

رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف شیشه خودترمیم شونده بر پایه‌ی کانال‌های میکروآوندی تحت شرایط بارگذاری کششی

محمد امین محمدی
 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

رضا اسلامی فارسانی*
 دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

حامد خسروی
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

چکیده

در این تحقیق یک سیستم خودترمیم بر پایه کانال‌های میکروآوندی در کامپوزیت زمینه پلیمری الیافی به کار گرفته شده است. کانال‌های میکروآوندی با روش از بین بردن پیش‌شکل‌های جامد، که در هنگام ساخت نمونه داخل ساختار کامپوزیت قرار داده شده بودند، ایجاد شدند. برخی از کانال‌ها با مخلوط رزین اپوکسی و سخت کننده انیدریدی و برخی دیگر با شتاب دهنده‌ی مایع پر شدند. زمانی که سازه تحت بارگذاری قرار بگیرد باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند میکروتکرک‌ها می‌شود که این میکروتکرک‌ها در ادامه کار رشد کرده و پس از شکستن میکروکانال‌ها باعث آن می‌شوند که ماده ترمیمی ذخیره شده در کانال‌ها به محل آسیب جریان یابد و در اثر گذشت زمان آسیب ایجاد شده حذف شود. هدف از این تحقیق، بررسی زمان ترمیم و کسر حجمی ماده ترمیمی بر روی راندمان ترمیم ساختار پس از ایجاد آسیب اولیه می‌باشد. برای این منظور، استحکام کششی نمونه‌ها در مدت زمان‌های ترمیم متفاوت پس از ایجاد آسیب، به دست آورده شد که مشاهدات حاکی از آن بود که بیشترین راندمان ترمیم به میزان ۶۴/۹ درصد در نمونه‌ی با کسر حجمی ۴ درصد پس از گذشت ۷ روز حاصل شد. **واژه‌های کلیدی:** میکروتکرک‌ها، خودترمیمی، کانال‌های میکروآوندی، پیش‌شکل‌های جامد، استحکام کششی، راندمان ترمیم.

On the Mechanical Response of Microvascular-based Self-healing E-glass Fiber/epoxy Composites under tensile testing condition

M.A. Mohammadi
 R. Eslami-Farsani
 H. Khosravi

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

Abstract

In this study, a microvascular-based self-healing system has been introduced and employed in fibrous polymer-based composites. Microvascular channels were created using removable solid pre-forms which were placed in the structure of composite during specimen fabrication. Some of the channels were filled with epoxy resin+anhydride hardener as a healing agent and some others were filled by liquid catalyst. When the structure is subjected to the loading and micro-cracks created in the specimen, they will break the microchannels and then the healing agent flows in the damage area, leading to the elimination of the defects over a time span. This study aimed at investigating the role of healing time and healant volume fraction on the healing efficacy of structure after initial damage created through bending method. To do so, tensile strength of the specimens were assessed after passing the different time span from the initial damage creation. The observations indicated that the highest tensile strength recovery was 64.9% after 7 days.

Keywords: Microcracks, Self-healing, Microvascular channels, Removable solid pre-forms, Tensile strength, healing efficiency.

پلیمری را داشته باشیم که ابتدا نیاز به تشخیص محل آسیب توسط بازدیدهای چشمی، دستگاه‌های غیرمخرب (مانند دستگاه فراصوت) و یا تابش اشعه ایکس و در ادامه، نیاز به فرآیند زمان‌بر ترمیم وجود دارد. در بسیاری از مواد پلیمری و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری که محل آسیب دیده برای تشخیص و اعمال فرآیند ترمیم قابل دسترسی نیست، می‌توان از کامپوزیت‌هایی استفاده کرد که قابلیت ترمیم به صورت خود به خودی را داشته باشند. این گونه از کامپوزیت‌ها تحت عنوان کامپوزیت‌های خودترمیم شونده^۱ شناخته می‌شوند. به طور کلی سیستم خودترمیم، سیستمی است که بتواند تنها در معرض حمله‌ی

