



## بررسی تجربی خواص ضربه ثقلی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف

محسن میرزایی سیسان<sup>۱</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۴/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲

### چکیده

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز، موادی هستند که از ترکیب آلیاژها و کامپوزیت‌های پلیمری ساخته می‌شوند؛ در نتیجه مزیت‌های هرکدام از این دو ماده در ماده جدید نیز وجود دارد و با هم ترکیب می‌شوند. در این پژوهش، چهار نوع کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز، به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند و اثر تغییر نوع الیاف و چیدمان لایه‌ها روی مقاومت به ضربه آن‌ها با آزمایش ضربه ثقلی بررسی شد. کامپوزیت‌های لایه‌ای ساخته شده، شامل دو ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ به عنوان لایه‌های رویی و زیری بود که در دو نوع آنها دو لایه رزین اپوکسی تقویت شده با پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف آرامید و در دو نوع دیگر، دو لایه رزین اپوکسی تقویت شده با پارچه الیاف شیشه و پارچه الیاف آرامید در بین ورق‌های آلومینیم قرار داده شدند. نتایج نشان داد که بهترین خواص ضربه در میان انواع کامپوزیت‌های الیاف-فلز مورد بررسی، مربوط به نوعی است که از لایه‌های ورق آلومینیوم/رزین اپوکسی-پارچه الیاف آرامید/رزین اپوکسی-پارچه الیاف شیشه/ورق آلومینیوم تشکیل شده است. همچنین این نوع کامپوزیت، کمترین میزان تخریب و کمترین تغییر شکل مرکزی را نیز نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** آلومینیوم ۲۰۲۴؛ کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز؛ کربن؛ الیاف آرامید؛ الیاف شیشه؛ ضربه ثقلی.

## Experimental Study of Drop Weight Impact Properties of Composite Laminates Aluminum/Epoxy Resin with Fibers Reinforcement

M. Mirzaee Sisan<sup>1</sup>, and R. Eslami-Farsani<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

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

### Abstract

Fiber-metal laminates (FMLs) consist of metal alloys and polymer composites. The beneficial characteristics of both the metals and composites are thus contained in FMLs. In this work, four sets of FMLs are fabricated by a hand lay-up method, and the resistance impact induced by the drop-weight instrument on different lay-up configurations is studied. In all sets, the top and bottom layers are the aluminium 2024-T3 sheets. Between the top and bottom aluminium sheets, there are two composite layers. In two sets, there are epoxy resins reinforced with carbon and aramid fibers fabrics. In the other two sets, the composite layers are epoxy resins reinforced with glass and aramid fibers fabrics. The results obtained show that the best resistance impact is related to FMLs consisting of aluminum sheet/epoxy resin-aramid fibers fabric/epoxy resin-glass fibers fabric/aluminum sheet, and it has the lowest damage impact and lowest permanent central deflection.

**Keywords:** Aluminum 2024; Carbon Fibers; Aramid Fibers; Glass Fibers; Drop Weight Impact.

## ۱- مقدمه

سازه‌های مورد استفاده در بدنه هواپیماها، عمدتاً از آلیاژهای آلومینیوم نظیر، آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ هستند که توسط پرچ بهم متصل شده‌اند. از آنجا که پیش‌بینی می‌شود ترافیک هوایی افزایش چشمگیری پیدا کرده، تعداد مسافران افزایش زیادی یابند، نیاز به فناوری که تحمل پذیرش این تعداد مسافر را داشته باشد، به خوبی مشخص است [۱ و ۲].

در ایجاد این فناوری، کاستن از هزینه‌های پرواز و هزینه‌های تولید و کاستن از وزن سازه، مهمترین پارامتر به حساب می‌آید. کامپوزیت‌ها با وجود داشتن مزایای متعددی چون وزن کم، استحکام ویژه و سفتی ویژه بالا، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، معایبی نیز دارند که سبب عدم استفاده عمده از آن‌ها در سازه‌های اصلی شده است که از جمله این معایب، می‌توان به چقرمگی کم آن‌ها و همچنین مقاومت کم در برابر بارهای ضربه ای اشاره کرد [۱ و ۳].

