت شرکت Avery Denison انگلستان.

روشها

برای ساخت مواد کامپوزیتی چند لایه‌ای GRP و هیبریدی GLALL با توجه به مواد اولیه و امکانات موجود، دو شکل از مواد به صورت تخت و لوله‌ای در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، نمونه‌های تقویت نشده ماتریس پلی‌استر نیز به منظور مقایسه نتایج آزمایشها تهیه شده است.

در ساخت کلیه مواد کامپوزیتی از روش دستی روی، هم قرار دادن لایه‌ها استفاده شده و تجهیزات و لوازم مورد نیاز و همچنین قالبهای مناسب جهت ساخت کامپوزیتهای تخت و لوله‌ای تهیه شده است. در روش مورد استفاده لایه‌های مختلف CSM، WR یا آلومینیم در توالی‌های مشخص با استفاده از رزین پلی‌استر بر روی هم قرار گرفته و در شرایط محیط، عملیات پخت انجام شده است. در زمان ساخت دمای محیط برابر $25^{\circ}C$ بوده است. نمونه‌ها بعد از مدت ۴ روز آزمایش شده‌اند. در جدول ۲ ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها در نمونه‌های

جدول ۲ - ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها در نمونه‌های مختلف (نمونه‌های ۱۳-۱، تخت و نمونه‌های ۱۶-۱۴ لوله‌ای شکل‌اند).

کد نمونه	نوع چند لایه‌ای	ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها
۱	ماتریس تقویت نشده	-
۲	سه لایه CSM	CSM،CSM،CSM
۳	سه لایه CSM و دو لایه WR	CSM،WR،CSM،WR،CSM
۴	دو لایه CSM و دو لایه WR و یک لایه آلومینیم	CSM،WR،AL،WR،CSM
۵	دو لایه CSM، دو لایه WR ودو لایه آلومینیم	CSM،AL،WR،WR،AL،CSM
۶	چهار لایه CSM	CSM،CSM،CSM،CSM
۷	چهار لایه WR	WR،WR،WR،WR
۸	چهار لایه CSM و یک لایه آلومینیم	CSM،CSM،AL،CSM،CSM
۹	چهارلایه CSM و دولایه WR	CSM،WR،CSM،CSM،WR،CSM
۱۰	چهار لایه CSM و دو لایه آلومینیم	CSM،AL،CSM،CSM،AL،CSM
۱۱	سه لایه WR	WR،WR،WR
۱۲	دو لایه CSM و یک لایه آلومینیم	CSM،AL،CSM
۱۳	یک لایه CSM و دو لایه آلومینیم	AL،CSM،AL
۱۴	سه لایه CSM	CSM،CSM،CSM
۱۵	سه لایه WR	WR،WR،WR
۱۶	دو لایه CSM و یک لایه آلومینیم	CSM،AL،CSM

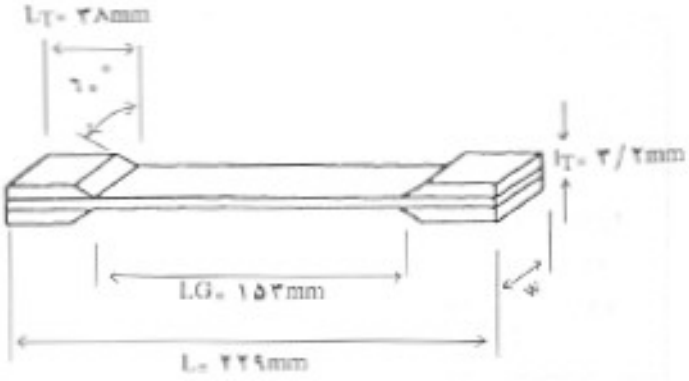
جدول ۳ - خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیتهای ساخته شده.

کد نمونه	کسر حجمی تقویت کننده	سفتی (GPa)	استحکام کششی (MPa)	چگالی (g/cm^3)
۱	۰	۵	۸۰	۱/۳
۲	۰/۱۲	۱۳/۸	۱۸۵	۱/۴۵
۳	۰/۱۲	۱۳/۸	۱۸۵	۱/۴۵
۴	۰/۱۶۴	۱۶/۴	۲۹۰	۱/۵۲
۵	۰/۲۰۸	۱۸	۳۲۰	۱/۵۹

مختلف و همچنین کد آنها ارائه شده است. در مجموع ۱۳ نمونه تخت و ۳ نمونه لوله‌ای تهیه و ساخته شده است. در شکل ۱ تصویر بعضی از نمونه‌های تخت و لوله‌ای ساخته شده نشان داده شده است.

