

## بررسی حساسیت نانوماده مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی در کرنش سنجی با استفاده از تغییرات مقاومت الکتریکی

امید سام دلیری<sup>۱</sup>، آزاده وطنی<sup>۲</sup>، علی بزرگمهر<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، omid\_sam@ut.ac.ir

۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

### چکیده

نانولوله‌های کربنی چندجداره، که در مواد پلیمری به کار می‌روند، با هدف ایجاد حسگر پیزو مقاومتی در پایش سلامت سازه‌های مهندسی استفاده می‌شوند. در این مقاله، حساسیت به تغییرات کرنش در نانوماده مرکب حاوی نانولوله کربنی - اپوکسی با استفاده از تغییرات الکتریکی بررسی شد. حسگر نانوماده مرکب روی یک تیر آلومینیومی یک‌سر گیردار چسبانده شده است تا اعمال کرنش روی آن ممکن باشد. ابتدا نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد‌های مختلف وزنی از ۰/۱ تا ۱/۵، درون زمینه اپوکسی به صورت نسبتاً یکنواخت توزیع شدند. این فرایند توسط یک همزن مکانیکی انجام شد. بدین ترتیب ماده‌ای هوشمند و مناسب برای سنجش کرنش ایجاد گردید. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی ریزساختار این حسگر بررسی شد تا نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی و تشکیل شبکه رسانا مشخص شود. اثر فرایند آماده‌سازی نانوماده مرکب بر تغییرات الکتریکی و کرنش، طی بارگذاری مکانیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده منجر به حساسیت بیشتر حسگر نسبت به تغییرات الکتریکی شده است. همچنین آماده‌سازی نمونه‌ها با دو دمای پخت ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که نمونه‌های ساخته شده با دمای پخت پایین‌تر، حساسیت بیشتری نسبت به کرنش اعمال شده دارند.

### واژگان کلیدی

نانولوله‌های کربنی، نانوماده مرکب، تغییرات مقاومت الکتریکی، حسگر

### ۱. مقدمه

است. به منظور افزایش استحکام و دوام مکانیکی سازه‌های مهندسی از مواد مرکب پیشرفته استفاده می‌شود. ذرات کربنی مانند

امروزه استفاده از مواد غیرارگانیک و افزودن آنها به مواد مرکب با زمینه پلیمری، منجر به توسعه و بهبود عملکرد مواد مرکب شده

تغییر فاصله میان آنهاست. سومین دلیل تغییر در شبکه پیرو مقاومتی ناشی از تغییر شکل می‌باشد. از میان عوامل ذکر شده، دو عامل اول و دوم تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر تغییرات مقاومت الکتریکی نانوماده مرکب در هنگام اعمال بار مکانیکی دارند. نینگ هو و همکاران [۲۲] با استفاده از مدل تحلیلی مونت کارلو، اثر تونل‌زنی نانولوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی را روی تغییرات رسانایی این حسگر بررسی نمودند و نتایج خود را با استفاده از روش تجربی تأیید کردند. آنها در مدل تحلیلی، نانولوله‌های کربنی توزیع شده در زمینه اپوکسی را به صورت استوانه‌ای در نظر گرفتند و در روش تجربی، اثر روش ساخت و پارمترهای آماده‌سازی را روی میزان تغییرات الکتریکی حسگر، بررسی نکردند. تنها پارمتر تجربی آنها کسر حجمی نانولوله‌های کربنی بوده که برای درصدهای بالاتر از یک بررسی شد. تاکنون در مورد لزوم به‌کارگیری حسگر نانوماده مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی در ارزیابی سلامت سازه‌ها بحث شد. در بیشتر تحقیق‌های انجام شده در کرنش‌سنجی و آسیب‌سنجی با نانوماده مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی و با روش تغییرات الکتریکی، نانولوله کربنی با درصد وزنی ثابت در زمینه اپوکسی ترکیب شده است. همچنین در این تحقیق‌ها اثر سایر عوامل مانند شرایط آماده‌سازی نانوماده مرکب و دمای پخت، روی تغییرات الکتریکی حسگر مورد بررسی قرار نگرفته است؛ زیرا هر چقدر نانوماده مرکب به‌عنوان حسگر، حساسیت بالاتری نسبت به کرنش داشته باشد، ارزیابی سلامت سازه بهتر انجام می‌شود. یکی از عوامل مهم و اثرگذار بر حساسیت این حسگرها درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موجود در نانوماده مرکب می‌باشد. این مقاله با هدف افزایش دقت حسگر در کرنش‌سنجی سازه‌ها ارائه شده است. این نانوماده مرکب یا حسگر با درصدهای مختلف وزنی از نانولوله کربنی و در دو دمای پخت مختلف آماده شده است. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی، از جریان مستقیم استفاده شد. به‌منظور بررسی تغییرات الکتریکی، حسگر را روی یک تیر یک‌سر گیردار آلومینیومی چسبانده و نیروی مکانیکی عمود بر سطح افقی تیر اعمال شد.

