



## بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی خودترمیم‌شونده مبتنی بر شبکه میکروآوندی تحت بارگذاری عرضی

محمدرضا باب‌الحوایجی<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>، حامد خسروی<sup>3</sup>

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

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

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

\* تهران، صندوق پستی 119991 43344، eslami@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 بهمن 1395

پذیرش: 16 فروردین 1396

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

کامپوزیت‌های الیافی

خودترمیمی

شبکه میکروآوندی

استحکام خمشی

بازده ترمیمی

### چکیده

وقوع آسیب امری اجتناب‌ناپذیر در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری الیافی می‌باشد. وجود سیستم‌های خودترمیم‌شونده از طریق اجرای مستقل عمل ترمیم موجب افزایش طول عمر کاری قطعه و همچنین کاهش زمان عمل ترمیم آن‌ها می‌شود. در تحقیق حاضر، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده اپوکسی-الیاف شیشه از نوع E مبتنی بر شبکه میکروآوندی طراحی و در ادامه ساخته شدند. ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق روش حذف پیش شکل‌های جامد صورت گرفت. به علت عدم وجود پژوهش‌های لازم در استفاده از سیستم رزین و هاردنر انیدریدی که سیالیت بالاتری نسبت به رزین و هاردنر آمینی دارند و همچنین امتزاج‌پذیری قابل کنترل آن‌ها، در این تحقیق از مواد مذکور به عنوان عامل ترمیم‌کننده استفاده شد. هدف از پژوهش حاضر بررسی کسر حجمی مناسب و زمان مطلوب برای مشاهده پدیده ترمیم‌شوندگی است. بدین منظور شبکه میکروآوندی (شامل رزین اپوکسی و هاردنر انیدریدی با مقادیر حجمی 2، 3.2 و 3.7 درصد) در کامپوزیت‌های الیافی تعبیه شدند. خواص خمشی نمونه‌ها با گذشت زمان‌های مختلف (صفر، 4، 8 و 11 روز) پس از ایجاد آسیب اولیه به وسیله آزمون ضربه، مورد بررسی قرار گرفتند. پس از شکست و ایجاد عیب در ساختار، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و پس از ترکیب با کاتالیزور مذکور عملیات پلیمریزاسیون موضعی و ترمیم مجدد سازه شروع می‌شود. بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی به میزان 46 درصد برای نمونه حاوی 3.2 درصد حجمی ماده ترمیمی با گذشت 8 روز پس از ایجاد آسیب مشاهده شد.

## Micro-vascular channel based self-healing fibrous composites under transverse loading

Mohammad Reza Babolhvaeji<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<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, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 26 January 2017  
Accepted 05 April 2017  
Available Online 29 April 2017

**Keywords:**  
Fibrous composites  
Self-healing  
Micro-vascular channels  
Flexural strength  
Healing efficiency

### ABSTRACT

The occurrence of damage is considered as an unavoidable fact in fiber reinforced polymers. For this reason, the self-healing systems could extend the service life time of materials by implementing the concept of autonomous or induced repair. Herein, a self-healing E-glass fibers/epoxy composite based on micro-vascular channels has been designed and fabricated. The specimens were fabricated via the hand lay-up route, while the fabrication of micro-vascular channels was conducted through the removing of solid preforms. Due to the lack of previous studies about the utilization of anhydride resin-hardener system with lower viscosity and also their controllable miscibility in comparison to the amine systems, in the present work, these materials were selected as healing agent for repairing the primary defects created in the structure. For this purpose, micro vascular channels containing two various parts of epoxy resin and anhydride hardener (2, 3.2, and 3.7 Vol.% with respect to the matrix part) were incorporated in the structure of composites. The flexural behavior of the specimens was assessed during the different time spans (0, 4, 8 and 11 days) from the primary damage creation. After the defect creation in the structure, the healing agents present in the micro vascular channels flow into the defects and after combining with catalysis dispersed in the matrix, local polymerization process and restoration of properties are started. According to the obtained results in this research, the highest flexural strength recovery of 46% was observed for the specimen with 3.2% healing agent after 8 days.

