



بررسی اثر زمان بر رفتار ترمیمی کامپوزیت اپوکسی - الیاف شیشه خودترمیم حاوی میکروکانال‌های آوندی در شرایط بارگذاری‌های خمشی و کششی

محمد امین محمدی¹، محمدرضا باب الحوائجی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، محمدرضا زمانی³

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

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

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

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

چکیده	اطلاعات مقاله
وقوع آسیب امری اجتناب‌ناپذیر در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. آسیب‌ها در این کامپوزیت‌ها به صورت تورق، ترک‌های سطحی، ترک‌ها در زمینه‌ی پلیمر و غیره می‌باشند. وجود سیستم‌های خودترمیم از طریق جلوگیری از رشد آسیب‌ها موجب افزایش عمر کاری سازه می‌شود. در تحقیق حاضر، یک کامپوزیت زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده اپوکسی - الیاف شیشه مبتنی بر میکروکانال‌های آوندی ساخته شده و بر روی تعمیر سازه از طریق انتقال مواد ترمیمی تمرکز شده است. ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق ایجاد پیش‌شکل‌های جامد و سپس حذف آن‌ها صورت گرفت. از آنجایی که یک عامل مهم برای ترمیم موثر این سازه‌ها پس از ایجاد آسیب، سیالیت بالا و امتزاج‌پذیری مناسب در محل آسیب می‌باشد، لذا از سیستم رزین و هاردنر انیدریدی در این تحقیق به عنوان عامل ترمیم‌کننده استفاده شد که سیالیت بالاتری را نسبت به رزین و هاردنرهای آمینی دارند. هدف از پژوهش حاضر بررسی زمان مطلوب ترمیم جهت بدست آوردن راندمان ترمیم بهینه سیستم است. بدین منظور کانال‌های میکروآوندی با یک درصد حجمی ثابت (4٪) در ساختار کامپوزیت تعبیه شدند. خواص خمشی و کششی نمونه‌ها با گذشت زمان‌های مختلف (صفر، 4، 7 و 11 روز) پس از ایجاد آسیب اولیه به وسیله خمش، مورد بررسی قرار گرفتند. پس از شکست و ایجاد عیب در ساختار، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و با گذشت زمان، عملیات پلیمریزاسیون و ترمیم مجدد سازه تکمیل شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی و کششی به ترتیب به میزان 59.07 درصد و 68.05 درصد برای نمونه حاوی 4 درصد حجمی ماده ترمیمی با گذشت 7 روز پس از ایجاد آسیب اولیه حاصل می‌شود.	دریافت: 96/10/02 پذیرش: 97/04/20 کلیدواژگان: کامپوزیت پلیمری خودترمیمی کانال‌های میکروآوندی استحکام خمشی استحکام کششی زمان ترمیم

Effect of time on healing behavior of microvascular channels based self-healing E-glass fibers/epoxy composite under flexural and tensile loadings condition

M. A. Mohammadi¹, M. R. Babolhavaeji¹, R. Eslami-Farsani^{1*}, M. R. Zamani²

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

2- School of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

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

Keywords

Polymer composite
Self-healing
Microvascular channels
Flexural strength
Tensile strength
Healing time

Abstract

The occurrence of damage is an unavoidable fact in fiber reinforced polymer composites. Damage modes in polymer composites are delamination, surface cracking, polymer matrix cracking, etc. The presence of self-healing systems could extend the service life time of structure via preventing of damage growth. In this study, a self-healing E-glass fibers/epoxy composite based on micro-vascular channels has been fabricated and focused on the repair of the structure through the delivery of self-healing agents. The specimens were fabricated by hand lay-up route, while the fabrication of microvascular channels was conducted through creating solid preforms and then removing them. Since an important factor for effective healing of these structures after damage creation is high fluidity and suitable miscibility in the damage area, so in the present work, anhydride resin-hardener system was used because of the higher fluidity in comparison to the amine resin-hardener systems. The aim of this study is to investigate the role of healing time for achieve of system optimum healing efficiency. To do so, microvascular channels with a constant volume fraction (4%) were incorporated in the structure of composites. The flexural and tensile behaviors of the specimens were assessed during the different time span (0, 4, 7 and 11 days) from the primary damage creation through bending method. After damage creation and break, healing agents present in the microvascular channels flowed in the damage area and over a time span local polymerization process and restoring of structure were completed. The results showed that, the highest flexural and tensile strength recovery was obtained 59.07% and 68.05% for the specimen with 4% healing agent after 7 days from initial damage creation.

1-مقدمه

اتمسفری مختلف، کاربردهای گوناگونی را در وسایل نقلیه (ماشین، سفینه‌های فضایی، کشتی و غیره)، کالاهای ورزشی، صنایع ساختمانی و الکترونیک دارند. با وجود تمام این مزیت‌ها، بشر هنگام استفاده از این مواد با

پلیمرها و سازه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر به فردشان از جمله استحکام و مدول ویژه بالا، فرآیندپذیری خوب و پایداری شیمیایی در شرایط

Please cite this article using:

Mohammadi, M. A. Babolhavaeji, M. R. Eslami-Farsani, and R. Zamani, M. R., "Effect of time on healing behavior of microvascular channels based self-healing E-glass fibers/epoxy composite under flexural and tensile loadings condition", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 503-510, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

[8]. در ادامه، نوریس و همکارانش [9] از لوله‌های شیشه‌ای با قطر 0.5 میلیمتر در کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند تا ساختاری با دو خاصیت خودترمیمی و سنجش آسیب را داشته باشند. زمان آسیب، میکروتک بین کانال‌ها با فشار متفاوت قرار گرفته و باعث تغییر در فشار میکروکانال‌ها می‌شود. این تغییر در فشار باعث می‌شود که مواد خودترمیم به محل ترک منتقل شوند. آن‌ها پس از این روش به ۹۴ درصد بازیابی در استحکام پس از ضربه دست یافتند.