## ۲. روند آزمایشگاهی

### ۲-۱. مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

نانوماده مرکب ساخته شده حاوی اپوکسی به‌عنوان زمینه و نانولوله کربنی چندجداره محصول شرکت واکو ژاپن<sup>۱</sup> به‌عنوان نانوذره

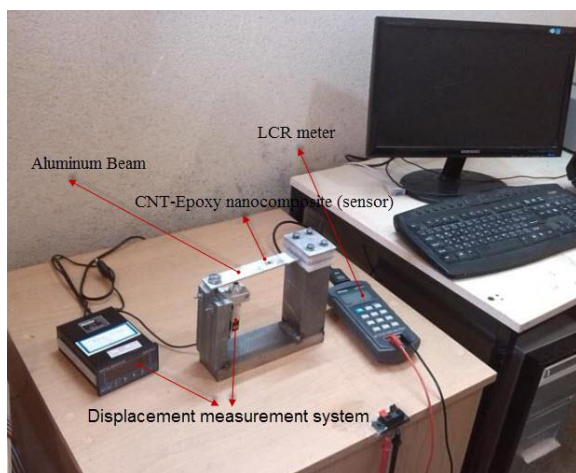
فیبرهای کربنی، بلوک‌های کربن و به تازگی استفاده از نانولوله‌های کربنی، به‌طور گسترده در تحقیقات به‌منظور بهبود خواص مکانیکی (خواص الاستیک، استحکام شکست و چقرمگی شکست، سختی) [۱-۴] و الکتریکی مواد مرکب [۵-۸] مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار الکتریکی و مکانیکی مناسب مواد مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی سبب شده تا به‌عنوان یک حسگر، در ارزیابی سلامت سازه‌ها به‌کار رود [۹-۱۰]. این نانوذره کربنی به‌همراه پلیمرها، مواد مرکبی را ایجاد می‌کنند که نقش یک حسگر در ارزیابی سلامت سازه‌های بزرگتر مانند پل‌ها را دارد [۱۱]. چنانچه این حسگر در مکان‌های مناسب در سازه، جاسازی شود، تغییرشکل‌های ناخواسته در سازه سبب اعمال نیرو و پیشرفت آسیب در حسگر و در نتیجه تغییرات مقاومت الکتریکی در حسگر خواهد شد. بنابراین مفهوم پایش وضعیت سازه، براساس تغییرات هدایت الکتریکی حسگر جاسازی شده در آن سازه می‌باشد. لذا می‌توان شروع و توسعه تغییرشکل‌ها در آن سازه را با ارزیابی تغییرات الکتریکی و با گذشت زمان بررسی نمود.

بهبود خصوصیات مکانیکی و الکتریکی مواد مرکب حاوی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و چندجداره و سایر نانوذرات کربنی قبلاً گزارش شده است [۱۲-۱۴]. نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نماینده‌ای از نانوذرات کربنی، همراه ماده پلیمری در صنایع مختلف به‌عنوان حسگرهای گازی [۱۵] و حسگرهای کرنشی [۱۶] به‌کار می‌روند. وقتی نانوذرات رسانا درون زمینه پلیمری توزیع می‌شوند، یک شبکه رسانا درون زمینه پلیمری ایجاد می‌شود. میزان رسانایی این شبکه، تحت تأثیر درصد وزنی نانوذرات، آثار متقابل میان نانوذرات در زمینه پلیمری و چگونگی توزیع آنها می‌باشد [۱۷-۱۸]. تمام پارامترهای ذکر شده در قسمت قبل، ارتباط نزدیکی با ویژگی حسگری ماده مرکب نانولوله‌های کربنی با زمینه پلیمری دارد. کرنش‌سنجی در ماده مرکب با پایه پلیمر حاوی نانولوله‌های کربنی، بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی است. این تغییرات ناشی از تغییر شکل و شکست در زمینه پلیمری در هنگام بارگذاری است [۱۹-۲۱]. به دلائل زیر، تغییرات شبکه مقاومتی در شبکه رسانا، کمک به شناسایی شبکه پیرومقاومتی در این نانوماده مرکب خواهد کرد [۲۲]. نخستین دلیل تخریب شبکه رساناست که به‌دلیل از بین رفتن تماس میان دو نانولوله کربنی مجاور ایجاد شده است. دومین دلیل، تغییرات مقاومت تونلی میان دو نانولوله کربنی مجاور می‌باشد که ناشی از

۲۰۰ میکرون انتخاب شد. این ابعاد براساس اندازه کرنش سنج‌های تجاری فلزی انتخاب شد. بدین‌منظور نمونه‌ها تا رسیدن به ضخامت ۲۰۰ میکرون (با کاغذ سمباده عدد ۱۵۰۰) سنباده و سپس با استفاده از محلول پولیش حاوی اکسید آلومینا پرداخت شدند. شکل ۱ حسگر کامپوزیتی که روی یک تیر آلومینیومی چسبانده شده است را نشان می‌دهد.

## ۲-۲. سیستم اندازه‌گیری جهت اعمال کرنش و بررسی حساسیت نمونه‌ها

به‌منظور بررسی حساسیت به کرنش نمونه‌ها، از یک تیر یک‌سر گیردار آلومینیومی استفاده شد. بدین‌طریق که حسگر نانوماده مرکب در فاصله معین روی سطح تیر با استفاده از پلیمر دو جزئی میتراپل چسبانده شدند. دو سیم مسی در دو طرف نانوماده مرکب و با چسب نقره متصل شدند. تغییرات مقاومت الکتریکی با جریان مستقیم و به روش اتصال دوتایی اندازه‌گیری می‌شود. از دستگاه LCR (محصول شرکت TECPEL تایوان) به‌منظور ثبت تغییرات مقاومت الکتریکی در اثر اعمال کرنش به نمونه‌ها استفاده شده است. این دستگاه دارای خروجی RS-232-C می‌باشد که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد و تغییرات مقاومت الکتریکی را در هر لحظه ثبت می‌کند. محدوده اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی این دستگاه بین  $0/001$  اهم تا  $10^8$  مگا اهم می‌باشد. چون ضخامت نمونه‌های نانوماده مرکب ۲۰۰ میکرون می‌باشد، میزان کرنش وارده به تیر در خارجی‌ترین لایه از تار خنثی، به‌عنوان کرنش حسگر در نظر گرفته شد.