### 1- مقدمه

مواد ترجیحی در اغلب کاربردهای مهندسی نظیر نظامی، فضایی، ساختمانی و غیره به کار گرفته می‌شوند. به وجود آمدن آسیب‌هایی نظیر میکروتُرک‌ها در سازه‌های کامپوزیتی یک امر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد که منجر به افت خواص

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف به دلیل خواصی همچون چگالی پایین، پایداری شیمیایی ذاتی در دمای محیط و نسبت استحکام به وزن بالا به عنوان

Please cite this article using:

M. R. Babolhvaeji, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

محدود بودن کسر حجمی عامل ترمیمی در محل آسیب تحقیقات در زمینه خودترمیمی به سمت استفاده از شبکه‌های میکروآوندی سوق پیدا کرد [5]. روش میکروآوندی با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای توخالی اولین بار برای ترمیم ترک در مواد بتنی و با استفاده از ترکیب سه جزئی بر پایه‌ی متیل متاکریلات معرفی شد. بعدها این روش برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به-کار گرفته شد [16]. در سال 2007، توهی و همکارانش [17] با استفاده از شبکه میکروآوندی که با کانال‌هایی با قطر 200 میکرون در سه بعد ساخته شده بود به میانگین بازده ترمیمی 70 درصد و امکان ترمیم هفت بار یک محل از آسیب دست پیدا کردند.

در پژوهش بعدی که توسط توهی و همکارانش انجام شد، نمونه ترمیمی حاوی کانال‌هایی با قطر 200 میکرونی مورد آزمایش قرار گرفتند. این کانال‌ها به‌طور جداگانه با رزین اپوکسی و عامل پخت تغذیه شدند. نمونه‌های آماده شده تحت آزمون کشش دو سر شکاف قرار گرفتند. در پژوهش صورت گرفته ارزیابی رفتار ترمیمی برحسب چقرمگی شکست نمونه پس از ترمیم در نظر گرفته شد، به‌گونه‌ای که در اولین سیکل ترمیم، متوسط بازده ترمیم 86 درصد حداکثر مقدار آن نیز 120 درصد بوده است [18]. در تحقیقی که توسط اوموسلا و همکارانش [19] بر روی کامپوزیت زمینه پلیمری حاوی الیاف شیشه انجام شد، رفتار خودترمیمی این کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش کامپوزیتی با زمینه پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه ساخته شد که حاوی شبکه‌ای با قطر 400 میکرون بود. به منظور ایجاد آسیب و ارزیابی بازده ترمیمی یک آسیب اولیه بر روی نمونه‌ها ایجاد شد. نتایج حاصل از ترمیم بیانگر بازیابی 84 درصد استحکام خمشی بود.

بنابر مطالعات انجام شده، تحقیقاتی در زمینه خودترمیمی مبتنی بر شبکه میکروآوندی با استفاده از مواد انیدریدی در کامپوزیت‌های الیافی انجام نشده است. بر این اساس، هدف از تحقیق حاضر بررسی پدیده خودترمیمی در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه E توسط شبکه میکروآوندی تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای می‌باشد.

## 2- مواد و روش تحقیق

### 2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی ML-506 و هاردنر آمینی HA-11 (ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر) به‌عنوان فاز زمینه و از پارچه الیاف شیشه دوجهته نوع E با دانسیته سطحی  $400 \text{ g/m}^2$  محصول شرکت لاینسکس چین به‌عنوان فاز تقویت‌کننده الیافی استفاده شد. همچنین از سیم‌های پلیمری با قطرهای 500 و 700 میکرون جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل ساختار کامپوزیت استفاده شد. عوامل ترمیم شامل رزین اپوکسی ML-526، هاردنر انیدریدی HA-59 و کاتالیزور متیل ایمویدازول AX-11 (محصول شرکت مواد مهندسی مکرر) در میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. سیالیت بالا از دلایل انتخاب این نوع سیستم خودترمیمی بود.

### 2-2- روش ساخت نمونه‌ها

ساخت کامپوزیت‌ها با روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق روش حذف پیش‌شکل‌های جامد انجام شد. بدین منظور ابتدا چهار لایه پارچه الیاف شیشه با ابعاد مناسب جهت ساخت نمونه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D790M برای آزمون خمشی برش داده شدند. سپس سیم‌های پلیمری بین لایه‌های اول و دوم، و لایه‌های سوم و

مکانیکی آن و در شرایط حاد با رشد آن‌ها عیب ورقه‌ای شدن و در نهایت شکست کامپوزیت رخ خواهد داد [1-3]. انجام بازرسی‌های معمول به‌منظور تشخیص محل آسیب زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود [4]، بنابراین کامپوزیت‌های دارای خاصیت خودترمیمی می‌توانند منجر به افزایش اطمینان خاطر بابت ترمیم درجای محل آسیب، کاهش هزینه و صرفه‌جویی در زمان ترمیم شوند [5]. خاصیت خودترمیمی به دو صورت کلی خودترمیمی ذاتی و خودترمیمی غیرذاتی تقسیم‌بندی می‌شوند.

