



## بررسی تجربی رفتار کششی کامپوزیت‌های چند لایه الیاف- فلز خود ترمیم شونده با الیاف شیشه توخالی کوتاه

رضا اسلامی فارسانی<sup>1\*</sup>، فاطمه محبتی<sup>2</sup>، حامد خسروی<sup>3</sup>

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

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\* تهران، صندوق پستی 19991 43344، eslami@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 95/07/21

پذیرش: 95/08/18

### کلیدواژگان:

کامپوزیت چندلایه‌ای الیاف- فلزنانو

پدیده خود ترمیمی

رفتار کششی

میکرولوله‌های شیشه‌ای کوتاه

### چکیده

کامپوزیت‌های چندلایه‌ای الیاف- فلز که از اتصال ورق‌های نازک فلزی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند، به دلیل دارا بودن وزن کمتر و خواص مکانیکی بهتر در مقایسه با سایر کامپوزیت‌ها و آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند. در صورت ایجاد عیوبی همچون ترک در این مواد، ساختار آن‌ها آسیب دیده و لذا باید آن را جایگزین نمود. جهت بهبود عیوب و ترک‌ها بدون جایگزین کردن کامپوزیت چندلایه‌ای از سیستم‌های خودترمیمی استفاده می‌شود. در این پژوهش یک سری میکرولوله‌های شیشه‌ای کوتاه پرشده با نوعی ماده ترمیم‌کننده شامل رزین اپوکسی و هاردنر مربوط به آن به‌عنوان سیستم خودترمیمی استفاده شده است. هنگامی که در حین بارگذاری عیب یا ترک در کامپوزیت ایجاد شود، این عیوب با میکرولوله‌های شیشه‌ای کوتاه برخورد کرده، در نتیجه میکرولوله‌ها شکسته و عامل ترمیمی در محل آسیب جریان پیدا می‌کند که با گذشت زمان موجب ترمیم آسیب و در نتیجه بهبود خواص کامپوزیت می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی کسر حجمی مناسب و زمان مطلوب جهت مشاهده پدیده ترمیم‌شوندگی است. بدین منظور میکرولوله‌های شیشه‌ای حاوی مواد ترمیم‌کننده با کسرهای حجمی 4، 8 و 12 پر و خردشده و در کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه پراکنده شدند. خواص کششی نمونه‌ها با گذشت زمان‌های مختلف پس از ایجاد آسیب مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین میزان بازیابی راندمان ترمیم به میزان 58.3 درصد برای نمونه حاوی 8 درصد حجمی ماده ترمیمی مشاهده شد.

## Experimental study of tensile behavior of self-healing fiber-metal laminates composites with chopped hollow glass fibers

Reza Eslami-Farsani<sup>1\*</sup>, Fatemeh Mohabbati<sup>1</sup>, Hamed Khosravi<sup>2</sup>

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

2- Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

\* P.O.B. 19991-43344, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Fiber metal laminate composite  
Self-healing phenomenon  
Tensile behavior  
Chopped microglass tubes

### Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are a family of hybrid composite structures formed from the combination of metal layers sandwiching a fiber-reinforced plastic layer. Because of low weight and better mechanical properties in comparison with aluminum alloys and other composites, they have found a wide range of use in aerospace industry. In the case of deep micro-cracks within the FMLs, they must be replaced. To avoid of replacing the FMLs, the self-healing phenomenon is an appropriate strategy to control the defects and micro-cracks. In this research a series of chopped micro glass tubes were employed to provide a self-healing system. These chopped micro glass tubes were filled with epoxy resin + hardener as a healing agent system. When the structure is exposed under loading condition, the created damages and micro-cracks rupture the chopped micro-glass tubes and the healing agent flows in the damage area and over a time span the defects will be healed and eliminated. The aim of this study is to find out the appropriate chopped micro-glass tubes volume fraction and the healing time to obtain an efficient healing. For this purpose, the chopped micro-tubes containing 4, 8, and 12 Vol.% were incorporated in epoxy-glass fibers composite and the tensile behavior observed for the specimens were assessed during different healing time. The highest healing efficiency of 58.3% was observed for the specimen with 8% healing agent.

