



## بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی چند لایه های فلز - کامپوزیت تقویت شده با نانو سیلیکا

فرزاد گردانه<sup>۱\*</sup>، مهدی یارمحمدتوسکی<sup>۲</sup>

\*۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب، تهران (fa.gardaneh@gmail.com)

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب، تهران

۱۳۹۹-۳-۲۷: تاریخ پذیرش ۱۳۹۹-۳-۱۸: تاریخ دریافت

**چکیده:** چند لایه های فلز - کامپوزیت (FML) به دلیل دارا بودن مزایای مهمی از جمله استحکام بالا، وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و رطوبت، خواص خوب خستگی و غیره مورد توجه صنایع مختلف از جمله صنایع هوا و فضا قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر هدف آن است تا با اصلاح ساختار FML از طریق افزودن نانو در زمینه به بهبود خواص مکانیکی آنها کمک شود. بدین منظور درصد‌های وزنی های مختلف نانوسیلیکا (۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد نسبت به زمینه) از طریق روش‌های همزن مغناطیسی و آلتراسونیک در ساختار FML متشکل از آلومینیوم ۲۰۲۴ و الیاف هیبریدی و شیشه افزوده شد. رفتار مکانیکی نمونه‌های ساخته شده تحت آزمون نفوذ شبه استاتیکی با سببه سرکروی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های FML دارای نانو دارای مقاومت به شکست بهتری در مقایسه با نمونه شاهد (بدون افزودن فاز نانو) داشته و بیشترین میزان بهبود استحکام در ارتباط با نمونه ۰/۶ درصد وزنی نانو سیلیکا با الیاف شیشه و ۰/۳ درصد وزنی نانو سیلیکا با الیاف هیبریدی مشاهده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** چند لایه های فلز - کامپوزیت، آلومینیوم ۲۰۲۴، نانو سیلیکا، نفوذ شبه استاتیکی

### ۱. مقدمه

چند لایه های فلز - کامپوزیت یا Fiber Metal Laminate (FML) از لایه‌های فلز و مواد کامپوزیتی شامل الیاف تقویت کننده تشکیل شده‌اند [۱]. به عنوان یک ماده هیبرید سبک وزن، FML ها ترکیبی منحصر به فردی را از خود مانند خواص استاتیک خاص نشان می دهند و مقاومت بسیار عالی در برابر ضربه، همراه با مقاومت در برابر شکست و خستگی داشته که مورد توجه صنعت حمل و نقل قرار گرفته است [۲]. چند لایه‌های فلز - کامپوزیتی پس از جنگ جهانی دوم در ساخت تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار گرفت [۳]. اخیراً از FML ها، به طور گسترده در سازه‌های هواپیما مانند بدنه و بالها استفاده می‌شود [۴] بطوریکه از آن در هواپیمای Airbus A380 به دلیل بهبود در خستگی، مقاومت در برابر خوردگی، ضربه و سبک شدن وزن (تقریباً ۷۹۴ کیلوگرم) استفاده شده است [۵، ۶]. سازمان‌های دیگر مانند ناسا، بمباردیر و امبریر علاقه‌مند به جایگزینی آلومینیوم

در FML ها هستند. در طول چند سال گذشته، علم و تکنولوژی ساختارها و استفاده از کامپوزیت‌ها به سرعت در حال افزایش است و استفاده از چنین سازه‌هایی، در انواع تجهیزاتی که کاربردهای کلیدی و حساس نظیر ماهواره‌ها افزایش می‌یابد [۷].

بارگذاری شبه‌استاتیکی چند لایه‌های فلز - کامپوزیت یک روش مناسب برای تعیین رفتار اینگونه مواد، تحت یک دامنه وسیع از شرایط مختلف بارگذاری است. در چند سال گذشته، مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی متعددی در خصوص ویژگی عملکرد مکانیکی FML ها انجام شده است. ریز و کانتول [۸] به بررسی خواص مکانیکی (خواص شبه استاتیکی و ضربه) چندلایه‌های الیاف - فلز ساخته شده از کامپوزیت پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. آزمون‌های اولیه نشان داد که می‌توان با عملیات سطحی آلومینیوم و کوپلیمر پروپیلن (اصلاح شده انیدرید اسید مالیک) چسبندگی بسیار مناسبی را در بین لایه‌های آلومینیوم و صفحات کامپوزیتی ایجاد نمود. جیمز و همکارانش [۹] تلورانس تخریب آزمون‌های برش و خمش سه نقطه ای چند لایه الیاف- فلز گلار و لایه‌های آلومینیومی ALH19 که با نورد به یکدیگر متصل شده بودند را مورد بررسی قرار دادند.