به‌طور کلی، سامانه‌های خودترمیمی ذاتی یا برگشت‌پذیر پلیمرهایی هستند که در برابر محرک، به حالت غیرشبکه‌ای، اولیگومری و مونومری خود تبدیل شده و قابلیت بازگشت مجدد به ساختار پلیمری خود را دارند [6]. خودترمیمی ذاتی می‌تواند از راه واکنش‌های برگشت‌پذیر گرمایی، پیوندهای هیدروژنی، زوج شدن یون‌ها، توزیع یک فاز گرمانرم یا نفوذ مولکولی انجام پذیرد [5]. در سامانه‌های غیرذاتی زمینه پلیمر به تنهایی قابلیت ترمیم ندارد، بلکه خودترمیمی در آن به واسطه عامل ترمیم ایجاد می‌شود. به‌طور کلی، خود ترمیمی در این دسته از مواد به سه روش شامل کپسول‌دار کردن، استفاده از لوله توخالی و استفاده از شبکه‌های میکروآوندی، صورت می‌پذیرد. کپسول در مواد کامپوزیتی و پلیمرها به شکل ذراتی کروی (هسته-پوسته) در ابعاد میکرو هستند که با عامل خودترمیمی پر شده است. با ایجاد شکاف کپسول‌ها شکسته شده و عامل ترمیم، که در دمای ترمیم به شکل مایع است، توسط نیروی موینگی به داخل شکاف جاری می‌شود، سپس، این ماده در مجاورت کاتالیزوری که از قبل در محیط پراکنده شده است، پلیمر شده و شکاف را ترمیم می‌کند [7].

لوله شیشه توخالی که با عامل ترمیم مناسب از راه فرآیند موینگی پر می‌شوند، در اثر ایجاد شکاف در زمینه، شکسته شده و عامل ترمیم را وارد محیط شکاف می‌کنند. در نتیجه، فرآیند پلیمر شدن و عمل ترمیم شکاف‌ها انجام می‌گیرد [8].

روش خودترمیمی به روش میکروآوندی برخلاف سایر روش‌ها (میکروکپسول و الیاف توخالی) امکان رسانش پیوسته عامل ترمیمی به محل آسیب و ترمیم چندباره را فراهم می‌کند. در خودترمیمی به روش میکروآوندی عامل ترمیمی در کانال‌هایی توخالی قرار دارند که این کانال‌ها در یک تا سه بعد درون کامپوزیت می‌توانند تعبیه شوند. برخلاف دو روش قبلی در این روش به وسیله جریان نیمه پیوسته عامل ترمیمی در شبکه امکان ترمیم چندباره یک محل از کامپوزیت وجود دارد که این امر موجب جلوگیری از ایجاد ترک ثانویه در محل ترک اولیه خواهد شد [5].

در بررسی روش‌های خودترمیمی تحقیقات بسیاری تا به امروز صورت گرفته است. وایت و همکارانش [9] در سال 2001 و کیسلر [10] در سال 2003، تحقیقاتی را بر روی استفاده از میکروکپسول‌ها و پراکندگی کاتالیست انجام دادند. در زمینه استفاده از لوله‌های توخالی حاوی کسر حجمی‌های متفاوت از عامل ترمیمی، تحقیقاتی توسط درای [11] در سال 1996، بلی [12] در سال 2001، پنگ [13] در سال 2005 و ترسک [14] در سال 2006 صورت پذیرفت. در سال‌های 2002 و 2003 استفاده از عامل ترمیمی به صورت جامد توسط چن [15]، نیز به‌گونه‌ای که از یک سری پلیمرهای حالت جامد که امکان ایجاد مجدد اتصالات را با اعمال دمای موردنظر دارند، انجام گرفت.

با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های مورد اتخاذ در روش‌های خودترمیمی مذکور نظیر عدم امکان پرکردن مجدد سیستم‌های خودترمیمی و

14 درجه انتخاب شد. ابتدا سه نمونه با کسر حجمی یکسان 2 درصد عامل ترمیمی جهت به‌دست آوردن بهترین زمان ترمیم و سپس سه نمونه با مقادیر مختلف عامل ترمیمی 2، 3.2 و 3.7 درصد جهت به‌دست آوردن بهترین کسر حجمی عامل ترمیمی در مدت زمان ثابت تحت بارگذاری خمشی قرار گرفتند. آسیب به‌وجود آمده و نفوذ عامل ترمیمی در "شکل 2" نشان داده شده است.

