



## بررسی تجربی رفتار کششی کامپوزیت پلیمری خودترمیم شونده تحت اثر سیکل‌های گرمایشی

سید محمد رضا خلیلی<sup>1,2\*</sup>، محسن زارعی<sup>3</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>4</sup>، محمد رضا زمانی<sup>5</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد معین، مهندسی مکانیک، موسسه تکنولوژی دهلی، دهلی نو

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

5- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 دی 1396

پذیرش: 12 اسفند 1396

ارائه در سایت: شهریور 1397

### کلیدواژگان:

کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه

پدیده خودترمیمی

سیکل‌های گرمایشی

رفتار کششی

مهندسان از خودترمیمی که در سیستم‌های بیولوژیکی انجام می‌شود، الهام گرفته‌اند و از این موضوع برای ترمیم مواد مختلف از جمله کامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند. در این پژوهش نیز با بهره‌گیری از روش‌های خودترمیمی، به ترمیم میکروترک‌ها و آسیب‌های ایجاد شده در یک کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه پرداخته شده است. بدین منظور از یک سری میکرولوله‌های توخالی شیشه‌ای برای ایجاد مکانیزم ترمیم شونده استفاده شد. این میکرولوله‌ها با نوعی ماده ترمیمی که یک رزین دوجزئی می‌باشد، پر شدند. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر سیکل‌های گرمایشی بر زمان ترمیم در این کامپوزیت‌هاست. بدین منظور سیکل‌های حرارتی متوالی (1، 3 و 5 سیکل) در محدوده دمایی 25 تا 70 درجه سانتی‌گراد پس از ایجاد آسیب در نمونه، اعمال شدند. نتایج آزمون کشش بیانگر آن بود که بازده ترمیم 86 درصدی که با گذشت 7 روز بدست آمده، تقریباً با اعمال 5 سیکل گرمایشی در محدوده دمایی یاد شده با گذشت تنها 1 روز حاصل می‌شود.

## Experiment study of tensile behavior of self-healing polymer composite under heating cycles

Seyed Mohammad Reza Khalili<sup>1,2</sup>, Mohsen Zarei<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>3\*</sup>, Mohammad Reza Zamani<sup>4</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, 110016, India

3- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

4- Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 13 January 2018  
Accepted 3 March 2018  
Available Online September 2018

### Keywords:

Epoxy-glass fiber composite  
Self-healing phenomenon  
Heating cycle  
Tensile behavior

### Abstract

Engineers inspired of self-healing operation in biological system and take advantage of this innovation for repairing different materials such as composites. In the present study, reparation of micro-cracks and damages in an epoxy-glass fibers composite using self-healing methods in investigated. So one series of hollow glass micro-tubes were used to fabricate a self-healing mechanism. These micro-tubes were filled by one self-healing agent which is one two-part resin. The purpose of the present study is to investigate the effect of heating cycles over the time is restored in this composites. So consecutive temperature cycles (1, 3 and 5 cycles) were implemented in the temperature range of 25-70 °C after the damage made in the sample. The results of tension tests showed that a 86% healing efficiency which gained after 7 days can be gained only in 1 day with almost 5 cycles of heat in the mentioned temperature range.

### 1- مقدمه

ساختار خود هستند. از طرفی طولانی نمودن هر چه بیشتر عمر مفید فقط با تکیه بر تکنیک‌های نظارت و نگهداری دقیق ممکن می‌شود. این در شرایطی است که حتی اگر بررسی‌ها و تشخیص

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری زمانی که تحت بارگذاری‌های ترمومکانیکی مداوم قرار می‌گیرند مستعد به ایجاد میکروترک در

Please cite this article using:

S. M. R. Khalili, M. Zarei, R. Eslami-Farsani, M. R. Zamani, Experiment study of tensile behavior of self-healing polymer composite under heating cycles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 18-25, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

چندباره بکار گرفتند که موفقیت محدودی حاصل شد. موتوکو و همکارانش [10] نیز استفاده از ریزپیپت‌های<sup>7</sup> شیشه‌ای حاوی ماده ترمیمی را در کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند که آن‌ها هم ناموفق بودند.

بلی و همکارانش [11] در سال 2001 برای اولین بار از الیاف توخالی شیشه‌ای حاوی ماده ترمیمی استفاده کردند. آن‌ها این الیاف را با رزین و هاردنر پر کرده و درون زمینه کامپوزیت تقویت شده با پارچه بافته شده از الیاف شیشه قرار دادند. در این سیستم به علت ویسکوزیته بالای رزین، ترک توسط رزین پر نشد و عمل ترمیم به خوبی صورت نگرفت.

در پژوهشی دیگر، پنگ و همکارانش [13،12] با اضافه کردن عامل رنگی فلورسنت فرابنفش به رزین ترمیمی و ذخیره آن در الیاف توخالی، رهايش عامل ترمیمی از الیاف شیشه و پرکردن ترک توسط آن را مشاهده کردند. ترسکا و همکارانش [14] نیز با پر کردن الیاف توخالی شیشه از عامل ترمیمی و به کار بردن آن‌ها درون زمینه کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه بازده ترمیم<sup>8</sup> را 87 درصد اندازه‌گیری کردند.