همه این عوامل، باعث ایجاد دسته جدیدی از مواد به نام کامپوزیت لایه‌ای الیاف فلز (FML) شد که از کنار هم قرار دادن لایه‌های نازک آلیاژها از قبیل، آلومینیوم، فولاد، تیتانیوم و منیزیم با لایه نازک کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت شده با الیاف (با ضخامت در حدود ۰.۵-۰.۲ میلی‌متر برای هر لایه) ساخته می‌شوند. FMLs همزمان خواص خوب فلزات از جمله، چقرمگی و مقاومت خوب در برابر آسیب ضربه را با مقاومت خوب کامپوزیت‌ها در برابر خستگی و خوردگی ترکیب می‌کنند و سازه ای ایجاد می‌کنند که علاوه بر وزن کم، تمامی مشخصات لازم برای کاربرد در بدنه و سازه‌های اصلی هواپیما را دارا است [۲ و ۴].

در سال ۱۹۸۲، اولین محصول از FML با نام تجاری<sup>۱</sup> ARALL توسط ALCOA به بازار عرضه شد [۳ و ۵]. این نوع FML با صفحات نازک آلومینیوم همراه با الیاف آرامید داخل زمینه اپوکسی یا انواع دیگر زمینه ساخته می‌شود [۶]. یکی از معایب الیاف آرامید، مقاومت اندک آنها در مقابل بارهای فشاری است. ARALL، دارای استحکام کم، اما سفتی بسیار بالایی بوده، مقاومت آن در برابر خستگی

بسیار خوب است. به علت چگالی کم الیاف آرامید، ARALL سبک ترین نوع FML بشمار می‌آید [۵].

در سال ۱۹۸۷، نسل دوم FML با نام GLARE<sup>۲</sup>، به بازار عرضه شد که تا به امروز ارزان ترین و رایج ترین نوع FMI به شمار می‌آید. GLARE، معمولاً استحکام بسیار خوب بخصوص در راستای الیاف دارد، اما سفتی آن‌ها کمی از آلومینیوم کمتر است. GLARE، علاوه بر خواص خوب در برابر خستگی، دارای استحکام ضربه، استحکام پسماند و مقاومت در برابر شعله و خوردگی بسیار خوبی است [۵ و ۳].

نوع دیگری از FML، CARALL<sup>۳</sup> است که از لایه‌های متناوب الیاف کربن و ورق آلومینیوم تشکیل شده است. در واقع این نوع از FML، به منظور بهبود خواص ARALL ایجاد شد [۵].

به علت وجود مزایای مختلف در کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف فلز این مواد بطور گسترده در صنایع هوافضا، مورد استفاده قرار می‌گیرند. کامپوزیت‌های FML برای اولین بار به طور گسترده در هواپیمای Airbus A300، مورد استفاده قرار گرفتند و پس از آن، ARALL در ساختن پوسته بال هواپیمای فوکر ۲۸ و در محفظه بار بویینگ C17 بکار گرفته شد. همچنین از GLARE برای ساختن پوشش کف اتاق محموله‌ها استفاده شد که باید در برابر ضربه مقاوم باشند [۱ و ۲].

خواص مکانیکی FML در بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز علمی پژوهشی بررسی شده است. آزمون‌های کشش، فشار، برش و ضربه اصلی‌ترین آزمون‌های مورد استفاده برای مشخص کردن خواص مکانیکی این نوع از مواد هستند [۷]. Vlot و همکاران [۸ و ۷ و ۲] رفتار آلومینیوم، کامپوزیت‌های الیاف شیشه و رزین اپوکسی، الیاف کربن و رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های چند لایه GLARE، ARALL و CARALL را زیر بارگذاری‌های کششی، فشاری و ضربه بررسی کردند. نتایج نشان داد، انرژی لازم برای ایجاد اولین ترک در کامپوزیت‌های الیافی و همچنین CARALL

<sup>3</sup> Glass Reinforced Aluminum Laminate

<sup>4</sup> Carbon Reinforced Aluminum Laminate

<sup>1</sup> Fiber Metal Laminates

<sup>2</sup> Aramid Reinforced Aluminum Laminate

آرامید ساخت شرکت Colan (مطابق با مشخصات جدول ۱)، برای انواع FMLs استفاده شد.

