

# بررسی نقش نانولوله‌های کربنی بر روی رفتار کششی نانوکامپوزیت زمینه وینیل استر

درسا دهقان بانیانی<sup>۱\*</sup>، سید احمد جنابعالی جهرمی<sup>۲</sup>، سید مجتبی زبرد<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

\*Dorsa\_dehghaan@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳)

## چکیده

رزین‌های وینیل استر، از معروف‌ترین پلیمرهای گرماسخت محسوب می‌شوند. این رزین‌ها از واکنش یک نوع اسید کربوکسیلیک غیراشباع نظیر آکریلیک یا متاکریلیک و یک واحد رزین اپوکسی تولید می‌گردند. به منظور بهبود خواص و نیز بهینه‌سازی آن‌ها برای شرایط بارگذاری مختلف، این مواد را با عوامل تقویت‌کننده‌ای از جمله الیاف کوتاه (مانند شیشه یا کربن) و یا ذرات سرامیکی تقویت می‌کنند. در تحقیق حاضر از نانولوله کربنی چند دیواره به عنوان عامل تقویت‌کننده جهت بهبود رفتار کششی رزین وینیل استر استفاده شده است. نقش نانولوله‌های کربنی بر رفتار تغییر شکل و شکست نانوکامپوزیت با استفاده از نمونه‌های کششی تقویت‌شده با ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی طبق استاندارد ASTM D638 بررسی شده است. جهت تعیین نقش نانولوله‌های کربنی بر روی مکانیزم تغییر شکل و شکست وینیل استر، سطح شکست نمونه‌ها مورد ارزیابی میکروسکوپی بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که مدول یانگ، استحکام تسلیم و چقرمگی شکست وینیل استر وابسته به درصد نانولوله کربنی می‌باشد. بطوریکه با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی به رزین وینیل استر، حدود ۲۸٪ کاهش استحکام کششی، ۵۳/۱۶٪ افزایش مدول یانگ و ۳۰٪ کاهش تانژنس شکست ایجاد شد. ارزیابی میکروسکوپی بیانگر وابستگی رفتار شکست نانوکامپوزیت ساخته‌شده به حضور و میزان این نانولوله‌ها بوده و همچنین به رابطه‌ی منطقی بین خواص و آرایش سطح شکست نانوکامپوزیت اشاره دارد. علاوه بر تشکیل حفرات و پدیده‌ی بهم پیوستن حفرات، مکانیزم‌های پل زدن، شکست، جدایش و بیرون آمدن نانولوله‌ها و فیری شدن رزین وینیل استر در سطوح شکست این نانوکامپوزیت‌ها بوضوح مشاهده شد.

## واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت، وینیل استر، نانولوله کربنی، مکانیزم شکست.

## ۱- مقدمه

اپوکسی بیسفنول A، تولید می‌شوند. هنگامی که در مونومر استایرن حل می‌شوند، یک رزین گرماسخت با مقاومت گرمایی خوب و مقاومت شیمیایی برجسته در برابر اسیدها، بازها،

رزین‌های وینیل استر، از معروف‌ترین پلیمرهای گرماسخت به حساب می‌آیند. وینیل استرها اساساً اپوکسی‌های متاکریلات<sup>۱</sup> شده‌ای هستند که از واکنش اسید متاکریلیک<sup>۲</sup> با یک رزین

مکانیکی وینیل استر با استفاده از افزودن تقویت کننده‌های فلزی، غیر فلزی و الیاف شده است. به طور مثال ژانهو<sup>۴</sup> و همکارانش رزین وینیل استر را با نانو ذرات اکسید مس تقویت کرده و خواص نانو کامپوزیت های بدست آمده را بررسی کردند. در این تحقیق نشان داده شد که هرچه توزیع نانو ذرات و پیوند شیمیایی بین رزین وینیل استر و تقویت کننده‌ها همگن تر باشد خواصی از جمله پایداری حرارتی و استحکام کششی افزایش خواهد یافت [۳]. توستسون<sup>۵</sup> و همکارانش به ساخت نانو کامپوزیت وینیل استر/نانو لوله‌های کربنی پرداخت و خواص الکتریکی کامپوزیت‌های ساخته شده را بررسی کردند [۴]. در سال ۲۰۱۱، آویلز<sup>۶</sup> و همکارانش به بررسی فرآیندهای اکسیداسیون و سیلانیزه کردن نانو لوله‌های کربنی چند دیواره برای کامپوزیت‌های نانو لوله کربنی چند دیواره/وینیل استر پرداختند. کامپوزیت‌های پلیمری از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره‌ی عامل دار و رزین وینیل استر ساخته شدند و آزمون فشار روی آنها انجام شد و به این نتیجه رسیدند که بهبود خواص مکانیکی در فشار به دلیل کاهش طول نانو لوله‌های کربنی بعد از اکسیداسیون آنها و فرآیندهای ساخت کامپوزیت، محدود خواهد شد و این امر با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد بررسی قرار گرفت [۵].

