

بررسی تأثیر عملیات سطحی و افزودن نانوذرات بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی با استفاده از روش رویه پاسخ

مسلم نجفی

رضا انصاری*

ابوالفضل درویشه

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در این مقاله، تأثیر فرآیندهای مختلف عملیات سطحی و افزودن نانورس بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، آلیاژ ۳۱۰۵ آلومینیوم تحت فرآیندهای مختلف آماده‌سازی شامل چربی‌زدایی، سایش مکانیکی، سونش شیمیایی، کرومات‌کردن و ترکیبی از این فرآیندها مورد عملیات سطحی قرار گرفت. سپس چندلایه‌های الیافی فلزی با استفاده از ورق‌های آلومینیوم، رزین اپوکسی خالص و بهبودیافته با نانورس و الیاف شیشه توسط روش لایه‌گذاری دستی تولید شدند. تأثیر فرآیندهای مختلف آماده‌سازی سطح و استفاده از نانوذرات بر خواص خمشی و ضربه‌ای نمونه‌ها با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که کرومات‌کردن سطح فلز مؤثرترین نقش را در افزایش خواص مکانیکی نمونه‌ها دارد. درحالی‌که چربی‌زدایی در بین فرآیندهای مختلف آماده‌سازی سطوح، کمترین اثر را در بهبود خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی دارا است. همچنین بررسی نتایج تحلیل عوامل تأثیرگذار اصلی نشان داد که به‌رغم نقش مفید نانورس در بهبود خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی، نقش فرآیندهای آماده‌سازی سطح مؤثرتر از افزودن نانوذرات است.

واژه‌های کلیدی: چندلایه‌های الیافی فلزی، عملیات سطحی، نانورس، خواص ضربه‌ای، خواص خمشی.

Investigating the Effects of Surface Treatment and Nanoparticles Addition on Mechanical Properties of FMLs Using the Response Surface Methodology

M. Najafi

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

R. Ansari

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

A. Darvizeh

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

In this paper, the effect of various surface treatment processes and nanoclay addition on the mechanical properties of fiber metal laminates is investigated. For this purpose, the aluminum alloy 3105 was surface treated under different processes includes degreasing, mechanical abrasion, chemical etching, chromate conversion treatment and combinations of these processes. Then, the fiber metal laminates were manufactured by aluminum sheets, pure epoxy resin and modified resin with nanoclay and glass fiber using hand lay-up process. The effect of different processes of surface treatments and using nanoparticles on the flexural and impact properties of the specimens was investigated using response surface method. The results obtained indicated that the chromate conversion treatment of metal surface has a most effective role in increasing the mechanical properties of the specimens. While, among different processes of surface treatments, degreasing has a less effective role in enhancement of mechanical properties of fiber metal laminates. The result of main effects analysis also showed that despite the useful role of nanoclay in improvement of the mechanical properties of fiber metal laminates, the role of surface treatment processes is more effective than nanoparticles addition.

Keywords: Fiber metal laminates, Surface treatment, Nanoclay, Impact properties, Flexural properties.

۱-مقدمه

آلومینیوم و کامپوزیت به‌عنوان دسته‌ای جدید از مواد کامپوزیتی هیبریدی معرفی شدند. با توجه به بهره‌گیری از خواص ترکیبی دو ماده در قالب یک ساختار واحد، این مواد دارای مزیت‌های قابل‌توجهی نظیر استحکام خستگی عالی، سفتی مناسب، مقاومت به ضربه بالا، چگالی پایین و مقاومت بالا به خوردگی و سایر شرایط محیطی هستند [۲، ۳]. با توجه به ماهیت ساختاری چندلایه‌های الیافی فلزی و وجود دو ماده کاملاً متفاوت در کنار یکدیگر، موضوع اتصال دو ماده به‌عنوان مهم‌ترین مسئله در طراحی، ساخت و کارکرد این مواد در نظر گرفته می‌شود [۴]. به‌رغم انجام تحقیقات وسیع، تا به امروز ضعف نسبی استحکام در ناحیه سطح مشترک فلز/کامپوزیت به‌عنوان بزرگ‌ترین چالش پیش روی توسعه این مواد مطرح است. وجود سطح مشترک نسبتاً ضعیف

در دهه هفتاد و در دانشگاه صنعتی دلف هلد، ایده استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری در قالب یک ماده ترکیبی به‌منظور غلبه بر معایب دو ماده (خواص ضربه‌ای نسبتاً ضعیف و حساسیت بالای مواد کامپوزیتی به شرایط محیطی و خواص خستگی پایین آلیاژهای آلومینیوم) مطرح شد [۱]. درنهایت، در آغاز دهه هشتاد، چندلایه‌های الیافی فلزی^۱ متشکل از لایه‌های متناوب

^۱ FMLs (Fiber Metal Laminates)

فلز/کامپوزیت، ساختار چندلایه‌های الیافی فلزی را مستعد به بروز و رشد ترک تحت بارگذاری‌های جانبی نموده است. واضح است که رشد ترک در سطح مشترک فلز/کامپوزیت، منجر به کاهش استحکام فشاری و ضربه‌ای در چندلایه‌های الیافی فلزی خواهد شد. به‌منظور مرتفع نمودن این مشکل، روش‌های متعدد آماده‌سازی سطح نظیر آماده‌سازی مکانیکی و شیمیایی، آندایزینگ^۱، الگودار نمودن سطوح و استفاده از عوامل جفت‌کننده^۲ توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۵، ۶].

یون و همکاران [۷] تحقیقاتی را بر روی تأثیر مورفولوژی سطح در استحکام چسبی اتصالات استیل/کامپوزیت انجام دادند. آن‌ها از طریق روش خطوط میکرو-دوره‌ای سطح فلز را الگودار نمودند. این محققان گزارش نمودند که افزایش استحکام سطحی ناشی از اصلاح توپوگرافی سطح فلز منجر به گذر از حالت شکست بین‌سطحی بین دو ماده به شکست برشی در درون یک ماده شده است.

آلفانو و همکاران [۸] تأثیر پرتوافکنی لیزر را بر اتصال آلومینیوم/پوکسی توسط پرتوافکنی ایتربیم^۳ بر سطح آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بهبود مورفولوژی سطح منجر به ایجاد مکانیسم در هم قفل‌شدگی مکانیکی می‌شود که در نهایت به بهبود اتصال آلومینیوم/پوکسی می‌انجامد.

علاوه بر روش‌های اصلاح مورفولوژی سطح، اخیراً تلاش‌هایی در زمینه افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و بهبود چقرمگی سطح مشترک فلز/کامپوزیت توسط نانوذرات گزارش شده است. بهره‌گیری از نانومواد نظیر نانولوله‌های کربن و نانورس با ویژگی‌های منحصربه‌فرد منجر به بهبود استحکام، سفتی، مقاومت حرارتی، پایداری ابعادی، و بهبود خواص سطح مشترکی شده است [۹، ۱۰].

هاک و همکاران [۱۱] در تحقیقاتشان نشان دادند که با استفاده از درصد بسیار پایینی از نانورس، افزایش قابل‌توجهی 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/پوکسی حاوی نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف شیشه/پوکسی معمولی بود. ایجاد فصل مشترک مستحکم بین ماده زمینه پلیمری و نانورس دلیل اصلی بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های ساخته‌شده از این مواد عنوان شد.

پل و همکاران [۱۲] نشان دادند که میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/پوکسی 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.