شکل ۲. تجهیزات اندازه‌گیری کرنش و تغییرات مقاومت الکتریکی در تیر یک سر گیردار آلومینیومی

رسانا می‌باشد. قطر این نانولوله ۳ تا ۱۰ نانومتر بوده و بالای ۹۵ درصد کربن گرافیتی دارد. روند ساخت نمونه‌ها به دو روش مختلف انجام شد. تفاوت اصلی این دو روش در ترتیب اختلاط اجزای تشکیل‌دهنده است. در روش اول، ابتدا اپوکسی PR700 و CNT چندجداره و در روش دوم اپوکسی PR700 و سخت‌کننده PR700 PolyolST 109000 مخلوط شدند. این نوع رزین و سخت‌کننده محصول شرکت فرانسوی Synthene است. گفتنی است برای اختلاط مواد در تمامی مراحل، از همزن مکانیکی (IKA RW20 Digital) ساخت شرکت آلمانی IKA استفاده شده است. این دستگاه ۳/۱ کیلوگرم وزن دارد و یک نمایشگر دیجیتالی تنظیم دور، بین ۶۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه دارد. در روش اختلاط اولیه رزین اپوکسی و نانولوله کربنی ابتدا با استفاده از همزن مکانیکی، اپوکسی با درصد‌های مختلف وزنی نانولوله کربنی (۱/۰ تا ۱/۵) و زمان مخلوط ۲۵ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. سپس سخت‌کننده به مخلوط اضافه شده و روند هم‌زدن به مدت یک دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه ادامه یافت. در انتها مخلوط بدست آمده به مدت سه دقیقه با سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه مخلوط شدند. رزین و سخت‌کننده بنا بر دستورالعمل سازنده به نسبت ۱۰ به ۱ با هم مخلوط شدند. در روش اختلاط اولیه رزین اپوکسی و سخت‌کننده، اپوکسی و سخت‌کننده به مدت یک دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از همزن مکانیکی با هم مخلوط شدند، سپس به مخلوط مورد نظر درصد‌های مختلفی از CNT اضافه شد و هم‌زدن به مدت یک دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه ادامه یافت. پس از فرآوری مواد سازنده نانوماده مرکب، مخلوط به‌دست آمده در قالب‌هایی از جنس تفلون ریخته شده و در دو دمای مختلف (۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت دو ساعت عملیات حرارتی شدند.



شکل ۱. تیر آلومینیومی و حسگر نانوماده مرکب چسبانده شده روی آن

طول و عرض نمونه‌هایی که برای اندازه‌گیری به‌عنوان حسگر کرنش مورد استفاده قرار گرفتند، ۱۰ و ۵ میلی‌متر و ضخامت آن

کرنش‌های بیشتر را می‌توان با دو دلیل اصلی توجیه کرد. اولین و مهم‌ترین دلیل، ارتباط غیرخطی فاصله نانولوله‌های کربنی با هم در ماتریس پلیمری با مقاومت تونلی است که تحت عنوان تئوری سیمونز ارائه شده است [۲۲]. مبنای انتخاب این نوع از کرنش‌سنج‌ها بر اساس تغییرات الکتریکی این حسگر حین بارگذاری می‌باشد. به‌علاوه میان تغییرات الکتریکی و کرنش اعمال‌شده بر حسگر، رابطه‌ای ریاضی وجود دارد که تقریباً به‌صورت خطی است که در ادامه توصیف شده است.

### ۳-۱-۱. نمونه‌ها با ترکیب اولیه رزین اپوکسی و نانولوله کربنی

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای فیلم‌های نانوماده مرکب ساخته‌شده با اختلاط اولیه رزین اپوکسی و نانولوله کربنی با درصد‌های وزنی مختلف (۰/۰۵، ۰/۲ و ۱/۵ درصد) و دمای پخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به واکنش‌پذیری کم‌سطحی در نانولوله‌های کربنی، در عمل میل بسیار ناچیزی به ایجاد واکنش بین تقویت‌کننده و ماتریس وجود دارد. این امر سبب می‌شود گاهی اعمال کرنش تنها منجر به کشیده‌شدن فاز ماتریس شود و فاصله نانولوله‌های کربنی بدون تغییر بماند. به‌همین دلیل در نقاطی از نمودار تغییرات ناچیز مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود.

مقدار کرنش اعمال شده ( $\epsilon$ ) به نمونه نانوماده مرکب در هر مرحله از اعمال نیرو توسط پیچ، با استفاده از معادلات تیر اویلر برنولی مطابق رابطه ۱ به‌دست آمد. در این رابطه،  $x$  فاصله محل نصب سنسور تا انتهای ثابت تیر،  $L$  فاصله محل اعمال نیرو توسط پیچ تا انتهای ثابت تیر،  $EI$  صلابت خمشی تیر،  $c$  فاصله تار خنثی تا سطح آزاد تیر و  $F$  مقدار نیروی اعمالی توسط پیچ هستند.

