



بررسی اثر سیکل حرارتی بر میزان بازیابی استحکام کششی در کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده تحت بار ضربه‌ای

علی طالع‌زاده لاری^۱، علی نیک‌بخت^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران
۲- پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:

کامپوزیت
مواد خودترمیم
ضربه افتان
بازیابی استحکام کششی
سیکل حرارتی

خلاصه: در پژوهش حاضر، فرآیند خودترمیمی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از جنس الیاف شیشه-اپوکسی بررسی شده است. عامل ترمیمی دوجزئی شامل رزین اپوکسی ML506 و هاردنر HA-II است که درون میکرولوله‌هایی ذخیره شده و بین لایه‌های اول و دوم و نیز لایه‌های پنجم و ششم نمونه‌ها قرار گرفتند. آسیب اولیه توسط آزمون ضربه افتان ایجاد شده و نهایتاً با انجام آزمون کشش میزان بازیابی استحکام کششی نمونه‌ها بررسی شده است. اثر تعداد میکرولوله‌های حاوی عوامل ترمیم‌کننده، مدت زمان ترمیم (بدون اعمال سیکل حرارتی) و اعمال سیکل حرارتی بر فرآیند ترمیم نمونه‌های آسیب دیده مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌هایی حاوی ۸، ۱۶ و ۳۲ واحد ترمیمی در بازه‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ روزه بررسی شدند. علاوه بر این، تعدادی از نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب اولیه، تحت ۱، ۳، ۵ و ۷ سیکل حرارتی قرار گرفته و پس از بازه زمانی یک روزه، آزمون کشش آنها انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بدون اعمال سیکل حرارتی فرآیند ترمیم پس از بازه ۶ روزه تقریباً به صورت کامل انجام شده است (بازیابی ۸۳ درصدی استحکام کششی). هرچند بیشترین میزان بازیابی استحکام کششی ۸۶٪ است که برای نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی و بعد از ۱۲ روز حاصل می‌شود. همچنین می‌توان با اعمال ۵ سیکل حرارتی بر نمونه آسیب‌دیده دارای ۳۲ واحد ترمیم پس از گذشت یک روز تقریباً به همین میزان ترمیم دست یافت. ضمناً تاثیر سیکل حرارتی تا سیکل پنجم بوده و اعمال سیکل‌های حرارتی بعدی تاثیر چندانی بر تسریع فرآیند ترمیم و بازده آن ندارد.

۱- مقدمه

جدا شدن الیاف تقویت‌کننده از زمینه نیز از دیگر مودهای خرابی سازه‌های کامپوزیتی است. علاوه بر موارد یاد شده، پلیمرهای ترد و سازه‌های کامپوزیتی با پایه پلیمری، تحت ضربه (حتی با سرعت پایین) یا بارگذاری‌های حرارتی بسیار مستعد ایجاد میکروترک در ساختار خود هستند. این میکروترک‌ها می‌توانند در ادامه با پیوستن به یکدیگر موجب تورق سازه‌های کامپوزیتی شوند. شایان ذکر است که بسته به نوع کارکرد سازه‌های کامپوزیتی قرارگیری تحت این نوع بارگذاری‌ها، به خصوص ضربه سرعت پایین، بسیار محتمل است. از طرفی آسیب‌های ایجاد شده در انرژی‌های نسبتاً کم اغلب هیچ نشانه قابل مشاهده‌ای بر روی سطح ماده باقی نمی‌گذارد و در بسیاری از موارد شناسایی این آسیب‌ها در بدو پیدایش به کمک بازدیدهای دوره‌ای بسیار دشوار و پرهزینه و گاهی ناممکن است. در صورت عدم تشخیص به موقع، آسیب می‌تواند به آرامی تحت تنش متناوب یا نوسانی رشد نموده و ایجاد ترک‌هایی در سازه نماید که بعضاً ترمیم

سازه‌های کامپوزیتی به سبب خواص منحصر به فردی چون نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر حرارت و رطوبت و خوردگی، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلفی نظیر هواپیماسازی، خودروسازی، هوافضا، نفت و گاز، خطوط انتقال آب، صنایع دریایی و نظامی دارند. کامپوزیت‌ها می‌توانند دارای زمینه پلیمری، سرامیکی و فلزی باشند که کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بسیار پرکاربردتر بوده و جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف دارند. علیرغم نقاط قوت کامپوزیت‌ها، این مواد نقاط ضعفی نیز دارند. عدم تشابه خواص مکانیکی مواد در محل اتصال لایه‌ها می‌تواند تمرکز تنش را در این نواحی در پی داشته باشد. علاوه بر این، ضربه یا اعمال تنش در این مواد ممکن است پدیده جدایش لایه‌ها^۱ را ایجاد نماید.

1 Delamination

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: anikbakht@aut.ac.ir



از میکروکپسول‌ها^۷ و استفاده از کانال‌های میکروآوندی^۸ تقسیم نمود. هر یک از این روش‌ها مزایای خاص خود را دارند. به عنوان مثال در صورت ذخیره‌سازی عامل ترمیم‌کننده در الیاف توخالی، این الیاف می‌توانند به صورت همزمان نقش تقویت‌کننده را نیز ایفا نمایند. استفاده از میکروکپسول‌های پخش شده در زمینه کامپوزیت، توزیع یکنواخت‌تر عامل ترمیم‌کننده را در پی دارد. ضمن اینکه استفاده از این روش محدودیتی برای طراحی سازه کامپوزیتی ایجاد نمی‌کند. مهم‌ترین مزیت استفاده از کانال‌های میکروآوندی، قابلیت ترمیم چند باره سازه است [۳].

در سال‌های اخیر مقالات مروری مختلفی در خصوص مواد کامپوزیتی خودترمیم‌منتشر شده که بررسی‌های جامعی روی این مواد انجام داده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به مقاله اسلام و بیهت در سال ۲۰۲۱ اشاره نمود که در آن آخرین پیشرفت‌ها در خصوص طراحی و تکنیک‌های ساخت انواع مواد خودترمیم‌فلزی، سرامیکی بتنی و کامپوزیت‌های پلیمری مطالعه شده است. در این پژوهش برتری‌های نسبی روش‌های ساخت مختلف بیان شده است [۴]. همچنین کادام و همکارانش در همین سال فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی خودترمیمی را بررسی نمودند و پارامترهای موثر بر خودترمیمی نظیر کاتالیزورها، دما، نوع ترمیم، نقطه ذوب، اندازه کپسول، شکل و جهت و زمان پخت را بررسی نموده‌اند. همچنین ایشان تکنیک‌های مختلف مورد استفاده برای ساخت مواد خودترمیم‌شونده و فعل و انفعالات فیزیکی، پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش آب‌گریز و برهم‌کنش‌های شیمیایی را مورد بحث قرار داده‌اند [۵].

در زمینه میزان بازیابی خواص مکانیکی و استحکام سازه‌های کامپوزیتی خودترمیم‌مقالات متعددی منتشر شده است. از جمله می‌توان به پژوهش‌های محمدی و همکارانش [۶، ۷] در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ اشاره نمود که در آنها از کانال‌های آوندی به عنوان مخزن ماده ترمیم‌کننده استفاده شده است. علاوه بر این، در بسیاری از مقالات منتشر شده در سال‌های اخیر از میکروکپسول‌ها به عنوان مخزن عامل ترمیم‌کننده استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط ابراهیمی نژاد و اسلامی فارسانی [۸]، پیتالا و همکارانش [۹]، شینده و همکارانش [۱۰]، میرزاحمدی و همکارانش [۱۱]، ابراهیمی نژاد و همکارانش [۱۲-۱۴] اشاره نمود.

آنها در آن مرحله غیرممکن خواهد بود. از این رو شناسایی و ترمیم این میکروتکرها در مراحل اولیه پیدایش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در سازه‌های حساس و حیاتی، بازرسی مداوم قطعات به کمک آزمون‌های غیرمخربی نظیر تست فراصوت^۱، ترموگرافی مادون قرمز^۲، پرتونگاری اشعه ایکس^۳ صورت می‌گیرد و در صورت مشاهده آسیب شدید قطعه تعویض می‌گردد. برای آسیب‌های کمتر ترمیم آسیب در دستور کار قرار می‌گیرد. اگر تخریب به صورتی موضعی اتفاق افتاده باشد می‌توان با تزریق رزین در محل آسیب آن را ترمیم نمود و یا محل آسیب را به روش‌های مختلف تقویت کرد. اما به طور کلی بازدید مداوم، تشخیص، ترمیم یا تقویت منطقه آسیب‌دیده فرآیندی دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است [۱].