تان و همکارانش [15] در مطالعه‌ای دیگر از لوله‌های شیشه - ای مؤین حاوی رزین دو جزئی برای خودترمیمی کامپوزیت‌های مورد استفاده در هواپیما استفاده کردند. زین‌الدین و همکارانش [16] نیز با قرار دادن لوله‌های مؤین شیشه‌ای حاوی رزین دو جزئی در کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه، بازده ترمیم را تحت آزمون ضربه سرعت پایین 53 درصد گزارش کردند.

در ادامه پژوهش‌های قبلی، اسلامی و همکارانش [۱۸،۱۷] از میکرولوله‌های شیشه‌ای حاوی رزین و هاردنر انیدریدی برای مشاهده پدیده ترمیم‌شوندگی در کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده کردند که نتایج بیانگر بازده‌های بالای 80 درصد بود. در پژوهشی دیگر، افتخاری و همکارانش [19] رفتار کامپوزیت زمینه پلیمری را در کسر حجمی‌های متفاوت از الیاف توخالی حاوی ماده ترمیمی مورد بررسی قرار دادند.

شبکه‌های میکروآوندی یکی دیگر از روش‌های خودترمیمی غیرذاتی هستند که تحقیقات جدیدتر را به خود اختصاص داده‌اند. اولین سیستم آوندی در سال 2007 توسط توهی و همکارانش [20] طراحی شد. نتایج بیانگر این بود که این شبکه - ها می‌توانند در یک موقعیت تا هفت بار ترمیم انجام دهند. همچنین حداکثر بازده ترمیمی نزدیک به 70 درصد گزارش شد.

به درستی انجام شود، همواره عملی بودن ترمیم ممکن نیست. از این رو مهندسان از خودترمیمی که در سیستم‌های بیولوژیکی همانند شبکه آوندی گیاهان یا مویرگی جانوران انجام می‌شود، الهام گرفته‌اند و از این موضوع برای ترمیم مواد مختلف از جمله کامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند [2،1].

خودترمیمی در کامپوزیت‌ها به وسیله روش‌های مختلفی انجام می‌شود، اما می‌توان آن را در حالت کلی به دو دسته خودترمیمی ذاتی و غیرذاتی تقسیم کرد. به طور کلی سیستم‌های خودترمیم ذاتی، پلیمرهایی هستند که به فرم مونومری، اولیگومری و یا وضعیت خود قبل از ایجاد اتصالات تبدیل شده و قابلیت بازگشت مجدد به ساختار پلیمری اولیه خود را دارند [3]. اما در ترمیم غیرذاتی عامل ترمیم‌کننده به گونه‌ای در یک مخزن ذخیره می‌شود و درون زمینه کامپوزیتی قرار می‌گیرد، به نحوی که در حضور ترک بتواند وارد عمل شده و عیوب مورد نظر را ترمیم نماید. استفاده از میکروکپسول‌ها، الیاف توخالی و شبکه‌های آوندی از رایج‌ترین روش‌های ترمیم غیرذاتی می‌باشند [4].

ترمیم با استفاده از میکروکپسول‌ها اولین بار توسط وایت و همکارانش [5] در سال 2001 صورت گرفت. آن‌ها با کپسوله کردن عامل ترمیمی دی‌سیکلوپنتادین (DCPD)<sup>1</sup> در پوسته‌ی اوره - فرمالدئیدی<sup>2</sup> و پراکندن ذرات کاتالیست گرابس<sup>3</sup> در زمینه کامپوزیت، موفق شدند اولین سیستم ترمیمی میکروکپسولی را معرفی کنند.

در پژوهشی دیگر، کسلر<sup>4</sup> و همکارانش [6] با استفاده از میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیمی DCPD و پراکندن ذرات کاتالیست گرابس در زمینه پلیمری، توانستند 80 درصد چقرمگی شکست از دست رفته را بازیابی نمایند. کامفوس<sup>5</sup> و همکارانش [7] نیز با استفاده از همین روش، ولی با کاتالیست دیگری به نام کلرید تنگستن<sup>6</sup> پایداری حرارتی کامپوزیت را بهبود بخشیدند. رول و همکارانش [8] در پژوهشی دیگر تأثیر قطر میکروکپسول را در زمینه اپوکسی مورد مطالعه قرار دادند.

یکی دیگر از روش‌های خودترمیمی غیرذاتی استفاده از الیاف توخالی است که مکانیزمی مشابه با روش میکروکپسول‌ها دارد. اولین بار درای و همکارانش [9] در سال 1994، خودترمیمی به روش ذخیره‌ی عامل ترمیمی در الیاف توخالی را جهت ترمیم

<sup>1</sup> Dicyclopentadiene

<sup>2</sup> Urea- formaldehyde

<sup>3</sup> Grubbs

<sup>4</sup> Kessler

<sup>5</sup> Kamphaus

<sup>6</sup> Tangsten chloride

<sup>7</sup> Micro- pipets

<sup>8</sup> Healing efficiency

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی KER 828 و هاردنر آمینی تتا<sup>2</sup> با نسبت رزین به هاردنر 10 درصد به عنوان فاز زمینه و از پارچه بافته شده از الیاف شیشه نوع E با وزن واحد سطح 300 گرم بر متر مربع به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر متوسط خارجی 300 میکرون و کسر تهینگی<sup>3</sup> (نسبت مساحت داخلی به مساحت کل) حدود 52 درصد برای ذخیره سازی عوامل ترمیمی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از رزین اپوکسی دو جزئی KER 828 رقیق شده (نسبت رزین به رقیق کننده 10 درصد) به عنوان عامل ترمیمی در میکرولوله‌ها استفاده شد. رقیق کردن رزین به این منظور است که رزین سیالیت لازم برای خروج از میکرولوله‌ها و همچنین پر کردن میکروتوک‌ها را به دست آورد.