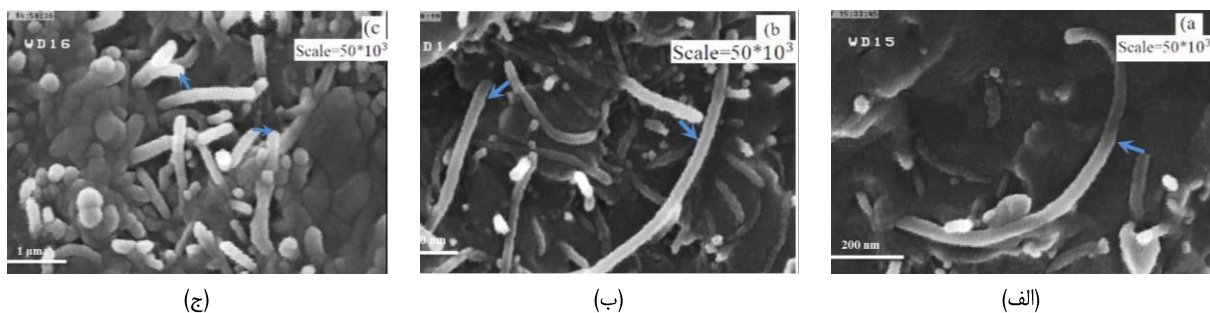
$$\epsilon = \frac{F(L-x)c}{EI} \quad (1)$$

شماتیکی از مجموعه دستگاه‌ها، نمونه و نحوه اندازه‌گیری در شکل ۲ نمایش داده شده است. هر یک از آزمایش‌ها سه بار تکرار شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. پاسخ مقاومت الکتریکی فیلم نانوماده مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی

به‌طور کلی مکانیزم کرنش‌سنج‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی را می‌توان به این دلایل نسبت داد: (۱) تغییرات آشکار شبکه رسانایی شکل‌گرفته توسط نانولوله‌های کربنی با از بین رفتن تماس میان آنها؛ (۲) تغییرات مقاومت تونلی در نانولوله‌های کربنی مجاور هم به‌دلیل تغییر فاصله؛ (۳) تغییرات پیرو مقاومتی خود نانولوله‌های کربنی به‌دلیل تغییر شکل به‌وجود آمده در اثر اعمال تنش. تغییرات غیرخطی مقاومت الکتریکی به ازای اعمال



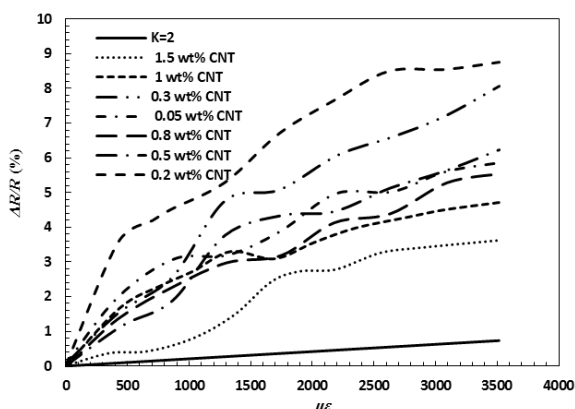
شکل ۳. تصویر FE-SEM آثار تونل‌زنی میان نانولوله‌های کربنی مجاور برای اختلاط اولیه اپوکسی (الف) ۰/۰۵، (ب) ۰/۲، (ج) ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی در دمای پخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد

لذا انتظار می‌رود سهم پیرو مقاومتی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پیرو مقاومتی کل نانوماده مرکب بسیار کوچک باشد. پاسخ پیرو مقاومتی کرنش‌سنج‌های تجاری در شکل ۴ آمده است. حسگر را می‌توان با استفاده از کمیت ضریب گنج مشخص کرد. ضریب گنج به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود [۲۳] که  $R_0$

علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تغییر شکل محدودی از نانولوله‌های کربنی انتظار داریم که به‌دلیل انتقال ضعیف تنش از ماتریس پلیمری به این نوع نانولوله‌های کربنی است که علاوه بر عدم تطابق الاستیک بین نانولوله‌های کربنی و پلیمر، به‌دلیل استحکام ضعیف خط اتصال بین آنهاست.

