



بهینه سازی رفتار خود ترمیمی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه توخالی

هانیه افتخاری¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، سید محمدرضا خلیلی³، حسین ابراهیم نژاد خالجیری⁴

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

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

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 خرداد 1396

پذیرش: 29 تیر 1396

ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

خودترمیمی

الیاف شیشه توخالی

خواص مکانیکی

کامپوزیت زمینه اپوکسی

چکیده

در این کار تحقیقاتی، رفتار خودترمیمی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف توخالی شیشه به عنوان محفظه نگهدارنده عامل ترمیمی بررسی شد. برای انجام این کار، در ابتدا الیاف توخالی شیشه توسط ایجاد حلاله با رزین و هاردنر پر شدند. سپس، الیاف توخالی پر شده در درصدهای حجمی 1، 3 و 5 درصد، در داخل زمینه اپوکسی قرار داده شدند. در گام بعدی، توسط اعمال فشار، تخریب در نمونه‌های کامپوزیتی ایجاد شد. سپس این نمونه‌های تخریب شده به مدت 2، 4، 7 و 14 روز برای انجام ترمیم در کامپوزیت در دامی محیط قرار داده شدند. در ادامه برای دستیابی به زمان بهینه ترمیم و درصد بهینه الیاف توخالی در کامپوزیت، این کامپوزیت‌ها تحت آزمایش خمش قرار گرفتند. در گام آخر، خواص مکانیکی کامپوزیت با درصد تقویت کننده و زمان ترمیم بهینه توسط آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین درصد الیاف توخالی 3 درصد حجمی و زمان بهینه برای عمل ترمیم 7 روز است. همچنین بازده ترمیم کامپوزیت در شرایط بهینه (3 درصد حجمی الیاف توخالی و زمان ترمیم 7 روز) در آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه به ترتیب حدود 77، 54 و 92 درصد بدست آمد.

Optimizing the self- healing behavior of hollow glass fibers reinforced epoxy matrix composite

Hanieh Eftekhari¹, Reza Eslami-Farsani^{1*}, Seyed Mohammad Reza Khalili², Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri¹

1- Faculty of Materials Science and Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 June 2017

Accepted 15 July 2017

Available Online 09 August 2017

Keywords:

Self-healing

Hollow Glass Fibers

Mechanical Properties

Epoxy Matrix Composite

ABSTRACT

In this research work, the self-healing behavior of epoxy matrix composite reinforced by hollow glass fibers as self-healing container was investigated. To do this, in the first step, the hollow glass fibers were filled with the epoxy resin and hardener by creating a partial vacuum. Then, the filled hollow glass fibers with different percentage of 1, 3 and 5 vol.% were embedded in the epoxy matrix. In the next step, by applying press, the destruction was created in these composites. Then, these destructed composites were healed at ambient temperature at different times of 2, 4, 7 and 14 days. Next, or accessing the optimum healing time and percentage of hollow fibers in composite, the flexural test was applied in these composites. In the final step, the mechanical properties of composite with the optimum healing time and percentage of reinforcement were evaluated via tensile, flexural and impact exams. The obtained results show that the optimum percentage of hollow fibers and time for healing process are 3 vol.% and 7 days. Also, the healing efficiency of composite in optimum conditions (3 vol.% hollow fibers and 7 days healing time) at tensile, flexural and impact exams was approximately 77, 54 and 92 % respectively.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری دارای مشکلاتی نظیر ایجاد ترک ریز و گسترش این ترک‌ها، لایه‌ای شدن الیاف و زمینه، شکست الیاف، خوردگی الیاف و افت خواص در دماهای کاری بالا هستند. به صورتی که با وارد شدن نیرو بر سطح قطعه پلیمری، مثلاً با اعمال ضربه، ترک‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی در آن ایجاد می‌شود که اگر این تخریب قابل ترمیم نباشد، با گسترش ترک‌ها در نهایت قطعه از بین می‌رود. پس از ایجاد این ترک‌ها خواص مکانیکی نظیر استحکام سفتی و پایداری ابعادی قطعه تغییر خواهد کرد [1,2]. شایان ذکر

از نقطه نظر علم و مهندسی مواد و مکانیک، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیشرفته نظیر الیاف کربن، شیشه، کولار و بازالت به دلیل داشتن خواصی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، سفتی به وزن بالا، جذب انرژی مناسب، دوام بیشتر و وزن کمتر، باعث جلب توجه بسیاری از محققان به خصوص در صنایع پیشرو از جمله خودروسازی، هوافضا، صنایع معدنی، کشتی‌سازی و حمل و نقل شده است [1]. در کنار مزایای ذکر شده

Please cite this article using:

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*, Vol. 17, No. 8, pp. 182-190, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به میزان تقویت‌کنندگی بالای الیاف شیشه و با توجه به قیمت مناسب آن نسبت به الیاف کربن، این دسته الیاف کاربرد بیشتری دارد. الیاف مورد استفاده در بحث خودترمیم‌کنندگی، قطره‌های مختلف داشته و کسر حجمی آن‌ها تا 65 درصد گزارش شده است. به طوری که در برخی موارد الیاف توخالی حاوی مواد ترمیم‌کننده، نقش تقویت‌کنندگی هم دارند و از الیاف دیگری به عنوان جزء تقویت‌کننده استفاده نمی‌شود و از انواع رزین‌ها مانند سیانوآکریلات⁶ و اپوکسی برای پر نمودن آن‌ها استفاده می‌شود [20].

اسلامی و همکاران [21] رفتار مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن حاوی مواد خودترمیمی انیدریدی⁷ را تحت بارگذاری عرضی بررسی کردند. محفظه نگهدارنده عامل خودترمیمی در این تحقیق الیاف شیشه توخالی بود که رزین و هاردنر انیدریدی به عنوان عامل ترمیم در داخل الیاف توخالی توسط ایجاد خلاء در شیشه قرار داده شدند. در تحقیق انجام شده توسط این محققین، از شیشه‌های توخالی پر شده با 2، 4 و 6 درصد حجمی عامل خودترمیمی در داخل کامپوزیت استفاده شد. سپس، پس از تخریب نتایج خودترمیمی بعد از گذشت 5 و 8 روز بررسی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که استحکام خمشی بعد از گذشت زمان تخریب، بهبود یافت و بازایی 84 درصدی برای نمونه 4 درصد حجمی پس از گذشت 8 روز بدست آمد.

در تحقیقی مشابه، ساری و همکاران [22] رفتار مکانیکی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن را تحت بارگذاری کششی بررسی کردند. هدف از این پژوهش بررسی کسر حجمی مناسب برای ماده خودترمیم و زمان مطلوب برای مشاهده پدیده ترمیم‌شوندگی گزارش شده است. بدین منظور میکرولوله‌های شیشه‌ای حاوی مواد ترمیمی انیدریدی با کسرهای حجمی 0.75، 1.65 و 2.5 درصد در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن قرار داده شد. نتایج گزارش شده نشان داد که بیشترین مقدار بازایی استحکام کششی به میزان 89 درصد برای نمونه حاوی 1.65 درصد حجمی ماده ترمیمی است. همچنین بررسی‌های مربوط به کرنش نشان داد که حضور میکرولوله‌ها باعث کاهش کرنش شکست در نمونه‌ها شده است که با افزایش زمان ترمیم، کرنش شکست بهبود یافته است.