### 2-2- روش‌های ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، ابتدا رزین و هاردنری که برای پر کردن میکرولوله‌ها از آن‌ها استفاده شد، به صورت جداگانه درون لوله‌های آزمایش ریخته شدند و به ترتیب با رنگ‌های پودری قرمز و سفید مخلوط شده تا رهاش از میکرولوله‌ها و پر کردن ترک توسط آن‌ها مشاهده شود. برای پر کردن میکرولوله‌ها با عامل ترمیم کننده نیز از خلاء استفاده شد. بعد از پر شدن میکرولوله‌ها از رزین و هاردنر به صورت جداگانه، این میکرولوله‌ها به صورت دوتایی در کنار هم قرار داده شدند. از کنار هم قرار گرفتن دو لوله یکی حاوی رزین و دیگری حاوی هاردنر، یک واحد خودترمیمی ایجاد می‌شود. در شکل 1 میکرولوله‌های شیشه‌ای قبل و بعد از پر شدن با عوامل ترمیمی نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش از دو نوع نمونه کامپوزیتی برای بررسی اثر خودترمیمی استفاده شد. نوع اول، کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه فاقد میکرولوله‌های توخالی بود که با استفاده از روش لایه چینی دستی در 6 لایه حاوی 60 درصد حجمی الیاف شیشه ساخته شد (نمونه شاهد). به منظور محاسبه میزان رزین و هاردنر مورد استفاده، ابتدا جرم 6 لایه پارچه بافته شده از الیاف شیشه اندازه‌گیری شد. با در دست داشتن چگالی الیاف شیشه، حجم الیاف بدست آمد که 60 درصد حجم کل در نظر گرفته - شد.

در پژوهشی دیگر، باب‌الحوایجی و همکارانش [21] به بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های خودترمیم اپوکسی-الیاف شیشه مبتنی بر شبکه‌های میکروآوندی پرداختند که نتایج حاصل، بازبایی 46 درصدی استحکام خمشی را پس از گذشت مدت زمان 8 روز نشان داد. به طور کلی کامپوزیت‌ها در مقابل عوامل مختلفی مانند دما، رطوبت و محیط خورنده رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند که یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار اثرات حرارتی می‌باشد. مطالعه اثرات بارگذاری حرارتی در کامپوزیت‌ها، از موضوعات مورد توجه محققین در طی دهه‌های اخیر بوده است.

در پژوهشی دروموند و همکارانش [22] استحکام خمشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف تک جهته را تحت سیکل‌های حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای بیانگر کاهش 11 درصدی استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی بود. سوسانو سگستر<sup>1</sup> و همکارش نیز تأثیر سیکل‌های حرارتی را بر خواص خمشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن مورد مطالعه قرار دادند [23]. در سال 2008، جوکسی مرک [24] به تأثیر سیکل‌های حرارتی بر کامپوزیت تقویت شده با دو اندازه مختلف از الیاف شیشه-سیلیکا پرداخت. نتایج نشان داد که اثر سیکل‌های حرارتی به نوع الیاف و همچنین اندازه الیاف تقویت کننده بستگی دارد. مرک در پژوهشی دیگر [25]، تأثیر سیکل‌های حرارتی را بر خواص خمشی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف یک سوپه سیلیکا مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که اختلاف قابل توجهی میان استحکام شکست نمونه‌ها قبل و بعد از سیکل‌های حرارتی وجود دارد.

با توجه به تحقیقات انجام شده، مشخص است که تاکنون بررسی همزمان دو موضوع خودترمیمی و بارگذاری حرارتی سیکلی در کامپوزیت‌های پلیمری صورت نگرفته است. همچنین نتایج پژوهش‌های گذشته بیانگر آن است که برای یک ترمیم مطلوب نیاز به گذشت مدت زمان طولانی می‌باشد. بر این اساس، هدف این پژوهش، طراحی و ساخت کامپوزیت پلیمری خودترمیم با استفاده از میکرولوله‌های توخالی شیشه‌ای حاوی عامل ترمیمی و بررسی زمان ترمیم در این کامپوزیت‌ها تحت سیکل‌های گرمایشی است.

<sup>2</sup> TETA

<sup>3</sup> Hollowness

<sup>1</sup> Segerstrom

بدون ایجاد آسیب مناسب عملاً بی معنی می‌باشد. ایجاد آسیب اولیه در نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش ضربه شاریپی و توسط دستگاه تست ضربه پاندولی SIT-200B ساخت شرکت سنتام<sup>1</sup> صورت گرفت. در این دستگاه، پاندول با انرژی مشخص رها شده تا به نمونه برخورد کرده و منجر به ایجاد آسیب در آن شود. این دستگاه دارای نمایشگر ال‌سی‌دی<sup>2</sup> بوده و کاربر می‌تواند به سادگی تست را انجام داده و انرژی ضربه را قرائت نماید. با استفاده از دستگاه مذکور، تحت زاویه 15 درجه و با انرژی معادل 4 ژول آسیبی به هر کدام از دو سمت نمونه‌ها اعمال شد تا مکانیزم ترمیم در آن‌ها راه‌اندازی شود. در واقع اعمال ضربه به نمونه‌ها باعث شکسته شدن میکرولوله‌های شیشه‌ای و رها شدن عامل ترمیمی از آن‌ها می‌شود.