#### 2-4- آزمون خمش سه نقطه‌ای

برای به‌دست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب در چهار زمان مختلف (صفر، 4، 8 و 11 روز) تحت آزمون خمش قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. در مجموع 5 نوع نمونه برای هر کسر حجمی از عامل ترمیمی (چهار نمونه دارای آسیب اولیه و یک نمونه فاقد آسیب (نمونه کنترلی)) تحت آزمون قرار گرفتند. آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل TB1 ساخت شرکت کویا انجام شد. پس از آزمون خمش، نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده به‌دست آمد. سپس محاسبه استحکام خمشی نمونه‌ها با توجه به استاندارد خمش ASTM D790M انجام شد. نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای در "شکل 3" نشان داده شده است.

#### 3- نتایج و بحث

##### 3-1- نمونه کنترلی

در ادامه به منظور بررسی تاثیر ایجاد آسیب بر روی استحکام خمشی، نتایج حاصل از نمونه کنترلی (حاوی میکروکانال‌های خودترمیم و بدون آسیب)، از هر کسر حجمی با نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای نمونه‌های صفر روز (حاوی آسیب و عدم اعمال زمان جهت ترمیم) تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند که در "شکل 4" نشان داده شده است.

در نمونه‌ی بدون آسیب مطابق "شکل 4"، با افزایش درصد حجمی عامل ترمیمی از 2 به 3.2 درصد استحکام خمشی کاهش ولی از 3.2 به 3.7 درصد استحکام خمشی افزایش می‌یابد، چرا که با افزایش درصد حجمی عامل



Fig. 2 The damage generated via charpy impact test and infusing the healing agent.

شکل 2 ایجاد آسیب توسط آزمون ضربه پاندولی و نفوذ عامل ترمیمی.

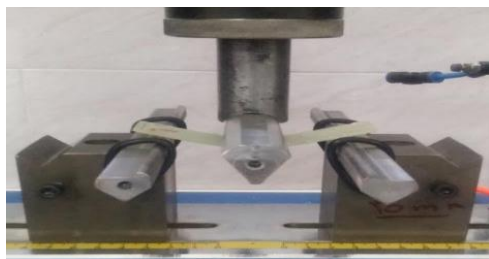


Fig. 3 Three-point bending test

شکل 3 آزمون خمش سه نقطه‌ای

چهارم قرار داده شدند. علت قراردادی در بین این لایه‌ها نزدیک بودن به نواحی دچار آسیب هنگام تخریب توسط دستگاه آزمون ضربه پاندولی بود. در "شکل 1" محل و موقعیت سیم‌های پلیمری جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل ساختار کامپوزیت نشان داده شده است. پس از این مراحل، مخلوط رزین و هاردنر که با نسبت مشخص ترکیب شده بودند، روی الیاف تقویت‌کننده شیشه (که پیش‌شکل‌های جامد در بین آن‌ها حضور داشتند) ریخته شده و زمان کافی جهت نفوذ رزین به تمامی لایه‌ها داده شد. از آنجایی که محبوس شدن هوا در داخل کامپوزیت در روش لایه‌گذاری دستی امری اجتناب‌ناپذیر است، لذا از پرس استاتیکی جهت نفوذ بهتر رزین و کاهش هوای محبوس شده در داخل کامپوزیت پس از پخت کامل استفاده شد.

پس از پخت اولیه کامپوزیت در دمای محیط، پیش‌شکل‌های جامد (سیم‌های پلیمری) از داخل کامپوزیت خارج شده و میکروکانال‌های توخالی جهت تزریق مواد خودترمیم در داخل ساختار باقی ماندند. برخی از کانال‌ها از رزین اپوکسی و هاردنر انیدریدی و برخی دیگر از کاتالیزور مایع متیل ایمویدازول پر شدند. پس از شکست و ایجاد عیب در ساختار، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و پس از ترکیب با کاتالیزور مذکور عملیات پلیمریزاسیون موضعی و ترمیم مجدد سازه شروع می‌شود. سه نوع نمونه حاوی عوامل خودترمیمی با کسرهای حجمی متفاوت (2، 3.2 و 3.7 درصد) مطابق با جدول 1 آماده شدند و در چهار زمان مختلف (صفر، 4، 8 و 11 روز) پس از ایجاد تخریب اولیه تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. همان‌طور که مشاهده می‌شود انتخاب کسر حجمی به‌صورت کاملاً تجربی بوده است و در بحث کسر حجمی توجه به تعداد و قطر میکروکانال‌ها امری ضروری است.

