

## بررسی تاثیر جدایش بین لایه‌ای بر رفتار خودعیب‌یاب کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی حاوی نانو لوله‌های کربن

علی نیک‌بخت<sup>۱\*</sup>، کیومرث جعفری خلفلو<sup>۲</sup>، سیدعلی صدوق ونینی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، پژوهشکده فناوری های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله امکان بکارگیری خاصیت پیرومقاومت به عنوان ابزاری برای پایش برخط و تشخیص وجود عیب جدایش بین لایه‌ای در یک تیر کامپوزیتی چندلایه تحت بارگذاری خمشی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، تغییرات خاصیت پیرومقاومت ماده به عنوان رفتار خودعیب‌یاب لحاظ شده است. بدین منظور نمونه‌های تیر کامپوزیتی از پارچه الیاف کربن تک جهته و رزین اپوکسی حاوی ذرات نانولوله‌های کربن ساخته شده و عیب بین لایه‌ای به صورت مصنوعی و با قرار دادن نوار تفلون بین لایه‌ها ایجاد شده است. نمونه‌های ساخته شده تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته و تغییرات تنش-کرنش و مقاومت الکتریکی آنها در دو حالت بدون عیب و با عیب اندازه‌گیری گردیده است. از نتایج مربوط به تنش-کرنش برای تعبیر مکانیزم‌های آسیب استفاده و بدین ترتیب زمان رخ دادن آسیب‌های مختلف در نمونه بر روی نمودارهای تغییر مقاومت الکتریکی مشخص شده است. سپس تغییرات مقاومت به آسیب قطعه ربط داده شده تا بتوان رفتار خود عیب‌یاب را در نمونه‌ها ارزیابی نمود. در حالت کلی نتایج نشان می‌دهد که وجود جدایش بین لایه‌ای باعث تغییر مقاومت تیر کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های بدون عیب در حین بارگذاری خمشی شده است. در محدوده بارگذاری الاستیک تا ۷۰ درصد اختلاف بین مقاومت الکتریکی نمونه‌های بدون عیب و با عیب وجود دارد. همچنین شروع گسترش عیب بین لایه‌ای باعث افزایش مقاومت الکتریکی در لایه‌های دور از تار خنثی می‌گردد. کاهش اندازه عیب باعث کاهش حساسیت رفتار خود عیب‌یاب در تشخیص گسترش عیب شده ولی محل طولی قرار گرفتن عیب تاثیری بر رفتار ندارد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۶/۱۳

کامپوزیت الیاف کربن، نانو لوله کربن، خاصیت پیرومقاومت، جدایش بین لایه‌ای،

رفتار خود عیب‌یابی

واژگان کلیدی

## Investigating the effect of delamination on self-diagnostic behavior of carbon/CNT epoxy composites

A. Nikbakht<sup>1\*</sup>, K. Jafari Khalafloo<sup>2</sup>, S.A. Sadough Vanini<sup>2</sup>

1- New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In this paper, the piezo-resistivity effect is utilized to experimentally investigate self-diagnostic behavior of composite laminates in determining delamination. In order to do so, composite laminated beams with unidirectional carbon fibers and epoxy resin containing CNT are produced while Teflon tape is placed between layers of some samples to artificially insert delamination. Three-point bending tests are conducted and stress-strain curves and electrical resistance of the samples are measured for not-damaged and damaged beams. The stress-strain curves are applied to interpret and determine damage mechanisms and to extract time data for the evolution of each damage mechanism. This time data is then used to determine the self-diagnostic behavior based on the variation of electrical resistance of the samples. The results show that in general, the electrical resistance of the not-damaged samples is higher than the damaged ones. This fact shows that piezo-resistivity effect can determine the existence of the delamination in the samples. Moreover, the propagation of delamination leads to electrical resistance increase when the delamination is placed far from the neutral axis of the beam. In addition, decreasing the dimension of the delamination reduces the sensitivity of the self-diagnosing behavior, which means that the variation of electrical resistance cannot determine the evolution of small sized delamination. On the other hand, the longitudinal location of delamination does not have a sensible effect on the behavior.

### Keywords

Carbon fiber composites, carbon nano tube, piezo-resistivity effect, delamination, self-diagnostic behavior

## ۱- مقدمه

در حالت کلی سازه‌های مهندسی بر اساس معیارهای طراحی اجزاء به گونه‌ای طراحی می‌گردند تا بتوانند در حالت تئوری در برابر بارهای وارده دوام بیاورند. با این حال سازه‌های مهندسی در معرض آسیب‌های دائمی بوده که عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این راستا و به منظور جلوگیری از رخ دادن حوادث زیانبار، پایش دائمی آسیب در سازه‌ها به خصوص سازه‌های حساس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آسیب‌های سطحی را می‌توان به صورت بصری و بدون نیاز به تجهیزات خاص کشف نمود اما اگر این آسیب‌ها در داخل سازه بوده و از چشم انسان پنهان بمانند می‌توانند خطرات زیادی را برای سازه ایجاد کرده و با پیشرفت خود منجر به شکست و از هم گسیختگی گردند. بنابراین توسعه فناوری‌های جدیدی که بتوانند عیوب پنهان در سازه را در مراحل ابتدایی آشکار نموده و با سهولت بیشتر و هزینه‌ی کمتر در دسترس باشند مورد توجه است.

سازه‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های چندلایه الیاف کربن به دلیل برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا در بسیاری از حوزه‌های پیشرفته مهندسی کاربرد دارند. با این وجود این سازه‌ها در معرض آسیب‌های بسیاری مانند شکست زمینه<sup>۱</sup>، شکست الیاف<sup>۲</sup> و جدایش بین لایه‌ای<sup>۳</sup> می‌باشند که استحکام و یکپارچگی سازه را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در این بین جدایش بین لایه‌ای به عنوان یکی از مهم‌ترین عیوب بوجود آمده در حین کارکرد سازه‌های کامپوزیتی چندلایه به حساب می‌آید زیرا به صورت چشمی قابل شناسایی نبوده و پیشرفت آن می‌تواند باعث از هم گسیختگی سازه گردد. لذا تشخیص به موقع این آسیب تاثیر به سزایی بر عملکرد و ایمنی سازه کامپوزیتی دارد. از طرفی تشخیص جدایش بین لایه‌ای با استفاده از روش‌های غیرمخرب مرسوم دشوار می‌باشد [۱]. از روش‌های تشخیصی غیرمخرب که امروزه برای پایش سلامت سازه‌ها استفاده می‌گردند می‌توان به تصویربرداری اشعه ایکس<sup>۴</sup>، اسکن فراصوت<sup>۵</sup>، ترموگرافی، نمودار گرمایی مادون قرمز، آنالیز مودال و جریان گردابی<sup>۶</sup> اشاره نمود. با این حال این روش‌ها گران بوده، نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و پرسنل کارآزموده داشته و نیازمند این هستند که محلی که احتمال آسیب در آن وجود دارد از قبل مشخص بوده و در دسترس باشد. از طرفی امکان بکارگیری این روش‌ها به صورت غیر برخط میسر است. لذا برای سازه‌های

در حال کار، استفاده از این شیوه‌ها با چالش همراه خواهد بود [۲]. یکی از روش‌های نوینی که می‌تواند در پایش آنالین سازه مورد استفاده قرار گیرد بر پایه تشخیص خرابی به کمک کامپوزیت‌های دارای خاصیت پیزومقاومت<sup>۷</sup> استوار است. منظور از خاصیت پیزومقاومت تغییر مقاومت الکتریکی ماده با اعمال کرنش است. در این روش سازه کامپوزیتی از چنین موادی ساخته شده تا تشخیص عیب به صورت آنالین و در حین عملکرد سازه صورت گیرد. این روش در عین حال هزینه‌ی بسیار کمتری نسبت به روش‌های آنالین یا آفلاین دیگر خواهند داشت. در این روش باید رسانایی الکتریکی سازه کامپوزیتی را به نحوی افزایش داد تا بتوان تغییرات آن را اندازه‌گیری و بررسی نمود. در این راستا می‌توان از نانوذرات کربن در شکل نانو لوله‌های کربنی (CNT)<sup>۸</sup> بهره جسته و این ذرات را به رزین مورد استفاده اضافه کرد.

نانو لوله‌های کربنی از لوله کردن ورقه‌های گرافن به شکل استوانه که انتهای آنها با درپوشی از ساختار فولرن بسته شده و به صورت تک‌دیواره و چنددیواره ساخته می‌شوند [۳-۵]. نانو لوله‌های تک‌دیواره از لوله کردن یک لایه گرافن و تبدیل کردن آن به استوانه و نانو لوله‌های چنددیواره با لوله کردن چند لایه گرافن و تبدیل آن‌ها به استوانه‌هایی که هر یک درون استوانه بزرگ‌تری از خود قرار دارند ایجاد می‌گردد [۶]. در مجموع خواص نانو لوله‌های کربنی تابعی از طول و قطر آن‌ها می‌باشد؛ به همین دلیل با توجه به اختلاف زیاد طول و قطر، خواص نانو لوله‌های تک‌دیواره<sup>۹</sup> و چنددیواره<sup>۱۰</sup> بسیار متفاوت است. به عنوان مثال اورنی و همکاران (۱۹۹۳) مودهای ارتعاشی فرکانس پایین و صلبیت ساختاری نانولوله‌های کربنی بلند را مورد مطالعه قرار داده و مدول یانگ نانولوله‌های تک‌دیواره را در حدود ۱۵۰۰ گیگاپاسکال محاسبه نموده‌اند [۷]. از طرف دیگر آزمایشات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط پراتو بر روی نانولوله‌های چنددیواره بازه ۰/۲۷ الی ۰/۹۵ تراپاسکال را برای مدول الاستیسیته این دسته از نانو ذرات نشان می‌دهد [۸].