اگرچه امروزه تأثیر بهبوددهندگی بسیاری از نانومواد در کامپوزیت‌ها امری اثبات شده است، ولی استفاده از آن‌ها در مواد پیشرفته‌تری نظیر چندلایه‌های الیافی فلزی به موارد بسیار خاص محدود شده است.

کیودوند و همکاران [۱۳] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی ساخته شده از آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم و لایه‌های الیاف شیشه/پوکسی را بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده بهبود ۲۵/۷٪ در استحکام خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۳٪ نانولوله کربنی نسبت

به نمونه‌های عاری از نانولوله‌های کربنی بود. همچنین تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌ها نمایان‌گر بهبود چسبندگی سطح مشترک فلز/کامپوزیت در نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی بود.

ژانگ و همکاران [۱۴] به مطالعه اثر نانولوله‌های کربنی چنددیواره بر خواص خمشی و ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی پرداختند. نتایج حاکی از افزایش چشم‌گیر خواص خمشی و ضربه‌ای در چندلایه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی بود. این بهبود خواص در مقادیر پایین‌تر نانولوله به سبب توزیع مناسب آن در زمینه مشهودتر بود.

نینگ [۱۵] در تحقیقاتش در زمینه روش‌های بهبود خواص برشی چندلایه‌های الیافی فلزی ساخته شده از الیاف کربن، از سه روش سونش شیمیایی، الگودار نمودن مکانیکی و افزودن نانوالیاف کربن استفاده نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده همزمان از سونش اسیدی و نانوالیاف کربن به ترتیب منجر به افزایش ۶۵٪ و ۱۷۶٪ در مقادیر چقرمگی شکست مود اول و دوم می‌شود.

مقاله حاضر برای اولین بار، تأثیر نانورس و عملیات سطحی مختلف بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی را مورد بررسی قرار داده است. در این پژوهش ابتدا چندلایه‌های الیافی فلزی توسط ورق‌های آلومینیوم عملیات سطحی شده و رزین اپوکسی خالص و بهبودیافته توسط نانورس ساخته شدند. سپس با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، خواص خمشی، ضربه‌ای و تحلیل میکروسکوپی سطوح شکست مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت.

۲- مواد و ساخت

۲-۱- مواد

رزین اپوکسی دو جزئی آرالدیت ام-ال ۵۰۵^۴ همراه با عامل پخت آج-ای ۱۳^۵، عرضه‌شده توسط شرکت مواد مهندسی مکر^۶ کشور ایران، به‌عنوان ماده زمینه پلیمری انتخاب شد. نانورس معدنی مورد استفاده در این مطالعه مونتموریلونیت کا-۱۰ شرکت سیگما آلدردیج^۷ ایالات‌متحده است. پارچه بافت ساده شیشه نوع ای^۸ با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر مترمربع از شرکت کولان^۹ استرالیا خریداری شد. آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ نیز از شرکت آلومینیوم ایران تهیه شد.

۲-۲- آماده‌سازی سطحی

برای ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی از ورق‌های مربع شکل آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ با ابعاد ۴۰۰ میلی‌متر × ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شد. پیش از اتصال ورق‌های فلزی به لایه‌های کامپوزیتی، از روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی برای افزایش کیفیت اتصال استفاده شد.

در فرآیند شماره ۱ ورق‌های فلزی صرفاً چربی‌زدایی شدند. علی‌رغم سهولت عملیات فوق، مرحله چربی‌زدایی اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه آلودگی‌های موجود در سطح ورق، از برقراری حداقل اتصال مانعت به عمل می‌آورد. مرحله چربی‌زدایی معمولاً توسط حلال‌های کلردار نظیر

^۴ Araldite ML-505

^۵ HA-13

^۶ Mokarrar Industrial Group

^۷ Sigma-Aldrich Co.

^۸ E-Glass Fabric

^۹ Colan Products Pty

^۱ Anodizing

^۲ Coupling agents

^۳ Ytterbium

هیلشر یو-آی-پی ۱۰۰۰ اچ دی^۳ 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 گاززدایی واقع شد.

لازم به ذکر است با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در زمینه مقادیر بهینه نانورس در رزین‌های اپوکسی، به منظور ارزیابی تأثیر نانورس بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی، دو سطح ۳ و ۵ درصد وزنی نانوذرات به عنوان سطوح اختلاط نانورس در رزین اپوکسی در نظر گرفته شد. در جدول ۱ متغیرهای ورودی طراحی آزمایش‌ها شامل درصد وزنی نانوذرات و روش آماده‌سازی سطحی به همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۱- متغیرهای ورودی و سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها

متغیر ورودی	سطوح		
	۱	۲	۳
درصد وزنی نانورس (%)	۰	۳	۵
روش آماده‌سازی سطحی	چربی-زدایی	چربی‌زدایی + سایش مکانیکی + اسیدشویی و بازشویی	چربی‌زدایی + سایش مکانیکی + اسیدشویی و بازشویی + کروماته کردن

۴-۲- فرآیند ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی

چندلایه‌های الیافی فلزی مورد استفاده در این پژوهش، با لایه‌چینی متناوب دو لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بین سه ورق آلومینیوم با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر در قالبی مربع شکل ساخته شدند. رزین اپوکسی خالص و غنی‌شده با ۳ و ۵ درصد وزنی نانورس به‌طور کامل با عامل پخت در نسبت ۱۰۰ به ۱۵ مخلوط شد. سپس فرآیند اختلاط با استفاده از یک مخلوط‌کن مکانیکی با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. پس از آن، مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه مورد گاززدایی قرار گرفت. از روش لایه‌گذاری دستی^۴ برای تولید چندلایه‌های الیافی فلزی استفاده شد. پس از آن، چندلایه‌ها برای مدت یک روز در خلأ ۶۰- کیلو پاسکال در دمای محیط تحت عملیات مکش 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 سلسیوس به مدت ۴ ساعت در اتوکلاو قرار گرفت.

۵-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها از صفحات چندلایه‌های الیافی فلزی با ابعاد مورد نظر توسط یک دستگاه برش جت آب برش داده شدند. همه نمونه‌ها با استفاده از یک کاغذ سنباده نرم آماده‌سازی شدند. بدین ترتیب، ناهمگونی‌های موضعی مواد از نمونه‌ها زدوده شد.

در این مقاله برای نشان دادن چندلایه‌های الیافی فلزی از کد FML

تری کلرواتیلن، تری کلرواتان، و یا دی کلرومتان، و یا دیگر حلال‌های غیر کلری از جمله متانول، تولوئن و یا استون انجام می‌شود [۱۶]. در این پژوهش، چربی و سایر آلودگی‌ها توسط استون از ورق‌ها زدوده شدند.