### Please cite this article using:

Eslami-Farsani, R. Mohabbati, F. and Khosravi, H., "Experimental study of tensile behavior of self-healing fiber-metal laminates composites with chopped hollow glass fibers", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 399-404, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

کامپوزیت‌های چندلایه الیاف- فلز، موادی هستند که از به هم چسباندن ورق‌های فلزی (نظیر ورق‌های آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم) و لایه‌های کامپوزیتی ایجاد می‌شوند، در نتیجه مزیت‌های هر کدام از این دو ماده در ماده جدید نیز وجود دارد که با هم ترکیب می‌شوند. این نوع کامپوزیت‌ها به دلیل دارا بودن خواصی چون مقاومت به ضربه بالا، مقاومت به خستگی و سفتی زیاد و شرایط تعمیر آسان در صنایع مختلف بخصوص هوافضا به کار می‌روند [1].

قرارگیری در معرض بارگذاری‌های شدید به‌سادگی منجر به بروز آسیب به این مواد خواهد شد. ریزترک‌ها یکی از مهلک‌ترین آسیب‌هایی هستند که در شرایط کاری در سازه‌های کامپوزیتی ظاهر شده و به طرز چشمگیری موجب کاهش عمر این سازه‌ها می‌شوند [2]. در سازه‌های کامپوزیتی و به‌طور کلی مواد ساختاری، حضور ریزترک‌ها منجر به کاهش سفتی و از کارافتادگی ناگهانی آن‌ها در شرایط کاری می‌شود [3]. از آنجایی‌که ردیابی و تعمیر آسیب‌های ایجادشده در بخش‌های داخلی سازه‌های کامپوزیتی امری دشوار است، باید از موادی که قابلیت ترمیم خودکار عیوب داخلی را داشته باشند، استفاده کرد [2].

به‌طور کلی دو نوع روش ترمیم ذاتی و غیرذاتی وجود دارد [4]. مواد خودترمیم‌شونده ذاتی یا برگشت‌پذیر، پلیمرهایی هستند که در برابر محرک، به حالت غیرشبکه‌ای، آلیگومری و منومری خود تبدیل شده و قابلیت بازگشت مجدد به ساختار پلیمری اولیه خود را دارند [5]. در ترمیم غیرذاتی، عوامل ترمیمی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عوامل به سه روش کپسول، الیاف توخالی و میکروآوندی در زمینه قرار می‌گیرند و در اثر ایجاد عیب شکسته شده و در ترک جریان یافته تا عیوب را ترمیم کنند.

اولین بررسی‌ها در زمینه مواد خودترمیم‌شونده در سال 1970 میلادی انجام شد که طی آن به‌منظور خودترمیم نمودن مواد مورد استفاده در فضاپیماهای اکتشافی مانند آپولو و شاتل از خاصیت خودترمیمی یک الاستومر تقویت‌شده استفاده شد [6]؛ اما در دهه 1980 و با هدف ترمیم ریزترک‌های غیرقابل مشاهده در سازه‌های پلیمری و کامپوزیتی و افزایش عمر کاری و ایمنی این سازه‌ها، برای اولین بار مفهوم پلیمرهای خودترمیم‌شونده ارائه شد. مقالاتی که از سوی درای و سوتوز در سال 1993 و وایت و همکارانش در سال 2001 چاپ شد توجه محققان را به این مواد جلب کرد [7]. اولین سامانه خودترمیم‌شونده موفق در سال 2001 و توسط وایت و همکارانش در دانشگاه ایلینویا ساخته شد که طی آن منومر دی‌سیکلوپنتادین و نسل اول کاتالیزورهای گرابز به صورت میکروکپسول مورد استفاده قرار گرفتند [7، 8].

عمده‌ترین مطالعات برای ایجاد خودترمیم‌شوندگی، روی کپسوله کردن عامل ترمیمی و کاتالیست صورت گرفته است. کپسول در مواد کامپوزیتی و پلیمرها به شکل ذراتی کروی (هسته-پوسته) است که با عامل خودترمیمی پر شده و در ابعاد میکرو ساخته می‌شود. اولین بار در سال 2001 میکروکپسول‌های خودترمیم معرفی شد که در آن عامل ترمیمی کپسوله شده و به همراه کاتالیست در زمینه کامپوزیتی جاسازی می‌شدند. فاز مایع به دلیل دارا بودن سیالیت لازم برای پرکردن میکروترک، معمول‌ترین عامل ترمیمی است. برای ترمیم مؤثر منطقه خراش، باید عامل ترمیمی و کاتالیست در پوشش توزیع شده باشند. علت استفاده از کاتالیست، تسریع پلیمریزاسیون عامل ترمیمی است. عامل ترمیمی و کاتالیست به صورت مجزا و یا ترکیبی

می‌توانند به صورت کپسول درآیند. با ایجاد خراش و انتشار ترک، کپسول تخریب می‌شود و محتوای آن به بیرون نشت می‌کند و ترک را پر می‌کند. نهایتاً عامل ترمیمی در مجاورت کاتالیست پلیمره می‌شود و عیب را ترمیم می‌نماید [2].