دقیق و همکاران [۱۰] مقایسه‌ای بین رفتار خزشی کامپوزیت‌های الیاف فلز ساخته شده با الیاف بازالت و الیاف شیشه انجام دادند. بدین منظور نمونه‌های الیاف بازالت اپوکسی با لایه‌هایی از آلومینیوم و یا فولاد مورد ملاحظه قرار گرفت. آزمون خزش در دو دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی انجام گرفت. در مطالعه جامعی که بر روی رفتار مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های الیاف - فلز توسط صدیقی و همکارانش [۱۱] صورت گرفت، این نتیجه حاصل شد که استفاده از چند لایه‌های الیاف - فلز به عنوان پوسته بیرونی به جای استفاده از فلز یا کامپوزیت الیافی برای ساخت صفحات ساندویچی بهتر است و این گونه صفحات می‌توانند در ساخت سازه‌های مورد استفاده در صنایع هوایی نقش پررنگتری را ایفا کنند. در پژوهشی که توسط وسوماتی و همکارش [۱۲] انجام شد مقایسه‌ای بین رفتار مکانیکی چندلایه‌های تقویت شده با الیاف کربن با چندلایه تقویت شده با الیاف کربن و الیاف طبیعی کف هندی تحت آزمون‌های خمش، ضربه و کشش مورد ملاحظه قرار گرفت. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی این دو چندلایه نمونه تفاوت چندانی ندارد اما از آن جایی که استفاده از الیاف طبیعی سبب کاهش در هزینه ساخت می‌شود و از دیدگاه حفظ محیط زیست استفاده از این نوع الیاف ارزش بیشتری دارد، می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از آنها در ساخت چندلایه‌ها بهتر است. همچنین بیان این نکته بسیار ضروری است که منیزیم ۱/۵۵ برابر سبک‌تر از آلومینیوم بوده و بنابراین استفاده از آن سبب سبک‌تر شدن سازه‌های الیاف - فلز می‌شود. یعقوبی و همکارانش [۱۳] بر اساس آزمایش‌های خود در زمینه ضربه‌های کم سرعت به این نتیجه رسیدند که چند لایه‌های الیاف - فلز ۳/۲-۵ با لایه چینی شبه همسانگرد، از بهترین مقاومت در برابر ضربه برخوردار می‌باشند. به و همکارانش [۱۴] دریافتند که استحکام کششی با شیار نهایی در نمونه‌های چند لایه هیبریدی بور شیشه آلومینیوم که دارای ترک‌های بزرگتر بوده کاهش می‌یابد. این محققین ضمن اینکه تاثیر ابعاد ترکها و اجزای تشکیل دهنده بر رفتار مکانیکی چند لایه‌های الیاف فلز هیبریدی بور شیشه آلومینیوم را بطور آزمایشی بررسی نمودند دریافتند که ناحیه لایه لایه شدگی، در نمونه‌هایی که دارای قطر سوراخ (گشودگی) کوچکتری هستند بزرگتر است. صدیقی و داریوشی [۱۵] خواص کششی و خمشی سازه گلار و همینطور تاثیر جهت الیاف بر آنها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون آنها نشان می‌دهد که ورق‌های الیاف شیشه‌ای تک جهته در چند لایه‌ها، به میزان زیادی باعث بهبود خواص مکانیکی آنها می‌شود. اسفندیار و همکارانش [۱۶] در تحقیقی که با هدف پیش بینی پاسخ تنش- کرنش چندلایه‌های الیاف فلز گلار انجام شد رفتار کششی غیر خطی در چند لایه‌های گلار را در شرایط بارگذاری درون صفحه‌ای مورد تحلیل قرار دادند. ووه و همکارانش [۱۷] پاسخ کششی غیرخطی و رفتار شکست در چندلایه‌های الیاف فلز گلار ۴ و گلار ۵ (که در معرض بارگذاری درون صفحه ای قرار گرفته بودند) را از طریق مدل سازی تحلیلی و شبیه سازی عددی ارزیابی نمودند. این محققین نشان دادند که پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی، با نتایج آزمایشی حاصله در تنش‌های بالا اختلاف دارد. مکانیزم‌های پیچیده شکست