سایش مکانیکی ورق‌های فلزی توسط کاغذ سنباده از روش‌های متداول ایجاد زبری سطح در مقیاس ماکرو به شمار می‌آید. در این روش، سایش مکانیکی منجر به ایجاد یک مورفولوژی موسوم به "قله-دره" در سطح فلز می‌شود. معمولاً فرآیند چربی‌زدایی مکمل این مرحله از آماده‌سازی سطوح محسوب می‌شود. در فرآیند شماره ۲ ورق‌های فلزی توسط کاغذ سنباده کاربید سیلیسیم با نمره ۲۲۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ در دو جهت ساییده شده و سپس توسط استون چربی‌زدایی شدند. پس از فروبردن ورق‌های چربی‌زدایی شده در یک سینی آب داغ و شستشوی کامل، ورق‌ها در محلول ۵٪ هیدرواکسید سدیم، برای مدت زمان ۱۰ دقیقه در دمای اتاق تحت سونش^۱ قرار گرفتند. سپس ورق‌ها مجدداً به‌طور کامل توسط آب گرم شستشو داده شدند. برای اطمینان از تمیزی کامل ورق‌ها از ذرات هیدرواکسید سدیم، اسیدشویی از طریق غوطه‌وری کامل ورق‌ها در محلول متشکل از سولفات فریک و اسیدسولفوریک انجام شد، و پس از آن شستشو توسط آب گرم صورت گرفت.

یکی از فرآیندهای مهم پوشش‌های تبدیلی، کروماته کردن است که در دو دهه اخیر گسترش قابل توجهی یافته است. با انجام این فرآیند، پوشش محافظ تبدیلی شامل ترکیبات کروم سه‌ظرفیتی و شش ظرفیتی بر روی سطح فلز ایجاد می‌شود. این لایه، اتصال محکمی با فلز پایه داشته و عملاً در آب و محیط واسطه نامحلول است. افزایش مقاومت به خوردگی، بهبود مقاومت به خراش‌های سطحی و افزایش میزان چسبندگی از مزایای استفاده از این روش محسوب می‌شود. بنابراین در فرآیند شماره ۳ برای بهبود اتصال سطح مشترک فلز/کامپوزیت از این روش استفاده شد. به این منظور پس از انجام فرآیند شماره ۲، عملیات کروماته‌کردن توسط غوطه‌ورکردن ورق‌ها در حمام متشکل از CrO_3 ، $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ و NAF در دمای اتاق انجام شد و ورق‌ها پس از شستشو توسط آب، در دمای اتاق خشک شدند.

۳-۲- اختلاط نانورس و رزین اپوکسی

ابتدا به منظور کاهش لزجت رزین و برای اختلاط مناسب‌تر نانوذرات در آن، مقدار مورد نظر از رزین اپوکسی در حمام روغن در دمای ثابت ۶۰ درجه سلسیوس گرم شد. سپس نانورس در نسبت‌های مختلف به رزین اپوکسی افزوده شده و عمل اختلاط با استفاده از همزن مکانیکی برای مدت زمان ۵ ساعت انجام شد.

در مرحله بعد، مخلوط نانورس و اپوکسی توسط یک همگن‌کن آیکا- تی ۲۵ استانفن^۲ کشور آلمان با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه همگن شد. حین انجام عملیات همگن‌سازی، به منظور اجتناب از گرمای بیش‌از حد، دمای مخلوط در محدوده 5 ± 60 درجه سلسیوس توسط حمام یخ ثابت نگه داشته شد.

پس از همگن‌سازی مکانیکی، برای پراکنده‌سازی بیشتر نانورس در زمینه اپوکسی، مخلوط توسط یک دستگاه همگن‌کن مافوق صوت

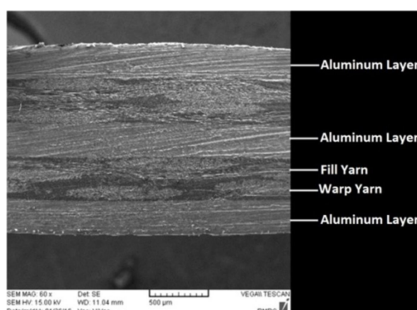
^۳ UIP1000hd, Hielscher

^۴ Wet lay-up process

^۱ Etch

^۲ IKA T25 Ultra-Turrax, Stanfen

استفاده شده است. همچنین درصد نانوذره در قالب پیشوند قبل از هر نوع نمونه اشاره شده است. اعداد ۱ تا ۳ بیانگر نحوه آماده سازی سطحی مطابق جدول ۱ است. به عنوان مثال، نمونه چندلایه الیافی فلزی حاوی ۳٪ نانورس و سطح آماده سازی شده از طریق روش ۳ تحت عنوان 3 wt.% nano-FML/3 کدگذاری شده است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی از مقطع نمونه چندلایه الیافی فلزی

۳- مشخصه سازی

۳-۱- آزمون ضربه چارپی

نمونه های آزمون ضربه چارپی توسط یک ماشین آونگی توری شرکت ام-اف-جی^۱ کشور ژاپن و بر اساس ASTM D 6110 مورد آزمایش قرار گرفتند. این دستگاه به یک چکش چارپی با طول ۷۵۰ میلی متر و با حداکثر سرعت ضربه ۵/۱ متر بر ثانیه مجهز بود. یک فاق ۷ شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ریشه ۲/۵۴ میلی متر در یک طرف نمونه ها ایجاد شد. ابعاد نمونه های آزمون ضربه ۱/۹ × ۱۲/۷ × ۶۰ میلی متر مکعب بود. آزمایش در دمای ۲ ± ۲۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵ ± ۴۰٪ انجام شد. همچنین به منظور اطمینان از نتایج آزمون، سه نمونه برای هر نوع ماده مورد آزمایش قرار گرفت.

۳-۲- آزمون خمش

آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس استاندارد ASTM D 790 و با استفاده از یک دستگاه تست یونیورسال هانسفیلد^۲ ساخت انگلستان انجام شد. ابعاد اسمی برای نمونه های آزمون ۱/۹ × ۱۲/۷ × ۱۰۰ میلی متر مکعب بود. آزمون در دمای ۲ ± ۲۳ درجه سلسیوس 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.

۳-۳- ارزیابی پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس از نانورس و نانوکامپوزیت ها توسط یک دستگاه پائالیتیکال^۳ ساخت کشور هلند مجهز به یک منبع تابش Cu Kα (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.

۳-۴- ارزیابی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی ریخت-شناسی، کیفیت ساخت و شکل شکست بر روی نمونه ها انجام شد. میکروگراف های میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست (پس از آزمون ضربه و خمش) در بزرگنمایی های مختلف با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی وگا تی اسکن^۴ ساخت جمهوری چک به دست آمد. شکل ۱ مقطعی از چندلایه الیافی فلزی مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد. تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی

۴- طراحی آزمایش ها^۵ به روش رویه پاسخ

به منظور بررسی اثر عوامل مختلف و برهمکنش آنها بر خواص مکانیکی چندلایه الیافی فلزی، با استفاده از نرم افزار مینی تب^۶، طراحی آزمایش ها به روش رویه پاسخ صورت گرفت. روش رویه پاسخ یک رهیافت آماری مبتنی بر اطلاعات واقعی استخراج شده از آزمایش های تجربی یا شبیه سازی کامپیوتری است که منجر به توسعه یک مدل تخمینی می گردد [۱۷]. کاربرد این روش در کاهش هزینه تحلیل های پرخرج نظیر روش های اجزای محدود، تحلیل های دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه سازی پاسخ به اثبات رسیده است. همچنین به سبب عملی بودن، بازدهی مناسب و سهولت در اجرا، از این روش در صنایع مختلف نظیر صنایع شیمیایی، نیمه رساناها، الکترونیک، ماشین کاری و برش فلزات استفاده می شود.