مطابق با مرور بر پژوهش‌های انجام شده توسط نویسندگان تحقیق حاضر، به نظر می‌رسد که پژوهش قابل توجه در زمینه نقش نانو لوله‌های کربنی چنددیواره در خواص کششی و ساز و کار شکست رزین وینیل استر انجام نشده است. لذا در این تحقیق از نانو لوله‌های کربنی چنددیواره بمنظور تقویت رزین وینیل استر و بهبود خواص مکانیکی این رزین مانند مدول کششی، استفاده شده و سطوح شکست نانو کامپوزیت‌های ساخته شده در آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تجربی

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش، از رزین وینیل استر بر پایه‌ی بیسفنول A

هیپوکلریت‌ها و بسیاری حلال‌ها را فراهم می‌آورند [۱]. دلیل مقاومت شیمیایی خوب وینیل استرها را می‌توان به عدم حضور پیوندهای استری در زنجیره‌ی اپوکسی نسبت داد. در حقیقت پیوندهای فیل استری منجر به اتصال اجزاء پلیمر می‌شوند و این اتصالات در مقایسه با اتصالات استری در برابر اکثر محیط‌های شیمیایی مانند شرایط قلیایی به شدت مقاومت می‌کنند. از آنجا که اتصال استری تنها در انتهای زنجیر وینیل استر وجود دارد، این امر حملات عوامل شیمیایی را محدود می‌کند [۲]. این رزین‌ها دارای چسبندگی خوبی با الیاف شیشه و دیگر تقویت کننده‌ها می‌باشند. در واقع از ویژگی‌های بی نظیر وینیل استر را می‌توان قابلیت برقراری پیوند این رزین‌ها با سایر سطوح نام برد. لوله‌های انتقال آب، گاز و مواد شیمیایی و نیز قطعات کامپوزیتی مورد استفاده در ساخت سکوی نفتی از جمله کاربردهای این رزین‌ها محسوب می‌شوند [۱]. دیگر کاربردهای تجاری مهم برای وینیل استرها شامل کاربردهای ساختاری خودرو، قطعات الکتریکی، مخازن بتن-پلیمر به منظور معدن کاوی و کاربردهای شیمیایی، کاربردهای دریایی با عملکرد بالا، دریچه‌های مشبک و نیز کالاهای ورزشی می‌باشد [۱]. وینیل استرها مانند پلی استرهای کلرندیک<sup>۳</sup> و پلی استرهای بیسفنول A از مواد گران قیمت ساخته شده و زمان فرآیند آنها طولانی می‌باشد که این امر افزایش قیمت تمام شده‌ی محصول را به دنبال دارد. بنابراین، گرایش تولیدکنندگان به سمت کاربردهای تجاری است که بهینه‌سازی عملکرد وینیل استرها می‌تواند دلیلی بر قیمت فوق العاده کامپوزیت نهایی باشد [۱]. می‌توان با افزودن عوامل تقویت کننده از جمله نانو ذرات آلی و غیر آلی مانند نانو لوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره، فیبرهای کربنی، نانو ذرات سیلیکا، نانو ذرات اکسید مس، نانو ذرات اکسید آلومینیوم و همچنین نانو ذرات اکسید آهن، عملکرد رزین‌های وینیل استر را بهینه‌سازی کرد. با تقویت رزین‌های وینیل استر توسط نانو مواد ذکر شده، خواص مکانیکی این رزین‌ها مانند چقرمگی شکست، مدول کشش و مدول خمش بهبود می‌یابد.

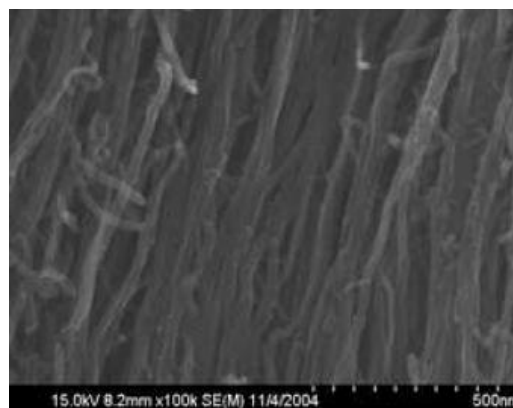
تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بهبود خواص فیزیکی و