کلینگ و همکاران [23] کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه توخالی را بررسی کردند. هدف این تحقیق شناسایی آسیب و بررسی رفتار خودترمیمی توسط الیاف شیشه توخالی پر شده با رزین پلی‌استر و اپوکسی بود. در این تحقیق برای شناسایی رفتار خودترمیمی از رنگ فلئورسنت در رزین پلی‌استر و اپوکسی استفاده و برای مشاهده رفتار خودترمیمی از لامپ ماوراء بنفش استفاده شد. نوع آسیب ایجاد شده در این کامپوزیت‌ها توسط دستگاه ضربه افتان انجام شد. سپس نمونه‌ها در دماهای 23 و 60 سانتی‌گراد به مدت 12 و 120 ساعت برای عمل خودترمیمی قرار داده شدند و سپس تحت بارگذاری عرضی خواص آن‌ها بررسی شد. نتایج گزارش شده بیان می‌کند که استفاده از رزین پلی‌استر به علت حساس نبودن به نسبت اختلاط از نقطه‌نظر انجام خودترمیمی بسیار مناسب‌تر از رزین اپوکسی به عنوان عامل خودترمیمی می‌باشد. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داد که استحکام خمشی کامپوزیت پس از تخریب و ترمیم توسط عامل ترمیم رزین پلی‌استر 20 درصد بهبود یافته است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، فعالیتی جامع در مورد بهینه‌سازی و بررسی خواص مکانیکی و ترمیم کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی لوله‌های توخالی الیاف شیشه انجام نشده است. بنابراین هدف اصلی این کار پژوهشی

است، ترک‌های ایجاد شده در کامپوزیت به دلیل قرارگیری در زیرلایه‌ها با چشم قابل مشاهده نیستند. شناسایی این ترک‌ها نیازمند تجهیزات پیشرفته بدون ایجاد تخریب در نمونه از جمله التراسونیک، گرماسنجی رادیویی، استفاده از اشعه ایکس می‌باشد [4].

یکی از رویکردهای محققان برای کاهش خسارت‌های ناشی از ترک‌ها، ترمیم میکروتورک‌ها در کامپوزیت براساس ترمیم زخم در سیستم‌های بیولوژیکی می‌باشد [5]. براساس بررسی‌های انجام شده تاکنون روش‌های مختلفی برای ترمیم این ترک‌ها پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های مورد استفاده در ترمیم ترک‌ها، نگهداری ماده خودترمیم شونده¹ در داخل محفظه نگهدارنده می‌باشد [6]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که این مواد خودترمیم شونده را می‌توان به صورت میکروکپسول²، شبکه میکروآوندی³ و همچنین الیاف شیشه توخالی برای ترمیم میکروتورک‌های ایجاد شده در زمینه، به کار برد [7-9].

برای دستیابی به ترمیم چند مرحله‌ای در مواد کامپوزیتی، استفاده از الیاف توخالی با قابلیت ذخیره‌سازی مقدار بیشتری از عامل ترمیم⁴ ابداع شد. با این وجود، پیشرفت‌های اولیه بسیار محدود بود که دلیل این امر، طراحی نامناسب الیاف توخالی و نیز استفاده از عامل ترمیم با ویسکوزیته بالا و در پی آن تزریق ناموفق رزین به درون ترک‌ها ذکر شده است [10]. در ادامه با بهینه‌سازی طراحی الیاف توخالی و استفاده از ویسکوزیته مناسب، این ساز و کار به روشی موثر برای تولید کامپوزیت‌های خودترمیم تبدیل شد [11، 12].

برای اولین بار استفاده از الیاف توخالی توسط درای و همکارانش جهت افزایش قابلیت تکرار ترمیم به کار گرفته شد و موفقیت محدودی حاصل شد [13-15]. در طی سال‌های بعد ماتوکو و همکارانش الیاف توخالی با قطر بالا را مورد استفاده قرار دادند که آن‌ها نیز ناموفق بودند [16]. سپس، بلی و همکارانش الیافی با قطر کمتر را استفاده کردند که در این سیستم به علت ویسکوزیته بالای رزین، ترک توسط رزین پر نشده و عمل ترمیم به خوبی صورت نگرفت [17]. باند و همکارانش بعدها فرآیند تولید الیاف توخالی را برای تولید الیاف توخالی بهینه توسعه دادند. در نهایت کامپوزیت خودترمیم شونده با استفاده از الیاف توخالی شیشه‌ای ابداع شده توسط براون و همکارانش در سال 2003 نسبت به کامپوزیت حاوی میکروکپسول‌های تولید شده توسط هوکر و همکارانش در سال 2002 از خواص ترمیم‌شوندگی برتری برخوردار بود [18]. علی‌رغم وجود مشکلاتی در مسیر ساخت کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف توخالی، با توجه به مزایای الیاف توخالی، تولید و توسعه کامپوزیت‌های حاوی الیاف توخالی، مورد توجه بسیاری از محققین و دانشمندان قرار گرفته است.

کلیه الیاف توخالی را می‌توان توسط رزین تک‌جزئی پر کرده و در درون کامپوزیت قرار داد و یا این که آن‌ها را به صورت مجزا از رزین و هاردنر پر نموده، به صورت موازی یا عمود بر یکدیگر قرار داد. همچنین می‌توان رزین (عامل ترمیم‌کننده) را در الیاف توخالی و کاتالیست را درون میکروکپسول‌ها ذخیره کرد [17]. برای ترمیم‌کنندگی به صورت کلی از الیاف شیشه‌ای توخالی استفاده می‌شود که بر اثر اعمال تنش، دیواره آن‌ها شکسته شده و رزین در محیط دارای ترک آزاد می‌شود [19]. البته به کارگیری سایر الیاف نظیر پلی‌متیل متاکریلات⁵ و الیاف کربن نیز گسترش یافته است که با توجه