۱- مقدمه

پلیمرها و سازه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر به فردشان از جمله استحکام و مدول ویژه بالا، فرآیندپذیری خوب و پایداری شیمیایی در شرایط اتمسفری مختلف، کاربردهای گوناگونی در وسایل نقلیه (ماشین، سفینه‌های فضایی، کشتی و غیره)، کالاهای ورزشی، مهندسی عمران و الکترونیک را دارند. با وجود تمام این مزیت‌ها، بشر هنگام استفاده از این مواد با عیوب مختلفی روبه‌رو است که این عیوب می‌توانند ناشی از رفتار مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، تشعشعات ماورای بنفش یا ترکیبی از این موارد باشند [۱]. یکی از این عیوب رایج، حضور میکروتکرک‌ها در سازه می‌باشد که با ادامه‌ی روند بارگذاری روی سازه، میکروتکرک‌ها به هم می‌پیوندند و باعث انهدام و شکست قطعه می‌شوند. جهت جلوگیری از انهدام سازه‌ی مورد نظر بایستی ترمیم درجای مواد

¹ Self-healing composites

عامل تخریبی، عوامل ترمیم‌کننده آزاد کند، به صورتی که انسجام فیزیکی و استحکام مکانیکی ماده را پس از تخریب بازابد [۲].

به طور کلی دونوع 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 می‌شود. 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 [۳]. روش دیگر خودترمیمی غیرذاتی، روش استفاده از کانال‌های میکروآوندی می‌باشد که می‌توان با الگوبرداری از این سیستم‌های عروقی در بدن موجودات (سیستم‌های زیستی)، جهت ایجاد مواد مرکب خودترمیم (سیستم‌های سنتزی) استفاده کرد [۴]. سیستم‌های آوندی که در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توانند به صورت یک‌بعدی، دو‌بعدی و یا سه‌بعدی باشند. در این سیستم‌ها می‌توان چندین عملکرد مانند خنک‌کنندگی سازه، سنجش آسیب سازه، خودترمیمی و غیره را داشته و کارایی کامپوزیت مورد نظر را افزایش داد. به علت مزایای بی‌شمار ساختارهای میکروآوندی تقاضای آن‌ها به طور فزاینده رو به افزایش است و نتایج آن‌ها به وفور در مقالات منتشر شده است [۵].

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 [۵]. در ابتدا برای [۶] جهت استفاده از میکروکانال‌ها در نمونه‌های خودترمیم حاوی اپوکسی تلاش خود را انجام داد. او ابتدا لوله‌های پپیت را به صورت جفت‌جفت 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 [۸]. در ادامه نوریس و همکارانش [۹] از لوله‌های شیشه‌ای با قطر ۰/۵ میلی‌متر در کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن استفاده کرده تا ساختاری با دو خاصیت خودترمیمی و سنجش آسیب را داشته باشند. زمان آسیب، میکروتورک 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 [۱۰ و ۱۱] اولین استفاده از الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر خارجی ۱۵ میکرون و قطر داخلی ۵ میکرون به عنوان میکروکانال جهت ذخیره‌ی مواد ترمیمی را داشتند. آن‌ها قابلیت پر کردن تنها نیمی از الیاف توخالی به علت قطر داخلی کم الیاف و رزین با لزجت بالا را

داشتند. این پر کردن الیاف به صورت جزئی باعث شد که وقتی ناحیه‌ای آسیب دید، انتقال رزین به آن ناحیه ناکامل باشد و در نتیجه‌ی آن ترمیم ماده هنگام آزمون فشار پس از ضربه محدودیت داشته باشد. پانگ و بوند [۱۲] با توجه به این مطلب از یک الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر بیشتر (قطر ۶۰ میکرون) و یک محلول خودترمیم دوجزئی در یک کامپوزیت هیبریدی زمینه اپوکسی استفاده کردند. آن‌ها از آزمون خمش چهارنقطه‌ای پس از ضربه استفاده کردند و خودترمیمی این نمونه‌ها را بررسی کردند و به بازیابی استحکام ۹۷ درصد از طریق ترمیم نمونه‌ها دست یافتند. تراسک و ویلیامز [۱۳-۱۶] با هدف توسعه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده حاوی الیاف شیشه توخالی برای کاربردهای هوافضایی اقدام به بررسی بازده ترمیم در نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی تحت آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای و فشار پس از ضربه نمودند و به ترتیب به بازده ترمیم ۹۷ و ۱۰۰ درصد رسیدند. همیلتون و همکارانش [۱۷] 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. و همکارانش [۱۸] از تک رشته‌های تریلن^۱ برای تولید شبکه‌های میکروآوندی با کانال‌های مستقیم که حاوی نانولوله‌های کربنی بود استفاده کردند. آن‌ها از این شبکه‌ها جهت ذخیره عامل ترمیمی و انتقال آن‌ها به محل ترک استفاده کردند. تراسک و باند [۱۹] شبکه‌های آوندی را در کامپوزیت‌های الیاف کربن به وسیله‌ی ذوب الیاز^۲ لحیم دما پایین ایجاد کردند. دمای ذوب به حدی بالا بود که الیاز^۲ به راحتی خارج شود و به حدی پایین بود که دمای پخت رزین مقاومت کند. استحکام فشاری کامپوزیت آن‌ها پس از ضربه^۳ به مقدار ۷۰ درصد کاهش یافت. در ادامه نوریس و همکارانش [۲۰] فعالیت ترسک و باند را گسترش دادند و با اعمال مواد خودترمیم در داخل میکروکانال‌ها توانستند که استحکام پس از ضربه در پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف^۳ را تا ۹۷ درصد بازیابی کنند.