مقادیر کسر حجمی الیاف از طریق آزمایشهای استاندارد [۲۲] و محاسبات عملی بدست آمده‌اند و براساس کسرهای حجمی حاصل مقادیر سفتی، استحکام و چگالی نمونه‌ها با استفاده از روابط حاکم و معادلات تعریف شده برای کامپوزیتها [۲۳] به صورت نظری محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. البته، در این جدول برخی ازخواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیتهای ساخته شده برای ۵ نمونه اول از جدول ۲ آورده شده است.

در بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیتهای GLALL خصوصیات مهم عبارتند از: رفتار کششی، ضربه‌ای، خستگی و ارتعاشی و همچنین تاثیر دما بر رفتار مکانیکی. در این مقاله از بین موارد یاد شده رفتار کششی، ضربه‌ای، ارتعاش عرضی و پیچشی و تاثیر دما بر رفتار ارتعاش پیچشی بررسی می‌شود.



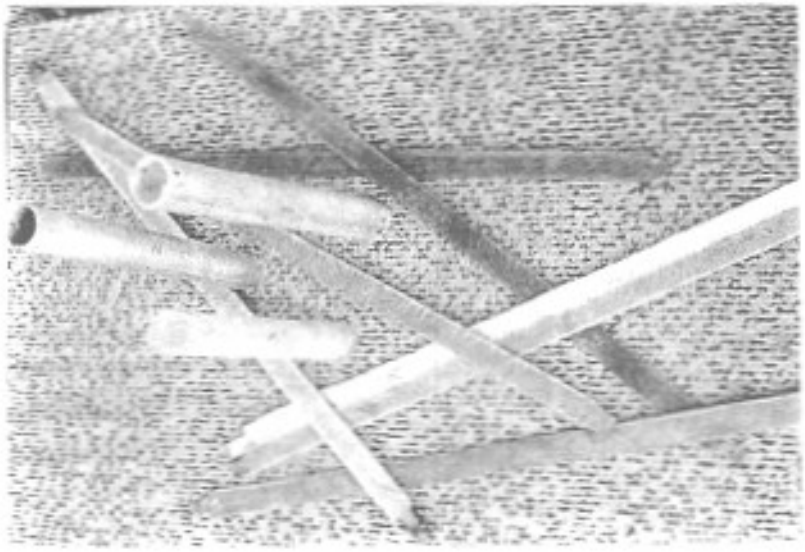
شکل ۲ - نمونه استاندارد آزمایش کشش و ابعاد آن.

آزمون کشش

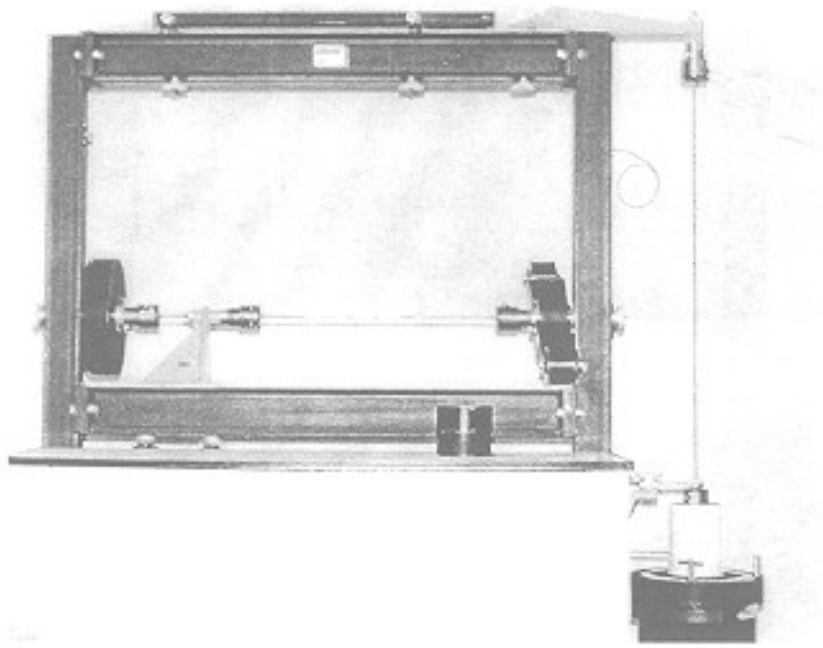
نمونه‌ها براساس استاندارد [۲۲] طبق ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ تهیه و با استفاده از تثبیت‌کننده‌های مناسب و دستگاه کشش استاندارد با سرعت حرکت فک متحرک به مقدار ۲ mm/min براساس استاندارد ASTM D ۳۰۳۹-۷۶ بارگذاری می‌شوند. مقادیر بار تغییر مکان نیز ثبت و سپس به مقادیر تنش - کرنش تبدیل می‌شوند.