¹ Self-Healing

² Microcapsules

³ Micro-vascular

⁴ Healing agent

⁵ Poly methyl methacrylate

⁶ Cyanoacrylate

⁷ Anhydride

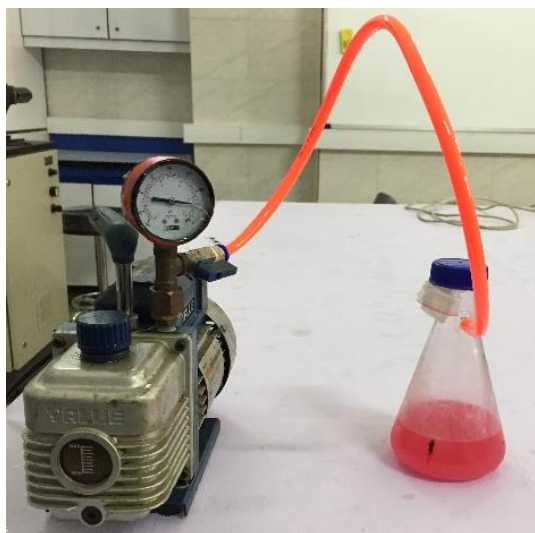


Fig. 1 Filling hollow glass fibers via vacuum pump

شکل 1 پر کردن الیاف شیشه توخالی به وسیله پمپ خلاء

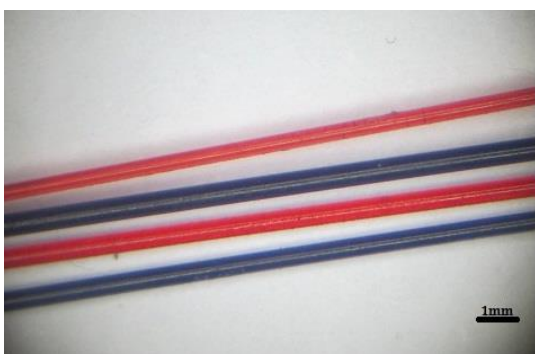


Fig. 2 Filled hollow glass fibers by vacuum pump

شکل 2 الیاف شیشه توخالی پر شده به وسیله پمپ خلاء

طراحی شد که در "شکل 3" می‌توان مشاهده نمود. لازم به ذکر است، برای دستیابی به سطوح صاف و کیفیت بهتر برای ساخت نمونه‌های کشش، خمش و ضربه از قالب فلزی استفاده شد. در گام بعدی، الیاف توخالی شیشه حاوی رزین و هاردنر در داخل قالب با فاصله موردنظر قرار داده شدند. در ادامه، رزین و هاردنر با یکدیگر مخلوط شده و به داخل قالب تزریق شدند. عمل پخت در دمای محیط و پس از گذشت 8 ساعت انجام شد که توسط شرکت سازنده مطرح شده است. شرایط تجربی ساخت و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های ساخته شده در جدول 2 آورده شده است. همچنین "شکل 4" یک نمونه از این کامپوزیت‌های ساخته شده را نشان می‌دهد که به صورت شماتیک نحوه قرارگیری الیاف توخالی شیشه در آن مشخص شده است. در این کار تحقیقاتی، سه نمونه با درصدهای حجمی الیاف توخالی متفاوت 1، 3 و 5 درصد حاوی رزین و هاردنر در نظر گرفته شدند. این نمونه‌ها پس از ایجاد تخریب، به مدت زمان‌های 2، 4، 7 و 14 روز در دمای 25 °C قرار داده شدند. انتخاب زمان‌های متفاوت برای ترمیم به این دلیل است که عامل ترمیمی زمان مناسب برای خروج از الیاف توخالی و ترمیم را داشته باشد.

5-2- ایجاد تخریب

در این پژوهش از دستگاه پرس و یک استوانه با قطر 9.5 mm و با سر دندانه-دار با قطر 0.1 mm برای تخریب استفاده شد (شکل 5). در نمونه‌ها، یک تخریب در وسط نمونه و تحت نیروی 120 kN ایجاد گردید (شکل 6). تخریب

دستیابی به زمان و درصد خودترمیمی بهینه در این نوع کامپوزیت توسط عامل خودترمیمی رزین اپوکسی و هاردنر و بررسی خودترمیمی انجام شده بر خواص کشش، خمش و ضربه کامپوزیت ذکر شده می‌باشد.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- مواد مورد استفاده

در گام نخست الیاف شیشه توخالی با قطر خارجی 380-400 μm به عنوان محفظه نگهدارنده عامل خودترمیمی ساخته شدند. رزین اپوکسی آرالدایت ال وای 5052¹ و هاردنر پلی‌آمین آرادور 5052² به عنوان عامل خودترمیمی و ماده زمینه (از شرکت هانتسمن³) انتخاب شدند. این رزین به دلیل پایین بودن ویسکوزیته در مقایسه با رزین‌های موجود دیگر، به‌عنوان گزینه مناسب عامل ترمیم‌شوندگی انتخاب شد. نسبت وزنی رزین به هاردنر مطابق توصیه شرکت سازنده 62 به 38 درصد وزنی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، برای کاهش ویسکوزیته رزین استفاده شده در محفظه خودترمیم از استون استفاده شد.

2-2- ساخت الیاف توخالی

ساخت الیاف توخالی شیشه بدین صورت است که در ابتدا لوله‌های توخالی شیشه از جنس بورسیلیکات با قطر خارجی 9 mm و قطر داخلی 7 mm تهیه شدند. سپس این لوله‌های توخالی با استفاده شعله، حرارت داده شدند. در نهایت با انجام پیچش و کشش همزمان قطر لوله‌های شیشه‌ای کاهش و الیاف شیشه توخالی با قطر خارجی 380-400 μm و قطر داخلی 300-320 μm به دست آمد. خواص الیاف شیشه توخالی ساخته شده به روش مذکور به صورت خلاصه در جدول 1 آمده است.

3-3- پر کردن الیاف توخالی

در گام نخست، رزین اپوکسی با نسبت وزنی 50:50 توسط استون رقیق شد تا قابلیت پر کردن الیاف توخالی افزایش یابد. سپس با ایجاد خلاء توسط پمپ و وجود نیروی موئین، الیاف توخالی توسط رزین اپوکسی پر شدند (شکل 1). در انتها، دو طرف الیاف توسط چسب به منظور عدم خروج رزین عایق‌بندی شد. این عایق‌بندی توسط چسب اپوکسی ساخت شرکت جلاسنج انجام شد. روندی مشابه روند پر شدن رزین برای پر کردن الیاف توسط هاردنر پلی-آمین نیز انجام شد (شکل 2).

4-4- ساخت کامپوزیت

برای ساخت کامپوزیت تقویت شده با الیاف توخالی شیشه، ابتدا قالب مناسب

جدول 1 مشخصات الیاف شیشه توخالی

Table 1 Hollow glass fibers specification

مقدار	خواص
3.3	جنس بورسیلیکات
68	مدول الاستیک در دمای 25 °C (kN/mm ²)
2.23	وزن مخصوص در دمای 25 °C (g/cm ³)
820	دمای ذوب (°C)
390	قطر متوسط خارجی الیاف شیشه توخالی (μm)
310	قطر متوسط داخلی الیاف شیشه توخالی (μm)
300	طول متوسط لوله‌ها (mm)

¹ Araldite LY5052

² Aradur 5052

³ Huntsman

و گذشت زمان لازم، ترمیم صورت گرفت.

6-2- آزمایش‌های مکانیکی

برای بررسی خواص مکانیکی از آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه چارپی استفاده شد. برای بررسی رفتار کششی دستگاه هانسفیلد¹ H25KS مطابق با استاندارد ASTM D3039 به کار رفت [24]. مطابق این استاندارد، نمونه‌ها با ابعاد $25 \times 250 \text{ mm}^2$ و با سرعت بارگذاری 2 m/s در شرایط محیطی تحت آزمایش استاتیکی کشش قرار گرفتند. رفتار خمشی کلیه نمونه‌های کامپوزیتی توسط دستگاه خمش سه نقطه‌ای در شرایط محیطی مطابق استاندارد ASTM D790M با سرعت بارگذاری 2 mm/min و با ابعاد 25×180 بررسی شد [25]. آزمایش ضربه چارپی نیز مطابق استاندارد ASTM D6110 با ابعاد $12 \times 75 \text{ mm}^2$ انجام پذیرفت [26]. برای دستیابی به نتایج صحیح‌تر، مطابق استاندارد هر آزمایش 5 بار تکرار و میانگین نتایج گزارش شد.