روش دیگر خودترمیمی، استفاده از الیاف توخالی است. الیاف شیشه و کربن توخالی برای این روش مورد بررسی قرار گرفته است [10، 9]. الیاف شیشه توخالی مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری برای اولین بار در سال 1964 توسط روزن مطرح شدند. در واقع روش ذخیره رزین‌های ترمیمی در الیاف توخالی که برای احیای چسبندگی ماکروسکوپی در محل خراش مطرح شده و به‌گونه‌ای است که تحت بارگذاری شدید و ایجاد آسیب در کامپوزیت، الیاف شکسته شده و رزین ترمیمی از الیاف خارج می‌شود و ترمیم آسیب را ممکن می‌سازد [11]. هاگر و باند [12] نشان دادند که استفاده از الیاف شیشه توخالی (با قطر  $30-60 \mu\text{m}$  و درصد خالی بودن 36-54 درصد) در پیش‌آغشته‌های لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی با درصد حجمی 20-25 درصد موجب افزایش قابل توجه استحکام فشاری کامپوزیت می‌شود. همچنین با بررسی نمونه‌های مورد آزمایش نشان دادند که کامپوزیت‌های دارای الیاف توخالی با قطر بیشتر دارای مقاومت فشاری بیشتری بوده و در برابر کماتش و ریز کماتش پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهند.

الیاف کربن توخالی نیز که دارای مدول الاستیک بالاتری از الیاف کربن T300 بودند توسط کورتیس و همکارانش تولید شدند [13]. درای و سوتوز [14، 15] در سال 1993 برای اولین بار از این روش استفاده کرده و اولین کامپوزیت‌های پلیمری خودترمیم‌شونده حاوی الیاف توخالی را ارائه کردند. در این کامپوزیت‌ها الیاف ترمیمی با نوعی منومر مخصوص پر شده و نتایج آزمون‌های خمش و ضربه نشانگر بهبود مقاومت کامپوزیت خودترمیم‌شونده در برابر میکروترک‌ها و ترمیم عیوب ساختاری بوده است. موتوکو و همکارانش [16] در سال 1999 استفاده از ریزپیپت‌های شیشه‌ای را به‌عنوان تیوب‌های ذخیره مواد خودترمیم پلیمری (الیاف ترمیمی) در کامپوزیت‌های لایه‌ای وینیل‌استر/الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند و پس از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌های خودترمیم‌شونده، بازدهی ترمیم قابل قبولی را مشاهده کردند. بلی و همکارانش [17] برای اولین بار الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر خارجی 15 میکرون و قطر داخلی 5 میکرون را با رزین و هاردنر پر کرده و درون کامپوزیت لایه‌ای تقویت‌شده با پارچه شیشه قرار دادند و برای سنجش بازده ترمیم از آزمون فشار پس از ضربه استفاده کردند.

روش دیگر خودترمیمی استفاده از شبکه‌های آوندی است. پس از الیاف توخالی و میکروکپسول‌ها، تحقیقات جدیدتر با الهام از طبیعت به سمت مواد خود ترمیمی ریزآوندی پیش رفت. یکی از مهم‌ترین ایرادات الیاف توخالی و میکروکپسول‌ها، ناتوانی در ترمیم مجدد یک نقطه از سطح است که می‌تواند سبب ایجاد ترک ثانویه در امتداد ترک اولی شود. با ایجاد جریان‌های نیمه پیوسته از عامل ترمیمی، سیکل‌های ترمیمی چندگانه در یک نقطه امکان‌پذیر خواهد بود [18]. این شبکه‌ها شامل الیاف یا کانال‌های توخالی هستند که در سه بعد به هم متصل شده‌اند و عامل ترمیم را در خود ذخیره کرده‌اند. پس از ایجاد ترک در زمینه پلیمری، عامل ترمیم از شبکه‌های مجرادر آزاد شده و فرآیند ترمیم انجام می‌شود [5].