مناسب، با سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه نانو لوله‌های کربنی در رزین توزیع شدند. جهت توزیع مناسب‌تر، نانو لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه تحت فرآیند فراصوت<sup>۱۲</sup> با استفاده از دستگاه آروان<sup>۱۳</sup> قرار گرفتند. سپس به منظور حذف حباب‌های ایجاد شده در حین فرآیندهای همگن‌سازی، مخلوط بدست آمده وارد دستگاه گاززدا شده و به مدت ۳۰ دقیقه فرآیند گاززدایی روی آن انجام شد. در ادامه ۲/۲ درصد وزنی کبالت (۰/۱٪)، ۰/۵ درصد وزنی دی متیل آمین و ۱/۱ درصد وزنی متیل اتیل کتون پراکساید را به عنوان عامل عمل آوری به سیستم اضافه کرده و به روش دستی مخلوط شد. جهت حذف حباب‌های ایجاد شده در رزین در اثر واکنش‌های صورت گرفته بین عوامل پخت با رزین وینیل استر و مخلوط سازی انجام شده، فرآیند گاززدایی مجدداً به مدت ۵ دقیقه صورت گرفت. برای تولید نمونه‌های استاندارد کششی، نانو کامپوزیت‌های نهایی در قالب سیلیکونی ساخته شده مطابق با استاندارد ASTM D638 ریخته شده و بعد از گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت، عملیات بازپخت با قرار دادن نمونه‌ها در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت انجام شد. آزمون کشش در دمای محیط توسط دستگاه کشش مدل سانتام-۱۵۰ با سرعت کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌ها انجام شد. بمنظور اطمینان از نتایج بدست آمده، هر یک از نانو کامپوزیت‌ها ۵ مرتبه مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت سطح مقطع نمونه‌های شکسته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل کمبریج استریو اسکن مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

اثر نانو لوله‌های کربنی بر استحکام کشش و مدول یانگ نمونه‌های وینیل استر تقویت شده با ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۳٪، ۰/۴٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ وزنی نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در شکل (۲) ارائه شده است.

خریداری شده از شرکت سونکو<sup>۷</sup> مدل ۹۰۱ به عنوان پلیمر زمینه در ساخت نانو کامپوزیت استفاده شد. همچنین نانو لوله‌های کربنی چنددیواره‌ی تولید شده توسط روش رسوب شیمیایی فاز بخار<sup>۸</sup>، دارای قطر داخلی ۳ تا ۵ نانومتر و قطر خارجی ۸ تا ۱۵ نانومتر و طول ۵۰ میکرومتر، به عنوان عامل تقویت کننده در ساخت این نانو کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۱) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانو لوله‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.



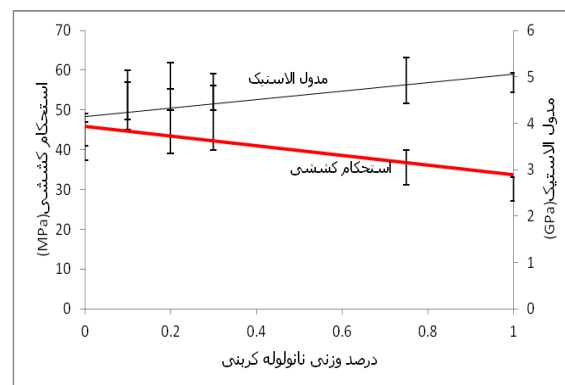
شکل (۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو لوله‌های کربنی چنددیواره مورد استفاده در این پژوهش.

متیل اتیل کتون پراکساید<sup>۹</sup> به عنوان کاتالیست و کبالت<sup>۱۰</sup> (۰/۱٪) و دی متیل آمین<sup>۱۱</sup> به عنوان شتاب دهنده خریداری شده از شرکت اکزا نوبل و همچنین ماده‌ی BYK-C8000 تهیه شده از شرکت آلتانا به عنوان عامل پیوند ساز در ساخت نانو کامپوزیت‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲- روش ساخت نانو کامپوزیت