### ۳-۱-۳. مقایسه پاسخ پیرومقاومتی نانوماده مرکب با دو فرایند ساخت مختلف

همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، در هر دو حالت فرایند ساخت با تغییر مقدار کرنش وارده به حسگر، مقاومت الکتریکی نیز تغییر کرده است. همچنین در هر دو حالت فرایند ساخت، بهترین پاسخ پیرومقاومتی برای ۰/۲ درصد نانولوله کربنی به‌دست آمده است. مقایسه همزمان رفتار پیرو مقاومتی دو نمونه با درصد وزنی برابر و فرایند ساخت مختلف (شکل‌های ۵ و ۶) به‌خوبی نشان می‌دهد که اختلاط اولیه رزین و سخت‌کننده منجر به حساسیت بالاتر حسگر نسبت به حالت اختلاط اولیه رزین و نانولوله کربنی شده است. پوشش نانولوله‌های کربنی توسط زنجیره‌های پلیمری بسیار پیچیده است، با اینحال به‌نظر می‌رسد اختلاط اولیه رزین و سخت‌کننده مانع آن می‌شود تا در درصد‌های پایین، نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری کپسوله شوند. این خود اثر مفیدی بر حساسیت حسگر نهایی دارد. از طرف دیگر، سرعت و زمان اختلاط نیز بر حساسیت حسگر نانولوله کربنی - اپوکسی تأثیرگذار است. به‌گونه‌ای که فرایند اختلاط با نیروی برشی ملایم‌تر و زمان اختلاط کمتر منجر به تشکیل شبکه‌های رسانایی ماکروسکوپیک بیشتری از نانولوله‌های کربنی می‌شود که این امر سبب تغییرات مقاومت بیشتر در کرنش‌های بالاتر می‌شود (شکل ۷). در حالت اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده، کلوخه‌های بیشتری از نانولوله‌های کربنی، نسبت به حالت اختلاط اولیه اپوکسی و نانولوله کربنی وجود دارد. این موضوع در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۵. مقایسه پاسخ پیرو مقاومتی نانوماده مرکب با اختلاط اولیه اپوکسی و CNT

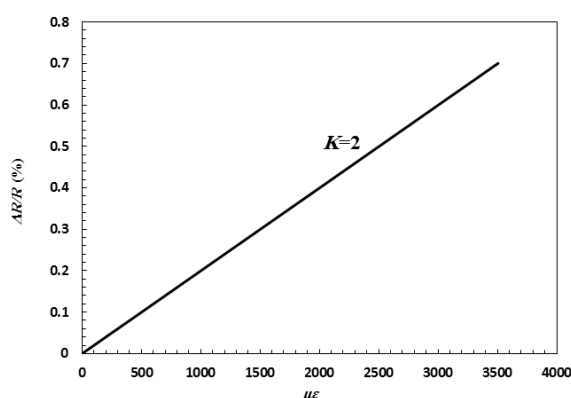
مقاومت الکتریکی اولیه نمونه،  $\Delta R$  تغییر مقاومت الکتریکی نمونه تحت کرنش مشخص و  $\epsilon$  مقدار کرنش اعمال شده به نمونه نانوماده مرکب است. مقدار ضریب گنج در کرنش‌سنج‌های تجاری برابر ۲ می‌باشد [۲۳].

$$K = \frac{\Delta R}{\epsilon R_0} \quad (2)$$

مقایسه همزمان رفتار پیرو مقاومتی نمونه‌ها با اختلاط اولیه رزین اپوکسی و نانولوله کربنی با کرنش‌سنج‌های تجاری (شکل ۵) به‌خوبی نشان می‌دهد که نمونه‌ها با اختلاط اولیه رزین اپوکسی و نانولوله کربنی منجر به حساسیت بالاتر نمونه‌ها نسبت به کرنش‌سنج‌های تجاری شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با تغییر مقدار کرنش وارده به حسگر، مقاومت الکتریکی نیز تغییر کرده است. با توجه به بالا بودن مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با ۰/۰۱ و ۰/۰۲ درصد CNT، قابلیت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی این نمونه‌ها را نداشتیم و نتایج این نمونه‌ها در نتایج آورده نشده است. در این حالت، بهترین حساسیت نمونه‌ها به ازای ۰/۲ درصد وزنی به‌دست آمده است.

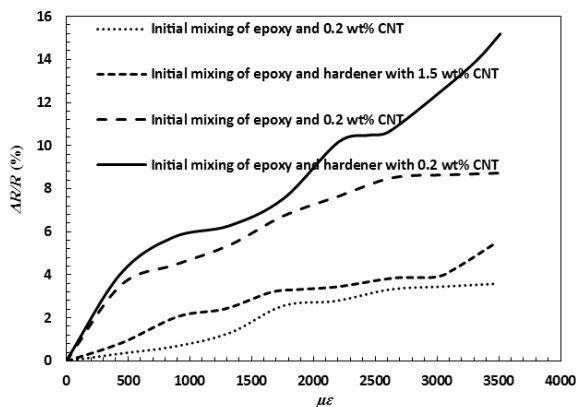
### ۳-۱-۲. نمونه‌ها با ترکیب اولیه رزین پوکسی و سخت‌کننده

شکل ۶ پاسخ پیرو مقاومتی فیلم‌های نانوماده مرکب ساخته شده با اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده با درصد‌های وزنی مختلف (از ۰/۰۱ تا ۱/۵) و دمای پخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با تغییر مقدار کرنش وارده به حسگر، مقاومت الکتریکی نیز تغییر کرده است. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که در این حالت نیز بهترین حساسیت برای ۰/۲ درصد نانولوله کربنی به‌دست آمده است.

