نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۳، سال ۱۳۹۸، صفحات ۱ تا ۱۰
DOI:

# بهبود خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم-اپوکسی/ الیاف بازالت با استفاده از نانولوله‌های کربنی چندجداره

حامد آقامحمدی، رضا اسلامی فارسانی*

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

**چکیده:** اخیراً استفاده از نانوذرات در زمینه‌های پلیمری به منظور بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری توجه خاصی را به خود جلب کرده است. اما موضوع بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز در اثر افزودن نانوذرات به خوبی مشخص نشده است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر نانولوله‌های کربنی چندجداره بر خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز متشکل از لایه‌های متناوب آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به همراه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت می‌باشد. نتایج نشان داد که در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، یک روند افزایشی در مقادیر استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها حاصل می‌شود، اما در مقادیر بالاتر نانولوله‌های کربنی چندجداره روند معکوسی مشاهده می‌شود. بنابراین، در این تحقیق، مقدار بهینه نانولوله کربنی چندجداره برابر با ۰/۵ درصد وزنی می‌باشد، به طوری‌که در مقایسه با نمونه بدون نانولوله کربنی، مقادیر استحکام خمشی و مدول خمشی به ترتیب ۶۲/۳۶ و ۱۶/۶۰ درصد بهبود پیدا می‌کند. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان داد که مکانیزم‌های بیرون‌زدگی و پل‌زنی نانولوله‌های کربنی دلیل اصلی این بهبود به دست آمده می‌باشند.

**تاریخچه داوری:**
دریافت:
بازنگری:
پذیرش:
ارائه آنلاین:

**کلمات کلیدی:**
کامپوزیت‌های الیاف/ فلز
الیاف بازالت
نانولوله‌های کربنی چندجداره
خواص خمشی

## ۱- مقدمه

امروزه، کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند استحکام ویژه بالا، مقاومت به خستگی بالا و سهولت تولید به عنوان جایگزین مناسبی برای مواد فلزی در حوزه‌های مختلفی مانند صنایع دریایی، هوافضا و حمل و نقل شناخته شده‌اند. با این وجود، این مواد مقاومت نسبتاً پایینی در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای و سایشی دارند. بنابراین با توجه به کاربرد گسترده این مواد در صنعت هوافضا (مخصوصاً در بدنه هواپیما) و همچنین بالا بودن احتمال آسیب از طریق برخورد اجسام خارجی، بهبود خواص مکانیکی این مواد ضروری است [۱].

اخیراً، موضوع بهبود خواص مکانیکی پلیمرها به وسیله افزودن ذرات ثانویه، توجه خاصی را در جوامع علمی و صنعتی به خود جلب کرده است. بهبود خواص مکانیکی پلیمرها با استفاده از نانوذرات مخصوصاً در موارد سفتی، استحکام و چقرمگی، به عنوان یکی از راه‌های مفید معرفی شده است. یکی از مهم‌ترین مزایای نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با میکروکامپوزیت‌ها این است که نانوذرات حتی در درصدهای وزنی بسیار پایین نیز قادر به بهبود چشمگیر در کامپوزیت‌ها هستند [۴-۲].

نانولوله‌های کربنی[1] یکی از مهم‌ترین نانوذرات شناخته شده می‌باشند. تا قبل از کشف گرافن[2] در سال ۲۰۰۴، نانولوله‌های کربنی به عنوان مستحکم‌ترین الیاف که دارای خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی فوق‌العاده‌ای هستند، محسوب می‌شدند. بنابراین، نانوکامپوزیت‌های پلیمری یکی از مهم‌ترین کاربردهای نانولوله‌های کربنی محسوب می‌شود. تاکنون، محققان زیادی به بررسی تاثیر نانولوله‌های کربنی بر خواص کامپوزیت‌های پلیمری پرداخته‌اند. اغلب مطالعات انجام شده دلالت بر تاثیر مثبت نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری دارند. با این وجود، در اغلب این مطالعات بیان شده است که تاثیرگذاری نانولوله‌های کربنی به عوامل مختلفی مانند نوع نانولوله کربنی، میزان خلوص، میزان پخش آن‌ها درون زمینه پلیمری و همچنین ماهیت زمینه پلیمری بستگی دارد [۸-۵].

برای مثال، ژو[3] برای مثال، ژو و همکاران [۸] به بررسی تاثیر نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی رزین اپوکسی ۸۶۲ پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که افزودن نانولوله‌های کربنی تاثیر مثبتی بر خواص کششی و خمشی رزین اپوکسی دارد، به‌طوری‌که استحکام خمشی نمونه‌ها در اثر افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله کربنی ۲۸/۳ درصد بهبود پیدا می‌کند. در یک مطالعه دیگر، کیم[4] و همکاران [۹] تاثیر دو نوع مختلف نانو لوله کربنی اصلاح

1 Carbon Nanotubes (CNTs)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: eslami@kntu.ac.ir

2 Graphene
3 Zhou
4 Kim



UNCORRECTED PROOF

شده[1] با اسید و اصلاح‌شده با عامل سیلانی[2] بر خواص خمشی و سایشی کامپوزیت الیاف کربن/ اپوکسی را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که خواص خمشی و سایشی کامپوزیت‌ها در اثر افزودن هر دو نوع نانولوله‌های کربنی بهبود جدی پیدا می‌کند. به علاوه، آن‌ها گزارش دادند که نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با عامل سیلانی قابلیت پخش بهتری درون رزین اپوکسی دارند که این موجب پیوند بهتر با الیاف کربن می‌شود. به‌طوری‌که در اثر استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با عامل سیلانی، مقادیر استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها در مقایسه با نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با اسید به ترتیب ۳۴ و ۲۰ درصد بهبود پیدا می‌کنند.

بر خلاف این تصور که افزودن نانولوله‌های کربنی همیشه موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌شود، اما مطالعاتی مبنی بر تاثیر منفی این ماده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها نیز وجود دارد. برای مثال، تاثیر نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف کربن/ اپوکسی توسط گودارا[3] و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها از سه نوع متفاوت نانولوله کربنی در مقدار ثابت ۰/۵ درصد وزنی استفاده کردند. اما بر خلاف انتظار، آن‌ها مشاهده کردند که در اثر افزودن نانولوله کربنی، استحکام کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. آن‌ها بیان کردند که پخش نامناسب نانولوله‌های کربنی درون زمینه پلیمری موجب ایجاد تشکیل دسته‌های آگلومره می‌شود، که در این حالت نانولوله‌های کربنی مانند یک عیب عمل می‌کنند و در نتیجه موجب افت خواص مکانیکی می‌شوند. همچنین در یک مطالعه دیگر، شکریه[4] و همکاران [۱۱] به بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی یک کامپوزیت با زمینه پلی‌استر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر چه در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، اما هیچ‌گونه تغییری در خواص کششی نمونه‌ها مشاهده نشد.

