

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

مجله مهندسی مکانیک، شماره پنجم، جلد ۴۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۶۹-۳۷۳

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

محمد امین محمدی

دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* رضا اسلامی فارسانی*

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

حامد خسروی

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 بدن 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 آنیدریدی و برخی دیگر با شتاب دهنده مایع پر شدند. زمانی که سازه تحت بارگذاری باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند میکروترک‌ها می‌شود که این میکروترک‌ها 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 ایجادشده 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 دست زمان‌های ترمیم‌متغیر پس از ایجاد آسیب، یه دست آورده شد که مشاهدات حاکی از آن بود که بیشترین راندمان ترمیم به میان ۴۶/۹ درصد در نمونه با کسر حجمی ۴ درصد پس از گذشت ۷ روز حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: میکروترک‌ها، 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 hardner 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 healtant 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 ابتداء نیاز به تشخیص محل آسیب توسط بازدیدهای چشمی، دستگاه‌های غیرمخرب (مانند دستگاه فراصوت) و یا تابش اشعه ایکس در ادامه، نیاز به فرآیند زمان بر ترمیم وجود دارد. درسیاری ازموادپلیمری 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 روبرو است که این عیوب می‌توانند ناشی از رفتار مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، تشعشعات ماوراء بنفش یا ترکیبی از این موارد باشند[۱]. یکی از این عیوب رایج، حضور میکروترک‌ها در سازه می‌باشد که با ادامه‌ی روند بارگذاری روی سازه، میکروترک‌ها به هم می‌پیوندند و باعث انهدام و شکست قطعه می‌شوند. جهت جلوگیری از انهدام سازه‌ی مورد نظر بایستی ترمیم در جای مواد

^۱Self-healing composites

عامل تحریبی، عوامل ترمیم‌کننده آزاد کند، به صورتی که انسجام فیزیکی و استحکام مکانیکی ماده را پس از تخریب بازیابد^[۷]. 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 مؤثثگی به محل ترک جاری می‌شود. سپس مایع آزاد شده در مجاورت کاتالیزوری که از قبیل 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 بدنه 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، دو بعدی و یا سه بعدی 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، مجرماً به هم پیوسته دارد^[۵]. در ابتدا درای^[۶] جهت استفاده از میکروکانال‌ها در نمونه‌های خودترمیم حاوی اپوکسی تلاش خود را انجام داد. او ابتدا لوله‌های پیپت 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 نمونه‌ای 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، میکروترک 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 ۹۴ درصد بازیابی در استحکام پس از ضربه دست یافتند بیلای و همکارانش^[۱۰] و اولین استفاده از الیاف شیشه‌ای توالی با قطر خارجی ۱۵ میکرون و قطر داخلی ۵ میکرون به عنوان میکروکانال جهت ذخیره‌ی مواد ترمیمی را داشتند. آن‌ها قابلیت پرکردن تنها نیمی از الیاف توالی به علت قطر داخلی کم الیاف و رزین با لزجت بالا را

۲- مواد و روش تحقیق

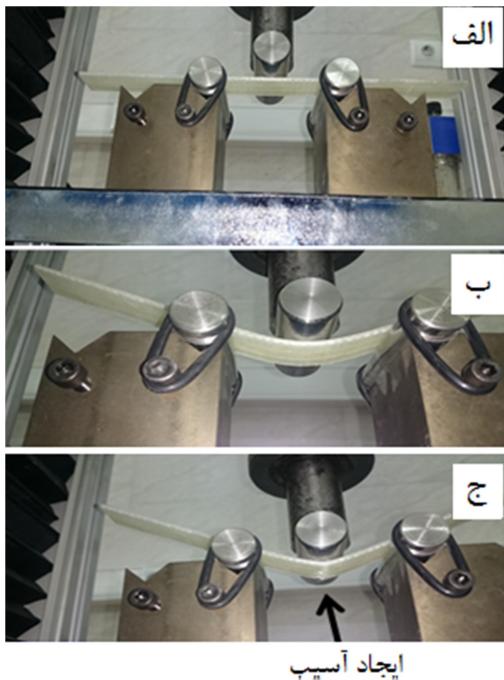
۲-۱- مواد مورد استفاده

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

1 Trilene monofilament

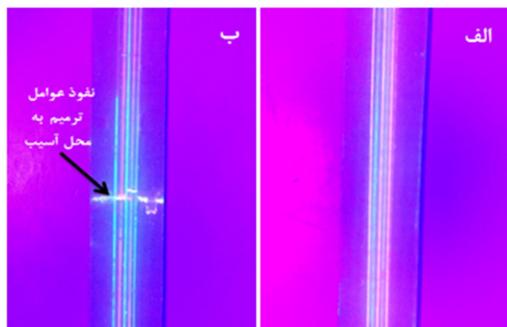
2 Compression after impact(CAI)