برآورد خواص الکتریکی نانو لوله‌های کربنی نیز موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. مطالعات مختلف بیانگر آن است که این دسته از نانوذرات بر اساس قطر و دست‌سازنی (کایرالیت)<sup>۱۱</sup> لوله می‌توانند خاصیت فلزی/رسانایی یا نیمه‌رسانایی داشته باشند [۹]. به عنوان مثال چارلیبر و ایسی (۱۹۹۶) و ایسن و همکاران (۱۹۹۶) مقاومت ویژه و رسانایی الکتریکی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و

7 Piezoresistive effect

8 Carbon nano tube

9 Single walled carbon nanotube (SWCNT)

10 Multi walled carbon nanotube (MWCNT)

11 Chirality

1 Matrix cracking

2 Fiber breakage

3 Delamination

4 X-ray inspection

5 Ultrasonic inspection

6 Eddy current

عیب‌یابی<sup>۶</sup> گویند. البته خاصیت پیزومقاومتی برای اندازه‌گیری کرنش وارد شده به سازه نیز قابل استفاده می‌باشد. هر دو کاربرد خود عیب‌یابی و اندازه‌گیری کرنش در کامپوزیت‌های الیاف کربن توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است.

تودوروکی و همکاران نشان دادند که رسانایی الکتریکی در جهت الیاف بسیار بیشتر از رسانایی در جهت عرضی بوده (حدود ۱۰ برابر بزرگ‌تر) و رسانایی الکتریکی در جهت عرضی نیز بیشتر از رسانایی در جهت ضخامت بوده و هرچه نسبت حجمی الیاف کمتر شود این نسبت بالاتر می‌رود. همچنین ایشان نشان دادند که ایجاد جدایش بین لایه‌ای باعث گسست تماس الیاف کربن بین لایه‌ها شده و مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد که این امر می‌تواند برای آشکارسازی عیب بکار گرفته شود [۲۳-۲۴]. بوگر و همکاران (۲۰۰۸)، لی و همکاران (۲۰۰۸)، لویولا و همکاران (۲۰۱۰) و گائو و همکاران (۲۰۱۰) خاصیت پیزومقاومتی را مبنای اندازه‌گیری کرنش در یک کامپوزیت الیاف کربن قرار داده و بررسی کرده‌اند [۲۵-۲۸]. آلاموسی و همکاران یک مدار الکتریکی معادل برای خاصیت پیزومقاومتی کامپوزیت‌های ساخته شده از رزین اپوکسی غنی شده با نانو لوله‌های کربن تعریف کرده و یک مدل عددی برای ارتباط اثر تونل‌زنی و خاصیت پیزومقاومتی ارائه نموده‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد که افزایش مقاومت تونل‌زنی باعث افزایش حساسیت حسگر پیزومقاومتی می‌گردد [۲۹]. تالمن و وانگ نیز یک مدل تحلیلی برای ارتباط بین کرنش و خاصیت پیزومقاومتی ارائه کرده‌اند که قابلیت استفاده در شبیه‌سازی‌های المان محدود را نیز دارا می‌باشد [۳۰]. وانگ و چانگ (۱۹۹۷) از اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی در راستای ضخامت برای تشخیص دلمینیشن در خستگی استفاده کردند [۳۱]. آبوت و همکاران (۲۰۱۰) توانستند با عبور دادن رشته‌های نانو لوله‌های کربنی به شکل کوک از لای تار و پود پارچه‌های الیاف شیشه و پایش تغییرات مقاومت الکتریکی آن‌ها، عیب جدایش بین لایه‌ای را در سازه کامپوزیتی ساخته شده از این پارچه‌ها و رزین اپوکسی آشکار نمایند [۳۲]. گارسیا ماسیاس و همکاران (۲۰۱۸) از حسگر اپوکسی و نانو لوله‌های کربنی برای تشخیص عیب کمانش استفاده نموده‌اند [۳۳].

همان‌گونه که بیان شد هدف از این پژوهش بهره‌گیری از اثر پیزومقاومتی کامپوزیت‌های الیاف کربن/اپوکسی به منظور تشخیص جدایش بین لایه‌ای و بررسی رفتار خود عیب‌یاب در آن‌ها می‌باشد. در این حالت کل سازه کامپوزیتی به عنوان یک حسگر عمل نموده و در صورت وجود و یا بروز آسیب در حین

چنددیواره را محاسبه کرده‌اند [۱۰-۱۱]. با این وجود، نانو لوله‌های کربنی تک‌دیواره بر اساس میزان دست‌سازنی خود می‌توانند عایق یا رسانای الکتریکی باشند در حالی که نانو لوله‌های چنددیواره همواره رسانا بوده و دارای رسانایی نسبتاً بالایی در مقایسه با سایر فیله‌های نانو یا میکرو مانند کربن سیاه می‌باشند [۱۲-۱۳].

در حالت کلی هدایت الکتریکی و حرکت الکترون‌ها بین نانو لوله‌های کربنی در یک کامپوزیت شامل دو مکانیزم انتقال الکترون از طریق شبکه رسانای الکتریکی نانو لوله‌ها و تونل‌زنی می‌باشد [۱۴]. بدین ترتیب که با رسیدن غلظت نانو لوله‌های کربن به یک میزان بحرانی، که با آن اصطلاحاً آستانه نفوذ<sup>۱</sup> گویند، رسانایی الکتریکی کلی این کامپوزیت‌ها افزایش سریعی را ناشی از مکانیزم اول تجربه می‌کند. در زیر آستانه نفوذ، نانو لوله‌های کربن از یکدیگر بسیار دور بوده و انتقال الکترون تنها با مکانیزم دوم که شامل جهش الکترون<sup>۲</sup>، یا همان اثر تونل‌زنی<sup>۳</sup> کوانتومی است امکان‌پذیر می‌باشد. با افزایش غلظت، افزایش اندکی در رسانایی مشاهده می‌شود تا جایی که نانو لوله‌ها می‌توانند یکدیگر را لمس کنند و در نتیجه یک مسیر یا شبکه رسانای الکتریکی<sup>۴</sup> با مقیاس کوچک بوجود آورند (مکانیزم اول). در حقیقت آستانه نفوذ با شروع شکل‌گیری مسیرهای رسانا در کامپوزیت مطابقت دارد. از طرف دیگر هر عاملی که با ایجاد فاصله بین نانو لوله‌ها باعث به هم ریختن این شبکه رسانا شود، موجب فعال شدن مکانیزم دوم شده و رسانایی الکتریکی و در نتیجه مقاومت الکتریکی کامپوزیت را دستخوش تغییر می‌کند. افزایش فاصله نانو لوله‌ها باعث سخت شدن حرکت الکترون‌ها در کامپوزیت شده و به تبع آن مقاومت ماده را که به آن مقاومت تونل‌زنی نیز گفته می‌شود، افزایش می‌دهد. این حقیقت موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران بوده است [۱۵-۲۱].

از جمله عوامل به هم ریختن شبکه رسانای الکتریکی کامپوزیت، اعمال کرنش و وجود عیوب در ساختار ماده کامپوزیتی است. همان‌گونه که اشاره شد، به تغییر مقاومت الکتریکی ماده در اثر کرنش ایجاد شده توسط بار مکانیکی اثر پیزومقاومتی گویند. ایده اصلی در این پژوهش بهره‌گیری از اثر پیزومقاومتی کامپوزیت‌ها به منظور تشخیص وجود و گسترش جدایش در آن‌ها می‌باشد. بدین گونه که کل سازه کامپوزیتی به صورت یک حسگر<sup>۵</sup> عمل کرده که با اندازه‌گیری تغییر مقاومت آن می‌توان عیوبی مانند جدایش بین لایه‌ای را آشکار نمود [۲۲]. به این رفتار سازه، رفتار خود

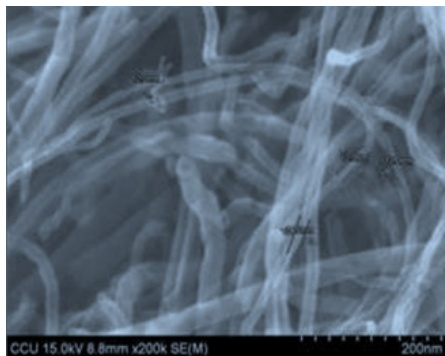
- 1 Percolation threshold
- 2 Electron hopping
- 3 Tunneling conductance effect
- 4 Conductive network
- 5 Sensor