استفاده از کامپوزیت‌های الیاف/ فلز[5] یکی دیگر از روش‌های موثر به منظور بهبود خواص کامپوزیت‌های پلیمری به شمار می‌رود. کامپوزیت‌های الیاف/ فلز گروه نسبتاً جدیدی از مواد ترکیبی هستند که از لایه‌های متناوب فلزات و کامپوزیت‌های پلیمری تشکیل شده‌اند. برای اولین بار، کامپوزیت‌های الیاف/ فلز در حدود سه دهه پیش در دانشگاه دلف[6] تولید شدند. محققان دانشگاه دلف به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با کامپوزیت‌های پلیمری متداول، می‌توان نرخ رشد ترک خستگی را در اثر اتصال ورقات نازک و به‌هم چسبیده شده فلزات و کامپوزیت‌های پلیمری بهبود بخشید. کامپوزیت‌های الیاف/ فلز دارای مزایای متعددی مانند مقاومت فوق‌العاده در ضربه، خوردگی و خستگی نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری متداول می‌باشند [۱۵-۱۲].

با این وجود، مطالعات بسیار محدودی مبنی بر استفاده از نانوذرات به منظور بهبود خواص بین لایه‌ای کامپوزیت‌های الیاف/ فلز صورت گرفته است. تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا به رزین اپوکسی بر روی خواص مکانیکی فصل‌مشترک فولاد/ اپوکسی توسط ژای[7] و همکاران [۱۶] انجام شده است. آن‌ها یک روند افزایشی چشمگیر در مقدار استحکام فصل‌مشترک فولاد/ اپوکسی در اثر افزودن نانوذرات آلومینا تا مقدار ۲ درصد وزنی را گزارش دادند. در این حالت، افزایش تقریباً ۳/۵ برابری نسبت به حالت پایه حاصل شد.

همچنین در یک مطالعه دیگر، فریدون[8] و همکاران [۱۷] تاثیر درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره[9] و نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار با عامل کربوکسیل[10] بر روی استحکام برشی بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که موثر بودن نانولوله کربنی بستگی به طول آن‌ها دارد، به طوری که استحکام برشی اتصالات لبه‌ای با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. در حالی‌که، زمانی که ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره کربوکسیل‌دار استفاده شد، استحکام برشی نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی حدود ۲۲ درصد کاهش یافت. آن‌ها نتیجه گرفتند که نانولوله‌های کربنی بدون عامل به دلیل روش تولید خود دارای طول بلندتری نسبت به نانولوله‌های عامل‌دار شده بودند و در نتیجه عملکرد بهتری در مکانیزم پل‌زنی از خود نشان می‌دهند. در یک مطالعه مشابه دیگر، کنستانکوپولو[11] و کوتسیکس[12] [۶] به بررسی تاثیر مقادیر اندک نانولوله‌های کربنی چندجداره بر خواص مکانیکی اتصال لبه‌ای بین کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی و آلیاژ آلومینیوم پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره به رزین اپوکسی، تاثیر متوسطی در بهبود خواص مکانیکی اتصالات لبه‌ای دارد و حتی افزایش بیشتر مقدار نانولوله کربنی موجب افت خواص نیز می‌شود.

در سال ۲۰۱۷، تاثیر دو نوع گرافن عاملدار و اصلاح‌نشده با عامل آمینی بر روی رفتار ضربه سرعت پایین یک کامپوزیت الیاف/ فلز متشکل از الیاف شیشه سه‌بعدی و ورقه‌های منیزیمی، توسط آسایی[13] و همکارانش [۱۸] بررسی شد. آن‌ها گزارش دادند که استفاده از گرافن اصلاح‌نشده تاثیر چندانی بر روی خواص ضربه این مواد ندارد. اما استفاده از ۰/۵ و ۱ درصد وزنی گرافن عامل‌دار موجب بهبود جدی در رفتار ضربه می‌شود. به هر حال، نتایج حاصل از مطالعه دیزجی[14] و همکارانش [۱۹] در تناقض با نتایج مطالعه آسایی و همکارانش می‌باشد. دیزجی و همکاران تاثیر نانوذرات گرافن و سیلیکا را بر روی خواص ضربه کامپوزیت‌های الیاف/ فلز متشکل از ورقه‌های

1 Modified
2 Silane
3 Godara
4 Shokrieh
5 Fiber Metal Laminates (FMLs)
6 Delft
7 Zhai
8 Fereidoon
9 Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT)
10 Carboxyl
11 Konstantakopoulou
12 Kotsikos
13 Asaee
14 Dizaji



UNCORRECTED PROOF

آلومینیوم و الیاف شیشه سه‌بعدی برررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که اگرچه کامپوزیت‌های الیاف/ فلز حاوی گرافن در مقایسه با نمونه‌های شامل نانوذرات سیلیکا رفتار ضربه بهتری دارند، اما نمونه‌های بدون نانوذرات رفتار بهتری نسبت به هر دو حالت دیگر دارد.

در سال‌های اخیر مطالعاتی مبنی بر جایگزینی الیاف بازالت با الیاف شیشه، به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص مکانیکی قابل مقایسه و خسارات محیطی کمتر انجام شده است. اما در زمینه استفاده از الیاف بازالت در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز همراه با نانولوله کربنی تحقیقاتی انجام نشده است. بنابراین در راستای تکمیل تحقیقات قبلی، هدف از این مطالعه بررسی تاثیر نانولوله های کربنی چندجداره بر خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز متشکل از الیاف بازالت، رزین اپوکسی و ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-تی۳ می‌باشد.

## ۲- بخش تجربی

### ۲- ۱- مواد

در این مطالعه، از نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح‌شده با عامل کربوکسیل با خلوص بیش از ۹۵ درصد، قطر داخلی ۵ تا ۱۰ نانومتر، قطر خارجی ۱۰ تا ۲۰ نانومتر و طول ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر متعلق به شرکت چیپ تیوبز[1] آمریکا استفاده شد. همچنین، مواد مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، آلومینیوم نوع ۲۰۲۴-تی۳ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، الیاف بافته‌شده بازالت (محصول شرکت بازالتکس[2] بلژیک) و رزین اپوکسی (اپون[3] ۸۲۸، با هاردنر تتا، تهیه‌شده از شرکت مواد مهندسی مکرر) می‌باشند. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-تی۳، رزین اپوکسی ۸۲۸ و الیاف بازالت به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده شده است.