#### 2-4- بارگذاری حرارتی سیکلی

برای بارگذاری حرارتی سیکلی از دستگاه چمبر مینی مدل ATM 7004-37 ساخت شرکت آریا سرمایه‌ش استفاده شد. این دستگاه قادر است که تعداد سیکل‌های متناوب را در یک فرآیند کاملاً کنترل شده و اتوماتیک در محدوده حرارتی 70- تا 180+ درجه سانتی‌گراد به نمونه اعمال نماید. با استفاده از دستگاه مذکور، سیکل‌های گرمایشی در محدوده دمایی 25 تا 70 درجه سانتی‌گراد به نمونه‌ها اعمال شدند. مدت زمان اعمال هر سیکل گرمایشی نیز 25 دقیقه بود. در پژوهش حاضر بارگذاری حرارتی سیکلی، برای سیکل‌های متوالی 1، 3 و 5 سیکل اعمال شد.

#### 2-5- آزمون کشش

از آزمون کشش مطابق استاندارد ATM D3039 به منظور بررسی خواص کششی نمونه شاهد و همچنین نمونه‌های خودترمیم استفاده شد. دستگاه مورد استفاده برای آزمون کشش ساخت شرکت هونسفیلد<sup>3</sup> مدل H25KS بود که دارای قابلیت اعمال 25 KN بار می‌باشد. در شکل 2 مراحل انجام آزمون کشش نشان داده شده است. در مجموع چهار دسته نمونه با نرخ بارگذاری 2 mm/min تحت آزمون کشش قرار گرفتند و نمودار نیرو- جابه‌جایی برای هر یک حاصل شد.

در این پژوهش به منظور محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم از رابطه (2) استفاده شد. در این رابطه،  $\sigma_f$  استحکام



Fig. 1 Glass micro-tubes, a) before and b) after being filled by self-healing agent

شکل 1 میکرولوله‌های شیشه‌ای، الف) قبل و ب) بعد از پر شدن از مواد ترمیمی

با توجه به کسر وزنی رزین و هاردنر (10 به 1) و به کمک رابطه (1) (قانون مخلوطها)، چگالی زمینه با داشتن چگالی رزین و هاردنر محاسبه شد.

$$\rho_m = \rho_r W_r + \rho_h W_h \quad (1)$$

که در این رابطه،  $W$ ، کسر وزنی و اندیس‌های  $r$  و  $h$  به ترتیب مبین رزین و هاردنر هستند. با محاسبه چگالی زمینه از قانون مخلوطها و در دست داشتن حجم زمینه (40 درصد حجم کل)، جرم زمینه بدست آمد و در ادامه با توجه به کسر وزنی رزین و هاردنر مورد استفاده، جرم آنها محاسبه شد.

دومین نوع نمونه کامپوزیتی، کامپوزیت 6 لایه اپوکسی-الیاف شیشه حاوی میکرولوله‌های توخالی بود. در این نمونه‌ها، کسر حجمی الیاف شیشه برابر 60 درصد و کسر حجمی میکرولوله‌ها به الیاف شیشه برابر 4 درصد در نظر گرفته شد. برای ایجاد کمترین گسستگی و در نتیجه کمترین کاهش در استحکام نمونه کامپوزیتی، میکرولوله‌های شیشه‌ای به جای یک لایه مجزا مستقیماً روی الیاف شیشه بافته شده قرار می‌گیرند. این لوله‌ها به صورت جفت شده (رزین در کنار هاردنر)، به منظور قرار نگرفتن روی تار خنثی و همچنین حفظ تقارن، بر روی لایه‌های دوم و چهارم قرار داده شدند.

#### 2-3- ایجاد آسیب و راه‌اندازی مکانیزم ترمیم

ایجاد آسیب و راه‌اندازی مکانیزم ترمیم یکی از مهمترین نکات در بررسی خودترمیمی کامپوزیت‌ها است، زیرا مبحث ترمیم

<sup>1</sup> Santam

<sup>2</sup> LCD

<sup>3</sup> Hounsfield

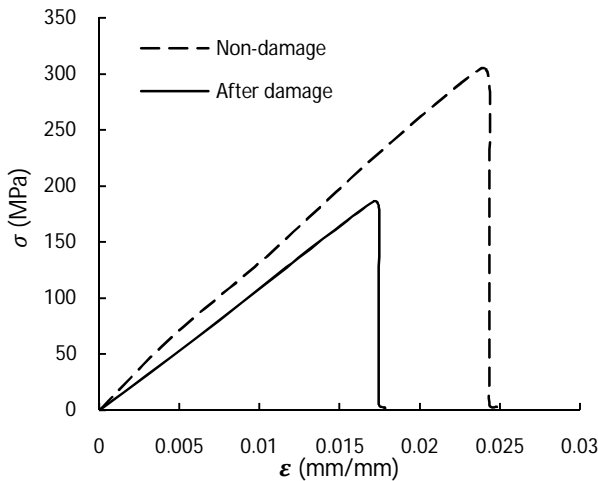


Fig. 3 Results of tensile test for control sample in two states non-damage and after damage

شکل 3 نتایج آزمون کشش نمونه شاهد در دو حالت بدون آسیب و پس از آسیب

### 3-2- مقایسه نمونه‌های خودترمیم با نمونه‌های شاهد

سه نمونه خودترمیم بدون ایجاد آسیب تحت آزمون کشش قرار گرفتند تا حداکثر استحکام کششی آن‌ها به دست آید. مقایسه استحکام کششی این نمونه‌های خودترمیم (که به صورت میانگین 268 MPa می‌باشد)، با نمونه شاهد بدون آسیب در شکل 4 آورده شده است. این مقایسه از کاهش 11 درصدی استحکام کششی نمونه خودترمیم نسبت به نمونه شاهد حکایت دارد.