تمام نمونه‌های FMLs به صورت ۴ لایه و با روش لایه‌گذاری دستی<sup>۱</sup> ایجاد شدند. در جدول ۲، نحوه چیدمان لایه‌های فلز و کامپوزیت در انواع FMLs ساخته شده، آمده است. برای تهیه FML، ابتدا سطوح ورق‌های آلومینیوم با چربی زدایی اولیه، ایجاد خراش به وسیله سمباده نرم و سپس پاک کردن با حلال استون آماده سازی شدند. استفاده از روش‌های آماده‌سازی سطح قدرت، اتصال بین لایه فلز و رزین را به شدت افزایش می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات پارچه‌های استفاده شده

نوع پارچه	الیاف شیشه	الیاف آرامید	الیاف کربن
نوع بافت	ساده <sup>۲</sup>	ساده	ساده
دانسیته سطحی (g/cm <sup>2</sup> )	۵۸۸	۷۵	۲۰۰
ضخامت (mm)	۰/۳	۰/۳	۰/۲۳
نام تجاری	AR111	AK502	T300

جدول ۲ نحوه لایه چینی لایه‌های فلز و کامپوزیت در انواع FMLs ساخته شده

کد کامپوزیت*	نحوه چیدمان
FML-CA	ورق آلومینیوم/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف کربن/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف آرامید/ ورق آلومینیوم
FML-AC	ورق آلومینیوم/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف آرامید/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف کربن/ ورق آلومینیوم
FML-AG	ورق آلومینیوم/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف آرامید/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف شیشه/ ورق آلومینیوم
FML-GA	ورق آلومینیوم/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف شیشه/ رزین اپوکسی- پارچه الیاف آرامید/ ورق آلومینیوم

\* A: پارچه الیاف آرامید، C: پارچه الیاف کربن، G: پارچه الیاف شیشه

برای بررسی خواص ضربه انواع FMLs ساخته شده، از دستگاه ضربه ثقلی (ضربه افتان) آزمایشگاه موسسه کامپوزیت ایران واقع در دانشگاه علم و صنعت (شکل ۱) استفاده شد. تمام آزمون‌ها براساس استاندارد ASTM D 7136 انجام پذیرفت [۱۲]. برای اعمال ضربه از گلوله فولادی با

و ARALL به مراتب از انرژی مورد نیاز در آلومینیوم و GLARE کمتر است.

Cantwell و Abdullah [۹]، کامپوزیت‌های متشکل از ورق آلومینیوم، الیاف شیشه و رزین پلی پروپیلن را تحت ضربه با سرعت بالا بررسی کردند. نتایج، بیانگر این مطلب بود که مقاومت به سوراخ شدگی و انرژی لازم برای عبور ضربه زننده از داخل FML چند برابر ورق آلومینیوم است.

Naik و همکاران [۱۰]، به بررسی رفتار ضربه‌ای و خصوصیات پس از ضربه کامپوزیت الیاف شیشه/ الیاف کربن/اپوکسی با لایه چینی‌های مختلف پرداختند. آن‌ها نشان دادند که کامپوزیت هیبریدی که در آن کربن در خارج و شیشه داخل قرار دارد، دارای بهترین مقاومت فشاری است؛ بنابراین با این چیدمان، ناحیه آسیب و اندازه ترک نسبت به بقیه کمتر است.

Hufenbach و همکاران [۱۱]، آزمایش‌هایی را برای شناسایی پارامترهای کلیدی موثر در مقاومت به ضربه در کامپوزیت‌ها انجام دادند. آن‌ها دریافتند که افزودن ورقه‌های فلزی، مقاومت کامپوزیت‌ها به خسارت را افزایش می‌دهد. همچنین استحکام و سفتی باقی مانده با چیدمان  $\pm 45^\circ$  درجه در مقایسه با صفر درجه بهتر و بیشتر حاصل می‌شود.

در این پژوهش، هدف اصلی بررسی اثر لایه چینی‌های مختلف برای انواع FMLs تحت ضربه است. بدین منظور، لایه‌های ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ به همراه کامپوزیت‌های رزین اپوکسی تقویت شده با پارچه‌های الیاف شیشه، الیاف کربن و الیاف آرامید مورد استفاده قرار گرفتند. برای بررسی میزان آسیب و تاثیر تغییر الیاف در FMLs از نمودار نیرو- زمان، تصاویر جلو و پشت ناحیه آسیب دیده و همچنین سطح مقطع ناحیه ضربه دیده استفاده شد که مساحت ناحیه آسیب نیز، توسط نرم افزار Matlab با استفاده از تعیین شرایط مرزی ناحیه آسیب برای نرم افزار و تخمین آن بر حسب میلی‌متر محاسبه شد.

