



## رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز خودترمیم‌شونده تحت بارگذاری عرضی

شعله عباس‌نیا<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>، حامد خسروی<sup>3</sup>

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

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

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\*تهران، صندوق پستی 19991-43344، [eslami@kntu.ac.ir](mailto:eslami@kntu.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 95/11/12

پذیرش: 96/01/23

### کلیدواژگان:

چندلایه‌های الیاف-فلز

میکروتورها

خودترمیمی

استحکام خمشی

بازده ترمیم

امروزه، چندلایه‌های الیاف-فلز کاربردهای زیادی در صنایع هوایی، دریایی و خودرو به دست آورده‌اند. این ساختارها شامل ورق‌های نازک فلزی اتصال یافته به کامپوزیت پیش‌آغشته می‌باشند. شناسایی و تعمیر ترک‌های داخلی ایجاد شده در چندلایه‌های الیاف-فلز، با روش‌های مرسوم مشکل است. برای غلبه بر این مشکل، در این پژوهش یک سیستم پلیمری خودترمیم‌شونده بر اساس میکرولوله‌های شیشه‌ای توخالی خردشده معرفی شده است که به بررسی استحکام خمشی چندلایه‌های الیاف-فلز با آرایش آلومینیوم 2024/رزین اپوکسی-الیاف شیشه؛ نوع E/آلومینیوم 2024، پس از تخریب می‌پردازد. میکرولوله‌های شیشه‌ای پرشده با عوامل ترمیمی (رزین اپوکسی + هاردنر آمینی) به صورت جفت کنار یکدیگر قرار داده شدند و در ادامه در داخل ساختار قرار گرفتند. هدف از این مطالعه دستیابی به کسر حجمی مناسب و همچنین زمان مطلوب جهت رسیدن به حداکثر بازده ترمیم می‌باشد. میکرولوله‌های حاوی عوامل ترمیمی با درصد حجمی‌های متفاوت 5، 8 و 11 درصد در نمونه‌ها به کار گرفته شدند و در ادامه تاثیر آن بر راندمان ترمیم استحکام خمشی پس از گذشت زمان‌های مختلف 3 و 5 روز پس از آسیب اولیه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی به میزان 89 درصد برای نمونه حاوی 8 درصد حجمی عامل ترمیمی با گذشت مدت زمان 5 روز پس از ایجاد آسیب می‌باشد.

## Mechanical performance of self-healing fiber-metal laminates under transverse loading

Shole Abbasnia<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>1\*</sup>, Hamed Khosravi<sup>3</sup>

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

2- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

\* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, [eslami@kntu.ac.ir](mailto:eslami@kntu.ac.ir)

### Keywords

Fiber-metal laminates

Micro-cracks

Self-healing

Flexural strength

Healing efficiency

### Abstract

Nowadays, fiber-metal laminates (FMLs) have gained many applications in aviation, marine and automotive industries. These structures include thin metallic face sheets bonded to the composite prepregs. Internal damages in FMLs are difficult to detect and repair by conventional methods. To overcome this, in the present study a self-healing polymeric system based on chopped hollow glass tubes has been introduced and employed to recover the flexural strength of Al-2024/E-glass-epoxy/Al-2024 specimens after damage. The micro-tubes were located next to each other in pairs and filled with restorative agents (epoxy resin + amine hardener). The aim of this study was to find a suitable volume fraction and also the optimum time to achieve the maximum healing efficiency. Various volume fractions of filled tubes containing 5, 8 and 11 vol.% healing agent together with different time passing period of 3 and 5 days after primary damage were employed. The results demonstrated that the maximum healing efficiency for flexural strength (89%) was observed for the specimen with 8 vol.% healing agent after passing 5 days from the time of damage creation.