در یک آزمایش دیگر، بلافاصله بعد از ایجاد آسیب در نمونه‌های خودترمیم (بدون این‌که اجازه ترمیم به آن‌ها داده شود)، آزمون کشش انجام شد.

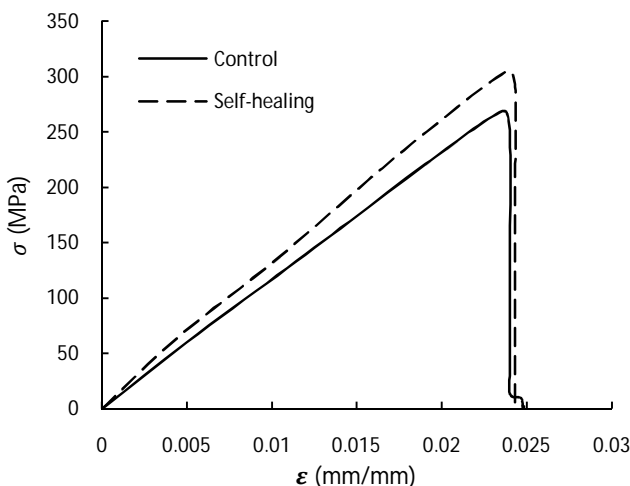


Fig. 4 Compare the self-healing and control samples the non-damage

شکل 4 مقایسه نمونه‌های خودترمیم و شاهد بدون ایجاد آسیب

کششی و اندیس‌های  $H$  و  $D$  به ترتیب مبین نمونه‌های ترمیم شده و بلافاصله پس از آسیب هستند. اندیس  $V$  نیز مقدار اولیه نمونه را قبل از آسیب نشان می‌دهد.

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

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- نمونه شاهد

در ارتباط با نمونه‌های شاهد، دو نوع نمونه یکی بدون آسیب و دیگری با ایجاد آسیب (هر کدام سه مرتبه جهت صحت‌گذاری نتایج) تحت آزمون کشش قرار گرفتند و نمودار نیرو-جابجایی هر یک بدست آمد. برای مقایسه صحیح بین نمونه‌ها نمی‌توان از مقادیر نیرو و جابجایی استفاده نمود، زیرا بدلیل تفاوت ضخامت در نمونه‌ها مقدار ماکزیمم نیروی تحمل شده در نمونه‌ها متفاوت می‌باشد. از اینرو استفاده از نمودار تنش- کرنش به منظور مستقل نمودن پارامتر مقایسه (استحکام کششی) از ابعاد نمونه، یک روش مناسب برای مقایسه می‌باشد. شکل 3 نمودار تنش- کرنش میانگین را برای نمونه‌های شاهد در دو حالت قبل و بعد از آسیب نمایش می‌دهد.

مطابق با نمودار شکل 3، ایجاد آسیب باعث کاهش استحکام کششی در نمونه‌ها می‌شود. استحکام کششی میانگین برای نمونه شاهد بدون آسیب، 304 MPa و برای نمونه آسیب زده شده، 186 MPa بدست آمد. این کاهش استحکام (که حدود 38 درصد است)، بعد از ایجاد آسیب، به علت تشکیل میکروترک‌ها و خرابی‌های غیرقابل رؤیت در نمونه اتفاق می‌افتد.

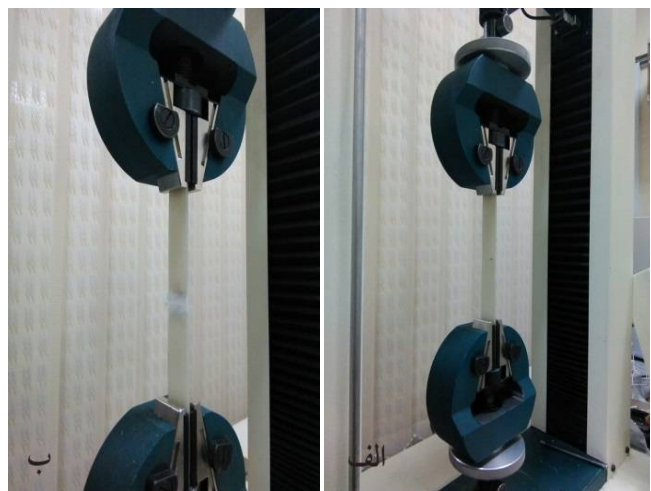


Fig. 2 Tensile test procedure, a) at the moment and b) at the end of test until sample's fracture

شکل 2 مراحل آزمون کشش، الف) در حین و ب) انتهای آزمون تا شکست نمونه

یک روز به ترتیب 188، 233 و 250 مگاپاسگال بدست آمد.