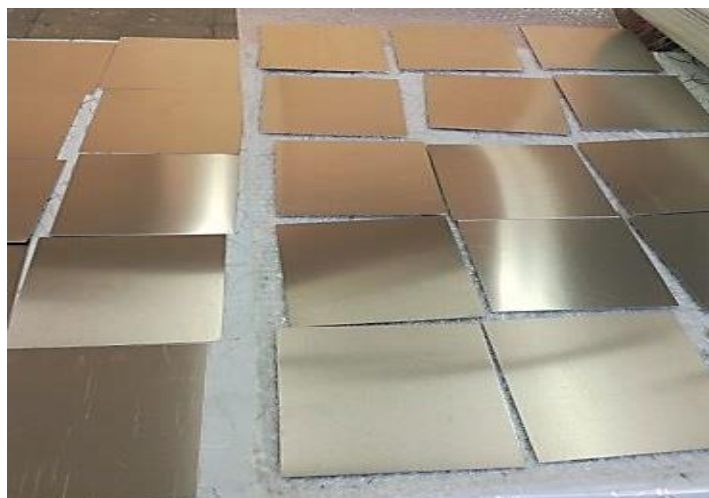
(که منجر به شکست نهایی چند لایه‌های الیاف فلز می‌شوند)، دلیل اصلی اختلاف موجود بین پیش بینی‌ها و نتایج آزمایشی قلمداد شده اند. لوکاک و همکارانش [۱۸] نشان دادند که چسبندگی بین ورق‌های آلومینیوم و پیش آغشته کامپوزیت الیاف، تاثیر زیادی بر خواص کششی و خمشی در چند لایه های فلزی تقویت شده با الیاف کربنی دارد. آنها در تحقیق خود، مشاهده نمودند که مقدار نسبی استحکام برشی بین لایه ای برای چند لایه‌هایی که دارای چسبندگی سطحی اندکی بودند به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. راج کومار و همکارانش [۱۹] هم تاثیر نرخ کرنش و پیکربندی لایه چینی بر خواص کششی و خمشی را در چند لایه‌های الیاف فلز کارال (CARALL) بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، استحکام کششی افزایش می‌یابد اما استحکام خمشی، با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. شیا و همکارانش [۲۰] تاثیر نرخ کرنش بر چند لایه‌های آلومینیومی تقویت شده با الیاف کربنی را بررسی کردند. چند لایه‌های الیاف/فلز کارال، مواد بسیار حساسی نسبت به نرخ کرنش هستند، و افزایش این نرخ هم باعث افزایش استحکام کششی و کرنش شکست می‌شود. بیناس و همکارانش [۲۱] در تحقیق خود، به بررسی مقاومت آلیاژهای آلومینیوم و چند لایه‌های کامپوزیت اپوکسی- کربنی در برابر ضربه کم سرعت پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که جهت قرار گیری الیاف در چند لایه‌های آلومینیوم و کربن - اپوکسی تک جهته، از اهمیت خاصی در زمینه افزایش یا کاهش مقاومت آنها در برابر ضربه برخوردار است. یو و همکارانش [۲۲] تاثیر خواص آلیاژ آلومینیوم بر عکس العمل گلار نسبت به ضربه کم سرعت را بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش استحکام تسلیم در آلیاژ آلومینیوم، میزان مقاومت در برابر ضربه در سازه افزایش می‌یابد. بیناس و همکارانش [۲۳] رفتار چند لایه‌های هیبریدی آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن را در برابر ضربه و همین طور مکانیسم‌های آسیب دیدگی مربوطه در قیاس با پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در حالات ضربه کم سرعت را بررسی کردند. با استفاده از مدل آسیب پیشرونده که بر مبنای تئوری تغییر شکل محدود با متغیرهای غیرخطی هندسی و مادی بود، چانگ و لسارد [۲۴] مواردی از آسیب دیدگی در کامپوزیت‌های چند لایه را بررسی کردند که پدیده سوراخ شدگی (گشودگی) بوده و در معرض بارگذاری فشاری قرار داشتند. اما این مدل، لایه لایه شدگی و کماتش ناشی از لایه لایه شدگی که در طول بارگذاری فشاری رخ می‌دهد را در نظر نمی‌گیرد. چن و همکارانش [۲۵] با ارائه مدلی ترکیبی از آسیب دیدگی (الاستوپلاستیک)، به بررسی رفتار مشهود ترک‌ها در چند لایه‌های الیاف فلز کارال و همینطور تاثیر پیکربندی‌های لایه چینی بر پاسخ مکانیکی چند لایه‌های سوراخ دار الیاف - فلز آلومینیوم پرداخته و پاسخ مکانیکی درون صفحه ای لایه‌های کامپوزیت را بدست آوردند. ماینز و همکارانش تاثیر نفوذ شبه استاتیکی و ضربه سرعت بالای سه نفوذ کننده با دماغه‌های مختلف را بر کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه بررسی و انرژی مورد نیاز برای نفوذ این نفوذ کننده‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. نفوذ کننده‌ها با شکل دماغه‌های تخت، نیمکروی و مخروطی بوده‌اند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ کننده سرتخت، بیشترین ضریب تشدید دینامیکی را نسبت به دو نفوذ کننده دیگر ارائه می‌کند [۲۶]. تریمولا و همکارانش نقش عوامل مؤثر بر نفوذ شبه- استاتیکی در اهداف کامپوزیتی را به روش تحلیلی و روش اجزای محدود، مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که جابجایی نسبی مابین الیاف و ماتریس با افزایش شعاع نفوذ کننده و همچنین افزایش نسبت مدول الاستیک الیاف به ماتریس، افزایش پیدا می‌کند [۲۷]. ون و همکارانش به بررسی نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی ضربه زنده‌های دارای دماغه تخت، نیم کروی و مخروطی بر سازه‌ی ساندویچی پرداختند. سازه مذکور دارای رویه‌هایی از جنس کامپوزیت شیشه/ پلی استر و هسته فوم پی وی سی بودند. نتایج آنها نشان داد، هنگامی که شعاع نفوذ کننده بیشتر از ضخامت هسته است، نفوذ کننده دارای دماغه نیم کروی، انرژی کمتری برای نفوذ کامل نیاز دارد. هنگامی که شعاع نفوذ کننده از ضخامت هسته کمتر است، انرژی مورد نیاز برای نفوذ کامل، در نفوذ کننده‌های مختلف تقریباً برابر است [۲۸]. لی و همکارانش فرآیند فشار شبه استاتیکی نفوذ کننده کروی را در مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دو نوع کامپوزیت کربن/ اپوکسی با الیاف تک جهته و کامپوزیت هیبریدی متشکل

