



## بررسی تجربی تأثیر روش اختلاط نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری و چندلایه‌های الیافی فلزی

مسلم نجفی<sup>۱</sup>، رضا انصاری<sup>۲\*</sup> و ابوالفضل درویزه

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، پردیس دانشگاهی دانشگاه گیلان، رشت

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷

### چکیده

در این مقاله، تأثیر انواع فرآیندهای اختلاط نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی و چندلایه‌های الیافی فلزی، مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، نانورس تحت فرآیندهای اختلاط توسط همزن مکانیکی، همزنایزر مکانیکی سرعت بالا و همزنایزر مافوق صوت، به رزین اپوکسی خالص افزوده شد. سپس چندلایه‌های الیافی فلزی و شیشه/اپوکسی با استفاده از رزین خالص و بهبود یافته با نانورس تولید شدند. به منظور دستیابی به کیفیت مناسب در ساخت ورق‌های چندلایه، از عملیات مکش خلأ و بازپخت در اتوکلاو تحت فشار و دمای معین استفاده شد. تأثیر دو پارامتر درصد نانورس و فرآیند اختلاط بر خواص مکانیکی نمونه‌ها در سطوح مختلف با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که افزودن نانورس در درصد‌های پایین‌تر، نقش مؤثرتری در افزایش استحکام خمشی نمونه‌ها دارد. در حالی که با افزودن مقادیر نانورس، در هر دو نوع ماده، مدول خمشی روند افزایشی نشان می‌دهد؛ همچنین بررسی نتایج آنالیز سیگنال به نویز نشان داد که در تعیین خواص مکانیکی هر دو نوع ماده حاوی نانورس، نقش فرآیند اختلاط مؤثرتر از مقدار نانوذرات است.

**کلمات کلیدی:** نانورس؛ چندلایه‌های الیافی فلزی؛ کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی؛ خواص خمشی؛ خواص ضربه‌ای.

## Experimental Study of the Influence of Mixing Method of Nanoclay on Mechanical Properties of Polymer Composites and Fiber Metal Laminates

M. Najafi<sup>1</sup>, R. Ansari<sup>2\*</sup>, A. Darvizeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Univ. Campus 2, Guilan Univ., Rasht, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Professor, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran

<sup>3</sup> Professor, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran

### Abstract

In this paper, the effect of different types of mixing processes of nanoclay on the mechanical properties of glass fiber/epoxy and fiber metal laminates is studied. For this purpose, the nanoclay was added to pure epoxy resin under mixing process by mechanical mixer, high-speed mechanical homogenizer, and ultrasonic homogenizer. Then, glass fiber/epoxy and fiber metal laminates were fabricated by pure resin and modified resin with nanoclay. In order to achieve high quality in the fabrication of laminate sheets, vacuum operation and post-curing in an autoclave were used under certain temperature and pressure. The effect of two parameters of the nanoclay percent and mixing process on the mechanical properties of the specimens was investigated using Taguchi design of experiments. The results obtained suggest that the nanoclay addition at lower percentages has a more effective role in increasing the flexural strength of the specimens. While by adding nanoclay particles in both material types, the flexural modulus show an increasing trend. Additionally, the result of signal to noise ratio showed that in determining mechanical properties of both material types containing nanoclay, the role of mixing process is more effective than nanoparticle loading.

**Keywords:** Nanoclay; Fiber Metal Laminate; Glass Fiber/Epoxy Composites; Flexural Properties; Impact Properties.

## ۱- مقدمه

امروزه، توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی و صنایع دریایی، شتاب قابل توجهی یافته است [۱-۴]. از دلایل این رشد فزاینده می‌توان به خواص مطلوب این مواد نظیر، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا، مقاومت در برابر خستگی و سهولت در ساخت در مقایسه با مواد فلزی مرسوم مانند، فولاد و آلومینیوم اشاره کرد [۵-۷]. البته مواد کامپوزیتی نیز به نوبه خود دارای معایبی نظیر، خواص ضربه‌ای نسبتاً ضعیف و حساسیت فراوان به شرایط محیطی هستند که منشأ تحقیقات فراوانی در زمینه بهبود خواص این مواد شده است.

در دهه هفتاد و در دانشگاه صنعتی دلفت برای اولین بار، ایده استفاده از الیاهای آلومینیوم و مواد کامپوزیتی در قالب یک ماده ساختاری ترکیبی برای غلبه بر معایب هر دو ماده (حساسیت بالای مواد کامپوزیتی به شرایط محیطی و خواص خستگی پایین الیاهای هوافضایی آلومینیوم) مطرح شد [۸]. در آغاز دهه هشتاد، چندلایه‌های الیافی فلزی<sup>۱</sup> متشکل از لایه‌های متناوب فلز و کامپوزیت، به‌عنوان دسته‌ای جدید از مواد کامپوزیتی هیبریدی معرفی شدند. در تحقیقات صورت گرفته روی این مواد اثبات شده است که چندلایه‌های الیافی فلزی نسبت به الیاهای آلومینیوم نه‌تنها در کاهش وزن سازه، بلکه در مقاومت به آسیب و تحمل خستگی بسیار کارتر هستند [۸-۱۳]. امروزه، چندلایه‌های الیافی فلزی، به‌عنوان موادی شناخته شده در بسیاری از کاربردهای سازه-ای پیشرفته نظیر، پوسته فوقانی بدنه هواپیمای ایرباس آ-۳۸۰ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسیاری از مطالعات پیشین روی مزایای اصلی چندلایه‌های الیافی فلزی نظیر، مقاومت در برابر ضربه و همچنین تحمل خستگی متمرکز شده است [۱۴-۱۷]. با این وجود، دیگر جنبه‌های جذاب این دسته از مواد، نظیر روش‌های بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸].

از دیگر تلاش‌های صورت گرفته اخیر در زمینه افزایش خواص مواد کامپوزیتی، می‌توان به استفاده از نانوذرات به‌عنوان بهبوددهنده ماده زمینه اشاره کرد. بهره‌گیری از نانو موادی نظیر، نانورس با ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند، ضریب

منظری بالا در ساختار نانوکامپوزیت‌های نوین، منجر به بهبود استحکام، سفتی، مقاومت حرارتی، پایداری ابعادی و خواص بازدارندگی در مواجهه با آب و رطوبت شده است [۱۹-۲۱].

هاک و همکاران [۲۲]، در تحقیقاتشان نشان دادند که با استفاده از درصد بسیار پایینی از نانورس، افزایش قابل توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه رخ می‌دهد. نتایج حاکی از افزایش ۴۴٪، ۲۴٪ و ۲۳٪ در مقادیر استحکام برشی، استحکام خمشی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی حاوی نانو ذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های مرسوم الیاف شیشه/اپوکسی بود. علاوه بر این آن‌ها گزارش کردند که دمای تجزیه حرارتی نانوکامپوزیت، تقریباً ۲۶ درجه سانتی‌گراد بالاتر از حالت بدون نانو ذرات است. ایجاد فصل مشترک مستحکم بین ماده زمینه پلیمری و نانورس، دلیل اصلی بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های ساخته شده از این مواد عنوان شد.

کرنمن و همکاران [۲۳]، از روش‌های کیسه خلأ و پرس گرم برای تولید نانوکامپوزیت‌های الیاف شیشه/نانورس/اپوکسی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که مدول و استحکام خمشی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس در مقایسه با کامپوزیت بدون نانورس، به ترتیب ۶٪ و ۲۷٪ افزایش یافته است.

رایس و همکاران [۲۴] در مطالعات خود، افزایش ۱۲٪ در مدول کششی کامپوزیت‌های الیاف کربن/اپوکسی ساخته‌شده با رزین غنی‌شده توسط نانورس را در مقایسه با رزین خالص گزارش کردند.

پل و همکاران [۲۵] نشان دادند که میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی، حاوی ۵ درصد وزنی نانورس بیشینه است. همچنین مشخص شد که در این درصد وزنی نانورس، چقرمگی کامپوزیت ۱۰٪ و استحکام کششی آن، ۷٪ افزایش می‌یابد.

باید به این نکته اشاره شود که به‌منظور تقویت مؤثر ماده زمینه توسط نانو ذرات، لازم است ابعاد این تقویت‌کننده‌ها در مقیاس اتمی یا مولکولی باشد؛ بنابراین، در صورت استفاده از نانورس، برای به دست آوردن خواص مطلوب باید پراکندگی نانو ذرات در زمینه با کیفیت بسیار مناسب صورت گیرد. در

<sup>۱</sup> FMLs

میکروسکوپی سطوح شکست و پراش پرتو ایکس، مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و ساخت

### ۲-۱- مواد

رزین اپوکسی دو جزئی آرالدیت ال-وای ۵۰۵۲<sup>۳</sup> همراه با عامل پخت آردور ۵۰۵۲<sup>۴</sup>، عرضه شده توسط شرکت هانتسمن<sup>۵</sup> کشور سوئیس، به عنوان ماده زمینه پلیمری انتخاب شد. نانورس معدنی مورد استفاده در این مطالعه، مونتموریلونیت کا-۱۰ شرکت سیگما آلدریج<sup>۶</sup> ایالات متحده با مساحت ۲۲۰-۲۷۰ مترمربع بر گرم است. پارچه بافت ساده شیشه نوع ای<sup>۷</sup> با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع، به عنوان تقویت کننده از شرکت کولان<sup>۸</sup> استرالیا خریداری شد. آلیاژ هوافضایی و استحکام بالای آلومینیوم ۲۰۲۴- تی ۳<sup>۹</sup> نیز، از شرکت آلکوا ایالات متحده آمریکا تهیه شد. برخی از مشخصات اصلی آلیاژ آلومینیوم، یاف و رزین مورد استفاده در این مطالعه، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات آلیاژ آلومینیوم و رزین اپوکسی

مشخصه	آلیاژ آلومینیوم [۲۹]	رزین اپوکسی [۳۰]	الیاف شیشه [۳۱]
چگالی (گرم بر مترمکعب)	۲/۷۸	۱/۱۷	۲/۵۴
استحکام کشش نهایی (مگا پاسکال)	۴۴۱-۴۳۴	۷۱-۴۹	۳۴۰۰
مدول کششی (گیگا پاسکال)	۷۳/۱	۳/۳۵-۳/۵۵	۷۲
کرنش در شکست (%)	۱۵-۱۰	۲/۵-۱/۵	۴/۸
دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	...	۱۲۰-۱۳۴	...
ضریب انبساط حرارتی (10 <sup>-6</sup> /°C)	۲۳/۲	۹۷	۵

<sup>۳</sup> Araldite LY5052

<sup>۴</sup> Aradur 5052

<sup>۵</sup> Huntsman Advanced Materials Inc.