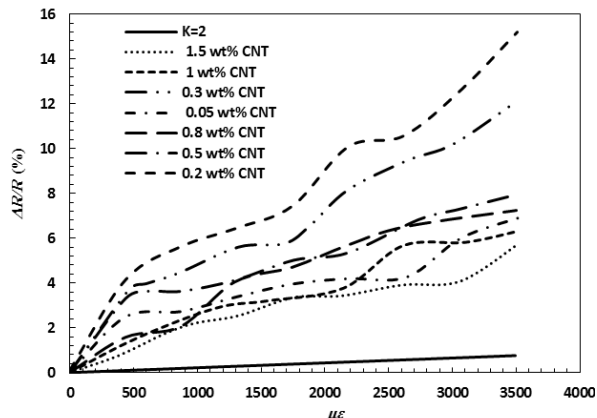


شکل ۶. نمودار پاسخ پیرو مقاومتی کرنش‌سنج‌های تجاری [۲۳]

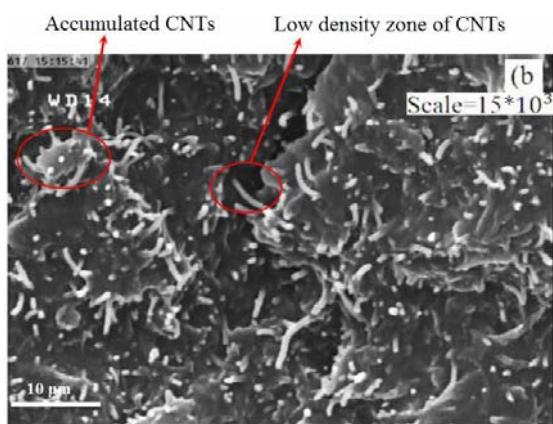




شکل ۷. پاسخ پیژومقاومتی نانوماده مرکب با روش‌های مختلف آماده‌سازی برای ۰/۲ درصد وزنی CNT



شکل ۶. مقایسه پاسخ پیژومقاومتی نانوماده مرکب با اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده



شکل ۸. تصویر سطح شکست نمونه‌ها با ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی برای (الف) اختلاط اولیه اپوکسی و نانولوله کربنی، (ب) اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده

فرایند، فرایند نفوذ است. درصد وزنی ذرات پرکننده در این مرحله، آستانه نفوذ نامیده می‌شود. بالاترین حساسیت در یک نانوماده مرکب زمانی به دست می‌آید که درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به مقدار آستانه نفوذ نزدیک باشد [۱۶، ۲۲]. با توجه به نتایج به دست آمده برای نمونه‌های ساخته شده به نظر می‌رسد که مقدار آستانه نفوذ برای هر دو فرایند ساخت نانوماده مرکب در محدوده ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی باشد.

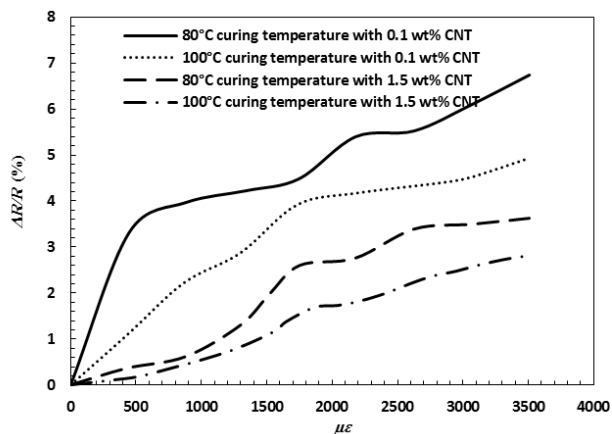
### ۳-۳. اثر دمای فرایند پخت نانوماده مرکب بر حساسیت حسگر

درجه حرارت بالا در فرایند پخت می‌تواند رسانایی الکتریکی نانوماده مرکب را افزایش دهد؛ زیرا درجه حرارت بالا موجب افزایش تحرک نانولوله‌های کربنی شده و روند شکل‌گیری شبکه رسانایی خیلی آسان‌تر و سریع‌تر می‌شود. لذا در حالتی که دمای

### ۳-۲. بررسی مقادیر آستانه نفوذ الکتریکی برای نمونه‌های مختلف

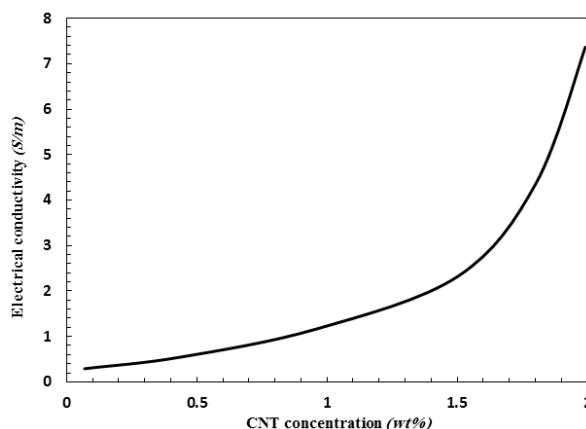
وقتی در یک نانوماده مرکب ماده زمینه (عایق) و نانولوله کربنی (رسانا) با هم ترکیب شوند، ممکن است چندین نانولوله کربنی مختلف به صورت زنجیروار به هم رسیده و تشکیل یک مسیر میانی در فیلم نازک دهند و نانوماده مرکب را از حالت عایق به سمت رسانا بودن منحرف کند. تئوری که رابطه بین تراکم پرکننده (نانولوله‌های کربنی در این مورد خاص) و رسانایی را توصیف می‌کند، تئوری نفوذ نامیده می‌شود [۱۶]. همان‌گونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود (شکل ۹)، یک مقدار بحرانی برای تراکم پرکننده وجود دارد، اگر میزان تراکم پرکننده زیر مقدار بحرانی باشد احتمال تشکیل مسیر رسانایی برابر صفر است و اگر بیشتر از مقدار بحرانی باشد مسیر رسانا تشکیل می‌شود و رسانایی الکتریکی نانوماده مرکب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این

ساخت و به ازای درصدهای وزنی مختلف از نانولوله کربنی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که نمونه‌های ساخته شده با دمای پخت پایین‌تر دارای حساسیت بهتری نسبت به کرنش اعمال شده هستند.