در این پژوهش، از رگرسیون رویه پاسخ به منظور ارائه یک معادله ریاضی درجه دوم کامل برای تعیین خواص مکانیکی به عنوان پاسخ استفاده شده است. یک مدل تجربی رویه پاسخ از نوع چندجمله ای درجه دوم به شکل زیر قادر به ارزیابی پارامتری عوامل مختلف مؤثر در خواص مکانیکی چندلایه الیافی فلزی خواهد بود.

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در این رابطه $f(x)$ به عنوان پاسخ یعنی خواص مکانیکی در نظر گرفته می شود. ضرایب β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} به ترتیب به عنوان ضرایب رگرسیونی عرض از مبدأ، خطی، درجه دوم و برهمکنشی در نظر گرفته شده اند. x_i و x_j متغیرهای وابسته هستند. جدول ۲ نشان دهنده حالات مختلف آزمایش بر اساس متغیرهای ورودی عملیات سطحی فلز و درصد وزنی نانورس در تعیین خواص مکانیکی چندلایه الیافی فلزی است.

¹ Torsee, MFG. CO., Ltd.

² Hounsfield

³ PANalytical X'Pert PRO MPD

⁴ Scanning electron microscopic (SEM)

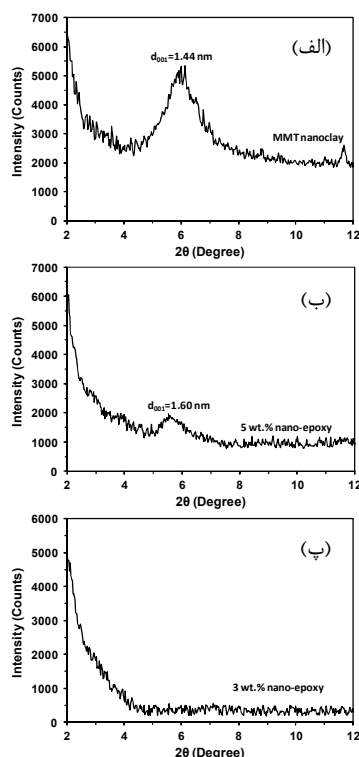
⁵ VEGA, TESCAN

⁶ Design of Experiment (DOE)

⁷ Response surface methodology (RSM)

⁸ Minitab

ضرب منطری لایه‌های نانورس، حالت ورقه‌ای شدن کامل به ایجاد سطح تماس بیشتر بین زنجیره‌های پلیمر و لایه‌های نانورس می‌انجامد که طبعاً با بهبود قابل ملاحظه خواص مکانیکی همراه خواهد بود [۱۹].



شکل ۲- الگوی پرتو ایکس از (الف) نانورس خالص، (ب) نانوکامپوزیت حاوی ۵٪ وزنی نانورس، (پ) نانوکامپوزیت حاوی ۳٪ وزنی نانورس

۵-۲- تحلیل واریانس و برآورد مدل

از نرم‌افزار مینی‌تب نسخه ۱۷ به‌منظور یافتن بهترین مدل تشریح-کننده خواص مکانیکی چندلایه الیافی فلزی مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شد. در روش طراحی فاکتوری معمولاً از تحلیل واریانس^۳ به‌منظور تعیین اهمیت مؤلفه‌های اصلی یک مدل و برهمکنش آن‌ها استفاده می‌شود. در جدول ۳ به‌عنوان یک نمونه تحلیل واریانس استحکام ضربه‌ای بر اساس ورودی‌های مختلف در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که در تحلیل واریانس از رگرسیون برای استخراج یک مدل تجربی منطبق با خروجی‌های آزمون ضربه استفاده شده است. دقت این مدل تجربی توسط ضریب R^2 صحت‌سنجی می‌شود. مقدار محاسبه‌شده R^2 بیش از ۹۹٪ است که به‌نوعی نمایان‌گر این امر است که مدل پیشنهادشده با دقت بسیار مناسبی قادر به تشریح رابطه مابین متغیرهای مستقل و پاسخ است. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۳ مقدار پی^۴ برای دو متغیر ورودی کمتر از ۰/۰۵ است که از لحاظ آماری گویای تأثیرگذاری بالای این دو متغیر بر روی پاسخ است. همچنین مقدار پی مدل نیز برابر با صفر است که نشان از تأثیرگذاری بالای مدل بر پاسخ دارد.

جدول ۲- حالات مختلف آزمایش‌ها بر اساس متغیرهای ورودی

کد نمونه	درصد وزنی نانورس (%)	روش آماده‌سازی سطحی
0 wt.% nano-FML/1	۰	۱
0 wt.% nano-FML/2	۰	۲
0 wt.% nano-FML/3	۰	۳
3 wt.% nano-FML/1	۳	۱
3 wt.% nano-FML/2	۳	۲
3 wt.% nano-FML/3	۳	۳
5 wt.% nano-FML/1	۵	۱
5 wt.% nano-FML/2	۵	۲
5 wt.% nano-FML/3	۵	۳

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تحلیل پراش پرتو ایکس

به‌منظور درک ویژگی‌های ساختاری نانورس/اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه چندلایه‌های ساخته‌شده در این پژوهش، نانورس خالص و نانوکامپوزیت‌های حاوی ۳٪ و ۵٪ وزنی نانورس، توسط آزمون پراش پرتو ایکس مورد ارزیابی قرار گرفتند. اطلاعات به‌دست‌آمده از پراش پرتو ایکس نانورس خالص نشان داده شده در شکل ۲-الف حاکی از وجود یک قله پراش نوک‌تیز در زاویه جدایش $2\theta = 6.0^\circ$ در فاصله بین‌لایه‌ای $d_{001} = 1.44$ نانومتر است. در انتهای نمودار یک قله با شدت پایین‌تر در $2\theta = 11.69^\circ$ در فاصله بین‌لایه‌ای $d_{001} = 0.76$ نانومتر مشهود است.

در تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت‌های حاوی ۵٪ نانورس یک قله پراش عریض در زاویه جدایش $2\theta = 5.52^\circ$ در فاصله بین‌لایه‌ای $d_{001} = 1.60$ نانومتر مشهود است (شکل ۲-ب). افزایش فاصله بین‌لایه‌ای نسبت به حالت نانورس خالص، به مولکول‌های اپوکسی اجازه می‌دهد تا بین لایه‌های سیلیکاتی نانورس نفوذ کنند که این عمل منجر به جهت‌گیری مناسب‌تر اپوکسی در بین این لایه‌ها شده و با ایجاد یک ساختار منظم تکراری، طبعاً به افزایش خواص مکانیکی منجر خواهد شد [۱۸]. البته وجود قله در نمودار پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت حاوی ۵٪ نانورس، نشان‌گر این امر است که نانوذرات بدون رسیدن به حالت ورقه‌ای کامل، یک ساختار بین‌لایه‌ای^۱ در زمینه اپوکسی تشکیل داده‌اند. همچنین تغییر مکان قله در مقایسه با نانورس خالص حاکی از ایجاد تغییرات ساختاری در شبکه پلیمری است. به‌عنوان یک قاعده کلی با توجه به افزایش لزجت در درصدهای بالاتر نانوذرات و احتمال بروز کلوخیدگی، فواصل بین‌لایه‌ای سیلیکاتی در درصدهای بالای نانورس کوچک‌تر از نمونه‌های حاوی درصدهای پایین‌تر نانورس است.