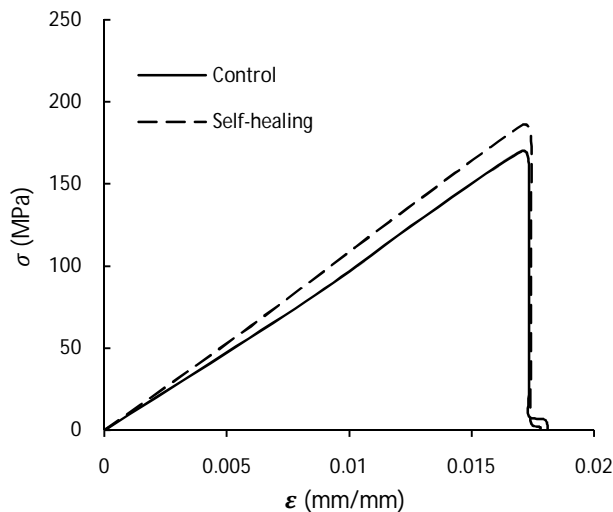


Fig. 5 Compare the self-healing and control samples after damage

شکل 5 مقایسه نمونه‌های خودترمیم و شاهد بعد از آسیب

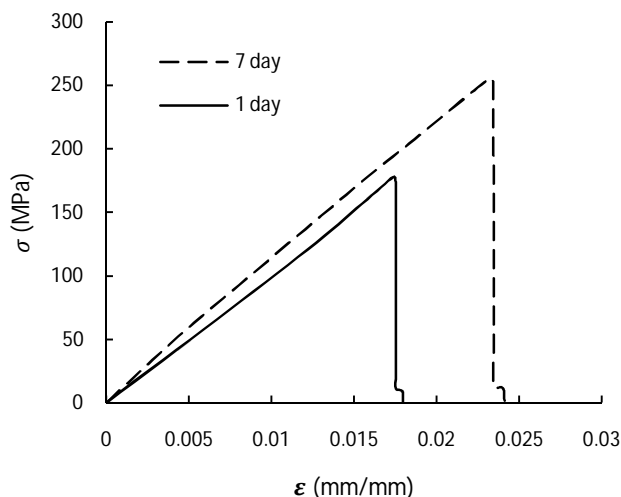


Fig. 6 Results of tensile test for self-healing sample after two different points in time

شکل 6 نتایج آزمون کشش نمونه خودترمیم پس از گذشت دو بازه زمانی مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌های گرمایشی تا 5 سیکل، استحکام کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش استحکام به این دلیل است که سیکل‌های گرمایشی باعث کاهش ویسکوزیته عامل ترمیم کننده می‌شوند که نتیجه آن رهاش سریع‌تر عامل ترمیمی از میکرولوله‌ها و نفوذ راحت‌تر به محل آسیب است. این سیکل‌های گرمایشی می‌توانند سرعت پلیمریزاسیون عامل ترمیمی را نیز افزایش دهند و باعث کاهش زمان ترمیم شوند [۶،۱۱].

استحکام کششی میانگین برای نمونه خودترمیم آسیب دیده 169 MPa بدست آمد. مقایسه نمودار تنش- کرنش میانگین این نمونه‌ها با نمونه شاهد آسیب دیده در شکل 5 نشان داده شده است. در این حالت نیز حضور میکرولوله‌ها باعث کاهش 9 درصدی استحکام کششی می‌شود. این امر می‌تواند به علت ناپیوستگی در آرایش و چیدمان لایه پایه و همچنین ایجاد نقاط تمرکز تنش به واسطه حضور میکرولوله‌های شیشه‌ای باشد. همچنین بررسی استحکام کششی نمونه خودترمیم قبل و بعد از ایجاد آسیب در آن (که به ترتیب 255 و 177 مگاپاسگال است)، بیانگر کاهش 37 درصدی استحکام بعد از آسیب می‌باشد. این کاهش استحکام پس از ایجاد آسیب، به علت تشکیل میکروترک‌ها و خرابی‌های غیرقابل رؤیت در نمونه اتفاق می‌افتد.

### 3-3- نمونه‌های خودترمیم پس از فرآیند ترمیم

نمودار تنش- کرنش میانگین برای نمونه‌های خودترمیم در دو زمان مختلف پس از ایجاد آسیب در شکل 6 نشان داده شده است. پس از ایجاد آسیب توسط دستگاه ضربه پاندولی در نمونه‌های خودترمیم، این نمونه‌ها در دمای اتاق وارد دوره ترمیم 1 و 7 روزه شدند. استحکام کششی میانگین برای این نمونه‌ها در بازه‌های زمانی 1 و 7 روز پس از آسیب به ترتیب 177 و 255 مگاپاسگال بدست آمد. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که استحکام کششی با گذشت زمان افزایش یافته است. این افزایش استحکام به این دلیل است که عوامل ترمیمی بعد از رهاسازی از میکرولوله‌ها برای رسیدن به محل آسیب و پرکردن سطح ترک و همچنین ایجاد پیوند با زمینه نیازمند زمان کافی می‌باشند. همچنین محاسبه بازده ترمیم توسط رابطه (2) نشان می‌دهد که بازده ترمیم بعد از گذشت 1 و 7 روز به ترتیب 8 و 86 درصد می‌باشد.

