



## رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف کربن حاوی مواد خودترمیم انیدریدی تحت بارگذاری عرضی

رضا اسلامی فارسانی<sup>۱\*</sup>، امین ساری<sup>۲</sup>، حامد خسروی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
eslami@kntu.ac.ir، ۱۹۹۹۱-۴۳۳۴۴

### چکیده

### اطلاعات مقاله

حضور میکروتکرک‌های عمقی در سازه‌های کامپوزیتی از جمله آسیب‌هایی به‌شمار می‌رود که در صورت مشاهده باید سازه را جایگزین نمود. پدیده خودترمیمی که از سیستم‌های بیولوژیکی مانند شبکه آوندی در گیاهان یا شبکه مویرگی در جانوران الهام گرفته شده است، روشی مناسب برای رفع عیوب و ترمیم میکروتکرک‌ها است. در این پژوهش با بهره‌گیری از سیستم خودترمیمی، به ترمیم میکروتکرک‌ها و آسیب‌های ایجاد شده در یک سازه کامپوزیتی پرداخته شده است. بدین منظور از یک سری میکرولوله‌های شیشه‌ای برای ایجاد مکانیزم ترمیم‌شوندگی استفاده شد. این میکرولوله‌ها با نوعی ماده ترمیم‌کننده که شامل رزین به همراه هاردنر انیدریدی بود، پر شدند. زمانی که سازه تحت بارگذاری قرار گیرد و در اثر آن آسیب یا میکروتکرک در نمونه مشاهده شود، با برخورد این ترک‌ها به میکرولوله‌ها، لوله‌ها شکسته شده و ماده درون آن‌ها در محل آسیب جریان پیدا می‌کند که با گذشت زمان باعث حذف آسیب می‌شود. هدف از پژوهش حاضر بررسی کسر حجمی مناسب و زمان مطلوب برای مشاهده پدیده ترمیم‌شوندگی است. بدین منظور میکرولوله‌های شیشه‌ای حاوی مواد ترمیمی انیدریدی با کسرهای حجمی ۲، ۴ و ۶ درصد در کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن تعبیه شدند. خواص خمشی نمونه‌ها با گذشت زمان‌های مختلف پس از ایجاد آسیب بررسی شد. بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی به میزان ۸۴ درصد برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی ماده ترمیمی با گذشت ۸ روز پس از ایجاد آسیب مشاهده شد.

دریافت: ۹۴/۱۲/۲۷

پذیرش: ۹۵/۲/۱۸

### کلیدواژه‌ها:

کامپوزیت اپوکسی - الیاف کربن  
پدیده خودترمیمی  
هاردنر انیدریدی  
رفتار خمشی

## Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading

Reza Eslami-Farsani\*, Amin Sari, Hamed Khosravi

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 19991- 43344 ,Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Epoxy-carbon fibers composite  
Self-healing phenomenon  
Anhydride hardener  
Bending behavior

### Abstract

In the case of presence of deep micro-cracks within the composite structures, they must be replaced. The self-healing phenomenon which is inspired from the biological systems such as vascular networks in plants or capillary networks in animals is an appropriate strategy to control the defects and micro-cracks. In the present research, by taking accounts the advantages of self-healing concept, an attempt has been made to control the micro-cracks and damages which were created in composite structures. To do so, a series of micro glass tubes were employed to provide a self-healing system. These micro-tubes were filled with epoxy resin + anhydride as a healing agent. When the structure is subjected to loading conditions, some damages or micro-cracks are created. In this situation, the micro glass tubes will rupture and the healing agent flows in the damage area, leading to the elimination of the defects over a time span. The aim of this study is to find out the appropriate micro glass tubes volume fraction and healing time to obtain an efficient healing. For this purpose, glass micro-tubes containing various anhydride agent loadings of 2, 4 and 6 vol. % were incorporated in epoxy-carbon fibers composites and the bending behavior of the specimens were assessed during different time span from defect creation. The highest bending strength recovery of 84% was observed for the specimen with 4% healing agent after 8 days.

### Please cite this article using:

Eslami-Farsani, R. Sari, A. and Khosravi, H., "Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 285-290, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف به علت دارا بودن استحکام و مدول ویژه بالا در صنایعی همچون هوافضا، صنایع هوایی، اتومبیل‌سازی و بخش انرژی‌های تجدیدپذیر به کار می‌روند. در طول عمر استفاده از کامپوزیت ممکن است عیوب و آسیب‌هایی غیر قابل تشخیص در ریزساختار یا در عمق سازه ایجاد شوند. حضور میکروترک‌ها در زمینه پلیمری می‌تواند بر روی خواص زمینه و همچنین الیاف تقویت‌کننده تأثیر مخرب زیادی داشته باشد. زمینه ترک‌دار موجب ایجاد تورق و در نتیجه شکست الیاف می‌شود. در ارتباط با سازه‌های کامپوزیتی، انتشار میکروترک‌ها ممکن است یکپارچگی ساختاری اجزای کامپوزیتی، عمر سازه و در نهایت ایمنی آن را تحت تأثیر قرار دهد. روش‌های ترمیمی مرسوم برای میکروترک‌های ایجاد شده در داخل سازه موثر نیستند. همچنین در سازه‌های کامپوزیتی بر خلاف فلزات، عیوب تشکیل شده را نمی‌توان با بررسی از روی سطح تشخیص داد. بنابراین اهمیت استفاده از کامپوزیت‌هایی که توانایی خودترمیمی را داشته باشند بسیار زیاد است. مواد خودترمیم موادی هستند که توانایی حذف عیوب و آسیب‌های ایجاد شده را به صورت خودبخودی دارا هستند. پدیده خودترمیمی با الگوبرداری از مکانیزم‌های زیستی و شبیه‌سازی مقوله ترمیم در بدن موجودات زنده به روش‌های مختلفی قابل دستیابی است [۲،۱].