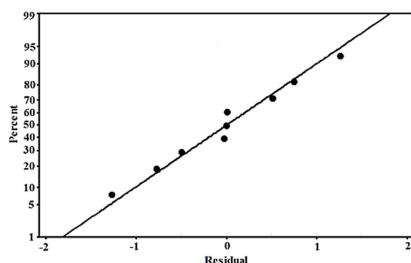
حذف قله مربوط به ناحیه بلورین نانورس در الگوی پراش نمونه‌های حاوی ۳٪ نانورس، نشان‌گر مقدار بهینه نانوذرات در این نانوکامپوزیت است (۲-پ). عموماً عدم وجود قله در الگوی پراش، نشانه‌ای از ورقه‌ای شدن کامل نانورس، ایجاد یک ساختار لایه‌لایه^۲ در زمینه اپوکسی و توزیع بهینه‌تر نانوذرات حین فرایند اختلاط است. با توجه به بالا بودن

^۳ ANOVA

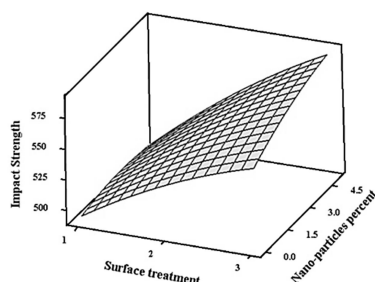
^۴ P value

^۱ Intercalated structure

^۲ Exfoliated structure

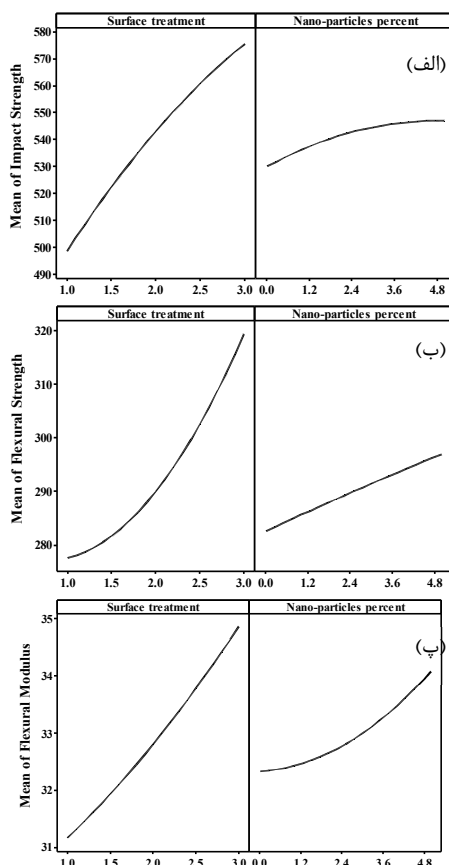


شکل ۳- نمودار احتمال نرمال برای استحکام ضربه‌ای



شکل ۴- نمودار رویه پاسخ تولیدشده برای استحکام ضربه‌ای

معمولاً برای ارزیابی دقیق‌تر میزان اثر هر یک از عوامل ورودی، از نمودارهای موسوم به عوامل تأثیرگذار اصلی که در شکل ۵ نشان داده شده است استفاده می‌شود.



شکل ۵- تأثیر عوامل اصلی برای (الف) استحکام ضربه‌ای، (ب) استحکام خمشی، (پ) مدول خمشی

معادلات (۲-۴) به ترتیب بیان‌گر معادله تجربی تخمین استحکام ضربه‌ای (IS)، استحکام خمشی (FS) و مدول خمشی (FM) به‌عنوان تابعی از متغیرهای درصد نانورس (N) و عملیات سطحی (T) هستند.

$$IS = 444.32 + 5.08T + 0.86N - 6.10T^2 - 0.75N^2 + 3.13TN \quad (2)$$

$$FS = 284.40 - 17.80T - 0.84N + 8.46T^2 - 0.04N^2 + 1.95TN \quad (3)$$

$$FM = 1295 - 1868T + 268N - 530T^2 - 106N^2 + 293TN \quad (4)$$

جدول ۳- تحلیل واریانس برای استحکام ضربه‌ای

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات اصلاح‌شده	میانگین مربعات اصلاح‌شده	مقدار پی
مدل	۵	۹۹۷۰/۹۶	۱۹۹۴/۱۹	۰/۰۰۰
آماده‌سازی سطحی	۱	۸۸۴۳/۴۴	۸۸۴۳/۴۴	۰/۰۰۰
درصد وزنی نانورس	۱	۴۵۲/۸۸	۴۲۵/۸۸	۰/۰۰۱
آماده‌سازی سطحی × درصد وزنی نانورس	۱	۲۴۸/۹۲	۲۴۸/۹۲	۰/۰۰۱
خطا	۳	۴/۸۷	۱/۶۲	
		$R^2 = ۹۹/۹۵$	$R^2 (adj) = ۹۹/۸۷$	$S = ۱/۲۷۳۷۱$

لازم به‌ذکر است که دقت مدل‌های تجربی ارائه‌شده برای استحکام خمشی و مدول خمشی نیز مانند مدل استحکام ضربه‌ای دقت بالایی داشته و به ترتیب برابر با مقدار محاسبه‌شده ۹۷/۵۸٪ و ۹۹/۸۹٪ است. با توجه به وجود رویه یکسان در خصوص تصدیق مدل‌های توسعه‌یافته، در این بخش به‌عنوان نمونه، تصدیق مدل توسعه‌یافته توسط نمودار احتمال نرمال و رویه پاسخ برای استحکام ضربه‌ای مطابق شکل‌های ۳ و ۴ انجام می‌شود. شکل ۳ احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای استحکام ضربه‌ای به نمایش گذاشته است. نمودار احتمال نرمال برای بررسی فرض نرمال بودن به‌کار می‌رود. تقریباً تمامی نقاط باقیمانده در دو سمت خط مستقیم و در مجاورت آن قرار دارند که حاکی از توزیع نرمال خطاها است. از ملزومات تحلیل واریانس نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده است.

شکل ۴ نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی تولیدشده توسط معادله (۲) برای استحکام ضربه‌ای را نشان می‌دهد. از این نمودارها برای درک چگونگی تأثیر روش عملیات سطحی و درصد نانوذرات بر استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی استفاده می‌شود. همان‌طور که از نمودار پاسخ مشخص است هم روش عملیات سطحی و هم درصد نانوذرات در تعیین خواص ضربه‌ای مؤثر هستند.

همچنین با توجه به شکل ۶-ب و رفتار نسبتاً یکسان نمونه‌ها در کلیه درصدهای وزنی نانوذرات، می‌توان به تأثیر تقریباً مشابه فرایندهای پیچیده عملیات سطحی بر ارتقای استحکام خمشی ماده اشاره نمود. از شکل ۶-پ نیز می‌توان چنین برداشت کرد که ضمن وجود برتری اولیه در مقدار مدول خمشی در نمونه‌های حاوی ۵٪ نانورس نسبت به سایر نمونه‌ها، تأثیر فرایندهای پیچیده عملیات سطحی بر مدول خمشی چندلایه‌های حاوی ۳٪ و ۵٪ نانورس اندکی بیش از نمونه‌های عاری از نانورس است.

به‌منظور تعیین دقت مدل پیشنهادی، مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط آزمایش‌های تجربی در قالب جدول‌های ۴-۶ صورت گرفته است. بررسی مقادیر نمایان‌گر دقت بسیار بالای مدل در تعیین خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی مورد مطالعه در این پژوهش است.