یک راهکار جایگزین، استفاده از کامپوزیت‌هایی است که قابلیت ترمیم خودبه‌خودی ناحیه آسیب‌دیده را داشته باشند. به طور کلی می‌توان سیستم خودترمیم‌کامپوزیت‌های پایه پلیمری را به دو دسته ذاتی^۴ و غیرذاتی^۵ تقسیم‌بندی نمود. در این خصوص می‌توان به مقاله ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ اشاره نمود که به تفصیل تفاوت این دو دسته روش ترمیمی، تقسیم‌بندی‌های مختلف آنها و برتری‌های هر یک نسبت به دیگری را شرح داده‌اند [۲]. اما می‌توان به اختصار بیان نمود که در سیستم‌های خودترمیم‌ذاتی، ترمیم ناحیه آسیب دیده و بازیابی خواص مواد بدون دخالت عامل خارجی صورت می‌پذیرد. در این سیستم‌ها فرآیند ترمیم مبتنی بر واکنش‌های فیزیکی یا شیمیایی است و در اثر عواملی نظیر واکنش‌های برگشت‌پذیر، نفوذ مولکولی و زوج شدن یونومرها انجام می‌شود. در سیستم خودترمیم غیرذاتی، ترمیم خودبه‌خودی وجود ندارد و ترمیم توسط یک عامل خارجی که از قبل درون کامپوزیت ذخیره شده و پس از بروز آسیب آزاد گردیده و به محل آسیب می‌رسد، انجام می‌شود. سیستم‌های خودترمیم غیرذاتی را می‌توان بر اساس نحوه ذخیره‌سازی عامل ترمیم‌کننده به سه دسته کلی استفاده از الیاف توخالی^۶ (میکرولوله‌ها)، استفاده

- 1 Ultrasonic Testing (UT)
- 2 Infrared thermography
- 3 X-ray tomography
- 4 Intrinsic self-healing
- 5 Extrinsic self-healing
- 6 Hollow fibers

7 Capsulation

8 Microvascular network

همزمان هم نقش تقویت کننده را ایفا می کردند و هم به عنوان مخزن عامل ترمیم کننده به کار می رفتند و علاوه بر آن قابلیت آشکارسازی اشعه ایکس را نیز داشتند. نتایج این بررسی نشان داد اگر چه به دلیل قطر کوچک لوله ها، حضور آنها تاثیر منفی بر رفتار مکانیکی سازه نداشت، اما به همین علت پر کردن لوله ها از عامل ترمیم کننده و آزاد شدن آنها پس از به وجود آمدن آسیب با دشواری هایی همراه بود. در خصوص ترمیم کننده تک جزئی (سیانواکریلات^۲) به دلیل آنکه نرخ پخش رزین کمتر از نرخ پخت آن بود، نتایج رضایت بخشی حاصل نشد. در خصوص ترمیم کننده دوجزئی LY5120 نیز نتایج مشابهی به دست آمد. هرچند برای ترمیم کننده دوجزئی MY750 که خود لزجت پایین تری داشت و با گرم شدن تا دمای ۶۰ درجه سانتی گراد لزجت آن باز هم کاهش می یافت و در ضمن به کمک افزودن ۴۰٪ استون رقیق شده بود، نتایج بهتری حاصل شد [۱۹]. پانگ و باند با توجه به نتایج پژوهش های قبلی از میکرولوله های شیشه ای با قطر خارجی ۶۰ میکرون به عنوان مخزن ذخیره کننده ماده ترمیم کننده بهره گرفتند که با زوایای ۰ و ۹۰ درجه در کامپوزیت قرار داده شده بود. ضمن اینکه با افزودن عامل رنگی فلورسنت فرابنفش به عامل ترمیم کننده، رها شدن آن و نحوه پر کردن ترک را مشاهده نمودند. ایشان از آزمون خمش چهارنقطه ای برای بررسی رفتار ترمیمی کامپوزیت استفاده نمودند و بازیابی ۹۳ درصدی استحکام خمشی را گزارش نمودند [۲۰].

تراسک و همکارانش از لوله های شیشه ای با قطر خارجی ۶۰ میکرون و قطر داخلی ۴۰ میکرون استفاده نمودند. ایشان نمونه های کامپوزیتی از جنس شیشه-پکسی و کربن-پکسی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین ایشان اثر فواصل قرارگیری لوله ها را نیز بررسی نمودند. این مطالعه نشان داد که اگر چه وجود لوله ها استحکام خمشی نمونه ها را ۱۶٪ کاهش داد اما پس از بروز آسیب، در همه نمونه های بررسی شده استحکام خمشی تا بیش از ۸۰٪ استحکام خمشی نمونه سالم بازیابی شد [۲۱، ۲۲].

کوسوراکیس و موریتز اثر وجود لوله های شیشه ای بر خواص مکانیکی کامپوزیت ها را بررسی نمودند. ایشان در این پژوهش خاصیت خودترمیمی را مد نظر قرار ندادند و صرفاً اثری که حضور این لوله ها بر ساختار کامپوزیت و در نتیجه خواص مکانیکی آن داشت را مطالعه

در ادامه به مرور مطالعاتی پرداخته می شود که در آنها از ایفای توخالی به عنوان مخزن ذخیره سازی عوامل ترمیم کننده استفاده شده است. نخستین پژوهش در ترمیم سازه به کمک عامل ترمیم کننده ذخیره شده در میکرولوله ها به مطالعات درای بازمی گردد. مطالعات ابتدایی وی مربوط به قطعات ساختمانی سیمانی بود که در آن با استفاده از عامل ترمیم شیمیایی نفوذپذیری زمینه سیمانی را کاهش داده و با ترمیم نسبی ترک و جلوگیری از رشد آن، دوام قطعه را افزایش داد [۱۵]. اما در ادامه، آن را برای سازه های کامپوزیتی زمینه پلیمری گسترش داده و ترمیم ریزترک های داخلی ایجاد شده در این سازه ها تحت بارگذاری حرارتی-مکانیکی را بررسی نمود. در این مطالعه انتشار عامل ترمیم کننده در ترک ها با استفاده از میکروسکوپ نوری^۱ و فوتوالاستیسیته^۲ مشاهده شد. همچنین آزمایش های بیرون کشی ایفای و آزمون ضربه برای بررسی توانایی پیوند مجدد ایفای و پر کردن ترک ها انجام شد [۱۶، ۱۷].

موتوکو و همکارانش خودترمیم شونده گی پل های کامپوزیتی قرار گرفته در معرض ضربه سرعت پایین را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ایفای شیشه تقویت کننده نوع S-2 در دو نوع زمینه مختلف وینیل استر C50-411 و رزین اپوکسی EPON-862 مورد بررسی قرار گرفت. ضمن اینکه برای ذخیره سازی عامل ترمیم کننده از لوله های توخالی مختلفی نظیر شیشه، آلومینیوم و مس استفاده نمودند و اثر این پارامتر را نیز بررسی کردند. نتایج بررسی ایشان نشان داد که استفاده از لوله های توخالی شیشه تاثیر منفی کمتری بر استحکام مکانیکی پل دارد و از طرف دیگر، این لوله ها در سطوح انرژی پایین تری می شکنند و در نتیجه در مقایسه با سایر لوله های بررسی شده عملکرد بهتری را از خود نشان می دهند. ضمن اینکه ایشان بیان داشتند که بزرگ تر بودن قطر لوله های شیشه ای (۱/۱۵ میلی متر) در مقایسه با قطر ایفای تقویت کننده (۱۲ میکرومتر)، زمینه ایجاد تمرکز تنش را فراهم می نماید و استفاده از لوله هایی با قطر کوچک تر مناسب تر است [۱۸]. با توجه به نتیجه این پژوهش، بلی و همکارانش از لوله های شیشه ای Owens-Corning Hollex استفاده نمودند که قطری بسیار کمتر از تحقیقات قبلی داشت (قطر خارجی ۱۵ میکرون و قطر داخلی ۵ میکرون). در واقع ایفای شیشه تقویت کننده در ساختار کامپوزیت مورد بررسی لوله هایی تو خالی بودند که به صورت

1 Optical microscopy

2 Photoelasticity

حجمی متفاوت (۰/۷۵، ۱/۶۵ و ۲/۵ درصد)، در سه بازه زمانی مختلف (صفر، ۵ و ۸ روز بعد از آسیب) بررسی شد. بیشترین بازیابی استحکام کششی به میزان ۸۹٪ گزارش شده که با گذشت ۸ روز در نمونه ۱/۶۵ درصد حجمی حاصل شده است.

افتخاری و همکارانش [۲۷] پژوهش مشابهی را انجام دادند که در آن از میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی ۳۸۰-۴۰۰ میکرون برای ذخیره‌سازی عوامل ترمیمی شامل رزین اپوکسی Araldite LY5052 و هاردنر پلی آمینی Aradur 5052 استفاده شد. در این پژوهش آسیب اولیه با استفاده از خمش سه نقطه‌ای ایجاد شد. نمونه‌هایی حاوی عامل ترمیمی با سه کسر حجمی متفاوت (۱، ۳ و ۵ درصد)، در چهار بازه زمانی مختلف (۲، ۴، ۷ و ۱۴ روز بعد از آسیب) مورد بررسی قرار گرفتند. میزان بازیابی خواص مکانیکی بر اساس آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه شاریبی بررسی شد؛ که بیشترین میزان بازیابی خواص به ترتیب ۷۷٪، ۵۴٪ و ۹۲٪ بود که متعلق به نمونه حاوی ۳٪ حجمی لوله‌های ترمیمی و با زمان ترمیم ۷ روز بود.

خلیلی و همکارانش [۲۸، ۲۹] اثر سیکل حرارتی را بر بازیابی استحکام کششی و خمشی کامپوزیت‌های خودترمیم بررسی نمودند. در این مطالعات از میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی ۳۰۰ میکرون و کسر تهیگی ۵۲٪ برای ذخیره‌سازی عامل ترمیمی استفاده شد. آسیب اولیه توسط ضربه شاریبی با انرژی ۴ ژول ایجاد شده و با انجام آزمون کشش و خمش سه نقطه‌ای، میزان بازیابی استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها بررسی شده است. ضمناً تعدادی از نمونه‌ها تحت ۱، ۳ یا ۵ سیکل حرارتی در محدوده ۲۵ تا ۷۰ سانتی‌گراد قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان بازیابی استحکام کششی و خمشی بعد از ۷ روز برای نمونه‌هایی که تحت سیکل حرارتی قرار نگرفته بودند به ترتیب ۸۶ و ۷۴ درصد گزارش شد؛ که این میزان از بازیابی تقریباً برای نمونه‌هایی است که تحت ۵ سیکل حرارتی قرار گرفته بودند، در یک روز حاصل شد.