### 3-4- نمونه‌های خودترمیم تحت اثر سیکل‌های گرمایشی

در این قسمت از پژوهش، نمونه‌های خودترمیم پس از ایجاد آسیب تحت سیکل‌های گرمایشی (1، 3 و 5 سیکل) قرار گرفتند. پس از ایجاد آسیب و اعمال سیکل‌های گرمایشی، نمونه‌ها در دمای اتاق وارد دوره ترمیم 1 روزه شدند تا فرآیند ترمیم در آن‌ها صورت گیرد. در شکل 7 نتایج آزمون کشش برای این نمونه‌ها تحت سیکل‌های مختلف آمده است. استحکام کششی میانگین این نمونه‌ها تحت بارگذاری حرارتی سیکلی برای سیکل‌های متوالی 1، 3 و 5 سیکل پس از گذشت

#### 4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تجربی اثر سیکل‌های گرمایشی بر زمان ترمیم در کامپوزیت‌های خودترمیم اپوکسی-الیاف شیشه پرداخته شد. برای ایجاد مکانیزم ترمیم شونده از یک سری میکرولوله‌های توخالی شیشه‌ای، با قطر میانگین خارجی 300 میکرون و کسر تهیگی حدود 52 درصد استفاده شد. همچنین به منظور بررسی اثر سیکل‌های گرمایشی، 1، 3 و 5 سیکل متوالی در محدوده دمایی 25 تا 70 درجه سانتی‌گراد پس از ایجاد آسیب در نمونه‌ها، اعمال شدند. بررسی اثر سیکل‌های حرارتی روی این کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که می‌توان با اعمال سیکل‌های گرمایشی باعث تسریع در روند ترمیم شد. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که با اعمال 5 سیکل گرمایشی در محدوده دمای مذکور پس از گذشت تنها 1 روز می‌توان به بازده ترمیمی که بعد از یک دوره درمان 7 روزه (86 درصد) اتفاق می‌افتد دست یافت.

#### 5- مراجع

- [1] M. Samadzadeh, H. S. Boura, M. Peikari, A Review on Self-healing Coatings Based on Micro-nanocapsules, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 68, pp. 159-164, 2010.
- [2] C. Zeng, H. Seino, J. Ren, K. Hatanaka, N. Yoshie, Self-healing Biobaewd Furan Polymers Cross-linked Various Bis-maleimides, *Polymer*, Vol. 54, pp. 5351-5357, 2013.
- [3] X. Chen, M. A. Dam, K. Ono, A. Mal, H. Shen, S. R. Nuut, k. Sheren, F. Wudl, A Thermally Re-mendable Cross-linked Polymeric Material, *Science*, Vol. 295, pp. 1698-1702, 2002.
- [4] B. J. Blaiszik, S. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, S. R. White, Self-healing Polymers and Composites, *Annua Review of Materials Research*, Vol. 40, pp. 179-212, 2010.
- [5] S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown, S. Viswanathan, Autonomic Healing of Polymer Composite, *Nature*, Vol. 409, pp. 794-797, 2001.
- [6] M. R. Kessler, N. R. Sottos, S. R. White, Self-healing Structural Composite Material, *composites Part A*, Vol. 34, pp. 743-753, 2003.
- [7] J. M. Kamphaus, J. D. Rule, J. S. Moore, N. R. Sottos, A New Self-healing Epoxy with Tungsten (VI) Chloride Catalyst, *J. R. Soc. Interface*, Vol. 5, pp. 95-103, 2008.
- [8] J. D. Rule, N. R. Sottos, S. R. White, Effect of Microcapsule Size on the Performance of Self-

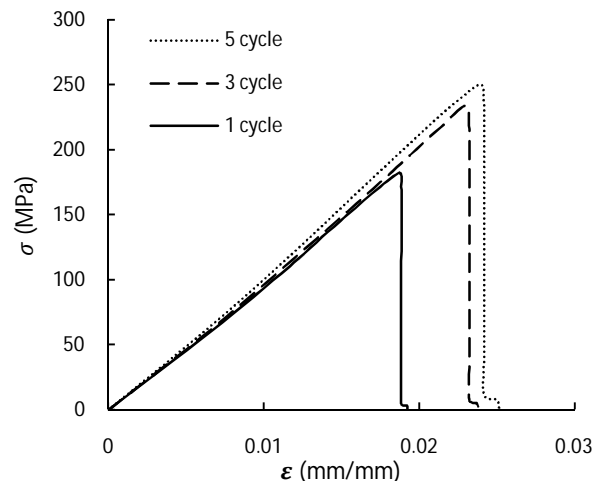


Fig. 7 Results of tensile test for self-healing sample under heating cycles  
شکل 7 نتایج آزمون کشش نمونه خودترمیم تحت اثر سیکل‌های گرمایشی

همچنین این سیکل‌ها می‌توانند باعث بوجود آمدن پیوند-های مولکولی جدید در زمینه شوند که به علت بهینه نبودن دمای عمل‌آوری در ابتدا تشکیل نشده بودند [26].