آزمون ضربه

برای انجام آزمون ضربه از دستگاه ایزود استفاده شده است. نمونه استاندارد شکافدار با استفاده از تثبیت‌کننده‌ها به صورت عمودی در دستگاه نصب شده و پاندولی متحرک به آن ضربه وارد می‌کند.این آزمایش طبق استاندارد ASTM D ۲۵۶-۷۸ انجام شده است و ازنظرکیفی برای نشان دادن شکل‌پذیری و جذب انرژی مواد



شکل ۱ - تصویر نمونه‌های کامپوزیتی تخت و لوله‌ای شکل مورد استفاده.



شکل ۳- دستگاه و وزنه‌های مورد استفاده در آزمایش ارتعاش پیچشی.

کامپوزیت در بارهای ضربه‌ای مناسب است.

آزمون ارتعاش پیچشی

این آزمایش با استفاده از دستگاه ارتعاش پیچشی که در شکل ۳ نشان داده شده است انجام می‌شود [۲۴]. دو نوع از نمونه‌ها در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند: یکی نمونه‌های تخت و دیگری نمونه‌های لوله‌ای.

نمونه‌های تخت

برای این آزمایش نمونه‌ها به شکل تیر و با ابعاد ۳۳۰، ۳۰، ۳ mm ساخته شده‌اند. در این روش تیر را از حالت تعادل خارج می‌کند و مدت زمان ۱۰ نوسان پیچشی را بدست می‌آورند و در نتیجه دوره تناوب نمونه‌ها نیز محاسبه می‌شوند. با محاسبه دوره یا زمان تناوب (T) می‌توان فرکانس طبیعی (ω_n)، مدول پیچشی (K) و مدول برشی - پیچشی (G) را با استفاده از معادلات زیر بدست آورد:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \qquad (1)$$

$$\omega_n = \left(\frac{K}{I}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

$$G = \frac{12Il\omega_n^2}{bh(b^2+h^2)} \qquad (3)$$

که در این معادلات I گشتاور دوم سطح مقطع تیر، l، b و h به ترتیب طول، پهنا و ضخامت تیر است.

نمونه‌های لوله‌ای

آزمایش بالا را دقیقاً می‌توان برای نمونه‌های لوله‌ای نیز تکرار کرد. قطر داخلی نمونه‌ها ۴۰ mm و ضخامت لوله‌ها ۴ mm است. با محاسبه دوره تناوب می‌توان کمیتهای فرکانس طبیعی، مدول پیچشی و مدول برشی - پیچشی در نمونه‌های کامپوزیتی لوله‌ای را از معادلات زیر معین کرد:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \qquad (4)$$

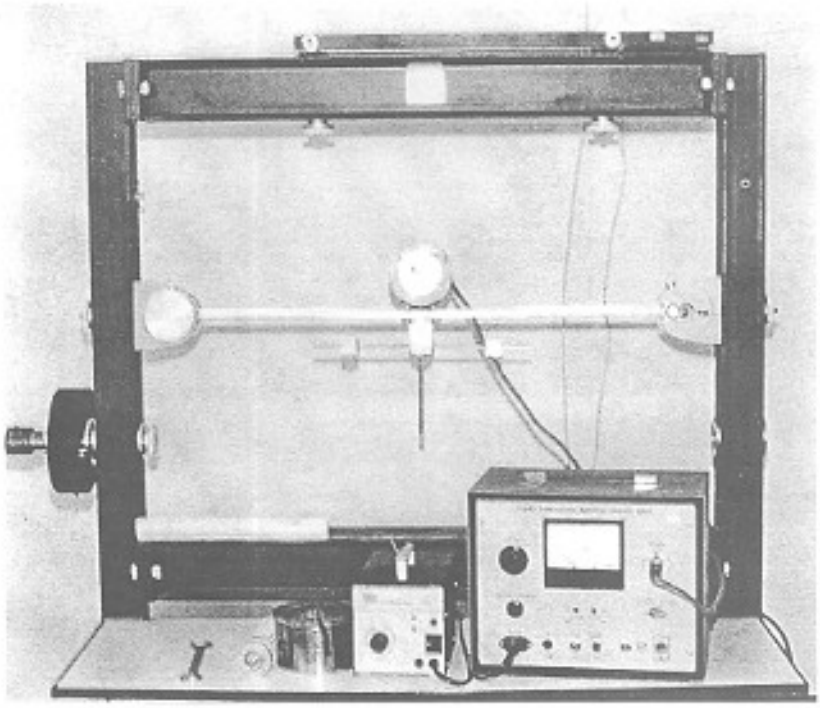
$$\omega_n = \left(\frac{K}{I}\right)^{1/2} \qquad (5)$$

$$G = \frac{12Il\omega_n^2}{\pi(R_o^4 - R_i^4)} \qquad (6)$$

که در معادله ۶، R_o و R_i به ترتیب شعاع خارجی و داخلی لوله است.