میرزاپور و همکارانش [۳۰] پنل ساندویچی شامل پوسته کامپوزیتی اپوکسی-الیاف کربن و هسته فوم پی وی سی^۱ و دارای لوله‌های شیشه‌ای حاوی عامل ترمیمی را بررسی کردند. در این پژوهش آسیب اولیه توسط خمش سه نقطه‌ای ایجاد شد و پس از آن با استفاده از آزمون ضربه شاریبی چقرمگی شکست دینامیکی نمونه‌ها

نمودند. این بررسی نشان داد که قطر لوله‌ها و جهت قرارگیری آنها دو پارامتر مهم در این زمینه است. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود این لوله‌ها در صفحه میانی، مدول الاستیک درون صفحه‌ای را متاثر نمی‌کند. ضمن اینکه اگر بارگذاری موازی جهت قرارگیری لوله‌ها باشد، خواص کششی و فشاری کامپوزیت نیز تغییر محسوسی نخواهد داشت. اما قرارگیری لوله‌ها در جهت عمود بر راستای بارگذاری موجب کاهش استحکام قطعه خواهد شد [۲۳].

زین‌الدین و همکارانش اثر خودترمیم‌شوندگی کامپوزیت‌ها تحت ضربه سرعت پایین را بررسی نمودند. در این مطالعه از رزین Envirez 70301 به عنوان ماده ترمیم‌کننده استفاده شد که در لوله‌های با قطر خارجی و داخلی ۱ و ۰/۸ میلی‌متر ذخیره شده بودند. ضمن اینکه علاوه بر آن، به نسبت دو به یک، لوله‌های با قطر خارجی ۰/۸ میلی‌متر و قطر داخلی ۰/۶ حاوی کاتالیزورهایی برای شروع فرآیند ترمیم و سرعت بخشیدن به آن درون ساختار کامپوزیت قرار داده شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که بار نهایی و انرژی ناشی از آن در نمونه‌های خودترمیم شونده به ترتیب به میزان ۵۳/۶٪ و ۸۶٪ بازیابی شدند [۲۴].

اسلامی فارسانی و همکارانش [۲۵] خودترمیم‌شوندگی تیر کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی را تحت بارگذاری خمشی بررسی کردند. در این مطالعه از میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی ۲۵۰ میکرون و کسر تهیگی ۵۵٪ برای ذخیره‌سازی عوامل ترمیمی شامل رزین اپوکسی ML526 و هاردنر انیدریدی (با نسبت ۱۰۰ به ۹۰) استفاده شد. ضمن اینکه کاتالیزور AxII نیز در فاز زمینه قرار گرفت. در این پژوهش، آسیب اولیه نیز با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر در دقیقه و میزان جابجایی ۵ میلی‌متر ایجاد شد. نمونه‌ها حاوی عامل ترمیمی با سه کسر حجمی متفاوت (۲، ۴ و ۶ درصد)، در سه بازه زمانی مختلف (صفر، ۵ و ۸ روز بعد از آسیب) مورد آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده حداکثر بازده ترمیم به میزان ۸۴٪ بود که بعد از گذشت ۸ روز و برای نمونه حاوی ۴٪ حجمی لوله‌های ترمیمی به دست آمد. ساری و همکارانش [۲۶] مساله مشابهی را برای همین اندازه لوله و همین عوامل ترمیمی انجام دادند که در آن اینکه آسیب اولیه توسط آزمون ضربه شاریبی با انرژی ۲۰ ژول ایجاد شده بود؛ و بازیابی استحکام کششی نمونه‌هایی حاوی عامل ترمیمی با سه کسر

۲- مطالعه تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی EPIKOTE828 محصول شرکت شل^۱ آلمان استفاده شده که ساختار آن بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول ای^۲ بوده و بایستی با یک هاردنر آمینی^۳ ترکیب شود تا فاز زمینه را ایجاد نماید. همچنین از پارچه بافته شده از الیاف شیشه نوع E با چگالی سطحی 400 g/m^2 محصول شرکت لینتکس^۴ چین به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است. یکی از عوامل مهم در کامپوزیت‌های خودترمیم، لزجت پایین عامل ترمیم کننده است. به همین دلیل از رزین اپوکسی ML506 و هاردنر HA-II از سری محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر که بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول ای و هاردنر پلی آمینی تولید شده به عنوان ماده ترمیم کننده استفاده شده است که لزجت آن در دمای اتاق $1/45 \text{ Pa.s}$ است [۳۵]. ضمن اینکه میکرولوله‌های شیشه‌ای با قطر خارجی ۲۰۰ میکرومتر، به عنوان مخزن عوامل ترمیم کننده در نظر گرفته شده است.

۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها در گام نخست میکرولوله‌های شیشه‌ای به صورت جداگانه و به کمک پمپ خلاء توسط رزین و هاردنری که به عنوان عوامل ترمیم کننده در نظر گرفته شده پر شد (شکل ۱). این لوله‌ها به صورت زوج لوله (یک لوله رزین و یک لوله هاردنر) به یکدیگر متصل شده و یک واحد ترمیمی را تشکیل می‌دهند. در گام بعد، نمونه‌ها به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. در این پژوهش چهار نوع نمونه ساخته شده است. نوع اول نمونه‌های فاقد میکرولوله هستند که به عنوان نمونه‌های شاهد مورد استفاده قرار می‌گیرد و از آنها جهت مقایسه با نمونه‌های خودترمیم استفاده می‌شود. سه نوع نمونه دیگر به ترتیب شامل ۸، ۱۶ و ۳۲ واحد ترمیمی هستند. با توجه به ابعاد نهایی نمونه‌ها، کسر حجمی میکرولوله‌ها به ترتیب $0/67\%$ ، $1/34\%$ و $2/68\%$ است. همه نمونه‌ها به صورت شش لایه ساخته شده که در آن هر شش لایه پارچه در یک جهت قرار گرفته‌اند و لایه‌ها

مطالعه شد. ایشان نمونه‌های حاوی درصد حجمی متفاوت مواد خودترمیم (۵/۰، ۱ و ۱/۵ درصد) را پس از مدت زمان متفاوت ترمیم (صفر، ۳ و ۷ روز) بررسی کردند و بیشترین میزان بازدهی ترمیم برای نمونه ۱/۵ درصد و پس از ۷ روز ترمیم به دست آمد.

عدلی و همکارانش [۳۱، ۳۲] از میکرولوله‌هایی به قطر خارجی ۴۵۰ میکرومتر و کسر تهینگی ۵۰-۵۵٪ برای ذخیره مواد ترمیمی در ساختار کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی استفاده کردند. ایشان تمرکز خود را بر تاثیر زاویه قرارگیری لوله‌ها (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) و نیز فاصله آنها از یکدیگر (۲۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر) قرار دادند. آسیب اولیه به وسیله آزمون کشش با کرنش $1/2\%$ ایجاد شد و سپس فرآیند ترمیم در نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان بازیابی استحکام کششی بر اساس آزمون کشش بررسی شد که بیشترین مقدار 42% و مربوط به نمونه دارای لوله‌های ۴۵ درجه و با فاصله ۲۰۰ میکرومتر بود. ایشان در پژوهش دیگری به صورت تجربی و عددی (به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس) اثر وجود لوله‌ها با زوایای مختلف را بر خواص اولیه نمونه‌های کامپوزیتی بررسی نمودند [۳۳].

کشیرسگار و همکارانش [۳۴] میزان ترمیم کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه تک جهته با رزین اپوکسی Lapox ARL-125 AH-367 و عامل ترمیم کننده Lapox L_552 /K-552 را بررسی نمودند. ایشان در این بررسی میزان بازیابی استحکام خمشی و مقاومت در برابر بار ضربه‌ای را پس از بازه‌های ترمیمی ۱، ۲ و ۳ روزه بررسی نمودند. بیشترین میزان بازیابی برای بازه ترمیمی سه روزه به دست آمد که برای استحکام خمشی و مقاومت در برابر بار ضربه‌ای به ترتیب برابر $74/53\%$ و $55/58\%$ گزارش شده است.

مرور مقالات نشان می‌دهد که تاثیر سیکل حرارتی بر فرآیند ترمیم کامپوزیت‌های خودترمیم غیرذاتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، آسیب اولیه نمونه‌ها عمدتاً توسط خمش سه نقطه‌ای و یا ضربه شاریبی ایجاد شده است. در پژوهش حاضر، بازده ترمیم نمونه‌هایی با کسر حجمی متفاوت میکرولوله‌ها بررسی شده است. آسیب اولیه نمونه‌ها توسط آزمون ضربه افتان ایجاد شده است. ضمن اینکه نمونه‌های آسیب دیده تحت سیکل‌های حرارتی مختلف قرار داده شده تا تاثیر این موضوع نیز بر فرآیند ترمیم مطالعه شود.

- 1 Shell Chemicals, Ins.
- 2 Bisphenol A
- 3 Amine
- 4 Lintex, Ins.



شکل ۱. پمپ خلا و مجموعه مورد نیاز جهت پر کردن میکرولوله‌ها

Fig. 1. The vacuum pump and set required to fill microtubes.



شکل ۲. لایه‌چینی و قرارگیری میکرولوله‌ها بین لایه‌ها و تثبیت آنها

Fig. 2. Hand layup procedure, placing and stabilizing of microtubules between the layers.