### ۲- ۲- آماده سازی سطح آلومینیوم

با توجه به تفاوت ماهیت بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی، یکی از مهم‌ترین مسائل طراحی و ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز، چسبندگی

**جدول ۱: خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴-تی۳ [۲۰].**

**Table 1.**

| ویژگی | مقدار |
|---|---|
| استحکام‌تسلیم(مگاپاسکال) | ۳۵۹ |
| استحکام‌کششی(مگاپاسکال) | ۴۵۵ |
| مدول‌الاستیک(گیگاپاسکال) | ۷۲ |
| چگالی(کیلوگرم‌بر‌مترمکعب) | ۲/۷۸۰ |
| ضریب‌پواسون | ۰/۳۳ |

1 Cheap Tubes
2 BASALTEX
3 Epon

**جدول ۲: خواص مکانیکی رزین اپوکسی ۸۲۸.**

**Table 2.**

| ویژگی | مقدار | استاندارد |
|---|---|---|
| مقاومت فشاری (کیلوگرم‌نیرو بر سانتی‌متر مربع) | ۹۵۰ | ASTMD۶۹۵M |
| مقاومت خمشی (کیلوگرم‌نیرو بر سانتی‌متر مربع) | ۹۹۰ | ASTMD۷۹۰M |
| مقاومت کششی (کیلوگرم‌نیرو بر سانتی‌متر مربع) | ۷۷۰ | ASTMD۶۳۸M |

**جدول ۳: خواص مکانیکی رزین اپوکسی ۸۲۸.**

**Table 3.**

| ویژگی | مقدار |
|---|---|
| چگالی سطحی (گرم بر مترمربع) | ۳۵۰ |
| نوع بافت | اطلس |
| ماده مورد استفاده در آماده‌سازی سطحی | سیلان |
| ضخامت(میلی‌متر) | ۰/۱۹ |
| درصد رطوبت | کمتر از ۰/۳ |

بین لایه‌های آن می‌باشد. به همین منظور، در این مطالعه به منظور بهبود چسبندگی سطحی بین آلیاژ آلومینیوم و الیاف بازالت/ رزین اپوکسی، از روش آندایزینگ با محلول اسیدسولفوریک استفاده شد. در این روش، ورق‌های آلومینیومی بعد از مرحله حکاکی توسط محلول هیدروکسید سدیم، با استفاده از دستگاه منبع تغذیه تحت فرایند آندایزینگ با جریان ۰/۱۵ آمپر به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند.

### ۲- ۳- ساخت کامپوزیت های الیاف / فلز

ابتدا نانولوله‌های کربنی در مقادیر مختلف ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵و ۰/۷۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شدند و به منظور بهبود پراکندگی در رزین اپوکسی، به مدت یک ساعت تحت امواج التراسونیک (دستگاه شرکت فاپن ایران) با توان ۳۲۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز قرار گرفتند. سپس، بعد از اختلاط نانولوله‌های کربنی با رزین اپوکسی، کامپوزیت‌های الیاف/ فلز در حالت قرارگیری نوع ۲/۱ (دو لایه آلومینیوم و یک بین‌لایه ساخته‌شده از ۴ لایه رزین تقویت‌شده با الیاف بازالت) در ابعاد ۰/۱۹ × ۲/۵ × ۱۵ سانتی‌متر مکعب با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. بعد از لایه‌گذاری، نمونه‌ها درون قالب گذاشته شدند و تحت فرایند پخت رزین در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ساخته‌شده به مدت ۷ روز به منظور تکمیل فرایند پخت در دمای محیط نگهداری شدند. لازم به ذکر است که نسبت درصد وزنی رزین اپوکسی به الیاف بازالت برابر با ۶۰:۴۰ بود. شکل ۱ نشان‌دهنده شکل شماتیکی از کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ساخته شده به همراه ابعاد آن است.

UNCORRECTED PROOF

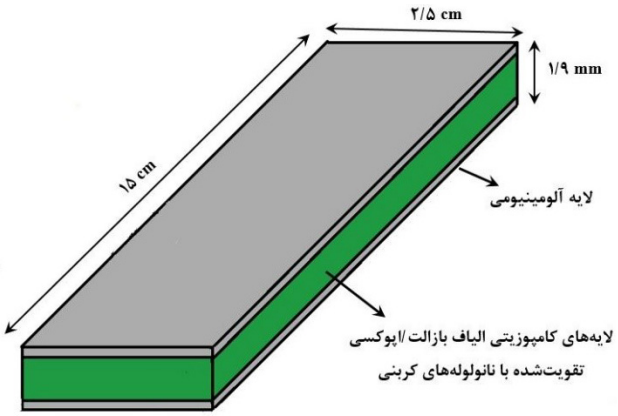



Fig. 1.

**شکل ۱: شکل شماتیکی از کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ساخته‌شده در این تحقیق.**

## ۲- ۴- بررسی مکانیکی و میکروساختاری

آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه کوپا[1] ۱۰ تنی در دمای محیط مطابق با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی۷۹۰ [2] انجام شد. همچنین استحکام و کرنش خمشی نمونه‌ها مطابق با این استاندارد و به ترتیب با توجه به روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \qquad (۱)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6DP}{L^2} \qquad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲)، $\sigma_f$ استحکام خمشی (مگاپاسکال)، $\varepsilon_f$ کرنش خمشی، $P$، بیشترین نیرو در منحنی‌های تنش-کرنش (نیوتن)، $L$، طول نمونه طبق استاندارد خمش که بر روی فک‌های دستگاه قرار می‌گیرد (میلی‌متر)، $b$، عرض نمونه (میلی‌متر)، $d$، ضخامت نمونه (میلی‌متر) و $D$، بیشترین تغییرشکل مرکز نمونه در حین آزمون خمش می‌باشد. همچنین مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها، با استفاده از سطح زیر منحنی تنش-کرنش به دست آمد. در این مطالعه، به منظور بررسی مورفولوژی سطحی آلومینیوم و سطح شکست کامپوزیت‌های الیاف/ فلز از میکروسکوپ الکترونی روبشی[3] مدل تی‌اسکن[4] استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

منحنی‌های تنش-کرنش کامپوزیت‌های الیاف/ فلز با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره در «شکل ۲» آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که منحنی‌های تنش-کرنش، حاصل از میانگین ۳ آزمایش برای هر نمونه

1 Koopa
2 ASTM D790
3 Scanning Electron Microscopy (SEM)
4 TESCAN

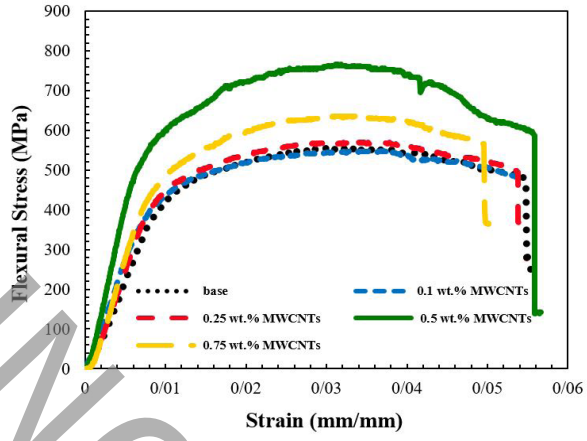



Fig. 2.