7-2- بررسی میکروسکوپی

برای نشان دادن روند ترمیم کامپوزیت‌های خودترمیم ساخته شده، از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 استفاده شد. شایان ذکر است، بزرگنمایی استفاده شده برای ثبت تصاویر کامپوزیت‌های خودترمیم $40 \times$ می‌باشد.

3- نتایج و بحث

1-3- محاسبه درصد الیاف توخالی بهینه جهت انجام آزمایشات

در فرآیند خودترمیمی، جهت انتخاب درصد الیاف توخالی باید دو نکته را در نظر گرفت. نخست، میزان مواد لازم جهت پرکردن ترک یا آسیب که با

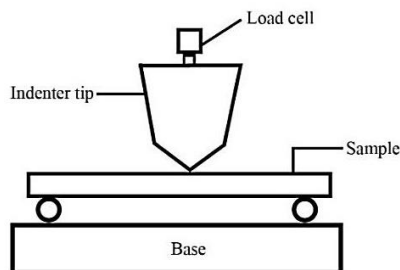


Fig. 5 Self-healing samples destruction by press machine

شکل 5 تخریب نمونه‌های خودترمیم‌شونده به وسیله‌ی دستگاه پرس

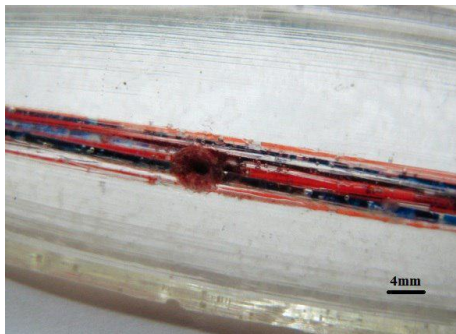


Fig. 6 Destructed hollow glass fibers composite by press machine

شکل 6 کامپوزیت الیاف شیشه توخالی تخریب شده با دستگاه پرس



Fig. 3 Fabricated mold for samples of tensile, flexural and impact

شکل 3 قالب ساخته شده برای نمونه‌های کشش، خمش و ضربه

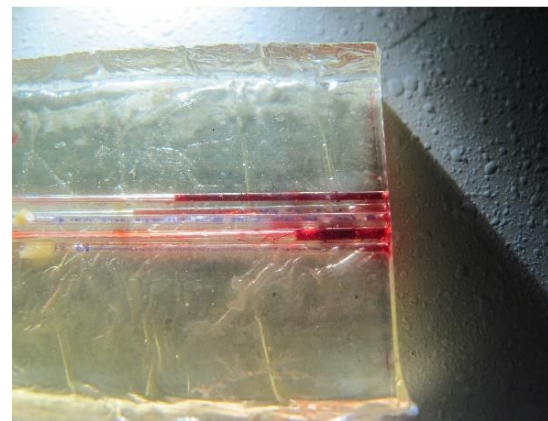
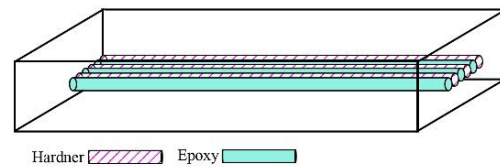


Fig. 4 Fabricated hollow glass fibers composite including healing agent

شکل 4 کامپوزیت الیاف شیشه توخالی ساخته شده حاوی عامل ترمیم

جدول 2 کدگذاری نمونه‌ها و شرایط تجربی

Table 2 Specimens coding and experimental conditions

تخریب	زمان ترمیم (day)	الیاف توخالی (vol.%)	کد نمونه *
بدون	0	0	0F-ND-00
با	2	1	1F-WD-02
با	4	1	1F-WD-04
با	7	1	1F-WD-07
بدون	0	3	3F-ND-00
با	0	3	3F-WD-00
با	2	3	3F-WD-02
با	4	3	3F-WD-04
با	7	3	3F-WD-07
با	14	3	3F-WD-14
با	2	5	5F-WD-02
با	4	5	5F-WD-04
با	7	5	5F-WD-07

* عدد اول سمت چپ: درصد الیاف شیشه توخالی، F: الیاف شیشه توخالی، ND: نمونه بدون تخریب، WD: نمونه تخریب شده، دو رقم سمت راست: تعداد روزهای ترمیم نمونه.

ایجاد شده موجب ایجاد ترک در الیاف شده و پس از تراوش مواد ترمیم‌کننده

¹ Hounsfield

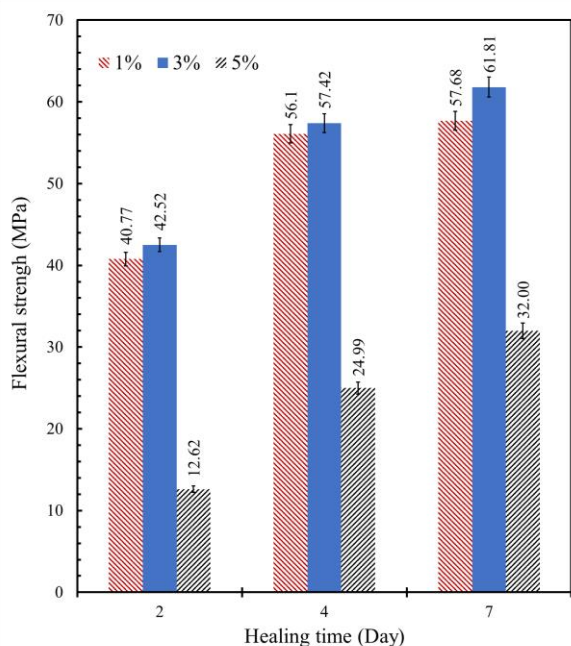


Fig. 7 Comparing flexural properties of self-healing samples at different healing time and percentage of hollow glass fibers

شکل 7 مقایسه استحکام خمشی نمونه‌های خودترمیم‌شونده با زمان‌های متفاوت ترمیم و الیاف شیشه توخالی

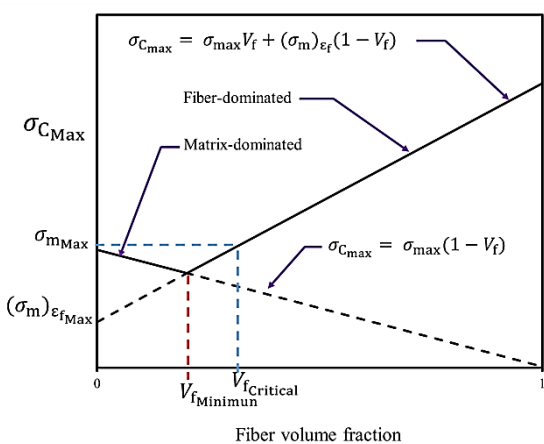


Fig. 8 Tensile resistance of composites vs. volume percent of hollow fibers

شکل 8 مقاومت کششی کامپوزیت برحسب درصد حجمی الیاف توخالی [28]

خودترمیم‌شونده با درصدهای حجمی الیاف 1، 3 و 5 درصد که مدت 7 روز زمان از تخریب آن‌ها گذشته باشد، تحت آزمایش کشش و ضربه نیز قرار گرفتند که نتایج آن به ترتیب در "شکل‌های 9 و 10" آورده شده است.