ترمیم‌کننده بر روی این لایه قرار داده شده و با استفاده از خمیر نگهدارنده ثابت شدند. پس از آن چیدمان لایه‌های لایه‌های دوم تا پنجم انجام شد. میکرولوله‌های باقیمانده بر روی لایه پنجم قرار داده شده و مجدداً به وسیله خمیر نگهدارنده ثابت شدند. در نهایت با قرارگیری لایه ششم فرآیند لایه‌چینی خاتمه یافت (شکل ۲). در مرحله بعد، به منظور حذف حباب‌های ایجاد شده در حین لایه‌گذاری دستی و همچنین صاف کردن سطح کامپوزیت نهایی، سطوح فوقانی

زاویه‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. ضمن اینکه نیمی از میکرولوله‌ها بین لایه‌های اول و دوم و مابقی بین لایه‌های پنجم و ششم قرار داده شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا پارچه‌های شیشه‌ای در ابعاد مناسب برش داده شده و به ترتیب روی یکدیگر در کف قالب قرار داده شدند. شایان ذکر است در هر مرحله، یک پنجم کل مخلوط رزین و هاردنر در نظر گرفته شده بین لایه‌ها و بر روی پارچه ریخته شد. چنانچه بیان شد پس از لایه‌گذاری لایه نخست، نیمی از لوله‌های حاوی مواد



شکل ۳. اعمال فشار بر پنل‌های کامپوزیتی ساخته شده

Fig. 3. Applying pressure on composite panels.

هوا سرعت سنبه و انرژی ناشی ضربه‌زننده در لحظه برخورد را می‌توان بر اساس جرم وزنه (m) و ارتفاع اولیه آن (h) مطابق روابط زیر تعیین نمود:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$U = mgh \quad (2)$$

بنابراین، سرعت و انرژی سنبه قبل از برخورد به ترتیب ۲/۹۷ متر بر ثانیه و ۱۳/۶۸ ژول خواهد بود.

این ضربه انواع آسیب‌های مختلف مواد کامپوزیتی شامل شکست ماتریس، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش لایه‌ها را در نمونه ایجاد می‌کند. شکل ۵ نمونه قبل و بعد از ضربه را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود خرابی ایجاد شده در نمونه در هر دو سطح نمونه (سطح بالایی و پایینی) قابل مشاهده است. به صورت طبیعی آسیب ایجاد شده موجب سبب کاهش استحکام کششی نمونه خواهد شد. از طرف دیگر،

قالب بر روی کامپوزیت قرار داده شده و کل مجموعه به مدت ۴۸ ساعت تحت پرس ناشی از بار وزنه‌های به وزن ۴۰ کیلوگرم قرار گرفت (شکل ۳). پس از پخت در دمای محیط، پنل‌های کامپوزیتی از درون قالب خارج شده و با استفاده از دستگاه واترجت در ابعاد مناسب برش داده شدند تا نمونه‌های نهایی به ابعاد ۲۵×۲۵۰ میلی‌متر ایجاد شود. شایان ذکر است ضخامت پنل ایجاد شده و در نتیجه نمونه‌های نهایی نیز ۳ میلی‌متر است.

۲-۳- نحوه ایجاد آسیب در نمونه‌ها

به منظور ایجاد آسیب در نمونه‌های کامپوزیتی، از آزمون ضربه افتان با سنبه ضربه‌زن کروی استفاده شده است. این قسمت توسط دستگاه ضربه سرعت پایین که در آزمایشگاه کامپوزیت دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر قرار دارد انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها درون دستگاه قرار گرفت و وزنه‌ای با جرم ۳/۱ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری رها شد تا به سطح نمونه برخورد نماید. ضمن اینکه وجود دو ریل راهنما سبب می‌شد تا وزنه‌ها به صورت کاملاً عمودی حرکت نموده و به چپ یا راست منحرف نشوند (شکل ۴). با صرف نظر نمودن از اصطکاک جزئی دستگاه و مقاومت



شکل ۴. دستگاه انجام آزمون آزمون افتان

Fig. 4. Drop-weight machine for low velocity test

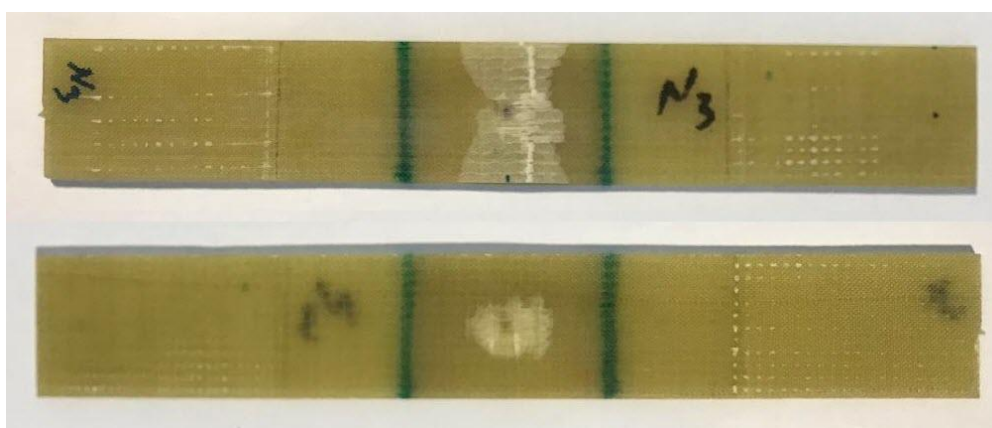
۲-۴- بارگذاری حرارتی سیکلی

هرچند فرآیند ترمیم به خودی خود در دمای محیط صورت می‌پذیرد اما اعمال سیکل‌های حرارتی می‌تواند روند ترمیم را سرعت بخشد. به همین جهت و به منظور بررسی اثر سیکل حرارتی بر فرآیند ترمیم نمونه‌ها، برخی از نمونه‌ها بلافاصله پس از ایجاد آسیب در آنها تحت یک یا چند سیکل حرارتی قرار داده شدند. مدت زمان هر

این ضربه موجب شکست میکرولوله‌ها و آزاد شدن مواد ترمیم‌کننده و شروع فرآیند ترمیم می‌شود. لازم به ذکر است در این فرآیند صرفاً زمینه پلیمری کامپوزیت ترمیم خواهد شد که می‌تواند از رشد ترک در زمینه جلوگیری کند. ضمن اینکه ترمیم زمینه پلیمری می‌تواند به نوبه خود از جدایش الیاف از زمینه و نیز جدایش لایه‌ها جلوگیری نماید و در نتیجه استحکام کششی نمونه‌ها را افزایش دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) نمونه‌ی کامپوزیتی درون فیکسچر قبل از ضربه ب) نمایی از پشت و روی قطعه کامپوزیتی بعد از ضربه

Fig. 5. a) Composite specimen in the fixture before the impact test. b) A back-view and a front-view of the composite specimen after the impact test.

۲-۵- آزمون کشش

جهت بررسی اثر خودترمیمی نمونه‌ها بر استحکام کششی آنها از آزمون کشش تک محوری استفاده شده است. آزمون به وسیله دستگاه Dartec با ظرفیت بار ۵۰ کیلونیوتن که در آزمایشگاه خستگی و عمر سازه دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر مستقر است، انجام شده است. آزمون با نرخ بارگذاری ۲ mm/min و مطابق استاندارد ASTM-D3039 انجام شده است (شکل ۶). جهت انجام آزمون کشش می‌بایست دو لبه انتهایی هر نمونه به اندازه ۵ سانتی‌متر در فک دستگاه قرار می‌گرفت. جهت حصول اطمینان از عدم لغزش نمونه‌ها درون فک دستگاه، پیش

سیکل حرارتی ۱۲۰ دقیقه بود که شامل ۶۰ دقیقه حرارت‌دهی و ۶۰ دقیقه سرد شدن آهسته در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) بود. حرارت دهی توسط دستگاه اتوکلاو RMAC9000_CT3 مستقر در آزمایشگاه خستگی و عمر سازه دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. این دستگاه قابلیت حرارت‌دهی تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. برای نمونه‌های حاضر حرارت‌دهی تا دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در پژوهش حاضر اثر اعمال سیکل حرارتی ۷ و ۵، ۳، ۱ و ۷ سیکل حرارتی بررسی شده است. نمونه‌ها پس از اعمال سیکل حرارتی مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفته و سپس آزمون کشش برای آنها انجام شد.