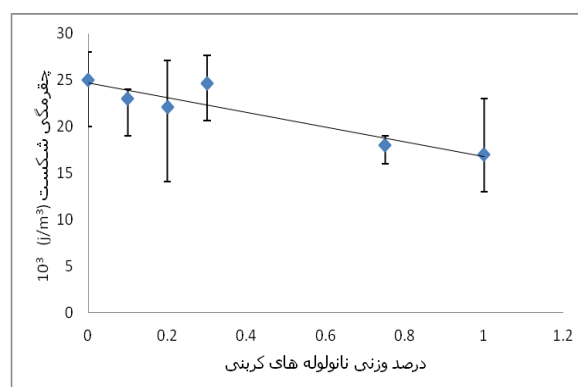
بسته به درصد وزنی عامل تقویت کننده در هریک از نانو کامپوزیت‌ها، مقادیر مشخص از این نانومواد (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی) توزین شد و به همراه یک درصد وزنی عامل پیوند ساز به مقدار مناسب رزین وینیل استر اضافه شده و بصورت دستی مخلوط گردید. سپس به مدت ۲۰ دقیقه با بهره‌گیری از نیروهای برشی قوی ایجاد شده توسط همزن

که مساحت سطح ویژه<sup>۱۴</sup> نانولوله های کربنی چندین برابر بیشتر از عوامل تقویت کننده ی دیگر می باشد، این امر منجر به تمایل بیشتر نانولوله ها در چسبیدن به یکدیگر خواهد شد. در اثر تجمع و تشکیل آگلومره، سطوح ویژه ی آنها کم می شود. از آنجا که انتقال نیرو از طریق فصل مشترک نانو لوله ها و رزین انجام می شود، با کاهش این سطوح، انتقال تنش افت پیدا کرده و منجر به کاهش استحکام کششی می شود. از طرفی این آگلومره ها بصورت مراکز تمرکز تنش در نمونه عمل کرده و منجر به کاهش چقرمگی شکست نانو کامپوزیت می شوند [۶-۱۲]. از آنجا که نانو لوله های کربنی، مدول الاستیکی برابر با ۹۱۰ GPa دارند، با جایگیری این مواد در رزین وینیل استر، مدول الاستیک نانو کامپوزیت به شدت افزایش می یابد. از آنجا که تعیین مدول الاستیک در تغییر شکل هایی در حد الاستیک انجام می گیرد، لذا بحث جدایش عوامل تقویت کننده از رزین که خود منجر به کاهش عملکرد نانو لوله ها بعنوان عوامل تقویت کننده و همچنین کاهش استحکام و انرژی شکست می شود، مطرح نیست. زیرا در تغییر شکل الاستیک، تنش های اعمالی به نمونه در حدی نیستند که بتوانند جدایش نانو لوله ها از رزین وینیل استر را موجب شوند. بنابراین طبق قانون مخلوطها، دلیل افزایش مدول یانگ نانو کامپوزیت را می توان مدول یانگ بسیار بالای نانو لوله های کربنی نام برد. توزیع مناسب نانولوله ها نیازمند نیروی برشی بسیار قوی می باشد که باید دقت شود به اندازه ی کافی و مناسب بوده تا در طول نانولوله تخریب ایجاد نشود. در اثر استفاده از همزن آلتراسونیک و همزن برشی قوی، سطح نانولوله ها دچار تخریب شده و از عیوب ایجاد شده در سطح، ترک ها شروع و انتشار می یابند. یک نمونه از این عیوب، عیوب استون والز<sup>۱۵</sup> می باشند که حین اعمال نیرو به نانو لوله ها، دو پیوند کربن-کربن در جداری نانو لوله کربنی شکسته و دو پیوند جدید کربن-کربن تشکیل می شود. در نتیجه یک جفت ساختار پنج ضلعی و یک جفت ساختار هفت ضلعی مطابق شکل (۴) بوجود خواهد آمد. در صورتیکه چگالی این عیوب در دیواره ی نانو لوله ها زیاد شود منجر به تخریب بیش از حد نانو لوله ها شده و نانو کامپوزیت



شکل (۲): اثر نانو لوله های کربنی بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های پایه وینیل استر تقویت شده با نانو لوله های کربنی چنددیواره

به منظور بررسی تأثیر حضور نانو لوله های کربنی چنددیواره بعنوان تقویت کننده در انرژی شکست رزین وینیل استر، سطوح زیر منحنی های تنش - کرنش بدست آمده از آزمون کشش هر یک از نمونه ها محاسبه شد. شکل (۳) بیانگر تأثیر نانو لوله های کربنی بر چقرمگی شکست نانو کامپوزیت های ساخته شده می باشد.



شکل (۳): اثر نانو لوله های کربنی چنددیواره بر روی چقرمگی شکست نانو کامپوزیت های پایه وینیل استر.