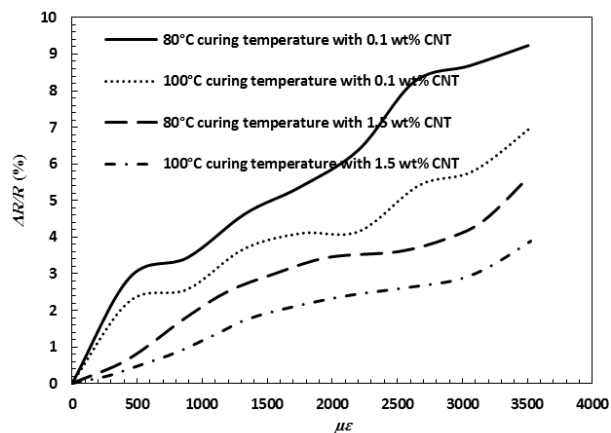


شکل ۱۰. مقایسه پاسخ پیزو مقاومتی نمونه‌ها با دمای پخت مختلف برای اختلاط اولیه اپوکسی و نانولوله کربنی

فرایند پخت پایین باشد می‌تواند مقاومت الکتریکی نانوماده مرکب را افزایش دهد. یک شبکه رسانایی پراکنده با مقاومت بالا می‌تواند برای به دست آوردن حساسیت حسگری بالاتر مطلوب باشد [۲۴]. تأثیر دمای پخت نانوکامپوزیت بر حساسیت حسگر با دو فرایند



شکل ۹. منحنی آستانه نفوذ الکتریکی نانوماده مرکب



شکل ۱۱. مقایسه پاسخ پیزو مقاومتی نمونه‌ها با دمای پخت مختلف برای اختلاط اولیه اپوکسی و سخت کننده

به سخت شدن می‌کند، مدت زمان فرایند تولید در این روش نمی‌تواند طولانی باشد. به همین دلیل در روش اختلاط اولیه اپوکسی و سخت کننده، نانولوله‌های کربنی به خوبی در ماتریس اپوکسی پخش نمی‌شوند. مقایسه تصاویر نشان می‌دهد در حالت اختلاط اولیه اپوکسی و سخت کننده، کلوخه‌های بیشتری از نانولوله‌های کربنی، نسبت به حالت اختلاط اولیه اپوکسی و نانولوله کربنی وجود دارد. وجود توده‌های جمع شده از نانولوله کربنی، تأثیر بسزایی بر هدایت

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله نانوماده مرکب نانولوله کربنی - اپوکسی با استفاده از هم‌وزن مکانیکی و با درصدهای مختلف وزنی از نانولوله‌های کربنی آماده شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، ریزساختار نانوماده مرکب ارزیابی شد؛ به طوری که توزیع اتفاقی و نسبتاً یکنواخت نانولوله کربنی چند جداره درون زمینه اپوکسی مشاهده شد. به این ترتیب رسانایی و استحکام مناسب برای نانوماده مرکب حاصل شد. نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱. در حالت اختلاط اولیه اپوکسی و سخت کننده، باید توجه داشت چون با افزودن سخت کننده مخلوط شروع

پیزومقاومتی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پیزومقاومتی کل نانوماده مرکب بسیار کوچک باشد

۴. آثار درصد وزنی نانولوله کربنی و زمان اضافه کردن سخت‌کننده در رفتار حسگری نانوماده مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که اختلاط اولیه اپوکسی و سخت‌کننده منجر به حساسیت بیشتر حسگر می‌شود. همچنین درصدهای وزنی نسبتاً پایین‌تر نانوماده مرکب منجر به حساسیت بهتر می‌شود، به گونه‌ای که بالاترین حساسیت حسگر برای هر دو فرایند ساخت به ازای ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی باشد

۵. بالاترین حساسیت در یک نانوماده مرکب زمانی به دست می‌آید که درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به مقدار آستانه نفوذ نزدیک باشد. با توجه به نتایج به دست آمده برای نمونه‌های ساخته شده، به نظر می‌رسد مقدار آستانه نفوذ برای هر دو فرایند ساخت نانوماده مرکب در محدوده ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی باشد

۶. آماده‌سازی نمونه‌ها با دو دما پخت مختلف نشان داد که نمونه‌های ساخته شده با دمای پخت پایین‌تر دارای حساسیت بهتری نسبت به کرنش اعمال شده هستند

الکتریکی و حساسیت فیلم پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی دارد

۲. به طور کلی، مکانیزم عملکرد کرنش‌سنج‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی را می‌توان به دلایل زیر نسبت داد: تغییرات آشکار شبکه رسانایی شکل گرفته توسط نانولوله‌های کربنی با از بین رفتن تماس میان آنها، تغییرات مقاومت تونلی در نانولوله‌های کربنی مجاور هم به دلیل تغییر فاصله و تغییرات پیزومقاومتی خود نانولوله‌های کربنی به دلیل تغییر شکل به وجود آمده در اثر اعمال تنش