بیلا و همکارانش [10] اولین بار از الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر خارجی 15 میکرون و قطر داخلی 5 میکرون به عنوان میکروکانال جهت ذخیره‌ی مواد ترمیمی استفاده کردند. آن‌ها قابلیت پرکردن تنها نیمی از الیاف توخالی به علت قطر داخلی کم الیاف و رزین با ویسکوزیته بالا را داشتند. این پر کردن الیاف به صورت جزئی باعث شد که انتقال رزین به ناحیه آسیب دیده، ناکامل باشد و در نتیجه‌ی آن ترمیم ماده هنگام آزمون فشار پس از ضربه محدودیت داشته باشد. تراسک و ویلیامز [11-14] با هدف توسعه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده حاوی الیاف شیشه توخالی برای کاربردهای هوافضایی اقدام به بررسی بازده ترمیم در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن- اپوکسی و الیاف شیشه- اپوکسی تحت آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای و فشار پس از ضربه نمودند و به ترتیب به بازده ترمیم 97 و 100 درصد رسیدند.

همیلتون و همکارانش [15] از الیاف نایلون با قطر ۲۸۰ میکرون به عنوان یک پیش‌شکل جامد قابل برداشتن جهت ایجاد سیستم میکروآوندی بهره گرفتند. در ادامه‌ی تحقیقات، آن‌ها اثر پمپاژ برای انتقال پرفشار مواد خودترمیم در شبکه‌های آوندی را بررسی کرده و نتایج مطلوبی در این ارتباط حاصل شد. وو و همکارانش [16]، تک رشته‌های تریلن برای تولید شبکه‌های میکروآوندی با کانال‌های مستقیم حاوی نانولوله‌های کربنی را بکار بردند. آن‌ها از این شبکه‌ها جهت ذخیره عامل ترمیمی و انتقال آن‌ها به محل ترک استفاده کردند.

تراسک و باند [17] شبکه‌های آوندی را در کامپوزیت‌های الیاف کربن به وسیله‌ی ذوب آلیاژ لیمیم دما پایین ایجاد کردند. دمای ذوب به اندازه‌ای بود که آلیاژ به راحتی خارج شود و پخت کامپوزیت نیز اتفاق بیافتد. نتایج نشان داد که استحکام فشاری پس از ضربه کامپوزیت به مقدار ۷۰ درصد کاهش یافته است. در ادامه نوریس و همکارانش [18] فعالیت ترسک و باند را گسترش دادند و با اعمال مواد خودترمیم در داخل میکروکانال‌ها توانستند استحکام پس از ضربه در کامپوزیت را تا 97 درصد بازیابی کنند.

در ادامه‌ی تحقیقات پیشین، هدف از پژوهش حاضر، بررسی زمان ترمیم مناسب جهت دستیابی به بیشترین بازدهی ترمیمی با استفاده از مواد ترمیمی انیدریدی با سیالیت بالا در کامپوزیت‌های اپوکسی- الیاف شیشه حاوی میکروکانال‌های آوندی تحت آزمون‌های کشش و خمش است. در این کامپوزیت‌ها از پیش شکل‌های جامد قابل حذف برای ایجاد میکروکانال‌های یک‌بعدی جهت ذخیره‌ی عوامل ترمیمی درون ساختار کامپوزیت استفاده شده است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی بیسفنول اف ML-506 و هاردنر پلی‌آمین HA-11 (ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر) به عنوان فاز زمینه و از پارچه الیاف شیشه دوجهته نوع E با دانسیته سطحی 400 g/m^2 محصول شرکت

عیوب مختلفی روبه‌رو است که این عیوب می‌توانند ناشی از رفتار مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، تشعشعات ماورای بنفش یا ترکیبی از این موارد باشند [1]. یکی از این عیوب رایج، حضور میکروتک‌ها در سازه می‌باشد که با ادامه‌ی روند بارگذاری روی سازه، این میکروتک‌ها به هم می‌پیوندند و باعث انهدام و شکست قطعه می‌شوند. جهت جلوگیری از انهدام سازه‌ی مورد نظر ابتدا نیاز به تشخیص محل آسیب توسط بازرسی‌های معمول و نهایتاً تعمیر و یا تعویض سازه با یک سازه جدید می‌باشد. از آنجایی که تشخیص محل آسیب و همچنین تعمیر و تعویض آن زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود، لذا می‌توان از کامپوزیت‌هایی استفاده کرد که قابلیت ترمیم به صورت خود به خودی را داشته باشند. این گونه از کامپوزیت‌ها تحت عنوان کامپوزیت‌های خودترمیم شناخته می‌شوند. کامپوزیت‌های دارای خاصیت خودترمیمی می‌توانند منجر به افزایش اطمینان خاطر بابت ترمیم درجای محل آسیب، کاهش هزینه و صرفه‌جویی در زمان ترمیم شوند [2].