به طور کلی دو روش ترمیم ذاتی و غیرذاتی وجود دارند. در ترمیم ذاتی، بازیابی خواص مواد و ترمیم در اثر عواملی همچون واکنش‌های برگشت‌پذیر، نفوذ مولکولی و یا زوج شدن یونومرها به وجود می‌آید [۳]. در ترمیم غیرذاتی عوامل فعال یا عوامل ترمیم مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عوامل فعال به سه روش کپسول، الیاف توخالی و میکروآوند در زمینه قرار می‌گیرند تا پس از ایجاد عیب و شکسته شدن پوسته در ترک، جریان یافته و عیوب را ترمیم کنند.

استفاده از نانو/میکروکپسول‌های پلیمری در مواد خودترمیم شونده در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط وایت و همکاران [۴] مطرح شد و از آن زمان تا به حال به طور گسترده‌ای در طرح‌های تحقیقاتی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. به طور خلاصه، میکرو/نانوکپسول‌های حاوی ماده ترمیم‌کننده به همراه کاتالیزور مناسب در زمینه پلیمری توزیع شده و با رشد ترک‌ها در ماده زمینه و برخورد آن‌ها با کپسول‌ها موجب پاره شدن دیواره کپسول و در ادامه رهاسازی عامل ترمیم‌کننده در محل آسیب خواهند شد. واکنش پلیمریزاسیون بین ماده آزاد شده و ذرات کاتالیزور خیلی سریع اتفاق افتاده و باعث ترمیم آسیب و نهایتاً بازیابی خواص مکانیکی ماده زمینه می‌شود. در واقع در این روش پس از ایجاد ترک در پوسته کپسول و خروج عوامل ترمیم (مونومر) عملیات ترمیم آغاز می‌شود. کپسول‌ها که می‌توانند در مقیاس‌های میکرو و یا نانو [۵] باشند، پس از سنتز داخل پلیمر قرار داده می‌شوند. در این روش حضور کاتالیزور بعنوان فاز جدایش ثانویه ضروری است [۴،۱]. کاتالیزورها می‌توانند به صورت کپسول و یا به صورت فاز پخش شده در زمینه وجود داشته باشند [۶].

لی و همکاران [۷] تأثیر عوامل موثر بر مورفولوژی، ضخامت دیواره کپسول، مقدار عامل پخت مناسب، عمر کپسول و توزیع اندازه میکروکپسول‌های حاوی دیسیکلوپنتادین و دیواره اوره-فرمالدهید را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که با کنترل عوامل فرایند همچون دمای انجام واکنش، نسبت وزنی هسته-دیواره، سرعت اختلاط و غلظت عامل امولسیون‌کننده می‌توان شرایط بهینه را به وجود آورد. رول و همکاران [۸] به بررسی تجربی تأثیر قطر میکروکپسول‌ها در ماتریس اپوکسی EPON 828

پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در یک کسر حجمی ثابت هر چه اندازه کپسول‌ها بزرگتر باشد انرژی جذب شده برای شکست بیشتر می‌شود که دلیل آن وجود عوامل ترمیم بیشتر در کپسول است. استفاده از میکروکپسول‌های چندلایه روش دیگری است که مورد مطالعه قرار گرفته است. کپسول‌های چندلایه این امکان را فراهم می‌آورند که از مواد ترمیم‌کننده متنوعی بتوان بهره جست. بازدهی و پایداری حرارتی بالا از مشخصات این نوع کپسول‌ها است [۱۰،۹]. براون و همکاران [۱۱] و همچنین جین و همکاران [۱۳،۱۲] به بررسی رفتار شکست و خستگی و تأثیر کپسول‌های خودترمیم پرداخته‌اند و نشان دادند که حضور کپسول‌ها در زمینه پلیمری بر پایه اپوکسی EPON828 باعث بهبودی خواص مکانیکی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی می‌شود.