Please cite this article using:

Abbasnia, Sh. Eslami-Farsani, R. Khosravi, H. "Mechanical performance of self-healing fiber-metal laminates under transverse loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 185-190, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف به دلیل دارا بودن خواص ویژه‌ای نظیر سفتی و استحکام ویژه عالی، وزن کم، فرآیندپذیری خوب و پایداری شیمیایی در شرایط مختلف محیطی، از کاربرد گسترده‌ای در زمینه سازه‌های هوایی، پره توربین‌های بادی، وسایل نقلیه و صنایع نظامی و دریایی برخوردار هستند [1، 2]. زمینه پلیمری در این کامپوزیت‌ها اغلب گرماسخت (نظیر اپوکسی) بوده که ذاتاً ترد و حساس به ترک هستند، بنابراین در مقابل جوانه‌زنی و رشد ترک مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند [3].

ریزترک‌ها یکی از مهلک‌ترین آسیب‌هایی هستند که در شرایط کاری در سازه‌های کامپوزیتی ظاهر شده و به طرز چشمگیری موجب کاهش عمر این سازه‌ها می‌شوند. از آنجایی که ردیابی و تعمیر آسیب‌های ایجاد شده در بخش‌های داخلی سازه‌های کامپوزیتی امری دشوار است، باید از موادی استفاده شود که قابلیت ترمیم خودکار عیوب داخلی را داشته باشند [4]. پلیمرها و کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده قادر هستند تا در پاسخ به بروز آسیب به ماده (ریزترک‌ها، جدایش الیاف از زمینه، بیرون‌زدگی الیاف از زمینه، ترک بین لایه‌ای در زمینه، تورق، تغییر شکل و غیره) از خود واکنش نشان داده و عملیات ترمیم را در هر زمانی انجام دهند [5-7]. در بسیاری از سازه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در هواپیماها و سازه‌های هوافضایی، فرآیند تعمیر و نگهداری همواره هزینه‌های سنگینی را به همراه دارد؛ بنابراین به منظور کاهش هزینه در تعمیرات سازه‌های کامپوزیتی هوافضایی و حذف نیروی انسانی متخصص می‌توان از مواد کامپوزیتی مجهز به عوامل خودترمیم‌شونده استفاده نمود [8].

خودترمیمی به صورت قابلیت بازیابی و یا تعمیر خودکار و مستقل مواد پس از آسیب و بدون دخالت هرگونه عامل خارجی تعریف می‌شود. خودترمیمی در حالت کلی به دو دسته شامل خودترمیمی ذاتی یا خودکار و خودترمیمی غیرذاتی (نیازمند دخالت عامل خارجی) تقسیم می‌شود [9]. به طور کلی، سیستم‌های خودترمیم‌شونده ذاتی یا برگشت‌پذیر پلیمرهایی هستند که در برابر محرک، به حالت غیرشبکه‌ای، اولیگومری و منومری خود تبدیل شده و قابلیت بازگشت مجدد به ساختار پلیمری اولیه خود را دارند [10].

در سیستم‌های خودترمیمی غیرذاتی، زمینه پلیمری به تنهایی قابلیت ترمیم ندارد، بلکه خودترمیمی در آن به واسطه عامل ترمیم ایجاد می‌شود. به طور کلی خودترمیمی غیرذاتی به سه صورت کلی شامل: کپسول‌دار کردن، استفاده از الیاف توخالی و استفاده از شبکه‌های توخالی محقق می‌شود.

کپسول در مواد کامپوزیتی و پلیمرها به شکل ذراتی کروی است که با عامل ترمیمی پر شده (هسته - پوسته) و در ابعاد میکرو ساخته می‌شود. با ایجاد ترک، جداره کپسول‌ها شکسته شده و عامل ترمیم که در دمای ترمیم به شکل مایع است توسط نیروی موئینگی به داخل ترک جاری می‌شود. سپس مایع آزاد شده در مجاورت کاتالیزوری که از قبل در محیط پراکنده شده است، پلیمره شده و شکاف را ترمیم می‌کند [10]. اولین سیستم خودترمیم‌شونده موفق در سال 2001 توسط وایت و همکارانش در دانشگاه ایلینویا ساخته شد که طی آن منومر دی‌سیکلوپنتادین و نسل اول کاتالیزورهای گرابز به صورت ریزپوشینه (میکروکپسول) مورد استفاده قرار گرفتند [11].