به طور کلی دو نوع سیستم خودترمیم در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری وجود دارد. سیستم‌های خودترمیم ذاتی و غیرذاتی که در سیستم‌های خودترمیم ذاتی، بازیابی خواص مواد و ترمیم در اثر عواملی همچون واکنش‌های برگشت‌پذیر، نفوذ مولکولی و یا زوج شدن یونومرها به وجود می‌آید. در سیستم‌های غیرذاتی عوامل ترمیم توسط یک عامل خارجی ذخیره شده و پس از ایجاد آسیب به محل ترک جریان می‌یابند. روش میکروکپسول و استفاده از کانال‌های میکروآوندی جز روش‌های غیرذاتی بوده که جهت ذخیره عوامل ترمیم درون کامپوزیت استفاده می‌شوند. در روش استفاده از میکروکپسول‌ها، کپسول‌ها با عامل خودترمیمی پر شده و در ابعاد میکرو ساخته می‌شوند. با ایجاد ترک جداره کپسول‌ها شکسته شده و عامل ترمیم که به شکل مایع است، توسط نیروی موئینگی به محل ترک جاری می‌شود. سپس مایع آزاد شده در مجاورت کاتالیزوری که از قبل در محیط پراکنده شده است پلیمریزه شده و شکاف را ترمیم می‌کند [3]. روش دیگر خودترمیمی غیرذاتی، روش استفاده از کانال‌های میکروآوندی است که می‌توان با الگوبرداری از این سیستم‌های عروقی در بدن موجودات (سیستم‌های زیستی)، جهت ایجاد مواد مرکب خودترمیم (سیستم‌های سنتزی) استفاده کرد [4].

خودترمیمی به روش میکروآوندی برخلاف سایر روش‌ها، 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 سایر روش‌ها، 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].

جهت ایجاد کانال‌های میکروآوندی درون کامپوزیت‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که هر روش محدودیت‌های خودش را به لحاظ طراحی شبکه، ساده یا پیچیده، مجزا یا به هم پیوسته دارد [6]. در ابتدا، برای جهت استفاده از میکروکانال‌ها در نمونه‌های خودترمیم حاوی اپوکسی تلاش خود را انجام داد. او ابتدا لوله‌های پبپت را به صورت جفت-جفت کنار هم قرار داد و در یک لوله رزین و در دیگری هاردنر تزریق کرد. سپس این نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و نمونه‌ی اپوکسی آسیب دید و لوله‌ها دچار شکست شدند. این امر باعث آن شد که محتویات درون لوله‌ها به محل ترک جریان پیدا کرده و باعث ترمیم و بهبود استحکام از دست رفته نمونه شوند

ثانیاً مواد ترمیمی به دلیل ویسکوزیته‌ای که دارند به زمان کافی جهت نفوذ توسط نیروی موئینگی به محل آسیب و همچنین ایجاد پیوند مجدد در محل آسیب نیازمندند.

2-3- ایجاد آسیب اولیه

از دستگاه خمش سه‌نقطه‌ای به منظور ایجاد آسیب نمونه‌های شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی مواد خودترمیمی استفاده شد. ایجاد آسیب در نمونه‌ها با استفاده از خم کردن آن‌ها به میزان 8 میلی‌متر با نرخ بارگذاری 2 mm/min صورت گرفت. در شکل 2 مراحل انجام خمش سه‌نقطه‌ای و ایجاد آسیب در نمونه نشان داده شده است.

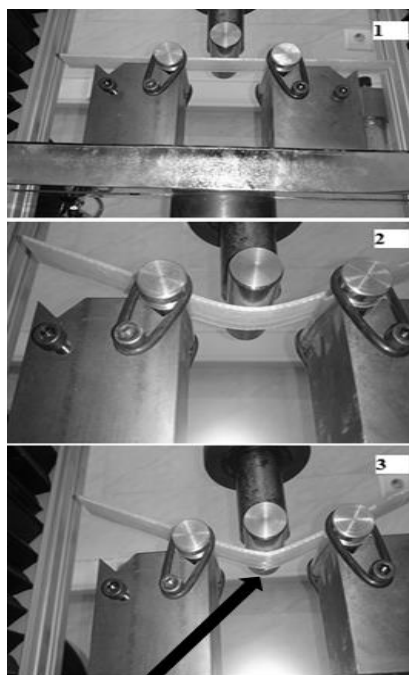
شکل 3 کامپوزیت حاوی میکروکانال‌های آوندی را در دو حالت قبل و پس از ایجاد آسیب، نشان می‌دهد. جهت تشخیص بهتر ناحیه‌ی آسیب دیده، مواد ترمیمی توسط مواد فلئورسانس ماورای بنفش رنگی شده‌اند.

2-4- آزمون خمش سه نقطه‌ای

برای بدست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب اولیه در چهار زمان مختلف (صفر، 4، 7 و 11 روز) تحت آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D790M قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل TB1 ساخت شرکت کوپا انجام شد. پس از آزمون خمش، نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام خمشی نمونه‌ها با توجه به استاندارد انجام شد.