<sup>۶</sup> Sigma-Aldrich Co.

<sup>۷</sup> E-Glass Fabric

<sup>۸</sup> Colan Products Pty

<sup>۹</sup> Aluminum alloy 2024-T3

حالت ورقه‌ای شدن<sup>۱</sup>، لایه‌های سیلیکاتی به طور کامل و یکنواخت در ساختار زمینه پلیمری پراکنده می‌شوند [۲۶]. با این حال، رسیدن به این حالت از پراکندگی نانوذرات، به سبب گرایش ذاتی این ذرات به کلوخیدگی<sup>۲</sup>، بسیار دشوار است.

اگرچه امروزه تأثیر بهبوددهندگی نانو مواد در ساختارهای کامپوزیتی امری اثبات شده است، ولی استفاده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای واقعی نظیر، چندلایه‌های الیافی فلزی، به موارد بسیار خاص محدود شده است.

در یکی از تحقیقات اخیر در زمینه چندلایه‌های الیافی فلزی هیبرید شده با نانوذرات، مسعودی و همکاران [۲۷] اثر نانورس بر خواص بالستیکی چندلایه‌های الیافی فلزی را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های بالستیک در سرعت‌های ۲۰۵ و ۲۲۵ متر بر ثانیه نشان داد که میزان جذب انرژی مخصوص در ۴٪ وزنی نانورس ناچیز است، اما در ۷٪ و ۱۰٪ وزنی نانورس، میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد.

کبودوند و همکاران [۲۸]، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی ساخته شده از آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم و لایه‌های الیاف شیشه/اپوکسی را بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده بهبود ۲۵/۷٪ در استحکام خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۳٪ نانو لوله کربنی نسبت به نمونه‌های عاری از نانو لوله‌های کربنی بود؛ همچنین تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌ها، نمایان‌گر بهبود چسبندگی سطح مشترک فلز/کامپوزیت در نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی بود.

مقاله حاضر بر بررسی تأثیر روش اختلاط نانورس بر خواص خمشی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و چندلایه‌های الیافی فلزی، متمرکز شده است. در این پژوهش، ابتدا کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های الیافی فلزی توسط رزین اپوکسی خالص و رزین بهبود یافته توسط درصد‌های وزنی مختلف نانورس، به روش‌های مختلف اختلاط ساخته شدند. سپس با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، خواص خمشی و ضربه‌ای این مواد توسط انواع مختلف آزمون‌های تجربی نظیر، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، آزمون ضربه چارپی، تحلیل

<sup>۱</sup> Exfoliation

<sup>۲</sup> Agglomeration

## ۲-۲- اختلاط نانورس و رزین اپوکسی

ابتدا به منظور کاهش ویسکوزیته رزین برای اختلاط مناسب‌تر نانوذرات در آن، مقدار مورد نظر از رزین اپوکسی در حمام روغن در دمای ثابت ۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. سپس نانورس در نسبت‌های مختلف به رزین اپوکسی افزوده شده، عمل اختلاط با استفاده از همزن مکانیکی برای مدت ۵ ساعت انجام شد. در مرحله بعد، مخلوط نانورس و اپوکسی توسط یک همزن‌نایزر سرعت‌بالا آیکا- تی ۲۵ استانفن<sup>۱</sup> کشور کشور آلمان با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه همگن شد. حین انجام عملیات همگن‌سازی، به‌منظور اجتناب از گرمای بیش از حد، درجه حرارت مخلوط در محدوده  $5 \pm 60$  درجه سانتی‌گراد، توسط حمام یخ ثابت نگه‌داشته شد. پس از همگن‌سازی مکانیکی، برای پراکنده‌سازی بیشتر نانورس در زمینه اپوکسی، مخلوط توسط یک دستگاه همزن‌نایزر مافوق صوت هیلشر یو-آی-پی ۱۰۰۰ اچ دی<sup>۲</sup> به مدت ۳۰ دقیقه تحت تابش امواج مافوق صوت قرار گرفت. در نهایت، برای خروج هرگونه حباب هوا، مخلوط در حدود ۳۰ دقیقه در آون خلأ، مورد گاز زدایی واقع شد [۳۲، ۳۳].

لازم به ذکر است، به‌منظور ارزیابی تأثیر زمینه پلیمری بر خواص مکانیکی چندلایه‌های مورد بررسی در این پژوهش، دو متغیر درصد وزنی نانورس و شرایط فرآوری نانو ذرات و رزین اپوکسی، به‌عنوان ورودی‌های آزمایش در نظر گرفته شدند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در زمینه مقادیر بهینه نانورس در رزین‌های اپوکسی، دو سطح ۳ و ۵ درصد وزنی به‌عنوان سطوح اختلاط نانورس در رزین اپوکسی در نظر گرفته شد؛ همچنین نحوه اختلاط نانو ذرات در رزین اپوکسی به‌صورت: (۱) همزن مکانیکی، (۲) همزن مکانیکی و همزن‌نایزر مکانیکی سرعت بالا (۳) همزن مکانیکی، همزن‌نایزر مکانیکی سرعت بالا و همزن‌نایزر مافوق صوت، به‌عنوان سه سطح فرآوری نانو ذرات در زمینه پلیمری در نظر گرفته شدند. در جدول ۲، متغیرهای ورودی به همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها قابل مشاهده است.

## جدول ۲- متغیرهای ورودی و سطوح در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها

متغیر ورودی	سطوح		
	۱	۲	۳
درصد وزنی نانورس (%)	۳	۵	...
روش اختلاط	همزن مکانیکی	همزن مکانیکی + همزن‌نایزر مکانیکی	همزن مکانیکی + همزن‌نایزر مکانیکی + همزن‌نایزر مافوق صوت

## ۲-۳- فرآیند ساخت مواد کامپوزیتی و چندلایه‌های

## الیافی فلزی

چندلایه‌های الیافی فلزی مورد استفاده در این پژوهش، با لایه‌چینی سه تک‌لایه کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی بین دو ورق آلومینیوم با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر در قالبی مربع شکل ساخته شدند؛ همچنین در ساخت چندلایه کامپوزیتی، از ده تک‌لایه کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی استفاده شد. رزین اپوکسی خالص و اپوکسی غنی شده با ۳ و ۵ درصد وزنی نانورس به‌طور کامل با عامل پخت در نسبت ۱۰۰ به ۳۸ مخلوط شد. سپس فرآیند اختلاط با استفاده از یک مخلوط‌کن مکانیکی در حدود ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. پس‌از آن مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه، مورد گاززدایی قرار گرفت.

از روش لایه‌گذاری دستی<sup>۳</sup>، برای تولید کلیه چندلایه‌ها اعم از کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های الیافی فلزی استفاده شد. پس از انجام عملیات لایه‌گذاری، چندلایه‌ها برای مدت یک روز در خلأ ۶۰- کیلو پاسکال تحت عملیات مکش خلأ قرار گرفتند. برای به حداقل رساندن اثر نامناسب تفاوت انبساط حرارتی بین اجزای مختلف چندلایه، کمترین دمای پخت ممکن برای بازپخت چندلایه‌ها انتخاب شد؛ بنابراین، مجموعه برای بازپخت نهایی تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال و دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در اتوکلاو قرار گرفت. تصویری شماتیک از چیدمان لایه‌های مختلف فلز و کامپوزیت در ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی و کامپوزیتی، در شکل ۱ قابل مشاهده است.

<sup>۱</sup> IKA T25 Ultra-Turrax, Stanfen

<sup>۲</sup> UIP1000hd, Hielscher

<sup>۳</sup> Wet Lay-Up Process

و "I" به ترتیب، به منظور بیان نوع آزمون مکانیکی یعنی آزمون خمشی و آزمون ضربه انجام شده روی نمونه‌ها تعیین شد. همچنین، اعداد ۱ تا ۳، بیان‌گر نحوه اختلاط نانوذرات در رزین اپوکسی مطابق جدول ۲ است؛ بنابراین به‌عنوان مثال، نمونه خمشی چندلایه الیافی فلزی، حاوی ۳٪ وزنی نانورس و زمینه فرآوری شده از طریق روش همزن مکانیکی تحت عنوان nano-FML/F1 3 wt.% کدگذاری شده است.

### ۳- مشخصه‌سازی

#### ۳-۱- ارزیابی پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس از نانورس و نانوکامپوزیت‌های مختلف توسط یک دستگاه پانالیتیکیال<sup>۱</sup> ساخت کشور هلند مجهز به یک منبع تابش Cu K $\alpha$  (طول موج: ۱/۵۴۰۶ آنگستروم)، مورد بررسی قرار گرفت. طیف پراش در دمای اتاق با سرعت اسکن ۱/۵۶ درجه بر دقیقه به دست آمد.

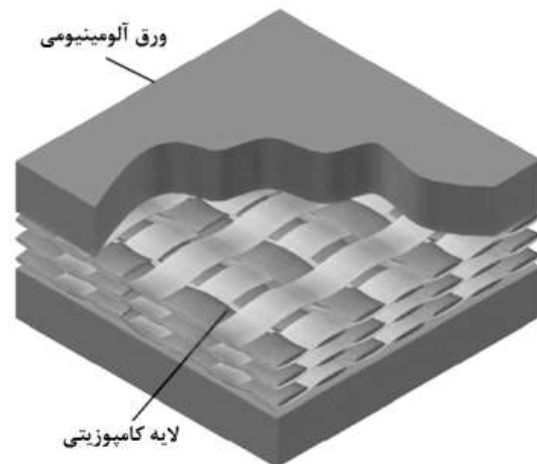
فاصله اساسی (d)<sup>۲</sup> بین لایه‌های سیلیکاتی و میزان پراکندگی نانوذرات در پلیمر با استفاده از قانون براگ محاسبه می‌شود:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

که در آن n یک عدد صحیح از طول موج است،  $\theta$  زاویه پراش (برحسب درجه) و  $\lambda$  طول موج پرتو تابشی است.