مشاهده می شود با افزایش درصد وزنی نانو لوله های کربنی، استحکام کششی و چقرمگی شکست کم شده و مدول یانگ افزایش می یابد. از جمله دلایلی که می توان برای کاهش استحکام و چقرمگی شکست این نانو کامپوزیت ها نام برد، توزیع نامناسب نانولوله ها و تجمع این تقویت کننده ها می باشد. از آنجا

از آنجا که نانولوله‌های کربنی مدول یانگ بالایی نسبت به رزین وینیل‌استر دارند، با جایگیری آن‌ها در زمینه مدول یانگ کامپوزیت ساخته شده طبق قانون مخلوط‌ها افزایش می‌یابد [۷-۱۴]. با توجه به شکل (۲) می‌توان اظهار داشت هرچه درصد وزنی تقویت‌کننده بیشتر شود، مدول الاستیک افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد و در نهایت افزایش مدول یانگ وینیل‌استر حاوی ۱٪ وزنی نانولوله‌های کربنی نسبت به رزین خالص برابر ۵۴٪ می‌باشد.

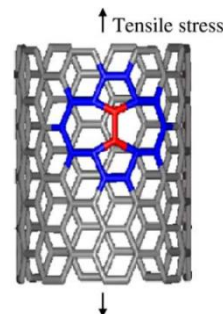
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها بیانگر چسبندگی نامناسب نانو لوله‌ها و پیوند ضعیف آن‌ها به رزین می‌باشد که خود منجر به کاهش انرژی شکست شده و نانو لوله‌ها بعنوان تقویت‌کننده نمی‌توانند نقش خود را بخوبی ایفا کنند. بعبارت دیگر به محض اعمال نیرو به نمونه‌های کششی، ترک‌های موجود در نمونه که در اثر حضور عیوب مختلف مانند تجمع نانو لوله‌ها و حفرات ایجاد شده‌اند، با دریافت انرژی کمی شروع به پیشروی می‌کنند. بنابراین نمونه‌ها به سرعت دچار شکست خواهند شد [۱۲]. بعضی از حفرات موجود در نمونه در اثر جدایش نانو لوله‌ها و پدیده‌ی دی-باندینگ از رزین وینیل‌استر بوجود می‌آیند و برخی دیگر در اثر حباب‌های به دام افتاده در رزین ایجاد می‌شوند.

شکل (۵) سطح شکست نمونه‌ی وینیل‌استر تقویت شده با ۳/۰٪ وزنی نانو لوله‌های کربنی را ارائه می‌دهد و مشاهده می‌شود که ترک از یک حفره در قطعه شروع شده‌است. در واقع حباب‌های به دام افتاده در رزین حین فرآیند آلتراسونیک به‌خوبی از سیستم خارج نشده و در نهایت در بارگذاری حین آزمون کشش، این حفرات بهم پیوسته و پدیده‌ی بهم پیوستن حفرات<sup>۱۷</sup> و در نتیجه‌ی آن تشکیل حفره‌ی بزرگتر رخ داده‌است. این حفره که خود به‌عنوان مرکز تمرکز تنش در نمونه عمل کرده‌است، نقطه‌ی شروع و پیشروی ترک محسوب می‌شود.

ساخته شده دچار افت خواص مکانیکی از جمله استحکام و انرژی شکست می‌شود. [۷-۹].

دلیل مهم دیگر کاهش استحکام و انرژی شکست را پیوند ضعیف نانولوله‌ها با زمینه‌ی وینیل‌استر می‌توان نام برد. با توجه به روشی که برای ساخت کامپوزیت انتخاب شد، ضرورتاً نانولوله‌های کربنی به صورت اتفاقی<sup>۱۶</sup> کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. بدان علت که نانولوله‌ها در جهات ترجیحی قرار نگرفته‌اند، استحکام افت پیدا می‌کند. در صورتی که عملیات سطحی روی نانولوله‌ها انجام شود، انتظار می‌رود خواص نانو کامپوزیت مانند استحکام و چقرمگی شکست افزایش یابد [۹-۱۰].

در اثر اضافه کردن عامل پخت متیل‌اتیل‌کتون پراکساید به رزین وینیل‌استر در حین ساخت نانو کامپوزیت، این ماده تجزیه شده و یک سری رادیکال‌های آزاد ایجاد خواهد شد. این رادیکال‌های آزاد به شدت قابل حمل بوده و می‌توانند توسط نانو لوله‌های کربنی به دام بیفتند. این امر نیز می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش استحکام این نانو کامپوزیت‌ها تلقی شود. در ادامه عملیات پخت رزین که در دمای بالا انجام می‌شود موجب ایجاد تنش‌های حرارتی در کامپوزیت شده و تشکیل حفرات و میکروتُرک‌ها در نواحی تجمع نانولوله‌های کربنی را بدنبال دارد و در نتیجه‌ی آن، خواص مکانیکی، استحکام و چقرمگی شکست نانو کامپوزیت کاهش می‌یابد [۱۳]. انتهای نانو لوله‌ها نیز بعنوان مراکز تمرکز تنش در کامپوزیت‌ها عمل کرده و منجر به افت این خواص می‌شوند [۹-۱۲].