3 Fiber-reinforced polymers



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 4% درصد جهت بدست آوردن بهترین زمان ترمیم و سپس سه نمونه خودترمیم با کسر حجمی‌های مختلف 2.5% ، 4% و 8% 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 ایجادشده در نمونه‌های خودترمیم را توسط دستگاه خمش نشان می‌دهد. جهت تشخیص بهتر ناحیه‌ی آسیب دیده، مواد ترمیمی توسط مواد فلورسانس ماوراء بنفس رنگ 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 $500\text{ }\mu\text{m}$ و $700\text{ }\mu\text{m}$ میکرون جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل ساختار کامپوزیت استفاده شد. عوامل ترمیم شامل رزین اپوکسی ML526، سخت کننده آنیدریدی HA59 و کاتالیزور Ax11 (محصول شرکت مواد مهندسی مکرر) 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 میکروآندی 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 موردنیاز اپوکسی و سخت کننده که نسبت اختلاط $100:15$ بود را در داردن برای ساخت کامپوزیت $4\text{ }\mu\text{m}$ (درصد حجمی تقویت کننده) به دست آمد. همچنین سیم‌های پلیمری بین لایه‌های اول و دوم و لایه‌های سوم و چهارم قرار داده شدند. علت قراردهی در بین این لایه‌ها نزدیک بودن به نواحی تحت کشش و فشار هنگام تخریب توسط دستگاه آزمون خمش بود. پس از این مراحل مخلوط رزین و سخت کننده که با نسبت مشخص ترکیب شده بودند روی الیاف تقویت کننده 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 اختیار ناپذیر است، لذا از پرس استاتیکی جهت نفوذ بهتر رزین و کاهش هوا محبوس شده در داخل کامپوزیت پس از پخت کامل 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. برخی از کانال‌ها از رزین اپوکسی و سخت کننده آنیدریدی که با نسبت $100:90$ به ترکیب شده بودند، و برخی دیگر از شتاب دهنده‌های مایع متیل ایمیدازول پر شدند. پس از شکست و ایجاد غیب در ساختار، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و پس از ترکیب با شتاب دهنده مذکور عملیات پلیمریزاسیون موضعی و ترمیم مجدد سازه شروع می‌شود.

۳-۲- نحوه ایجاد آسیب در نمونه‌ها

از دستگاه آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTMD790M به منظور ایجاد آسیب نمونه‌های شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی مواد خودترمیمی استفاده شد. ایجاد آسیب در نمونه‌ها از طریق خم کردن به میزان 10 mm میلیمتر با نرخ مارگذاری 2 mm/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 بھینه، نمونه ها پس از ایجاد آسیب در چهار زمان مختلف (۰، ۴، ۱۱ روز) تحت آزمون کشش مطابق شکل ۳ قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جهت صحه گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. تخریب و آزمایش نمونه ها توسط دستگاه یونیورسال مدل کوپا با قابلیت اعمال ۵۰KN نیرو انجام شد. پس از آزمون کشش، نمونه نیرو- جابه جایی برای هر یک از نمونه های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام کششی نمونه ها با توجه به استاندارد کشش ASTM D3039M انجام شد.