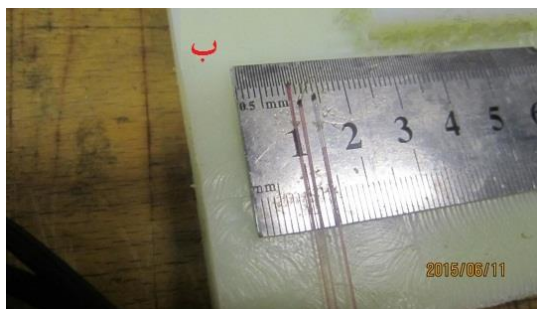
روش دیگر خودترمیمی، استفاده از الیاف توخالی است که مکانیزم این روش شبیه به روش کپسولی بوده ولی با این تفاوت که در روش کپسولی محدودیت عوامل ترمیم بهبود یافته و همچنین تکرارپذیری در این روش امکان‌پذیر است [۴]. استفاده از الیاف شیشه و کربن توخالی برای این روش مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. درای و سوتوز برای اولین بار با پر کردن الیاف توخالی شیشه در زمینه اپوکسی، کامپوزیت‌های خودترمیم را به وجود آوردند [۱۶،۱۵]. در ادامه به منظور بهبودی خواص مکانیکی بلی و همکاران [۱۷] از الیاف شیشه با قطر خارجی ۱۵ میکرون و قطر داخلی ۵ میکرون استفاده کردند. تراسک و همکاران [۱۹،۱۸] از الیاف توخالی شیشه در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند و بازدهی بالای ۹۰ درصد را گزارش دادند.

روش دیگر خودترمیمی، استفاده از شبکه‌های آوندی است. بدین منظور با شبیه‌سازی پوست انسان در سازه‌ها، شبکه میکروآوندی را ایجاد می‌کنند [۲۰]. پیشرفت‌های اخیر در لیتوگرافی و امکان طراحی مستقیم در چاپگرهای سه‌بعدی امکان طراحی‌های پیچیده شبکه‌های آوندی میکرونی و همچنین شبیه‌سازی سیستم عروقی موجودات را در سازه‌ها فراهم آورده است [۲۱،۲۰]. با استفاده از این روش بازیابی بیش از ۹۶ درصد از استحکام فشاری بعد از آزمون ضربه مشاهده شده است [۲۲]. لیم و همکاران [۲۱] در این ارتباط از تکنولوژی لیزر بهره گرفتند. استفاده از این تکنولوژی برای ساخت شبکه آوندی روشی سریع و قابل انعطاف است و می‌توان شبکه آوندی را با شکل‌های مختلف ساخت. روش دیگر که در کسری از ثانیه یک شبکه آوندی را تشکیل می‌دهد القای بار و تخلیه سریع آن است. در این روش در کسری از ثانیه شبکه آوندی سه‌بعدی ایجاد می‌شود. در ابتدا با استفاده از پرتو الکترون ۱۰ MeV برای القای بار به میزان مشخص معمولاً  $1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  [۲۳] استفاده می‌شود. پس از باردار کردن نمونه که معمولاً از نمونه‌های پلاستیکی نظیر PMMA<sup>۱</sup> استفاده می‌شود به منظور دشارژ کردن از یک الکتروود نوک تیز متصل به زمین استفاده می‌شود که با اتصال به نمونه باعث تخلیه سریع بار می‌شود. عملیات دشارژ کردن را می‌توان در چند نقطه به صورت همزمان انجام داد تا مورفولوژی‌های مختلفی تشکیل شوند [۲۴،۲۳].

نکته قابل توجه در مواد خودترمیم، عوامل فعال یا عوامل ترمیم هستند. این عوامل می‌توانند تک‌جزئی و یا دوجزئی باشند. دیسیکلوپنتادین (DCPT<sup>۲</sup>) معمول‌ترین ماده مورد استفاده است که به همراه کاتالیست گرایس به عنوان عوامل ترمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵،۱۲،۱۳]. لی و همکاران [۲۶] از

1 Poly(methylmethacrylate)  
2 Dicyclopentadiene

حجمی متفاوت (۲، ۴ و ۶ درصد) آماده شد و در سه زمان مختلف (صفر، ۵ و ۸ روز) پس از ایجاد تخریب تحت آزمون قرار گرفتند.



شکل ۱ میکرولوله‌های شیشه مورد استفاده الف) قبل و ب) پس از پرشدن توسط مواد ترمیمی

### ۲-۳- آزمون خمش سه نقطه‌ای

از آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790M به منظور بررسی خواص خمشی نمونه شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی مواد خودترمیمی استفاده شد. ایجاد خرابی اولیه در نمونه‌ها با استفاده دستگاه خمش از طریق خم کردن نمونه‌ها به میزان ۵ میلی‌متر با نرخ بارگذاری ۲ mm/min صورت گرفت. در شکل ۲، مراحل انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

در مجموع ۴ نوع نمونه (سه نمونه با کسر حجمی مختلف لوله‌های توخالی و یک نمونه شاهد) با نرخ بارگذاری ۵ mm/min تحت آزمون (هر کدام سه مرتبه جهت صحت‌گذاری نتایج) توسط دستگاه یونیورسال مدل Hounsfield با نام تجاری H25KS و قابلیت اعمال ۲۵ KN بار قرار گرفتند و نمودار نیرو برحسب جابجایی برای هر یک حاصل شد. استحکام خمشی نمونه‌ها نیز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \left[ 1 + 6\left(\frac{D}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \right] \quad (1)$$

که در این رابطه  $\sigma_f$ ،  $P$ ،  $L$ ،  $b$ ،  $d$  و  $D$  به ترتیب مبین استحکام خمشی، نیروی خمشی حداکثر، فاصله دو تکیه‌گاه، پهنای نمونه، ضخامت نمونه و انحنای خط مرکز نمونه هستند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نمونه شاهد

در ارتباط با نمونه‌های شاهد، دو نوع نمونه، یکی بدون تخریب و دیگری با ایجاد تخریب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند. در شکل ۳، نمودار نیرو-جابجایی برای این نمونه‌ها آورده شده است.