با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده، هدف از پژوهش حاضر، بررسی جنبه‌های خودترمیمی در کامپوزیت‌های چندلایه الیاف- فلز (ورق آلومینیوم

برای بررسی تأثیر خودترمیمی و همچنین تعیین بازدهی فرایند ترمیم، نمونه‌های شاهد (کنترلی) نیز ساخته شدند. ترکیب و روش ساخت این نمونه‌ها نیز مشابه ساخت نمونه‌های خودترمیم بود، با این تفاوت که نمونه‌های شاهد فاقد الیاف توخالی حاوی مواد خود ترمیم‌شونده هستند.

### 2-3- آزمون کشش تک‌محوری

به‌منظور بررسی خواص کششی نمونه‌های خودترمیمی و شاهد از آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D3039 با دستگاه کشش با ظرفیت 10 تن، ساخت شرکت کوپا استفاده شد. ایجاد آسیب اولیه در نمونه‌ها توسط دستگاه خمش از طریق خم کردن نمونه‌ها به میزان 5 میلی‌متر و با نرخ بارگذاری 5mm/min صورت گرفت. در شکل 2 چگونگی انجام آزمون کشش نشان داده شده است.

### 3- نتایج و بحث

در ارتباط با نمونه شاهد، دو نمونه یکی بدون تخریب و دیگری با ایجاد تخریب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند. در شکل 3 نمودار تنش- کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. مطابق نمودارها ایجاد عیب تأثیر زیادی روی جابجایی شکست نداشته و تنها باعث کاهش استحکام کششی لازم برای شکست شده است. استحکام کششی در نمونه شاهد قبل و بعد از تخریب به ترتیب 360 و 312 مگاپاسکال می‌باشد. افت استحکام کششی پس از تخریب به میزان 13 درصد است. کاهش استحکام کششی نمونه کنترلی پس از ایجاد آسیب به علت حضور میکروترک‌ها در نمونه است.

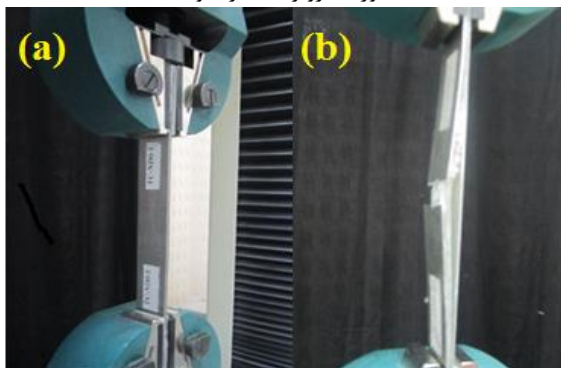


Fig. 2 Tensile test a) before and b) after the fracture of specimen

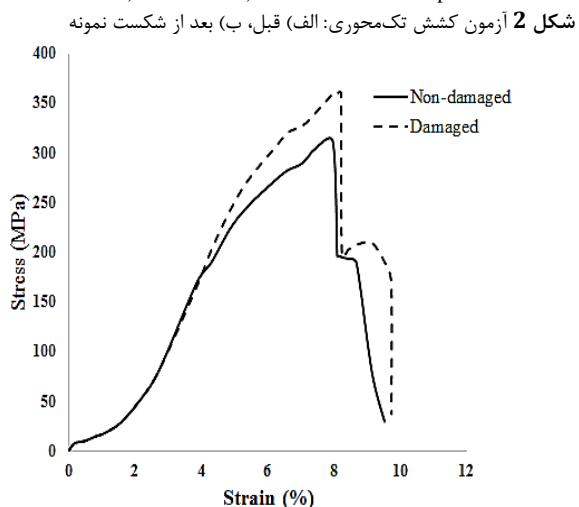


Fig. 3 The tensile response of base specimen before and after damaging

شکل 3 رفتار کششی نمونه شاهد قبل و بعد از ایجاد تخریب

2024 و کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه با استفاده از میکرولوله‌های شیشه‌ای کوتاه به عنوان نگهدارنده مواد خود ترمیم) و بررسی بازده ترمیم این کامپوزیت‌ها تحت آزمون کشش است. بدین منظور با استفاده از عامل ترمیمی، کسر حجمی مطلوب و زمان مناسب ترمیم مورد بررسی قرار گرفت.