2-5- آزمون کشش

برای بدست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب در چهار زمان مختلف (0، 4، 7 و 11 روز) تحت آزمون کشش مطابق استاندارد شماره



Damage creation

Fig. 2 The initial damage process through 3- point bending method, 1) Before damage, 2) While damage creation, 3) Damage creation
شکل 2 مراحل ایجاد آسیب توسط خمش سه‌نقطه‌ای، (1) قبل ایجاد آسیب، (2) حین ایجاد آسیب، (3) ایجاد آسیب

لاینتکس چین به عنوان فاز تقویت‌کننده الیافی استفاده شد. همچنین از سیم‌های پلیمری با قطرهای 280 و 500 میکرون جهت ایجاد میکروکانال‌ها با کسر حجمی یکسان ماده ترمیمی در داخل ساختار کامپوزیت استفاده شد. عوامل ترمیم نیز شامل رزین اپوکسی بیسفنول اف ML-526 و هاردنر مالئیک انیدرید (محصول شرکت مواد مهندسی مکرر) بود که در میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- روش ساخت نمونه‌ها

ساخت کامپوزیت از طریق روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق روش حذف پیش‌شکل‌های جامد انجام شد. ابتدا وزن مورد نیاز اپوکسی و هاردنر (با نسبت اختلاط 100 به 15) برای ساخت کامپوزیت 4 لایه (حاوی 30 درصد حجمی تقویت‌کننده) به دست آمد. همچنین سیم‌های پلیمری بین لایه‌های اول و دوم و همچنین لایه‌های سوم و چهارم پارچه الیاف شیشه قرار داده شدند.

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 روی الیاف تقویت‌کننده شیشه که پیش‌شکل‌های جامد در بین آن‌ها حضور داشتند، ریخته شد 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 استفاده شد.

پس از پخت اولیه کامپوزیت به مدت 4 ساعت در دمای محیط، پیش‌شکل‌های جامد (سیم‌های پلیمری) از داخل کامپوزیت خارج شده و میکروکانال‌های توخالی جهت تزریق مواد خودترمیم در داخل ساختار باقی ماندند. کانال‌ها با رزین اپوکسی و هاردنر انیدریدی توسط سرنگ انسولین پر شدند. لازم به ذکر است که جهت مقایسه‌ی نتایج با یک مقدار مرجع، نمونه‌های شاهد (نمونه‌های بدون میکروکانال)، نیز مطابق روش فوق ساخته شدند. پس از شکست و ایجاد عیب در نمونه‌های خودترمیم، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و عملیات ترمیم سازه شروع می‌شود. در این پژوهش، چهار نمونه با درصد حجمی ثابت عوامل ترمیم (4%) و زمان‌های مختلف ترمیم (صفر، 4، 7 و 11 روز) جهت رسیدن به بالاترین راندمان ترمیم، پس از ایجاد آسیب اولیه با خمش مورد آزمایش قرار گرفتند. دلیل انتخاب این مدت زمان‌های ترمیم آن است که اولاً زمان پخت سیستم ترمیمی در این پژوهش 4 روز بود و لذا باید حداقل 4 روز برای مشاهده میزان استحکام بهبود یافته در نظر گرفته می‌شد.

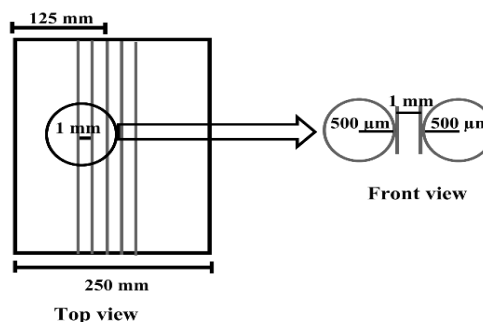


Fig. 1 The position of polymeric wires in specimens to create the microchannels

شکل 1 موقعیت سیم‌های پلیمری جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل نمونه‌ها

3-1-2- نمونه‌های خودترمیم

چهار نمونه با کسر حجمی یکسان ثابت مواد ترمیمی (4%) جهت بدست آوردن بهترین زمان ترمیم مورد آزمون خمش قرار گرفتند. با توجه به شکل 5، استحکام خمشی نمونه حاوی 4% عامل ترمیمی در بازه‌های صفر، 4، 7 و 11 روز پس از ایجاد آسیب به ترتیب 198، 253.14، 297.1 و 285.06 مگاپاسکال بدست آمد. با گذشت زمان از صفر روز به 4 روز نمونه ترمیم می‌شود، چرا که هنگام ایجاد آسیب در بین میکروکانال‌ها اختلاف فشار به وجود می‌آید و این اختلاف فشار و همچنین نیروی موئینگی باعث خروج عوامل ترمیم می‌شود. از آنجایی که 4 روز زمان کافی جهت خروج عوامل ترمیم و برقراری پیوند مجدد با زمینه نیست لذا در 4 روز، تنها ترمیم جزئی مناطق آسیب دیده مشاهده می‌شود و لذا حداکثر استحکام خمشی در این مدت زمان بدست نمی‌آید. با گذشت زمان، عوامل ترمیم فرصت لازم جهت نفوذ به مناطق آسیب دیده را پیدا می‌کنند، بنابراین در مدت زمان 7 و 11 روز وسعت ناحیه ترمیم بیشتر شده و حداکثر استحکام خمشی حاصل می‌شود.