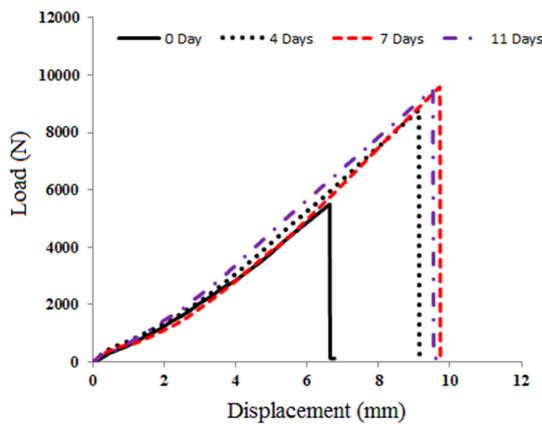


شکل ۳- نحوه انجام آزمون کشش بر روی نمونه کامپوزیتی

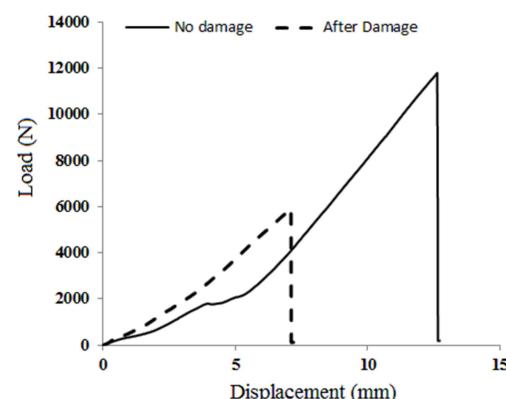
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمونه شاهد

در ارتباط با نمونه های شاهد، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل ۴، نمونه نیرو- جابه جایی برای این نمونه ها آورده شده است.



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



شکل ۴- نمونه نیرو- جابه جایی برای نمونه شاهد در دو حالت بدون تخریب و پس از ایجاد تخریب

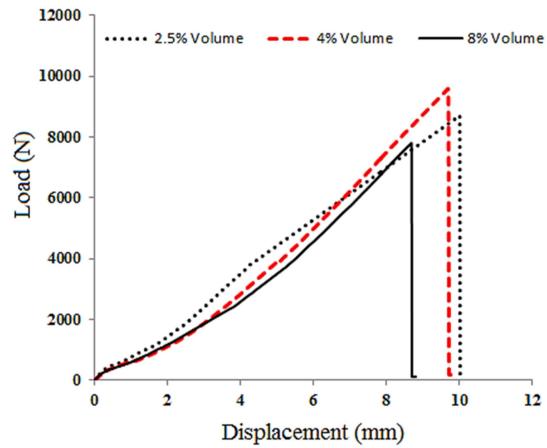
در ارتباط با نمونه ۸ درصد ماده ترمیم می‌توان گفت که بیشترین ماده ترمیمی مریبوط به این نمونه است، اما از آنجایی که حجم کانال‌هایی که ایجاد شده، زیاد هستند کانال‌ها به صورت نواحی گستته در ساختار عمل کرده و افت خواص کامپوزیت را در پی دارد. از طرفی هم به دلیل حجم بالای مواد ترمیمی ذخیره شده در ساختار، جاری-شدن مواد ترمیمی به ناحیه‌ی آسیب دیده بیشتر بوده و باعث ترمیم بهتر نسبت به نمونه حاوی $2/5$ درصد عامل ترمیمی شده است. بنابراین باستی یک حد بهینه برای کسر حجمی مواد ترمیمی پیدا کرد. از آنجایی که نمونه ۴ درصد بیشترین استحکام را به علت تناسب بین حجم ناحیه‌ی آسیب دیده با حجم مواد ترمیمی ذخیره شده در میکروکانال‌ها دارد و همچنین نیروی مویینگی جهت انتقال مواد ترمیمی به اکثر نواحی آسیب دیده کافی است، لذا حد بهینه‌ی کسر حجمی جهت ذخیره 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

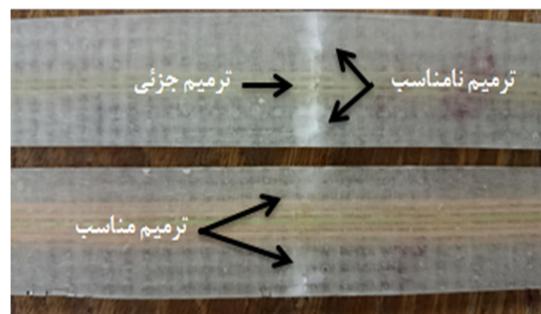
جهت مقایسه صحیح بین نمونه شاهد و نمونه‌های خود ترمیم نمی‌توان از نمودار نیرو-جایگایی استفاده نمود ، زیرا به دلیل تفاوت ضخامت و عرض نمونه‌ها ، مقدار حداکثر نیروی تحمل شده در دونمونه متفاوت است. استفاده از پارامتر استحکام کششی به منظور مستقل نمودن پارامتر مقایسه از بعد از نمونه ، روشنی مناسب به شمار می‌رود. در شکل ۸ استحکام کششی میانگین برای نمونه‌های شاهد و خود ترمیمی به منظور مقایسه آن هاشان 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 این‌امر می‌تواند به علت گستگی در آرایش و چیدمان لمینیت پایه به علت وجود میکروکانال‌ها و کاهش کسر حجمی الیاف تقویت کننده 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.