از لایه‌های کربن اپوکسی و پارچه‌های تک جهت کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها مبین کاهش لایه‌لایه شدگی کامپوزیت در صورت استفاده از لایه‌ی پارچه‌ای مابین لایه‌های کامپوزیتی بود. خرابی کامپوزیت، ناشی از فشار شبه استاتیکی، تطابق خوبی با نتایج ضربه سرعت پایین نشان داد. باکوم و زیگری نفوذ شبه استاتیکی نفوذکننده با دماغه نیم‌کروی را در کامپوزیت‌های با الیاف شیشه دو و سه بعدی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که خرابی به وجود آمده بر اثر نفوذ، در کامپوزیت دارای الیاف سه بعدی بسیار بیشتر از کامپوزیت با الیاف دو بعدی است [۲۹].

در این مقاله تاثیر نانو سیلیکا بر روی FML ها با لایه چینی‌های مختلف تحت آزمایش نفوذ شبه استاتیکی با سمبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

## ۲. ساخت نمونه‌ها

ساخت نمونه‌ها به جهت استفاده از نانو سیلیکا در آنها به روش لایه‌گذاری دستی انجام می‌پذیرد. از الیاف کربن و الیاف شیشه UD ۴۰۰ تک جهت دارای استحکام زیاد نسبت به وزن، مقاومت کششی بالا، ضریب انبساط حرارتی بسیار پائین استفاده شده که در چیدمان لایه‌های FML از آنها استفاده شده است. نانوسیلیکا نیز با خلوص ۹۹/۹٪ و به بزرگی ذرات ۱۵ نانومتر در ماتریس زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ مطابق شکل ۱ استفاده شده که نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خستگی بالایی دارد. ورقهای آلومینیوم با ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتی متر با ضخامت ۰/۷ میلیمتر در رویه‌های بالایی و پایینی FML مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱) آلومینیوم 2024-T3

نمونه‌ها در دو حالت لایه چینی با ۴ نوع درصد وزنی نانو به میزان صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد مطابق جدول ۱ ساخته شد، پس از تهیه رزین و ترکیب آن با نانوسیلیکا با درصد نانوهای اشاره شده به کمک همزن مکانیکی لازم است تا رزین حاوی نانو با همزن مغناطیسی و دستگاه التراسونیک به روش همگن سازی فراصوت بطور کامل در هم آمیخته شوند. برای آماده سازی آلومینیوم ۲۰۲۴ میبایست سطح آن را به اصطلاح اچ کرد.

جدول ۱) نحوه چیدمان لایه های FML بر اساس درصدوزنی نانو و نوع الیاف

نوع ۴-۱	نوع ۸-۵
شیشه (۰ درجه)	کربن (۰ درجه)
شیشه (۹۰ درجه)	شیشه (۹۰ درجه)
شیشه (۹۰ درجه)	شیشه (۹۰ درجه)
شیشه (۰ درجه)	کربن (۰ درجه)

اچ کردن حذف بخشی از سطح آلومینیوم با استفاده از روش های شیمیایی است. از دلایل اچ کردن آلومینیوم می توان به مات کردن مواد (کاهش انعکاس یا براقی)، برای حذف آلودگی از سطح برای پنهان کردن عیوب سطحی (خش، از بین بردن خطوط، و غیره) برای تولید یکنواخت نهایی نام برد. اچ شیمیایی، هم با استفاده از محلول ای قلیایی و هم اسیدی انجام می شود. اچ کردن اغلب با استفاده از هیدروکسید سدیم صورت می گیرد. در این مرحله که ماتریس زمینه، الیاف ها و آلومینیوم ۲۰۲۴ آماده شده، با استفاده از ترتیب آمده در جدول ۱ نسبت به چیدمان لایه ها اقدام می گردد. پس از اینکه لایه چینی نمونه ها انجام گردید میبایست بر روی نمونه ها وزنه هایی به سنگینی تقریباً متوازن بر روی آنها قرار گیرد. این وزنه ها میبایست به مدت ۱ هفته در دمای آزمایشگاه نگهداری تا پروسه ساخت و اصطلاحاً پخت تکمیل گردد. نمونه های ساخته شده در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲) نمونه ها بعد از پخت

### ۳. آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

مناسب‌ترین روش برای شناسایی رفتار کامپوزیت‌ها و آسیب‌های ناشی از نفوذ، انجام آزمایش نفوذ شبه استاتیکی می‌باشد. آزمایش نفوذ شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های ۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد نانو سیلیکا در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گردیده است. انجام آزمایش با کنترل جابجایی فک بالایی دستگاه، میزان جابجایی و محل اعمال نیرو صورت می‌گیرد. دستگاه تست نفوذ شبه استاتیکی و فیکسچر استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمایش‌ها باید تا نفوذ کامل نفوذکننده در داخل نمونه ادامه یابد تا اینکه نمودار تنش - کرنش به صورت افقی و ثابت بماند. سرعت بارگذاری در این آزمایش 5mm/min و از نفوذ کننده سرکروی مطابق شکل ۴ استفاده گردیده است. شایان ذکر است که ضخامت کلیه نمونه‌های ساخته شده با بکدیگر تقریباً برابر و در حدود ۳ میلیمتر است. شکل ۵ زمان انجام آزمایش در لحظه نفوذ کامل سمبه سرکروی در نمونه را نشان می‌دهد که نتیجه نفوذ نیز قابل مشاهده است.