۳. با توجه به واکنش پذیری کم سطحی در نانولوله‌های کربنی، در عمل میل بسیار ناچیزی به ایجاد واکنش بین تقویت‌کننده و ماتریس وجود دارد. علاوه بر این، تغییر شکل بسیار محدودی از نانولوله‌های کربنی انتظار می‌رود که به دلیل انتقال ضعیف تنش از ماتریس اپوکسی به این نوع نانولوله‌های کربنی می‌باشد که علاوه بر عدم تطابق الاستیک بین نانولوله‌های کربنی و پلیمر (مدول الاستیک نانولوله کربنی برابر یک تراپاسکال در حالی که مدول الاستیک اپوکسی ۲/۴ گیگاپاسکال می‌باشد)، به دلیل استحکام ضعیف خط اتصال میان آنها نیز می‌باشد. لذا انتظار می‌رود سهم

#### ۴. مآخذ

- [1] J. Suhr, N. Koratkar, P. Keblinski, P. Ajayan, Viscoelasticity in carbon nanotube composites, *Nature materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 134-137, 2005.
- [2] F. Gojny, M. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 15, pp. 2363-2371, 2004.
- [3] E. T. Thostenson, T. W. Chou, On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 5, pp. 573, 2003.
- [4] E. T. Thostenson, T. W. Chou, Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization, *Journal of physics D: Applied physics*, Vol. 35, No. 16, pp. L77, 2002.
- [5] F. Du, J. E. Fischer, K. I. Winey, Effect of nanotube alignment on percolation conductivity in carbon nanotube/polymer composites, *Physical Review B*, Vol. 72, No. 12, pp. 121404, 2005.
- [6] B. Vigolo, C. Coulon, M. Maugey, C. Zakri, P. Poulin, An experimental approach to the percolation of sticky nanotubes, *Science*, Vol. 309, No. 5736, pp. 920-923, 2005.
- [7] L. Wang, Z. M. Dang, Carbon nanotube composites with high dielectric constant at low percolation threshold, *Applied physics letters*, Vol. 87, No. 4, pp. 042903, 2005.
- [8] J. Sandler, J. Kirk, I. Kinloch, M. Shaffer, A. Windle, Ultra-low electrical percolation threshold



- in carbon-nanotube-epoxy composites, *Polymer*, Vol. 44, No. 19, pp. 5893-5899, 2003.
- [9] K. Schulte, C. Baron, Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements, *Composites science and technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 63-76, 1989.
- [10] B. M. Lee, S. Gupta, K. J. Loh, S. Nagarajaiah, Strain sensing and structural health monitoring using nanofilms and nanocomposites, *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering*, pp. 303, 2016.
- [11] D. D. Chung, Self-monitoring structural materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 22, No. 2, pp. 57-78, 1998.
- [12] J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, Y. K. Gun'ko, Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites, *Carbon*, 2006, Vol. 44, No. 9, pp. 1624-1652, 1998.
- [13] D. J. Kwon, Z. J. Wang, J. Y. Choi, P. S. Shin, K. L. DeVries, J. M. Park, Damage sensing and fracture detection of CNT paste using electrical resistance measurements, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 90, pp. 386-391, 2016.
- [14] S. Mishra, K. Kumaran, R. Sivakumaran, S. P. Pandian, S. Kundu, Synthesis of PVDF/CNT and their functionalized composites for studying their electrical properties to analyze their applicability in actuation & sensing, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 509, pp. 684-696, 2016.
- [15] C. Li, E. T. Thostenson, T. W. Chou, Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 6, pp. 1227-1249, 2008.
- [16] E. T. Thostenson, T. W. Chou, Carbon nanotube networks: sensing of distributed strain and damage for life prediction and self healing, *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 21, pp. 2837-2841, 2006.
- [17] I. Alig, P. Pötschke, D. Lellinger, T. Skipa, S. Pegel, G. R. Kasaliwal, T. Villmow, Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts, *Polymer*, Vol. 53, No. 1, pp. 4-28, 2012.
- [18] M. Moniruzzaman, K. I. Winey, Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, Vol. 39, No. 16, pp. 5194-5205, 2006.
- [19] L. Flandin, Y. Brechet, J. Y. Cavaille, Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors, *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 6, pp. 895-901, 2001.
- [20] R. Zhang, M. Baxendale, T. Peijs, Universal resistivity-strain dependence of carbon nanotube/polymer composites, *Physical Review B*, Vol. 76, No. 19, pp. 195433, 2007.
- [21] M. Nofar, S. Hoa, M. Pugh, Failure detection and monitoring in polymer matrix composites subjected to static and dynamic loads using carbon nanotube networks, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 10, pp. 1599-1606, 2009.
- [22] N. Hu, Y. Karube, C. Yan, Z. Masuda, H. Fukunaga, Tunneling effect in a polymer/carbon nanotube nanocomposite strain sensor, *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 13, pp. 2929-2936, 2008.
- [23] A. Ferrreira, J. Rocha, A. Ansón-Casaos, M. Martínez, F. Vaz, S. Lanceros-Mendez, Electromechanical performance of poly (vinylidene fluoride)/carbon nanotube composites for strain sensor applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 178, pp. 10-16, 2012.
- [24] N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu, J. Li, Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites, *Sensors*, Vol. 11, No. 11, pp. 10691-10723, 2011.

پی نوشت

---

1. Wako pure chemicals