#### ۳-۲- آزمون خمش

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D790 و با استفاده از یک دستگاه تست یونیورسال ۲۰ کیلو نیوتونی سنتام اس تی ام-۱۵۰<sup>۳</sup> ساخت ایران انجام شد. ابعاد اسمی برای نمونه‌های آزمون خمشی، ۱۲/۷ × ۱۰ × میلی‌متر مربع (عرض × طول) بود. آزمون در دمای ۲ ± ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵ ± ۵٪ انجام شد. در این آزمون، سه نمونه برای هر نوع ماده مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار متوسط استحکام خمشی و مدول خمشی تعیین شد. تصویری از نحوه انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی یک نمونه چندلایه الیافی فلزی، در شکل ۲ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- تصویر شماتیک از چیدمان لایه‌گذاری در الف) چندلایه الیافی فلزی و ب) کامپوزیت الیافی شیشه/اپوکسی

#### ۲-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها از صفحات چندلایه‌های الیافی فلزی و کامپوزیتی با ابعاد مورد نظر، توسط یک دستگاه برش جت آب و با توجه به توصیه استاندارد ASTM برش داده شدند.

در این مقاله برای نشان دادن رزین غنی شده توسط نانوذرات، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف و چندلایه‌های الیافی فلزی به ترتیب، از علائم GE، M و FML استفاده شده است. همچنین درصد نانو ذره در نمونه‌های حاوی نانورس در قالب پیشوند قبل از هر نوع نمونه اشاره شده است. نماد "F"

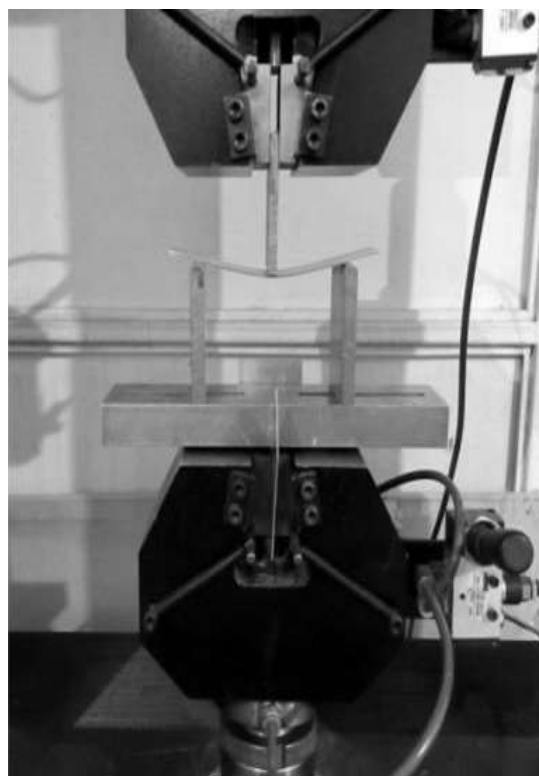
<sup>1</sup> PANalytical X'Pert PRO MPD

<sup>2</sup> d-spacing

<sup>3</sup> SANTAM, STM-150, 20KN



شکل ۳- نمونه‌های آزمون ضربه چارپی ساخته شده از چندلایه الیافی فلزی و کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی



شکل ۲- تصویری از نمونه چندلایه الیافی فلزی تحت آزمون خمش



شکل ۴- تصویری از انجام آزمون ضربه توسط ماشین آونگی توریسی

### ۳-۳- آزمون ضربه چارپی

مطابق شکل ۳، ابعاد نمونه‌های آزمون ضربه چارپی معادل  $60 \times 12.7$  میلی‌متر مربع تعیین شد. یک فاق ۷ شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ریشه  $2/54$  میلی‌متر در یک طرف نمونه‌ها ایجاد شد. نمونه‌های آزمون ضربه چارپی، توسط یک ماشین آونگی توریسی شرکت ام-اف-جی<sup>۱</sup> کشور ژاپن و بر اساس ASTM D 6110، مورد آزمایش قرار گرفتند. این دستگاه به یک چکش چارپی با طول ۷۵۰ میلی‌متر و با حداکثر سرعت ضربه  $5/1$  متر بر ثانیه مجهز است. آزمایش در دمای محیط  $2 \pm 25$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $4 \pm 45\%$  انجام شد. تصویری از ماشین آزمون ضربه حین انجام آزمون ضربه چارپی، در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳-۳- ارزیابی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup>

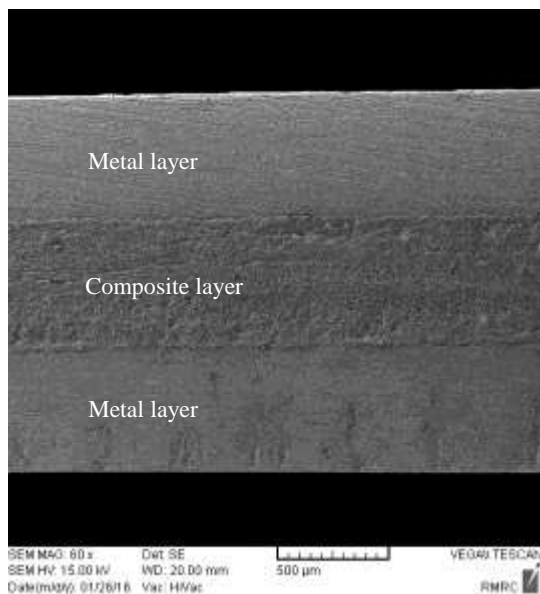
مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی ریخت‌شناسی، کیفیت ساخت و شکل شکست روی نمونه‌ها انجام شد. میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscopic (SEM)

<sup>1</sup> Torsee, MFG. CO., Ltd.

جدول ۳- حالات مختلف آزمایش‌ها بر اساس متغیرهای ورودی و سطوح آن‌ها

نحوه اختلاط	درصد وزنی نانورس (%)	کد نمونه
۱	۳	3 wt.% nano-GE/1
۲	۳	3 wt.% nano-GE/2
۳	۳	3 wt.% nano-GE/3
۱	۵	5 wt.% nano-GE/1
۲	۵	5 wt.% nano-GE/2
۳	۵	5 wt.% nano-GE/3



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی از مقطع نمونه چندلایه الیافی فلزی

ویژگی‌های قله و فواصل بین لایه‌های نمونه‌های نانوکامپوزیت مختلف، در جدول ۴ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل پراش پرتوایکس نانوکامپوزیت‌های مختلف نشان می‌دهد که در تمامی حالات به جز نمونه 3 wt.% nano-M/3 نانورس بدون رسیدن به حالت ورقه‌ای کامل، یک ساختار بین لایه‌ای<sup>۳</sup> در زمینه اپوکسی تشکیل می‌دهند؛ همچنین

سطوح شکست (پس از آزمون خمش و ضربه) در بزرگ-نمایی‌های مختلف با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی وگا تی اسکن<sup>۱</sup> ساخت جمهوری چک به دست آمد. قبل از انجام عملیات تصویربرداری، برای جلوگیری از شارژ توسط الکترون‌های جذب‌شده توسط نمونه، ابتدا سطح نمونه-ها با یک لایه نازک طلا پوشش داده شد و سپس در ولتاژ ۱۵ کیلوولت، عملیات ثبت تصاویر انجام شد.

شکل ۵ مقطعی از چندلایه الیافی فلزی مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، نمایانگر کیفیت بالا و نسبتاً عاری از نقص فصل مشترک بین لایه کامپوزیتی و فلزی در نمونه چندلایه الیافی فلزی است.

#### ۴- طراحی آزمایش‌ها

به منظور بررسی اثر عوامل مختلف بر خواص خمشی و ضربه-ای، با استفاده از نرم‌افزار مینی-تب<sup>۲</sup>، طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی صورت گرفت. جدول ۳، نشان‌دهنده حالات مختلف آزمایش‌های پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی برای کامپوزیت‌ها است. لازم به ذکر است که در مورد چندلایه‌های الیافی فلزی نیز، همین رویه آزمایش صادق است.

#### ۵- نتایج و بحث

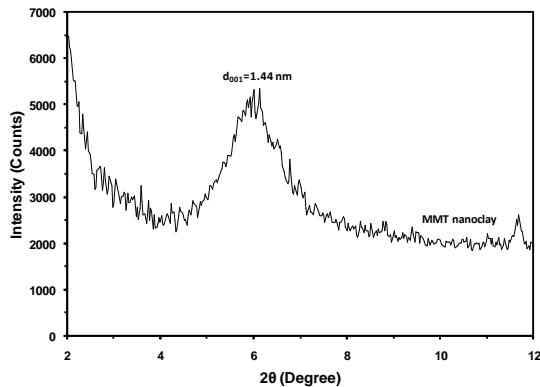
##### ۵-۱- تحلیل پراش پرتوایکس

به منظور درک ویژگی‌های ساختاری نانورس/اپوکسی به عنوان ماده زمینه چندلایه‌های ساخته شده در این پژوهش، نانورس خالص و نانوکامپوزیت‌های حاوی ۳٪ و ۵٪ وزنی نانورس، توسط آزمون پراش پرتوایکس، مورد ارزیابی قرار گرفتند. اطلاعات به دست آمده از پراش پرتوایکس نانورس خالص نشان داده شده در شکل ۶، حاکی از وجود یک قله پراش نوک‌تیز در زاویه جدایش  $2\theta = 6/13^\circ$  در فاصله بین لایه‌های  $d_{001} = 1/44$  نانومتر است. در انتهای نمودار یک قله با شدت پایین‌تر در  $2\theta = 11/69^\circ$  در فاصله بین لایه‌های  $0/76$  نانومتر مشهود است.