### 2- مواد و روش تحقیق

#### 2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی اپون 828 و هاردنر مربوطه به عنوان فاز زمینه و از الیاف تک جهته شیشه نوع E (شرکت لاین تکس چین) با استحکام کششی حدود 2400 مگاپاسکال و وزن مخصوص 2.65 گرم بر سانتیمتر مکعب به عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. ورق آلومینیوم 2024 با ضخامت 0.4 میلی‌متر نیز برای لایه‌های فلزی کامپوزیت الیاف- فلز تهیه شد. همچنین از میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی 300 میکرون و کسر ته‌نیگی 55 درصد برای ذخیره‌سازی عوامل ترمیم استفاده شد. عوامل ترمیمی رزین اپوکسی و هاردنر مربوط به آن بودند که در زمینه مورد استفاده قرار گرفتند.

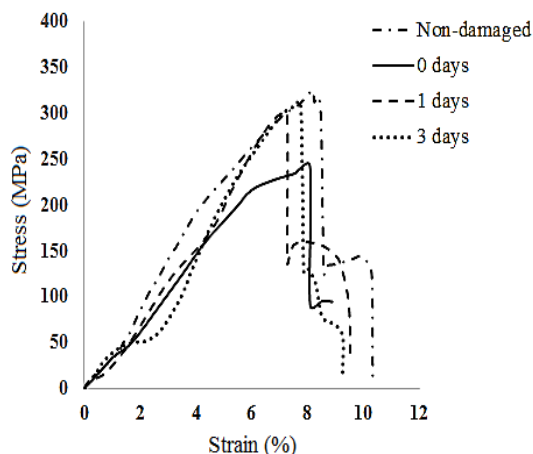
#### 2-2- روش ساخت نمونه‌ها

در ساخت میکرولوله‌ها از یک سری لوله موبین به قطر 1 سانتی‌متر استفاده شد که در اثر حرارت و تحت کشش قرارگرفتن، قطر آن‌ها کاهش یافت و در نهایت میکرولوله‌هایی با قطر میانگین 300 میکرون حاصل شدند. رزین اپوکسی اپون 828 و هاردنر به عنوان عامل ترمیمی درون لوله‌های موبین قرار گرفتند. به منظور پر کردن لوله‌ها از پمپ خلاء استفاده شد. در شکل 1 لوله‌های موبین پر شده با عوامل ترمیمی نشان داده شده است. ساخت کامپوزیت الیاف- فلز با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی انجام پذیرفت. ابتدا آماده‌سازی سطح ورق‌های آلومینیومی و برش الیاف شیشه تک‌جهته در دو جهت 0 و 90 درجه انجام شد. سپس با استفاده از رزین اپوکسی و هاردنر، لایه‌های الیاف شیشه با زوایای 0/90/90/0 بین دو ورق آلومینیوم قرار گرفتند و لوله‌های موبین خرد شده به صورت اتفاقی در لایه‌های اول و سوم توزیع شدند. نمونه‌های کامپوزیتی الیاف- فلز حاوی عوامل خودترمیمی با کسرهای حجمی متفاوت (4، 8 و 12 درصد) آماده شدند و در سه زمان مختلف (صفر، 1 و 3 روز) پس از تخریب تحت آزمون قرار گرفتند.



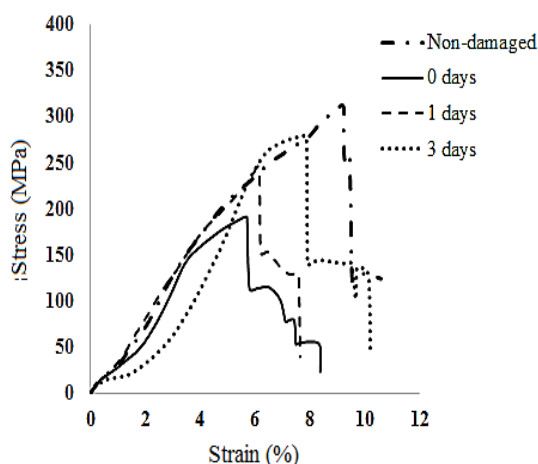
Fig. 1 The glass micro-tubes a) before and b) after the filling using healing materials