جدول ۴- مقادیر استحکام ضربه‌ای پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده

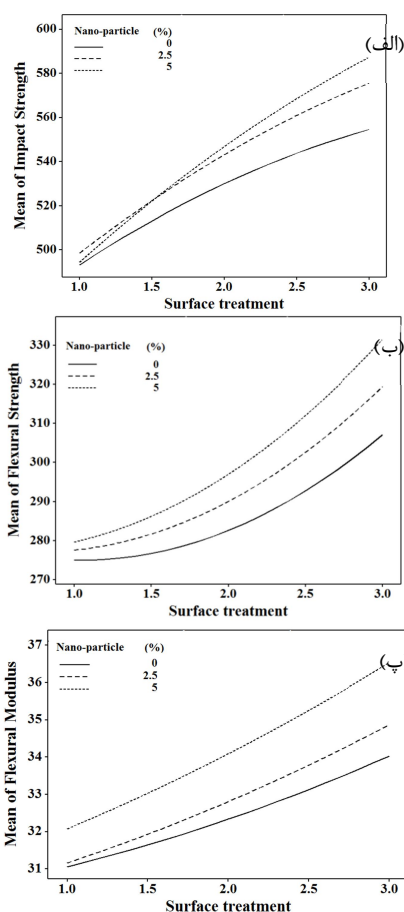
کد نمونه	مقادیر تجربی	مقادیر پیش‌بینی‌شده
0 wt.% nano-FML/1	۴۹۳/۰۸۲	۴۹۳/۳۰
0 wt.% nano-FML/2	۵۳۰/۰۶	۵۳۰/۰۸
0 wt.% nano-FML/3	۵۵۴/۱۷	۵۵۴/۶۶
3 wt.% nano-FML/1	۴۹۷/۲۶	۴۹۸/۲۲
3 wt.% nano-FML/2	۵۴۴/۷۲	۵۴۴/۷۱
3 wt.% nano-FML/3	۵۷۹/۹۶	۵۷۸/۶۹
5 wt.% nano-FML/1	۴۹۵/۲۳	۴۹۴/۴۸
5 wt.% nano-FML/2	۵۴۶/۹۵	۵۴۶/۹۳
5 wt.% nano-FML/3	۵۸۶/۴۲	۵۸۷/۱۹

جدول ۵- مقادیر استحکام خمشی پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده

کد نمونه	مقادیر تجربی	مقادیر پیش‌بینی‌شده
0 wt.% nano-FML/1	۲۷۳/۲۹	۲۷۵/۰۶
0 wt.% nano-FML/2	۲۸۲/۴۸	۲۸۲/۶۳
0 wt.% nano-FML/3	۳۰۹/۰۴	۳۰۷/۱۲
3 wt.% nano-FML/1	۲۸۱/۴۹	۲۷۸/۰۶
3 wt.% nano-FML/2	۲۹۳/۸۵	۲۹۱/۴۷
3 wt.% nano-FML/3	۳۱۶/۰۱	۳۲۱/۸۱
5 wt.% nano-FML/1	۲۷۸/۰۳	۲۷۹/۶۹
5 wt.% nano-FML/2	۲۹۴/۷۷	۲۹۶/۹۹
5 wt.% nano-FML/3	۳۳۵/۱۲	۳۳۱/۲۴

همان‌طور که به‌وضوح در این شکل مشخص است، افزایش درصد وزنی نانوذرات تأثیر مثبت هرچند ملایمی بر کلیه خواص مکانیکی مورد مطالعه اعم از استحکام ضربه‌ای، استحکام خمشی و مدول خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی دارد. از طرفی، به‌سبب بزرگ‌تر بودن مقدار تفاضل ما بین حد پایین و بالای عامل روش عملیات سطحی نسبت به درصد وزنی نانوذرات می‌توان چنین نتیجه گرفت که در تعیین خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی، روش انجام عملیات سطحی فلز بسیار تأثیرگذارتر از استفاده از نانورس در ساختار این مواد است. از دیگر نکات قابل‌برداشت از شکل ۵، تأثیرگذاری قابل‌توجه نانوذرات در ارتقای مدول خمشی نسبت به سایر خواص مکانیکی چندلایه است. در نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۵ به اثر متقابل عوامل تأثیرگذار پرداخته نشده است و به همین دلیل در نمودار شکل ۶ تأثیر دو عامل روش عملیات سطحی و درصد وزنی نانوذرات بر خواص مکانیکی موردبررسی قرار گرفته است.

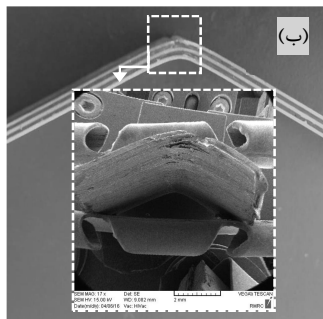
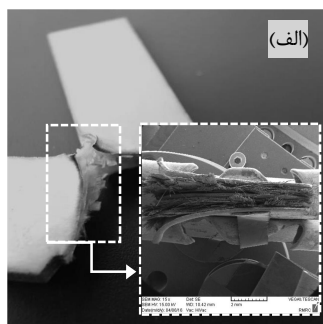
با توجه به شکل ۶-الف و شیب نمودارهای واقع‌شده در آن می‌توان گفت که در مقادیر بالای وزنی نانوذرات، استفاده از فرایندهای پیچیده‌تر عملیات سطحی (یعنی فرایند ۲ و ۳) اثر بیشتری در بهبود استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی دارد.



شکل ۶- نمودار اثرات متقابل برای (الف) استحکام ضربه‌ای، (ب) استحکام خمشی، (پ) مدول خمشی

جدول ۶- مقادیر مدول خمشی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

مقادیر پیش‌بینی شده	مقادیر تجربی	کد نمونه
۳۱/۰۶	۳۱/۱۳	0 wt.% nano-FML/1
۳۲/۳۴	۳۲/۲۷	0 wt.% nano-FML/2
۳۴/۰۳	۳۴/۰۴	0 wt.% nano-FML/3
۳۱/۲۸	۳۱/۱۸	3 wt.% nano-FML/1
۳۳/۰۰	۳۳/۰۶	3 wt.% nano-FML/2
۳۵/۱۳	۳۵/۱۸	3 wt.% nano-FML/3
۳۲/۰۸	۳۲/۱۲	5 wt.% nano-FML/1
۳۴/۰۹	۳۴/۱۰	5 wt.% nano-FML/2
۳۶/۵۱	۳۶/۴۷	5 wt.% nano-FML/3



شکل ۷- تصاویر تهیه‌شده توسط دوربین اپتیکال و میکروسکوپ با بزرگنمایی پایین مربوط به نمونه‌های آزمون (الف) ضربه، (ب) خمش