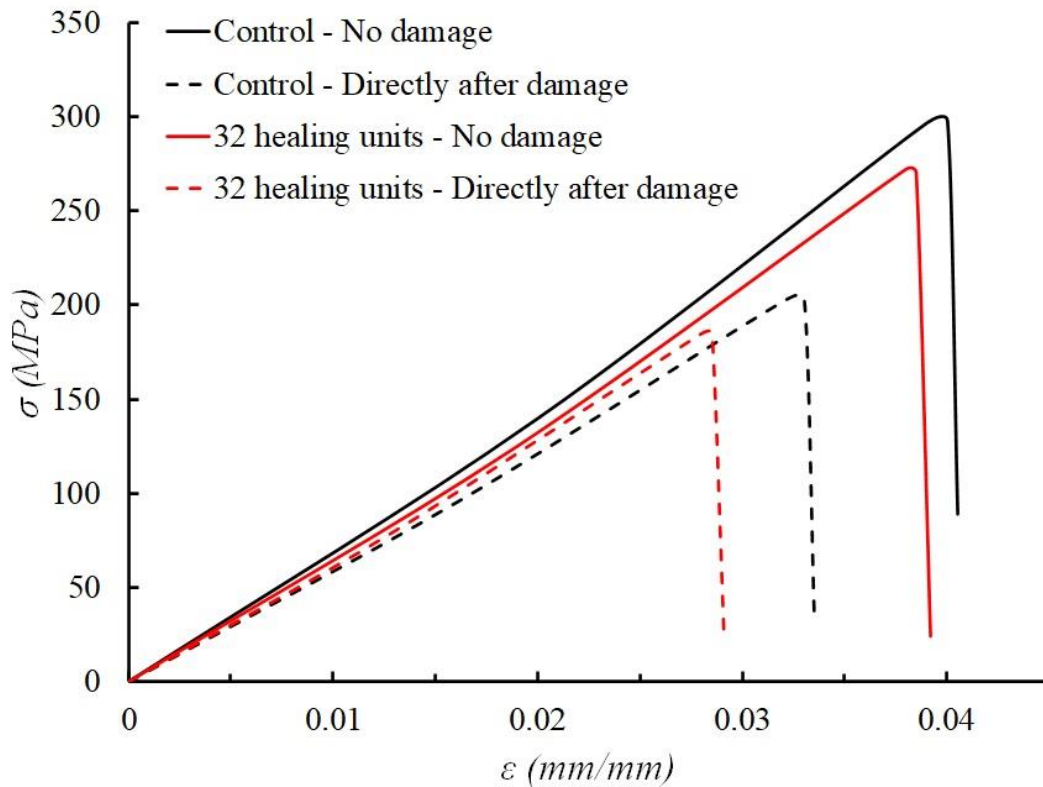
شکل ۶. آزمون کشش تک محوری

Fig. 6. Uniaxial tensile test.

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده و بحث در خصوص آنها آورده شده است. شایان ذکر است برای اطمینان از تکرارپذیری آزمون‌ها، سه نمونه برای هر حالت ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است که نهایتاً مقادیر میانگین برای آنها گزارش شده است.

از انجام آزمون کشش دو سر هر نمونه با سمباده زبر پرداخت شد. به منظور بررسی اثر حضور میکرولوله‌ها، خواص خودترمیمی کامپوزیت و نیز اثر سیکل حرارتی آزمون کشش در چندین مرحله زمانی مختلف انجام شده است: قبل از ایجاد آسیب، بلافاصله پس از ایجاد آسیب، و در فواصل زمانی ۱، ۶ و ۱۲ روز بعد از ایجاد آسیب. ضمناً نمونه‌هایی که بارگذاری حرارتی روی آنها اعمال شده بود، فقط یک روز بعد از ایجاد آسیب مورد آزمون کشش قرار گرفتند.



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی در مقایسه با نمونه شاهد (با و بدون آسیب)

Fig. 7. Stress-strain diagram of the sample with 32 repairing-units compared with the control samples (with and without damage)

۳-۱- نمونه‌های شاهد
 لایه‌های قطعه کامپوزیتی قرار داده شود. اما باید توجه داشت که وجود همین میکرولوله‌ها موجب ایجاد ناپیوستگی در ساختار نمونه کامپوزیتی شده و می‌تواند زمینه‌ای برای بروز تمرکز تنش و نهایتاً ایجاد میکروترک‌هایی در نمونه باشد. بنابراین ضروری است که اثر حضور این میکرولوله بر استحکام کششی نمونه‌ها قبل از ایجاد آسیب بررسی شود. نتایج به دست آمده در جدول ۱ نمایش داده شده است که کاهش استحکام نمونه‌ها در اثر وجود میکرولوله‌ها را نشان می‌دهد. اهمیت این موضوع از آن جهت است که مشخص می‌کند حتی در صورت بازیابی صد در صدی خواص مکانیکی نمونه پس از انجام فرآیند ترمیم، استحکام کششی نمونه‌ها کمتر از نمونه‌هایی است که اصلاً میکرولوله‌ای در ساختار آنها وجود ندارد. به عبارت دیگر، اگرچه استفاده از میکرولوله‌ها امکان بازیابی استحکام از دست رفته را فراهم می‌آورد، اما ظرفیت قطعه برای تحمل بار را کاهش می‌دهد.

چنانچه پیش از این توضیح داده شد، نمونه‌های شاهد نمونه‌هایی هستند که میکرولوله‌ها در آنها وجود ندارند. این نمونه‌ها در دو شرایط مختلف بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب تحت آزمون کشش قرار گرفتند. از این نتایج برای مقایسه با نتایج نمونه‌های خودترمیم به منظور بررسی اثر حضور میکرولوله‌ها استفاده می‌شود (شکل ۷). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استحکام کششی میانگین نمونه شاهد بدون آسیب ۲۹۸ مگاپاسکال است که پس از ایجاد آسیب اولیه و ایجاد ترک‌ها و میکروترک‌ها در نمونه، استحکام کششی برای نمونه شاهد آسیب دیده با ۳۲٪ کاهش به ۲۰۳ مگاپاسکال می‌رسد.

۳-۲- بررسی اثر حضور میکرولوله‌ها

چنانچه توضیح داده شد، برای شروع فرآیند ترمیم در نمونه‌ها نیاز است که مواد ترمیم‌کننده در درون میکرولوله‌هایی و در بین

جدول ۱. استحکام کششی و درصد کاهش استحکام در اثر وجود میکرولوله‌ها در نمونه‌ها

Table 1. Tensile strength and strength reduction percentage due to the presence of microtubes in the samples

درصد کاهش استحکام			استحکام کششی (مگاپاسکال)			نوع نمونه
۳۲ واحد	۱۶ واحد	۸ واحد	۳۲ واحد	۱۶ واحد	۸ واحد	
ترمیمی	ترمیمی	ترمیمی	ترمیمی	ترمیمی	ترمیمی	
-	-	-	۲۹۸	۲۹۸	۲۹۸	شاهد بدون آسیب
-	-	-	۲۰۳	۲۰۳	۲۰۳	شاهد بعد از آسیب
%۱۰	%۷	%۵	۲۶۹	۲۷۶	۲۸۳	خودترمیم بدون آسیب
%۹	%۷	%۴	۱۸۵	۱۸۹	۱۹۴	خودترمیم بلافاصله بعد از آسیب

در این رابطه S_H ، S_D و S_V به ترتیب استحکام کششی نمونه ترمیم شده، استحکام کششی نمونه خودترمیم بلافاصله بعد از آسیب و استحکام کششی نمونه خودترمیم بدون آسیب هستند. در خصوص این رابطه اشاره به این نکته ضروری است که بازده ترمیم نمونه‌های دارای کسر حجمی‌های مختلف میکرولوله‌ها، بر اساس استحکام نمونه خودترمیم بدون آسیب با همان کسر حجمی سنجیده می‌شود.

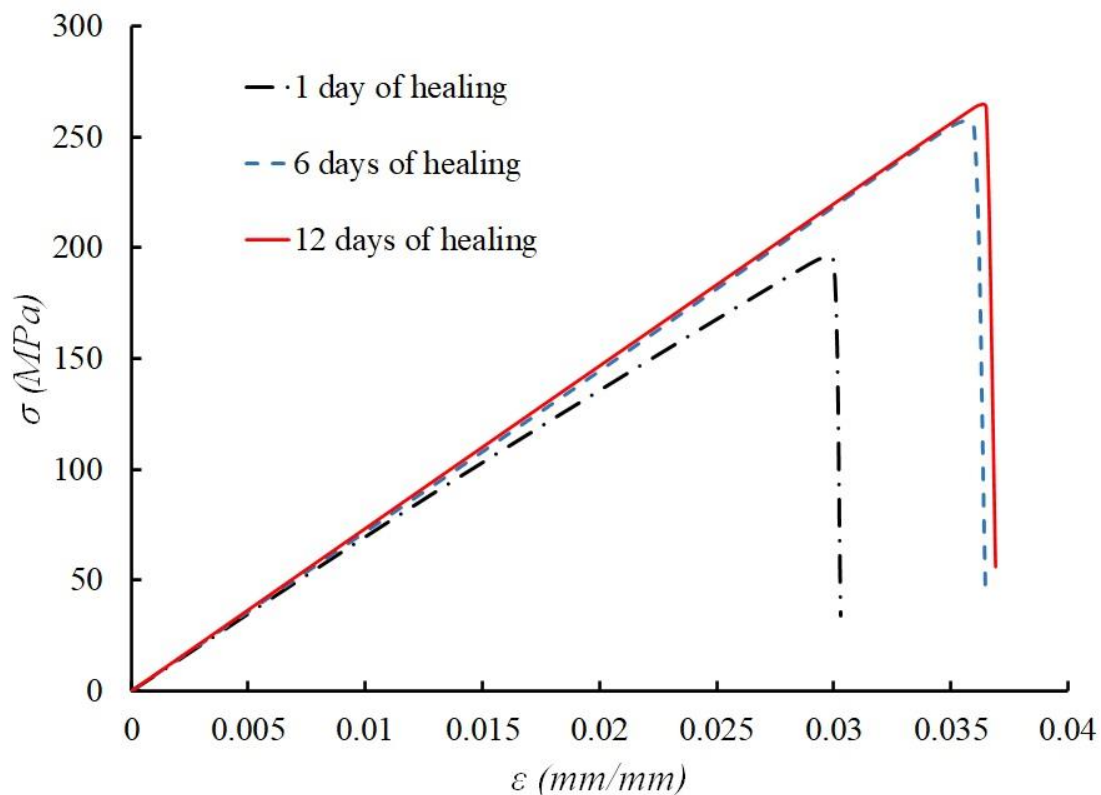
به منظور بررسی زمان لازم برای تکمیل فرآیند ترمیم، پس از ایجاد آسیب اولیه در نمونه‌ها، آنها را در سه بازه زمانی مختلف ۱، ۶ و ۱۲ روزه در دمای اتاق نگه داشته شده و سپس تحت آزمون کشش قرار گرفتند. استحکام کششی به دست آمده برای نمونه‌ها با تعداد مختلف واحد ترمیمی در جدول ۲ آورده شده است. ضمن اینکه شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های دارای ۳۲ واحد ترمیمی را در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بعد از بروز آسیب، با شکسته شدن میکرولوله‌ها و رها شدن عوامل ترمیم‌کننده، این عوامل با رسیدن به محل آسیب و پر کردن ترک‌های ایجاد شده و نیز با ایجاد پیوندهای شیمیایی جدید با زمینه می‌توانند استحکام کششی را بازیابی نمایند. همچنین از نتایج پیداست که فرصت ۱ روزه برای انجام فرآیند ترمیم به هیچ عنوان کافی نیست و میزان بازدهی ترمیم در این مدت بسیار پایین است. با افزایش زمان ترمیم، میزان استحکام بازیابی شده به مقدار قابل توجهی افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، مقایسه بازده ترمیم در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که فرآیند ترمیم در بازه زمانی ۶ روزه تقریباً پایان یافته است و تفاوت معناداری میان نتایج نمونه‌های