## ۲- مواد اولیه و روش آزمایش

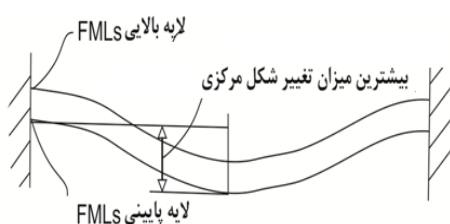
در این تحقیق از ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت ۰.۲ میلی متر و رزین اپوکسی ۵۲۲۵ با هاردنر ۵۲۲۵ ساخت شرکت Bitex به همراه ۳ نوع پارچه الیاف شیشه، کربن و

<sup>1</sup> Hand Lay-Up

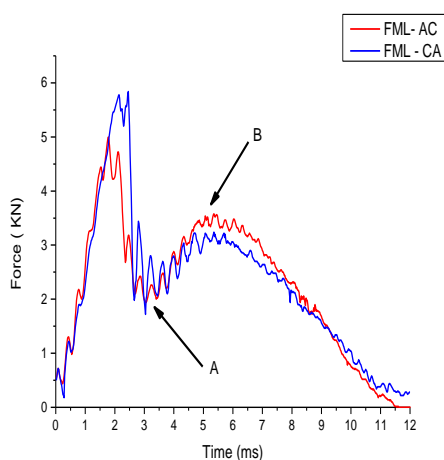
<sup>2</sup> Plain



شکل ۱- دستگاه آزمون ضربه ثقلی



شکل ۲- نحوه محاسبه بیشترین میزان تغییر شکل مرکزی



شکل ۳- نمودار نیرو برحسب زمان در کامپوزیت‌های لایه‌ای FML-AC و FML-CA

میزان مقاومت باقی مانده ضربه در انواع FML است که رفتار هر دو نمودار در این قسمت تقریباً یکسان است.

شکل ۴، تصاویر هندسه تخریب در جلو و پشت قسمت ضربه دیده در نمونه‌های FML-CA و FML-AC و شکل ۵، سطح مقطع ضربه برش داده شده این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، مودهای خسارت از جمله

جرم ۹.۵ کیلوگرم استفاده شد که نوک آن به شکل نیمه کروی با قطر ۱ سانتیمتر است و از ارتفاع ۴۷ سانتی متری با سرعت ۳ متر بر ثانیه به سمت نمونه مربعی شکل با ابعاد ۸×۸ سانتی متر سقوط می‌کند.

برای محاسبه مساحت ناحیه آسیب، از کد نوشته شده در نرم افزار Matlab استفاده شد. ورودی کد نوشته شده در جعبه ابزار پردازش تصویر، تصاویر گرفته شده از قطعه مورد نظر است. با مشخص کردن یک سری نقاط مرزی ناحیه آسیب، کد نوشته شده اقدام به عبور دادن یک چند وجهی و یک دایره از نقاط انتخاب شده می‌کند. در مرحله بعد کد نوشته شده، مساحت چند وجهی و همچنین دایره را به صورت پیکسل به پیکسل محاسبه می‌کند. در مرحله آخر با داشتن نسبت تبدیل هر پیکسل به میلی متر و ضرب این نسبت، مقدار مساحت ناحیه آسیب برحسب میلی متر مربع حاصل می‌شود.

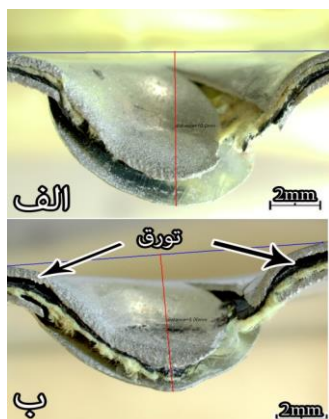
برای محاسبه بیشترین میزان تغییر شکل مرکزی در نمونه های FMLs نیز، نرم افزار Matlab مورد استفاده قرار گرفت. میزان اختلاف ارتفاع بین لایه رویی FML و لایه پایینی آن نشان دهنده، میزان تغییر شکل مرکزی در FMLs است. نحوه این محاسبه به صورت شماتیک در شکل ۲ مشخص شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقایسه کامپوزیت‌های FML-AC و FML-CA