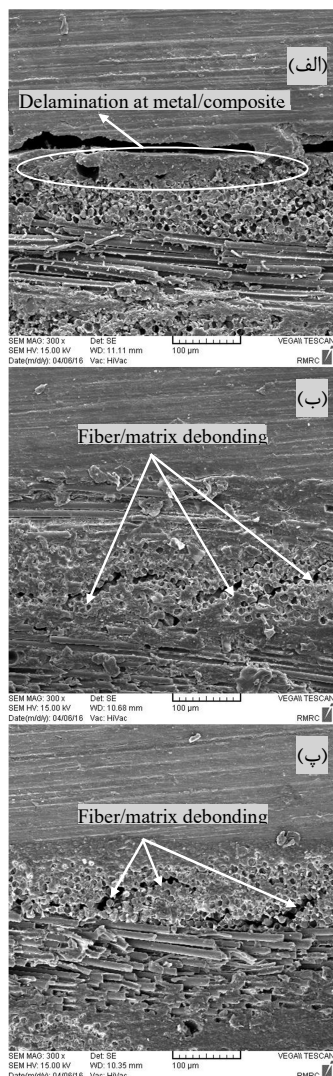
مطابق نتایج مندرج در جدول ۴، چندلایه‌های الیافی فلزی بالاترین مقادیر خود را در فرآیند عملیات سطحی شماره ۳ نشان دادند. به این ترتیب، مقادیر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های چندلایه الیافی فلزی هیبریدشده با نانوذرات یعنی 3 wt.% nano-FML/1، 3 wt.% nano-FML/2 و 3 wt.% nano-FML/3 به ترتیب ۴۹۷/۲۶، ۵۴۴/۷۲ و ۵۷۹/۹۶ ارزیابی شد. این مقادیر به ترتیب گویای ارتقای ۹/۵۴٪ و ۱۶/۶۳٪ استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با ۳٪ نانوذرات تولیدشده توسط روش عملیات سطحی ۲ و ۳ نسبت به روش ۱ است. این افزایش خواص 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. افزایش ۱۰/۴۴٪ و ۱۸/۴۱٪ استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با ۵٪ نانوذرات تولیدشده توسط روش عملیات سطحی ۲ و ۳ نسبت به روش ۱ نیز می‌تواند گواه مناسبی از طرح ادعای فوق باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده روش عملیات سطحی ۲ و ۳ چسبندگی بهتری بین لایه‌های کامپوزیتی و ورق‌های فلزی ایجاد می‌کند. اتصال مناسب‌تر در سطح کامپوزیت/فلز در مواجهه با بارگذاری ضربه‌ای مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهند چراکه انرژی برخورد باید صرف جدایش کامپوزیت/فلز و سایر حالات خرابی نظیر بیرون‌آمدگی الیاف شود.

۳-۵- ارزیابی حالت‌های شکست

در شکل ۷ تصاویری از نحوه ایجاد شکست در نمونه‌های آزمون ضربه و خمش در مقیاس کلی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مطابق شکل ۷-الف در هیچ‌یک از نمونه‌های آزمون ضربه، جدایش کامل در دو تکه شکسته شده از نمونه رخ نداده و صرفاً به‌منظور قرارگیری نمونه‌ها در نگه‌دارنده میکروسکوپ، تعدادی از آن‌ها از ناحیه وسط نمونه برش داده شدند. همچنین در کلیه حالات آزمون، لایه‌های فلزی تحت کشش در نمونه‌های خمشی دچار شکست کامل شدند.

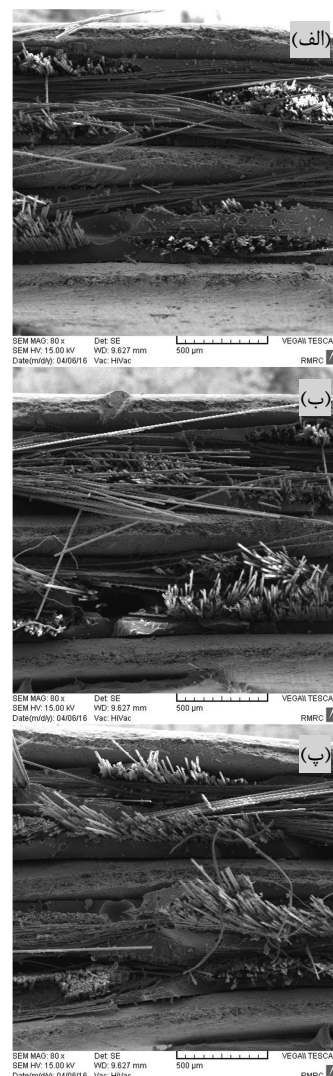
تصاویر میکروسکوپی تهیه‌شده از ریزساختارهای نواحی شکست نمونه‌های مختلف چندلایه‌های الیافی فلزی حاوی اطلاعات مفیدی در زمینه چگونگی تأثیر عملیات سطحی و نانوذرات بر خواص مکانیکی این چندلایه‌ها است. به سبب تعدد بالای حالات آزمایش، در ادامه تصاویری از نمونه‌های تولیدشده توسط فرآیند عملیات سطحی ۱ تا ۳، حاوی ۳٪ نانورس ارائه شده است.

الگوهای حاکم بر شکست ناشی از ضربه 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 ۸ قابل مشاهده است. بررسی تصاویر میکروسکوپی حالت‌های شکست نمایانگر این امر است که عملیات سطحی تأثیر به‌سزایی در نحوه شکست چندلایه‌های الیافی فلزی دارند. همان‌طور که در شکل‌های ۸-ب و ۸-پ قابل مشاهده است حالت خرابی بیرون‌آمدگی الیاف شیشه‌ای از زمینه پلیمری به‌صورت نامنظم در چندلایه‌های الیافی فلزی تولیدشده توسط فرآیند ۲ و ۳ نسبت به حالت ۱ (شکل ۸-الف) به‌مراتب بیشتر است. با توجه به مطرح بودن حالت خرابی بیرون‌آمدگی الیاف به‌عنوان یکی از نشانه‌های شکست نرم و نیاز به صرف انرژی بالا برای رخ دادن این حالت، استحکام ضربه‌ای بالاتر چندلایه‌های تولیدشده با عملیات سطحی ۲ و ۳ نسبت به حالت ۱ توجیه‌پذیر خواهد بود. این مشاهدات منطبق با مقادیر گزارش‌شده در جدول ۴ است.



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۳۰۰ برابر مربوط به نمونه‌های آزمون خمشی: (الف) 3 wt.% nano-FML/1 (ب) 3 wt.% 3 wt.% nano-FML/2 (پ) 3 wt.% nano-FML/3

شامل جدایش الیاف/زمینه و ترک‌خوردگی زمینه است. همچنین مسیر اشاعه ترک در این دو نوع نمونه دارای یک رفتار منقطع و نامنظم است که احتمالاً مربوط به ممانعت ایجاد شده توسط ذرات نانورس در برابر رشد ترک در زمینه است [۱۵]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانورس با بهبود خاصیت چسبندگی در سطح مشترک فلز/کامپوزیت و انتقال ناحیه ترک‌خوردگی از سطح مشترک فلز/کامپوزیت به سطح مشترک الیاف/زمینه موجب صرف انرژی بیشتر جهت ایجاد تخریب در ماده شده است که این امر به نوبه خود تأثیر شایانی در ارتقای خواص خمشی داشته است. برعکس، در نمونه‌های تولیدشده توسط فرآیند عملیات سطحی ۱، لایه کامپوزیتی در محل اتصال به لایه فلزی به‌صورت گسترده‌ای دچار تورق به شکل یک ترک عمیق و مستقیم شده است. با توجه به این‌که لایه کامپوزیتی تقریباً دچار هیچ‌گونه ترک-خوردگی داخلی مشخصی نشده است، حذف سریع ناحیه اتصال فلز/کامپوزیت از عملیات تحمل بار قطعاً کاهش خواص خمشی در این



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۸۰ برابر مربوط به نمونه‌های آزمون ضربه: (الف) 3 wt.% nano-FML/1 (ب) 3 wt.% 3 wt.% nano-FML/2 (پ) 3 wt.% nano-FML/3