6 Self-diagnosis behavior

تری‌اتیلن تتراآمین<sup>۴</sup> ساخت شرکت هانتزمن<sup>۵</sup> و با نسبت ۱۰ به ۱ مخلوط می‌شود. این رزین پس از مخلوط شدن با هاردنر زمان کار ۱ ساعت دارد. پارچه الیاف کربن استفاده شده تک‌جهته بوده و از شرکت ایران کامپوزیت تامین شده که مشخصات مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است. ضخامت و خواص فیزیکی و مکانیکی توسط شرکت سازنده ارائه شده و مقاومت الکتریکی به وسیله اهم‌متر اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱. مشخصات نانو لوله‌های مورد استفاده

|                  |                                |
|------------------|--------------------------------|
| وزن              | ۵ گرم                          |
| قطر خارجی        | ۱۰-۲۰ نانومتر                  |
| قطر داخلی        | ۵-۱۰ نانومتر                   |
| طول              | ۱۰-۳۰ میکرومتر                 |
| خلوص             | بالای ۹۵%                      |
| Tap density      | ۰/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب     |
| True density     | حدود ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب |
| رسانایی الکتریکی | بالای ۱۰۰ S/cm                 |



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی نانو لوله‌های استفاده شده

جدول ۲. خواص الیاف کربن مورد استفاده

|                                      |                     |
|--------------------------------------|---------------------|
| ضخامت                                | ۰/۳ میلی‌متر        |
| چگالی سطحی                           | ۲۰۰ گرم بر متر مربع |
| استحکام کششی                         | ۳۸۰۰-۴۰۰۰ مگاپاسکال |
| مدول الاستیسیته                      | ۲۳۰ گیگاپاسکال      |
| مقاومت الکتریکی در جهت الیاف         | ۵ اهم               |
| مقاومت الکتریکی در جهت عمود بر الیاف | ۱۶۱/۷ اهم           |

کارکرد، قابلیت شناسایی برخط وجود دارد. روش بکار گرفته شده در این تحقیق انجام آزمایشات تجربی می‌باشد. در این راستا نمونه‌های تیر کامپوزیتی الیاف کربن با رزین اپوکسی که حاوی نانو لوله‌های کربنی می‌باشند ساخته شده است. هدف از اضافه کردن نانو لوله‌های کربنی افزایش رسانایی الکتریکی تیر در حد قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در برخی از نمونه‌ها عیب جدایش بین لایه‌ای به صورت مصنوعی و با قرار دادن یک نوار تفلون بین لایه‌های مختلف ایجاد شده تا مشخصا بتوان اثر این عیب را بر روی رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌ها بررسی نمود. در همه نمونه‌ها سیم‌های مسی در دو سر تیر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازه تعبیه شده است. سپس نمونه‌های بدون عیب و با عیب تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته و علاوه بر منحنی تنش- کرنش، نمودار تغییرات مقاومت تیر کامپوزیتی محاسبه و ثبت شده است. از نتایج مربوط به منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها برای تعبیر مدهای آسیب استفاده شده و بدین ترتیب زمان رخ دادن آسیب‌های مختلف در نمونه مشخص شده است. در مرحله بعدی زمان رخ دادن آسیب بر روی نمودارهای تغییر مقاومت الکتریکی ثبت شده تا بتوان رفتار خود عیب‌یاب نمونه را در برابر شناسایی وجود و گسترش عیب جدایش بین لایه‌ای بررسی نمود. مطالعه رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌ها با مقایسه تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌های سالم و با عیب انجام شده است. در مرحله آخر اثر ابعاد و محل قرارگیری طولی عیب جدایش بین لایه‌ای بر رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌ها بررسی شده است.

## ۲- تجربی

به منظور انجام آزمایشات تجربی تیرهای کامپوزیتی با الیاف کربن و رزین اپوکسی که حاوی نانو لوله‌های کربنی است با روش لایه‌چینی دستی<sup>۱</sup> ساخته شده است. برای بررسی تاثیر آسیب ناشی از جدایش بین لایه‌ای، در حین فرآیند ساخت در بین لایه‌ها یک نوار تفلون قرار داده شده است. خصوصیات مواد مورد استفاده و همچنین روش ساخت در ادامه تشریح شده است.

## ۱-۲ مواد و روش‌ها

برای ایجاد رسانایی در تیر کامپوزیتی، از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره ساخت شرکت نوترینو ایران با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ استفاده شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی<sup>۲</sup> این نانو ذرات که توسط شرکت تولید کننده ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. رزین مورد استفاده، رزین اپوکسی KER ۸۲۸ ساخت شرکت کومهو<sup>۳</sup> بوده که با هاردنر

- 1 Hand layup
- 2 SEM image
- 3 Kumho P&B chemicals

4 Triethylene tetramine  
5 Huntsman

## ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا رزین و هاردنر با یکدیگر مخلوط شده است. سپس به میزان ۱ درصد وزنی مخلوط رزین و هاردنر، نانو لوله‌های کربنی به مخلوط اضافه و ترکیب حاصله به مدت زمان ۳۰ دقیقه بر روی هیتر استیرر<sup>۱</sup> هم زده شده است (شکل ۲-الف). به منظور همگن نمودن مخلوط و پخش مناسب نانوذرات، مخلوط رزین و نانو لوله به مدت ۵۰ دقیقه (به تعداد ۱۰ مرتبه در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه) در دستگاه همزن فراصوت ساخت شرکت باندلین<sup>۲</sup> (با توان ۲۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) قرار گرفته است. از آنجایی که در حین عمل همگن‌سازی فراصوت مخلوط رزین داغ می‌شود و داغ شدن بیش از حد ممکن است به قیری و غیر قابل استفاده شدن مخلوط بینجامد، بشر حاوی مخلوط رزین در یک ظرف آب سرد و قطعات یخ قرار داده شده است (شکل ۲-ب).



شکل ۲. (الف) مخلوط رزین و نانو لوله کربنی بر روی هیتر استیرر (ب) و همگن‌سازی رزین با فرآیند هم زدن فراصوت

در این پژوهش نمونه‌های تیر کامپوزیتی ۸ لایه به روش لایه‌چینی دستی و با قرار دادن الیاف به صورت تک جهته صفر درجه ساخته

۱- هیتر استیرر ساخت شرکت vision

۲- Bandelin

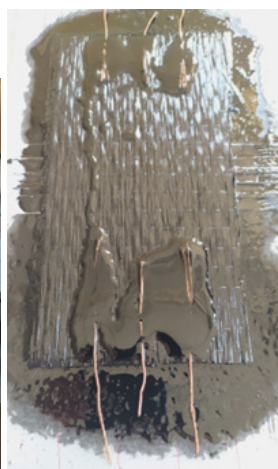
شده‌اند. ابتدا تعدادی نمونه بدون عیب تولید شده و سپس برای ایجاد عیب جدایش بین لایه‌ای، در حین لایه-چینی بین لایه‌ها یک نوار تفلون به عرض ۴۰ میلی‌متر قرار داده شده است (شکل ۳-الف). محل قرارگیری عیب در وسط راستای طولی تیر می‌باشد. از این نمونه‌ها برای بررسی امکان بکارگیری خاصیت پیرومقاومتی در تعیین رفتار خود عیب‌یاب تیر کامپوزیتی استفاده شده است. بر این اساس در کل ۸ سری تیر کامپوزیتی تولید شده است (یک سری تیر بدون عیب و ۷ سری تیر با جدایش که عیب بین لایه‌های ۱-۲، ۲-۳، ۳-۴، ۴-۵، ۵-۶، ۶-۷ و ۷-۸ قرار گرفته است). برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، پس از آغشته کردن لایه هفتم به رزین، در هر سمت چیدمان سه عدد سیم مسی به عنوان الکترود قرار داده شده است به گونه‌ای که سیم‌های مقابل دو به دو کاملاً روی یک تار الیاف کربن و در فواصل عرضی برابر قرار گیرند (شکل ۳-ب). پس از آن روی این سیم‌ها نیز به رزین آغشته شده و لایه هشتم روی آنها قرار داده شده است. بر اساس مطالعات پیشین، برای مشخص شدن تاثیر جدایش بین لایه‌ای توسط تغییرات مقاومت الکتریکی، بایستی جریان الکتریکی در جهت الیاف اعمال گردد [۲۴]. بدین جهت است که در این پژوهش چیدمان الکترودهای مسی مطابق توضیحات فوق و شکل ۳-ب در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، نمونه‌ها با گذاشتن وزنه‌های ده کیلویی به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط تحت فشار قرار گرفته تا فرآیند پخت کامل گردد (شکل ۳-پ).