۲-۲-۳- محاسبه کسر حجمی بهینه

در شکل ۶ نمودارهای کشش مریبوط 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 مریبوط به نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی می‌باشد. استحکام کششی مریبوط به نمونه‌های حاوی $2/5$ ٪، $4/8$ ٪ و $8/8$ ٪ ماده ترمیمی به ترتیب علت کم بودن استحکام در نمونه حاوی $2/5$ 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 ناحیه‌ای 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 مویینگی که باعث جاری شدن مواد ترمیمی می‌شود، به علت بسته شدن میکروکانال‌ها نمی‌تواند به کمک کامپوزیت بباشد.

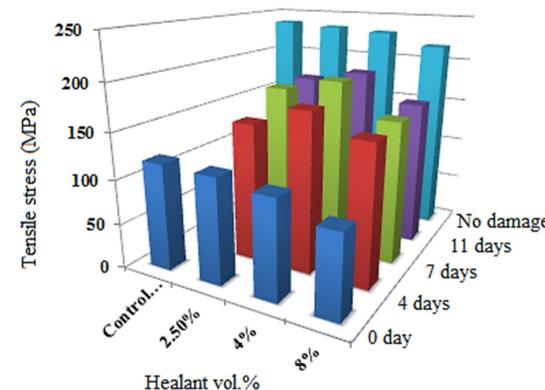


شکل ۶- نمودار نیرو- جایگایی برای نمونه‌های با ۳ نوع کسر حجمی مواد ترمیمی در مدت زمان ۷ روز



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

ترمیمی تهیه و خواص ترمیمی آنها پس از گذشت زمان های مختلف (۴، ۱۱ 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 میکروکانال ها ایجاد می شود باعث رشد سریع تر ترک شده و افت استحکام کامپوزیت را در پی دارد. نتایج بدست آمده پس از ترمیم نمونه ها حاکی از آن بود که پس از گذشت ۷ روز نمونه های 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 حد اکثر استحکام کششی کامپوزیت را در پی دارد. نتایج بدست آمده پس از ترمیم نمونه ها حاکی از آن بود که پس از گذشت ۷ روز نمونه های 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 حد اکثر استحکام کششی کامپوزیت را به همراه داشت.

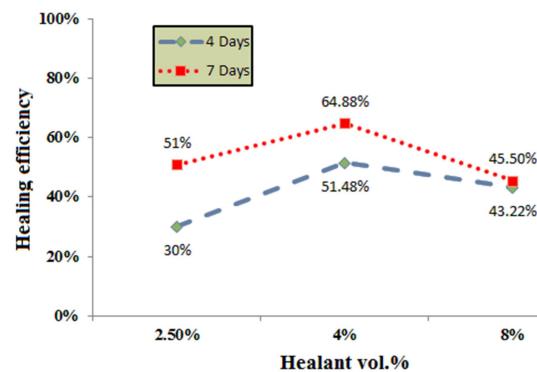


شکل ۸- ارتباط بین استحکام کششی و درصد حجمی ماده ترمیمی پس از گذشت چهار باره زمانی مختلف.

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، اینگر خاصیت مورد اندازه گیری است. با توجه به رابطه ۴، بازده ترمیم برای نمونه های 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 پسازگذشت و بازه زمانی مختلف.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی رفتار کششی کامپوزیت های خودترمیم اپوکسی - الیاف شیشه حاوی کانال های میکرو آوندی پرداخته شد. استفاده از پیش شکل های جامد قابل برداشتن به دلیل برطرف کردن مشکل فصل مشترک بین سطح کانال و رزین در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نمونه های کامپوزیتی با سه درصد حجمی مختلف (۲/۵، ۴ و ۸ درصد) از میکروکانال های 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) Track 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 vasculles 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.