در روش خودترمیمی بر پایه الیاف توخالی نیز مشابه با روش کپسوله‌کردن، الیاف توخالی از رزین‌های ترمیمی پر می‌شود و در اثر ایجاد

آسیب در کامپوزیت، رزین ترمیم از الیاف خارج شده و تحت خلا و اعمال حرارت منطقه‌ای آسیب ترمیم می‌شود [11]. الیاف شیشه توخالی مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری برای اولین بار در سال 1964 توسط روزن مطرح شدند [12]. در آن زمان از الیاف توخالی به عنوان جایگزینی برای الیاف شیشه مرسوم، در جهت افزایش سفتی و استحکام کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌شد. هاکر و باند [13] نشان دادند که استفاده از الیاف شیشه توخالی با قطر  $60 \mu\text{m}$  در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی موجب افزایش سفتی خمشی این مواد می‌شود. این دو محقق همچنین نشان دادند که استفاده از الیاف شیشه توخالی (با قطر  $30-60 \mu\text{m}$  و درصد خالی - بودن 36-58 درصد) در پیش‌آغشته‌های لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی با درصد حجمی 20-25 درصد، موجب افزایش قابل توجه استحکام فشاری کامپوزیت می‌شود [14].

درای و همکارانش [15] نشان دادند که طرح پیشنهادی مبتنی بر خروج مواد شیمیایی از الیاف ترمیمی عملی بوده و از سیانواکریلات، اتیل سیانواکریلات و متیل سیانواکریلات به عنوان عوامل ترمیم‌کننده در ترمیم ترک‌های موجود در بتن استفاده کردند. بلی و همکارانش [16] برای اولین بار الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر خارجی  $15 \mu\text{m}$  و قطر داخلی  $5 \mu\text{m}$  را با رزین و هاردنر پر کرده و درون کامپوزیت لایه‌ای تقویت شده با پارچه شیشه قرار دادند و برای سنجش بازده ترمیم از آزمون فشار پس از ضربه استفاده کردند. باند و همکارانش [17] در ساخت کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، به منظور پرکردن الیاف توخالی از ماده پلیمری دارای رنگ ماورای بنفش استفاده کردند که قادر به ردیابی درجای ترک‌ها و قابلیت خودترمیمی است. در این کامپوزیت‌ها، الیاف توخالی حاوی رزین و هاردنر با زوایای صفر و 90 درجه در میان لایه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی قرار گرفتند تا بروز پدیده‌های تورقی شدن و ترک‌های زمینه کامپوزیت را ردیابی کنند. بازده ترمیم کامپوزیت‌های لایه‌ای فوق تا 93% نیز گزارش شده است.

تراسک و ویلیامز با هدف توسعه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده حاوی الیاف شیشه توخالی برای کاربردهای هوافضایی اقدام به بررسی بازده ترمیم در نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی تحت آزمون‌های خمش 4 نقطه‌ای و فشار پس از ضربه نمودند [18، 19]. نتایج ترمیم حاصل از قرارگیری الیاف توخالی پر شده با رزین و هاردنر در میان لایه‌های کامپوزیت‌ها بسیار رضایت‌بخش بوده و در نمونه‌های حاوی الیاف کربن و شیشه به ترتیب بازده ترمیم 97 و 100 درصد گزارش شده است. تان و سایر همکارانش [20، 21] به منظور بررسی خودترمیمی در کامپوزیت‌های مورد استفاده در هواپیماها از قراردادن لوله‌های موئین شیشه‌ای به قطر 1.5-1.6 میلی‌متر (که پیش‌تر با رزین و هاردنر پر شده‌اند)، در زمینه اپوکسی استفاده کردند. لوله‌های موئین در کنار هم قرار گرفته و آزمون خمش سه نقطه‌ای جهت تعیین بازده ترمیم نمونه‌ها انتخاب شده و بیشترین میزان بازده ترمیم برابر با 47.6 درصد گزارش شد.