رزین DGEBA<sup>۱</sup> و هاردنر پلی اتر آمین به عنوان عوامل ترمیم استفاده کردند. کوپ و همکاران [۲۷] از EPA<sup>۲</sup> به همراه کاتالیست Sc(OTf)<sub>3</sub> به عنوان جایگزینی برای DCPT استفاده کردند. منگون و همکاران [۲۸]، PMDS<sup>۴</sup> را به عنوان عوامل ترمیم معرفی کردند. از عوامل ترمیم دیگر می‌توان EMAA<sup>۵</sup> را نام برد که در سازه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود [۲۹].

در ادامه تحقیقات قبلی، هدف از پژوهش حاضر بررسی جنبه‌های خودترمیمی در سازه‌های کامپوزیتی اپوکسی-الیاف کربن و بررسی بازده ترمیم در این مواد تحت شرایط بارگذاری خمش سه نقطه‌ای است. بدین منظور از هاردنرهای انیدریدی به عنوان عوامل ترمیم استفاده شد و کسر حجمی مطلوب عوامل ترمیم و همچنین زمان مناسب برای ترمیم مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲- مواد و روش تحقیق

#### ۲-۱- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی ML506 و هاردنر آمینی HA11 (ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر) به عنوان فاز زمینه و از پارچه الیاف کربن دو جهته T700S (شرکت الیاف کربن توریا، آمریکا) با استحکام کششی حدود ۵ GPa به عنوان فاز تقویت‌کننده الیافی استفاده شد. همچنین از میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی متوسط ۲۵۰ میکرون و کسر تهیگی حدود ۵۵ درصد برای ذخیره‌سازی عوامل ترمیم استفاده شد. عوامل ترمیم رزین اپوکسی ML526، هاردنر انیدریدی (در درون لوله‌های میکرونی) و کاتالیزور Ax11 در زمینه مورد استفاده قرار گرفتند. سیالیت بالا و امکان استفاده به صورت تک‌جزئی از دلایل انتخاب این نوع هاردنر بودند.

#### ۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت میکرولوله‌ها از یک سری لوله‌های موئین با قطر خارجی ۱ سانتی‌متر استفاده شد که پس از چندین مرتبه حرارت دادن تحت کشش قرار گرفته و قطر آن‌ها کاهش داده شد تا در نهایت میکرولوله‌هایی با قطر میانگین حدود ۲۵۰ میکرون حاصل شدند. به منظور پرکردن لوله‌ها از روش خلاء استفاده شد. رزین و هاردنر انیدریدی با نسبت ۱۰۰ به ۹۰ ترکیب شده و در درون لوله‌های موئین قرار گرفت. کاتالیزور در اطراف لوله‌های موئین پخش شد تا پس از ایجاد عیب و شکسته شدن لوله‌های شیشه‌ای و جریان یافتن عوامل ترمیم عملیات پلیمریزاسیون شروع شده و عملیات ترمیم صورت گیرد. در شکل ۱ لوله‌های موئین قبل و بعد از پرشدن با عوامل ترمیمی نشان داده شده‌اند.

ساخت نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی و از طریق قراردادن ۶ لایه پارچه الیاف کربن صورت گرفت. بدین منظور پس از تعیین وزن مورد نیاز از اپوکسی و هاردنر برای تشکیل کامپوزیت حاوی ۳۰ درصد تقویت‌کننده، ۶ لایه پارچه کربن در ابعاد مناسب برش شدند. به منظور به دست آوردن خواص مناسب و سطح صاف، نمونه‌های کامپوزیتی بر روی قالب سیلیکونی ساخته شده و سپس در ابعاد مناسب مطابق با استاندارد بریده شدند. لوله‌های موئین در لایه‌های دوم و پنجم (به منظور حفظ تقارن) قرار داده شدند. همچنین سه نوع نمونه حاوی عوامل خودترمیمی با کسرهای

1 Diglycidyl ether of bisphenol A epoxy

2 Ethylphenylacetate

3 Scandium(III)triflate

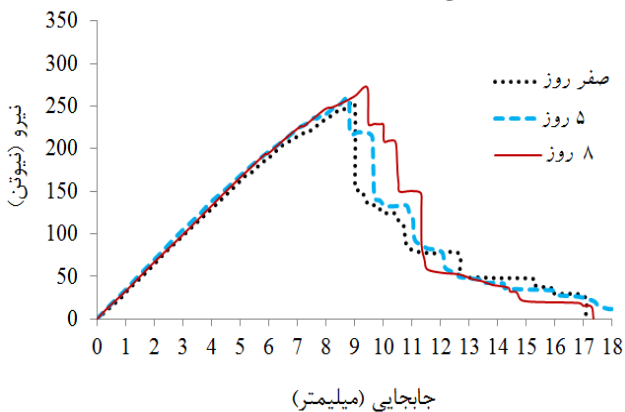
4 Poly(dimethylsiloxane)