شکل ۳، رفتار نمودار نیرو- زمان حاصل از آزمون ضربه ثقلی را برای نمونه های FML-AC و FML-CA در ۴۳ ژول انرژی نشان می‌دهد. نمودارها یک رفتار شبیه به هم را تا رسیدن به نقطه ماکزیمم از خود نشان می‌دهند. بیشترین نیروی اعمالی برای کامپوزیت FML-CA، ۵۸۴۰ نیوتن است که در مقایسه با ۵۰۰۰ نیوتن ماکزیمم نیرو برای FML-AC، در حدود ۸۴۰ نیوتن بیشتر از FML-AC است. این بدین معناست که FML-CA نیروی بیشتری را تا رسیدن به نقطه ماکزیمم احتیاج دارد، در حالی که میزان این نیرو برای FML-AC کمتر است.

بعد از نقطه ماکزیمم، نمودارها سیر نزولی به خود می‌گیرند تا نقطه A و پس از آن مجدداً افزایش می‌یابند تا رسیدن به نقطه B که این قسمت از نمودار (AB)، بیانگر



شکل ۵- سطح مقطع ناحیه شکست نمونه‌های FMLs:  
الف) FML-AC و ب) FML-CA

نسبت به FML-AC از خود نشان می‌دهد؛ اما در FML-CA، تورق دیده می‌شود.

### ۲-۳- مقایسه کامپوزیت های FML-GA و FML-AG

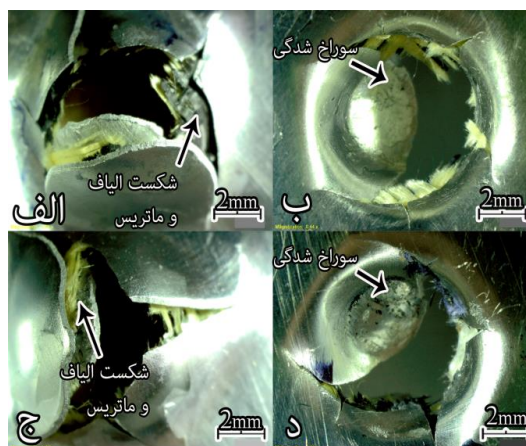
شکل ۶، نمودارهای نیرو- زمان حاصل از آزمون ضربه ثقلی را برای نمونه‌های FML-GA و FML-AG در ۴۳ ژول انرژی نشان می‌دهد. در این نمودارها تا رسیدن به نقطه پیک، رفتار هر دو کامپوزیت تقریباً شبیه به یکدیگر است.

بیشترین نیروی اعمالی برای FML-AG، ۶۴۰۰ نیوتن و برای FML-GA، ۶۲۰۰ نیوتن است که در این حالت، اختلافی به میزان ۲۰۰ نیوتن در میزان ماکزیمم نیروی اعمالی مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان در ضربه پذیری بهتر الیاف آرامید، نسبت به الیاف شیشه جستجو کرد. پس از نقطه پیک، افتی در نمودارها دیده می‌شود و پس از آن در محدوده نقاط A تا B نمودارها مجدداً سیر صعودی به خود می‌گیرند که این رفتار برای هر دو FMLs تقریباً یکسان است.

شکل ۷، تخریب در جلو و پشت نمونه‌های FML-AG و FML-GA را نشان می‌دهد. در هر دو، شکست زمینه و الیاف و نفوذ دیده شده، اما در هیچکدام اثری از تورق مشاهده نمی‌شود. این پدیده می‌تواند بخاطر پایین‌تر بودن میزان مدول این دو الیاف، نسبت به الیاف کربن باشد که باعث ضربه پذیری بهتر الیاف شیشه و آرامید می‌شود. لذا می‌توان گفت، این دو نوع الیاف از قابلیت توزیع مناسبی از انرژی ضربه در سطح FMLs برخوردارند.

شکست الیاف، شکست ماتریس و سوراخ شدن در هر دو نوع FML مشاهده می‌شود.

تورق<sup>۱</sup> بین لایه کربن و آلومینیوم در FML-CA رخ می‌دهد؛ در حالی که هیچ گونه تورقی در FML-AC دیده نمی‌شود (شکل ۵). این بدین معناست که الیاف آرامید می‌توانند نیروی ضربه را در کل سطح نمونه پخش کنند، در حالی که الیاف کربن نمی‌توانند نیرو را در سطح پخش کنند و بیشترین نیروی وارده به این نمونه، در یک نقطه متمرکز می‌شود و همچنین بخاطر مدول بالاتر الیاف کربن نسبت به آرامید است که هر قدر مدول بالاتر باشد، انعطاف پذیری کمتر بوده، تنش‌های بین لایه‌ای افزایش خواهند یافت که این خود دلیلی بر ایجاد تورق در نمونه است.