شکل 1 میکرولوله‌های شیشه مورد استفاده، الف) قبل، ب) پس از پر شدن توسط مواد ترمیمی



**Fig. 5** The tensile response of specimen with 8 vol.% healing agent after different healing time after initial damaging

شکل 5 رفتار کششی نمونه حاوی 8 درصد حجمی عامل ترمیمی در حالت تخریب نشده و پس از گذشت سه بازه زمانی مختلف پس از تخریب



**Fig. 6** The tensile response of specimen with 12 vol.% healing agent after different healing time after initial damaging

شکل 6 رفتار کششی نمونه حاوی 12 درصد حجمی عامل ترمیمی در حالت تخریب نشده و پس از گذشت سه بازه زمانی مختلف پس از تخریب

استحکام کششی نمونه‌های ترمیمی نسبت به نمونه شاهد کمتر است. علت این امر گسستگی و ناپیوستگی در ساختار کامپوزیت در اثر وجود میکروتُرک‌ها است. میکروتُرک‌ها در ساختار مانند عیب عمل کرده و به دلیل افزایش تمرکز تنش در کامپوزیت استحکام کششی را کاهش می‌دهد.

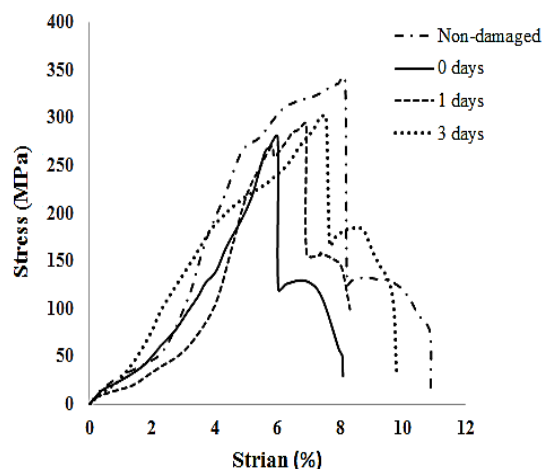
با افزایش کسر حجمی میکرولوله‌های حاوی مواد ترمیمی، استحکام کششی کاهش می‌یابد، به طوری که در نمونه حاوی 12 درصد مواد ترمیمی کاهش حدود 39 درصدی در استحکام کششی نمونه پس از آسیب نسبت به نمونه شاهد آسیب دیده مشاهده می‌شود. مزیت اصلی نمونه‌های خودترمیمی نسبت به نمونه فاقد عوامل ترمیمی بهبود خواص مکانیکی به دلیل ترمیم عیوب با گذشت زمان است.

بهبود استحکام کششی پس از ترمیم در نمودارهای شکل 8 با گذشت زمان نشان داده شده است. برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم (η)، از رابطه 1 استفاده شد [19]:

نمودارهای تنش- کرنش برای نمونه‌های حاوی 4 درصد حجمی مواد ترمیمی در سه زمان مختلف پس از ایجاد تخریب در شکل 4 نشان داده شده است. استحکام کششی این نمونه‌ها در بازه زمانی صفر، 1 و 3 روز پس از تخریب به ترتیب 280، 294 و 301 مگاپاسکال به دست آمد. قبل از تخریب، استحکام کششی این نمونه، 343 مگاپاسکال بوده است. مشاهده می‌شود که کاهش استحکام کششی بعد از تخریب نسبت به قبل از آن حدود 18 درصد است. استحکام کششی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی بدون تخریب نسبت به نمونه استاندارد، 5 درصد کاهش یافته است که دلیل کاهش استحکام، ناپیوستگی ناشی از حضور میکرولوله‌ها در کامپوزیت ییاف- فلز است.