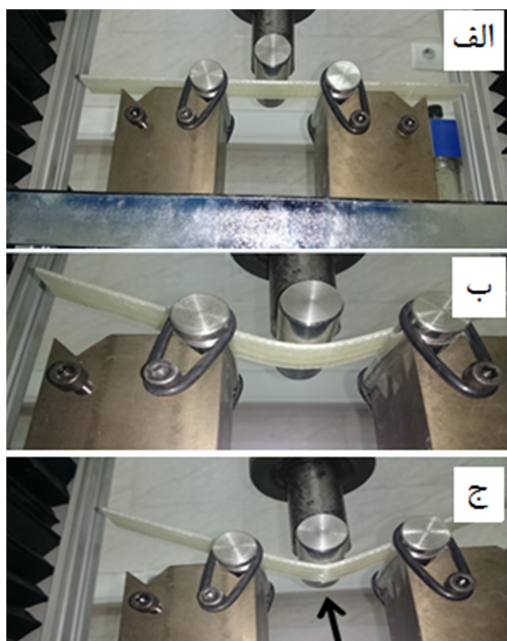
در ادامه‌ی تحقیقات پیشین، هدف از پژوهش حاضر، بررسی زمان ترمیم مناسب جهت دستیابی به بیشترین بازدهی ترمیمی در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه حاوی میکروکانال‌های آوندی تحت آزمون کشش است. در این کامپوزیت‌ها از پیش شکل‌های جامد قابل حذف برای ایجاد میکروکانال‌های یک‌بعدی جهت ذخیره‌ی عوامل ترمیمی درون ساختار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

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی ML-506 و سخت‌کننده آمینی HA-11 (ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر) به عنوان فاز زمینه و از پارچه الیاف شیشه دو جهته نوع E با دانسیته سطحی ۴۰۰g/m² محصول شرکت LINTEX چین با استحکام کششی حدود

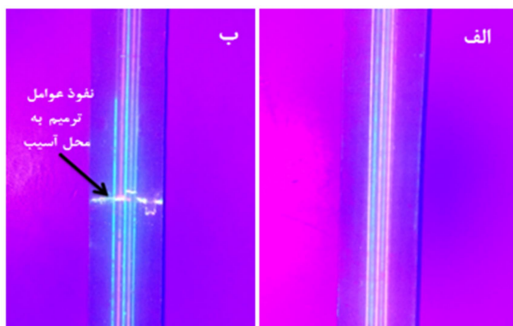
1 Trilene monofilament
2 Compression after impact (CAI)
3 Fiber-reinforced polymers



ایجاد آسیب

شکل ۱- مراحل ایجاد آسیب توسط آزمون خمش سه نقطه‌ای، الف) قبل ایجاد آسیب، ب) حین ایجاد آسیب، ج) ایجاد آسیب

ابتدا چهار نمونه با کسر حجمی یکسان ۴ درصد جهت بدست آوردن بهترین زمان ترمیم و سپس سه نمونه خودترمیم با کسر حجمی‌های مختلف ۲.۵٪، ۴٪ و ۸٪ جهت بدست آوردن بهترین کسر حجمی در مدت زمان ثابت مورد آزمون خمش جهت ایجاد آسیب قرار گرفتند. همچنین جهت مقایسه نتایج، یک نمونه کنترلی (نمونه بدون میکروکانال) در دو حالت بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۲ آسیب ایجاد شده در نمونه‌های خودترمیم را توسط دستگاه خمش نشان می‌دهد. جهت تشخیص بهتر ناحیه‌ی آسیب دیده، مواد ترمیمی توسط مواد فلوروسانس ماورای بنفش رنگی شده‌اند.