**شکل ۲: منحنی تنش-کرنش کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم ۲۰۲۴-اپوکسی/ الیاف بازالت با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره .**

می‌باشند. همان‌طور که مشخص است، رفتار خمشی تمامی نمونه‌ها تقریباً به صورت یکسانی می‌باشد، به‌طوری‌که همه نمونه‌ها دارای دو ناحیه الاستیک و پلاستیک می‌باشند. به دلیل وجود لایه‌های آلومینیومی، این نمونه‌ها بعد از رسیدن به بیشینه مقدار تنش، قادر به تحمل این تنش تا حد بالایی از کرنش هستند. لازم به ذکر است که، در حین فرایند آندایزینگ، یک ساختار متخلخل (آلومینا) بر روی سطح تشکیل می‌شود که حفرات موجود در این ساختار مکان‌های مناسبی برای پر شدن رزین اپوکسی محسوب می‌شوند. این پدیده موجب ایجاد چسبندگی قوی بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی می‌شود. به دلیل این چسبندگی، هیچ‌گونه جدایش بین لایه‌ها در حین آزمون خمش سه نقطه‌ای مشاهده نمی‌شود.

با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش، مقادیر محاسبه شده استحکام خمشی و مدول خمشی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، در مقایسه با استحکام نمونه بدون نانولوله کربنی (۵۵۴/۱۳ مگاپاسکال)، افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی موجب کاهش استحکام خمشی نمونه‌ها به مقدار ۵۴۷/۶۶ مگاپاسکال می‌شود و به عبارت دیگر حدود ۱/۱۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین، در مقایسه با افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره، مشخص است که افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره تاثیر بیشتری دارد. به‌طوری‌که، در اثر افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره، استحکام خمشی ۵۹۴/۳۷ مگاپاسکال، مدول خمشی ۶۳/۸۸ و چقرمگی شکست ۲۶/۲۲ ژول بر میلی‌متر مکعب حاصل می‌شود، که این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانولوله کربنی چندجداره، به ترتیب ۷/۲۶ ، ۱۱/۶۵ و ۲/۱۰ درصد بالاتر هستند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مقادیر اندک نانولوله کربنی (برای مثال ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد وزنی) تاثیر قابل‌توجهی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ندارد. با توجه به قانون مخلوط‌ها مشخص است که هر چه میزان نانولوله‌های کربنی بیشتر باشد، تاثیرگذاری این ماده

UNCORRECTED PROOF

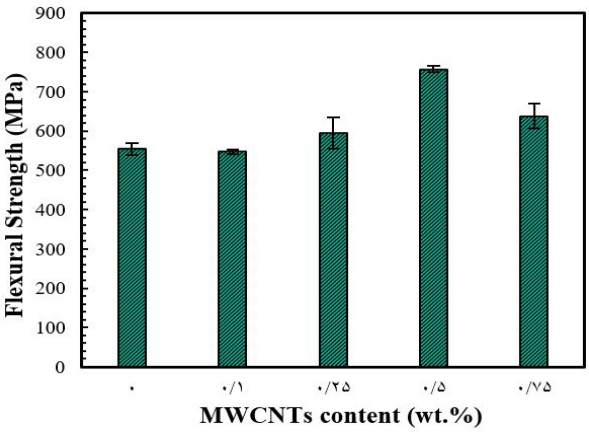



Fig. 3.

**شکل ۳:مقادیر استحکام خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم ۲۰۲۴-پوکسی/ الیاف بازالت با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره.**

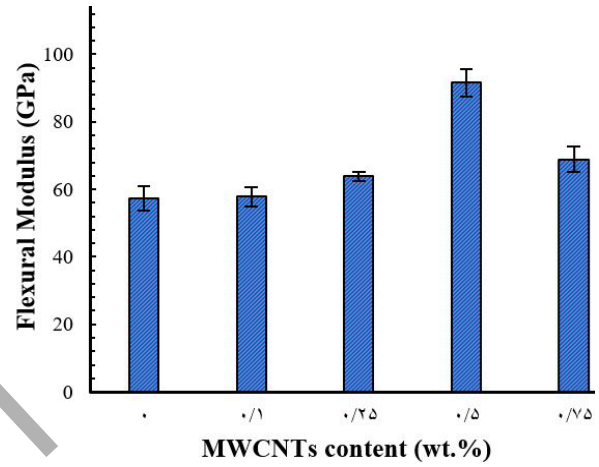



Fig. 4.

**شکل ٤:مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم ۲۰۲۴-پوکسی/ الیاف بازالت با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره.**

در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز بیشتر می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که پایین بودن مقدار نانولوله‌های کربنی، مهم‌ترین دلیل در بهبود جزیی خواص کامپوزیت‌های الیاف/ فلز حاوی این نانولوله‌ها می‌باشد. اما این رابطه برای مقادیر بالای نانولوله‌های کربنی چندجداره صدق نمی‌کند. به طوری که در بین تمامی نمونه‌ها بالاترین استحکام خمشی ۷۵۷/۰۶ مگاپاسکال مربوط به کامپوزیت لایه‌ای الیاف/ فلز حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره می‌باشد. همچنین مشخص است که، در اثر افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی مدول خمشی و چقرمگی شکست در مقایسه با نمونه بدون نانولوله کربنی، حدود ۶۰/۳۶،۱۶/۶۲ و ۳۹/۸۷ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین در اثر افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی خواص خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی افت می‌کند، اما هنوز خواص خمشی این نمونه‌ها بسیار بالاتر از نمونه بدون نانولوله کربنی می‌باشد.

مقادیر محاسبه‌شده از منحنی‌های تنش-کرنش در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴ به طور خلاصه می‌توان گفت که، افزودن نانولوله‌های کربنی موجب ایجاد یک روند افزایشی در خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی می‌شود. اما با افزایش بیشتر مقدار نانولوله‌کربنی یک روند کاهشی مشاهده می‌شود، ولی هنوز خواص خمشی کامپوزیت الیاف/ فلز با ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی بالاتر از نمونه بدون نانولوله کربنی چندجداره می‌باشد. با این وجود، در اثر افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی خواص خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی افت می‌کند، اما هنوز خواص خمشی این نمونه‌ها بسیار بالاتر از نمونه بدون نانولوله کربنی می‌باشد. اگرچه با توجه به قانون مخلوط‌ها انتظار می‌رود که افزایش هر چه بیشتر نانولوله‌های کربنی منجر به بهبود خواص خمشی شود، اما عواملی چون افزایش احتمال تشکیل کلوخه‌های نانولوله کربنی و افزایش ویسکوزیته از مهم‌ترین دلایل افت خواص خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که همیشه یک رقابت بین عوامل تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که در مطالعه حاضر، مقدار بهینه نانولوله کربنی برابر با ۰/۵ درصد وزنی می‌باشد.

دلیل بهبود به دست آمده در خواص خمشی نمونه‌ها را می‌توان در تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی جستجو کرد. در مورد کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، مکانیزم‌های بیرون‌زدگی[1] نانولوله‌های کربنی، پل‌زنی[2] نانولوله‌های کربنی، جدایش[3] نانولوله از زمینه پلیمری و رشد پلاستیکی حفره[4] از مهم‌ترین مکانیزم‌های

**جدول ٤: خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴-تی۳ [۲۰].**

Table 4.