شکل (۴): عیوب استون‌والز در ساختار گرافیتی نانو لوله‌ی کربنی تحت تنش

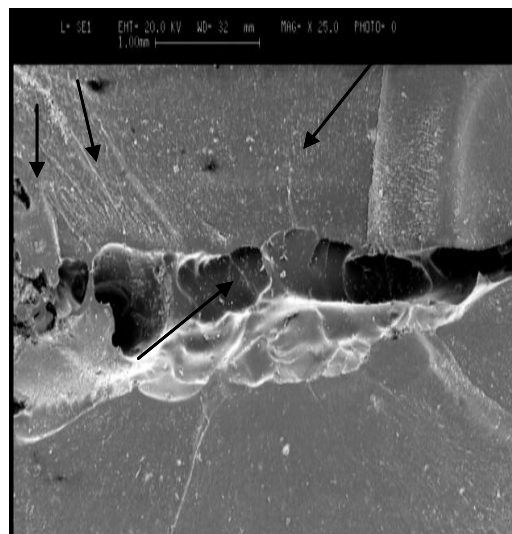
کششی [۹]

شکل (۷) تجمع نانو لوله های کربنی و مکانیزم های پل زدن و شکست را در نمونه ی وینیل استر تقویت شده با ۱٪ وزنی نانو لوله های کربنی با بزرگنمایی های بالاتر نشان می دهد. در حقیقت ممکن است نانو لوله های کربنی بین دو سطح ایجاد شده در نمونه به صورت یک پل عمل کرده و از باز شدن دو سطح ترک جلوگیری کنند که به آن، مکانیزم پل زدن گفته می شود. چنانچه نانو لوله های کربنی نتوانند در برابر تنش های اعمالی مقاومت کنند و شکست در آن ها اتفاق افتد مکانیزم شکست مکانیزم غالب است. در صورتی که نانو لوله ها چسبندگی مناسبی با زمینه نداشته باشند، احتمال جدایش نانو لوله ها از زمینه ی پلیمری وجود دارد که به آن مکانیزم کشیده شدن و بیرون آمدن می گویند.

شکل (۸) بیان گر توزیع نامناسب نانو لوله ها و عدم چسبندگی آن ها به رزین وینیل استر می باشد. در این شکل واضح است که تجمع نانو لوله های کربنی با افزایش درصد وزنی این تقویت کننده افزایش یافته است و بخصوص در نمونه ی ۷۵٪ وزنی نانو لوله ی کربنی - وینیل استر درگیری<sup>۱۸</sup> نانو لوله ها که حاکی از عدم توزیع مناسب آن ها می باشد، مشاهده می شود. افزایش نانو لوله های کربنی باعث تجمع بیشتر و در نتیجه کاهش تر شوندگی کامل آن ها با رزین می شود.

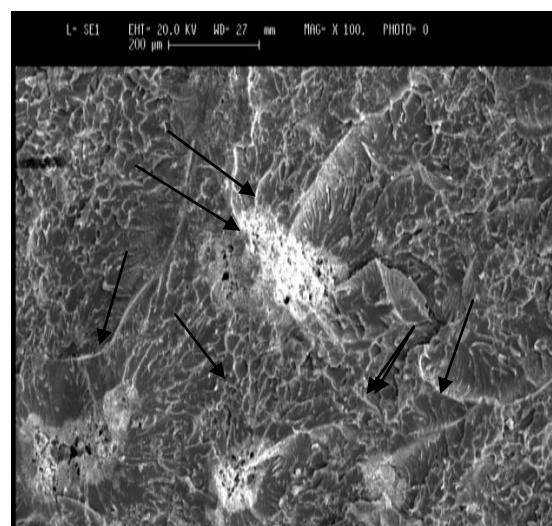
#### ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نانو کامپوزیت های پایه پلیمری وینیل استر تقویت شده با نانو لوله های کربنی چنددیواره ساخته شد و از استاندارد ASTM D638 آزمون کشش بمنظور بررسی خواص کششی این نانو کامپوزیت ها استفاده شد. همچنین سطوح شکست و مکانیزم های جذب انرژی نانو لوله های کربنی در حین شکست مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد با افزایش درصد وزنی نانو لوله های کربنی چنددیواره، استحکام کششی و چقرمگی شکست کاهش و مدول یانگ نانو کامپوزیت ها افزایش می یابد. همچنین افزایش درصد وزنی نانو لوله ها منجر به توزیع نامناسب تر آن ها و ایجاد مناطقی با تمرکز تنش بالا شده و از این