اثر دما بر رفتار ارتعاشی

نمونه‌ها را می‌توان علاوه بر آزمون ارتعاشی در دمای معمولی (۲۵°C)، در دمای بالاتر نیز مورد آزمایش و بررسی قرار داد. نمونه‌های مورد آزمایش به وسیله کوره‌ای در اطراف نمونه در دماهای ۲۵، ۵۰،

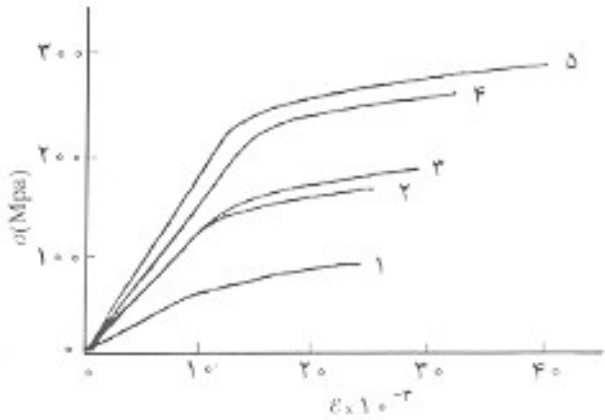


شکل ۴ - دستگاه و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ارتعاش عرضی.

۷۰ و $80^{\circ}C$ قرار گرفته و آزمایش ارتعاش پیچشی روی آنها انجام شده است. سپس، فرکانس طبیعی، مدول پیچشی و مدول برشی - پیچشی آنها محاسبه شده است.

آزمون ارتعاش عرضی

در این آزمون نمونه‌ها به شکل تیری مسطح و با ابعاد $830 \times 30 \times 3$ mm تهیه شده و در دستگاه مورد استفاده در آزمایش



شکل ۵ - نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های تحت آزمایش کشش.

ارتعاش عرضی که درشکل ۴ نشان داده شده است، برای بدست آوردن فرکانس طبیعی‌عرضی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند[۲۴]. در این آزمایش تیر کامپوزیتی در دو انتها نگه داشته شده و در وسط آن یک موتور نصب می‌شود. با افزایش دور موتور فرکانس طبیعی تیر با فرکانس چرخش موتور یکسان می‌شود و در زمان تشدید فرکانس، تیر با دامنه زیاد شروع به نوسان می‌کند. با دانستن دور موتور و معادله دانکرلی می‌توان فرکانس طبیعی تیر را بدست آورد.

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_{II}^2} \qquad (۷)$$

$$f_n = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{EI}{m_b L^3}\right)^{1/2} \qquad (۸)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{g}{\delta}\right)^{1/2} \qquad (۹)$$

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \qquad (۱۰)$$

که در آن f فرکانس طبیعی کل سیستم، f_n فرکانس طبیعی تیر به جرم m_b به تنهایی، f_1 فرکانس طبیعی تیر با جرم اعمال شده روی آن، F وزن اعمال شده روی تیر و δ خیز تیر در اثر جرم اعمال شده روی آن است. مقادیر فرکانس طبیعی را می‌توان به صورت تجربی نیز بدست آورد و

جدول ۴ ـ نسبت خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده به نمونه ۱.

کد نمونه	نسبت سفتی	نسبت استحکام کششی در نقطه تسلیم	نسبت استحکام کششی در نقطه شکست	نسبت چقرمگی
۲	۲/۳۶	۲/۲۶	۱/۹۵	۲/۱۶
۳	۲/۳۶	۲/۶۱	۲/۱۴	۳
۴	۲/۹۲	۳/۵۷	۳/۱	۵
۵	۳/۵۲	۴/۴۲	۳/۳۷	۷

با مقادیر بدست آمده نظری مقایسه کرد.