خودترمیمی بر پایه شبکه‌های آوندی شامل الیاف یا کانال‌های توخالی هستند که در سه بعد به هم متصل شده‌اند و عامل ترمیم را در خود ذخیره کرده‌اند. پس از ایجاد ترک در زمینه پلیمری، عامل ترمیم از شبکه‌های مجرادار آزاد شده و فرآیند ترمیم انجام می‌شود [10].

کامپوزیت‌های چندلایه‌ای الیاف-فلز (FMLs<sup>1</sup>) موادی هستند که از چسباندن ورقه‌های فلزی و لایه‌های کامپوزیتی ساخته می‌شوند. در این

<sup>1</sup> Fiber-Metal Laminates (FMLs)

شرکت LINTEX چین بود که دارای وزن مخصوص 2.56 گرم بر سانتی‌متر مکعب است. همچنین از لوله‌های موئین شیشه‌ای با قطر خارجی 300-400 میکرومتر از جنس پیرکس به عنوان مخازن ذخیره عامل ترمیمی استفاده شد (شکل 1). برای پر کردن این لوله‌های موئین شیشه‌ای از دستگاه پمپ خلا استفاده شد. به این صورت که یک سر لوله‌ها درون رزین و یا هاردنر قرار گرفتند و سر دیگر آن‌ها به پمپ خلا متصل شد و به وسیله خمیر مهر و موم تمامی منافذ بسته شدند. با روشن شدن پمپ خلا رزین و هاردنر به آرامی درون لوله‌ها نفوذ کردند. همچنین از ورق آلومینیوم 2024 با ضخامت 5 میلی‌متر به عنوان ورق فلزی برای ساخت کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز استفاده شد. ورق آلومینیوم 2024 به دلیل مقاومت بالا در برابر رشد ترک و استحکام بالا به عنوان الیازی مناسب در سازه‌ها محسوب می‌شود.

## 2-2- روش ساخت نمونه‌ها

سیستم ترمیمی مورد استفاده در این پژوهش به صورت دوجزئی (رزین و هاردنر) انتخاب شد. رزین و هاردنر مورد استفاده برای پر کردن لوله‌های موئین شیشه‌ای همان رزین و هاردنر مورد استفاده برای ساخت زمینه کامپوزیت الیاف-فلز هستند. برای ساخت سیستم خودترمیم‌شونده، حداقل از دو لوله موئین در کنار یکدیگر استفاده شد (یکی حاوی رزین اپوکسی و دیگری حاوی هاردنر). بنابراین از قرارگیری هر دو لوله در کنار یکدیگر یک واحد خودترمیمی ایجاد می‌شود. واحدهای خودترمیمی استفاده شده در این پژوهش به صورت لوله‌های شیشه‌ای کوتاه بودند که اصطلاحاً خرد شده نامیده می‌شوند. ابعاد این لوله‌های شیشه‌ای با یکدیگر متفاوت بوده و در محدوده 1-2 سانتی‌متر قرار داشتند. همچنین سه نوع نمونه حاوی عوامل خودترمیمی با کسرهای حجمی متفاوت (5، 8 و 11 درصد) آماده شد و در سه زمان مختلف (بلافاصله، 3 و 5 روز) پس از آسیب تحت آزمون قرار گرفتند.

در این پژوهش لایه‌چینی کاملاً به صورت دستی انجام پذیرفت. در ابتدا ورق آلومینیوم و الیاف شیشه در ابعاد نمونه (عرض 2.5 و طول 13 سانتیمتر) برش داده شدند و سطح یکی از ورقه‌های آلومینیومی با مخلوط رزین و هاردنر پوشانده شد. چهار لایه الیاف شیشه با آرایش 0/90/90/0 (صفر درجه به معنای موازی با جهت نورد ورقه آلومینیوم و 90 درجه به معنای عمود بر آن است)، بر روی ورقه آلومینیومی قرار گرفتند. در بین تمامی این لایه‌ها رزین و هاردنر اضافه شد و همچنین لوله‌های موئین شیشه‌ای خرد شده حاوی عوامل ترمیم جهت ایجاد تقارن در کامپوزیت، بین لایه‌های صفر و 90 درجه (یعنی در دو لایه)، به صورت تصادفی قرار گرفتند. در نهایت ورق آلومینیومی سمت دیگر نمونه بر روی لایه‌های قبلی چیده شد و نمونه‌ها به مدت سه روز