شکل ۶- ناحیه خسارت دیده در نمونه‌های FMLs، الف و ب) جلو و پشت FML-AC، ج و د) جلو و پشت FML-CA

میزان ناحیه تخریب در پشت نمونه برای FML-AC، ۲۳۵ میلی مترمربع است، در حالی که برای FML-CA، ۲۲۳ میلی مترمربع است. از طرفی، میزان بیشترین تغییر شکل مرکزی در FML-CA، ۹۰۶ میلی متر و در FML-AC، ۱۰۲ میلی متر است (شکل ۵).

در مجموع نتایج نشان می‌دهند که FML-CA، نیروی بیشتری را تا رسیدن به نقطه ماکزیمم تحمل می‌کند و همچنین FML-CA خسارت ناشی از ضربه ثقلی کمتری

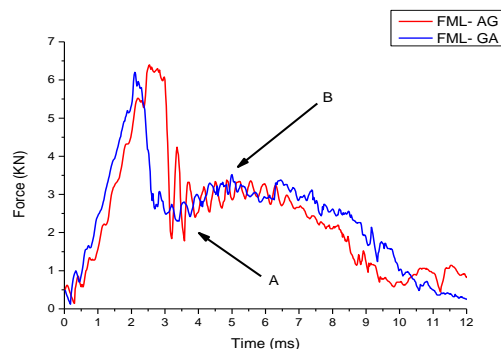
<sup>۱</sup> Delamination

در مجموع و براساس نتایج آزمون‌ها می‌توان گفت که عملکرد FML-AG، بهتر از FML-GA در برابر ضربه ثقلی بوده، میزان خسارت و تخریب در این FMLs کمتر است.

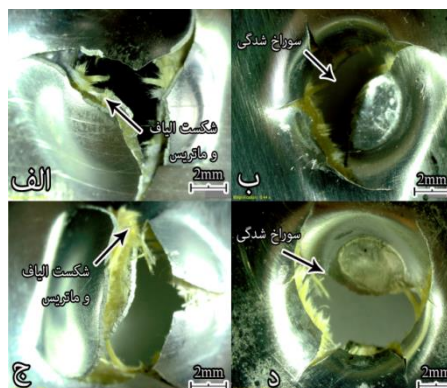
### ۳-۴- مقایسه انواع FMLs

شکل ۹، مقایسه‌ای بین نمودار نیرو برحسب زمان برای انواع FMLs مورد بررسی را نشان می‌دهد. FML-AG، بیشترین نیرو را تا رسیدن به نقطه ماکزیمم در برابر ضربه ثقلی تحمل می‌کند که این ویژگی بخاطر وجود الیاف شیشه و آرامید است که هر دو خواص مناسبی در برابر ضربه از خود نشان می‌دهند و دارای جذب بالای انرژی ضربه هستند. ماکزیمم نیرو برای FML-AG، ۶۴۰۰ نیوتن است. نتایج طاهری [۱۳] و تهرانی [۱۴] نیز، بیانگر عملکرد بهتر الیاف شیشه در ضربه با سرعت پایین نسبت به سایر الیاف می‌باشد.

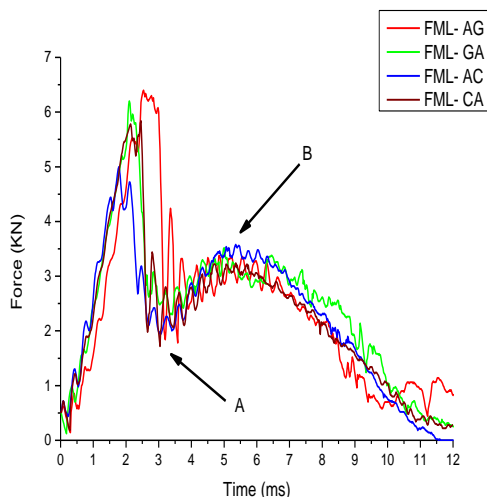
شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مساحت ناحیه آسیب دیده را در جلو و پشت انواع FMLs و شکل (۱۲)، میزان تغییر شکل مرکزی را برای آنها نشان می‌دهند. با بررسی شکل‌های ناحیه تخریب شده در جلو و پشت نمونه می‌توان گفت که کمترین خسارت در جلوی ناحیه ضربه دیده در FML، مربوط به FML-AG است، در حالی که بیشترین خسارت در پشت نمونه‌ها در FML-GA دیده می‌شود. از سوی دیگر و براساس شکل ۱۲، کمترین میزان تغییر شکل مرکزی مربوط به FML-AG است.