شکل ۳) نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر و دستگاه آزمایش نفوذ شبه استاتیکی



شکل ۴) انواع نفوذ کننده‌ها

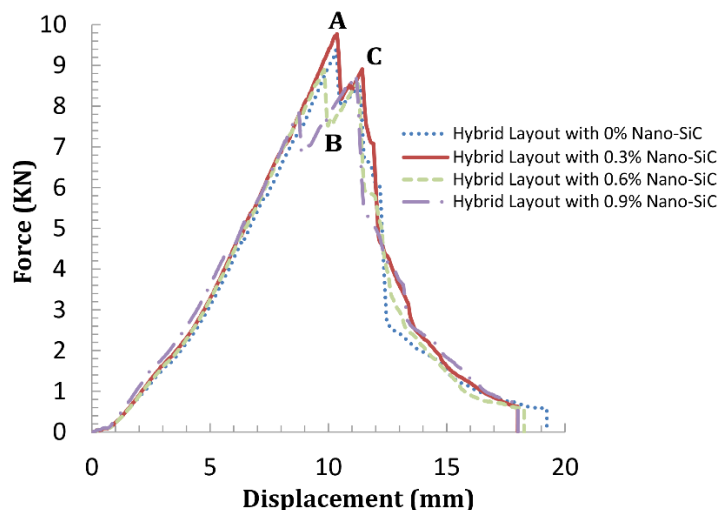


شکل ۵) سوراخ ایجاد شده در پی نفوذ سمیه سرکروی در آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

پس از انجام آزمایش نفوذ شبه استاتیکی، نتایج که از میانگین گیری تکرار آزمایش ها بر روی هر کدام از نمونه ها با درصد های وزنی ۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد نانوسیلیکا به دست آمده است، در نمودار نیرو-جابجایی بشرح زیر قابل مشاهده است.

### ۱-۳- بررسی نمونه ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف هیبرید و نفوذکننده سرکروی

نمودار نیرو- جابجایی ورق FML با الیاف هیبریدی کربن و شیشه با درصد وزنی نانو سیلیکای مختلف تحت نفوذ شبه استاتیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. نمونه ها با الیاف هیبریدی دارای زوایای چیدمان به ترتیب صفر، ۹۰، ۹۰ و صفر درجه بوده و همچنین درصد وزنی نانو سیلیکا در ماتریس زمینه نیز در مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ است که همگی با نفوذکننده سرکروی تحت آزمایش نفوذ شبه استاتیکی قرار گرفته اند.



شکل ۶) نمودار نیرو جابجایی نمونه‌ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف هیبرید و نفوذکننده سرکروی

همانطور که از شکل ۶ مشخص می‌شود نمودار نیرو جابجایی نمونه‌ها روند مشابهی به همدیگر دارند تمامی حالتها تا قبل از رسیدن به نیروی تماسی ماکزیمم بر همدیگر منطبق می‌باشند و بعد از نیروی تماسی ماکزیمم نیز روند نمودارها تقریباً مشابه می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه‌ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف هیبرید و نفوذکننده سرکروی توسط دستگاه در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. نمونه با درصد خلوص ۰/۳ نانوسیلیکا نتایج بهتری را نسبت به سایر درصدها داشته به طوری که میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه برابر با ۵۶/۰۴ ژول بوده است. بیشترین نیروی وارده به آن ۹/۸ کیلو نیوتن در جابجایی ۱/۰۳۸ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲) نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه‌ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف هیبرید و نفوذکننده سرکروی

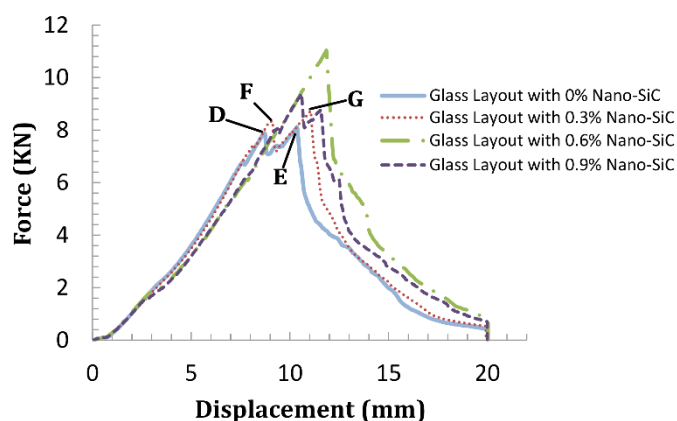
درصد نانوسیلیکا	انرژی جذب شده (KJ)	نیروی وارده ماکزیمم (KN)	جابجایی (ضخامت) که در آن نیرو حداکثر شده (mm)
۰	۵۲/۴۱	۹/۴	۱/۰۳۴
۰/۳	۵۴/۰۶	۹/۸	۱/۰۳۸
۰/۶	۵۲/۷۸	۹	۰/۹۱
۰/۹	۵۲/۴۶	۸/۸	۱/۱۲۰