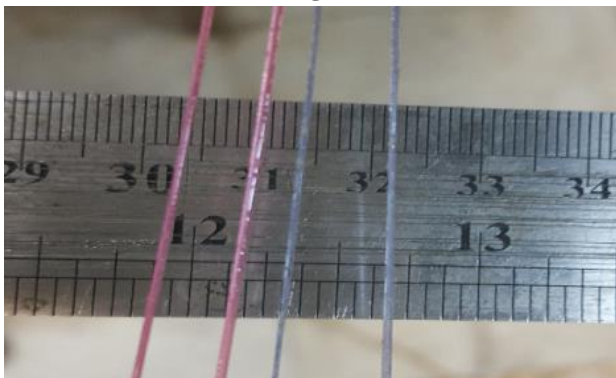


Fig. 1 Micro-glass tubes containing healing agent.

شکل 1 میکرولوله‌های شیشه‌ای حاوی عوامل ترمیم.

حالت، مزیت‌های هر کدام از این دو ماده در ماده جدید نیز وجود دارد و با هم ترکیب می‌شوند [22]. فلزات دارای مزیت‌هایی مثل مقاومت در برابر ضربه بالا و همچنین شرایط تعمیر آسان می‌باشند. کامپوزیت‌ها نیز دارای مزیت‌هایی مانند مقاومت در برابر خستگی بالا و سفتی زیاد می‌باشند. با ترکیب این مواد، ضعف کامپوزیت‌ها مانند مقاومت در برابر ضربه پایین و همچنین کاستی‌های فلزات مانند مقاومت در برابر خستگی کم و مقاومت در برابر خوردگی پایین آن‌ها بهبود می‌یابند [23]. ورقه‌های فلزی مرسوم در ساخت FML، آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم می‌باشند که هر کدام از این فلزات تاثیر متفاوتی بر خواص FML دارند [24].

در ادامه تحقیقات قبلی که خودترمیمی در کامپوزیت‌ها و رفتار مکانیکی FML بطور مستقل بررسی شده‌اند، در تحقیق حاضر تاثیر مواد خودترمیم بر خواص مکانیکی FML مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس، مواد خودترمیم در سازه‌های FML با زمینه اپوکسی و تقویت‌کننده الیاف شیشه قرار داده شده و درصد حجمی و زمان بهینه جهت دستیابی به بیشترین بازده ترمیم تحت شرایط بارگذاری عرضی تعیین می‌شود.

## 2- مواد و روش تحقیق

### 2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز پلیمری از رزین اپوکسی KER 828 با وزن مخصوص  $1160 \text{ kg/m}^3$  و هاردنر HA-11 به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی KER 828 در جدول 1 نشان داده شده است. ساختار رزین مورد نظر بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول ای<sup>1</sup> بوده و از ترکیب آن با یک هاردنر اپیکلروهیدرینی<sup>2</sup>، محصول نهایی حاصل می‌شود. این رزین از دو بخش زنجیره پلیمری و گروه‌های عاملی که معمولاً در انتهای زنجیره قرار دارند، تشکیل شده است. این گروه‌های عاملی بسیار واکنش‌پذیر هستند و در حضور عامل پخت (هاردنر)، واکنش داده و پیوندهای شیمیایی را تشکیل می‌دهند که منجر به شکل‌گیری یک ساختار شبکه‌ای می‌شود. به این واکنش، واکنش پلیمریزاسون می‌گویند. که سبب سخت شدن رزین می‌شود. واکنش پلیمریزاسون و پخت برای این نوع رزین در دمای محیط، به مدت سه روز به طول می‌انجامد. خصوصیات خوب مکانیکی و درصد انقباض بسیار کم پس از پخت، از مزایای این رزین است. گرانروی رزین در حالت مخلوط نشده و در دمای اتاق بسیار کم بوده که این ویژگی، ساخت نمونه‌های کامپوزیتی و عملیات تزریق رزین به درون لوله‌های موئین شیشه‌ای را تسهیل می‌نماید.