برای انجام تست خمش سه نقطه‌ای استاندارد ASTM D7264 مبنای قرار گرفته است که استاندارد مربوط به آزمایش خواص خمشی سازه‌های کامپوزیتی با زمینه<sup>۳</sup> پلیمری می‌باشد [۳۴]. بر

### 3- Matrix



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) ایجاد عیب جدایش بین لایه‌ای به وسیله نوار تفلون در حین ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، (ب) قرار دادن سیم مسی بین لایه‌های ۷ و ۸ برای اندازه‌گیری مقاومت تیر در حین بارگذاری، (پ) اعمال فشار به نمونه‌ها برای اتمام فرآیند ساخت

جدول ۳. خواص کششی تیر کامپوزیتی الیاف کربن و رزین اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| ۱۴۰۰ مگاپاسکال | استحکام کششی    |
| ۵۰ گیگاپاسکال  | مدول الاستیسیته |
| ۱/۶-۱/۲ درصد   | کرنش شکست       |

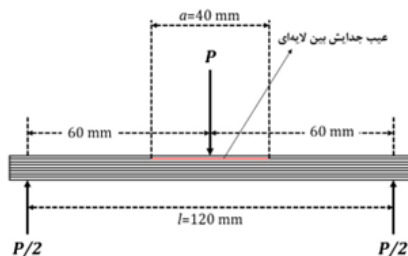
بر اساس استاندارد ASTM D7264 و با توجه به ضخامت نمونه‌ها، فاصله تکیه‌گاه‌ها در تست خمش مطابق شکل ۵ بوده و سرعت وارد آمدن نیرو نیز برابر ۸ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. همچنین در شکل ۵ موقعیت یک عیب جدایش بین لایه‌ای نیز به صورت شماتیک بین لایه‌های اول و دوم نمایش داده شده است. آزمایش خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه تست گالداپینی<sup>۱</sup> با ظرفیت ۲/۵ تن انجام شده که تجهیزات و نحوه انجام آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به بار خمشی اعمالی و جابه‌جایی (انحراف عمودی) وسط نمونه می‌باشد. همه اندازه‌گیری‌ها به طور همزمان صورت گرفته و از داده‌های نیرو-جابه‌جایی بر اساس استاندارد ASTM برای محاسبه تنش-کرنش مطابق روابط زیر استفاده شده است که در آن  $b$ ،  $h$  و  $m$  به ترتیب عرض تیر، ضخامت تیر و نسبت نیرو به جابه‌جایی به ازای تنش ماکزیم می‌باشد. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نیز در حین آزمایش خمش به وسیله اهم‌متر و کرنومتر و به صورت لحظه‌ای ثبت شده است.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (۱) \text{ بیش‌ترین تنش خمشی}$$

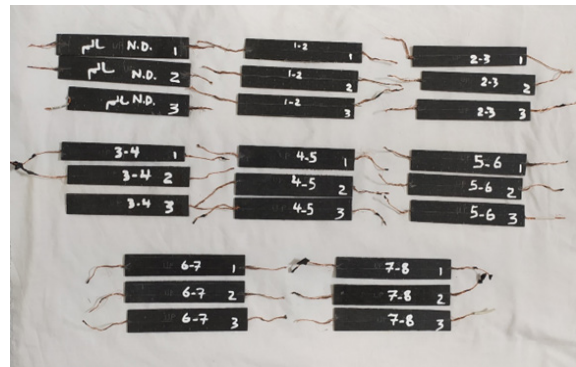
$$\epsilon_f = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (۲) \text{ کرنش}$$

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (۳) \text{ مدول الاستیسیته خمشی}$$



تصویر یک نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸ پس از انجام تست خمش و شکست نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است.

این اساس، از مجموعه‌های لایه‌چینی شده تیرهای کامپوزیتی با ابعاد ۲۵ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر بریده شده است. شایان ذکر است که ضخامت کلیه تیرها نیز برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین بر اساس میزان رزین و الیاف بکار رفته در ساخت قطعات، درصد حجمی الیاف کربن تقریباً برابر با ۲۵٪ محاسبه می‌شود. بایستی دقت نمود که در هنگام برش، سیم‌های مسی تعبیه شده در نمونه‌ها قطع نشوند. نمونه‌های بریده شده در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. این نمونه‌ها برای بررسی امکان استفاده از خاصیت پیرومقاومتی در تعیین رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۴. تصویر نمونه‌های برش خورده نهایی

در مرحله آخر با روش توضیح داده شده، تعدادی نمونه سالم نیز برای انجام تست کشش به منظور مشخص کردن خواص کششی تیر کامپوزیتی ساخته شده است. همچنین برای بررسی اثر مکان طولی و اندازه عیب جدایش بین لایه‌ای، با تغییر اندازه و محل نوار تفلون نمونه‌های کامپوزیتی دیگری ساخته شده‌اند که مشخصات آن‌ها در بخش نتایج ارائه شده است. شایان ذکر است که بر اساس استاندارد برای بررسی هر پارامتر ۵ نمونه تست ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج ارائه شده شامل میانگین مقادیر بدست آمده در آزمایشات می‌باشد.

### ۳-۲- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

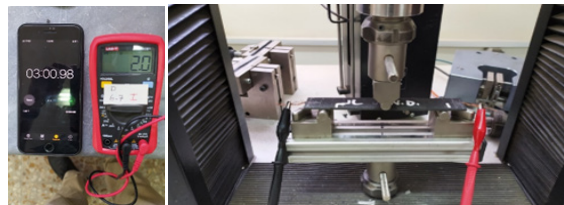
پیش از انجام تست خمش سه نقطه‌ای مقاومت کلیه نمونه‌ها با اهم‌متر اندازه‌گیری شده است. مقادیر بدست آمده در جهت الیاف بین ۰/۸ الی ۴/۹ اهم و در جهت عمود بر الیاف در بازه ۳۸ الی ۷۵ اهم بوده که کلیه مقادیر کمتر از مقاومت الکتریکی الیاف (به تنهایی) مندرج در جدول ۲ می‌باشد. علت این امر اضافه شدن نانولوله‌های کربنی به رزین بوده که باعث بوجود آمدن شبکه رسانا در تیر می‌گردد. علاوه بر این بدست آوردن خواص کششی تیر کامپوزیتی، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های سالم تولید شده در مرحله قبل بر مبنای استاندارد ASTM D-3039 [۳۵] انجام گرفته که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

این حد مربوط به بیشترین تنش در تیر نیست (ستون آخر جدول ۴). در یک تیر بدون عیب بین اولین صدای آسیب و تنش ماکزیمم، آسیب‌های جزئی در تیر بوجود می‌آید که تاثیر چندانی بر روند رو به صعود نمودار و ریزساختار تیر نخواهد داشت. از طرفی آسیب‌ها در تیرهای بدون عیب و با عیب با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در یک تیر کامپوزیتی بدون عیب، با توجه به ترد و شکننده بودن ساختار، اولین مکانیزم آسیب جدی پس از منطقه تغییر شکل الاستیک را می‌توان مربوط به شکست زمینه<sup>۲</sup> در نظر گرفت. پس از شروع آسیب جدی در تیر تنش آفت کرده و رفتار تیر غیرخطی می‌گردد. در مراحل بعدی نیز به ترتیب ابتدا جدایش بین لایه‌ای و سپس شکست الیاف به مکانیزم‌های خرابی و آسیب اضافه شده که استحکام تیر را با نرخ بیشتری کاهش می‌دهد. این امر در نمودار تنش- کرنش تیر ساخته شده بدون عیب در شکل ۹-الف نشان داده شده است. در تیرهای دارای عیب، اولین آسیب گسترش عیب بین لایه‌ای می‌باشد که مربوط به اولین صدای آسیب در حین انجام آزمایش است. زیرا گسترش آسیب از محل نوک جدایش بین لایه‌ای مصنوعی ایجاد شده در حین فرآیند ساخت صورت می‌گیرد. همانگونه که از نمودارهای شکل ۸ مشخص است، وجود این آسیب عمدتاً باعث کاهش کرنش مربوط به محدوده تغییر شکل خطی می‌گردد که علت این امر پیش افتادن شروع آسیب در تیر می‌باشد. با این وجود پس از این مرحله الیاف بار را تحمل کرده و از آنجائی که الیاف به صورت تک جهت قرار گرفته‌اند، فعالیت مکانیزم‌های دیگر خرابی با اولویت شکست زمینه منتفی خواهد بود. بنابراین پس از این مرحله نیز تنش صعودی است [۳۶].

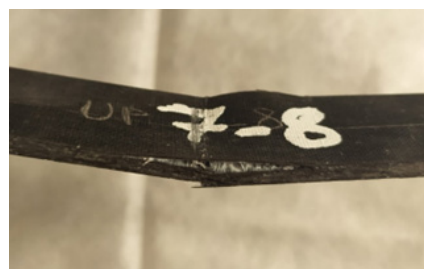
با فعال شدن مکانیزم‌های دیگر آسیب شامل شکست زمینه و الیاف و جدایش بین سایر لایه‌ها، روند افزایشی تنش متوقف شده و ادامه نمودار با افت شدید تنش همراه خواهد بود. رفتار توضیح داده شده در نمودارهای شکل ۸ به خوبی قابل مشاهده است. نمونه‌ای از این رفتار برای نمونه شماره ۷ به صورت حدودی در شکل ۹-ب نشان داده است.