شکل ۲- نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب در نمونه کامپوزیتی حاوی میکروکانال‌های یک‌بعدی مواد ترمیمی، الف) قبل ایجاد آسیب، ب) پس از ایجاد آسیب

به عنوان فاز تقویت‌کننده الیافی استفاده شد. همچنین از سیم‌های پلیمری با قطر ۵۰۰ و ۷۰۰ میکرون جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل ساختار کامپوزیت استفاده شد. عوامل ترمیم شامل رزین اپوکسی ML526، سخت‌کننده انیدریدی HAS9 و کاتالیزور Ax11 (محصول شرکت مواد مهندسی مکر) در میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. سیالیت بالا از دلایل انتخاب این نوع سیستم خودترمیمی بود.

۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

ساخت کامپوزیت از طریق روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق روش حذف پیش‌شکل‌های جامد انجام شد. بدین منظور ابتدا چهار لایه پارچه شیشه با ابعاد مناسب جهت ساخت نمونه کامپوزیتی برش داده شدند. سپس وزن مورد نیاز اپوکسی و سخت‌کننده که نسبت اختلاط ۱۰۰ به ۱۵ را دارند برای ساخت کامپوزیت ۴ لایه (۳۰ درصد حجمی تقویت‌کننده) به دست آمد. همچنین سیم‌های پلیمری بین لایه‌های اول و دوم و لایه‌های سوم و چهارم قرار داده شدند. علت قراردادی در بین این لایه‌ها نزدیک‌بودن به نواحی تحت کشش و فشار هنگام تخریب توسط دستگاه آزمون خمش بود. پس از این مراحل مخلوط رزین و سخت‌کننده 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 به مدت ۴ 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. برخی از کانال‌ها از رزین اپوکسی و سخت‌کننده انیدریدی که با نسبت ۱۰۰ به ۹۰ ترکیب شده بودند، و برخی دیگر از شتاب دهنده‌های مایع متیل ایمیدازول 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 شتاب دهنده‌ی مذکور عملیات پلیمریزاسیون موضعی و ترمیم مجدد سازه شروع می‌شود.

۲-۳- نحوه‌ی ایجاد آسیب در نمونه‌ها

از دستگاه آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790M به منظور ایجاد آسیب نمونه‌های شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی مواد خودترمیمی استفاده شد. ایجاد آسیب در نمونه‌ها از طریق خم کردن به میزان ۱۰ میلیمتر با نرخ بارگذاری ۲mm/min صورت گرفت. در شکل ۱ مراحل انجام خمش سه نقطه‌ای و ایجاد آسیب در نمونه نشان داده شده است.

۴-۲- آزمون کشش

برای به دست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب در چهار زمان مختلف (۰،۴، ۷ و ۱۱ روز) تحت آزمون کشش مطابق شکل ۳ قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. تخریب و آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل کوپا با قابلیت اعمال ۵۰ KN نیرو انجام شد. پس از آزمون کشش، نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام کششی نمونه‌ها با توجه به استاندارد کشش ASTM D3039M انجام شد.

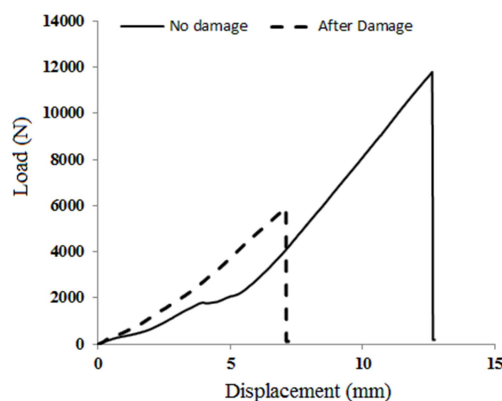


شکل ۳- نحوه انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌ی کامپوزیتی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمونه شاهد

در ارتباط با نمونه‌های شاهد، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل ۴، نمودار نیرو-جابجایی برای این نمونه‌ها آورده شده است.