##### 2-3- نحوه ایجاد آسیب

به منظور ایجاد آسیب از آزمون ضربه پاندولی SIT-200B ساخت شرکت مهندسی سنتام استفاده شد. نحوه ایجاد آسیب به این صورت انجام گرفت که پاندول دستگاه با راستای قائم زاویه 14 درجه می‌ساخت و پشت و روی هر نمونه تحت این نوع ضربه قرار گرفت. زاویه پاندول باید به نوعی انتخاب شود که نمونه زیاد آسیب نبیند و در حدی باشد که میکروکانال‌های ایجاد شده درون ساختار شکسته و عوامل ترمیم به محل ترک جریان یابند و لذا زاویه

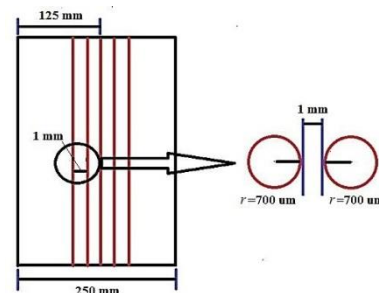


Fig. 1 The position of polymeric wires in specimens to create the microchannels

شکل 1 موقعیت سیم‌های پلیمری جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل نمونه‌ها

جدول 1 اطلاعات مربوط به تعداد و قطر کانال‌ها

Table 1 Information of numbers and diameters of channels

ماده ترمیمی (/)	تعداد کانال‌ها- قطر کانال (میکرون)
2	500-6
3.2	500-10
3.7	700-6

در "شکل 6"، نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای مربوط به نمونه حاوی 3.2 درصد حجمی مواد ترمیمی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان حداکثر میزان بار تحمل شده به 233 نیوتن پس از 8 روز رسیده است. مقادیر بار تحمل شده پس از گذشت چهار و یازده روز به ترتیب برابر با 143 و 216 نیوتن می‌باشند که با روند نتایج نمونه‌های حاوی 2 درصد حجمی مواد ترمیمی مطابقت دارد.

در "شکل 7"، نمودارهای خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی 3.7 درصد حجمی مواد ترمیمی نشان داده شده است. بار خمشی تحمل شده پس از گذشت 4 روز، 143 نیوتن و پس از هشت روز به مقدار 306 نیوتن به دست آمده است (حداکثر بار خمشی تحمل شده). در نمونه‌های مذکور این افزایش استحکام به دلیل رهاش عوامل ترمیمی در محل آسیب و ایجاد پیوند با زمینه است. با گذشت 11 روز از زمان ترمیم مقدار بار تحمل شده تغییر چندانی نکرده و به مقدار 304 نیوتن رسید. این نتایج نیز با نتایج نمونه‌های حاوی 2 و 3.2 درصد حجمی مواد ترمیمی مطابقت دارند.

برای مقایسه صحیح بین نمونه کنترلی 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 از ابعاد نمونه، روشی مناسب برای مقایسه پارامترها به شمار می‌رود. در "شکل 8" استحکام خمشی برحسب کسر حجمی مواد ترمیمی برای نمونه‌های کنترلی و خودترمیم به منظور مقایسه آن‌ها نشان داده شده است.

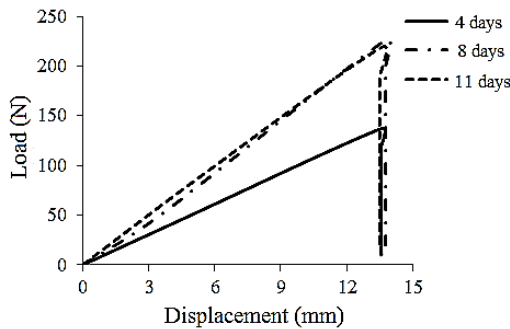


Fig. 6 The bending response of specimens with 3.2 vol.% healing agent after different healing time

شکل 6 رفتار خمشی نمونه حاوی 3.2 درصد حجمی عامل ترمیمی، پس از گذشت سه زمان مختلف پس از تخریب

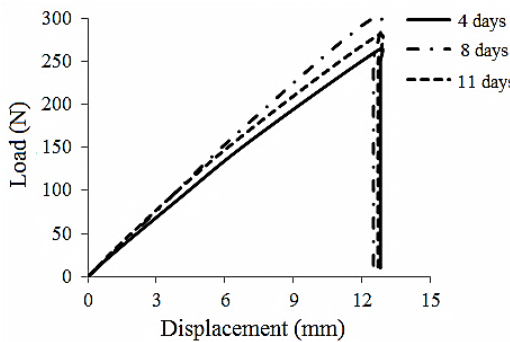


Fig. 7 The bending response of specimens with 3.7 Vol.% healing agent after different healing time.