با ملاحظه به نتایج در جدول شماره ۱ مشخص است که افزایش درصد وزنی نانوسیلیکا تضمین بر بهبود خواص مکانیکی نمونه نیست اما در درصد خاصی ممکن است بهینه ترین حالت ممکن باشد که در این آزمایش درصد نمونه ۰/۳ حالت بهینه است به طوری که باعث شده نفوذکننده نیروی بیشتری را برای نفوذ صرف کند. در حالت کلی روند نفوذ بدین صورت است که در مرحله اول که نفوذکننده میبایست از آلومینیوم ۲۰۲۴ کرده که انرژی بیشتری لازم است (نقطه A در نمودار ۶) و پس از آن نفوذ در الیاف هیبرید که متشکل از الیاف شیشه، کربن و ماتریس زمینه به همراه نانوسیلیکا که این لایه دارای خاصیت جاذب انرژی است خواهد بود که به مراتب نیروی کمتری نسبت به نیروی صرف شده نسبت به نیروی مورد نیاز در آلومینیوم ۲۰۲۴ ولی در عین حال قابل توجه صرف گردیده که منجر به فشردگی شدن لایه میانی می شود (نقطه B در نمودار ۶). در نهایت نفوذ کننده به مشابه نقطه A با آلومینیوم ۲۰۲۴ مواجه خواهد شد که نیروی بیشتر صعود نمودار را به نقطه C به همراه خواهد داشت. البته نفوذکننده در زمان رسیدن به آلومینیوم پایین، به دلیل عدم وجود فوم، با نیروی کمتری نسبت به آلومینیوم اول به صفحه زیرین نفوذ میکند. در مجموع پس از سوراخ شدن صفحه نفوذ (آلومینیوم ۲۰۲۴)، فشردگی شدن لایه میانی از یک طرف و وجود نیروی اصطکاک بین لایه میانی و نفوذکننده از طرف دیگر، ناحیه ای با رفتار قابل پیش بینی در بین نقاط A و C را بوجود آورده است.

### ۲-۳- بررسی نمونه ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف شیشه و نفوذکننده سرکروی

نمودار نیرو-جابجایی ورق FML با الیاف شیشه با درصد وزنی نانو سیلیکای مختلف تحت نفوذ شبه استاتیکی در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه ها با الیاف شیشه دارای زوایای چیدمان به ترتیب صفر، ۹۰، ۹۰ و صفر درجه بوده و همچنین درصد وزنی نانو سیلیکا در ماتریس زمینه نیز در مقادیر صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است روند پیمایشی نمودار نیرو - جابجایی جهت الیاف شیشه به شباهت نزدیکی با الیاف هیبریدی دارد، با این تفاوت که در درصد وزنی ۰/۶ نانوسیلیکا علاوه بر اینکه نتیجه بهینه تر و نیروی بیشتری ثبت شده است و روند نمودار نیرو-جابجایی ورق FML با الیاف شیشه با ورق FML با الیاف هیبریدی متفاوت است. نمودارها دو مرحله ای نشده که دلیل آن میتواند به دلیل مقاوت بالای آلومینیوم ۲۰۲۴ اول و فوم بعد از آن باشد، که به هر ترتیب، با توجه به جدول شماره ۳، میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه برای نمونه با درصد وزنی 0.6 نانوسیلیکا با لایه چینی هیبریدی که با زوایای ۰/۹۰/۹۰/۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته و با نفوذ کننده سرکروی توسط دستگاه نفوذ شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته است، برابر با ۶۴/۶۵ ژول بوده است. بیشترین نیروی وارده به آن ۱۱ کیلو نیوتن در جابجایی ۱/۱۸۶ میلیمتر می باشد.



شکل ۷) نمودار نیرو جابجایی نمونه ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف شیشه و نفوذکننده سرکروی

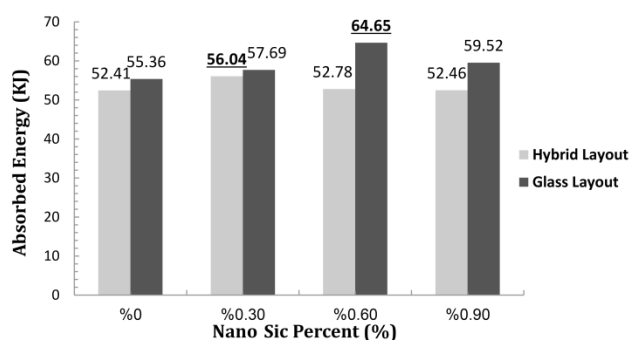
جدول ۳) نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه ها در درصد نانوسیلیکاهای مختلف با الیاف شیشه و نفوذکننده سرکروی

درصد نانوسیلیکا	انرژی جذب شده (KJ)	نیروی وارده ماکزیمم (KN)	جابجایی (ضخامت) که در آن نیرو حداکثر شده (mm)
۰	۵۵/۳۶	۸/۱	۱/۰۳۸
۰/۳	۵۷/۶۹	۸/۷	۱/۱۰۶
۰/۶	۶۴/۶۵	۱۱	۱/۱۸۶
۰/۹	۵۹/۵۲	۹/۴	۱/۰۵۹