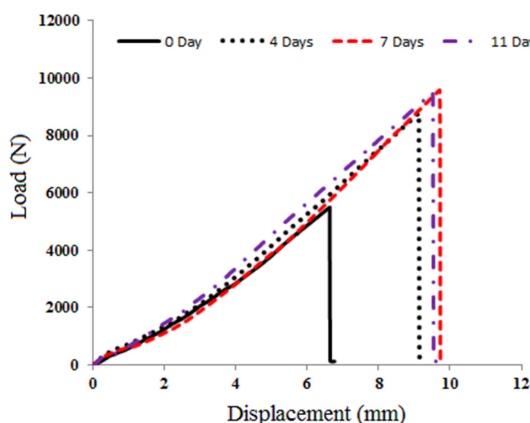
شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌ی شاهد در دو حالت بدون تخریب و پس از ایجاد تخریب

مطابق با نمودار شکل ۴ و با استفاده از روابط مربوطه استحکام کششی در نمونه‌ی بدون ایجاد آسیب ۲۳۷/۲ و در نمونه‌ی پس از ایجاد آسیب ۱۱۸/۹ مگاپاسکال بدست آمد. بنابراین افت استحکامی به اندازه ۵۰ درصد پس از ایجاد آسیب مشاهده شد. این افت استحکام کاملاً طبیعی بوده چرا که تخریب توسط خمش صورت گرفته است و دو لایه‌ی پایینی و بالایی (لایه اول و چهارم) که به ترتیب نواحی تحت کشش و فشار می‌باشند آسیب دیده و دو لایه از کامپوزیت چهار لایه آسیب دیده است. این میزان کاهش استحکام پس از ایجاد آسیب و خم کردن نمونه به میزان ۱۰ میلی‌متر مشاهده شده است.

۴-۲- نمونه‌های خود ترمیم

۴-۲-۱- محاسبه زمان ترمیم بهینه

ابتدا چهار نمونه با کسر حجمی یکسان ۴ درصد جهت بدست آوردن بهترین زمان ترمیم مورد آزمون کشش قرار گرفت. با توجه به شکل ۵ و با استفاده از روابط مربوطه استحکام کششی نمونه‌ی حاوی ۴ درصد حجمی ماده ترمیمی در بازه‌های صفر، ۴ و ۷ و ۱۱ روز پس از ایجاد آسیب به ترتیب ۱۰۹/۹، ۱۷۵/۵، ۱۹۲/۵ و ۱۹۱/۰ مگاپاسکال به دست آمد. با گذشت زمان، نمونه ترمیم می‌شود و پس از گذشت ۷ روز به حداکثر استحکام ۱۹۲/۵ 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 را داریم که خود باعث افزایش استحکام می‌شود. با توجه به نمودار شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که پخت تقریباً کامل رزین در زمان هفت روز اتفاق افتاده است و زمان بیشتر تاثیر زیادی بر ترمیم ندارد. پخت کامل عوامل ترمیم بعد از هفت روز نه تنها بیشترین استحکام را در پی دارد بلکه باعث افزایش انرژی لازم تا شکست کامپوزیت می‌شود.



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی عامل ترمیمی و پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف پس از تخریب