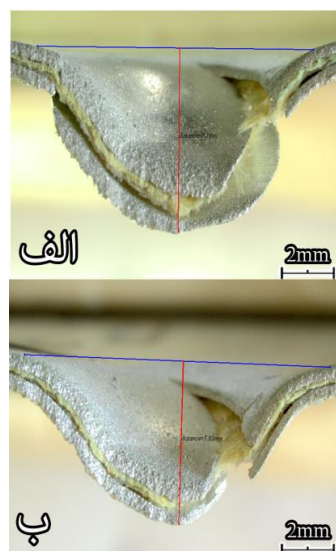
شکل ۶- نمودار نیرو برحسب زمان در کامپوزیت‌های لایه‌ای FML-AG و FML-GA



شکل ۷- ناحیه خسارت دیده در نمونه‌های FMLs، الف و ب) جلو و پشت FML-AG، ج و د) جلو و پشت FML-GA



شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو-زمان برای انواع FMLs



شکل ۸- سطح مقطع ناحیه شکست نمونه‌های FMLs: الف) FML-GA و ب) FML-AG



لایه‌های بالایی در تحقیق فعلی بجای الیاف کربن، الیاف کولار انتخاب شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز در برابر بارهای ضربه‌ای بررسی شد. بدین منظور، چهار نمونه کامپوزیتی از لایه‌های متناوب ورق‌های آلومینیوم T۳-۲۴ و رزین اپوکسی تقویت شده با پارچه الیاف شیشه، پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف آرامید استفاده شد. نتایج نهایی به شرح زیر است:

- FML-CA در مقایسه با FML-AC، مقاومت به ضربه بالاتری را تحت ضربه ثقلی از خود نشان می‌دهد.

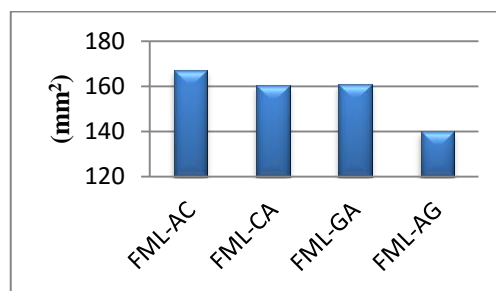
- در نمونه FML-CA، بین لایه کربن و آلومینیوم تورق مشاهده شد که این مطلب، نشانگر عملکرد ضعیف کربن در توزیع نیرو در سطح نمونه و مدول بالاتر الیاف کربن نسبت به آرامید و شیشه است. چون هر چه مدول بالاتر باشد، انعطاف پذیری کمتر است و تنش‌های بین لایه‌ای افزایش خواهند یافت که ایجاد تورق می‌کنند.

- بهترین عملکرد و مقاومت در برابر ضربه در میان انواع FMLs مورد بررسی در FML-AG دیده شد که این خود بیانگر این مطلب است که الیاف آرامید، خواص ضربه پذیری بسیار خوبی دارند و بیشتر نیروی اعمالی را در سطح توزیع می‌کنند.

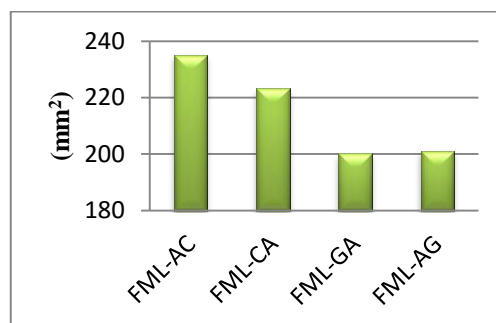
- دلیل بهترین عملکرد در برابر ضربه ثقلی در کامپوزیت الیاف-فلز FML-AG و همچنین دلیل نبود هیچگونه تورقی در این کامپوزیت، به نظر می‌رسد که می‌توان امکان استفاده از این کامپوزیت در بدنه هواپیماها و مصارف دیگر هوافضا را بررسی کرد.