5 Poly[ethylene-co-methacrylic acid]

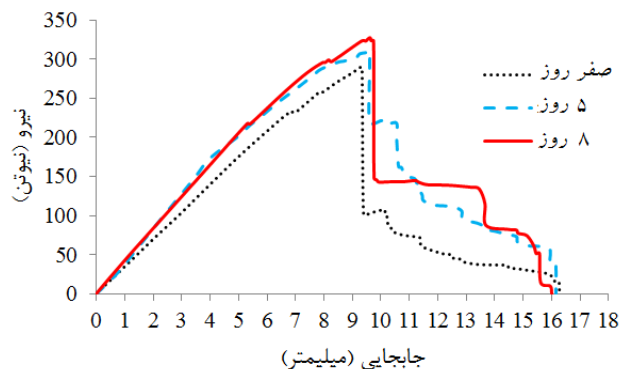
## ۳-۲- نمونه‌های خودترمیم

نمونه‌های نیرو-جابجایی برای نمونه‌های حاوی ۲ درصد حجمی مواد ترمیمی در سه زمان مختلف پس از ایجاد تخریب در شکل ۴ نشان داده شده است. با استفاده از رابطه ۱، استحکام خمشی این نمونه‌ها در بازه‌های صفر، ۵ و ۸ روز پس از تخریب به ترتیب ۱۹/۵، ۲۰/۵۲ و ۲۱/۵۸ مگاپاسکال به دست آمد. مشاهده می‌شود که کاهش استحکام پس از ایجاد آسیب نسبت به نمونه شاهد بعد از آسیب حدود ۱ درصد کمتر بوده که دلیل آن حضور میکرولوله‌ها می‌باشد که باعث افزایش ضخامت و ایجاد ناپیوستگی در کامپوزیت است. با گذشت زمان، نمونه ترمیم می‌شود و به حداکثر استحکام ۲۱/۵۸ مگاپاسکال می‌رسد که این استحکام نسبت به نمونه فاقد میکرولوله حدود ۱۰ درصد کمتر است.

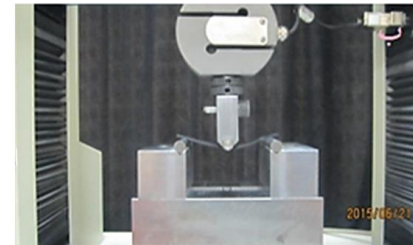
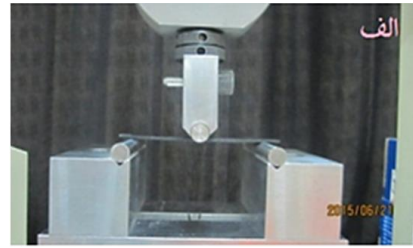
در شکل‌های ۵ و ۶، نمودارهای خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۴ و ۶ درصد حجمی مواد ترمیمی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با گذشت زمان حداکثر نیروی خمشی در نمونه حاوی ۴ درصد به میزان ۱۸ درصد و در نمونه حاوی ۶ درصد میکرولوله به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته است. این افزایش استحکام به دلیل آزاد شدن عوامل ترمیم و جریان یافتن در سطح ترک و ایجاد پیوند با زمینه است. دلیل کاهش شدید استحکام در نمونه‌های حاوی ۶ درصد، بالاتر بودن کسر حجمی میکرولوله‌ها می‌باشد که به عنوان نواحی گسسته در ساختار عمل کرده و منجر به افت خواص می‌شوند.



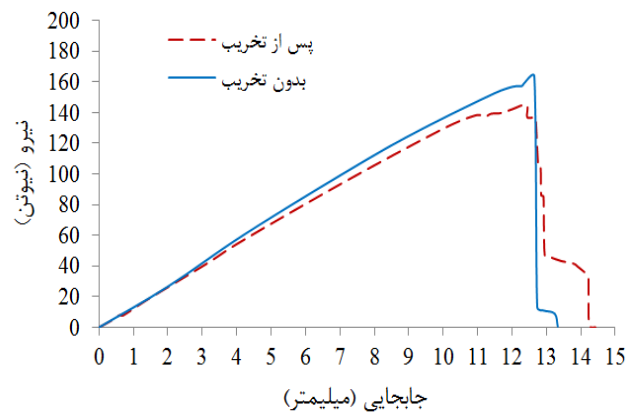
شکل ۴ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه حاوی ۲ درصد حجمی عامل ترمیمی و پس از گذشت سه بازه زمانی مختلف پس از تخریب



شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی عوامل و پس از گذشت سه زمان صفر، پنج و هشت روز پس از تخریب



شکل ۲ مراحل انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای، (الف) قبل، (ب) در حین و (ج) انتهای آزمون تا شکست نمونه



شکل ۳ نمودار نیرو-جابجایی خمشی برای نمونه کنترلی در دو حالت بدون تخریب و پس از تخریب