علاوه بر این، آزمون مشابهی برای نمونه‌های خودترمیم، بلافاصله بعد از ایجاد آسیب انجام شد و نتایج به دست آمده با نمونه شاهد آسیب دیده مقایسه شده و در جدول ۱ نمایش آورده شده است. استحکام کششی میانگین برای نمونه‌هایی با ۸، ۱۶ و ۳۲ واحد ترمیمی به ترتیب ۱۹۴، ۱۸۹ و ۱۸۵ مگاپاسکال به دست آمد که به ترتیب %۴، %۷ و %۹ کاهش را نسبت به نمونه شاهد آسیب دیده نشان می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد که مطابق انتظار به دلیل از بین رفتن پیوستگی لایه‌های کامپوزیتی در اثر حضور میکرولوله‌ها، وجود آنها استحکام کششی نمونه‌های آسیب‌دیده را کاهش می‌دهد. هرچند با طی شدن فرآیند ترمیم، این موضوع جبران خواهد شد. شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نمونه خودترمیم حاوی ۳۲ واحد ترمیمی را در مقایسه با نمونه شاهد (برای هر دو حالت با و بدون آسیب) نشان می‌دهد.

۳-۳- بررسی فرآیند ترمیم

پیش از ارائه نتایج مربوط به ترمیم نمونه‌ها ضروری است معیاری برای سنجش بازده فرآیند ترمیم در نظر گرفته شود. در مراجع مختلف روابط متفاوتی به منظور محاسبه بازده ترمیم ارائه شده است که یکی از مرسوم‌ترین آنها رابطه (۳) است [۳۶]:

$$\eta = \frac{S_H - S_D}{S_V - S_D} \quad (3)$$



شکل ۸. نمودار تنش- کرنش نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی پس از ترمیم در بازه‌های زمانی مختلف

Fig. 8. Stress-strain diagram of the sample with 32 repairing-units after different time periods

جدول ۲. استحکام کششی و بازده ترمیم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف

Table 2. Tensile strength and recovery efficiency of the samples in different time intervals

بازده ترمیم			استحکام کششی (مگاپاسکال)			نوع نمونه
۳۲ واحد ترمیمی	۱۶ واحد ترمیمی	۸ واحد ترمیمی	۳۲ واحد ترمیمی	۱۶ واحد ترمیمی	۸ واحد ترمیمی	
-	-	-	۲۶۹	۲۷۶	۲۸۳	خودترمیم بدون آسیب
-	-	-	۱۸۵	۱۸۹	۱۹۴	خودترمیم بلافاصله بعد از آسیب
%۱۱	%۱۰	%۸	۱۹۴	۱۹۸	۲۰۱	خودترمیم با ۱ روز ترمیم
%۸۳	%۷۵	%۶۴	۲۵۵	۲۵۴	۲۵۱	خودترمیم با ۶ روز ترمیم
%۸۶	%۷۷	%۶۳	۲۵۷	۲۵۶	۲۵۰	خودترمیم با ۱۲ روز ترمیم

جدول ۳. استحکام کششی و بازده ترمیم نمونه‌ها پس از قرارگیری تحت سیکل‌های حرارتی مختلف

Table 3. Tensile strength and recovery efficiency of samples after being subjected to different thermal cycles.

استحکام کششی (مگاپاسکال)						نوع نمونه
بازده ترمیم			استحکام کششی (مگاپاسکال)			
۳۲ واحد ترمیمی	۱۶ واحد ترمیمی	۸ واحد ترمیمی	۳۲ واحد ترمیمی	۱۶ واحد ترمیمی	۸ واحد ترمیمی	
-	-	-	۲۶۹	۲۷۶	۲۸۳	خودترمیم بدون آسیب
-	-	-	۱۸۵	۱۸۹	۱۹۴	خودترمیم بلافاصله بعد از آسیب
%۱۹	%۱۸	%۱۵	۲۰۱	۲۰۵	۲۰۷	خودترمیم تحت ۱ سیکل حرارتی با ۱ روز ترمیم
%۶۷	%۵۷	%۴۹	۲۴۱	۲۳۹	۲۳۸	خودترمیم تحت ۳ سیکل حرارتی با ۱ روز ترمیم
%۸۵	%۷۲	%۶۲	۲۵۶	۲۵۲	۲۴۹	خودترمیم تحت ۵ سیکل حرارتی با ۱ روز ترمیم
%۸۷	%۷۴	%۶۱	۲۵۸	۲۵۳	۲۴۸	خودترمیم تحت ۷ سیکل حرارتی با ۱ روز ترمیم

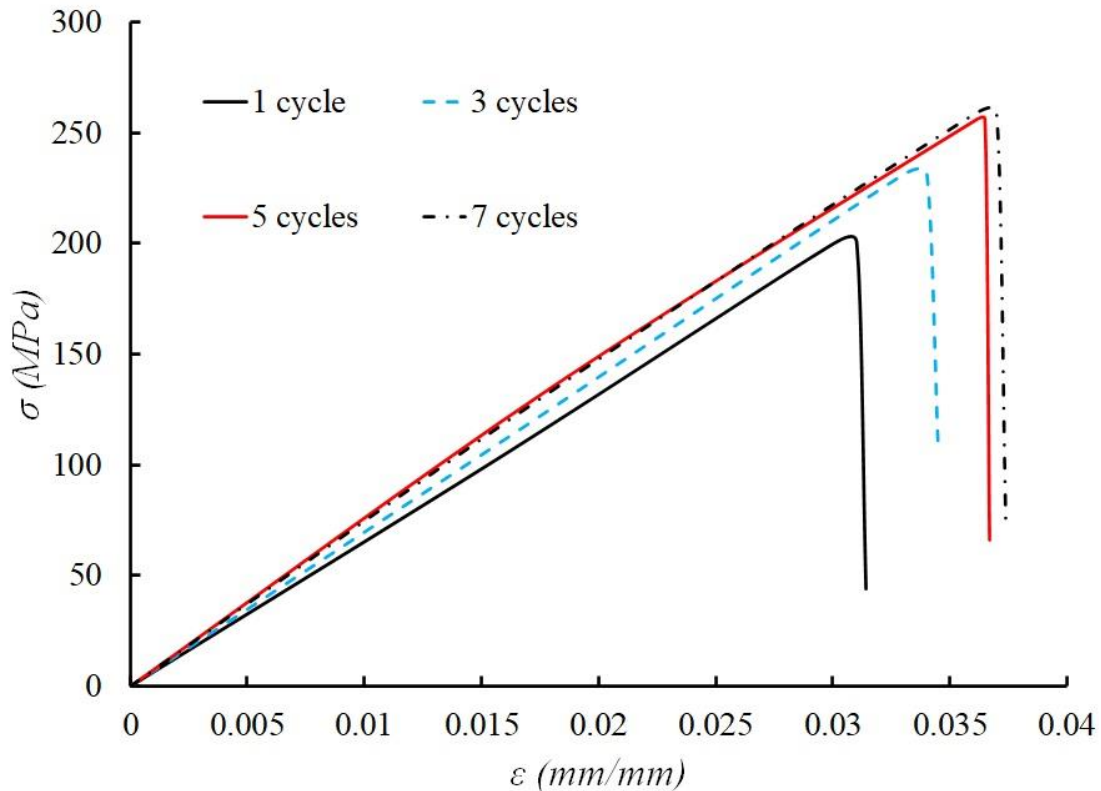
۳-۴- بررسی اثر سیکل حرارتی

چنانچه بیان شد، نمونه‌های خودترمیم برای دستیابی به میزان مناسبی از بازده ترمیم نیازمند زمان کافی (حداقل بازه ۶ روزه) هستند. اما می‌توان با اعمال سیکل‌های حرارتی فرآیند ترمیم را سرعت بخشید. به منظور بررسی این موضوع، دسته دیگری از نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب تحت سیکل‌های حرارتی مختلف (۱، ۳، ۵ و ۷ سیکل) قرار گرفتند و پس از آن یک روز در دمای اتاق قرار داده شدند تا فرآیند ترمیم تکمیل گردد. سپس نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفتند. استحکام کششی و نیز بازده ترمیم همه نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. ضمن اینکه نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی ۳۲ واحد ترمیمی پس از اعمال سیکل‌های حرارتی مختلف در شکل ۹ نمایش داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در همه نمونه‌ها اعمال سیکل حرارتی به تسریع فرآیند ترمیم کمک نموده است. شاید بتوان یکی از مهم‌ترین دلایل اثرگذاری سیکل‌های حرارتی را کاهش ویسکوزیته عامل ترمیمی دانست که موجب نفوذ راحت‌تر و بیشتر آن به ترک‌های ایجاد شده در ناحیه آسیب‌دیده می‌شود. ضمن اینکه، سیکل‌های حرارتی سرعت پلیمریزاسیون عامل ترمیمی را نیز افزایش می‌دهند. علاوه بر این، افزایش دما می‌تواند موجب ایجاد پیوندهای مولکولی جدیدی میان عامل ترمیمی و زمینه کامپوزیتی شود که به دلیل بهینه نبودن دمای عمل‌آوری امکان تشکیل آنها در دمای اتاق وجود نداشته است [۲۸، ۲۹].