شکل 7 رفتار خمشی نمونه حاوی 3.7 درصد حجمی عامل ترمیمی، پس از گذشت سه زمان مختلف

ترمیمی به 3.7، قطر سیم پلیمری مورد استفاده جهت دستیابی به این درصد حجمی زیاد بوده (700 میکرون) و لذا ضخامت نمونه افزایش یافته و هنگام آزمون خمش، نمونه از استحکام بیشتری برخوردار است. در نمونه همراه با ایجاد آسیب، با افزایش تعداد میکروکانال‌ها از 6 به 10 (یعنی افزایش درصد حجمی از 2 به 3.2 درصد) به علت این که قطر میکروکانال‌ها کم می‌باشد، ضخامت کامپوزیت کم بوده و هنگام ایجاد آسیب جذب انرژی کامپوزیت کمتر بوده و آسیب ایجاد شده بیشتر می‌باشد. اما با افزایش قطر میکروکانال‌ها از 500 به 700 میکرون (افزایش درصد حجمی از 3.2 به 3.7 درصد) به علت این که قطر میکروکانال‌ها افزایش پیدا کرده است، ضخامت کامپوزیت بیشتر شده و هنگام ضربه آسیب کمتری را ساختار به خود می‌بیند و در نهایت هنگام آزمون خمش استحکام در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر می‌شود.

### 3-2- نمونه‌های خودترمیم

نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های حاوی 2 درصد حجمی مواد ترمیمی در سه زمان مختلف پس از ایجاد تخریب در "شکل 5" نشان داده شده است. بار تحمل شده در بازه‌های 4، 8 و 11 روز پس از تخریب به ترتیب 150، 210 و 208 نیوتن به دست آمد. با توجه به مدت زمان لازم جهت پخت کامل عامل ترمیمی با گذشت هر چه بیشتر زمان مقدار بار قابل تحمل افزایش می‌یابد و با گذشت 8 روز، نمونه ترمیم می‌شود و به حداکثر استحکام 210 نیوتن می‌رسد. با توجه به گذشتن از زمان کامل پخت مقدار بار قابل تحمل پس از یازده روز تغییر چندانی نکرد.

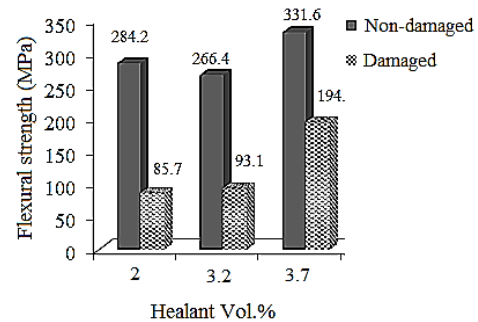


Fig. 4 Flexural strength of control specimens with and without initial damages as a function of healant Vol.%

شکل 4 مقادیر استحکام خمشی برای نمونه‌های کنترلی بدون آسیب و نمونه با آسیب برحسب درصد حجمی عامل ترمیمی

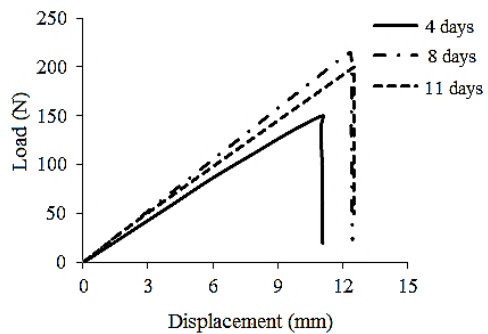


Fig. 5 The bending response of specimens containing 2 Vol.% healing agent after different healing time

شکل 5 رفتار خمشی نمونه حاوی 2 درصد حجمی عامل ترمیمی، پس از گذشت سه زمان مختلف پس از تخریب

این امر بیانگر این نکته است که حجم آسیب بوجود آمده در حدی نبوده که توانسته باشد خود را به کانال‌های حاوی عامل ترمیمی برساند که این امر خود را در ترمیم جزئی مناطق دچار آسیب نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بیشتر بودن وسعت عیوب که در اثر اعمال ضربه در نمونه‌های حاوی کانال-های 500 میکرون ایجاد شدند در ابتدا منجر به افت استحکام بیشتر در این نمونه‌ها و در ادامه با اعمال مدت زمان لازم برای ترمیم منجر به افزایش بازده ترمیم شده‌اند. در این حالت، بین آسیب‌های بین ورقه‌ای به خوبی ارتباط برقرار شد و با رسانش هر چه بیشتر عامل ترمیمی، فرآیند ترمیم آسیب در موقعیت‌های مختلف تسریع شد.