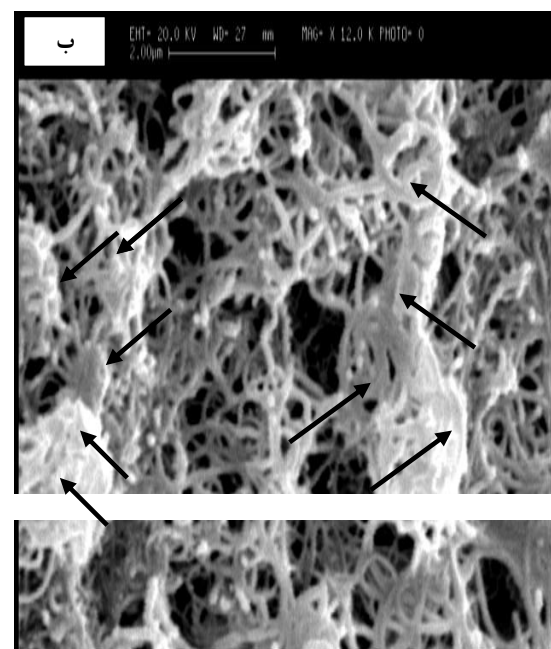
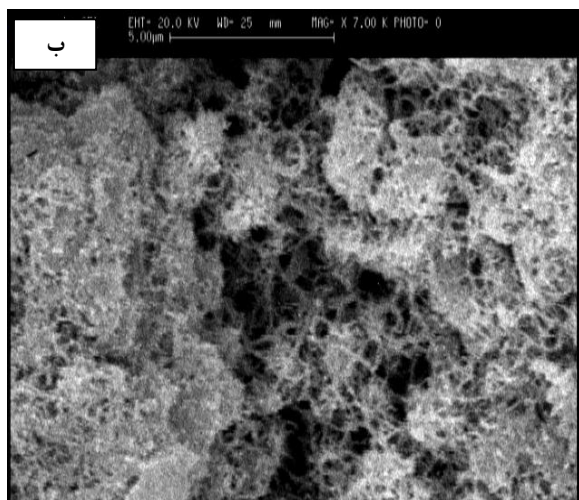
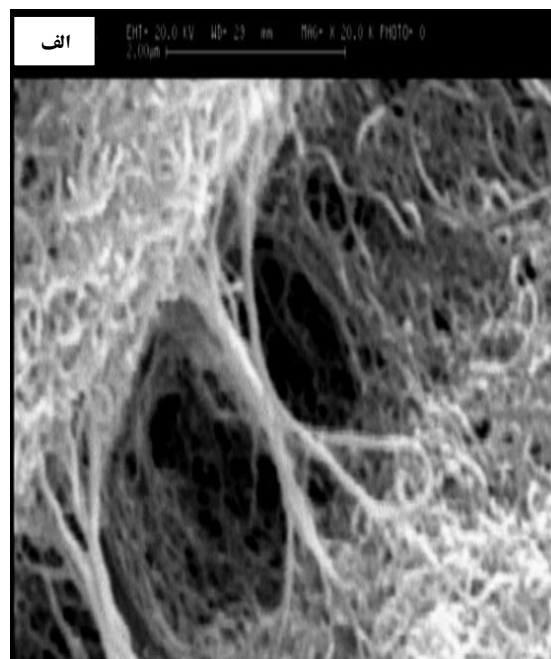
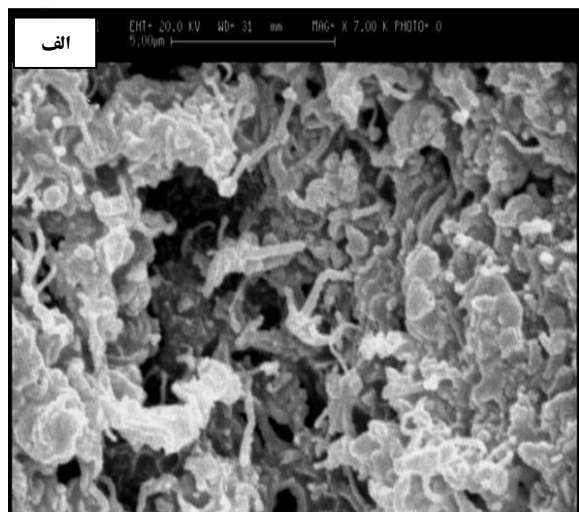
شکل (۵): سطح شکست نمونه ی وینیل استر تقویت شده با ۰/۳٪ وزنی نانو لوله های کربنی

اما شکل (۶) سطح مقطع شکست نمونه ی وینیل استر تقویت شده با ۱٪ وزنی نانو لوله های کربنی را نمایش می دهد. از آنجا که درصد وزنی نانو لوله ها در این نمونه افزایش یافته است، احتمال تجمع این نانو مواد افزایش پیدا کرده و این آگلومرها منجر به افزایش تمرکز تنش در قطعه شده و ترک از همین نواحی شروع و انتشار یافته است.