#### ۵- مراجع

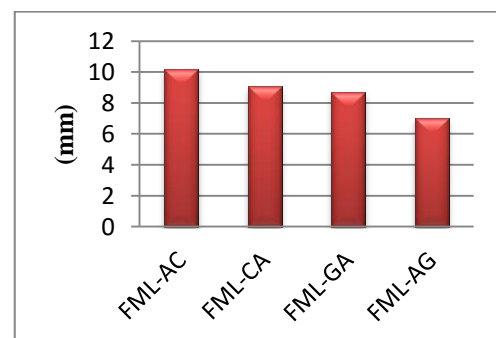
- [1] Vlot A, Vogesang LB, Vries TJ (1999) Toward application of fiber metal laminates in large aircraft. In GLARE conference, Delft university, Netherlands, 558- 570.
- [2] A Vlot (1993) Low velocity impact loading on fiber reinforced aluminium laminates (Arall and Glare) and other aircraft sheet materials. Delft Univ of Technology, Rept. LR-718, Delft, The Netherlands.
- [3] Sadighi M, Alderlisten RC, Benedictus R (2012) Impact resistance of Fiber-Metal laminates: A review. Int J Impact Eng 1-52.



شکل ۱۰- مساحت ناحیه آسیب دیده در جلوی انواع FMLs



شکل ۱۱- مساحت ناحیه آسیب دیده در پشت انواع FMLs



شکل ۱۲- میزان تغییر شکل مرکزی انواع FMLs

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که FML-AG که از لایه چینی پارچه الیاف آرامید در بالای FML و پارچه الیاف شیشه در پایین آن استفاده شده است، بهترین مقاومت به ضربه را در میان انواع FMLs ایجاد می‌کند. این نتایج با نتایج Naik و همکاران [۱۰] در خصوص بررسی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت هیبریدی رزین اپوکسی/الیاف شیشه/الیاف کربن با لایه چینی‌های مختلف مطابقت دارد. در نتایج آن‌ها نیز، بهترین مقاومت به ضربه با ناحیه آسیب کمتر در حالتی است که الیاف شیشه در پایین و الیاف کربن در بالا قرار گرفته است. لایه‌های پایینی در هر دو تحقیق الیاف شیشه بوده،

- tolerance characteristic of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates. *Compos Part B-Eng* 32(7): 565-574.
- [11] Hufenbach W, Ibraim FM, Langkamp A, Bohm R, Hornig A (2008) Charpy impact tests on composite structures-an experimental and numerical investigation. *Compos Sci Technol* 68: 2391-2400.
- [12] D7136M-07 Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. <http://www.astm.org/standards/D7136.htm>
- [13] Taheri- Behrooz F, Yahyapour I, Shokrieh MM (2014) Effect of stacking sequence on failure mode of fiber metal laminates under low velocity impact. *Iranian Polymer Journal* 23(2): 147-152.
- [14] Tehrani Dehkordi M, Nosraty H, Shokrieh MM (2013) Low velocity impact simulation of intraply hybrid composites reinforced with brittle and ductile fibers. *Esteghlal Journal, Computational Methods in Engineering* 32(1): 115-124. in Persian
- [4] Zhu S, Chai GB (2013) Low-velocity impact response of fiber-metal laminates-a theoretical approach. *P I Mech Eng L-J Mat* 228(4): 301-311.
- [5] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora MO, Coban O (2011) A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Mater Design* 32(7): 3671-3685.
- [6] Alderliesten R, Rans C, Benedictus R (2008) The applicability of magnesium based fiber metal laminates in aerospace structures. *Compos Sci Technol* 68(14): 2983-2993.
- [7] Vlot A, Vogelesang LB, Vries TJ (1999) Towards application of fiber metal laminates in large aircraft. *Aircr Eng Aerosp Tec* 71: 558-570.
- [8] Vlot A (1996) Impact loading on fiber metal laminates. *Int J Impact Eng* 18: 291-307.
- [9] Abdullah MR, Cantwell WJ (2006) The impact resistance of propylene- based fiber- metal laminates. *Compos Sci Technol* 66: 1682-1693.
- [10] Naik NK, Ramasimha R, Arya H, Prabhu SV, Shamara N (2001) Impact response and damage