#### ۴. بحث و نتایج

به طور کلی مکانیزم شکست چند لایه های فلز - کامپوزیتی FML متشکل از چهار مرحله بوده که در مرحله اول تماس و اعمال نیروی نفوذ کننده با سطح نمونه رخ داده که این مرحله کاملاً به صورت الاستیک خطی و بدون هیچ گونه خرابی و یا پارگی بر روی سطح نمونه است. در مرحله دوم نمودار با نفوذ سنبه به سطح آلومینیوم دچار تغییر می گردد که با اعمال نیرو ترک در سطح نمونه آشکار که ادامه آن منجر به خرابی و شکست نمونه می گردد، این مرحله موجب تورق و ترک خوردگی ماتریس می گردد. همانگونه که در نمودارها مشترکاً قابل ردیابی است در این مرحله، نمودارها نامنظم و حرکت غیرقابل پیش بینی از لحاظ صعودی یا نزولی شدن نمودار رخ می دهد همانگونه که مشخص است در شکل ۶ در هر ۴ نمونه بعد از مرحله A نمودار نزولی شده اما در شکل شماره ۷ در درصد نانو صفر و در درصد نانو ۰/۳ نمودار روند متفاوتی به نسبت سایر نمونه ها طی کرده است به طوری که پس از نقطه D و شکست آلومینیوم اول در نقطه E در زمان شکست آلومینیوم دوم با این وصف که نفوذ

کننده بعد از آلومینیوم دوم با فوم دیگری مواجه نیست، نیروی بیشتری را صرف سوراخ کردن نمونه کرده است که منجر به صعودی شدن نمودار شده است. همین امر در مسیر F تا G رخ داده است. علت غیر قابل پیش بینی و نامنظم بودن نمودار در گذر از مرحله D به E یا F به G، رفتار نامشخص فوم در برابر اعمال نیروی شبه استاتیکی و از طرف دیگر اصطکاک بین سنبه و فوم در حال عبور از هسته FML است. پس از آن نفوذکننده به صفحه زیرین رسیده و شکسته می شود که در این مرحله نیز تورق و شکست ماتریس اتفاق می افتد.



شکل ۸) انرژی جذب شده نمونه های مختلف

طبق شکل ۸، نمونه با درصد وزنی ۰/۳ نانو سیلیکا با الیاف هیبریدی و نمونه با درصد وزنی ۰/۶ نانو سیلیکا با الیاف شیشه مقاومت بیشتری نسبت سایر نمونه ها با نفوذکننده سرکروی از خود نشان می دهد، که در مقایسه با سایر نیروها این نمونه بیشترین نیرو را نیز تحمل کرده است. نتایج حائز این نکته است که درصد خاصی از نانو سیلیکا موجب افزایش مقاومت نمونه می گردد و گرنه در بعضی موارد نمونه بدون نانو سیلیکا از نمونه با نانو سیلیکا دارای مقاومت بیشتری است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود با افزایش درصد وزنی نانو سیلیکا تا درصد معینی موجب بهبودی مقاومت نمونه ها گردیده است و افزایش بیش از آن موجب کاهش نیروها گردیده است به طور مثال در نمونه با الیاف شیشه با نفوذکننده سرکروی تا درصد وزنی ۰/۶ نانو سیلیکا موجب بهبود عملکرد شده است و در درصد ۰/۹ کاملاً مقاومت بطور چشمگیری کاهش داشته است.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر افزودن نانو سیلیکا به محلول رزین جهت تقویت ساختار چند لایه های فلز - کامپوزیتی تحت نفوذ شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از نانو سیلیکا سبب افزایش میزان جذب انرژی و خواص مقاومتی FML ها نشان می دهد و همچنین به دلیل عبور کامل نفوذکننده از نمونه ها و کامل شدن عملیات نفوذ، حالات آسیب عمدتاً شامل ترک خوردگی ماتریس، واماندگی ماتریس و لایه لایه شدگی نمونه حادث گردید.

بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم FML با الیاف شیشه تحت نفوذ با سمبه سرکروی مربوط به حالت ۰/۶ درصد وزنی نانو می باشد، بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم FML با الیاف هیبریدی تحت نفوذ با سمبه سرکروی مربوط به حالت ۰/۳ درصد وزنی نانو می باشد، بیشترین انرژی جذب شده ماکزیمم FML با الیاف شیشه تحت نفوذ با سمبه سرکروی مربوط به حالت ۰/۶ درصد

وزنی نانو می باشد، بیشترین انرژی جذب شده ماکزیمم FML با الیاف هیبریدی تحت نفوذ با سمبه سرکروی مربوط به حالت ۰/۳ درصد وزنی نانو می باشد.