در شکل‌های 5 و 6 نمودارهای مربوط به نمونه‌های حاوی 8 و 12 درصد حجمی مواد ترمیمی نشان داده شده است. استحکام کششی نمونه 8 درصد در بازه زمانی صفر، 1 و 3 روز پس از تخریب به ترتیب 240، 299.6 و 311.5 مگاپاسکال و در نمونه‌های 12 درصد حجمی در همین بازه‌های زمانی به ترتیب 190، 244.6 و 278.2 مگاپاسکال به دست آمده است. استحکام نمونه‌های 8 و 12 درصد حجمی قبل از تخریب به ترتیب 324.9 و 311.9 مگاپاسکال می‌باشد. افت استحکام نمونه‌های 8 و 12 درصد حجمی نسبت به استحکام کششی قبل از تخریب به ترتیب 25.5 و 38.7 درصد است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان حداکثر استحکام کششی در نمونه حاوی 8 و 12 درصد حجمی عامل ترمیمی به ترتیب 29 و 42 درصد افزایش یافته است. این افزایش استحکام به دلیل آزاد شدن عوامل ترمیم و جریان یافتن در سطح ترک و ترمیم عیوب است. پخت عوامل ترمیمی با گذشت زمان علاوه بر افزایش استحکام کششی روی چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش) نیز تأثیر داشته و موجب بهبود آن شده است. دلیل کاهش شدید استحکام در نمونه‌های حاوی 12 درصد عامل ترمیمی، بالاتر بودن کسر حجمی میکرولوله‌ها است که این باعث ایجاد عیوب ساختاری و ناپیوستگی بیشتر شده و لذا افت شدید استحکام را در پی داشته است.

در شکل 7 استحکام کششی نمونه‌های شاهد و خودترمیم به منظور مقایسه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود،



**Fig. 4** The tensile response of specimen with 4 vol.% healing agent after different healing time after initial damaging

شکل 4 رفتار کششی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی در حالت تخریب نشده و پس از گذشت سه بازه زمانی مختلف پس از تخریب

حاوی مواد ترمیمی باعث کاهش استحکام کششی کامپوزیت چندلایه ییاف- فلز می‌شود. اما با گذشت زمان و انجام فرآیند ترمیم عیب ایجاد شده در اثر تخریب، استحکام کششی بهبود می‌یابد. نمونه حاوی 8 درصد مواد ترمیمی بیشترین راندمان ترمیمی به میزان 58.3 درصد را دارد. در این نمونه افت استحکام نسبت به نمونه حاوی 12 درصد حجمی عامل ترمیمی کمتر است. دلایل ذکر شده موجب می‌شود که 8 درصد عامل ترمیمی، کسر حجمی مناسب و مدت سه روز زمان مناسب جهت انجام ترمیم‌شوندگی در نمونه باشد.

### 5- مراجع

[1] Cortes, P. and Cantwell W.J., "The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fiber-metal laminates", Composites science and technology, Vol. 66, No. 13, pp. 2306-2316, 2006.

[2] Yuan, Y.C. Yin, T. Rong, M.Z. and Zhang, M.Q., "Self-healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review", EXPRESS Polymer Letters, Vol. 2, No. 4, pp. 238-250, 2008.

[3] Zhang, J. Lin, T. Cheung, S.C.P. and Wang, C.H., "The effect of carbon nanofibres on self-healing epoxy/poly(ε-caprolactone) blends", Composites Science and Technology, Vol. 72, pp. 1952-1959, 2012.

[4] Semaami, M. Aram, E. and Mahdavian, A., "Smart polymer: Self-healing Polymers", Polymerization, Vol. 3, pp. 27-38, 2013.

[5] Bekas, D.G. Tsirka, K. Baltzis, D. and Paipetis, A.S., "Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques", Composites Part B: Engineering, Vol. 87, pp. 92-119, 2016.

[6] Scheiner, M. Dickens, T.J. and Okoli O., "Progress towards self-healing polymers for composite structural applications", Polymer, Vol. 83, pp. 260-282, 2016.

[7] Wu, D.Y. Meure, S. and Solomon, D., "Self-healing polymeric materials: A review of recent developments", Progress in Polymer Science, Vol. 33, No. 5, pp. 479-522, 2008.

[8] 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, No. 18, pp. 4063-4068, 2010.

[9] Curtis, P. and Ttavis, S., "Hollow Carbon Fiber for Performance Polymer Composite", Plastics, Rubber and Composites, Vol. 28, pp. 201-209, 1999.

[10] Eslami-Farsani, R. Sari, A. 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.

[11] McDonald, J.C. Duffy, D.C. Anderson, J.R. Chiu, D.T. Wu, H. Schueller, O.J. and Whitesides, G.M., "Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane)", Electrophoresis, Vol. 21, pp. 27-40, 2000.

[12] Hucker, M., Bond, I. Bleay, S. and Haq, S., "Experimental evaluation of unidirectional hollow glass fiber/epoxy composites under compressive loading", Composites: Part A, Vol. 34, No. 10, pp. 927-932, 2003.