براساس نتایج نشان داده شده در "شکل‌های 9 و 10" می‌توان فهمید که در آزمایش کشش نیز بهترین خواص از نمونه خود ترمیم‌شونده با 3 درصد حجمی الیاف توخالی پر شده با استحکام کششی 20.00 MPa حاصل شده است. همچنین در آزمایش ضربه تفاوت معناداری در انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف شیشه حاوی عامل خودترمیمی دیده نمی‌شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که کامپوزیت حاوی 3 درصد حجمی الیاف پر شده، بهینه‌ترین خواص را در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌ها از خود نشان می‌دهد.

افزایش آن، رزین و هاردنر شانس بیشتری برای پر کردن آسیب و همچنین برخورد با یکدیگر و انجام عملیات خودترمیمی خواهند داشت. دیگری، وجود الیاف توخالی که می‌تواند به عنوان مراکز آسیب عمل کرده و باعث کاهش خواص مکانیکی در نمونه شود [27].

نتایج آزمایش خمش در "شکل 7" نشان داده شده است. براساس "شکل 7" با توجه به خواص خمشی می‌توان مشاهده کرد که بهترین درصد الیاف نمونه‌های خودترمیم در زمان‌های ترمیم 2، 4 و 7 روز، مربوط به نمونه‌های حاوی 3٪ حجمی الیاف توخالی پر شده، به ترتیب با استحکام‌های خمشی 42.52، 57.42، 61.81 و 57.68 MPa می‌باشد. این نتیجه از عملکرد مقدار ماده ترمیم‌کننده و کسر حجمی الیاف توخالی حاصل شده است.

لازم به ذکر است که رابطه بین کسر حجمی الیاف و استحکام کامپوزیت به صورت رابطه‌های (1) و (2) می‌باشد که به صورت شماتیک در "شکل 8" رسم شده است.

$$V_{fCritical} = \frac{\sigma_{mMax} - (\sigma_m)\epsilon_{fMax}}{\sigma_{fMax} - (\sigma_m)\epsilon_{fMax}} \quad (1)$$

$$V_{fMin} = \frac{\sigma_{mMax} - (\sigma_m)\epsilon_{fMax}}{\sigma_{fMax} + \sigma_{mMax} - (\sigma_m)\epsilon_{fMax}} \quad (2)$$

در رابطه‌های (1) و (2)، σ_m ، V_f ، ϵ_f و به ترتیب کسر حجمی الیاف، استحکام زمینه، استحکام الیاف و کرنش الیاف می‌باشند. همچنین در این رابطه‌ها اندیس‌های Max، Min و Critical نشان‌دهنده مقادیر بیشینه، کمینه و بحرانی پارامترهای ذکر شده هستند.

براساس "شکل 8"، مشخص شده است، چنانچه درصد الیاف تقویت‌کننده کمتر از حجم بحرانی (رابطه 1) باشد، باعث کاهش استحکام نمونه می‌گردد. همچنین در مقدار کمتر از حداقل درصد حجمی (رابطه 2)، با افزایش درصد حجمی الیاف تقویت‌کننده، استحکام کامپوزیت کاهش می‌یابد [28]. با توجه به این نکته می‌توان بیان کرد که 3 درصد حجمی الیاف نسبت به 5 درصد حجمی می‌تواند اثر منفی کمتری بر روی کاهش استحکام نمونه‌ها داشته باشد. بنابراین باید انتظار داشت که 1 درصد حجمی الیاف کمترین اثر منفی بر روی کاهش استحکام را دارد.

از طرف دیگر باید این نکته در نظر گرفته شود با افزایش درصد حجمی الیاف توخالی، حجم بیشتری از مواد خودترمیمی را می‌توان در داخل کامپوزیت ذخیره کرد که باعث افزایش میزان ترمیم‌پذیری می‌شود. بنابراین همان‌گونه که مشخص است، کامپوزیت حاوی 5 درصد وزنی الیاف توخالی شیشه پر شده با عامل ترمیمی، بازده ترمیم بالاتری نسبت به کسرهای حجمی 3 و 1 درصد خواهد داشت. با توجه به این که هدف داشتن استحکام بالاتر به خصوص در درصدهای زیر حجم بحرانی تقویت‌کننده و دستیابی به بازده مناسب برای ترمیم است، بنابراین می‌توان بیان کرد که کامپوزیت حاوی 3 درصد حجمی الیاف توخالی شیشه پر شده با عامل ترمیمی، تعادلی بین دو عامل یعنی داشتن استحکام و بازده ترمیم مناسب را ایجاد می‌کند. ایجاد این تعادل باعث می‌شود که کامپوزیت پس از تخریب خواص استحکامی بالاتری داشته باشد که نتایج "شکل 7" نیز این را تایید می‌کند.

با توجه به "شکل 7"، بعد از گذشت 7 روز از تخریب، در تمامی نمونه‌های آزمایش شده با درصدهای متفاوت الیاف توخالی به میزان 1، 3 و 5 درصد حجمی به ترتیب بیشترین استحکام خمشی با مقدارهای 57.68، 61.81 و 32.00 MPa مشاهده می‌شود. از آنجایی که نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های متفاوت، شرایط متفاوتی داشته و خواص مکانیکی مختلفی دارند، برای اطمینان از انتخاب تعداد الیاف توخالی بهینه در کلیه آزمایش‌ها، سه نمونه

محیط و پس از آن تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش در "شکل 11" و جدول 3 آورده شده است. با توجه به شکل 11 مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، استحکام نهایی نمونه‌ها از MPa 42.52 مربوط به نمونه کامپوزیت خودترمیمی 3F-WD-14 با استحکام خمشی MPa 63.12 افزایش یافته است و بیشترین استحکام بدست آمده می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود بعد از مدت 7 روز استحکام خمشی نمونه خودترمیم‌شونده تغییر چندانی نکرده است. از آنجایی که استحکام خمشی نمونه 3F-WD-07 (61.81 MPa)، 97.9 درصد استحکام خمشی نمونه 3F-WD-14 است، نمونه 3F-WD-07 نمونه مناسبی محسوب می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده، نمونه 3F-WD-14 به عنوان نمونه بالاترین خواص برای مقایسه خواص خودترمیمی دیگر کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده در نظر گرفته شد.

در جدول 4 و "شکل 12" مقایسه استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت خودترمیم‌شونده، نسبت به نمونه 3F-WD-14، آورده شده است. با توجه به نمودار "شکل 12" و جدول 4، می‌توان گفت که بعد از نمونه 3F-WD-07، نمونه‌های شامل 3 و 1 درصد حجمی الیاف پر شده به ترتیب بعد از 4 و 7 روز زمان ترمیم با استحکام‌های خمشی MPa 57.42 و MPa 57.69 گزینه‌های مناسب دیگری هستند که قابلیت استفاده جهت بررسی رفتار خودترمیم در آزمایش‌های مکانیکی را دارند. دلیل انتخاب این نمونه‌ها داشتن استحکام خمشی حدود 91 درصد استحکام خمشی نمونه کامپوزیت خودترمیمی 3F-WD-14 می‌باشد.