نتایج و بحث

با استفاده از مقادیر تنش ـ کرنش بدست آمده در آزمایش کشش، نمودارهای تنش ـ کرنش همه نمونه‌ها رسم شده‌اند (شکل ۵). در جدول ۴ نیز مقادیر نسبت سفتی، استحکام کششی در نقطه تسلیم،استحکام کششی در نقطه شکست و چقرمگی همه نمونه‌ها به کمیتهای متناظر نمونه ۱ داده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۴ همگی از آزمایش کشش روی نمونه‌ها بدست آمده‌اند. از مقادیر جدول ۳ و ۴ و نتایج بدست آمده برای همه نمونه‌های آزمایش شده با مقادیر بدست آمده از روابط ریزمکانیک ومعادلات حاکم اختلافی حدود ۲ تا ۱۰ درصد مشاهده می‌شود که این اختلاف در ساخت کامپوزیت با روش دستی منطقی است [۱۱]. همان طور که از جدول ۴ مشخص است، تقویت ماتریس پلیمری با الیاف شیشه تاثیر مناسبی در کمیتهای یاد شده دارد. اما نمونه‌های ۴ و ۵ نسبت بالاتری در استحکام کششی در نقطه تسلیم و خصوصاً چقرمگی نشان می‌دهند. با قرار دادن الیاف شیشه و آلومینیم در ماتریس (نمونه ۵) مقدار چقرمگی ۷ برابر افزایش یافته است. افزایش ۷۳ درصد کسر حجمی تقویت کننده در مقایسه با نمونه‌های ۲ و ۳ چقرمگی تا میزان ۲۲۵ درصد افزایش یافته است. با مقایسه مقادیر بدست آمده از جدول ۴ مشاهده می‌شود که وجود آلومینیم نسبت به استفاده از شیشه به تنهایی تاثیر مناسبتری در افزایش استحکام در نقطه تسلیم و چقرمگی کامپوزیت دارد. همچنین، نمودار و جدول نشان می‌دهد که وجود الیاف WR در کامپوزیت نسبت به الیاف CSM تاثیر بهتری در افزایش استحکام در نقطه تسلیم و چقرمگی دارد. در نمونه‌های ۲ و ۳ با وجود برابری کسر حجمی الیاف، مشاهده می‌شود که استحکام در نقطه تسلیم و استحکام در نقطه شکست و چقرمگی نمونه ۳ بمراتب بهتر از نمونه ۲ است. این امر بواسطه وجود الیاف جهت‌دار در نمونه ۳ است. با توجه به نمودار تنش ـ کرنش در شکل ۵ مشاهده می‌شود که استحکام نهایی شکست و کرنش نهایی

جدول ۵ ـ خواص مکانیکی ویژه نمونه‌های تهیه شده.

کد نمونه	سفتی ویژه $(\frac{Nm}{g})\times 10^{3}$	استحکام‌ویژه $(\frac{Nm}{g})$	چقرمگی‌ویژه $(\frac{Nm}{g})$
۱	۳/۸۴	۶۱/۵	۱
۲	۹/۵	۱۱۷/۳	۱/۹۵
۳	۹/۵	۱۲۷/۶	۲/۷
۴	۱۰/۷۸	۱۷۴/۳	۴/۳۶
۵	۱۱/۳۲	۱۸۲/۳	۵/۷۵

شکست برای مواد کامپوزیت با افزایش تقویت کننده افزایش یافته است. اثر آلومینیم در بهبود خواص شکست بسیار بیشتر است، بطوری که در نمونه ۵ با کاهش الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های ۲ و ۳ و قراردادن آلومینیم در کامپوزیت، تنش نهایی شکست این نمونه ۳/۵ برابر نمونه ۱ (بدون تقویت کننده) و تقریباً ۲ برابر نمونه ۲ و کرنش نهایی شکست آن در حدود ۲ برابر نمونه‌های ۱ و ۲ است. جدول ۵ استحکام، سفتی و چقرمگی ویژه (نسبت کمیتهای متناظر به چگالی) را برای این پنج نمونه نشان می‌دهد. از مزیتهای منحصر بفرد کامپوزیتها در مقایسه با مواد متداول مهندسی می‌توان به مقادیر همین کمیتها اشاره کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر آلومینیم در افزایش سفتی ویژه کم و در افزایش استحکام ویژه نسبتاً مناسب است، اما چقرمگی ویژه نمونه‌های ۴ و ۵ نسبت به سایر نمونه‌ها بالاست.