الیاف تک‌جهته شیشه نوع E به عنوان الیاف تقویت‌کننده برای هسته کامپوزیتی انتخاب شد. پارچه شیشه 300 گرمی مورد استفاده، محصول

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی KER 828

Table 1 Physical and mechanical properties of epoxy resin KER 828

پارامتر	مقدار
وزن مخصوص در دمای 25 °C	1160 kg/m <sup>3</sup>
گرانروی در دمای 25 °C	14-12 Pa.s
مدول یانگ	2.75 GPa
استحکام کششی	69 MPa
استحکام برشی (چسبندگی)	41 MPa
زمان پخت نهایی (روز)	3 روز

<sup>1</sup> Bisphenol A

<sup>2</sup> Epichlorohydrin

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \left[ 1 + 6\left(\frac{D}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \right] \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma_f$ ،  $P$ ،  $L$ ،  $b$ ،  $d$  و  $D$  به ترتیب نشان‌دهنده استحکام خمشی، نیروی خمشی حداکثر، فاصله دو تکیه‌گاه، پهنای نمونه، ضخامت نمونه و انحنای خط مرکز نمونه می‌باشند.

### 3- نتایج و بحث

در این پژوهش برای بررسی خواص خودترمیمی نمونه‌های FML به مقایسه نمونه‌ها با درصدهای حجمی متفاوت در بازه‌های زمانی مختلف جهت ترمیم پرداخته شده است. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های حاوی 5 درصد حجمی مواد خودترمیم در سه زمان مختلف در نمودار شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام خمشی نمونه‌های آسیب دیده با گذشت مدت زمان بیشتر، بهبود یافته است که این نشان‌دهنده ترمیم میکروتکرک‌های ایجاد شده در نمونه با گذشت زمان می‌باشد. هر چه مدت زمان بیشتری از آسیب نمونه‌ها بگذرد مواد خودترمیم بیشتری به درون میکروتکرک‌ها نفوذ کرده و میزان ترمیم و استحکام خمشی افزایش می‌یابد.

در شکل‌های 5 و 6 نمودارهای جابجایی-نیرو نمونه‌های حاوی 8 و 11 درصد حجمی مواد خودترمیم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استحکام خمشی نمونه‌ها در هر دو درصد حجمی به ترتیب برای نمونه‌ای که بلافاصله پس از آسیب تست شده است و نمونه‌های ترمیم شده

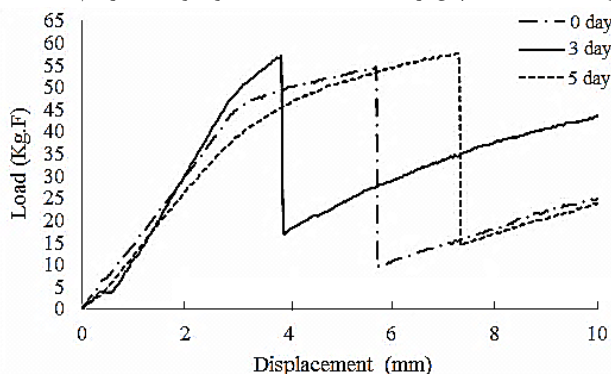


Fig. 4 The bending response of FML specimens with 5 vol.% healing agent after different healing time.

شکل 4 رفتار خمشی نمونه‌های FML با 5 درصد حجمی عوامل ترمیم در سه زمان

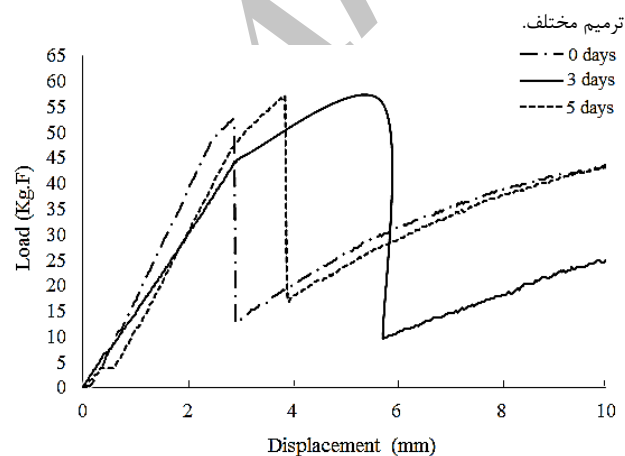


Fig. 5 The bending response of FML specimens with 8 vol.% healing agent after different healing time.