<sup>۱</sup> VEGA, TESCAN

<sup>۲</sup> Minitab

<sup>۳</sup> Intercalated Structure



شکل ۶- الگوی پرتو ایکس از نانورس خالص

### ۵-۲- خواص مکانیکی

#### ۵-۲-۱- خواص خمشی

تحقیقات انجام شده در حوزه اتصالات بیان‌گر این امر است که نتایج آزمون خمش می‌تواند ابزار بسیار مفیدی در ارزیابی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی نظیر، چندلایه‌های الیافی فلزی باشد [۳۴، ۳۵]. مک دویت و براون [۳۶] گزارش دادند که آزمون خمش سه نقطه‌ای نظیر سایر آزمون‌های مکانیکی برشی مرسوم نظیر، آزمون پوست‌کنی<sup>۱</sup>، آزمون پارگی توسط گوه<sup>۲</sup> و آزمون برشی لب روی هم<sup>۳</sup>، نسبت به ارزیابی عیوب سطحی حساسیت بالایی دارد. بر این اساس، به منظور بررسی اثر نانورس که نقش مهمی در تغییر ماهیت خواص فصل مشترکی دارند، آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های کامپوزیتی و چندلایه‌های الیافی فلزی اعمال شد.

نمونه‌ای از منحنی تنش- کرنش خمشی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای، روی نمونه‌های کامپوزیتی و چندلایه‌های الیافی فلزی در شکل ۷ نشان داده شده است. آشکار است که چندلایه‌های الیافی فلزی بدون در نظر گرفتن مقدار نانورس، در قسمت اولیه نمودار رفتار الاستیک خطی از خود بروز می‌دهند. با افزایش مقدار بار، چندلایه‌های الیافی فلزی الگویی مشابه آلیاژهای آلومینیوم تحت خمش نشان می‌دهند. در نهایت پس از عبور از نقطه تسلیم، این مواد انحراف قابل توجهی از حالت خطی

به‌عنوان یک قاعده کلی با توجه به افزایش لزجت در درصدهای بالاتر نانوذرات و احتمال بروز کلوخیدگی، فواصل بین لایه‌های سیلیکاتی در نمونه‌های حاوی ۰.۵٪، نانورس کم‌تر از نمونه‌های حاوی ۰.۳٪ نانوذرات است.

فاصله بین لایه‌های نسبتاً پایین  $d_{001}=1/49$  نانومتر در نمونه‌های 5 wt.% nano-M/1 نمایان‌گر روش اختلاط نامناسب نانورس در زمینه است که به عدم جدایش نانوذرات از یکدیگر و احتمالاً کلوخیدگی آن‌ها منجر شده است. البته واضح است که بدون در نظر گرفتن درصد وزنی نانوذرات در نانوکامپوزیت، استفاده از روش اختلاط ۲ و ۳ به ترتیب منجر به افزایش فواصل بین لایه‌های شده است. هرچند بررسی میزان افزایش فواصل بین لایه‌های در دو نانوکامپوزیت حاوی ۰.۳٪ و ۰.۵٪ نانوذرات، کارایی روش اختلاط ۲ و ۳ در نمونه‌های 3 wt.% nano-M را نسبت به 5 wt.% nano-M می‌دهد. عدم وجود قله مشخصی در الگوی پراش نمونه‌های 3 wt.% nano-M/3 نشان‌گر استفاده از روش اختلاط مناسب (روش ۳) و مقدار بهینه نانوذرات در این نوع نانوکامپوزیت است. عموماً عدم وجود قله در الگوی پراش، نشانه‌ای از ورقه-ای شدن کامل نانورس یا ایجاد ساختار بین لایه‌ای نامنظم با فواصل بین لایه‌ای است.

#### جدول ۴- زاویه جدایش و فاصله بین لایه‌ای

##### نانوکامپوزیت‌های نانورس/اپوکسی برحسب درصد نانوذرات و روش اختلاط

کد نمونه	$2\theta$ (°)	$d_{001}$ (nm)
3 wt.% nano-M/1	۵/۴۸	۱/۶۱
3 wt.% nano-M/2	۵/۲۷	۱/۶۷
3 wt.% nano-M/3	...	...
5 wt.% nano-M/1	۵/۹۲	۱/۴۹
5 wt.% nano-M/2	۵/۷۵	۱/۵۳
5 wt.% nano-M/3	۵/۵۲	۱/۶۰

<sup>1</sup> Peel Test

<sup>2</sup> Wedge Tear Test

<sup>3</sup> Lap Shear Test



به‌طور مثال در کامپوزیت‌های nano-GE/F1 5 wt.%، افزودن نانوذرات نه تنها منجر به افزایش استحکام خمشی نشده است، بلکه به کاهش ۰/۷۲٪ نسبت به حالت قبل از افزودن نانو ذرات انجامیده است؛ همچنین در تمامی حالات کامپوزیت‌های حاوی ۳٪ نانورس، استحکام خمشی بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های با ۵٪ نانورس نشان می‌دهند. این امر را می‌توان به ایجاد کلوخیدگی احتمالی نانورس در کامپوزیت‌های nano-GE 5 wt.% نسبت داد که علی‌رغم ایجاد سفتی مناسب، ساختار کامپوزیت را مستعد به بروز و رشد ترک در نقاط تجمع نانوذرات نموده است.

برخلاف تأثیر قابل توجه افزودن نانورس بر بهبود خواص خمشی کامپوزیت‌ها، خواص خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی پس از افزودن نانورس دچار تغییرات چندانی نشد. نتایج نشان‌دهنده مدول خمشی متوسط  $49/52 \pm 0/98$  گیگاپاسکال و استحکام خمشی متوسط  $563/0 \pm 15$  مگاپاسکال برای نمونه‌های FML/F است.

در روندی مشابه آنچه در نانوکامپوزیت‌های ساخته شده از طریق فرآیند ۳ مشاهده شد، چندلایه‌های الیافی فلزی نیز، بالاترین مقادیر خود را در این نوع فرآیند اختلاط نشان دادند. به این ترتیب، مقادیر مدول خمشی و استحکام خمشی نمونه‌های چندلایه الیافی فلزی هیبرید شده با نانوذرات 3 wt.% nano-FML/F3 و 5 wt.% nano-FML/F3 به ترتیب،  $49/77 \pm 1/01$  گیگاپاسکال و  $57/62 \pm 12$  مگاپاسکال و  $49/79 \pm 1/00$  گیگاپاسکال و  $57/18 \pm 13$  مگاپاسکال تعیین شد. این مقادیر گویای ارتقای اندک ۰/۵٪ و ۱/۳۵٪ در مقادیر مدول خمشی و استحکام خمشی در حضور ۳٪ وزنی نانورس در ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی است. به شکل مشابه ارتقای مدول خمشی و استحکام خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی در صورت استفاده از ۵٪ وزنی نانورس به ترتیب، ۰/۵۴٪ و ۱/۲۷٪ خواهد بود.

#### ۵-۲-۲- خواص ضربه‌ای

نتایج آزمون ضربه چرپی روی نمونه‌های کامپوزیتی و چندلایه‌های الیافی فلزی، در جداول ۷ و ۸ آمده است. نتایج حاکی از افزایش ۸ درصدی مقدار استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های nano-GE/I3 3 wt.% نسبت به

داشته، تا زمان رسیدن به تنش نهایی، دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شوند. در مقابل، نمونه‌های کامپوزیتی خالص و بهبود یافته توسط نانو ذرات تا قبل از رسیدن به حداکثر تنش خمشی، یک رفتار نسبتاً خطی از خود بروز می‌دهند.

در جداول ۵ و ۶، متوسط خواص خمشی نمونه‌های چندلایه الیافی فلزی و کامپوزیتی ساخته شده از رزین اپوکسی بهبود یافته با نانورس و رزین خالص، نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده مدول خمشی متوسط  $18/91 \pm 0/65$  گیگاپاسکال و استحکام خمشی متوسط  $449/50 \pm 7$  مگاپاسکال برای کامپوزیت‌های ساخته شده با رزین خالص است.

بالاترین خواص خمشی در بین نانوکامپوزیت‌ها، به نانوکامپوزیت‌های تولید شده توسط مجموعه‌ای از فرآیندهای اختلاط با همزن مکانیکی، هموزنایزر مکانیکی و هموزنایزر مافوق صوت اختصاص یافت. مقادیر مدول خمشی و استحکام خمشی نمونه‌های نانوکامپوزیت‌های هیبریدی nano-GE/F3 3 wt.% و nano-GE/F3 5 wt.% به ترتیب،  $20/43 \pm 0/74$  گیگاپاسکال و  $498/01 \pm 12$  مگاپاسکال و  $21/22 \pm 0/98$  گیگاپاسکال و  $478/13 \pm 8$  مگاپاسکال تعیین شد؛ بنابراین، افزودن ۳ درصد وزنی نانورس اثر قابل توجهی (بیش از ۱۰٪) بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های ساخته شده توسط فرآیند ۳ دارد. علاوه بر این، افزودن ۵ درصد وزنی نانورس افزایش ۱۲/۲۱٪ را در مقدار مدول خمشی کامپوزیت‌های ساخته شده با فرآیند ۳ ایجاد کرده است. این افزایش در خواص خمشی، احتمالاً به دلیل حضور لایه‌های سیلیکاتی روی سطح الیاف شیشه و بهبود چسبندگی سطحی بین زمینه اپوکسی و الیاف شیشه است [۳۷]. تحقیقات صورت گرفته توسط یوهال و همکاران [۳۸] نشان داده است، حضور نانورس منجر به سهولت در واکنش پیوندهای عرضی پلیمر شده، در نتیجه به افزایش چگالی پیوندهای عرضی می‌انجامد.

همچنین از بررسی نتایج می‌توان دریافت، صرف نظر از روش اختلاط، افزودن ۳٪ نانوذرات در تمامی حالات منجر به افزایش مدول و استحکام خمشی کامپوزیت‌ها شده است؛ در حالی که در کامپوزیت‌های حاوی ۵٪ نانوذرات، ارتقای استحکام خمشی به‌عنوان یک قاعده کلی مشهود نیست.