شکل (۶): سطح مقطع شکست نمونه ی وینیل استر تقویت شده با ۱٪ وزنی نانو لوله های کربنی

نواحی ترک شروع شده و انتشار می‌یابد و در نهایت منجر به شکست زود هنگام قطعه خواهد شد.



شکل (۸): تجمع نانولوله‌ها و مکانیزم شکست و کشیده شدن آن‌ها در سطح شکست دو نمونه‌ی (الف) ۰/۳٪ وزنی نانولوله کربنی-وینیل استر و (ب) ۰/۷۵٪ وزنی نانولوله کربنی-وینیل استر

شکل (۷): تجمع نانولوله‌های کربنی و مکانیزم‌های پل زدن و شکست در نمونه‌ی وینیل استر تقویت شده با ۱٪ وزنی نانولوله‌های کربنی با بزرگنمایی‌های متفاوت

### ۵- منابع

[1] S.T. Peters, "Handbook of composites", 2<sup>nd</sup> ed., Chapman and Hall, London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, 1998.

[۲] م. ح. بهشتی، ا.م. رضادوست، "پلاستیک‌های تقویت شده

- [12] S.H. Park, P.R. Bandaru, "Improved mechanical properties of carbon nanotube/polymer composite through the use of carboxyl-epoxide functional group linkages", *Journal of Polymer*, vol. 51, pp. 5071-5077, 2010.
- [13] A.T. Seyhan, "Development of multi and double walled carbon nanotubes (cnts)/vinylester nanocomposites", Ph. D. Thesis Izmir Institute, 2008.
- [14] H.G Cebeci, H. de Villoria, A.J. Hart and B.L. Wardle, "Multifunctional properties of high volume fraction aligned carbon nanotube polymer composites with controlled morphology", *Journal of Composites Science and Technology*, vol. 69, pp. 2649-2656, 2009.
- (کامپوزیت‌ها)، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران.
- [3] Z. Guo, X. Liang, T. Pereria, R. Scaffaro and H. Hahn, "CuO nanoparticle filled vinyl-ester resin nano composites: Fabrication, Characterization and Property analysis", *Journal of Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 2036-2044, 2007.
- [4] E.T. Thostenson, S. Ziaee and T. Chou, "Processing and electrical properties of carbon nanotube/vinyl-ester nanocomposites", *Journal of Composite Science and Technology*, vol. 69, pp. 801-804, 2009.
- [5] F. Aviles, "oxidation and silanization of MWCNTs for MWCNT/vinyl ester composites", *Express polymer letters*, vol. 5, pp. 766-776, 2011.
- [6] S. Kanagaraj, F. Varanda, T. Zhil'tsova, M. Oliveira and A. Simões, "Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites", *Journal of Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 3071-3077, 2007.
- [7] E. Thostenson and T. Chou, "Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites, *Journal of Carbon*", vol. 44, pp. 3022-3029, 2006.
- [8] B. Fiedler, F. Gojny, M. Wichmann, M. Nolte and K. Schulte, "Fundamental aspects of nano-reinforced composites", *Journal of Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 3115-3125, 2006.
- [9] R. Andrews, M.C. Weisenberger, "Carbon nanotube polymer composites", *Journal of Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 8, pp. 31-37, 2004.
- [10] M. Wong, M. Paramsothy, X.J. Xu Ren, S. Y. Li and K. Liao, "Physical interactions at carbon nanotube-polymer interface", *Journal of Polymer*, vol. 44, pp. 7757-7764, 2003.
- [11] J. Coleman, U. Khan, W.J. Blau and Y.K. Gun'ko, "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites", *Journal of Carbon*, vol. 44, pp. 1624-1652, 2006.
- 
- ۶- پی نوشت ها
- [1] Methacrylate  
 [2] Methacrylic Acid  
 [3] Chlorendic  
 [4] Zhanhu  
 [5] Thostenson  
 [6] Avilles  
 [7] Swancor  
 [8] CVD  
 [9] MEKP  
 [10] Cobalt  
 [11] DMA  
 [12] Ultrasonic process  
 [13] AROAN  
 [14] Specific surface area  
 [15] Stone Wales  
 [16] Random  
 [17] Void coalescence  
 [18] entanglement