علاوه بر مباحث مرتبط با آسیب در تیرها، مقایسه رفتار الاستیک و غیرخطی نمونه‌های ساخته شده نیز قابل توجه و تفسیر می‌باشد. با صرفنظر کردن از پیچیدگی‌های هندسی، می‌توان سطح تماس لایه‌های ۴ و ۵ نمونه‌ها را به عنوان تار خنثی در نظر گرفت. بر این اساس مشاهده می‌شود که رفتار الاستیک تیرها برای عیب‌های متقارن نسبت به تار خنثی تقریباً مشابه یکدیگر است. به عنوان مثال نمونه‌های ۲ و ۶ دارای رفتار الاستیک مشابه می‌باشند. علت آن است که وجود آسیب بین لایه‌ای در محدوده تغییر شکل

همان‌گونه که در این شکل مشخص است وجود عیب جدایش بین لایه‌ای و همچنین شکست زمینه و الیاف در نمونه به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶- تجهیزات و نحوه آزمایش خمش سه نقطه‌ای و اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده



شکل ۷- تصویر نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸ پس از انجام تست خمش و شکست

### ۳- نتایج و بحث

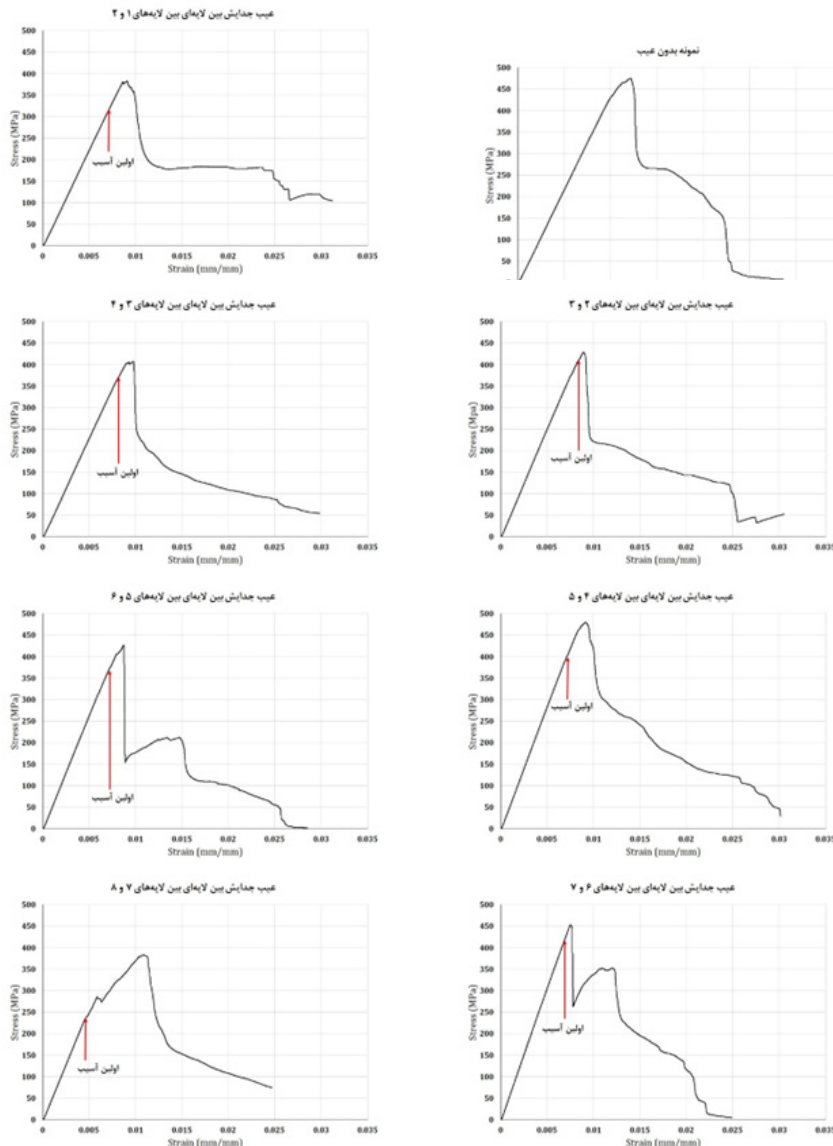
در این بخش نتایج آزمایشات تجربی به منظور بررسی رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌های کامپوزیتی در برابر شناسایی وجود و گسترش جدایش بین لایه‌ای ارائه شده است. نمودار تنش-کرنش برای تیر کامپوزیتی بدون عیب و با عیب جدایش بین لایه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر ماکزیمم تنش، مدول خمشی، زمان اولین صدای ناشی از گسترش آسیب جدی و زمان رخ دادن ماکزیمم تنش در جدول ۴ لیست گردیده است. برای تسهیل در تفسیر داده‌ها، نمونه‌های با عیب به ترتیب با شماره‌های ۱ الی ۷ شماره‌گذاری شده که این امر نیز در جدول ۴ نشان داده شده است. علاوه بر این با در نظر گرفتن داده‌های زمانی آزمایش خمش، کرنش مربوط به اولین آسیب در تیر نیز در شکل ۸ مشخص شده است. همان‌گونه که از نتایج شکل ۸ مشخص است، یک منطقه تغییر شکل خطی مشاهده می‌شود که مربوط به مرحله بارگذاری پیش از بوجود آمدن آسیب<sup>۲</sup> در تیر می‌باشد. این منطقه تغییر شکل را می‌توان به عنوان رفتار الاستیک در نظر گرفت. علت چنین رفتاری عدم ایجاد آسیب جدی در تیر تحت بارگذاری خمشی می‌باشد. حد زمانی این منطقه مربوط به شنیده شدن اولین صدای آسیب در حین آزمایش لحاظ شده است و بایستی توجه داشت که

۱- مقادیر ارائه شده در این نمودارها برابر مقادیر میانگین داده‌های آزمایشات است و در صورتی که نتایج نمونه‌ای اختلاف زیادی با بقیه نمونه‌ها داشته باشد، نتایج مربوطه کنار گذاشته شده و مجدداً نمونه‌های بیشتری ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.  
2- Damage



قسمتی از بار کششی وارده (که در عمل در حال گسترش جدایش بین لایه ای است) به الیاف منتقل می شود و در نتیجه الیاف با کشیده شدن بار را تحمل کرده و نمودار تنش صعودی می گردد. همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که نمونه‌های با عیب مدول خمشی بیشتری نسبت به نمونه سالم دارند. علت این امر را می توان مرتبط با تحمل بار بیشتر توسط الیاف کربن در نمونه‌هایی دانست که دارای عیب می‌باشند. بدان معنا که وجود جدایش باعث می‌شود که قسمت بیشتری از بار به الیاف کربن منتقل شده و لذا الیاف بار بیشتری را تحمل می‌کنند. بر این اساس می‌توان انتظار داشت که نمونه‌های با عیب دارای مدول خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های سالم باشند. این امر به ویژه در نمونه‌هایی که عیب آن‌ها در منطقه تنش کششی واقع شده نمایان تر است.

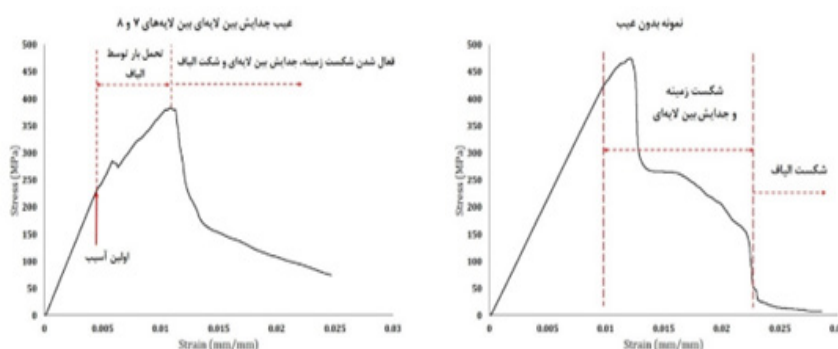
الاستیک تاثیر چندانی بر رفتار تیر ندارد. البته در محدوده تغییر شکل غیرخطی رفتار این دو نمونه کاملا با یکدیگر متفاوت است که دلیل این امر ناشی از قرار داشتن جدایش بین لایه‌ای نمونه ۲ در محدوده تنش فشاری و در نمونه ۶ در محدوده تنش کششی است. علاوه بر این، از آن جایی که جدایش در نمونه ۴ بر روی تار خنثی قرار دارد انتظار می‌رود که این نمونه شبیه‌ترین رفتار را با تیر بدون عیب داشته باشد، که این موضوع در نمودارها به خوبی مشاهده می‌شود. در خصوص نمونه‌های با عیب زیر تار خنثی (نمونه های ۵، ۶ و ۷)، پس از منطقه الاستیک تنش کاهش داشته و سپس تا پیش از شروع گسترش آسیب‌های دیگر روند افزایشی را در پیش می‌گیرد. علت این امر آن است که در این نمونه‌ها جدایش در منطقه تنش کششی تیر (یعنی در زیر تار خنثی) واقع شده و با شروع گسترش آسیب ناشی از جدایش بین لایه‌ای،



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش برای تیرهای کامپوزیتی بدون عیب و با عیب جدایش بین لایه‌ای

جدول ۴. مقادیر ماکزیمم تنش، مدول خمشی و زمان رخ دادن ماکزیمم تنش برای تیرهای کامپوزیتی بدون عیب و با عیب جدایش بین لایه‌ها

| شماره نمونه | محل قرارگیری عیب         | ماکزیمم تنش (مگا پاسکال) | مدول خمشی (گیگا پاسکال) | زمان صدای گسترش اولین آسیب (ثانیه) | زمان رخ دادن ماکزیمم تنش (ثانیه) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|             | بدون عیب                 | ۴۷۵/۱                    | ۴۴/۵                    | ۵۴                                 | ۶۸                               |
| ۱           | جدایش بین لایه‌های ۱ و ۲ | ۳۸۳/۱                    | ۴۴/۹                    | ۴۸                                 | ۵۸                               |
| ۲           | جدایش بین لایه‌های ۲ و ۳ | ۴۲۹/۳                    | ۵۲/۹                    | ۵۸                                 | ۶۲                               |
| ۳           | جدایش بین لایه‌های ۳ و ۴ | ۴۰۷/۴                    | ۴۵/۶                    | ۵۱                                 | ۵۹                               |
| ۴           | جدایش بین لایه‌های ۴ و ۵ | ۴۸۰/۲                    | ۶۱/۷                    | ۴۳                                 | ۵۶                               |
| ۵           | جدایش بین لایه‌های ۵ و ۶ | ۴۲۷/۵                    | ۵۳/۴                    | ۴۴                                 | ۵۳                               |
| ۶           | جدایش بین لایه‌های ۶ و ۷ | ۴۵۳/۱                    | ۵۹/۴                    | ۵۵                                 | ۶۱                               |
| ۷           | جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸ | ۳۸۳/۷                    | ۴۸/۹                    | ۴۴                                 | ۷۲                               |



شکل ۹. آسیب‌های وارده بر تیر کامپوزیتی و تاثیر آن بر نمودار تنش-کرنش برای (الف) تیر بدون عیب و (ب) تیر با عیب جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸

آن است که در نتیجه آسیب‌های پیشین و همچنین از دست رفتن یکپارچگی الیاف، شبکه رسانای درون کامپوزیت از بین رفته و مقاومت تونل‌زنی نیز به دلیل ایجاد فاصله در زمینه و الیاف افزایش می‌یابد. در نتیجه ایجاد این فاصله حرکت الکترون‌ها در تیر با سختی همراه بوده و در نتیجه مقاومت بالا می‌رود.