[13] Curtis, P.T. and Travis, S.W.G., "Hollow carbon fibers for high performance polymer composites", Plastics, Rubber and Composites, Vol. 28, No. 5, pp. 201-209, 1999.

[14] Dry, C. Sottos, N.R., "Passive smart self-repair in polymer matrix composite materials", SPIE, Vol. 1916, pp. 438-444, 1993.

[15] Dry, C., "Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials", Composite Structures, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.

[16] Motuku, M. Vaidya, U.K. and Janowski, G.M., "Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact", Smart Materials and Structures, Vol. 8, No. 5, pp. 623-638, 1999.

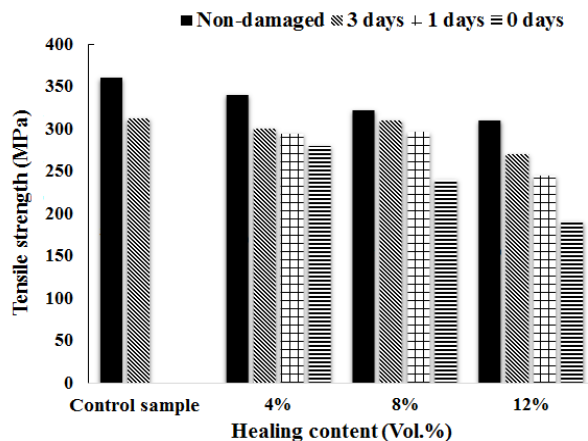


Fig. 7 The relationship between tensile strength and healing content after different healing time

شکل 7 ارتباط بین استحکام کششی و میزان ماده ترمیمی در بازه‌های زمانی متفاوت ترمیم برای نمونه‌های خودترمیم در مقایسه با نمونه‌های شاهد

$$\eta = \frac{\sigma_{f(H)} - \sigma_{f(D)}}{\sigma_{f(V)} - \sigma_{f(D)}} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (1)، زیرنویس‌های H، D و V به ترتیب نشان‌دهنده نمونه‌های ترمیم‌شده، تخریب‌شده و نمونه شاهد هستند. با توجه به رابطه بالا، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در شکل 8 نشان داده شده است. با توجه به نمودار مذکور بیشترین بازده ترمیم حدود 58.3 درصد و برای نمونه حاوی 8 درصد حجمی مواد ترمیمی و با گذشت 3 روز پس از تخریب حاصل شد.

### 4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر رفتار کششی کامپوزیت‌های چندلایه ییاف- فلز خودترمیم شونده با ییاف توخالی شیشه‌ای کوتاه بررسی شد. نمونه‌های کامپوزیتی با درصد‌های حجمی مختلف 4، 8 و 12 درصد عامل ترمیمی تهیه و خواص ترمیمی آن‌ها پس از گذشت صفر، 1 و 3 روز از زمان تخریب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که حضور میکرولوله‌های خردشده

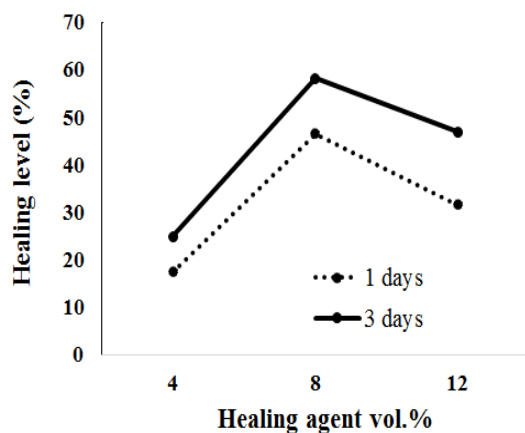


Fig. 8 The relationship between healing efficiency and healing content after two different healing times

شکل 8 ارتباط بین درصد حجمی ماده ترمیمی و بازده ترمیم پس از گذشت دو بازه زمانی ترمیمی مختلف در نمونه‌های خودترمیم

- [17] Bleay, S.M. Loader, C.B. Hawyes, V.J. Humberstone, L. and Curtis P.T., "A smart repair system for polymer composites", Composites: Part A, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.
- [18] Wechsato, W. Lorente, S. and Bejan, A., "Tree-shaped networks with loops", International journal of heat and mass transfer, Vol. 48, No. 3-4, pp. 573-583, 2005.
- [19] 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.