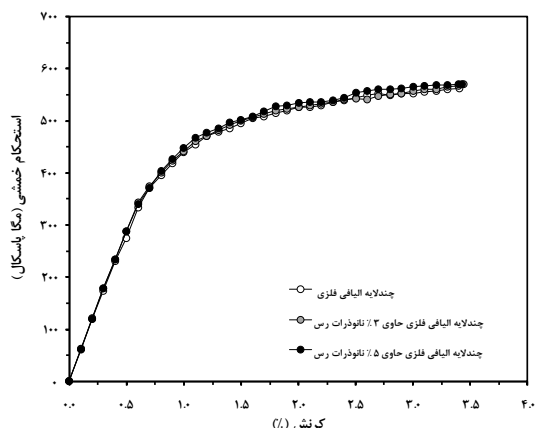
کامپوزیت‌های GE/I است. این در حالی است که افزودن ۳٪ نانورس در فرآیندهای اختلاط ۱ و ۲ به ترتیب، منجر به بهبود ۱/۵۰٪ و ۶/۵۲٪ در استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی شده است؛ همچنین استفاده از ۵٪ نانورس تحت فرآیندهای اختلاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، به بهبود ۰/۴۲٪، ۱/۳۴٪ و ۵/۶۸٪ در ساختار کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی انجامیده است؛ بنابراین نظیر آنچه در خاصیت استحکام خمشی کامپوزیت دیده شد، استفاده از ۳٪ نانورس در کلیه فرآیندهای اختلاط نسبت به ۵ درصد وزنی نانورس مزیت دارد.

جدول ۶- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای برای چندلایه‌های الیافی فلزی

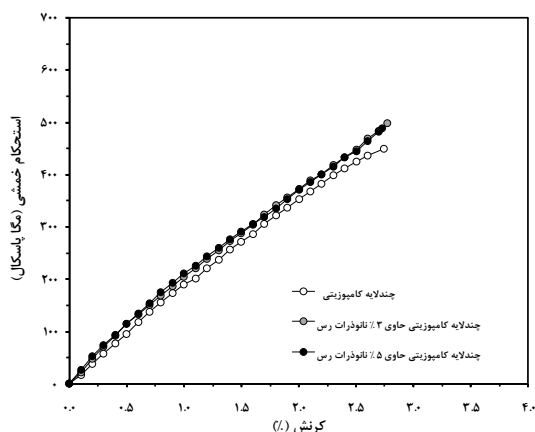
کد نمونه	مدول خمشی (گیگاپاسکال)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)
FML/F	۴۹/۵۲±۰/۵۸	۵۶۳/۰۰±۳
3 wt.% nano- FML/F1	۴۹/۶۱±۰/۱۸	۵۵۸/۳۷±۵
3 wt.% nano- FML/F2	۴۹/۶۰±۰/۴۲	۵۶۸/۳۹±۹
3 wt.% nano- FML/F3	۴۹/۷۷±۰/۶۱	۵۷۰/۶۲±۱۶
5 wt.% nano- FML/F1	۴۹/۵۸±۰/۶۸	۵۶۰/۴۷±۹
5 wt.% nano- FML/F2	۴۹/۶۳±۰/۴۹	۵۶۳/۱۸±۱۱
5 wt.% nano- FML/F3	۴۹/۷۹±۰/۶۰	۵۷۰/۱۸±۱۲

جدول ۷- نتایج آزمون ضربه چارپی برای چندلایه‌های کامپوزیتی

کد نمونه	استحکام ضربه‌ای (kJ/m <sup>2</sup> )
GE /I	۳۹۶/۵۵±۱۱
3 wt.% nano- GE /I1	۴۰۲/۴۶±۷
3 wt.% nano-GE/I2	۴۲۲/۳۸±۱۰
3 wt.% nano-GE/I3	۴۲۸/۲۴±۱۰
5 wt.% nano- GE/I1	۳۹۸/۱۹±۱۳
5 wt.% nano- GE/I2	۴۰۱/۸۳±۱۱
5 wt.% nano- GE/I3	۴۱۹/۰۳±۸



(الف)



(ب)

شکل ۷- نمودارهای تنش-کرنش خمشی نمونه‌های (الف) چندلایه الیافی فلزی و (ب) کامپوزیتی

جدول ۵- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای برای چندلایه‌های کامپوزیتی

کد نمونه	مدول خمشی (گیگاپاسکال)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)
GE/F	۱۸/۹۱±۰/۶۵	۴۴۹/۵۰±۷
3 wt.% nano-GE/F1	۱۸/۸۴±۰/۴۴	۴۵۳/۴۲±۳
3 wt.% nano-GE/F2	۱۹/۳۶±۰/۶۷	۴۷۴/۲۵±۹
3 wt.% nano-GE/F3	۲۰/۴۳±۰/۷۴	۴۹۸/۰۱±۱۲
5 wt.% nano-GE/F1	۲۰/۰۱±۰/۱۷	۴۴۶/۲۲±۳
5 wt.% nano-GE/F2	۲۰/۳۶±۰/۷۹	۴۵۲/۶۳±۹
5 wt.% nano-GE/F3	۲۱/۲۲±۰/۹۸	۴۵۸/۱۳±۸

ضربه‌ای نمونه nano-FML/II 5 wt.% کاهش ناچیز ۰/۱٪ را نسبت به نمونه عاری از نانورس نشان می‌دهد که با توجه به درصد وزنی بالای نانورس در این نمونه، می‌تواند دلیل توزیع نامناسب نانو ذرات و بروز کلوخیدگی در فرآیند شماره ۱ باشد.

### ۵-۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها به روش ناگوچی

به‌منظور تعیین درجه تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی بر خواص خمشی چندلایه‌ها، تحلیل سیگنال به نویز توسط نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. با توجه به این‌که مشخصه مدول و استحکام خمشی و ضربه‌ای می‌بایست تا حد امکان بیشینه باشد، در تحلیل سیگنال به نویز حالت پاسخ "بزرگتر-بهرتر" انتخاب شده است؛ بنابراین نسبت سیگنال به نویز به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

که در آن n تعداد تکرارها است و  $Y_i$  مشخصه موردنظر در تکرار i ام از یک طرح است. نتایج تحلیل سیگنال به نویز نمونه‌های چندلایه الیافی فلزی و کامپوزیتی در شکل‌های ۸ و ۹ در قالب خروجی نرم‌افزار ارائه شده است.

با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۸ مشخص می‌شود که در تعیین خواص خمشی نانوکامپوزیت‌های مورد مطالعه، روش اختلاط مؤثرتر از درصد وزنی نانورس است؛ همچنین شیب نمودار سیگنال به نویز-روش اختلاط از حالت ۲ به ۳ افزایش مشهودی یافته است که نمایان‌گر تأثیر چشم‌گیر روش اختلاط ۳ نسبت به سایر روش‌های اختلاط است. تأثیر منفی درصد بالای نانورس بر استحکام خمشی و ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌ها نیز، در شکل ۸-ب و شکل ۸-پ به‌وضوح مشخص است.

بررسی نتایج تحلیل سیگنال به نویز نمونه‌های چندلایه الیافی فلزی در قالب شکل ۹، گویای این امر است که روندی نسبتاً مشابه آنچه در نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شد در تعیین خواص خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی هیبرید شده با نانوذرات حاکم است.

مطابق شکل ۹-الف، افزایش ناگهانی شیب در نمودار سیگنال به نویز-روش اختلاط، حاکی از تأثیر چشم‌گیر روش اختلاط ۳ بر افزایش مدول خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی نسبت به سایر روش‌ها است. از دیگر نکات مهم قابل استناد در شکل ۹-الف، شیب نمودار سیگنال به نویز درصد وزنی

### جدول ۸- نتایج آزمون ضربه چارپی برای

#### چندلایه‌های الیافی فلزی

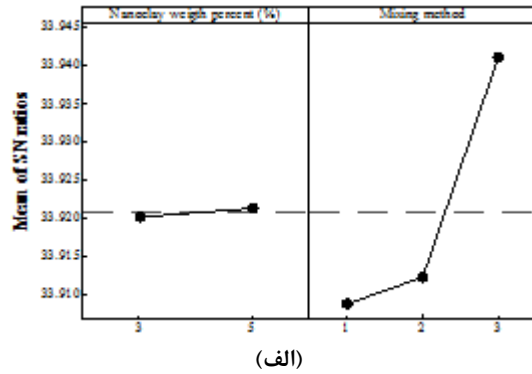
کد نمونه	استحکام ضربه‌ای (kJ/m <sup>2</sup> )
FML/I	۹۴۱/۴۱±۷
3 wt.% nano-FML/II	۹۴۳/۰۳±۹
3 wt.% nano-FML/II	۹۵۱/۸۱±۸
3 wt.% nano-FML/III	۹۷۸/۲۰±۴
5 wt.% nano-FML/II	۹۴۰/۴۲±۹
5 wt.% nano-FML/II	۹۶۶/۳۰±۷
5 wt.% nano-FML/III	۹۸۲/۵۳±۳

در حالت کلی، اختلاط مناسب نانورس در رزین می‌توان منجر به پرشدگی حفرات ماده زمینه شود که این امر به‌نوبه خود به بهبود نسبی خواص مکانیکی می‌انجامد. علت رفتار مناسب‌تر خواص در حالت استفاده از ۳٪ نانورس، احتمالاً به اختلاط مناسب‌تر نانو ذرات در این درصد وزنی ارتباط دارد. استفاده از درصد بالای نانورس هرچند در کلیه فرآیندهای اختلاط منجر به ارتقای خواص ضربه‌ای کامپوزیت شده است، اما همان‌طور که از نتایج آزمون XRD برمی‌آید، احتمال ایجاد کلوخیدگی نانو ذرات بیشتر شده که این امر می‌تواند به تشدید تردی ماده منجر شود. این افزایش تردی در درصد‌های وزنی بالای نانوذرات به‌همراه بروز تخریب‌های اولیه ناشی از تجمع نانوذرات به پایین‌آمدن قابلیت ارتقاء خواص مکانیکی نانوذرات در ساختار کامپوزیت می‌انجامد [۳۹].