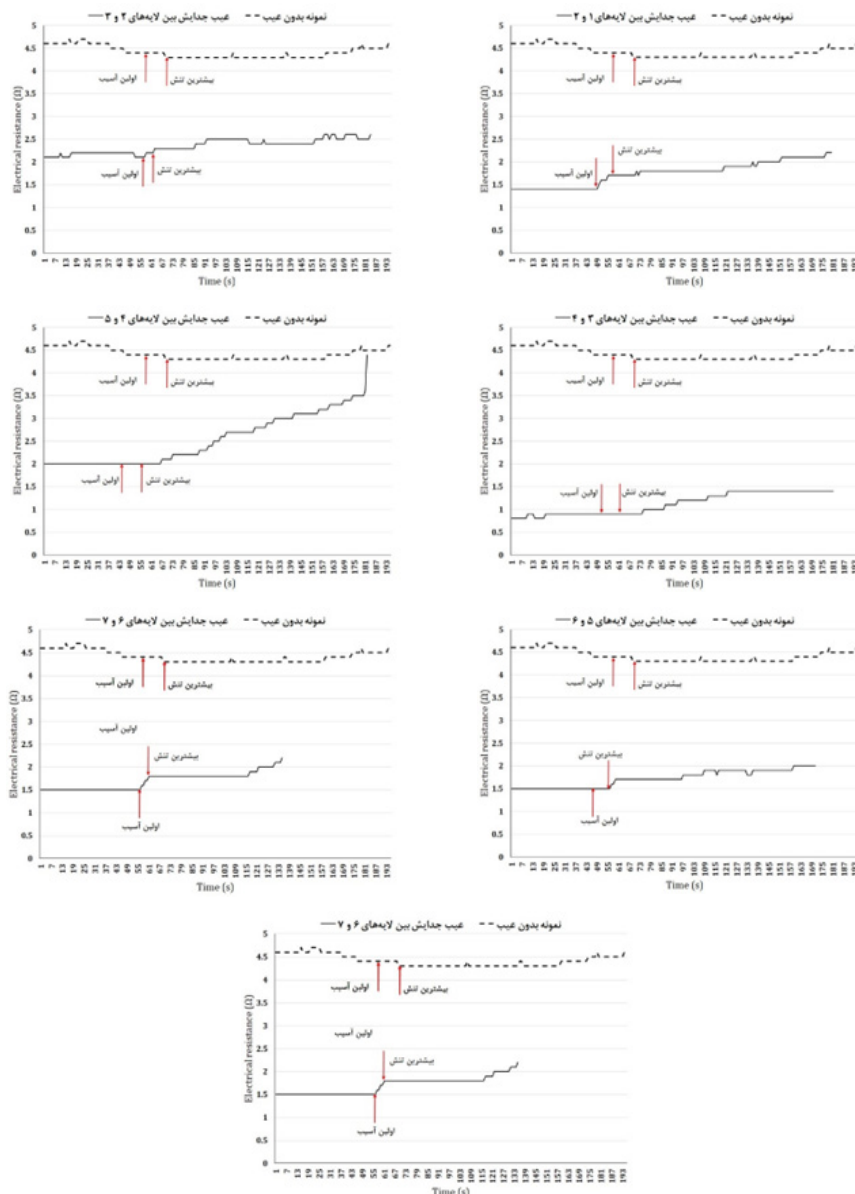
شکل ۱۰. تغییرات مقاومت الکتریکی برای تیر بدون عیب در حین بارگذاری خمشی

تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب زمان آزمایش برای نمونه‌ها با آسیب جدایش بین لایه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در هر حالت، نمودار مربوط به مقاومت الکتریکی تیر بدون عیب نیز رسم شده است. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۱۱ مشخص

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، هدف از این مطالعه تعیین رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت الیاف کربن/اپوکسی در شناسایی خرابی ناشی از جدایش بین لایه‌ها بر مبنای بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی در حین بارگذاری می‌باشد. بدین منظور تغییرات مقاومت الکتریکی تیرهای کامپوزیتی در حین بارگذاری ثبت شده و داده‌های مربوط به تیر بدون عیب و تیرهای با عیب جدایش بین لایه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب زمان آزمایش برای نمونه بدون عیب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، تاثیر مکانیزم‌های آسیب بر رفتار کامپوزیت بر حسب زمان آزمایش (که مستخرج از داده‌های زمانی بارگذاری در تست خمشی، جدول ۴ و شکل ۸ می‌باشد) نیز نمایش داده است. با توجه به شکل ۱۰، برای تیر بدون عیب مقاومت الکتریکی در محدوده الاستیک افت ناچیزی دارد. زیرا الیاف کاملاً صاف نبوده و موج‌دار هستند و در اثر فشار وارده به یکدیگر نزدیکتر شده و رسانایی بهتری را فراهم می‌کنند. پس از منطقه تغییر شکل الاستیک و در منطقه مربوط به شکست زمینه تغییر زیادی در مقاومت دیده نمی‌شود که این امر نشان‌دهنده آن است که تغییرات مقاومت الکتریکی قابلیت چندانی برای تشخیص این آسیب را ندارد. پس از مرحله شکست الیاف، مقاومت افزایش می‌یابد. علت

حتی کاهش می‌یابد. علت افزایش مقاومت تیرهای کامپوزیتی از بین رفتن شبکه رسانا و افزایش مقاومت تونل‌زنی در اثر افزایش فاصله اجزاء (رزین و الیاف) ناشی از گسترش جدایش بین لایه‌ای می‌باشد. مقایسه نمودارهای شکل ۱۱ مشخص می‌کند که برای نمونه‌های با عیب جدایش نزدیک تار خنثی (نمونه‌های ۳، ۴ و ۵) مقاومت الکتریکی بین اولین آسیب و بیشترین تنش ثابت بوده و پس از رخ دادن بیشترین تنش شروع به افزایش می‌کند. در نمونه‌های با عیب جدایش دور از تار خنثی (نمونه‌های ۱، ۲، ۶ و ۷)، بلافاصله پس از اولین آسیب که گسترش عیب جدایش بین لایه‌ای است (رجوع شود به شکل‌های ۸ و ۹ و توضیحات مربوطه) مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. این بدان معناست که خاصیت پیرومقاومتی توانایی شناسایی گسترش خرابی بین لایه‌ای را نیز دارد. لیکن این توانایی محدود به نمونه‌هایی است که آسیب در لایه‌های دور از تار خنثی واقع شده است.

است، نتیجه وجود جدایش بین لایه‌ای کمتر بودن مقدار مقاومت تیر کامپوزیتی با عیب نسبت به تیر بدون عیب است. علاوه بر این، در حالی که در تیر بدون عیب در محدوده الاستیک مقاومت الکتریکی تا وقوع آسیب اولیه تدریجاً کاهش می‌یابد، در تیرهای با عیب جدایش بین لایه‌ای مقاومت الکتریکی در محدوده الاستیک تقریباً ثابت است. از همین حقیقت می‌توان در شناسایی وجود عیب جدایش بین لایه‌ای به خصوص عیوب ناشی از ساخت قطعات کامپوزیتی بهره برد. بدان معنا که در صورت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی کامپوزیت پس از ساخت و مقایسه آن با یک سازه کامپوزیتی مشابه و سالم، تیر با مقاومت کمتر دارای آسیب و خرابی می‌باشد. همچنین در شکل ۱۱ مشخص است که با گذر از منطقه تغییر شکل الاستیک مقاومت الکتریکی در تیر با عیب جدایش بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقاومت الکتریکی تیر بدون عیب حتی پس از شروع آسیب تغییر چندانی نمی‌کند و



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب زمان در نمونه‌های کامپوزیتی با عیب جدایش بین لایه‌ای

در شکل ۱۳ نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش اندازه عیب، امکان شناسایی و تشخیص گسترش آن توسط تغییرات مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که هر چه اندازه جدایش بین لایه‌های بیشتر باشد، فاصله ایجاد شده در اجزاء بیشتر شده و در نتیجه حساسیت سازه نسبت به از دست رفتن شبکه رسانای الکتریکی و همچنین مقاومت تونل‌زنی افزایش می‌یابد. تاثیر محل طولی قرارگیری آسیب نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بررسی نتایج این شکل نشان می‌دهد که محل طولی عیب تاثیر چندانی بر رفتار خود عیب‌یاب تیر ندارد. زیرا عامل اصلی برای تغییر رفتار، فاصله‌ای است که خرابی ناشی از جدایش در اجزاء تیر ایجاد می‌کند. این فاصله باعث بر هم خوردن شبکه رسانای تیر و افزایش مقاومت تونل‌زنی می‌گردد. از طرفی محل قرارگیری عیب تاثیری بر این فاصله ندارد. لذا تغییر محل عیب تاثیر به‌سزایی بر رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت نمی‌گذارد.