3-2- نتایج آزمون کشش

3-2-1- نمونه‌های شاهد

در آزمون کشش بر روی نمونه‌های شاهد (نمونه‌ی بدون میکروکانال) مشابه آزمون خمش، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل 6، نمودار تنش- کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. مطابق با نمودار شکل 6 و با استفاده از روابط مربوطه، استحکام کششی در نمونه‌ی بدون ایجاد آسیب 320.2 مگاپاسکال و در نمونه‌ی پس از ایجاد آسیب 160.5 مگاپاسکال بدست آمد.

3-2-2- نمونه‌های خودترمیم

چهار نمونه با کسر حجمی یکسان 4 درصد جهت به‌دست آوردن بهترین زمان ترمیم مورد آزمون کشش قرار گرفت.

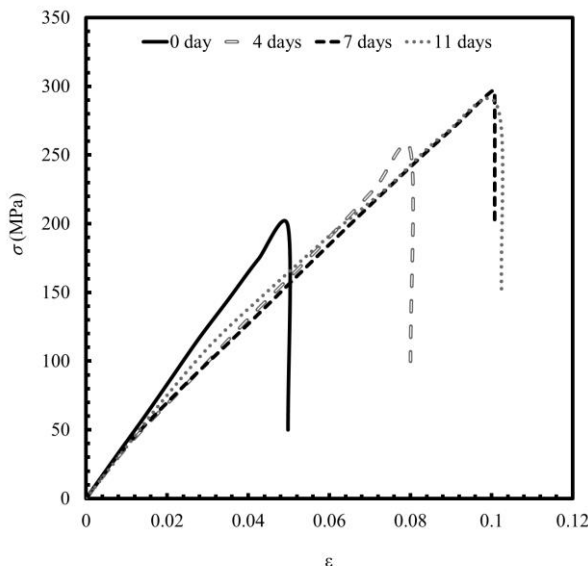


Fig. 5 The bending response of specimens with 4 vol% healing agent after 4 different healing time

شکل 5 رفتار خمشی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف پس از آسیب اولیه

ASTM D3039M قرار گرفتند. در این حالت نیز جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل TB1 ساخت شرکت کوپا انجام شد پس از آزمون کشش، نمودار نیرو- جابه‌جایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام کششی نمونه‌ها با توجه به استاندارد کشش انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون خمش

3-1-1- نمونه‌ی شاهد

در ارتباط با نمونه‌های شاهد، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل 4، نمودار تنش بر حسب کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. مطابق با نمودار شکل 4 و با استفاده از روابط مربوطه، استحکام خمشی در نمونه‌ی بدون ایجاد آسیب، 360 مگاپاسکال و در نمونه‌ی پس از ایجاد آسیب، 200 مگاپاسکال بدست آمد. این افت استحکام کاملاً طبیعی بوده چرا که آسیب اولیه توسط خمش صورت گرفته است و دو لایه‌ی پایینی و بالایی (لایه اول و چهارم) که به ترتیب تحت کشش و فشار می‌باشند، آسیب دیده‌اند.

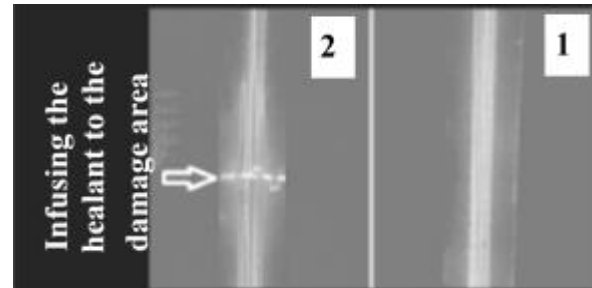


Fig. 3 Microvascular channels based composite under ultraviolet ray, 1) Before damage, 2) Infusing healant to the damage zones

شکل 3 کامپوزیت حاوی میکروکانال‌های آوندی زیر اشعه‌ی ماورای بنفش، (1) قبل آسیب، (2) نفوذ عوامل ترمیم به مناطق آسیب دیده

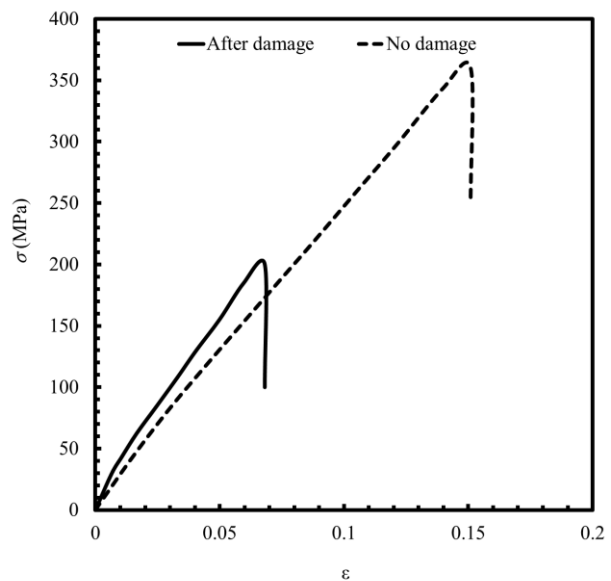


Fig. 4 Flexural strength of after damage case and no damage specimens case

شکل 4 استحکام خمشی نمونه‌ی شاهد در دو حالت بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب

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

به طور کلی استحکام نمونه‌های خودترمیم (حاوی میکروکانال‌های آوندی) در مقایسه با نمونه‌های شاهد (بدون میکروکانال‌های آوندی) در هر دو حالت خمش و کشش به علت گسستگی در آرایش و چیدمان لایه‌ها کمتر است [19]. همچنین با مقایسه نمونه‌های شاهد و خودترمیم در هر دو حالت خمش و کشش می‌توان به این نکته پی برد که حضور میکروکانال‌ها در بین لایه‌های کامپوزیت باعث به وجود آمدن تمرکز تنش شدیدتر اطراف میکروکانال‌ها می‌شود. این تنش‌های شدید به علت پیدایش پدیده موج‌دار شدن لایه‌ها¹ و ایجاد ناپوستگی در ساختار، باعث به وجود آمدن نواحی غنی از رزین² می‌شوند و این نواحی به علت عدم وجود تقویت کننده باعث می‌شوند که ظرفیت تحمل بار کامپوزیت کاهش یابد. مسئله‌ی دیگری که مطرح است بحث استحکام برشی بین لایه‌ای³ هنگام ایجاد آسیب می‌باشد. استحکام برشی بین لایه‌ای به حضور جاهای خالی بین لایه‌ای، حفره‌ها و یا عیوبی که حین مراحل ساخت کامپوزیت ایجاد می‌شوند، حساس است. با توجه به این موضوع، میکروکانال‌ها به‌عنوان حفره‌های بین لایه‌ای عمل می‌کنند و به‌طور قابل توجهی استحکام برشی بین لایه‌ای را کاهش می‌دهند [20]. پس به طور کلی میکروکانال‌ها باعث افت خواص به مقدار جزئی می‌شوند، ولی از طرف دیگر، میکروکانال‌های حاوی عوامل ترمیمی این قابلیت را دارند تا آسیب ایجاد شده در سازه را ترمیم کرده و در نهایت از انهدام سازه جلوگیری به عمل بیاورند. بدین منظور لازم است تا راندمان ترمیم در هر دو حالت خمش و کشش محاسبه شود. برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم (η)، از رابطه (1) استفاده شده است [2]:

$$\eta = \frac{f_{healed} - f_{damaged}}{f_{virgin} - f_{damaged}} \quad (1)$$

که در این رابطه f بیانگر خاصیت مورد اندازه‌گیری است و اندیس‌های $healed$ ، $damaged$ ، $virgin$ به ترتیب بیان‌گر نمونه‌های دست نخورده (نمونه‌های حاوی میکروکانال و آسیب ندیده)، نمونه‌های آسیب دیده و نمونه‌های ترمیم شده می‌باشند. با توجه به رابطه 1، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در نمودار شکل 8 نشان داده شده است. مطابق این نمودار، پس از ایجاد آسیب در مدت زمان‌های مختلف ترمیم از صفر به 11 روز، روند صعودی افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی وجود دارد، به طوری که در 4 روز، کمترین نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب و در نهایت کمترین راندمان ترمیم به میزان 56% و 38% به ترتیب در هر دو حالت کشش و خمش بدست آمده است. اما در مدت زمان 7 روز، بیشترین نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب و نهایتاً بیشترین راندمان ترمیم به میزان 68.05% و 59.07% به ترتیب در هر دو حالت کشش و خمش مشاهده شده است. همچنین زمان بیشتر (11 روز) تأثیری در نفوذ بیشتر عوامل ترمیم و نهایتاً افزایش راندمان ترمیم در مقایسه با 7 روز نداشته است. نتایج استریو موجود در شکل 9، صحت نتایج بدست آمده را تایید می‌کند. با توجه به شکل 9 مشخص است که بعد از 4 روز از ایجاد آسیب اولیه، نفوذ عوامل ترمیم در نواحی نزدیک به میکروکانال‌ها اتفاق افتاده است و نواحی دورتر، ترمیم نشده‌اند، اما وقتی زمان ترمیم بیشتر شود (7 روز)، نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب بیشتر شده و این عوامل ترمیم با خیس کردن کامل محل ترک باعث ترمیم سازه و حذف ترک‌های ایجاد شده می‌شوند.

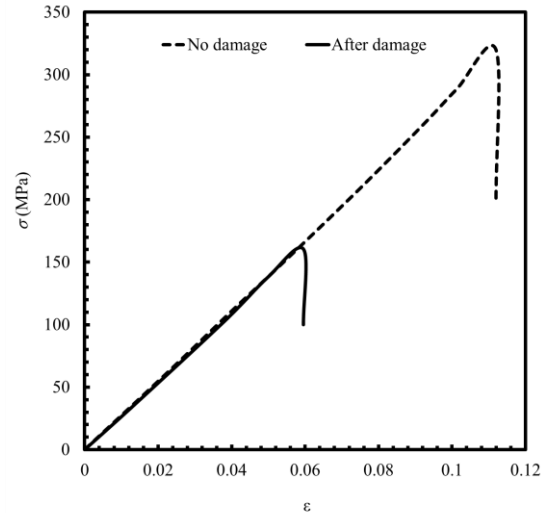


Fig. 6 Tensile strength of after damage and no damage specimens
شکل 6 استحکام کششی نمونه‌ی شاهد در دو حالت بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب

با توجه به شکل 7، استحکام کششی نمونه حاوی 4 درصد حجمی ماده ترمیمی در بازه‌های صفر، 4 و 7 و 11 روز پس از ایجاد آسیب به ترتیب 149.7، 241.05، 261.6 و 261 مگاپاسکال به دست آمد. با گذشت زمان، نمونه ترمیم می‌شود و پس از گذشت 7 روز به حداکثر استحکام کششی 261.6 مگاپاسکال می‌رسد. دلیل روند صعودی افزایش استحکام با گذشت زمان، آزاد شدن عوامل ترمیم و جاری شدن آن‌ها به محل ترک توسط نیروی موئینگی و ایجاد پیوند با زمینه است. همچنین در اثر گذشت زمان، پخت کامل عوامل ترمیم و نفوذ زنجیره‌های مولکولی در هم اتفاق افتاده است که خود باعث افزایش استحکام می‌شود. با توجه به نمودار شکل 7 می‌توان مشاهده کرد که پخت تقریباً کامل رزین در زمان 7 روز اتفاق افتاده است و زمان بیشتر تأثیر زیادی بر ترمیم ندارد. پخت کامل عوامل ترمیم بعد از 7 روز نه تنها بیشترین استحکام را در پی دارد، بلکه باعث افزایش انرژی لازم تا شکست کامپوزیت می‌شود.

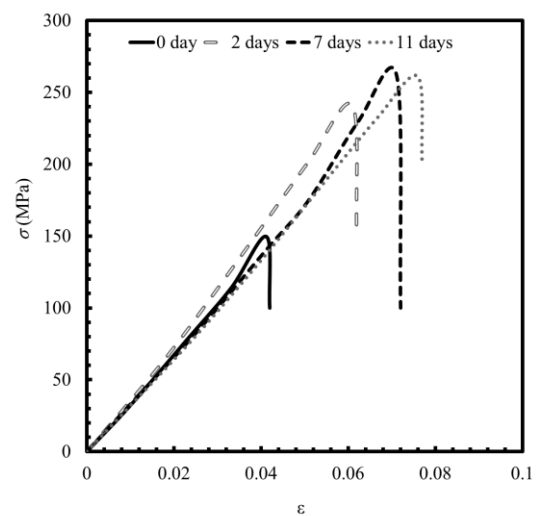


Fig. 7 Tensile strength of specimens with 4 vol.% healing agent after 4 different healing time

شکل 7 استحکام خمشی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف پس از آسیب

¹ Wavy plies

² Resin rich

³ Interlaminar shear strength

- با مقایسه زمان‌های ترمیم 4، 7 و 11 روز پس از آسیب اولیه، بهینه‌ترین زمان ترمیم کامپوزیت به ازای 7 روز بدست آمد.
- بیشترین مقدار بازیابی در استحکام خمشی و استحکام کششی کامپوزیت بعد از گذشت 7 روز از ایجاد آسیب اولیه حاصل شد.
- بازده ترمیم بهینه در آزمون‌های خمش و کشش به ترتیب به میزان 59.07 و 68.05 درصد بعد از گذشت 7 روز از ایجاد آسیب اولیه بدست آمد.

مراجع

[1] 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.

[2] Kaufmann, M., Zenkert, D., Mattei, C., "Cost Optimization of Composite Aircraft Structures Including Variable Laminate Qualities", Composite Science and Technology, Vol. 68, pp. 2748-2754, 2008.

[3] Emami, M., Aram, E., Mahdavian, A., "Smart Polymers: Self Healing Polymers", Scientific Quarterly, Vol. 1, pp. 27-38, 1392. (in Persian)

[4] White, S. R., Blaiszik, B. J., Kramer, S., Olugebefola, S. C., Moore, J. S. and Sottos, N. R., "Self-healing Polymers and Composites", American Science, Vol. 99, No. 5, pp. 392-399, 2011.

[5] Blaiszik, B., Self-Healing Polymers and Composites, Annual Review of Materials Research, Vol. 40, pp. 179-211, 2010.

[6] Saeed, M. U., Chen, Z. and Li, B., "Manufacturing Strategies For Microvascular Polymeric Composites: A review", Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 78, pp. 327-340, 2015.

[7] Dry, C., "Procedures Developed for Self-Repair of Polymer Matrix Composite Materials", Composite Structures, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.

[8] Dry, C. M., "Self-Repairing Reinforced Matrix Materials", US Pat. 6,261,360, 2001.

[9] Norris, C. J., White, J. A. P., McCombe, G., Chatterjee, P., Bond, I. P., Trask, R. S., "Autonomous Stimulus Triggered Self-Healing in Smart Structural Composites", Smart Materials and Structures, Vol. 21, pp. 1-10, 2012.

[10] Bleay, S. M., Loader, C. B., Hawyes, V. J., Humberstone, L., Curtis, P. T., "A Smart Repair System for Polymer Matrix Composites", Composites Part A, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.

[11] Trask, R. S., Bond, I. P., "Biomimetic Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 704-710, 2006.