3-3- مشاهده تجربی فرآیند خودترمیمی

"شکل 13" مراحل فرآیند خودترمیمی در نمونه‌های خودترمیم‌شونده، قبل از تخریب اولیه، بعد از تخریب، 2 روز بعد از تخریب و 7 روز بعد از تخریب را

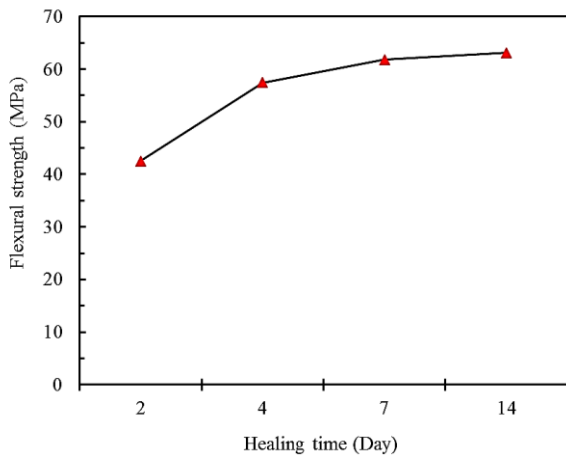


Fig. 11 Comparing flexural strength of self-healing samples with different healing time

شکل 11 مقایسه استحکام خمشی نمونه‌های خودترمیم‌شونده با زمان‌های ترمیم مختلف

جدول 3 استحکام خمشی نمونه‌های خودترمیم‌شونده با زمان‌های ترمیم مختلف

Table 3 Flexural strength of self-healing samples with different healing time

کد نمونه	استحکام خمشی (MPa)
3F-WD-02	42.52
3F-WD-04	57.42
3F-WD-07	61.81
3F-WD-14	63.12

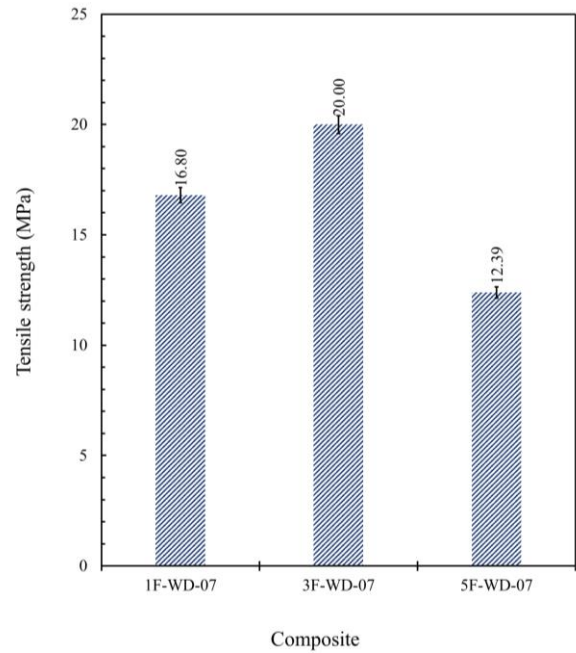


Fig. 9 Tensile strength of self-healing samples with different percent of hollow fibers

شکل 9 استحکام کششی نمونه‌های خودترمیم‌شونده با درصد متفاوت الیاف توخالی

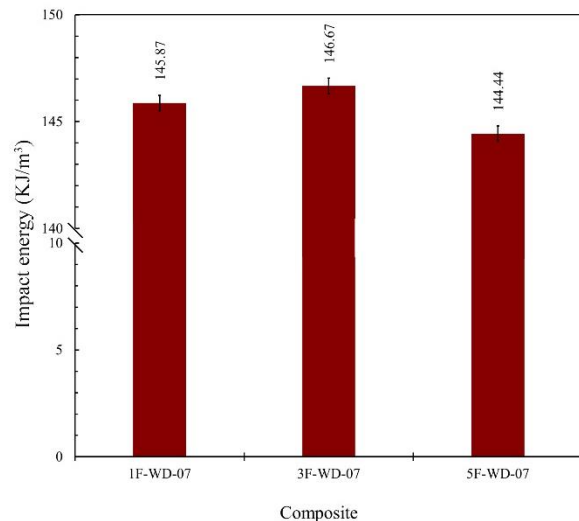


Fig. 10 Impact energy of self-healing samples with different percent of hollow fibers

شکل 10 انرژی ضربه نمونه‌های خودترمیم‌شونده با درصد متفاوت الیاف توخالی

2-3- محاسبه بهترین زمان خودترمیمی

به طور کلی زمان و دمای عملیات پخت رزین‌های اپوکسی با یکدیگر متفاوت است و به جنس این مواد بستگی دارد. اما با توجه به این که در کاربردهای عملی، خودترمیم‌کنندگی باید در دمای محیط انجام پذیرد، در این پژوهش سعی شده است از نوعی رزین استفاده شود که در دمای اتاق عمل‌آوری شده و بتواند در این دما، به استحکام نهایی برسد. از آنجایی که افزودن رقیق‌کننده جهت کاهش ویسکوزیته رزین، زمان دستیابی به استحکام نهایی را دچار تغییراتی می‌کند، لذا بررسی و یافتن زمانی که در آن بتوان به بالاترین درصد اثربخشی ترمیم دست یافت، امری ضروری است.

جهت یافتن بهترین زمان خودترمیمی نمونه‌های خودترمیم‌شونده، 4 نمونه خودترمیم‌شونده تخریب شده، به مدت 2، 4، 7 و 14 روز در دمای اتاق

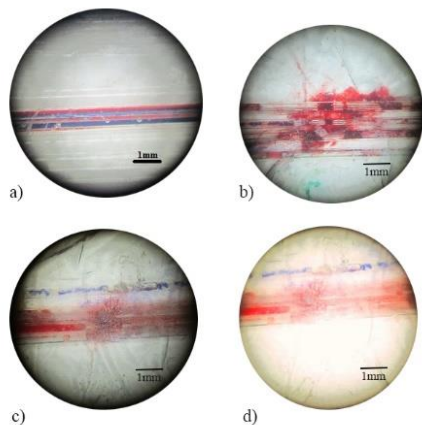


Fig. 13 Self-healing sample, a) before destruction, b) after destruction, c) 4 days after destruction, d) 7 days after destruction

شکل 13 نمونه‌ی خودترمیم‌شونده، (a) قبل از تخریب، (b) بعد از تخریب، (c) 4 روز بعد از تخریب، (d) 7 روز بعد از تخریب

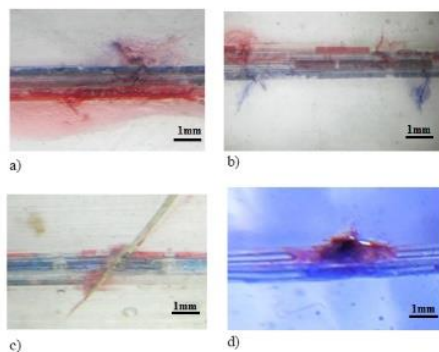


Fig 14 Destruction and healing process of the self-healing samples: a-c) collision between crack and filled fibers, d) healing after 7 days

شکل 14 روند تخریب و ترمیم نمونه‌های خودترمیم‌شونده: (a-c) برخورد ترک با الیاف پر شده، (d) ترمیم بعد از 7 روز

خیلی واضح قابل مشاهده است. بنابراین با خروج بیشتر عامل ترمیمی، بازده ترمیم نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، استحکام کامپوزیت ترمیم شده نیز افزایش می‌یابد که این روند با نتایج حاصل از آزمون‌های کشش، خمش و ضربه مطابقت خوبی دارد.