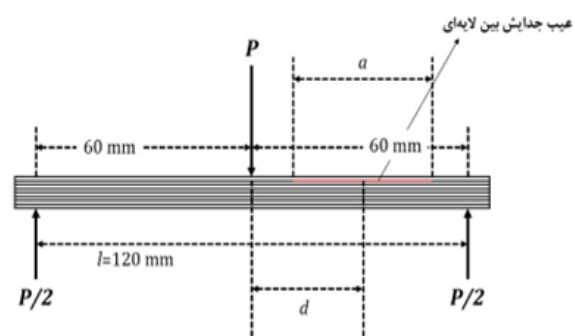
این مقاله بر بررسی رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت در شناسایی جدایش بین لایه‌های با بهره‌گیری از خاصیت پیزومقاومتی ماده متمرکز بوده و تاثیر گسترش آسیب‌های دیگر در کامپوزیت (شامل شکست زمینه و الیاف) با تحلیل نتایج تست خمش صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و تحلیل پارامتریک شروع و گسترش خرابی، الگویی برای شناسایی مکان و زمان رخ داد آسیب‌های مختلف در کامپوزیت با استفاده از خاصیت پیزومقاومتی به عنوان رفتار خود عیب‌یاب ماده ارائه داد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار خود عیب‌یاب تیر کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن و رزین اپوکسی حاوی نانو لوله‌های کربنی در برابر شناسایی وجود و گسترش جدایش بین لایه‌های به روش تجربی

نتایج شکل ۱۱ مشخص می‌کند که خاصیت پیزومقاومتی به خوبی قابلیت شناسایی وجود و گسترش عیب جدایش بین لایه‌های را دارد. لذا می‌توان از این خاصیت به عنوان رفتار خود عیب‌یاب سازه کامپوزیتی تحت بار بهره‌جست. بدین ترتیب که با اندازه‌گیری دائمی و برخط مقاومت الکتریکی یک سازه تحت بار، در صورت مشاهده تغییرات متوجه وجود یا گسترش آسیب در سازه شد. چنین رفتاری را می‌توان به عنوان رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت برشمرد. در مرحله بعد، اثر ابعاد و محل طولی عیب بر رفتار خود عیب‌یاب سازه بررسی شده است. هدف از این بررسی امکان شناسایی محل و ابعاد عیب بین لایه‌های است. بدین منظور پارامتر  $d$  (فاصله مرکز عیب تا مرکز نمونه) برای مشخص نمودن محل طولی و پارامتر  $a$  برای نمایش ابعاد عیب تعریف شده است (شکل ۱۲). برای بررسی اثر این دو پارامتر، با استفاده از روش توضیح داده شده در بخش ۲، تعدادی نمونه با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

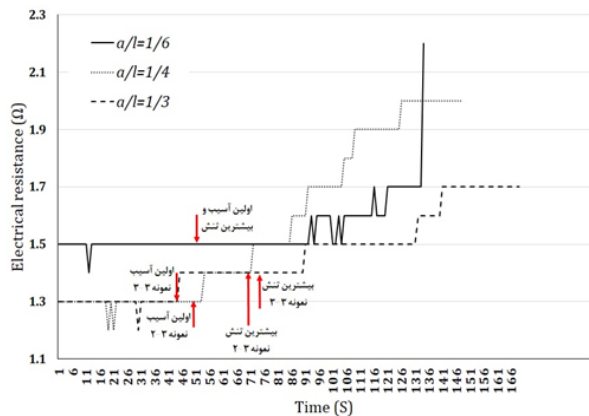
تاثیر اندازه عیب جدایش بین لایه‌های بر رفتار خود عیب‌یاب تیر



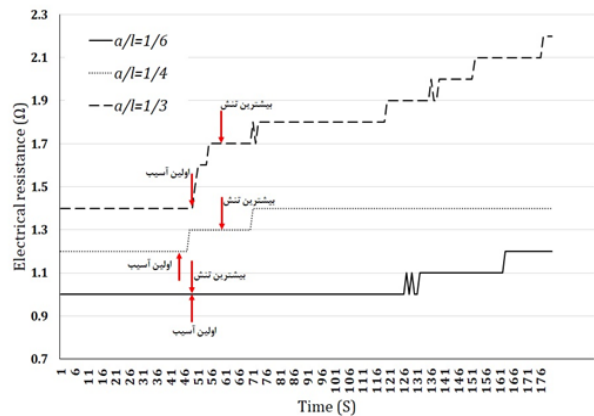
شکل ۱۲. شماتیک محل قرار گرفتن طولی عیب جدایش بین لایه‌ای

جدول ۵. مشخصات نمونه‌های ساخته شده برای بررسی اثر ابعاد و محل طولی عیب بر رفتار خود عیب‌یاب تیر کامپوزیتی

| شماره نمونه | $a/l$ | $d/l$ | محل عیب            | بررسی اثر طول عیب      |
|-------------|-------|-------|--------------------|------------------------|
| نمونه ۱-۲   | 1/6   | 0     | بین لایه‌های ۱ و ۲ |                        |
| نمونه ۲-۲   | 1/4   |       |                    |                        |
| نمونه ۳-۲   | 1/3   |       |                    |                        |
| نمونه ۱-۳   | 1/6   | 0     | بین لایه‌های ۷ و ۸ |                        |
| نمونه ۲-۳   | 1/4   |       |                    |                        |
| نمونه ۳-۳   | 1/3   |       |                    |                        |
| نمونه ۱-۴   | 1/3   | 0     | بین لایه‌های ۱ و ۲ | بررسی اثر محل طولی عیب |
| نمونه ۲-۴   |       | 1/8   |                    |                        |
| نمونه ۳-۴   |       | 1/4   |                    |                        |
| نمونه ۱-۵   | 1/3   | 0     | بین لایه‌های ۷ و ۸ |                        |
| نمونه ۲-۵   |       | 1/8   |                    |                        |
| نمونه ۳-۵   |       | 1/4   |                    |                        |

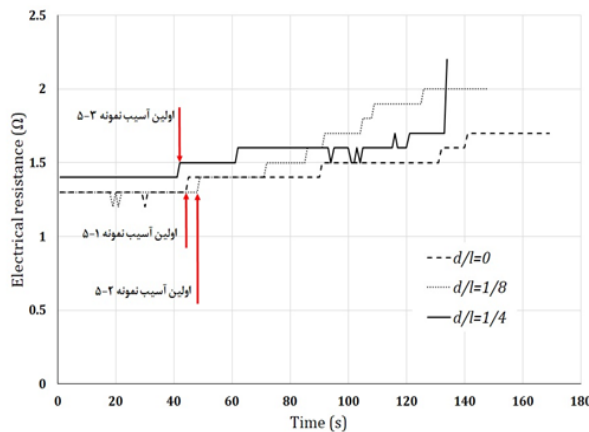


(ب)

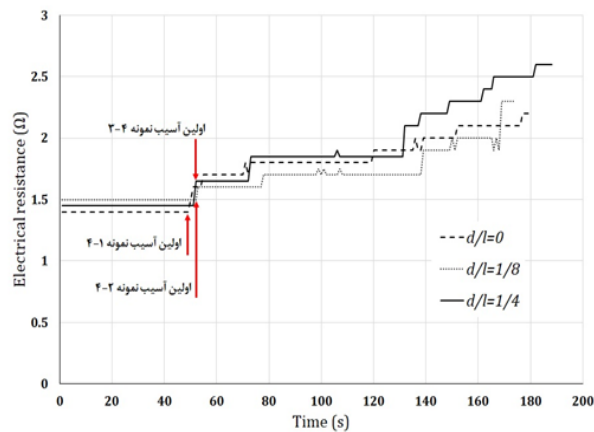


(الف)

شکل ۱۳. اثر اندازه عیب بر روی تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌ها (الف) عیب جدایش بین لایه‌های ۱ و ۲، (ب) عیب جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸ ( $d/l=0$ )



(ب)



(الف)

شکل ۱۴. اثر محل طولی عیب بر روی تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌ها (الف) عیب جدایش بین لایه‌های ۱ و ۲، (ب) عیب جدایش بین لایه‌های ۷ و ۸ ( $a/l=1/3$ )

وجود آسیب مرتبط با جدایش پی برد. از طرفی مقاومت نمونه‌ها با عیب جدایش دور از تار خنثی، در هنگام گسترش آسیب افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که مقاومت تیرهای بدون عیب در شروع گسترش آسیب کاهش می‌یابد. بر این اساس، بهره‌گیری از اثر پیژومقاومتی امکان شناسایی گسترش آسیب جدایش بین لایه‌ای را نیز فراهم می‌کند. مقایسه نتایج تغییرات مقاومت و تنش-کرنش نشان می‌دهد که رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌های ساخته شده در شناسایی شکست زمینه کارایی مناسبی نداشته ولی می‌توان از آن برای شناسایی شروع شکست الیاف بهره برد. همچنین کاهش اندازه عیب باعث کاهش امکان شناسایی عیب با اندازه‌گیری تغییرات مقاومت در حین بارگذاری می‌شود. از طرف دیگر، با ثابت بودن اندازه عیب، محل طولی قرار گرفتن عیب بین لایه‌ها تاثیر چندانی بر رفتار خود عیب‌یاب نمونه‌ها ندارد.