شایان ذکر است که نزدیکی استحکام نمونه‌های قرارگرفته تحت ۵ سیکل و ۷ سیکل حرارتی نشان می‌دهد که میزان اثرگذاری سیکل‌های

ترمیم شده به مدت ۶ روز و ۱۲ روز مشاهده نمی‌شود. در توجیه تفاوت اندک میان نتایج ۶ روزه و ۱۲ روزه باید به این نکته اشاره نمود که علیرغم تلاش‌های انجام شده برای ساخت و آزمون تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان، اما وجود تفاوت میان نمونه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. لذا تفاوت جزئی میان نتایج ترمیم ۶ روزه و ۱۲ روزه را، بیش از آنکه مربوط به ادامه فرآیند ترمیم در این مدت بدانیم، می‌توان به خطای آزمایش نسبت داد.

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که افزایش کسر حجمی میکرولوله‌ها که به معنای افزایش عوامل ترمیمی در دسترس برای ترمیم ناحیه آسیب دیده است، الزاماً موجب بهبود شرایط و افزایش استحکام نهایی و بازده ترمیم نمی‌شود [۲۵-۲۷]. علت آن است که پر شدن ترک‌های ایجاد شده در ناحیه آسیب دیده به مقدار مشخصی از عوامل ترمیمی نیاز دارد. وجود عوامل ترمیمی بیشتر نه تنها تاثیر مثبتی در این خصوص ندارد، بلکه می‌تواند به دلیل خواص مکانیکی ضعیف‌تر این عوامل نسبت به ساختار اصلی نمونه کامپوزیتی، استحکام نهایی آن را کاهش دهد. در پژوهش حاضر، برای تمامی بازه‌های زمانی بررسی شده، نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی، بازده ترمیمی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. این موضوع نشان می‌دهد کسر حجمی در نظر گرفته شده برای میکرولوله‌ها هنوز به محدوده اشباع نرسیده، لذا با افزایش کسر حجمی میکرولوله‌ها بازده ترمیم افزایش یافته است.



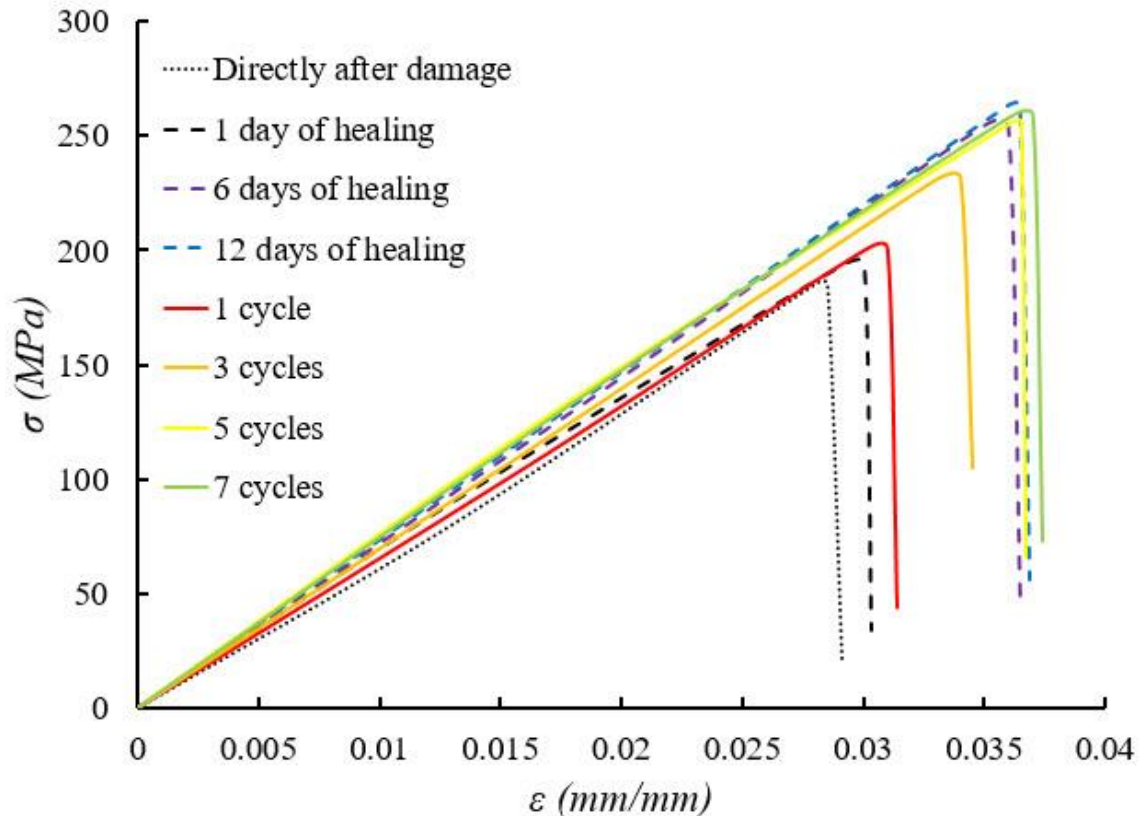
شکل ۹. نمودار تنش- کرنش نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی پس از اعمال سیکل حرارتی مختلف و یک روز ترمیم

Fig. 9. Stress-strain diagram of the sample with 32 repairing-units after applying different thermal cycles and one day of repair.

بخشی از استحکام نمونه بازیابی می‌شود اما این میزان چندان قابل توجه نیست. اگر همین ترمیم یک روزه پس از اعمال تنها یک سیکل حرارتی به نمونه صورت پذیرد، میزان بازیابی استحکام افزایش خواهد یافت. اعمال سیکل‌های دوم و سوم و نیز سیکل‌های چهارم و پنجم سبب خواهد شد تا ترمیم انجام شده (پس از گذشت یک روز) به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. اما چنانکه پیداست، اعمال سیکل‌های ششم و هفتم تاثیر چندان بر افزایش استحکام ندارد. به عبارت دیگر اعمال ۵ سیکل حرارتی حداکثر اثرگذاری ناشی از اعمال سیکل‌های حرارتی را ایجاد خواهد کرد و نیازی به سیکل‌های بعدی نیست. ضمن اینکه استحکام بازیابی شده پس از اعمال ۵ (و یا ۷) سیکل حرارتی و گذشت یک روز ترمیم، تقریباً معادل استحکامی است که نمونه بدون اعمال سیکل حرارتی و پس از ۶ یا ۱۲ روز ترمیم به دست خواهد آورد.

حرارتی بر تسریع فرآیند ترمیم در هر دو دسته تقریباً برابر بوده و سیکل‌های حرارتی ششم و هفتم تاثیر چندان بر تکمیل و تسریع فرآیند ترمیم ندارند. نکته حائز اهمیت دیگر اینکه اگر چه اعمال سیکل‌های حرارتی برای نمونه‌هایی با کسر حجمی مختلف میکرولوله تاثیر مثبتی بر روند ترمیم داشته است، اما میزان اثرگذاری آن بر نمونه‌هایی با ۳۲ واحد ترمیمی بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است به گونه‌ای که بازده ترمیم در این نمونه بعد از ۷ سیکل حرارتی و تنها پس از گذشت یک روز، بیشتر از بازده ترمیم ۱۲ روزه برای نمونه‌ای است که تحت سیکل حرارتی قرار نگرفته است. دلیل این موضوع را می‌توان در دسترس نبودن عوامل ترمیمی کافی برای نمونه‌هایی حاوی ۸ و ۱۶ واحد ترمیمی دانست.

برای مقایسه بهتر نتایج به دست آمده، تمامی نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی ۳۲ واحد ترمیمی به صورت تجمیع شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود حتی با انجام ترمیم یک روزه در دمای نیز



شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش-کرنش تجمیع شده برای نمونه حاوی ۳۲ واحد ترمیمی (بلافاصله پس از آسیب، ترمیم در بازه‌های زمانی بدون اعمال سیکل حرارتی، ترمیم پس از گذشتن یک روز از اعمال سیکل حرارتی)

Fig. 10. Different stress-strain diagrams of the sample with 32 repairing-units (immediately after damage, repair in time intervals without thermal cycle, repair one day after applying the thermal cycle)

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اگر چه وجود میکرولوله‌های حاوی عوامل ترمیمی استحکام اولیه نمونه را تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد، اما می‌تواند پس از ایجاد آسیب اولیه تا بیش از ۸۵٪ استحکام خود را بازیابی نماید. علاوه بر این، بر اساس نتایج به دست آمده نمونه‌های حاوی ۳۲ واحد ترمیمی بازده ترمیمی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند. ضمن اینکه نتایج نشان می‌دهد که فرآیند ترمیم در بازه ۶ روزه تقریباً به پایان می‌رسد و پس از آن تغییرات معناداری در استحکام نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اعمال سیکل حرارتی می‌تواند فرآیند ترمیم را به شکل قابل توجهی سرعت بخشد. به گونه‌ای که اعمال ۵ سیکل حرارتی می‌تواند موجب شود تا پس از ۱ روز به بازده ترمیمی دست یافت که برای نمونه خودترمیم عادی (بدون اعمال سیکل حرارتی) پس از ۱۲ روز ایجاد می‌شود. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که اعمال سیکل‌های حرارتی ششم و هفتم تاثیر چندانی بر تسریع فرآیند ترمیم ندارد.