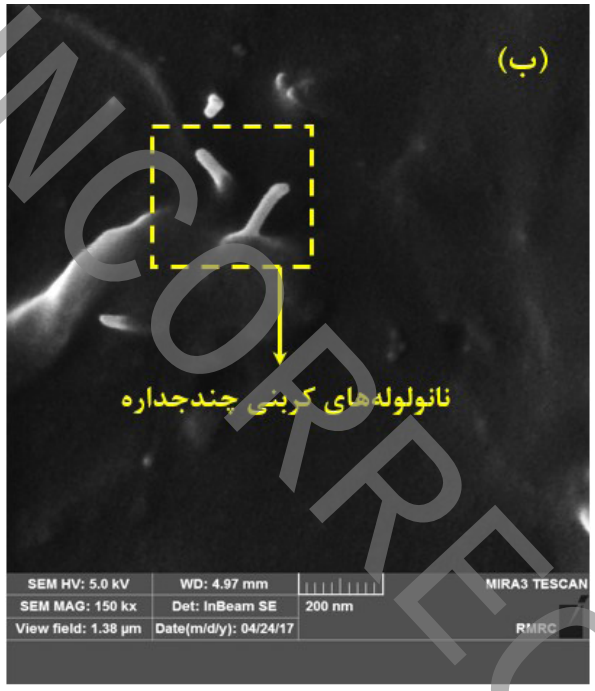
| مقدار نانولوله کربنی چندجداره (درصد وزنی) | استحکام خمشی (مگاپاسکال) | مدول خمشی (گیگاپاسکال) | چقرمگی شکست (ژول بر متر مکعب) |
|---|---|---|---|
| صفر | ۵۵۴/۱۳ | ۵۷/۲۱ | ۲۵/۴۹ |
| ۰/۱ | ۵۴۷/۶۶ | ۵۷/۷۸ | ۲۶/۲۲ |
| ۰/۲۵ | ۵۹۴/۳۷ | ۶۳/۸۸ | ۳۵/۹۲ |
| ۰/۵ | ۷۵۷/۰۶ | ۹۱/۶۳ | ۲۶/۴۹ |
| ۰/۷۵ | ۶۳۷/۸۶ | ۶۸/۹۲ | ۲۶/۴۹ |

1 Pull-out
2 Bridging
3 Debonding
4 Plastic void growth

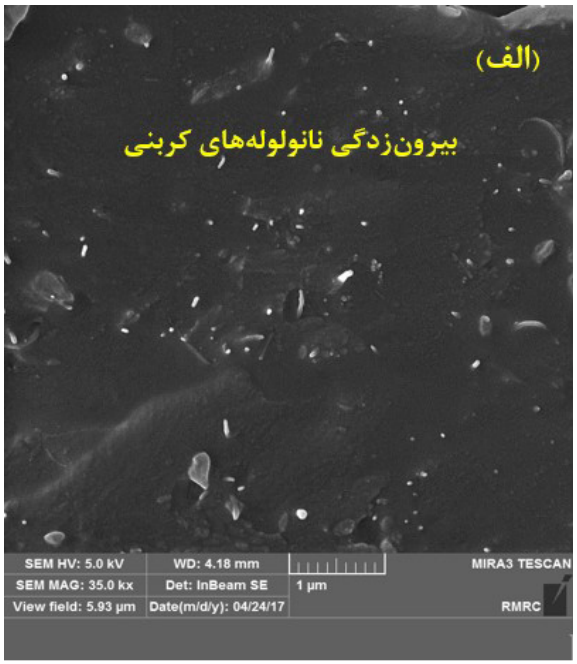
UNCORRECTED PROOF

تقویت‌کنندگی محسوب می‌شوند. زمانی‌که ترک با فصل‌مشترک پلیمر/ نانولوله کربنی مواجه می‌شود، ابتدا نانولوله‌های کربنی از طریق پل‌زدن ترک منجر به جلوگیری از باز شدن ترک می‌شوند و در صورتی که انرژی بیشتری اعمال شود، یا نانولوله‌های کربنی از زمینه پلیمری خارج می‌شوند و یا شکست نانولوله‌های کربنی رخ می‌دهد. شکل ۵ نشان‌دهنده برخی از مکانیزم‌های تاثیرگذار در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز می‌باشد.

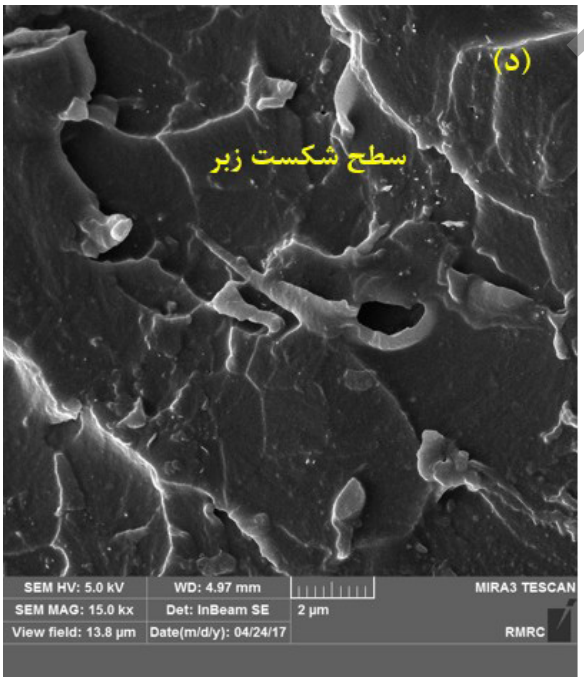
در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، به وضوح پخش مناسب نانولوله‌های کربنی چندجداره درون رزین اپوکسی و همچنین مکانیزم بیرون‌زدگی نانولوله‌های کربنی از رزین اپوکسی نشان داده شده است. در شکل۵-ج



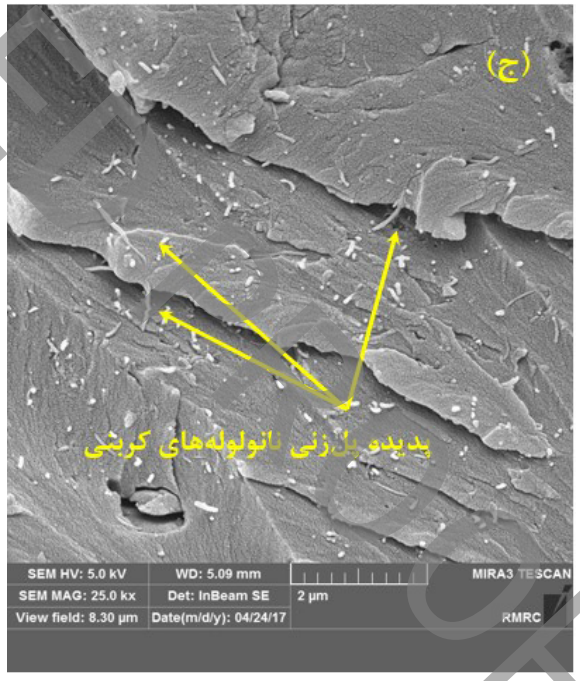

(ج) مکانیزم پل‌زنی،




(الف) پخش مناسب نانولوله‌های کربنی،




(د) سطح شکست زبر،




(ب) مکانیزم بیرون‌زدگی،

Fig. 5.