پایین‌بودن بازده ترمیمی در 4 روز برای تمامی نمونه‌ها (بازده ترمیمی 2.4، 3 و 2.7 درصد به ترتیب برای کسر حجمی‌های 2، 3.2 و 3.7 درصد) بیانگر عدم وجود زمان کافی برای اختلاط بین مخلوط رزین/هاردنر و کاتالیست می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها بازده ترمیمی بعد از گذشت 8 روز تغییر چندانی پیدا نکرده‌اند که امر به خاطر سپری کردن مدت زمان لازم به منظور پخت کامل عامل ترمیمی است که پس از گذشتن از 8 روز گذشت زمان تأثیری بسزایی بر روی بازده ترمیمی نداشته است. در حقیقت در زمان 8 روز نفوذ کامل عوامل ترمیم به محل آسیب و پخت کامل آن‌ها به وجود آمده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی رفتار خمشی کامپوزیت‌های خودترمیم اپوکسی-الیاف شیشه مبتنی بر شبکه میکروآوندی پرداخته شد. به دلیل کمبود پژوهش‌های لازم در استفاده از رزین و هاردنر انیدریدی که سیالیته بالاتری نسبت به رزین و هاردنر آمینی دارند و همچنین امتزاج‌پذیری قابل کنترل آن‌ها از مواد مذکور به عنوان مواد ترمیم‌کننده استفاده شد. نمونه‌های کامپوزیتی با سه درصد حجمی مختلف از مواد ترمیمی (2، 3.2 و 3.7 درصد) تهیه و خواص ترمیمی آن‌ها پس از گذشت زمان‌های مختلف (صفر، 4، 8 و 11 روز) از زمان تخریب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که حضور شبکه میکروآوندی حاوی مواد ترمیمی باعث افزایش خواص خمشی کامپوزیت می‌شود، به‌گونه‌ای که با گذشت زمان و انجام فرآیند ترمیم آسیب به وجود آمده، استحکام خمشی بهبود می‌یابد. در تحقیق حاضر، بازایی 46 درصدی استحکام خمشی برای نمونه حاوی 3.2 درصد حجمی مواد ترمیمی پس از گذشت 8 روز مشاهده شد.

#### 5- مراجع

- [1] M. Richardson, M. Wisheart, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A*, Vol. 27, No. 12, pp. 1123-1131, 1996.
- [2] W. Cantwell, J. Morton, The impact resistance of composite materials-a review, *Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 347-362, 1991.
- [3] D. Hull, Y. Shi, Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigations, *Composite Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 99-120, 1993.
- [4] M. Kaufmann, D. Zenkert, C. Mattei, Cost optimization of composite aircraft structures including variable laminate qualities, *Composite Science and Technology*, Vol. 68, No. 13, pp. 2748-2754, 2008.
- [5] B. Blaiszik, Self-healing polymers and composites, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 40, 179-211, 2010.
- [6] D.S. Bergman, F. Wud, Mendable polymers, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-62, 2008.
- [7] Y. Yuan, Self-healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review, *Polymer Letters*, Vol. 2, No. 4, pp. 238-250, 2008.

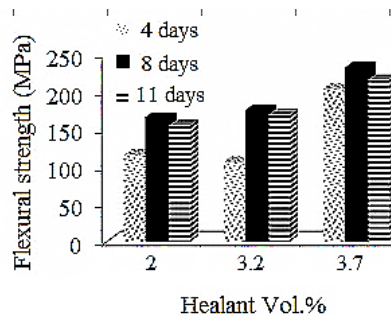


Fig. 8 The relationship between flexural strength and healing content after 3 different healing time.

شکل 8 ارتباط بین استحکام خمشی و میزان ماده ترمیمی در سه بازه زمانی متفاوت ترمیم.

برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم ( $\eta$ )، از رابطه زیر استفاده شد [1]:

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

که در این رابطه، زیرنویس‌های  $H$  و  $D$  به ترتیب مبین نمونه‌های ترمیم شده، صفر روز و نمونه‌های کنترلی هستند.

مطابق با نتایج نشان داده شده در "شکل‌های 4 و 8" و با توجه به تعریف بازده ترمیم (رابطه 1) در نمونه‌های ترمیمی تحت آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای، مقادیر محاسبه شده بازده ترمیم در "شکل 9" نشان داده شده است.