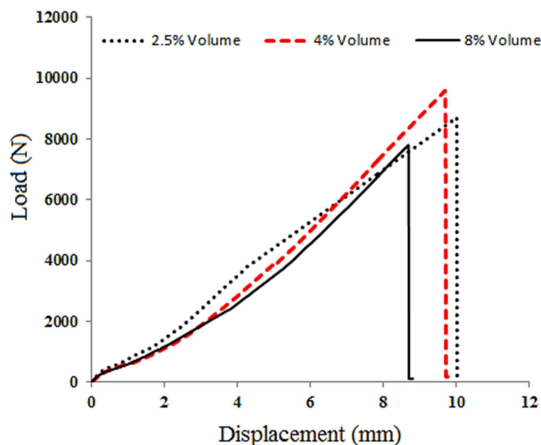
در ارتباط با نمونه ۸ درصد ماده ترمیم می‌توان گفت که بیشترین ماده ترمیمی مربوط به این نمونه است، اما از آنجایی که حجم کانال‌هایی که ایجاد شده، زیاد هستند کانال‌ها به صورت نواحی گسسته در ساختار عمل کرده و افت خواص کامپوزیت را در پی دارد. از طرفی هم به دلیل حجم بالای مواد ترمیمی ذخیره شده در ساختار، جاری شدن مواد ترمیمی به ناحیه‌ی آسیب دیده بیشتر بوده و باعث ترمیم بهتر نسبت به نمونه حاوی ۲/۵ درصد عامل ترمیمی شده است. بنابراین بایستی یک حد بهینه برای کسر حجمی مواد ترمیمی پیدا کرد. از آنجایی که نمونه‌ی ۴ درصد بیشترین استحکام را به علت تناسب بین حجم ناحیه‌ی آسیب‌دیده با حجم مواد ترمیمی ذخیره شده در میکروکانال‌ها دارد و همچنین نیروی مویبندی جهت انتقال مواد ترمیمی به اکثر نواحی آسیب دیده کافی است، لذا حد بهینه‌ی کسر حجمی جهت ذخیره‌ی ماده ترمیمی در داخل ساختار کامپوزیت را در میان درصد‌های مورد استفاده در این تحقیق دارد.

۳-۲-۳- مقایسه نمونه‌های خودترمیم با نمونه‌ی شاهد

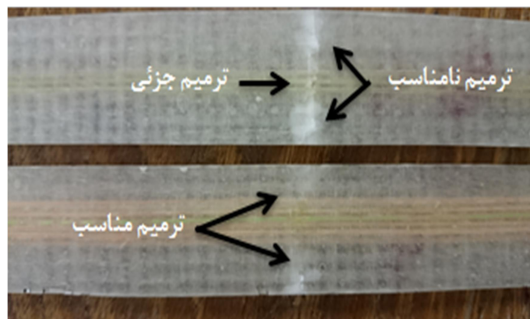
جهت مقایسه صحیح بین نمونه شاهد و نمونه‌های خود ترمیم نمی‌توان از نمودار نیرو-جابجایی استفاده نمود، زیرا به دلیل تفاوت ضخامت و عرض نمونه‌ها، مقدار حداکثر نیروی تحمل شده در نمونه متفاوت است. استفاده از پارامتر استحکام کششی به منظور مستقل نمودن پارامتر مقایسه از ابعاد نمونه، روشی مناسب به شمار می‌رود. در شکل ۸ استحکام کششی میانگین برای نمونه‌های شاهد و خود ترمیمی به منظور مقایسه آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استحکام کششی در نمونه شاهد پس از ایجاد آسیب در اثر شکسته شدن الیاف کاهش چشمگیری حدود ۵۰ درصد داشته است که این کاهش استحکام در نمونه‌های حاوی مواد ترمیمی به علت ایجاد کرنش موضعی اطراف میکروکانال‌ها [۲۱] بیشتر می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که استحکام کششی کامپوزیت‌های حاوی مواد ترمیمی در مقایسه با کامپوزیت بدون مواد ترمیمی کمتر است که این امر می‌تواند به علت گسستگی در آرایش و چیدمان لمینیت پایه به علت وجود میکروکانال‌ها و کاهش کسر حجمی الیاف تقویت‌کننده باشد. همچنین مشاهده می‌شود که پس از ایجاد آسیب در مدت زمان‌های مختلف ترمیم از صفر به ۱۱ روز روند صعودی افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی را شاهد هستیم. بیشترین بازیابی استحکام در مدت زمان ۷ روز بدست آمد و زمان ترمیم بیشتر تأثیری بر بازیابی استحکام از دست رفته نشان نداده است.