مورد بررسی قرار گرفته است. مبنای تعیین رفتار خود عیب‌یاب کامپوزیت، بهره‌گیری از اثر پیژومقاومتی تیر می‌باشد. بدین منظور نمونه‌های تیر کامپوزیتی به روش لایه‌چینی ساخته شده و در برخی از نمونه‌ها عیب جدایش بین لایه‌ای به صورت مصنوعی با قرار دادن نوار تفلون بین لایه‌ها ایجاد شده است. برای بررسی رفتار خود عیب‌یاب تست خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام شده و نتایج مربوط به نمونه‌های بدون عیب با نمونه با عیب مقایسه شده است. نمودارهای تنش-کرنش برای تفسیر خرابی در تیرها مورد استفاده قرار گرفته و داده‌های زمانی مربوط به اولین گسترش آسیب در نمونه‌ها استخراج شده است. پس از آن نمودار تغییرات مقاومت در حین بارگذاری برای تیرهای بدون عیب و با عیب رسم شده و به منظور امکان شناسایی وجود و گسترش عیب جدایش بین لایه‌ای با استفاده از تغییرات مقاومت تیر با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین اثر اندازه و محل طولی قرارگیری عیب بر رفتار خود عیب‌یاب تیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مقاومت تیر بدون عیب بالاتر از تیرهای با عیب جدایش بین لایه‌ای می‌باشد. بر این اساس می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت تیر و مقایسه آن با مقاومت یک تیر سالم به

۵- مراجع

[1] J. Wen, Z. Xia, F. Choy, Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement, *Composites: Part B* 42(2011), 77-86.

[2] P. Qiao, K. Lu, W. Leštari, J. Wang, Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates, *Composite Structures* 80(2007), 409-428.

[۳] م. رشوند، ز. رنجبر، س. باستانی، ش. روحانی، ف. نورمحمدیان، ک. الدین قرنجیک، عامل دار کردن و بهبود پراکنش نانوصفات گرافنی، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین، ۳(۱۳۹۴)، ۸۰۹-۸۳۰.

[4] M. Mehdipour Mirmahale, B. Noroozi, Evaluation of carbon nano webs produced by needleless and conventional electro-spun PAN-MWCNT nanofibers precursor, *Advanced Materials and Novel Coatings* 31(2019), 2212-2227.

[۵] ح. مشیدی، م. ربیعی، ن. ربیعی، طراحی و ساخت نانوحسگر زیستی چندگانه برای تشخیص همزمان گازهای دی اکسید کربن، متان، اتانول و آمونیاک، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین، ۲۵(۱۳۹۷)، ۱۸۰۸-۱۷۹۹.

[6] K. Zare, V.K. Gupta, O. Moradi, A.H. Makhlof, M. Sillanpaa, M.N. Nadagouda, H.Sadegh, R. Shahryari-Ghoshekandi, A. Pal, Z.J. Wang, I. Tyagi, M. Kazemi, A comparative study on the basis of adsorption capacity between CNTs and activated carbon as adsorbents for removal of noxious synthetic dyes: a review, *Journal of nanostructure in chemistry* 5(2015), 227-236.

[7] G. Overney, W. Zhong, D. Tomanek, Structural rigidity and low frequency vibrational modes of long carbon tubules, *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters* 27(1993), 93-96.

[8] M. Prato, Fullerene polymers: synthesis, properties and applications. John Wiley & Sons, 2009.

[9] M. Terrones, Carbon nanotubes: synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications, *International Materials Reviews* 49(2004), 325-377.

[10] J.C. Charlier, P. Issi, Electrical conductivity of novel forms of carbon, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 57(1996), 957-965.

[11] T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H. Hiura, J.W. Bennett, H.F. Ghaemi, T. Thio, Electrical-conductivity of individual carbon nanotubes, *Nature* 382(1996), 54-56.

[12] Y. Ando, X. Zhao, H. Shimoyama, G. Sakai,

K. Kaneto, Physical properties of multiwalled carbon nanotubes, *International Journal of Inorganic Materials* 1(1999), 77-82.

[13] B. De Vivo, P. Lamberti, G. Spinelli, V. Tucci, L. Vertuccio, V. Vittoria, Simulation and experimental characterization of polymer/carbon nanotubes composites for strain sensor applications, *Journal of Applied Physics* 116(2014), 054307.

[14] L. Chang, K. Friedrich, L. Ye, P. Toro, Evaluation and visualization of the percolating networks in multi-wall carbon nanotube/epoxy composites, *Journal of Materials Science* 44(2009), 4003-4012.

[15] R. Shueler, J. Petermann, K. Schule, H.P. Wentzel, Agglomeration and electrical percolation behavior of carbon black dispersed in epoxy resin, *Journal of Applied Polymer Science* 63(1997), 1741-1746.

[16] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell, Multiwall carbon nanotubes: synthesis and application, *Accounts of Chemical Research* 35(2002), 1008-1017.

[17] D. S. McLachlan, C. Chiteme, C. Park, K. E. Wise, S. E. Lowther, P. T. Lillehei, E. J. Siochi, J. S. Harrison, Ac and dc percolative conductivity of single wall carbon nanotube polymer composites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 43(2005), 3273-3287.

[18] W. Bauhofer, J.Z. Kovacs, A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites, *Composites Science and Technology* 69(2009), 1486-1498.

[19] L. Guadagno, C. Naddeo, V. Vittoria, A. Sorrentino, L. Vertuccio, M. Raimondo, V. Tucci, B. de Vivo, P. Lamberti, G. Lannuzzo, E. Calvi, S. Russo, Cure behavior and physical properties of epoxy Resin Filled with multiwalled carbon nanotubes, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 10(2010), 2686-2693.

[20] N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu, J. Li, Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes-based polymer nanocomposites, *Sensors* 11(2011), 10691-10723.

[21] C. Feng, L. Jiang, Investigation of uniaxial stretching effects on the electrical conductivity of CNT-polymer nanocomposites, *Journal of Physics D: Applied Physics* 47(2014), 405103.

[22] I. Kang, M. Schulz, H.J. Kim, V. Shanov, D. Shi, A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring, *Smart Materials and Structures* 15(2006), 737-748.

[23] A. Todoroki, M. Tanaka, Y. Shimamura,

Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method, *Composites Science and Technology* 62(2002), 619-628.

[24] A. Todoroki, M. Tanaka, Y. Shimamura, High performance estimations of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method, *Composites Science and Technology* 63(2003), 1911-1920.

[25] L. Böger, M.H.G. Wichmann, L. Ole Meyer, K. Schulte, Load and health monitoring in glass fiber reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix, *Composites Science and Technology* 68(2008), 1886-1894.

[26] X. Li, C. Levy, L. Elaadil, Multiwalled carbon nanotube film for strain sensing, *Nanotechnology* 19(2008), 045501.

[27] B.R. Loyola, V. La Saponara, K.J. Loh, In situ strain monitoring of fiber-reinforced polymers using embedded piezo resistive nanocomposites, *Journal of Materials Science* 45(2010), 6786-6798.

[28] S.L. Gao, R.C. Zhuang, J. Zhang, J.W. Liu, E. Mäder, Glass fibers with carbon nanotube networks as multifunctional sensors, *Advanced Functional Materials* 20(2010), 1885-1893.

[29] Alamusi, Y.L. Liu, N. Hu, Numerical simulations on piezoresistivity of CNT/polymer based nanocomposites, *Computers, Materials and Continua* 20(2010), 101-117.

[30] T. Tallman, K.W. Wang, An arbitrary strains carbon nanotube composite piezoresistivity model for finite element integration, *Applied physics letters* 102(2013), 011909.

[31] X. Wang, D.D.L. Chung, Sensing delamination in a carbon fiber polymer matrix composite during fatigue by electrical resistance measurement, *Polymer Composites*, 18(1997), 692-700.

[32] J. L. Abot, Y. Song, M. Sri Vatsavaya, S. Medikonda, Z. Kier, C. Jayasinghe, N. Rooy, V. N. Shanov, M. J. Schulz, Delamination detection with carbon nanotube thread in self-sensing composite materials, *Composites Science and Technology* 70(2010), 1113-1119.

[33] E. García-Macías, L. Rodríguez-Tembleque, A. Sáez, MWCNT/epoxy strip-like sensors for buckling detection in beam-like structures, *Thin-Walled Structures* 133(2018), 27-41.

[34] Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials, ASTM International, D 7264/D 7264M-07, 2007.

[35] Tensile properties of polymer matrix composite

materials, ASTM International, D 3039/D 3039M, 2002.

[36] Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM International, D 7905, 2019.