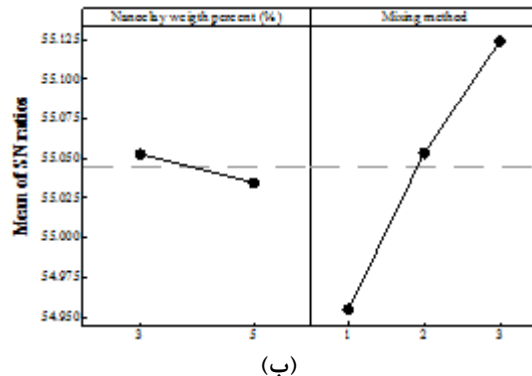
در مورد چندلایه‌های الیافی فلزی، نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن نانورس به زمینه اپوکسی مورد استفاده در ساختار چندلایه‌های هیبریدی اثر بهبوددهنده کمتری نسبت به کامپوزیت‌ها داشته است. این امر احتمالاً به کسر حجمی کمتر نانو ذرات در کل ساختار چندلایه‌های الیافی فلزی در مقایسه با نانوکامپوزیت‌ها مربوط می‌شود. به‌رحال با افزودن ۳٪ نانورس تحت فرایندهای ۱، ۲ و ۳، به ترتیب بهبود ملایم ۰/۱۷٪، ۱/۱۰٪ و ۳/۹۰٪ در استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی حاصل شده است. این مقادیر برای چندلایه‌های الیافی فلزی حاوی ۵٪ نانورس تحت فرآیند اختلاط ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۲/۶۴٪ و ۴/۳۶٪ است؛ همچنین استحکام

نانورس نیز همانند نانوکامپوزیت‌ها، روش اختلاط عامل مؤثر و تعیین‌کننده است. از طرف دیگر، نمودار سیگنال به نویز- درصد وزنی نانورس نشان می‌دهد که مشابه روند حاکم بر نانوکامپوزیت‌ها، تغییر درصد وزنی نانوذرات از ۳٪ به ۵٪، تأثیر منفی بر استحکام خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی

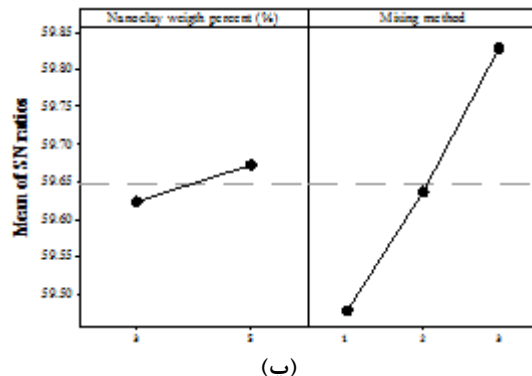
نانورس است. شیب اندک این نمودار، گویای این امر است که باوجود تأثیر مثبت افزایش درصد وزنی نانورس از ۳٪ به ۵٪، بهبود مدول خمشی در چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با نانورس، بسیار کمتر از مقادیر متناظر در نانوکامپوزیت‌های هیبریدشده با نانورس است.



(الف)

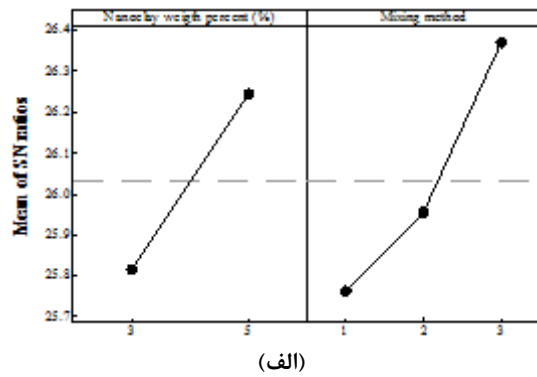


(ب)

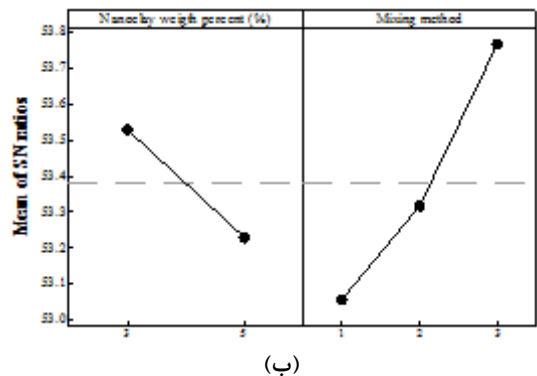


(پ)

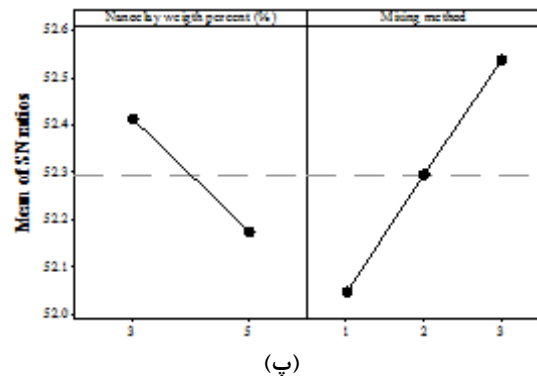
شکل ۹- تأثیر درصد وزنی نانورس و روش اختلاط بر (الف) مدول خمشی، (ب) استحکام خمشی و (پ) استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸- تأثیر درصد وزنی نانورس و روش اختلاط بر (الف) مدول خمشی، (ب) استحکام خمشی و (پ) استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی

جدول ۹- نتایج پیش‌بینی‌شده استحکام خمشی و ضربه‌ای توسط مدل تاگوچی برای چندلایه‌های الیافی فلزی

کد نمونه	استحکام ضربه‌ای (kJ/m <sup>2</sup> )	تفاوت با مقادیر تجربی (%)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	تفاوت با مقادیر تجربی (%)
3 wt.% nano- FML/F1	۹۴۳/۰۳	۰/۰۰	۵۶۰/۰۱	۰/۲۹
3 wt.% nano- FML/F2	۹۶۱/۹۷	۱/۰۵	۵۶۶/۳۷	۰/۳۵
3 wt.% nano- FML/F3	۹۷۸/۲۰	۰/۰۰	۵۷۰/۹۹	۰/۰۶
5 wt.% nano- FML/F1	۹۴۷/۳۷	۰/۷۳	۵۵۸/۸۲	۰/۲۹
5 wt.% nano- FML/F2	۹۶۶/۳۰	۰/۰۰	۵۶۵/۱۹	۰/۳۵
5 wt.% nano- FML/F3	۹۸۲/۵۳	۰/۰۰	۵۶۹/۸۰	۰/۰۷

فلزی، حاوی اطلاعات مفیدی در زمینه چگونگی تأثیر نانوذرات بر خواص مکانیکی این چندلایه‌ها است. به سبب تعدد بالای حالات آزمایش، در ادامه تصاویری از نمونه‌های تولید شده توسط رزین اپوکسی خالص، حاوی ۳٪ و ۵٪ نانورس ارائه شده که توسط فرآیند اختلاط ۳ تولید شده‌اند. در شکل ۱۰ نواحی شکست پس از آزمون خمش در کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس به شکل جدایش الیاف از زمینه<sup>۲</sup>، تورق<sup>۳</sup> و ترک‌خوردگی زمینه<sup>۴</sup> قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-پ مشخص است، میزان و وسعت ترک‌های تخریب ناشی از بارگذاری خمشی در نانوکامپوزیت‌ها، به‌مراتب کمتر از کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی (GE/F) است. احتمالاً می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از نانورس در زمینه پلیمری، چسبندگی بهتری بین الیاف و زمینه پلیمری ایجاد کرده، موجب تقویت فصل مشترک الیاف/زمینه و حفظ یکپارچگی کامپوزیت شده است [۳۲]؛ بنابراین می‌توان بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت تولید شده با رزین خالص را به بهبود خواص فصل مشترکی نسبت داد.

همچنین باید توجه داشت که لحظه آغاز ترک‌خوردگی و میزان ترک‌های ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی، عمدتاً نسبت مستقیم با مقادیر استحکامی ماده دارد که از این حیث

استحکام خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با نمودار ارائه شده در شکل ۹-ب بیان می‌کند که در بهبود هیبریدشده با نانورس دارد؛ اما مطابق شکل ۹-پ، افزایش نانوذرات نه تنها تأثیر منفی بر استحکام ضربه‌ای نداشته است، بلکه هر چند به‌صورت ملایم به بهبود این خاصیت منجر شده است.

به‌منظور تعیین دقت روش مورد استفاده در این پژوهش، مقایسه‌ای مابین نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط روش تاگوچی انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ قابل‌مشاهده است.

با توجه به گستردگی نتایج موجود، صرفاً مقادیر مربوط به استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی به‌عنوان نمونه در جدول ۹ درج شده است. همان‌گونه در این جدول قابل مشاهده است، به‌غیر از یک مورد، در تمامی نتایج، تفاوت مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده، کمتر از ۱٪ است. قاعدتاً این دقت بالای تخمین مدل توسط تاگوچی، نمایان‌گر اعتبار بالای مدل مورد استفاده در این پژوهش است.

#### ۵-۴- بررسی حالات شکست<sup>۱</sup>

##### ۵-۴-۱- آزمون خمش

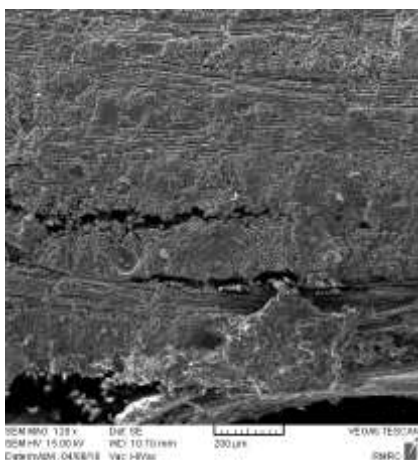
تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از ریزساختارهای نواحی شکست نمونه‌های مختلف کامپوزیتی و چندلایه‌های الیافی

<sup>2</sup> Fiber/Matrix Debonding

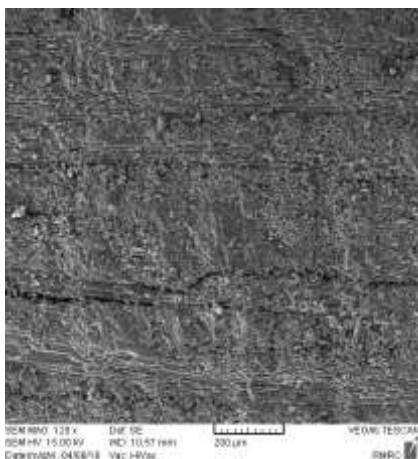
<sup>3</sup> Delamination

<sup>4</sup> Matrix Cracking

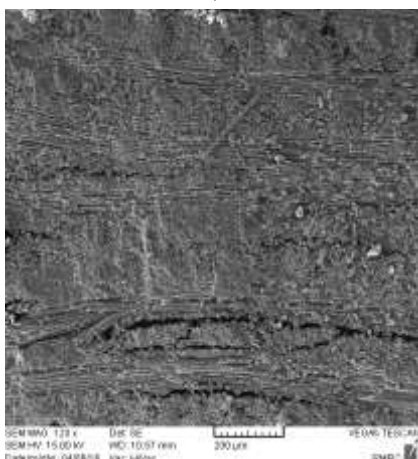
<sup>1</sup> Failure Modes



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۱۲۰ برابر مربوط به الف) GE/F، ب) 3 wt.% nano-GE/F3 و پ) 5 wt.% nano-GE/F3

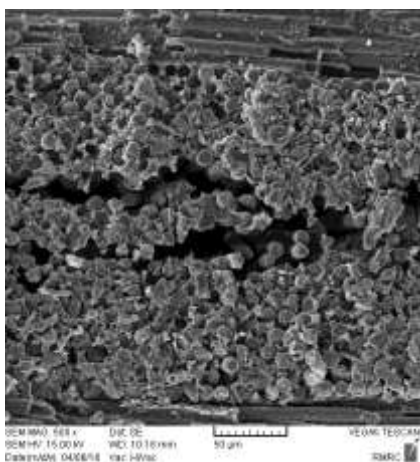
ریزساختارهای نشان‌داده شده در شکل ۱۰ با نتایج استحکام خمشی کامپوزیت‌ها تطابق مناسبی دارد.