**شکل ۵: شکل شماتیکی از کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ساخته‌شده در این تحقیق.**

UNCORRECTED PROOF

علاوه بر مکانیزم بیرون‌زدگی، مکانیزم پل‌زنی نانولوله‌های کربنی به وضوح مشخص است. مکانیزم پل‌زنی نانولوله‌های کربنی از باز شدن ترک‌های ایجاد شده در زمینه جلوگیری می‌کند و این بدان معنی است که برای رشد ترک به انرژی بیشتری نیاز است. با توجه به شکل ۵-د مشخص است که سطح شکست رزین اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی کاملاً زبر می‌باشد. بنابراین با توجه به این واقعیت که افزایش زبری سطح، سطح تماس بالاتری را برای پیوند فراهم می‌کند، می‌توان گفت که نانولوله‌های کربنی موجب بهبود چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیتی و همچنین بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری شده است.

به نظر نویسندگان این مقاله، ممکن است مکانیزم دیگری نیز در بهبود خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی نقش داشته باشد. همان‌طور که گفته شد، در طی فرایند آندایزینگ یک ساختار متخلخل با حفرات میکرومتری و نانومتری بر روی سطح آلومینیوم (لایه آلومینا) تشکیل می‌شود. شکل ۶ نشان‌دهنده مورفولوژی سطح آلومینیوم بعد از فرایند آندایزینگ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار آلومینیوم بعد از فرایند آندایزینگ شامل حفرات میکرومتری می‌باشد. لازم به ذکر است که عنصر مس مهم‌ترین عنصر آلیاژی موجود در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-تی۳ به صورت فاز ثانویه $CuAl_2$ می‌باشد. در واقع با توجه به این که تمایل شیمیایی آلومینیوم در مقایسه با این فاز بالاتر است، بنابراین وجود حفرات میکرومتری می‌تواند ناشی از خوردگی گالوانیکی بین آلومینیوم و فاز $CuAl_2$ باشد. از طرف دیگر انتظار می‌رود که تغییر در پارامترهای فرایند آندایزینگ تاثیر مهمی در اندازه حفرات داشته باشد. حال زمانی‌که

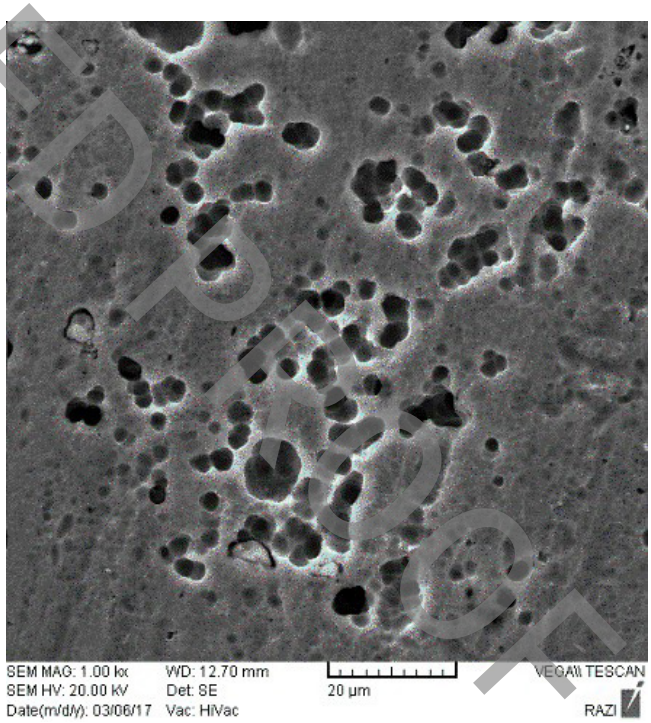
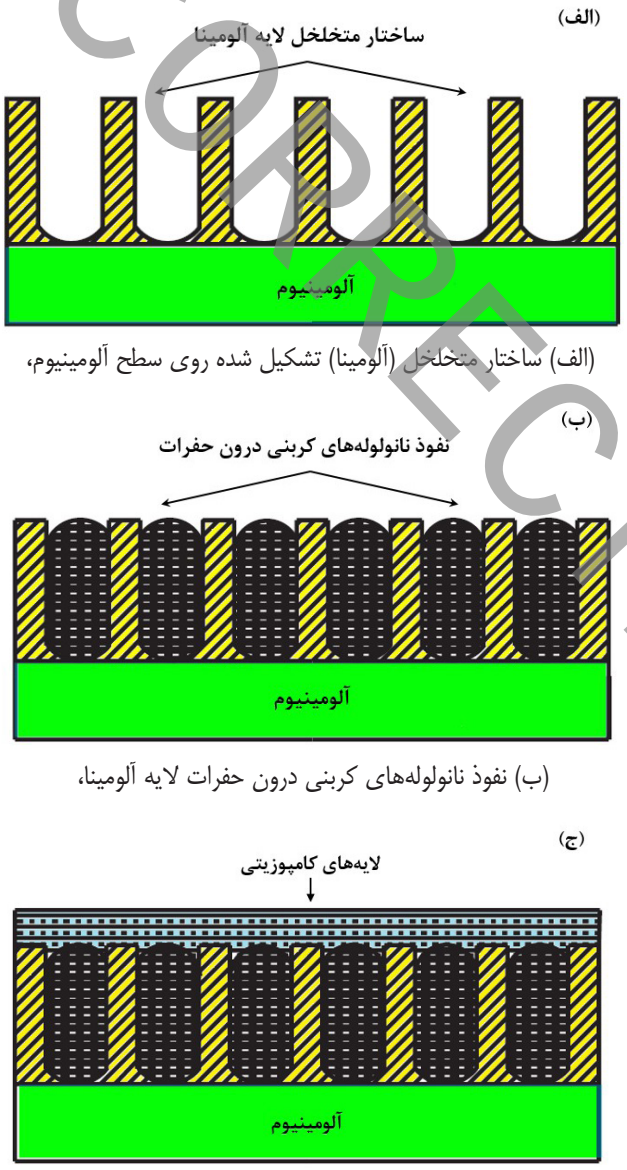



Fig. 6.

**شکل ٦: مورفولوژی سطحی آلیاژ آلومینیوم بعد از فرایند آندایزینگ .**

نانولوله‌های کربنی به زمینه اپوکسی افزوده می‌شوند، انتظار می‌رود که ورود آن‌ها درون حفرات مذکور موجب بهبود پیوند شیمیایی بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری می‌شود. این مکانیزم به صورت شماتیکی در شکل ۷ آورده شده است. به هر حال به نظر می‌رسد که اثربخشی این مکانیزم به شدت وابسته به مواردی چون روش آماده‌سازی سطح آلومینیوم، طول نانولوله‌های کربنی و میزان پخش نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از نانولوله‌های کربنی با عامل کربوکسیل تاثیر بسزایی در این مکانیزم داشته باشد.