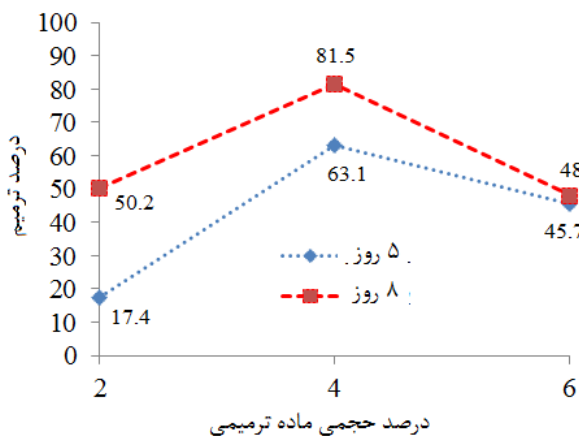
مطابق با نمودار شکل ۳، ایجاد عیب تأثیری بر روی میزان جابجایی شکست نداشته و تنها باعث کاهش نیروی خمشی لازم برای شکست شده است. استحکام خمشی کامپوزیت‌ها با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی و همچنین رابطه (۱) محاسبه شد. استحکام خمشی برای نمونه کنترلی بدون عیب، ۹۲/۲۳ MPa و برای نمونه بعد از ایجاد تخریب، ۷۴/۱۹ MPa به دست آمد. کاهش استحکام خمشی نمونه کنترلی پس از ایجاد آسیب به علت حضور میکروتُرک‌ها در نمونه است. این میزان کاهش استحکام که حدود ۲۱ درصد است، پس از ایجاد آسیب و خم کردن نمونه به میزان ۵ میلی‌متر مشاهده شده است.

. همچنین حضور الیاف توخالی به دلیل ایجاد نقاط تمرکز تنش و افزایش ضخامت کامپوزیت باعث کاهش استحکام خمشی می‌شود. با افزایش کسر حجمی لوله حاوی مواد ترمیمی، کاهش استحکام خمشی دیده می‌شود به طوری که در نمونه حاوی ۶ درصد حجمی ماده ترمیمی، کاهش حدود ۱۷ درصدی در استحکام خمشی نمونه پس از آسیب نسبت به نمونه شاهد آسیمی مشاهده می‌شود. این در حالی است که در درصد‌های حجمی ۲ و ۴، کاهش استحکام خمشی کمی مشاهده می‌شود. مزیت اصلی که این نوع مواد دارند، امکان خودترمیمی آن‌هاست که همان‌گونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان خواص مکانیکی بهبود یافته است.

بهبودی استحکام خمشی پس از ترمیم در نمودارهای شکل‌های ۴ تا ۶ با افزایش نیروی لازم برای شکست با گذشت زمان مشاهده می‌شود. برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم ( $\eta$ )، از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۴].

$$\eta = \frac{\sigma_{f(H)} - \sigma_{f(D)}}{\sigma_{f(V)} - \sigma_{f(D)}} \quad (2)$$

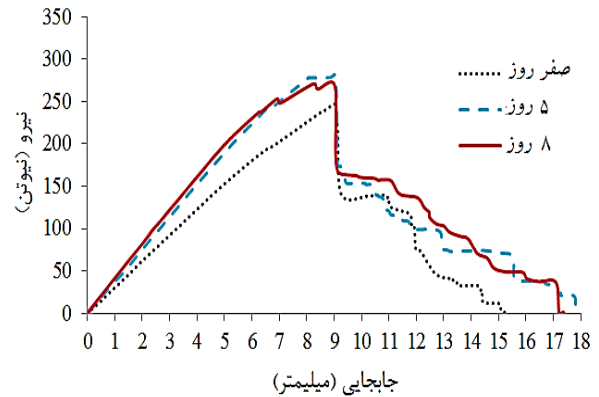
که در این رابطه، زیرنویس‌های H و D و V به ترتیب مبین نمونه‌های ترمیم شده، تخریب شده و اولیه بدون تخریب هستند. با توجه به رابطه ۲، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق این نمودار بیشترین بازده ترمیم حدود ۸۱ درصد و برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی مواد ترمیمی با گذشت ۸ روز پس از تخریب حاصل شد.



شکل ۸ ارتباط بین درصد حجمی ماده ترمیمی و بازده ترمیم پس از گذشت دو بازه زمانی مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی خواص خمشی کامپوزیت‌های خودترمیم اپوکسی-الیاف کربن پرداخته شد. به دلیل نواقصی که در استفاده از عوامل ترمیم دو جزئی (رزین و هاردنر) وجود دارد، عوامل ترمیم تک جزئی شامل رزین و هاردنر انیدریدی که سیالیت بالاتری نسبت به رزین و هاردنر آمینی دارند و همچنین امتزاج‌پذیری آن‌ها قابل کنترل است به کار گرفته شدند. نمونه‌های کامپوزیتی با سه درصد حجمی مختلف از میکرولوله‌های حاوی مواد ترمیمی (۲، ۴ و ۶ درصد) تهیه و خواص ترمیمی آن‌ها پس از گذشت زمان‌های مختلف (۵ و ۸ روز) از زمان تخریب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که حضور میکرولوله‌های حاوی مواد ترمیمی باعث کاهش خواص خمشی کامپوزیت می‌شوند. اما با گذشت زمان و انجام فرآیند ترمیم تخریب به وجود آمده، استحکام خمشی بهبود می‌یابد. بازیابی ۸۴