در شکل ۹ تصاویری از الگوهای حاکم بر شکست پس از آزمون خمشی در چندلایه‌های الیافی فلزی قابل مشاهده است. با توجه به شباهت فراوان حالات شکست در تمامی نمونه‌های خمشی، به‌منظور ارزیابی دقیق موضوع، تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۳۰۰ برابر در ناحیه اتصال فلز به کامپوزیت تهیه شد. در کلیه تصاویر نشان داده شده، لایه فلزی در سمت فوقانی شکل قابل مشاهده است. بررسی تصاویر میکروسکوپی حالات شکست چندلایه‌های الیافی فلزی نمایان‌گر این امر است که عملیات سطحی تأثیر بسیار بارزی در نحوه شکست خمشی چندلایه‌های الیافی فلزی دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۹-ب و ۹-پ قابل مشاهده است، اتصال ورق فلزی و لایه کامپوزیتی در چندلایه‌های الیافی فلزی تولیدشده توسط فرآیند عملیات سطحی شماره ۲ و ۳ نسبت به حالت عملیات سطحی شماره ۱ (شکل ۹-الف) به‌مراتب مناسب‌تر است. حالت غالب شکست در این دو نوع نمونه چنان‌که در شکل‌های ۹-ب و ۹-پ نشان داده شده است،

نمونه‌ها را نسبت به سایر نمونه‌ها در پی داشته است (شکل ۹-الف). افزایش کیفیت اتصال در نمونه‌های تولیدشده توسط فرآیند عملیات سطحی شماره ۲ و ۳ می‌تواند به افزایش در تعداد، اندازه و تنوع حفرات ایجادشده توسط فرآیند سایش مکانیکی و کروماته‌سازی روی سطوح ورق آلومینیوم مربوط باشد که احتمال و کیفیت درگیرشدن سطح لایه کامپوزیتی حاوی نانورس را در این محل‌ها افزایش داده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر دو عامل عملیات سطحی و درصد وزنی نانورس بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی بررسی شد. قبل از انجام عملیات لایه‌گذاری، ورق‌های آلومینیوم طی چند فرآیند مختلف شامل چربی‌زدایی، سایش مکانیکی با کاغذ سمباده، اسیدشویی و بازشویی و کروماته کردن و ترکیب‌های متفاوت از این فرآیندها مورد عملیات سطحی قرار گرفتند. همچنین نانورس در دو درصد وزنی ۰.۳٪ و ۰.۵٪ به رزین اپوکسی خالص افزوده شد. برای تعیین دقیق هر یک از عوامل یادشده بر خواص مکانیکی، طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ صورت گرفت. در تحلیل واریانس مدل‌های تجربی منطبق با خروجی‌های آزمون‌های خواص مکانیکی ارائه شد که با توجه به بالا بودن ضریب R^2 دقت این مدل‌های پیشنهادی تصدیق گردید. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عوامل مؤثر اصلی مشخص کرد که در تعیین خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه، روش عملیات سطحی فلز به مراتب مؤثرتر از میزان افزودن نانورس است. همچنین، تأثیر مثبت هرچند ملایم نانورس بر خواص مکانیکی چندلایه‌ها فارغ از نوع عملیات سطحی مشخص شد. تصاویر میکروسکوپی نیز نمایان‌گر تأثیر روش عملیات سطحی فلز بر حالت شکست چندلایه‌های الیافی فلزی بودند. بررسی دقیق این تصاویر نشان داد که استفاده از فرآیند سایش مکانیکی و کروماته کردن به‌همراه استفاده از مقادیر معینی از نانورس تأثیر به‌سزایی در افزایش خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی دارد.

۷- مراجع

- [1] Vogelesang L. B., and Vlot A., Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. *Journal of Material Process and Technology*, Vol. 103, No. 1, pp. 1-5, 2000.
- [2] Alderliesten R. C., and Benedictus R., Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures. *Journal of Aircraft*, Vol. 45, No. 4, pp. 1182-1189, 2008.
- [3] Vlot A., Impact loading on fibre metal laminates. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 291-307, 1996.
- [4] Truong H. T., Lagoudas D. C., Ochoa O. O., and Lafdi K., Fracture toughness of fiber metal laminates: Carbon nanotube modified Ti-polymer-matrix composite interface. *Journal of Composite Materials*, Vol. 0, No. 0, pp. 1-14, 2013.
- [5] Lee S., Kim D., Kim Y., Jung U., and Chung W., Effect of aluminum anodizing in phosphoric acid electrolyte on adhesion strength and thermal performance. *Metals and Materials International*, Vol. 22, No. 1, pp 20-25, 2016.
- [6] Sinmazcelik T., Avcu E., Bora M. O., and Çoban O., A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3671-3685, 2011.
- [7] Yun I. H., Kim W. S., Kim K. H., Jung J. M., Lee J. J., and Jung H. T., Highly enhanced interfacial adhesion properties of steel-polymer composites by dot-shaped surface patterning. *Journal of Applied Physicals*, Vol. 109, No. 7, pp. 074302, 2011.
- [8] Alfano M., Lubineau G., Furgieue F., and Paulino G. H., Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 39, pp. 33-41, 2012.
- [9] Brown J. M., Curliss D., and Vaia R. A., Thermoset-layered silicate nanocomposites. Quaternary ammonium montmorillonite with primary diamine cured epoxies. *Chemistry of Materials*, Vol. 12, No. 11, pp. 3376-3384, 2000.
- [10] Alamri H., and Low I. M., Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites. *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 214-222, 2012.
- [11] Haque A., Shamsuzzoha M., Hussain F., and Dean D., S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 10, pp. 1821-1837, 2003.
- [۱۲] پل محمد حسین، لیاقت غلام حسین، مهربانی یگانه عرفان، و افروزیان علی، بررسی تجربی تأثیر نانو ذرات رس و سیلیکا در خواص مکانیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی. *نشریه علمی پژوهشی مدرس*، د. ۲۴، ش. ۱۶، ص ۷۶-۸۲، ۱۳۹۳.
- [۱۳] کیودوند عماد، اسلامی فارسانی رضا، و خسروی حامد، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار بر رفتار خمشی سازه‌های کامپوزیتی الیاف-فلز. *دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مکانیک، صنایع و هوافضا*، تهران، ایران، ۱۳۹۵.
- [14] Zhang H., Gn S. W., An J., Xiang Y., Yang J. L., Impact behaviour of GLAREs with MWCNT modified epoxy resins. *Experimental Mechanics*, Vol. 54, No. 1 pp. 83-93, 2014.
- [15] Ning H., *Improvement on interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced plastic and fiber metal laminates*, MSc. Thesis, Chiba University, 2015.
- [16] Critchlow G. W., Yendall K. A., Bahrani D., Quinn A., and Andrews F., Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 26, pp. 419-53, 2006.
- [17] Bas D., and Boyaci I. H., Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, No. 3, pp. 836-845, 2007.
- [18] Agubra V. A., Owuor P. S., and Hosur M. V., Influence of nanoclay dispersion methods on the mechanical behavior of E-glass/epoxy nanocomposites. *Nanomaterials*, Vol. 3, pp. 550-563, 2013.
- [19] Kusmono K., Wildan M. W., and Mohd Ishak Z. A., Preparation and properties of clay-reinforced epoxy. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 2013, pp. 1-7, 2013.