با توجه نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مقادیر بالاتر از ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی موجب ایجاد یک روند کاهشی




(الف) ساختار متخلخل (آلومینا) تشکیل شده روی سطح آلومینیوم،

(ب) نفوذ نانولوله‌های کربنی درون حفرات لایه آلومینا،

(ج) پیوند بین لایه کامپوزیتی و آلومینیوم،

Fig. 7.

**شکل ۷: شکل شماتیکی از تاثیر نانولوله‌های کربنی بر روی فصل‌مشترک آلومینیوم آندایزشده/ لایه‌های کامپوزیتی .**

UNCORRECTED PROOF

خواص در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز می‌شود، به طوری که استحکام خمشی (۶۳۷/۸۶ مگاپاسکال) و مدول خمشی (۶۸/۹۲) کامپوزیت‌های الیاف/ فلز در اثر افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، در مقایسه با مقادیر متناظر درکامپوزیت‌های الیاف/ فلز با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، به ترتیب ۱۵/۷۴ درصد و ۲۴/۷۸ درصد کاهش پیدا می‌کند.

علت تاثیر منفی افزودن نانولوله‌های کربنی در درصدهای وزنی بالا بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز را می‌توان در رخداد پدیده‌های احتمالی مختلفی جستجو کرد. یکی از دلایل محتمل این است که استفاده از مقادیر بالای نانولوله‌های کربنی موجب افزایش احتمال تشکیل کلوخه می‌شود و در این حالت کلوخه‌ها به عنوان مکان‌های تمرکز تنش عمل کرده و موجب افت خواص مکانیکی می‌شوند. در شکل ۸، کلوخه‌های نانولوله کربنی نشان داده شده است. دومین دلیل می‌تواند ناشی از افزایش ویسکوزیته رزین اپوکسی در اثر افزودن نانولوله کربنی باشد و می‌توان انتظار داشت که مقادیر بالاتر نانولوله کربنی موجب افزایش بیشتر ویسکوزیته می‌شود. افزایش ویسکوزیته موجب ایجاد مشکلاتی مانند گاززدایی و ترشوندگی ناقص می‌شود. در اثر افزایش ویسکوزیته، حذف حباب‌های موجود در رزین اپوکسی به سختی اتفاق می‌افتد و این حباب‌ها موجب افت خواص مکانیکی می‌شوند. همچنین، ترشوندگی سطح الیاف به شدت تحت تاثیر ویسکوزیته رزین می‌باشد، به طوری که با افزایش ویسکوزیته ترشوندگی به طور ناقص اتفاق می‌افتد. شکل ۹–الف نشان‌دهنده حباب‌های میکرومتری در رزین اپوکسی حاوی ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل‌های ۹–ب و۹ –ج نیز مشخص است که در کامپوزیت الیاف/ فلز

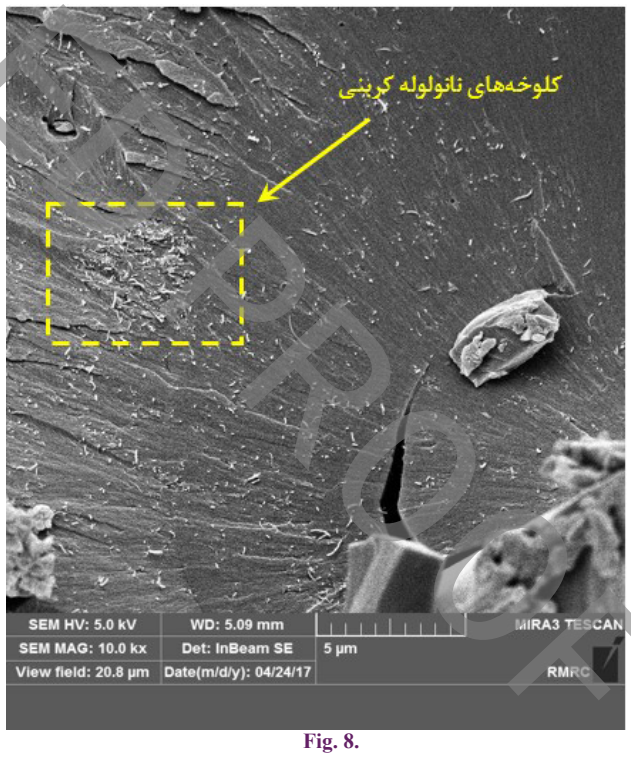
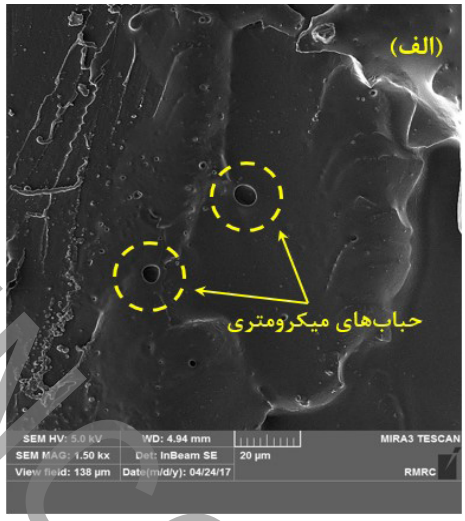
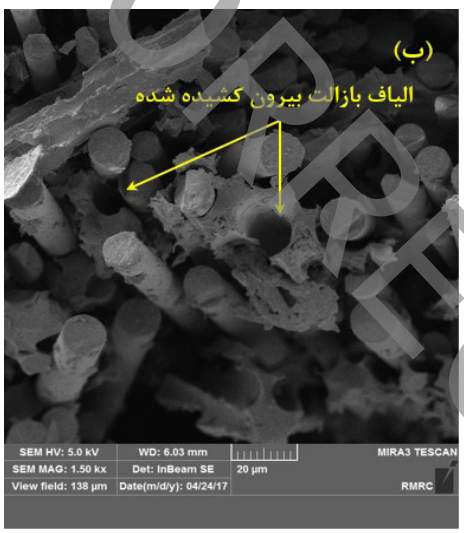


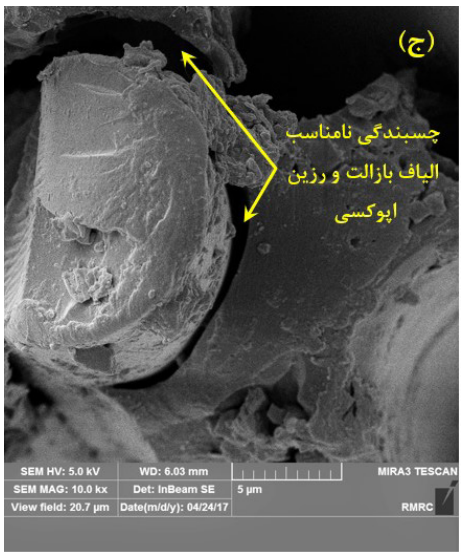

Fig. 8.

شکل ۸: کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی.