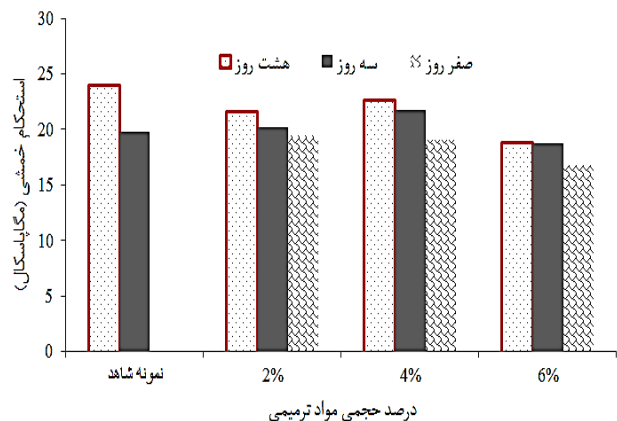


شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه حاوی ۶ درصد حجمی عوامل و پس از گذشت سه زمان صفر، پنج و هشت روز پس از تخریب

همان‌گونه که در شکل‌های ۴ تا ۶ مشاهده می‌شود، نیروی خمشی با گذشت زمان پس از تخریب افزایش یافته است که این امر به دلیل حضور عوامل ترمیمی در نمونه‌ها است. در واقع پس از تخریب، عوامل ترمیم در محل آسیب جریان یافته و با گذشت زمان به علت پخت این عوامل، نیروی خمشی افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو همچنین بر روی چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش) نیز تأثیر داشته و آن را افزایش می‌دهد.

برای مقایسه صحیح بین نمونه کنترل و نمونه‌های خودترمیم نمی‌توان از نمودار نیرو-جابجایی استفاده نمود، زیرا به دلیل تفاوت ضخامت نمونه‌ها، مقدار حداکثر نیروی تحمل شده در دو نمونه متفاوت است. استفاده از پارامتر استحکام خمشی به منظور مستقل نمودن پارامتر مقایسه از ابعاد نمونه، روشی مناسب برای به شمار می‌رود. در شکل ۷ استحکام خمشی میانگین برای نمونه‌های کنترلی و خودترمیم به منظور مقایسه آن‌ها نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود، استحکام خمشی در نمونه شاهد پس از ایجاد تخریب در اثر شکسته شدن الیاف کاهش چشمگیری حدود ۲۱ درصد داشته است. استحکام خمشی کامپوزیت‌های حاوی مواد ترمیمی در مقایسه با کامپوزیت بدون مواد ترمیمی کمتر است. این امر می‌تواند به علت گسستگی در آرایش و چیدمان لمینیت پایه به علت وجود میکرولوله‌های شیشه و کاهش کسر حجمی فاز الیافی کربن باشد



شکل ۷ ارتباط بین استحکام خمشی و میزان ماده ترمیمی پس از گذشت دو بازه زمانی مختلف

- [26] Li, Q. Kim, N.H. Hui, D. and Lee, J.H., "Effects of Dual Component Microcapsules of Resin and Curing Agent on the Self-Healing Efficiency of Epoxy" Composites: Part B, Vol. 55, pp. 79-85, 2013.
- [27] Coope, T. S. Wass, D. F. Trask, R. S. and Bond, P., "Repeated Self-Healing of Microvascular Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", Smart Materials Structures, Vol. 23, pp. 115002-115018, 2014.
- [28] Mangun, C. L. Mader, A. C. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing of a High Temperature Cured Epoxy using Poly(dimethylsiloxane) Chemistry", Polymer, Vol. 51, pp. 4063-4068, 2010.
- [29] Asadi, J. Ebrahimi, N.G. and Razzaghi, M., "Self-healing Property of Epoxy/Nanoclay Nanocomposite using Poly (ethylene-co-methacrylic acid) Agent", Composites: Part A, Vol. 68, pp. 56-61, 2015.

درصدی استحکام خمشی برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی مواد ترمیمی پس از گذشت ۸ روز مشاهده شد.