در پژوهش حاضر، فرآیند خودترمیمی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از جنس الیاف شیشه اپوکسی بررسی شد و اثر کسر حجمی میکرولوله‌های حاوی عامل ترمیم‌کننده و نیز اعمال سیکل حرارتی بر فرآیند ترمیم نمونه‌های آسیب دیده مورد مطالعه قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌ها از پارچه بافته شده از الیاف شیشه نوع E و رزین اپوکسی EPIKOTE828 استفاده شد. همچنین عامل ترمیم‌کننده به صورت دو جزئی شامل رزین اپوکسی ML506 و هاردنر HA-II در نظر گرفته شد. آسیب اولیه در نمونه‌ها توسط آزمون ضربه افتان ایجاد شده و تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها بررسی شد. فرآیند ترمیم در نمونه‌هایی شامل ۸، ۱۶ و ۳۲ واحد ترمیمی و در بازه‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ روزه بررسی شد. علاوه بر این، سری دیگری از نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب اولیه، تحت ۱، ۳، ۵ و ۷ سیکل حرارتی قرار گرفتند و پس از بازه زمانی یک روزه آزمون کشش آنها انجام شد.

Structures, 291 (2022) 115691.

منابع

- [10] V.V. Shinde, S.D. Shelke, A.D.N. Celestine, B.S. Beckingham, Self-healing in high impact polystyrene (HIPS) composites via embedded non-toxic solvent-filled microcapsules, *Journal of Applied Polymer Science*, 139(2) (2022) 51463.
- [11] S. Mirzamohammadi, R. Eslami Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Investigating the healing-mechanical behavior of glass fibers/epoxy self-healing composites containing microcapsules and silica nanoparticles under the shear loading, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 9(1) (2022) 31-42.
- [12] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, S. Mirzamohammadi, S.A. Chirani, The Simultaneous Effect of Microcapsules and Silica Nanoparticles on the Mechanical-healing Properties of Glass Fibers-Epoxy Smart Composites, *Fibers and Polymers*, 23(10) (2022) 2907-2915.
- [13] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, S. Mirzamohammadi, The effect of capsulated nanosilica-epoxy healing agents on the self-healing ability of glass fibers-epoxy composites under mechanical loading, *Journal of Industrial Textiles*, 52 (2022) 15280837221119833.
- [14] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, S. Mirzamohammadi, Assessment of mechanical and healing behaviors of glass fibers-epoxy composite containing the microcapsules with the nanocomposite shell, *Journal of Applied Polymer Science*, 140(1) (2023) e53273.
- [15] C.M. Dry, Alteration of matrix permeability and associated pore and crack structure by timed release of internal chemicals, *Ceramic Transactions*, 16 (1991) 729-768.
- [16] C.M. Dry, N.R. Sottos, Passive smart self-repair in polymer matrix composite materials, in: *Smart Structures and Materials 1993: Smart Materials*, SPIE, 1993, pp. 438-444.
- [17] C. Dry, Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials, *Composite*
- [1] M. Kessler, N. Sottos, S. White, Self-healing structural composite materials, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 34(8) (2003) 743-753.
- [2] F. Zhang, L. Zhang, M. Yaseen, K. Huang, A review on the self-healing ability of epoxy polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 138(16) (2021) 50260.
- [3] R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, A review on healing and mechanical behaviors of self-healable polymer matrix composites by extrinsic healing methods, *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(4) (2020) 549-570.
- [4] S. Islam, G. Bhat, Progress and challenges in self-healing composite materials, *Materials Advances*, 2(6) (2021) 1896-1926.
- [5] S. Kadam, S. Chavan, N.J. Kanu, An insight into advance self-healing composites, *Materials Research Express*, 8(5) (2021) 052001.
- [6] M. Mohammadi, R. Eslami-Farsani, H. Khosravi, On the Mechanical Response of Microvascular-based Self-healing E-glass Fiber/epoxy Composites under tensile testing condition, *Journal of Mechanical Engineering*, 49(2) (2019) 323-329.
- [7] M.A. Mohammadi, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Experimental investigation of the healing properties of the microvascular channels-based self-healing glass fibers/epoxy composites containing the three-part healant, *Polymer Testing*, 91 (2020) 106862.
- [8] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, Experimental investigation of flexural properties of glass fiber-epoxy self-healable composite structures containing capsulated epoxy healing agent and NiCl₂ (imidazole) 4 catalyst, *Journal of Industrial Textiles*, 51(5) (2021) 788-805.
- [9] R.K. Pittala, G. Dhanaraju, B.S. Ben, B.A. Ben, Self-healing of matrix cracking and delamination damage assessment in microcapsules reinforced carbon fibre epoxy composite under flexural loading, *Composite*

- [27] H. Eftekhari, R. Eslami-Farsani, S.M.R. Khalili, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Optimizing the self- healing behavior of hollow glass fibers reinforced epoxy matrix composite, *Modares Mechanical Engineering*, 17(8) (2017) 182-190.
- [28] S.M.R. Khalili, M. Zarei, R. Eslami-Farsani, M.R. Zamani, Experiment study of tensile behavior of self-healing polymer composite under heating cycles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 5(2) (2018) 18-25.
- [29] S.M.R. Khalili, M. Zarei, R. Eslami-Farsani, Experimental Study of the mechanical behavior of self-healing polymer composite under heating cycles, *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(2) (2019) 183-189.
- [30] N. Jalalian Mirzapour, m. Yarmohammad Tooski, Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Composite Sandwich Panel Using Self-healing Materials under CHARPY impact and 3-point Bending Destruction, *Journal of Science and Technology of Composites*, 4(4) (2018) 434-442.
- [31] A. Adli, K. Shelesh-Nezhad, M. Khoshnavan Azar, M. Mohammadi-Aghdam, The effect of vascular self-healing pattern on mechanical behaviour and healing performance of epoxy/glass composite, *Plastics, Rubber and Composites*, 49(2) (2020) 79-90.
- [32] A. Adli, K. Shelesh-Nezhad, M.R. Khoshnavan Azar, M. Mohammadi-Aghdam, The Effect of Vascular Self-Healing Orientation on Healing Efficiency of Epoxy/Glass Fiber Composite, *Journal of Science and Technology of Composites*, 7(1) (2020) 723-730.
- [33] A. Adli, K. Shelesh-Nezhad, M.R. Khoshnavan Azar, M. Mohammadi-Aghdam, Experimental and Numerical Studies on the Effect of Hollow Glass Fiber Presence and Orientation on the Tensile Behavior of Epoxy/Glass Fiber Composite, *Journal of Science and Technology of Composites*, 7(2) (2020) 881-890.
- [34] P. Kshirsagar, C.S. Jarali, S. Raja, Investigation on Flexural and Impact Strength of Hollow Glass Fabric and E-Glass Fiber Reinforced Self-Healing Polymer structures, 35(3) (1996) 263-269.
- [18] M. Motuku, U. Vaidya, G. Janowski, Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact, *Smart Materials and Structures*, 8(5) (1999) 623.
- [19] S. Bleay, C. Loader, V. Hawyes, L. Humberstone, P. Curtis, A smart repair system for polymer matrix composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12) (2001) 1767-1776.
- [20] J.W. Pang, I.P. Bond, A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility, *Composites Science and Technology*, 65(11-12) (2005) 1791-1799.
- [21] R. Trask, I. Bond, Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *Smart Materials and Structures*, 15(3) (2006) 704.
- [22] R. Trask, G. Williams, I. Bond, Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *Journal of the royal society Interface*, 4(13) (2007) 363-371.
- [23] A. Kousourakis, A. Mouritz, The effect of self-healing hollow fibres on the mechanical properties of polymer composites, *Smart Materials and Structures*, 19(8) (2010) 085021.
- [24] S. Zainuddin, T. Arefin, A. Fahim, M. Hosur, J. Tyson, A. Kumar, J. Trovillion, S. Jeelani, Recovery and improvement in low-velocity impact properties of e-glass/epoxy composites through novel self-healing technique, *Composite Structures*, 108 (2014) 277-286.
- [25] 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*, 3(3) (2016) 285-290.
- [26] A. Sari, R. Eslami Farsani, M.R. Zamani, An experimental investigation on the tensile behavior of epoxy/carbon fibers composites containing anhydride self-healing material, *Modares Mechanical Engineering*, 17(3) (2017) 336-342.

- (2012).
- [36] B.J. Blaiszik, S.L. Kramer, S.C. Olugebefola, J.S. Moore, N.R. Sottos, S.R. White, Self-healing polymers and composites, *Annual review of materials research*, 40(1) (2010) 179-211.
- Composites, *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*, 13(4) 41-56.
- [35] M. Aliha, R.M. HEIDARI, M. Shokrieh, M. Ayatollahi, Determination of tensile strength and crack growth of a typical polymer concrete using circular disc samples,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Talezadehlari, A. Nikbakht, *Investigating the effect of thermal cycles on the recovery of tensile strength in self-healing composites under impact loading*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(2) (2023) 159-178.

DOI: [10.22060/mej.2023.21725.7496](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21725.7496)