آزمون ضربه روی پنج نمونه اول از جدول ۲ انجام شده و نتایج آن به همراه نسبت مقدار انرژی جذب شده هر نمونه به نمونه ۱ در جدول ۶ ارائه شده است. نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه ماتریس خالص میزان جذب انرژی بیشتری دارند. با وجود برابری کسر حجمی نمونه‌های ۲ و ۳ مقدار جذب انرژی در دو نمونه متفاوت بوده و در نمونه ۳ این مقدار بیشتر است، زیرا در این نمونه از الیاف WR استفاده شده است که امتداد این الیاف عمود بر جهت ضربه بوده و در نتیجه مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. اما، وجود آلومینیم در کامپوزیت

جدول ۶ ـ مقدار انرژی جذب شده بر اثر ضربه برای نمونه‌های تهیه شده.

کد نمونه	مقدار انرژی جذب شده بر واحد سطح (KJ/m^{2})	نسبت‌انرژی‌جذب شده به نمونه ۱
۱	۴۵	۱
۲	۱۲۸	۲/۸۵
۳	۱۵۶	۳/۵
۴	۲۰۵	۴/۵۵
۵	۲۳۵	۵/۲۲

جدول ۷- نتایج آزمایش ارتعاش پیچشی نمونه‌های تخت.

کد نمونه	نسبت فرکانس هر نمونه به نمونه ۲				نسبت مدول برشی - پیچشی هر نمونه به نمونه ۲			
	۲۵°C	۵۰°C	۷۰°C	۸۰°C	۲۵°C	۵۰°C	۷۰°C	۸۰°C
۳	۱/۰۸	۱/۱۳۹	۱/۱۵	۱/۱۶	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۱۷	۱/۲
۴	۱/۲۰۹	۱/۲۵۳	۱/۳۱	۱/۳۵	۱/۲	۱/۲۶	۱/۳۶	۱/۴۹
۵	۱/۳۵	۱/۳۶۷	۱/۴۳	۱/۴۸	۱/۵	۱/۴۳	۱/۵۸	۱/۷۲

میزان جذب انرژی را نسبت به نمونه ۱ حدود ۵ برابر افزایش می‌دهد. در واقع پلی‌استر خود یک ماده نسبتاً شکل‌پذیر است و وجود الیاف باعث شکنندگی آن می‌شود، اما همان‌طور که از نمودار تنش - کرنش مشاهده می‌شود چقرمگی کامپوزیت GLALL نیز افزایش یافته است. افزایش چقرمگی ماده بواسطه وجود وجه مشترک نسبتاً خوب بین الیاف، ماتریس و لایه آلومینیم است. در غیر این صورت، کامپوزیت GRP باید دارای انرژی جذب شده کمتری باشد.

روی چهار نمونه تخت ۵-۲ از جدول ۲ آزمایش ارتعاش پیچشی در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۸۰°C انجام شده و نتایج این آزمایشها در جدول ۷ ارائه شده است. از نتایج آزمایشها مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی، مدول پیچشی و مدول برشی - پیچشی نمونه‌های تخت با افزایش کسر حجمی تقویت کننده افزایش می‌یابد. البته، باز هم مشاهده می‌شود که اثر تقویت کنندگی آلومینیم بمراتب بیشتر از الیاف شیشه است. در دماهای بالاتر مثلاً ۸۰°C، کمیتهای ذکر شده کاهش می‌یابند، اما در کامپوزیتهای GLALL کاهش کمتری مشاهده می‌شود. همچنین، تغییرات ایجاد شده به صورت یکنواخت است. فرکانس طبیعی نمونه ۲ با تغییرات دمایی ۵۵°C حدود ۲۵ درصد و نمونه ۵ در همین گستره دمایی حدود ۵ درصد کاهش نشان می‌دهد. همین طور، مدول برشی - پیچشی برای نمونه ۲ در همین گستره دمایی ۴۰ درصد کاهش می‌یابد، ولی کامپوزیت GLALL (نمونه ۵) حدود ۱۷ درصد کاهش نشان می‌دهد. همچنین، روی نمونه‌های لوله‌ای ۱۶-۱۴ آزمایش ارتعاش پیچشی انجام شده که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدول برشی - پیچشی نمونه ۱۵ نسبت به نمونه ۱۴ افزایشی در حدود ۸۰ درصد نشان می‌دهد. اما، در نمونه ۱۶ با قرار دادن یک لایه آلومینیم مدول برشی - پیچشی تا حدود ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