[12] Trask, R. S., Williams, G. J., Bond, I. P., "Bioinspired Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", Journal of Royal Society Interface, Vol. 4, pp. 363-371, 2007.

[13] Williams, G., Trask, R. and Bond, I., "A Self-Healing Carbon Fibre Reinforced Polymer for Aerospace Applications", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 6, pp. 1525-1532, 2007.

[14] Williams, G. J., Bond, I. P., Trask, R. S., "Compression After Impact Assessment of Self-Healing CFRP", Composites: Part A, Vol. 40, pp. 1399-1406, 2009.

[15] Hamilton, A. R., Sottos, N. R., White, S. R., "Pressurized Vascular Systems for Self-Healing Materials", Journal of Royal Society Interface, Vol. 9, pp. 1020-1028, 2012.

[16] Wu, A. S., Coppola, A. M., Sinnott, M. J., Chou, T.W., Thostenson, E. T., Byun, J. H., "Sensing of Damage and Healing in Three-Dimensional Braided Composites with Vascular Channels Composite Science and Technology, Vol. 72, No. 13, pp. 1618-1626, 2012.

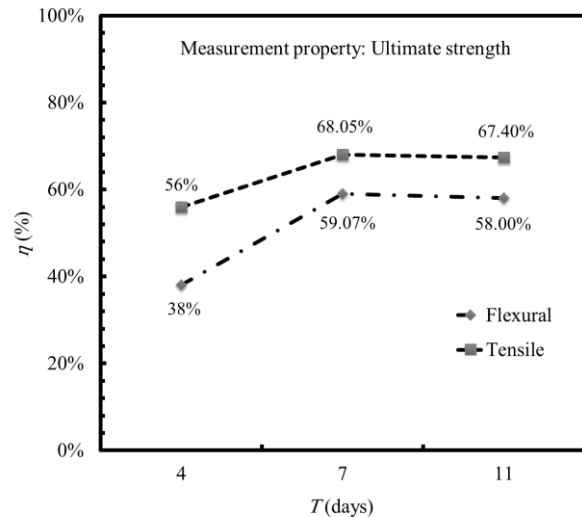


Fig. 8 The relation between healing efficiency and healing time.

شکل 8 ارتباط بین زمان ترمیم و بازده ترمیم در حالت کشش و خمش

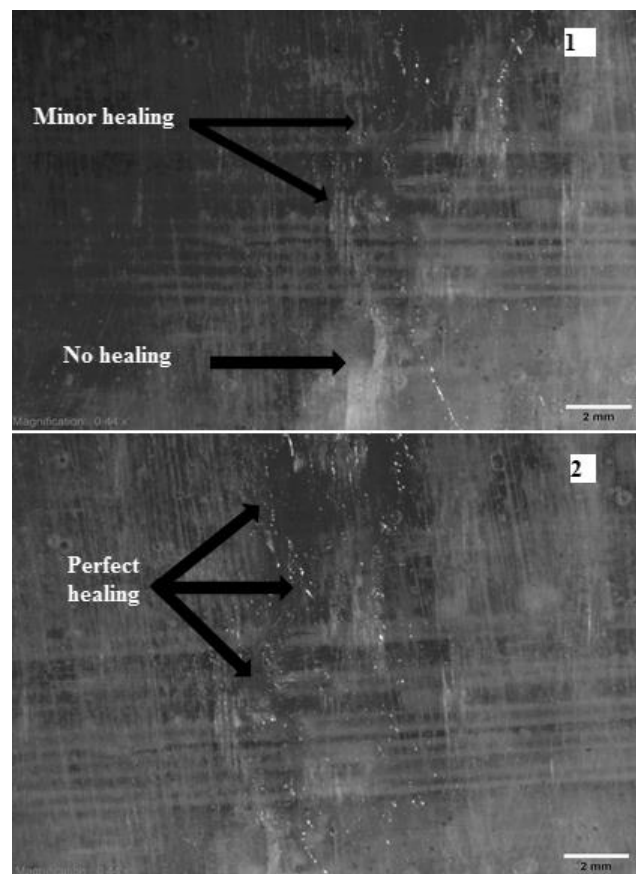


Fig. 9 Flowing of healing agent after, 1) 4 days, 2) 7 days

شکل 9 نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب بعد از، 1) 4 روز، 2) 7 روز

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر زمان بر رفتار ترمیمی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه خودترمیم حاوی میکروکانال‌های آوندی در شرایط بارگذاری‌های خمشی و کششی بررسی شد. نتایج نهایی حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است:

- [17] Trask, R. S., Bond, I. P., "Bioinspired Engineering Study of Plantae Vasculae for Self-Healing Composite Structures", *Journal of Royal Society Interface*, Vol. 7, pp. 921-931, 2010.
- [18] Norris, C. J., Meadway, G. J., O'Sullivan, M. J., Bond, I. P., Trask, R. S. "Self-Healing Fibre Reinforced Composites Via a Bioinspired Vasculature", *Advanced Functional Materials*, vol. 21, pp. 3624-33, 2011.
- [19] Eslami-Farsani, R., Sari, A., Khosravi, H., "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, 2017. (in Persian)
- [20] Muhammad-Umar, S., Li, B., Chen, Zh., "Mechanical Effects of Microchannels on Fiber-Reinforced Composite Structure", *Composite Structures*, Vol. 154, pp. 129-141, 2016.