##### ۵- مراجع

- [1] Samadzadeh, M. Boura, H. S. and Peikari, M., "A Review on Self-healing Coatings Based on Micro/nanocapsules", Progress in Organic Coatings, Vol. 68, pp. 159-164, 2010.
- [2] Zeng, C. Seino, H. Ren, J. Hatanaka, K. and Yoshie, N., "Self-healing Bio-based Furan Polymers Cross-linked with Various Bis-maleimides" Polymer, Vol. 54, pp. 5351-5357, 2013.
- [3] Emaami, M. Aram, E. and Mahdavian, A., "Smart polymer: Self-healing Polymers", polymerization, Vol. 3, pp. 27-38, 2013.
- [4] Blaiszik, B. Kramer, B. Olugebefola, S. Moore, J. S. and Sottos, N. R., "Self-Healing Polymers and Composites", Annual Review Material Research, Vol. 40, pp. 179-211, 2010.
- [5] Blaiszik, B. Sottos, N.R. and White, S. R., "Nanocapsules for Self-Healing Materials", Composite Science and Technology, Vol. 68, pp. 978-986, 2008.
- [6] Gerald, O. Wilson, H. and Anderson, M., "Self-healing Polymers", Inc Champaign, Illinois, John Wiley & Sons, pp. 1-33, 2010.
- [7] Li, Q. Mishra, A. K. Kim, N. H. Kulla, T. and Lee, J. H., "Effects of Processing Conditions of Poly(methylmethacrylate) Encapsulated Liquid Curing Agent on the Properties of Self-Healing Composites", Composites: Part B, Vol. 49, pp. 6-15, 2013.
- [8] Rule, J.D. Sottos, N.R. and White, S. R., "Effect of Microcapsule Size on the Performance of Self-healing Polymers", Polymer, Vol. 48, pp. 3520-3529, 2007.
- [9] Zhu, D. Y. Rong, M. Z. and Zhang, M. Q., "Preparation and Characterization of Multilayered Microcapsule-Like Microreactor for Self-Healing Polymers", Polymer, Vol. 54, pp. 4227-4236, 2013.
- [10] Caruso, M. Blaiszik, B. J. Jin, H. Schelkopf, S.R. Stradley, D.S. Sottos, N.R. White, S.R. and Moore J.S., "Robust, Double-Walled Microcapsules for Self-Healing Polymeric Materials", American Chemical Society, Vol. 2, pp. 1195-1199, 2010.
- [11] Brown, N. Sottos, N. R. and White, S. R., "Fracture Testing of a Self-Healing Polymer Composite", Experimental Mechanics, Vol. 42, pp. 372-379, 2002.
- [12] Jin, H. Miller, G. M. Sottos, N. R. and White, S. R., "Fracture and Fatigue Response of a Self-Healing Epoxy Adhesive", Polymer, Vol. 52, pp. 1628-1634, 2010.
- [13] Jin, H. Miler, G. M. Pety, J. S. Griffin, A. S. Stradley, D. S. D. Roach, D. Sottos, N. R. and White, S. R., "Fracture Behavior of a Self-Healing, Toughened Epoxy Adhesive", International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 44, pp. 157-165, 2013.
- [14] Curtis, P. and Ttavis, S., "Hollow Carbon Fiber for Performance Polymer Composite", Plastics, Rubber and Composites, Vol. 28, pp. 201-209, No 5, 1999.
- [15] Dry, C. and Sottos, N. R., "Passive Smart Self-Repair in Polymer Matrix Composite Materials", Smart Structures and Materials, Vol. 16, pp. 438-444, 1993.
- [16] Erin, B. and Wuld, F., "Procedures Smart Self-Repair of Polymer Matrix Composite Materials", Composite Structures, Vol. 35, pp. 263-269, 1996.
- [17] Bledy, S. and Loader, C. B., "A Smart-Repair System for Polymer Composite", Composites: Part A, Vol. 32, pp. 1767-1776, 2001.
- [18] Trask, R.S. and Bond, I., "Biomimetic Self-healing of Advanced Composite Structure using Hollow Glass Fiber", Smart Materials Structures, Vol. 15, pp. 704-710, 2006.
- [19] Williams, G. Bond, I. and Trask, R., "Compression after Impact Assessment of Self-healing CFRP", Composites: Part A, Vol. 40, pp. 1399-1406, 2009.
- [20] Therriault, D. Scott, R. N. and Lewis, J. A., "Chaotic Mixing in Three-Dimensional Microvascular Networks Fabricated by Direct-Write Assembly", Nature Materials, Vol. 2, pp. 265-271, 2003.
- [21] Lim, D. Mazumder, J. and Takayama, S., "Fabrication of Microfluidic Mixers and Artificial Vasculatures using a High-Brightness Diode-Pumped Nd: YAG Laser Direct Write Method", The Royal Society of Chemistry, Vol. 3, pp. 318-323, 2003.
- [22] Christopher, J. N. Gregory, J. M. Michael, J. O. Bond, I. and Trask, R. S., "Self-Healing Fiber Reinforced Composites via a Bioinspired Vasculature", Advanced Functionized Materials, Vol. 21, pp. 3624-3633, 2011.
- [23] Noskov, M. D. and Malinovski, A. S., "Experimental Study and Simulation of Space Charge Stimulated Discharge", Applied Physics, Vol. 92, pp. 4926-4934, 2002.
- [24] Huang, J.H. Kim, J. Agrawal, N. and Sudarsan, A.P., "Rapid Fabrication of Bio-inspired 3D Microfluidic Vascular Networks", Advanced Materials, Vol. 21, pp. 3567-3571, 2009.
- [25] Patel, A.J. Sottos, N.R. Wetzel, E.D. and White, S. R., "Autonomic Healing of Low-Velocity Impact Damage in Fiber-Reinforced Composites", Composites: Part A, Vol. 41, pp. 360-368, 2010.