الگوهای حاکم بر شکست خمشی در چندلایه‌های الیافی فلزی که عمدتاً شامل تغییر شکل پلاستیک ورق آلومینیومی، جدایش ورق فلزی از لایه کامپوزیتی و جدایش الیاف از زمینه است، در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

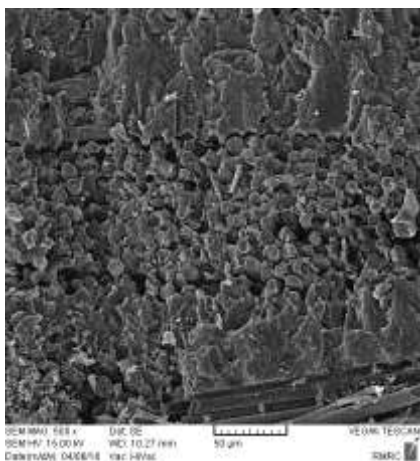
بررسی تصاویر میکروسکوپی حالات شکست چندلایه‌های الیافی فلزی، نمایان‌گر این امر است که نانورس تأثیر به‌سزایی در نحوه شکست خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی دارند. همان‌طور که در شکل ۱۱-ب و شکل ۱۱-پ قابل مشاهده است، اتصال ورق فلزی و لایه کامپوزیتی در چندلایه‌های الیافی فلزی حاوی نانو ذرات نسبت به حالت بدون استفاده از نانوذرات (شکل ۱۱-الف)، مناسب‌تر به نظر می‌رسد. این افزایش کیفیت اتصال احتمالاً مربوط به افزایش درگیر شدن سطح لایه کامپوزیتی حاوی نانورس در حفرات ایجادشده توسط فرآیند سایش مکانیکی و کروماتسازی روی سطوح ورق آلومینیوم است. البته این پدیده سطحی دارای یک محدوده بهینه است و با افزایش لزجت و کاهش قابلیت ترشوندگی و سیالیت رزین در درصدهای بالای نانوذرات ممکن است، دارای پیامدهای منفی نیز باشد [۴۰، ۴۱]. نشانه‌ای از این استدلال با مقایسه‌ای بین شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-پ، قابل مشاهده است که سطوح باقیمانده اتصال فلز به کامپوزیت در 5 wt.% nano-FML/F3 به مراتب کمتر از 3 wt.% nano-FML/F3 است.

#### ۵-۴-۲- آزمون ضربه

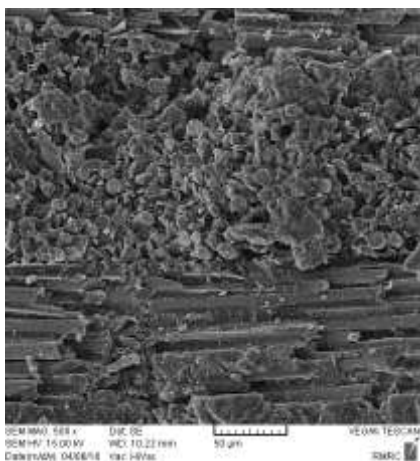
با توجه به ظاهر مایکروسکوپی نسبتاً یکسان حالات شکست در تمامی نمونه‌های کامپوزیتی آزمون ضربه، به‌منظور بررسی دقیق‌تر مکانیسم‌های شکست، تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر از مقطع شکست نمونه‌های کامپوزیتی پس از آزمون ضربه چارپی تهیه شد که در شکل ۱۲ ارائه شده است. با بررسی شکل ۱۲، تفاوت بارزی از لحاظ میزان تخریب در نمونه‌های نشان داده شده آشکار شد. آن چنان که در شکل ۱۲-الف مشخص است، میزان تخریب از نوع جدایش الیاف/زمینه در کامپوزیت عاری از نانورس به مراتب بیش از دو نوع نانو کامپوزیت حاوی ۳٪ و ۵٪ نانورس است.



(الف)

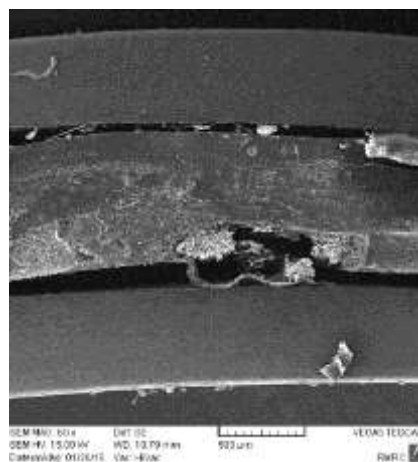


(ب)

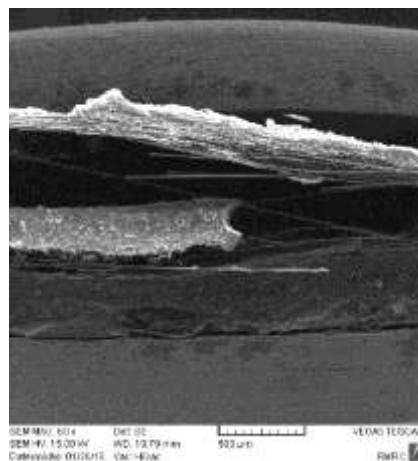


(پ)

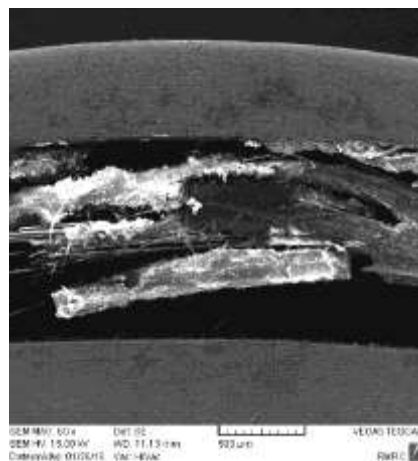
شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر مربوط به الف) GE/I، ب) 3 wt.% nano-GE/I3 و پ) 5 wt.% nano-GE/I3



(الف)



(ب)

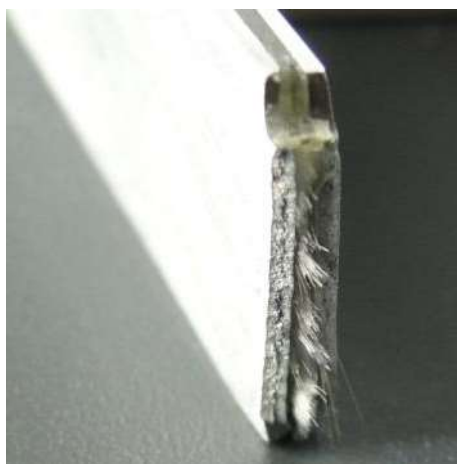


(پ)

شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۶۰ برابر مربوط به الف) FML/F، ب) 3 wt.% nano-FML/F3 و پ) 5 wt.% nano-FML/F3



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۳ تصاویری از سطوح شکست چندلایه‌های الیافی فلزی (الف) FML/I، (ب) 3 wt.% nano-FML/I3 و (پ) 5 wt.% nano-FML/I3

مسئلاً وجود فصل مشترک نسبتاً ضعیف الیاف/زمینه و وجود تخریب‌های اولیه در ماده پلیمری دلیل مناسبی برای پایین بودن خواص ضربه‌ای GE /I در مقایسه با 3 wt.% nano- GE /I3 و 5 wt.% nano- GE /I3 خواهد بود. تصاویر نشان داده شده در شکل‌های ۱۲-ب و ۱۲-پ، گویای وجود اتصال بسیار مناسب‌تر در ناحیه الیاف/زمینه است که به تبع منجر به بهبود خواص ضربه‌ای در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس شده است.

شکل ۱۳ تصاویری از چگونگی نحوه تخریب چندلایه‌های الیافی فلزی پس از انجام آزمون ضربه چارپی را نشان می‌دهد. از بررسی تصاویر سطوح شکست مشخص است که در تمامی نمونه‌ها، فرآیند ضربه با پارگی کامل ورق‌های آلومینیومی و دوتکه شدن نمونه، تغییر شکل پلاستیک فلز به شکل محدود، تورق بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی و شکست لایه‌های کامپوزیتی همراه است؛ همچنین با توجه به تصاویر شکل ۱۳-ب و ۱۳-پ می‌توان گفت که چندلایه‌های الیافی فلزی حاوی نانورس نیز همانند نمونه‌های کامپوزیتی هیبرید شده با نانورس، در مقایسه با نمونه‌های عاری از نانوذرات، رفتار بسیار مناسبی در حفظ انسجام ساختاری ماده پس از ضربه از خود بروز می‌دهند.