برای نمونه‌های خودترمیم تحت اثر سیکل‌های گرمایشی نیز بازده ترمیم با استفاده از رابطه (2) محاسبه شد. برای این نمونه‌ها بعد از اعمال 1، 3 و 5 سیکل گرمایشی بازده ترمیم به ترتیب 12، 64 و 81 درصد بدست آمد. در جدول 1 میزان استحکام کششی و بازده ترمیم نمونه‌های مورد آزمایش ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که اعمال سیکل‌های گرمایشی باعث تسریع در روند ترمیم می‌شود، به گونه‌ای که بازده ترمیم 86 درصدی که با گذشت 7 روز بدست آمده، با اعمال 5 سیکل گرمایشی در محدوده دمایی 25 تا 70 درجه سانتی‌گراد تقریباً با گذشت تنها 1 روز حاصل می‌شود.

جدول 1 استحکام کششی و بازده ترمیم نمونه‌های مورد آزمایش

نوع نمونه	استحکام کششی (MPa)	بازده ترمیم (درصد)
شاهد بدون آسیب	304±9	-
شاهد بعد از آسیب	186±13	-
خودترمیم بدون آسیب	268±8	-
خودترمیم بلافاصله بعد از آسیب	169±12	-
خودترمیم با ترمیم 1 روز	177±12	8
خودترمیم با ترمیم 7 روز	255±14	86
خودترمیم تحت 1 سیکل حرارتی	181±13	12
خودترمیم تحت 3 سیکل حرارتی	233±16	64
خودترمیم تحت 5 سیکل حرارتی	250±15	81

2016. (in Persian فارسی)
- [18] A. Sari, R. Eslami-Farsani, M. R. Zamani, An experimental investigation on the tensile behavior of epoxy/carbon fibers composites containing anhydride self-healing material, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 336-342, 2017. (in Persian فارسی)
- [19] H. Eftekhari, R. Eslami-Farsani, S. M. R. Khalili, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Optimizing the self-healing behavior of hollow glass fibers reinforced epoxy matrix composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 182-190, 2017. (in Persian فارسی)
- [20] K. S. Thoohey, N. R. Sottos, J. A. Lewis, J. S. Moore, S. R. White, Self-healing Materials with Microvascular Networks, *Nature*, Vol. 6, pp. 581-585, 2007.
- [21] M. R. Babolhavaeji, R. Eslami-Farsani, H. Khosravi, Micro-vascular channel based self-healing fibrous composites under transverse loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 63-68, 2017. (in Persian فارسی)
- [22] J. L. Drummond, M. S. Bapn, Static and Cyclic Loading of Fiber-reinforced Dental Resin, *Dental Materials*, Vol. 19, pp. 226-231, 2003.
- [23] S. Segerstrom, I. E. Ruyter, Effect of Thermal Cycling on Flexural Properties of Carbon-graphite Fiber-reinforced Polymers, *Dental Materials*, Vol. 25, pp. 845-851, 2008.
- [24] G. Mercic, I. E. Ruyter, Effect of Thermal Cycling on Composites Reinforced Tow Differently Sized Silica-glass Fibers, *Dental Material*, Vol. 23, pp. 1157-1163, 2006.
- [25] G. Mercic, J. W. Ruyter, Influence of Thermal Cycling on Flexural Properties of Composite Reinforced with Unidirectional Silica-glass Fibers, *Dental Material*, Vol. 24, pp. 1050-1057, 2007.
- [26] A. R. Ghasemi, M. Moradi, Low Thermal Cycling on Mechanical Properties of Laminated Composite Materials, *Mechanics of Materials*, Vol. 96, pp. 126-137, 2016.
- healing Polymers, *Polymer*, Vol. 48, pp. 3520-3529, 2007.
- [9] C. Dry, Procedures Developed for Self-healing of Polymeric Matrix Composite Material, *Composite Structure*, Vol. 35, pp. 263-269, 1996.
- [10] M. Motuku, U. K. Vaidya, G. M. Janowski, Parametric Studies on Self-repairing Approaches for Resin Infused Composites Subjected to low Velocity Impact, *Smart Mater Struct*, Vol. 8, pp. 623-638, 1999.
- [11] S. M. Bleay, C. B. Loader, V. J. Hawyes, L. Humberstone, P. T. Curtis, A Smart Repair System for Polymer Composites, *Composites Part A*, Vol. 32, pp. 1767-1776, 2001.
- [12] J. W. Pang, I. P. Bond, Bleeding Composites damage Detection and Self-healing Using a Biomimetic Approach, *Compos Part A*, Vol. 36, pp. 183-188, 2005.
- [13] J. W. Pang, I. P. Bond, A Hollow Fiber Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-healing and Enhanced Damage Visibility, *Composites Science & Technology*, Vol. 36, pp. 1791-1799, 2005.
- [14] R. S. Trask, G. J. Williams, I. p. Bond, Bioinspired Self-healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibers, *Journal of the Royal Society*, Vol. 4, pp. 363-371, 2007.
- [15] W. C. Tang, J. C. Kiew, K. Y. Siow, Z. R. Sim, H. S. Poh, M. D. Taufiq, Self-healing of Epoxy Composite for Aircrafts Structural Applications, *Solid State Phenomena*, Vol. 136, pp. 39-44, 2008.
- [16] S. Zainuddin, T. Arefin, A. Fahim, M. V. Hosur, J. D. Tyson, Recovery and Improvement in Low-velocity Impact Properties of E-glass/Epoxy Composites Through Novel Self-healing Techniquis, *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 277-286, 2014.
- [17] R. Eslami-Farsani, A. Sari, H. Khosravi, Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, pp. 285-290,