نمونه‌های ۲، ۱ و ۱۳-۶ که از ماتریس خالص، GRP و GLALL تشکیل شده‌اند تحت آزمایش ارتعاش عرضی قرار گرفته‌اند. مقادیر فرکانس طبیعی عرضی نظری (f_{nt}) و تجربی (f_{ne}) بدست آمده در جدول ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دوباره با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیم در کامپوزیت GRP، فرکانس طبیعی عرضی افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس طبیعی، مد ارتعاشی سازه نیز در فرکانسهای بالا رخ می‌دهد و در نتیجه سازه علاوه براینکه چقرمگی مناسب و انعطاف‌پذیری خوبی دارد، از نظر ارتعاشی نیز مناسب است. مثلاً، در نمونه‌های ۶، ۸ و ۱۰ با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیم در کامپوزیتی که دارای چهار لایه CSM است، به ترتیب فرکانس طبیعی عرضی حدود ۵۰ و ۸۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، در نمونه‌های ۲، ۱۲ و ۱۳ با جایگزینی لایه CSM به وسیله آلومینیم، مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی نمونه‌های ۲ و ۱۳ به ترتیب ۵۰ و ۷۵ درصد افزایش می‌یابد. با مقایسه نمونه‌های ۹ و ۱۰ که دارای شش لایه‌اند و در کنار لایه‌های CSM در یکی لایه‌های WR و در دیگری لایه‌های آلومینیم قرار گرفته است، اثر وجود آلومینیم بخوبی مشاهده می‌شود. فرکانس طبیعی نمونه ۱۰ نسبت به نمونه ۹، ۵۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

از مواد کامپوزیتی هیبریدی GLALL که از ترکیب رزین پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه سوزنی و حصیری با ورقهای آلومینیم ساخته شده‌اند می‌توان به عنوان دسته جدیدی از مواد کامپوزیت نام برد که

جدول ۸- نتایج حاصل از آزمون ارتعاش پیچشی نمونه‌های لوله‌ای.

کد نمونه	کسر حجمی	زمان تناوب (s)	فرکانس پیچشی (rad/s)	مدول پیچشی (N.m)	مدول برشی - پیچشی (MPa)
۱۴	۰/۲۳	۰/۴۶	۱۳/۲۶	۴۲/۱۶	۱۳۳/۷
۱۵	۰/۲۵	۰/۶۳	۹/۹۷	۳۲/۴۸	۲۴۹/۱
۱۶	۰/۴۰۳	۰/۲۷	۲۳/۲۷	۱۲۲/۳	۳۸۸/۲

جدول ۹- نتایج حاصل از آزمون ارتعاش عرضی نمونه‌های تخت.

کد نمونه	صلبیت خمشی $(N.m^2)^{1/2}$	f_{nt} (RPM)	f_{ne} (RPM)
۱	۰/۵۸۳	۱۱۲/۳	۱۲۰
۲	۰/۸۳۸	۱۶۲/۳	۱۷۰
۶	۰/۹۱۳	۱۷۶/۶	۱۹۰
۷	۰/۸۴۴	۱۶۳/۶	۱۷۵
۸	۱/۴۰۲	۲۷۱/۴	۲۸۵
۹	۱/۱۹۵	۲۳۱/۸	۲۴۰
۱۰	۱/۶۶	۳۲۱/۸	۳۵۰
۱۱	۰/۷۸۶	۱۵۲/۲	۱۶۰
۱۲	۱/۲۱۹	۲۳۳/۶	۲۵۰
۱۳	۱/۵۰۵	۲۹۱/۳	۳۰۰

در صنایع سازه‌ای، اتومبیل‌سازی، هواپیمایی و شرایطی که چقرمگی و ضربه‌پذیری در کنار استحکام زیاد و وزن کم لازم است مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش، این نوع مواد تهیه و ساخته شده‌اند و خصوصیات و رفتار مکانیکی آنها از نظر کشش، ضربه و ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته و از آزمایشهای انجام شده نتایج زیر بدست آمده است:

۱- افزایش یک لایه آلومینیم، یعنی افزایش ۳۶ درصد کسر حجمی نسبت به نمونه کامپوزیت الیافی بدون آلومینیم، باعث افزایش ۶۰درصد در استحکام در نقطه تسلیم و ۱۳۰ درصد در چقرمگی می‌شود و این مقدار بطور متناسب با افزایش مقدار آلومینیم افزایش می‌یابد.

۲- اثر آلومینیم در چقرمگی و همچنین استحکام در نقطه تسلیم کامپوزیت هیبریدی بمراتب بیشتر از استحکام در نقطه شکست و سفتی آن است.

۳- میزان انرژی جذب شده بر اثر ضربه کامپوزیت هیبریدی GLALL بمراتب بهتر از مواد کامپوزیت الیافی و ماتریس خالص است. این امر به واسطه استحکام در نقطه تسلیم و چقرمگی زیاد و در نتیجه بزرگ بودن سطح زیر منحنی نمودار تنش - کرنش است.