4-3- بررسی خواص مکانیکی در بهینه‌ترین زمان و درصد الیاف توخالی

با توجه به مطالب بیان شده و به دست آوردن زمان بهینه 7 روز و درصد بهینه الیاف توخالی شیشه (3%) در ترمیم کامپوزیت، رفتار خودترمیمی این کامپوزیت تحت آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه بررسی شد. برای محاسبه بازده ترمیم (η) در این کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده و تاثیر آن در رفتار مکانیکی کشش، خمش و ضربه از رابطه (3) استفاده شد [29].

$$\eta = \frac{\sigma_{f(h)} - \sigma_{f(d)}}{\sigma_{f(v)} - \sigma_{f(d)}} \quad (3)$$

که در این رابطه، d و h و v به ترتیب نمادهای نمونه ترمیم شده، تخریب شده و بدون تخریب هستند. داده‌های مربوط به آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه به صورت خلاصه در جدول 5 آورده شده است. با توجه به این جدول می‌توان فهمید که بازده ترمیم نمونه خودترمیم‌شونده با 3 درصد حجمی الیاف شیشه توخالی پس از 7 روز زمان ترمیم در آزمایش کشش 76.74%

جدول 4 مقایسه استحکام خمشی بین نمونه 3F-WD-14 و نمونه‌های دیگر بعد از ترمیم شدن در زمان‌های مختلف

Table 4 Comparing flexural strength between 3F-WD-14 sample and other samples at different time of healing

کد نمونه	استحکام خمشی (MP)	خودترمیمی نسبت به نمونه 3F-WD-14 (%)
1F-WD-02	40.78	64.6
1F-WD-04	56.11	88.9
1F-WD-07	57.69	91.4
3F-WD-02	42.52	67.4
3F-WD-04	57.42	91.0
3F-WD-07	61.81	97.9
3F-WD-14	63.12	100.0
5F-WD-02	12.62	20.0
5F-WD-04	25.00	39.6
5F-WD-07	32.01	50.7

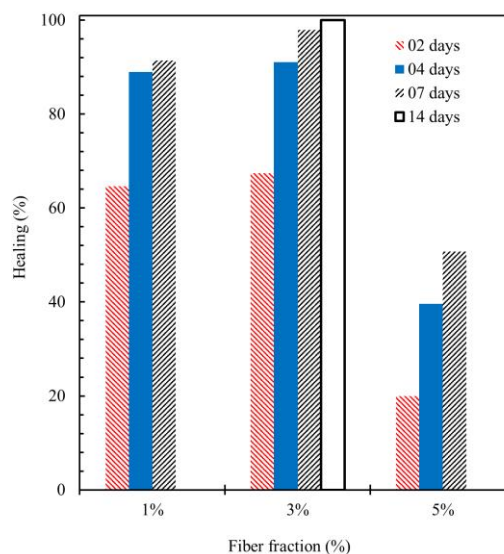


Fig. 12 Comparing the self-healing behavior between 3F-WD-14 sample and other samples at different time of healing

شکل 12 مقایسه رفتار خودترمیم‌شوندگی بین نمونه 3F-WD-14 و نمونه‌های دیگر در زمان‌های ترمیم‌شوندگی متفاوت

نشان می‌دهد. چنانچه در تصاویر مشاهده می‌شود، بعد از تخریب، الیاف شیشه حاوی رزین و هاردنر شکسته شده و پس از اختلاط این دو ماده در محل آسیب، عمل خودگیری رزین صورت گرفته است. همچنین در "شکل 13-c و 13-d" می‌توان مشاهده کرد که بعد از گذشت 4 و 7 روز فرآیند خودترمیمی صورت گرفته و نمونه‌ی کامپوزیتی ترمیم شده‌اند. براساس بررسی‌های انجام شده، می‌توان روند خودترمیمی را این گونه بیان کرد که با اعمال نیرو، ترک‌هایی در قطعه ایجاد می‌شود که با گسترش این ترک‌ها و برخورد آن‌ها با الیاف پر شده، مواد ترمیم‌کننده رها شده از الیاف شکسته، ترک را پر کرده و از گسترش و توسعه ترک جلوگیری و آن را ترمیم می‌کنند [13]. این مراحل به صورت مشخص در "شکل 14" قابل مشاهده است. در "شکل 14-a تا 14-c"، می‌توان پر شدن ترک توسط مواد ترمیم‌کننده و در "شکل 14-d"، ترمیم بعد از 7 روز را مشاهده کرد.

با توجه به "شکل‌های 13 و 14" می‌توان مشاهده کرد که در ابتدای تخریب هنوز عامل ترمیمی در داخل میکرولوله‌ها قرار دارد. خروج عامل ترمیمی به خاطر سیالیت کم عامل ترمیمی بسیار وابسته به زمان می‌باشد. بنابراین هرچه قدر زمان ترمیم بیشتر شود میزان ماده ترمیم بیشتری از داخل میکرولوله‌ها خارج می‌شود که این روند در "شکل 13-d" به صورت

الیاف شیشه و ترمیم شده پس از 7 روز، 76.74% و میزان تخریب باقیمانده در کامپوزیت 23.26% بدست آمد.

5. بازده ترمیم نمونه کامپوزیتی بهینه در آزمایش خمش، 53.52% و تخریب باقیمانده در کامپوزیت، 46.48% بدست آمد.

6. بازده ترمیم در نمونه کامپوزیتی بهینه در آزمایش ضربه، 91.64% و میزان تخریب باقیمانده، 8.36% بدست آمد.

7. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین بازده ترمیم برای آزمایش ضربه و کمترین بازده ترمیم برای آزمایش خمش بود.