تصویر نمونه چندلایه عاری از نانورس (۱۳-الف)، نمایان‌گر وجود تورق وسیع در ناحیه لایه کامپوزیتی/لایه فلزی است، درحالی‌که در دو نمونه حاوی نانورس میزان تورق به میزان قابل توجهی کمتر است. همان‌گونه که در بخش حالات شکست نمونه‌های خمشی نیز اشاره شد، افزایش کیفیت اتصال در نمونه‌های حاوی ۰.۳٪ و ۰.۵٪ نانورس احتمالاً مربوط به ایجاد زبری ریزساختار در سطح ماده کامپوزیتی است که منجر به افزایش احتمال درگیر شدن سطح این لایه با حفرات موجود روی سطوح ورق آلومینیوم می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور تعیین اثر دو عامل نحوه فرآوری نانوذرات در رزین و درصد وزنی نانو ذرات بر خواص مکانیکی چندلایه‌های هیبریدی، آزمون خمش سه نقطه‌ای و ضربه چارپی روی چندلایه‌های الیافی فلزی و کامپوزیتی انجام شد. نمونه‌های کامپوزیتی توسط ده لایه الیاف بافته شده شیشه و رزین اپوکسی و چندلایه‌های الیافی فلزی توسط دو ورق از



- [3] Miyano Y, Nakada M, Ichimura j, Hayakawa E (2008) Accelerated testing for long-term strength of innovative CFRP laminates for marine use. *Compos Part B-Eng* 39(1): 5-12.
- [4] Poodts E, Ghelli D, Brugo T, Panciroli R, Minak G (2015) Experimental characterization of a fiber metal laminate for underwater applications. *Compos Struct* 129: 36-46.
- [5] Nanni A (1993) Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, *Developments in Civil Engineering*. E Science 42:450.
- [6] Curtis PT, More BB (1983) The effects of environmental exposure on the fatigue behavior of CFRP laminates. *Composites*, 14(3): 1015-1022.
- [7] Takafumi K, Pearson RA (2004) The moisture effect on the fatigue crack of glass particle and fibre reinforced epoxies with strong and weak bending conditions, Part 2. A microscopic study on toughening mechanism. *Compos Sci Technol*, 64: 1991-2007.
- [8] Vogelesang LB, Vlot A (2000) Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. *J of Mater Processing Technol* 103:1-5.
- [9] Young JB, Landry JGN, Cavoulacos VN (1994) Crack growth and residual strength characteristics of two grades of glass-reinforced aluminum GLARE. *Compos Struct* 27: 457-469.
- [10] Asundi A, Choi AYN (1997) Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. *J Mater Processing Technol* 63: 384-394.
- [11] Vasek A, Polak J, Kozak V (1997) Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate GLARE-2. *Mat Sci Eng*, 234(236): 621-624.
- [12] Sinke J (2006) Development of fibre metal laminates: concurrent multi-scale modeling and testing. *J Mater Sci*, 41: 6777-6788.
- [13] Kawai M, Arai Y (2009) Off-axis notched strength of fiber-metal laminates and a formula for predicting anisotropic size effect. *Compos Part A- Appl S* 40: 1900-1910.
- [14] Alderliesten RC, Hagenbeek M, Homan JJ, Hooijmeijer PA, De Vries TJ, Vermeeren CAJR (2003) Fatigue and Damage Tolerance of Glare. *Appl Compos Mater* 10: 223-242.
- [15] Yeh JR (1995) Fatigue crack growth in fiber-metal laminates. *Int J Solids Struct* 32(14): 2063-2075.
- [16] Guo YJ, Wu XR (1998) A theoretical model for predicting fatigue crack growth rates in fibre-reinforced metal laminates. *Fatigue Fract Eng M* 21: 1133-1145.
- [17] Guuik JW, Vlot A, Vries TJD, Hoeven WVD (2002) GLARE technology development. *Appl Compos Mater* 9: 201-219.

آلیاژ استحکام بالای آلومینیوم ۲۰۲۴ و همان رزین و الیاف ساخته شدند. نانورس در دو درصد وزنی ۰.۳٪ و ۰.۵٪ تحت فرآیندهای اختلاط توسط همزن مکانیکی، هموژنایزر مکانیکی سرعت بالا و هموژنایزر مافوق صوت به رزین اپوکسی خالص افزوده شد. نتایج حاکی از تأثیر مثبت نانورس بر خواص مکانیکی هر دو نوع چندلایه بود. هرچند که این تأثیر مثبت در چندلایه‌های کامپوزیتی نسبت به چندلایه‌های الیافی فلزی به مراتب مشهودتر بود. برای تعیین دقیق هر یک از عوامل یاد شده بر خواص خمشی و ضربه‌ای، طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی صورت گرفت. بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل سیگنال به نویز هر دو نوع چندلایه مشخص کرد که در تعیین خواص خمشی مواد مورد مطالعه، روش اختلاط مؤثرتر از درصد وزنی نانورس است. برتری روش اختلاط ۳ شامل استفاده ترکیبی از همزن مکانیکی، هموژنایزر مکانیکی سرعت بالا و هموژنایزر مافوق صوت نسبت به سایر روش‌های اختلاط نشان داده شد. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن مقادیر نانورس از ۰.۳٪ به ۰.۵٪، تأثیر مثبتی در افزایش مدول خمشی هر دو نوع چندلایه دارد. همچنین تأثیر منفی درصد بالای نانورس (۰.۵٪ نسبت به ۰.۳٪) بر استحکام خمشی و ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس به وضوح مشخص شد. در نهایت به منظور بررسی ریخت‌شناسی، کیفیت ساخت و شکل شکست نمونه‌ها، تصاویری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد. تصاویر نمایانگر تأثیر مثبت نانورس در حفظ انسجام و یکپارچگی کامپوزیت‌ها و افزایش کیفیت اتصال در فصل مشترک فلز و کامپوزیت در چندلایه‌های الیافی فلزی است. البته مشخص شد که به سبب بروز پدیده کلوخیدگی و کاهش لزجت و سیالیت رزین در درصدهای وزنی بالای نانورس، مقادیر بهینه استحکام خمشی، ضربه‌ای و اتصال لایه فلزی به لایه نانوکامپوزیتی در ۰.۳٪ نانورس رخ می‌دهد.

## ۷- مراجع

- [1] Mouritz AP, Gellert E, Burchill P, Challis K (2001) Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Compos Struct* 53(1): 21-42.
- [2] Chung K, Seferis JC, Nam JD (2000) Investigation of thermal degradation behavior of polymeric composites: prediction of thermal cycling effect from isothermal data. *Compos Part A- Appl S* 31(9): 945-957.

- [30] <http://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Araldite-LY5052-Aradur5052-e.pdf>.
- [31] <http://www.colan.com.au/compositereinforcement>.
- [32] Zainuddin S, Hosur MV, Zhou Y, Kumar A, Jeelani S (2010) Durability study of neat/nanophased GFRP composites subjected to different environmental conditioning. *Mat Sci Eng A-Struct* 527: 3091-3099.
- [33] Chowdhury FH, Hosur MV, Jeelani S (2006) Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates. *Mat Sci Eng A-Struct* 421: 298-306, 2006.
- [34] Lacombe R Adhesion measurement methods Theory and practice (2005). First ed., CRC Taylor and Francis.
- [35] Botelho, EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC (2006) A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *J Mater Res* 9(3): 247-256, 2006.
- [36] McDevitt NT, Braun WL The three point bend test for adhesive joints: formation, characteristics and testing (1984). K.L. Mittal ed., Plenum Press, New York.
- [37] Manfredi LB, De Santis H, Vázquez (2008) A Influence of the addition of montmorillonite to the matrix of unidirectional glass fibre/epoxy composites on their mechanical and water absorption properties. *Compos Part A-Appl S* 39:1726-1731, 2008.
- [38] Uhl FM, Davuluri SP, Wong SC, Webster DC (2004) Organically modified montmorillonites in UV curable urethane acrylate films. *Polymer* 45(18): 6175-6187.
- [39] Khan SU, Iqbal K, Munir A, Kim JK (2011) Quasi-static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. *Compos Part A-Appl S* 42: 253-264.
- [40] Zhai LL, Ling G, Wang YW (2008) Effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on adhesion strength of epoxy adhesive and steel. *Int J Adhes Adhes*, 28(1): 23-28.
- [41] Prolongo SG, Gude MR, Urena A (2010) Rheological behavior of nanoreinforced epoxy adhesives of low electrical resistivity for joining carbon fiber/epoxy laminates. *J Adhes Sci Technol* 24(6): 1097-1112.
- [18] Alawsi G, Aldajah S, Rahmaan SA (2009) Impact of humidity on the durability of E-glass/polymer composites. *Mater Design* 30(7): 2506-2512.
- [19] Brown JM, Curliss D, Vaia RA (2000) Thermoset-layered silicate nanocomposites. Quaternary ammonium montmorillonite with primary diamine cured epoxies. *Chem Mater* 12(11) 3376-3384.
- [20] Maul P (2005) Barrier Enhancements using Additives, in Fillers, Pigments and Additives for Plastics in Packaging Applications. Proc. Pira International Confer, Belgium.
- [21] Alamri H, Low IM (2012) Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites. *Mater Design* 42: 214-222.
- [22] Haque A, Shamsuzzoha M, Hussain F, Dean D (2003) S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. *J Compos Mater* 37(10) 1821-1837.
- [23] Kornmann X, Rees M, Thomann Y, Necola A, Barbezat M, Thomann R (2005) Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. *Compos Sci Technol* 65: 2259.
- [24] Rice BP, Chen C, Cloos L, Curliss D (2001) Carbon fibre composites: organoclay/aerospace epoxy nanocomposites. Part I. *Sampe J* 37(5): 7-9.
- [25] Pol MH, Liaghat GH, Mehrabani Yeganeh E, Afrouzian (2015) A Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites. In Persian, *Modares Mechanical Engineering* 14(16): 76-82.
- [26] Roelofs JCAA, Berben PH (2006) Preparation and performance of synthetic organoclays. *Appl Clay Sci* 33: 13-20.
- [27] Masoudi A, Liaghat GH, Pol MH (2014) Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation. In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, 14(7): 43-51.
- [28] Kaboudvand E, Esalmi Farsani R, Khosravi H (2016) Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes addition on flexural behavior of FML structures. In Persian, Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on new technology achievements in mechanical, industrials and aerospace engineering, Iran.
- [29] <http://www.millproducts-alcoa.com>.