۴- تغییرات فرکانس طبیعی و مدول برشی - پیچشی نسبت به دما برای کامپوزیتهای تقویت شده با آلومینیم بمراتب کمتر از کامپوزیتهای الیافی بدون آلومینیم است. همچنین، تغییرات ایجاد شده بطور یکنواخت است.

۵- در نمونه‌های لوله‌ای با قرار دادن لایه آلومینیم در کامپوزیت پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه مدول برشی - پیچشی تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

۶- با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیم، فرکانس طبیعی عرضی مواد افزایش می‌یابد.

۷- در نهایت می‌توان کامپوزیتهای هیبریدی پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه و آلومینیم ساخت که علاوه بر قیمت بسیار پایین، وزن کم، استحکام نسبتاً زیاد و شکل‌پذیری مناسبی نیز داشته باشند، یعنی دارای چقرمگی مناسب بوده و در برابر خسارات وارده تحمل زیادی نشان دهند.

مراجع

1. Jones R.M.; *Mechanics of Composite Materials*; 2nd ed., Taylor & Francis, USA, 1999.
2. Matthews F. L., Rawlings R. D.; *Composite Materials: Engineering & Science*; Woodhead Ltd, Cambridge, England, 1999.
3. Agarwal B. and Broutman L. J.; *Analysis and Performance of Fiber Composities*; Wiley Interscince, New York, 1980.
4. Hancox N. L.;*Fiber Composite Hybrid Materials*; Applied Science, London, 1981.
5. Frazier W. E., Donnellan M.E., Architetto P. et al., The Status of HYMAT's - A New Category of Hybrid Materials; *J. Met.*; **43**, 5, 10-15, 1991.
6. Komarneni S., Nanocomposites; *J. Mater. Chem.*; **2**, 12, 1219-30, 1992.
7. Bose A., Lankford J., MIMLC's: New Composite Architecture; *Adv. Mater. Process*, **140**, 1, 18-22, 1991.
8. Hunt M., Star Wars Materials Launch Commercial products; *Mach. Des.*, **26**, 52-58, March 1993.
9. Laliberte J.F., Poon C., Straznicky P.V., Application of Fiber Metal Laminates; *J. Polym. Compos.*; **21**, 4, 558-67, 2000.
10. Koshorst J., New Material Brings Design Revolution, *Airbus Industrie Forum*; 4, 1996.
11. khalili M. R. et al., Characteristiees and Behaviour of GLALL Polymer Composite; 5th International Conference of Mechanical Engineering, Guilan University, Iran, 2001.
12. hashagen F., Borst R. de, Vries T. J., Delamination Behaviour of Spliced Fiber Metal Laminates, (part 2) Numerical Investigation; *Compos. Struct.*; **46**, 2, 147-62,

1999.

13. Birch S., New Materials for Airbus A3XX; *Aerospace Eng.*; **18**, 1, 11, 1998.
14. Vries T. J., Vlot A., Hinhagen F., Delamination Behaviour of Spliced Fiber Metal Laminates (Part 1): Experimental Results; *Compos. Struct.*; **46**, 2, 131-45, 1999.
15. Nine Layer Composites Is Behind Plans for 800 Seater Air Liner, News Brief; *High Performance Plastics*; 6, 1999.
16. Sidelnikov V. V. et al., Impact Behavior of SIAl Laminates; *Mater. Science Forum*, **331 - 337** (part 2) 190, 1221-24, 2000.
17. Mckenna J. T., Sparaco p., Operators Push for Cuts In Cost of Composites use; *Aviation Week & Space Tech.*; **149**, 10, 123-5, 1998.
18. Vogelesang L. B., Vlot A., Development of Fiber Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures; *J. Mater. Process. Tech.*; **103**, 1, 1-5, 2000.
19. Fridyandet J. N. et al.; *The Structure & Properties of GLARE Laminates*; ICAA-6, Japan, 1998.
20. Itharbore R. P., Design of the Wing of a Regional Air Liner in Composite Materials, Technische Hogeschool Delft Dept of Aerospace Eng., Report M864, 194, 1999.
21. Ekroon A., Rocca G. La, Impact Response of Fiber Metal Laminates; *key Eng. Mater.*; **141-143**, 1, 235-76, 1998.
22. Carlsson L. A. and Pipes R. B.; *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*; Technomic, Lancaster, 1997.
23. Weston J. W., Peters D. M., Thomas K. L.; *Engineering Guide to Composite Materials*; ASM, Ohio, 1987.
24. Experiments in Vibration Using the Universal Vibration Apparatus, Report TM16, TECQUIPMENT, Nottingham, 1989.