در خودترمیمی به روش میکروآوندی تناسب بین حجم آسیب به وجود آمده در کامپوزیت با حجم عامل ترمیمی یک امر ضروری برای رسیدن به بازده ترمیمی مناسب می‌باشد. با مشاهده نتایج "شکل 9" مشخص می‌شود که نمونه‌های حاوی 3.2 درصد عامل ترمیمی دارای این شرط لازم بین نمونه‌های مورد آزمون می‌باشند، به گونه‌ای که به 46 درصد بازده ترمیمی (حداکثر بازده ترمیمی) رسیدند. با مقایسه نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی 2 و 3.2 درصد عامل ترمیمی به خوبی مشخص می‌شود که کمتر بودن کسر حجمی عامل ترمیمی در نمونه‌های 2 درصد مانعی در برابر رسیدن به بازده ترمیمی بیشتر از 43 درصد در نمونه‌های مذکور است.

با توجه به مکانیزم خودترمیمی در شبکه‌های میکروآوندی یعنی رسیدن مناطق آسیب دیده به کانال‌ها و نفوذ عامل ترمیمی به این مناطق، پایین بودن بازده ترمیمی در نمونه‌های حاوی کسر حجمی 3.7 درصد عامل ترمیمی (20 درصد) قابل توجیه می‌باشد. با توجه به نتایج "شکل 5"، افت استحکام ناشی از ایجاد آسیب در نمونه‌های مذکور به مراتب کمتر از نمونه‌های حاوی کانال‌های 500 میکرونی می‌باشد (نمونه‌های 2 و 3.2 درصد عامل ترمیمی). به بیان دیگر، بالاتر بودن استحکام خمشی نمونه‌های حاوی کانال-های 700 میکرونی مبین پایین‌تر بودن حجم مناطق آسیب دیده می‌باشد.

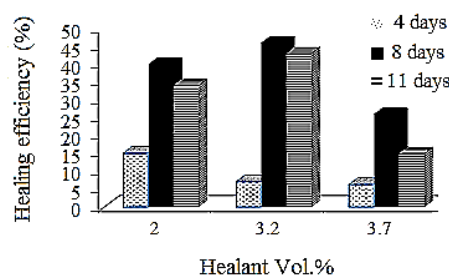


Fig. 9 The relationship between healing efficiency and healing content of specimens after three different healing times

شکل 9 ارتباط بین درصد حجمی ماده ترمیمی و بازده ترمیم در نمونه‌ها پس از گذشت سه بازه زمانی ترمیمی مختلف.

- Vol. 36, No. 2, pp. 183-188, 2005.
- [14] R.S. Trask, I.P. Bond, Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 704-710, 2006.
- [15] X. Chen, A. Dam, K. Ono, K. Mal, H. Shen, S.R. Nutt, A thermally re-mendable cross-linked polymeric material, *Science*, Vol. 295, No. 5560, pp. 1698-1702, 2002.
- [16] H.R. Williams, Biomimetic reliability strategies for self-healing vascular networks in engineering materials, *Journal of Royal Society Interface*, Vol. 5, No. 24, pp. 735-747, 2008.
- [17] K. Toohey, Self-healing materials with microvascular networks, *Nature Materials*, Vol. 6, No. 8, pp. 581-585, 2007.
- [18] K. Toohey, Delivery of two-part self-healing chemistry via microvascular networks, *Advanced Functional Materials*, Vol. 19, No. 9, pp. 1399-1405, 2009.
- [19] F. Omosola, K. Ryan, B. Basu, Glass fiber polyester composite with in vivo vascular channel for use in self-healing, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 9, pp. 1-8, 2014.
- [8] 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, 2016.
- [9] S.R. White, N. R. Sottos, J. Moore, P. Geubelle, M. Kessler, E. Brown, Autonomic healing of polymer composites, *Nature*, Vol. 409, No. 6822, pp. 794-797, 2001.
- [10] M.R. Kessler, N.R. Sottos, S. R. White, Self-healing structural composite materials, *Composites Part A*, Vol. 34, pp. 743-753, 2003.
- [11] C. Dry, Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials, *Composite Structures*, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.
- [12] S.M. Bleay, C.B. Loader, V.J. Hawyes, L. Humberstone, P.T. Curtis, S. Winchester, A smart repair system for polymer matrix composites, *Composites Part A*, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.
- [13] J.W.C. Pang, I.P. Bond, Bleeding composites-damage detection and self-repair using a biomimetic approach, *Composites Part A*,