(الف) رزین اپوکسی،




(ب) و (ج) کامپوزیت پلیمری حاوی ۷۵/۰ درصد وزنی نانولوله کربنی در بزرگنمایی‌های مختلف،

Fig. 9.

شکل ۹: سطح شکست .

UNCORRECTED PROOF

با ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، الیاف بازالت چسبندگی خوبی به رزین اپوکسی ندارند، به طوری‌که به وضوح الیاف بازالت خارج‌شده از زمینه اپوکسی مشخص شده است.

بنابراین با توجه نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که همیشه یک رقابت بین مکانیزم‌های تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله کربنی وجود دارد. پس با توجه به نتایج می‌توان گفت که در مقادیر پایین نانولوله کربنی، مکانیزم‌های تقویت‌کنندگی مانند بیرون‌زدگی و پل‌زنی نانولوله‌های کربنی تاثیر بیشتری بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز دارند، در حالی که در مقادیر بالاتر، عوامل تضعیف‌کننده‌ای مانند افزایش ویسکوزیته و تشکیل کلوخه موجب افت خواص می‌شوند.

## ٤- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تاثیر مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چندجداره بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز متشکل از ورق آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره به طور جدی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز تاثیر می‌گذارد. به طوری که در اثر افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌کربنی چندجداره مقادیر استحکام خمشی، مدول خمشی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز به ترتیب ۳۶/۶۲، ۶۰/۱۶ و ۳۹/۸۷ درصد نسبت به کامپوزیت لایه‌ای الیاف/ فلز مشابه فاقد نانولوله‌های کربنی چندجداره بهبود پیدا می‌کند. با توجه به تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان نتیجه گرفت که نانولوله‌های کربنی از طریق مکانیزم‌هایی مانند بیرون‌زدگی و پل‌زنی موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری می‌شوند. همچنین می‌توان گفت که افزودن نانولوله‌های کربنی از طریق پرکردن حفرات موجود بر روی سطح آلومینیوم، موجب بهبود چسبندگی بین ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ و کامپوزیت اپوکسی/ الیاف بازالت می‌شوند. به علاوه، در این مطالعه مشخص شد که افزودن نانولوله‌های کربنی بیش از ۰/۵ درصد وزنی موجب ایجاد یک روند کاهشی در خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز می‌شوند، استحکام خمشی و مدول خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز در اثر افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، در مقایسه با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، به ترتیب ۱۵/۷۴ درصد و ۲۴/۷۸ درصد کاهش پیدا می‌کند. علت تاثیر منفی افزودن نانولوله‌های کربنی در درصدهای وزنی بالا را می‌توان در پدیده‌هایی مانند تشکیل کلوخه و افزایش ویسکوزیته رزین جستجو کرد.

## منابع


[1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M.Ö. Bora, O. Çoban, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, Materials & Design, 32(7) (2011) 3671-3685.

[2] X. Li, W. Zhang, S. Zhai, S. Tang, X. Zhou, D. Yu, X. Wang, Investigation into the toughening mechanism of epoxy reinforced with multi-wall carbon nanotubes, e-Polymers, 15(5) (2015) 335-343.

[3] L. Meszaros, I.M. Gali, T. Czigany, T. Czvikovszky, Effect of nanotube content on mechanical properties of basalt fibre reinforced polyamide 6, Plastics, Rubber and Composites, 40(6-7) (2013) 289-293.

[4] M. Sánchez, M. Campo, A. Jiménez-Suárez, A. Ureña, Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM, Composites Part B: Engineering, 45(1) (2013) 1613-1619.

[5] N. Jahan, M.V. Hosur, S. Jeelani, Low-Velocity Impact Response of Woven Carbon Epoxy Composites with MWCNTs, (2013) 1586-1592.

[6] M. Konstantakopoulou, G. Kotsikos, Effect of MWCNT filled epoxy adhesives on the quality of adhesively bonded joints, Plastics, Rubber and Composites, 45(4) (2016) 166-172.

[7] M.M. Rahman, S. Zainuddin, M.V. Hosur, J.E. Malone, M.B.A. Salam, A. Kumar, S. Jeelani, Improvements in mechanical and thermo-mechanical properties of e-glass/ epoxy composites using amino functionalized MWCNTs, Composite Structures, 94(8) (2012) 2397-2406.

[8] Y. Zhou, F. Pervin, L. Lewis, S. Jeelani, Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy, Materials Science and Engineering: A, 452-453 (2007) 657-664.

[9] M.T. Kim, K.Y. Rhee, J.H. Lee, D. Hui, A.K.T. Lau, Property enhancement of a carbon fiber/epoxy composite by using carbon nanotubes, Composites Part B: Engineering, 42(5) (2011) 1257-1261.

[10] A. Godara, L. Mezzo, F. Luizi, A. Warrier, S.V. Lomov, A.W. van Vuure, L. Gorbatikh, P. Moldenaers, I. Verpoest, Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/ epoxy composites, Carbon, 47(12) (2009) 2914-2923.

[11] M.M. Shokrieh, A. Saeedi, M. Chitsazzadeh, Evaluating the effects of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of chopped strand mat/polyester composites, Materials & Design, 56 (2014) 274-279.

[12] G.B. Chai, P. Manikandan, Low velocity impact response of fibre-metal laminates:A review, Composite Structures, 107 (2014) 363-381.

[13] X. Li, X. Zhang, H. Zhang, J. Yang, A.B. Nia, G.B. Chai, Mechanical behaviors of Ti/CFRP/Ti laminates with different surface treatments of titanium sheets, Composite Structures, 163 (2017) 21-31.


UNCORRECTED PROOF

[14] M. Sadighi, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, Impact resistance of fiber-metal laminates: A review, International Journal of Impact Engineering, 49 (2012) 77-90.

[15] H. Zarei, M. Fallah, G. Minak, H. Bisadi, A. Daneshmehr, Low velocity impact analysis of Fiber Metal Laminates (FMLs) in thermal environments with various boundary conditions, Composite Structures, 149 (2016) 170-183.

[16] L.L. Zhai, G.P. Ling, Y.W. Wang, Effect of nano-Al2O3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, International Journal of Adhesion and Adhesives, 28(1-2) (2008) 23-28.

[17] A. Fereidoon, N. Kordani, Y. Rostamiyan, D. Ganji, M. Ahangari, Effect of carbon nanotubes on adhesion strength of e-glass/epoxy composites and alloy aluminium surface, World Appl Sci J, 9(2) (2010) 204-210.

[18] Z. Asaee, M. Mohamed, D. De Cicco, F. Taheri, Low-velocity impact response and damage mechanism of 3D fiber-metal laminates reinforced with amino-functionalized graphene nanoplatelets, International Journal of Composite Materials, 7(1) (2017) 20-36.

[19] R. Amooyi Dizaji, M. Yazdani, E. Aligholizadeh, A. Rashed, Effect of 3D□woven glass fabric and nanoparticles incorporation on impact energy absorption of GLARE composites, Polymer Composites, (2017) (in press).

[20] S. Abrate, Impact engineering of composite structures, Springer Science & Business Media, 2011.

UNCORRECTED PROOF