## مراجع

- [1] Vlot A, Krull M. Impact damage resistance of various fibre metal laminates. *Le Journal de Physique IV*. 1997 Aug 1;7(C3):C3-1045.
- [2] Hu Y, Zheng X, Wang D, Zhang Z, Xie Y, Yao Z. Application of laser peen forming to bend fibre metal laminates by high dynamic loading. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015 Dec 1;226:32-9.
- [3] Hillermeier RW, Seferis JC. Interlayer toughening of resin transfer molding composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001 May 1;32(5):721-9.
- [4] Zenkert D. *An Introduction to Sandwich Structures, Student Edition*. Dan Zenkert. 2005;110.
- [5] Zhang Z, Wang W, Rans C, Benedictus R. An experimental investigation into pin loading effects on fatigue crack growth in Fibre Metal Laminates. *Procedia Structural Integrity*. 2016 Jan 1;2:3361-8.
- [6] Vlot A, Gunnink JW, editors. *Fibre metal laminates: an introduction*. Springer Science & Business Media; 2011 Jun 28.
- [7] Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*. 2006 Sep;9(3):247-56.
- [8] Cantwell WJ. The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*. 2000 May 1;60(7):1085-94.
- [9] Cepeda-Jiménez CM, Alderliesten RC, Ruano OA, Carreño F. Damage tolerance assessment by bend and shear tests of two multilayer composites: glass fibre reinforced metal laminate and aluminium roll-bonded laminate. *Composites science and technology*. 2009 Mar 1;69(3-4):343-8.
- [10] Daghigh V, Khalili SM, Farsani RE. Creep behavior of basalt fiber-metal laminate composites. *Composites Part B: Engineering*. 2016 Apr 15;91:275-82.
- [11] Sadighi M, Dariushi S. An experimental study of the fibre orientation and laminate sequencing effects on mechanical properties of Glare. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2008 Jul 1;222(7):1015-24.
- [12] Vasumathi M, Murali V. Effect of alternate metals for use in natural fibre reinforced fibre metal laminates under bending, impact and axial loadings. *Procedia engineering*. 2013 Jan 1;64:562-70.
- [13] Seyed Yaghoubi A, Liu Y, Liaw B. Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) fiber-metal laminates. *Journal of thermoplastic composite materials*. 2012 Mar;25(2):223-47.

- [14] CHANG PY, YEH PC, YANG JM. Fatigue crack growth in fibre metal laminates with multiple open holes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2012 Feb;35(2):93-107.
- [15] Sadighi M, Dariushi S. An experimental study of the fibre orientation and laminate sequencing effects on mechanical properties of Glare. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2008 Jul 1;222(7):1015-24.
- [16] Esfandiari H, Daneshmand S, Mondali M. Analysis of elastic-plastic behavior of fiber metal laminates subjected to in-plane tensile loading.
- [17] Wu G, Yang JM. Analytical modelling and numerical simulation of the nonlinear deformation of hybrid fibre-metal laminates. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2005 Mar 24;13(3):413.
- [18] Lawcock G, Ye L, Mai YW, Sun CT. The effect of adhesive bonding between aluminum and composite prepreg on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced metal laminates. *Composites Science and Technology*. 1997 Jan 1;57(1):35-45.
- [19] Rajkumar GR, Krishna M, Narasimhamurthy HN, Keshavamurthy YC, Nataraj JR. Investigation of tensile and bending behavior of aluminum based hybrid fiber metal laminates. *Procedia Materials Science*. 2014 Jan 1;5:60-8.
- [20] Xia Y, Wang Y, Zhou Y, Jeelani S. Effect of strain rate on tensile behavior of carbon fiber reinforced aluminum laminates. *Materials Letters*. 2007 Jan 1;61(1):213-5.
- [21] Bienias J, Jakubczak P. Low velocity impact resistance of aluminium/carbon-epoxy fiber metal laminates. *Compos Theory Pract*. 2012;12(3):193-7.
- [22] Yu GC, Wu LZ, Ma L, Xiong J. Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates. *Composite Structures*. 2015 Jan 1;119:757-66.
- [23] Bienias J, Jakubczak P, Surowska B, Dragan K. Low-energy impact behaviour and damage characterization of carbon fibre reinforced polymer and aluminium hybrid laminates. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015 Sep 1;15(4):925-32.
- [24] Chang FK, Lessard LB. Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings: Part I—Analysis. *Journal of composite materials*. 1991 Jan;25(1):2-43.
- [25] Chen JF, Morozov EV, Shankar K. Progressive failure analysis of perforated aluminium/CFRP fibre metal laminates using a combined elastoplastic damage model and including delamination effects. *Composite Structures*. 2014 Aug 1;114:64-79.
- [26] Mines RA, Roach AM, Jones N. High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 1999 Jul 1;22(6):561-88.
- [27] Trimula S, Madanaraj H, Kaw AK, Besterfield GH, Ye J. Effect of extrinsic and intrinsic factors on an indentation test. *International Journal of Solids and Structures*. 1996 Oct 1;33(24):3497-516.

- [28] Wen HM, Reddy TY, Reid SR, Soden PD. Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading. InKey Engineering Materials 1998 (Vol. 141, pp. 501-552). Trans Tech Publications Ltd.
- [29] Lee SH, Aono Y, Noguchi H, Cheong SK. Damage mechanism of hybrid composites with nonwoven carbon tissue subjected to quasi-static indentation loads. Journal of Composite Materials. 2003 Feb;37(4):333-49