۳-۲-۲- محاسبه کسر حجمی بهینه

در شکل ۶ نمودارهای کشش مربوط به کامپوزیت‌های خود ترمیم حاوی میکروکانال‌های یک‌بعدی و با کسر حجمی‌های مختلف در مدت زمان ترمیم بهینه (۷ روز) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که بیشترین نیروی کششی قابل تحمل مربوط به نمونه حاوی ۴ درصد حجمی عامل ترمیمی می‌باشد. استحکام کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ۲/۵، ۴٪ و ۸٪ ماده ترمیمی به ترتیب ۱۷۸/۵، ۱۹۲/۵ و ۱۵۷/۹ مگاپاسکال پس از ایجاد آسیب بدست آمد. علت کم بودن استحکام در نمونه حاوی ۲/۵ درصد عامل ترمیمی را می‌توان به خاطر کمبود حجم عامل ترمیمی نسبت به حجم ناحیه آسیب دیده مرتبط دانست. همچنین به علت کمبود حجم مواد ترمیمی در این نمونه، ماده‌ی ترمیمی‌ای که به محل ترک جاری می‌شود تنها قادر است ناحیه‌ی را ترمیم کند که نزدیکترین مکان را به میکروکانال‌ها داشته باشد (شکل ۷) و پس از ترمیم کامل امکان بسته شدن میکروکانال‌ها وجود داشته و نیروی مویبندی که باعث جاری شدن مواد ترمیمی می‌شود، به علت بسته شدن میکروکانال‌ها نمی‌تواند به کمک کامپوزیت بیاید.

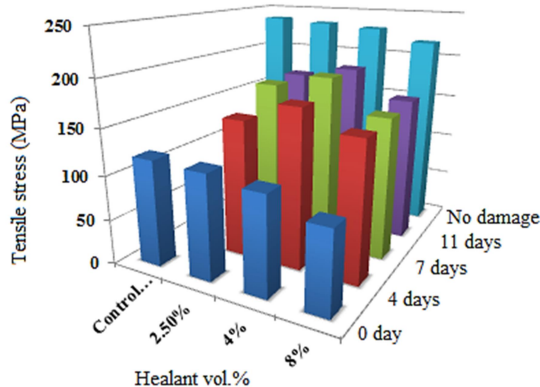


شکل ۶- نمودار نیرو- جابه‌جایی برای نمونه‌های با ۳ نوع کسر حجمی مواد ترمیمی در مدت زمان ۷ روز



شکل ۷- جریان یافتن مواد ترمیمی به محل آسیب در اثر نیروی مویبندی، نمونه بالایی با کسر ماده ترمیم کم و نمونه پایینی با کسر حجمی بالاتر

ترمیمی تهیه و خواص ترمیمی آن‌ها پس از گذشت زمان‌های مختلف (۷، ۱۱ و ۱۴ روز) از زمان تخریب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کاهش استحکام پس از ایجاد آسیب نسبت به نمونه شاهد بعد از آسیب حدود ۲ درصد کمتر بوده و کرنش موضعی که اطراف میکروکانال‌ها ایجاد می‌شود باعث رشد سریع‌تر ترک نسبت به حالتی که میکروکانال وجود ندارد (نمونه شاهد) شده و افت استحکام کامپوزیت را در پی دارد. نتایج بدست آمده پس از ترمیم نمونه‌ها حاکی از آن بود که پس از گذشت ۷ روز نمونه‌ی حاوی ۴٪ ماده ترمیمی به علت آزاد شدن عوامل ترمیمی در اثر نیروی مؤینگی به محل آسیب و همچنین ایجاد اتصالات عرضی با زمینه، به حداکثر استحکام کششی ۱۹۲/۵ MPa رسید که به میزان ۶۴/۹ درصد بازیابی در استحکام کششی کامپوزیت را به همراه داشت.



شکل ۸- ارتباط بین استحکام کششی و درصد حجمی ماده ترمیمی پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف.