5- مراجع

- [1] H. Ebrahimzad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, H. Khorsand, K. Abbas Banaei, Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015. (in Persian فارسی)
- [2] S. Weiner, H. D. Wagner, The material bone: structure-mechanical function relations, *Annual Review of Materials Science*, Vol. 28, pp. 271-298, 1998.
- [3] B. L. Zhou, Some progress in the biomimetic study of composite materials, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 45, No. 2, pp. 114-119, 1996.
- [4] M. R. Kessler, Self-healing: A new paradigm in materials design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 221, No. 4, pp. 479-495, 2007.
- [5] M. R. Babolhavaeji, R. Eslami-Farsani, H. Khosravi, Micro-vascular channel based self-healing fibrous composites under transverse loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 63-68, 2017. (in Persian فارسی)
- [6] Y. C. Yuan, T. Yin, M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Self-healing in polymers and polymer composites. concepts, realization and outlook: A review, *Express Polymer Letters*, Vol. 2, No. 4, pp. 238-250, 2008.
- [7] U. S. Chung, J. H. Min, P. C. Lee, W. G. Koh, Polyurethane matrix incorporating Pdms-based self-healing microcapsules with enhanced mechanical and thermal stability, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 518, pp. 173-180, 2017.
- [8] D. G. Bekas, D. Baltzis, A. S. Paipetis, Nano-reinforced polymeric healing agents for vascular self-repairing composites, *Materials & Design*, Vol. 116, pp. 538-544, 2017.
- [9] R. S. Trask, I. P. Bond, Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 704-710, 2006.
- [10] H. Williams, R. Trask, I. P. Bond, Vascula-healing composite sandwich structures, *Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 23, pp. 25-31, 2006.
- [11] S. K. Ghosh, *Self-Healing Materials Fundamentals, Design Strategies, and Applications*, First Edition, pp. 4-8, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [12] M. Hucker, I Bond, Influence of manufacturing parameters on the tensile strengths of hollow and solid glass fibres, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 309-315, 2002.
- [13] S. Van der Zwaag, *Self-Healing Materials, an Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, First Edition, pp. 118-122, Dordrecht: Springer Series in Materials Science, 2007.
- [14] C. M. Dry, Adhesive liquid core optical fibers for crack detection and repairs in polymer and concrete matrices, *Smart Structures and Materials*, Vol. 2444, pp. 410-413, 1995.
- [15] C. Dry, W. McMillan, Three part methylmethacrylate adhesion system as an internal delivery system for smart responsive concretes, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 297-300, 1996.
- [16] M. Motuku, U. K. Vaidya, G. M. Janowski, Parametric studies on self-repairing approaches for resin infusion composites subjected to low velocity impact, *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 623-638, 1999.
- [17] S. M. Bleay, C. B. Loader, V. J. Hawyes, L. Humberstone, P. T. Curtis, A smart repair system for polymer matrix composites, *Composites-Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.
- [18] M. Hucker, I. Bond, A. Foreman, J. Hudd, Optimization of hollow glass fibers and their composites, *Advanced Composites Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 181-189, 1999.
- [19] D. Y. Wu, S. Meure, D. Solomon, Self-healing polymeric materials: a review of recent developments, *Progress in Polymer Science*, Vol. 33, No. 5, pp. 479-522, 2008.
- [20] N. Fikru, *Self-healing of Fiber Reinforced Polymer Composites*, MSc Thesis, Addis ababa University, Ethiopia, 2003.
- [21] R. Eslami-Farsani, A. Sari, H. Khosravi, Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 285-290, 2016. (in Persian فارسی)
- [22] 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*, Vol. 17, No. 3, pp. 336-342, 2017. (in Persian فارسی)

می باشد. این بدان معنی است که کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه توخالی بعد از ایجاد ترک و ترمیم آن 76.74% خواص خود را بازیافته است و میزان کاهش خواص کششی یا میزان تخریب باقیمانده در این نوع از کامپوزیت خودترمیم شونده 23.26% می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده برای آزمایش خمش می توان بیان کرد که بعد از گذشت 7 روز خواص خمشی در این کامپوزیت حدود 53.52% بازیابی شده است و این کامپوزیت حدود 46.48% از خواص خمشی خود را از دست داده است. نتایج بدست آمده برای آزمایش ضربه نشان می دهد که بازده ترمیم در این کامپوزیت در خواص ضربه 91.64% می باشد و در آزمایش ضربه تنها 8.36% خواص ناشی از ایجاد تخریب کاهش یافته است.

با توجه به جدول 5 و نتایج بیان شده می توان فهمید که بهترین نتیجه برای ترمیم در نمونه خودترمیم شونده با 3 درصد حجمی الیاف شیشه توخالی پس از 7 روز زمان ترمیم در آزمایش ضربه حاصل شده است. این درحالی است که بازده ترمیم این کامپوزیت خودترمیم شونده در آزمایش خمش در مقایسه با آزمایش های کشش و ضربه کم است. علت این اختلاف زیاد بین بازده ترمیم در آزمایش خمش نسبت به آزمایش های کشش و ضربه را می توان این گونه بیان کرد که در آزمایش خمش الیاف شیشه حاوی عامل خودترمیمی، نقش تقویت کننده در یک جهت را دارند و با شکسته شدن این الیاف، خواص تقویت کنندگی الیاف در آن جهت تحت بارگذاری خمشی کاهش می یابد [28].

4- نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی رفتار خودترمیمی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه توخالی با درصدهای حجمی متفاوت الیاف حاوی عامل ترمیم و زمان های ترمیم متفاوت و تاثیر آن بر خواص مکانیکی بررسی شد. نتایج به دست آمده به شرح ذیل می باشد:

1. با مقایسه درصدهای حجمی 1، 3 و 5 درصد کامپوزیت تقویت شده با الیاف توخالی، بهینه ترین درصد حجمی الیاف شیشه توخالی حاوی عامل خودترمیمی 3% حجمی بود.
2. با مقایسه زمان های ترمیم 2، 4، 7 و 14 روز پس از تخریب کامپوزیت و انجام فرآیند خودترمیمی، بهینه ترین زمان خودترمیمی کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف شیشه توخالی در کامپوزیت ترمیم شده در 7 روز بدست آمد.
3. استحکام خمشی نمونه ترمیم شده در 7 روز، 97.9% استحکام خمشی نمونه ترمیم شده پس از 14 روز بود.
4. بازده ترمیم در آزمایش کشش برای نمونه بهینه (نمونه حاوی 3% حجمی جدول 5 محاسبه بازده ترمیم و درصد تخریب برای آزمایش های مکانیکی در نمونه حاوی 3 درصد الیاف توخالی شیشه

Table 5 Calculating healing efficiency and damage percentage for mechanical tests for samples with 3% hollow glass fibers

انرژی ضربه (KJ/m ³)	استحکام خمشی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	
148.90	76.87	21.24	3F-ND-00
122.22	44.47	15.91	3F-WD-00
146.67	61.81	20.00	3F-WD-07
91.64	53.52	76.74	بازده ترمیم (%)
8.36	46.48	23.26	درصد تخریب

- Notched Specimens of Plastics*, ASTM Standard, D6110 – 10, 2010.
- [27] C. Dry, Procedures developed for self-repair of polymeric matrix composite materials, *Composite Structures*, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.
- [28] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, pp. 166-168, Philadelphia: Taylor and Francis, 1999.
- [29] B. J. Blaiszik, S. L. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, N. R. Sottos, S. R. White, Self-healing polymers and composites, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 179-211, 2010.
- [23] S. Kling, T. Czigány, Damage detection and self-repair in hollow glass fiber fabric-reinforced epoxy composites via fiber filling, *Composites Science and Technology*, Vol. 99, pp. 82-88, 2014.
- [24] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM Standard, D3039/D3039M – 14, 2014.
- [25] *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM Standard, D790 – 10, 2010.
- [26] *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of*