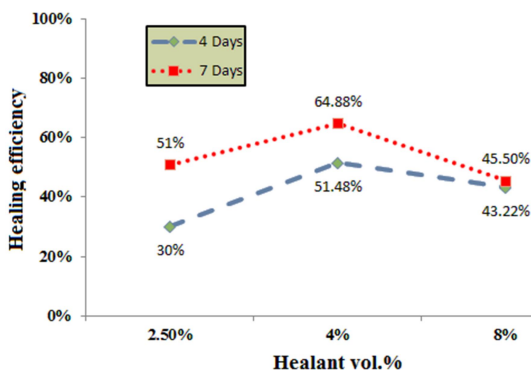
۵- مراجع

- 1) Wu D. Y., Meure S., and Solomon D., "Self-healing polymeric materials: A review of recent developments", Prog. Polym. Sci., Vol. 33, No. 5, pp. 479-522, 2008.
- 2) Hager M. D., Greil P., Leyens C., "Self-Healing Materials", Advanced Materials, vol. 22, no. 47, pp. 5424- 5430, 2010 Dec 14.
- 3) مه‌رسا امامی، الهام آرام، علیرضا مهدویان، "پلیمرهای هوشمند: ۳- پلیمرهای خودترمیمی"، فصلنامه علمی ترویجی، شماره ۱، صفحه ۳۸-۲۷، سال ۱۳۹۲.
- 4) White S. R., Blaiszik B. J., Kramer S. L. B., Olugebefola S. C., Moore J. S., and Sottos N. R., Self-healing polymers and composites, Am. Sci., Vol. 99, No. 5, pp. 392-399, 2011.
- 5) Saeed M. U., Chen Z., and Li B., Manufacturing strategies for microvascular polymeric composites: A review, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf, Vol. 78, pp. 327-340, 2015.
- 6) Dry C. M., & Sottos N. R., Passive smart self-repair in polymer matrix composite materials, In 1993 North American Conference on Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics, 1993 Jul 23.
- 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., inventor, Self-repairing, reinforced matrix materials, United States patent US 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, Int. J. Smart Mater Structure, Vol. 21, pp. 1-10, 2012.
- 10) Bleay S. M., Loader C. B., Hawyes V. J., Humberstone L., Curtis P. T., Winchester S. and Hay, J. N., Smart repair techniques for polymeric composite systems. Proc. ECCM9, pp.4-7, Brighton, UK.
- 11) Bleay S. M., Loader C. B., Hawyes V. J., Humberstone L., Curtis P. T., A smart repair system for polymer matrix composites, Int. J. Composites Part A, Vol. 32, no. 12, pp. 1767-1776, 2001.

برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم (η)، از رابطه زیر استفاده شد [۴]:

$$\eta = \frac{f_{healed} - f_{damaged}}{f_{virgin} - f_{damaged}} \quad (4)$$

که در این رابطه، η بیانگر خاصیت مورد اندازه‌گیری است. با توجه به رابطه ۴، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این نمودار بیشترین بازده ترمیم حدود ۸۱ درصد برای نمونه حاوی ۴ درصد حجمی مواد ترمیمی با گذشت ۸ روز پس از تخریب حاصل شد.



شکل ۹- ارتباط بین درصد حجمی ماده ترمیمی و بازده ترمیم پس از گذشتن و بازه زمانی مختلف.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی رفتار کششی کامپوزیت‌های خودترمیم اپوکسی-الیاف شیشه حاوی میکروآوندی پرداخته شد. استفاده از پیش‌شکل‌های جامد قابل برداشتن به دلیل برطرف کردن مشکل فصل‌مشترک بین سطح کانال و رزین در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی با سه درصد حجمی مختلف (۲/۵، ۴ و ۸ درصد) از میکروکانال‌های آوندی حاوی مواد

- 12) Pang J. W. C., and Bond I. P., Self-Repair and enhanced damage visibility in a hollow fibre reinforced plastic. Proc. 11th European Conf. on Composite Materials (Rhodes, May–June 2004). 2004.
- 13) Trask R. S., Bond I. P., Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *Int. J. Smart Material Structure*, Vol. 15 , pp. 704–710, 2006.
- 14) Trask R. S., G. J. Williams., Bond I. P., Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibers, *J. R. Soc. Interface*, Vol. 4, pp. 363–371, 2007.
- 15) Williams G., Trask R., and Bond I., A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications, *CompositesPart A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 6, pp. 1525-1532, 2007.
- 16) 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.
- 17) Hamilton A. R., Sottos N. R., White S. R., “Pressurized vascular systems for self-healing materials”, *J. R. Soc. Interface*, Vol. 9, pp. 1020-1028, 2012.
- 18) 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, *Int. J. Compos Sci Technol*, Vol. 72, No. 13, pp. 1618-1626, 2012.
- 19) Trask R. S., Bond I. P., Bioinspired engineering study of Plantae vasculae for self-healing composite structures, *J. R. Soc. Interface*, Vol. 7, pp. 921-931, 2010.
- 20) 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, *Adv Funct Mater*, Vol. 21, pp. 3624–33, 2011.
- 21) Hamilton A. R., Sottos N. R., and White S. R., Local strain concentrations in a microvascular network , *Proc. Soc. Exp. Mech. Inc.*, Vol. 67, pp. 255–263, 2010.