شکل 5 رفتار خمشی نمونه‌های FML با 8 درصد حجمی عوامل ترمیم در سه زمان ترمیم مختلف.

جهت پخت کامل رزین و هاردنر تحت فشار قرار گرفتند. در شکل 2 تصویر نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

### 2-3- آزمون خمش سه نقطه‌ای

نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D790 قرار گرفتند. نحوه بارگذاری در شکل 3 نشان داده شده است. تخریب اولیه در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمون خمش از طریق خم کردن نمونه‌ها به میزان 5 میلی‌متر تحت نرخ بارگذاری 2 mm/min صورت گرفت.

در اثر اعمال بار و خم شدن نمونه، لایه‌های پایینی تحت تنش کششی و لایه‌های بالایی تحت تنش فشاری قرار می‌گیرند. این تنش‌های کششی و فشاری سبب ایجاد تنش‌های برشی بین لایه‌های کامپوزیت می‌شوند، در نتیجه ترک‌هایی در زمینه کامپوزیت شکل می‌گیرند که در راستای فصل مشترک الیاف و زمینه پیشروی کرده و با برخورد به لوله‌های موئین شیشه‌ای سبب شکست آن‌ها می‌شوند. به دلیل یکسان بودن ضخامت نمونه‌ها با یکدیگر سرعت اعمال بار نیز برای آن‌ها یکسان محاسبه شد، همچنین جابجایی فک دستگاه نیز برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. بنابراین شرایط تمامی نمونه‌ها یکسان خواهد بود.

در مجموع 4 دسته نمونه (سه نمونه با کسر حجمی‌های مختلف 5، 8 و 11 درصد از لوله‌های توخالی حاوی عوامل خودترمیم و یک نمونه شاهد) با نرخ بارگذاری 4.4 mm/min (هر کدام سه مرتبه جهت صحت‌گذاری نتایج) تحت آزمون قرار گرفتند. در نمونه شاهد هیچ عامل ترمیمی استفاده نشده است. نرخ بارگذاری با استفاده از رابطه مربوطه در استاندارد مورد استفاده اندازه‌گیری شد و در نهایت نمودار نیرو برحسب جابجایی برای هر نمونه حاصل شد. استحکام خمشی نمونه‌ها نیز با استفاده از رابطه (1)، محاسبه شد.

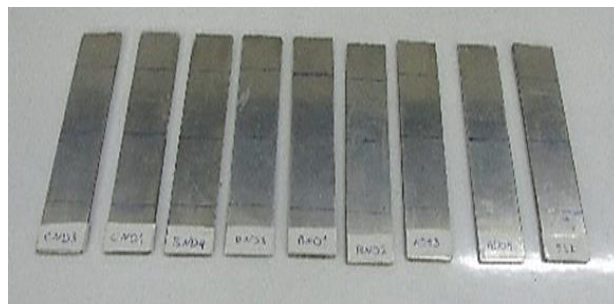


Fig. 2 Fabricated FML specimens for bending test.

شکل 2 نمونه‌های کامپوزیتی الیاف-فلز ساخته شده برای آزمون خمش.



Fig. 3 Three-point bending test.

شکل 3 نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای.

$$\eta = \frac{\sigma_{f(H)} - \sigma_{f(D)}}{\sigma_{f(V)} - \sigma_{f(D)}} \quad (2)$$

که در این رابطه، زیرنویس‌های H، D و V به ترتیب مبین نمونه‌های ترمیم شده، آسیب دیده و نمونه اولیه بدون آسیب هستند. با توجه به این رابطه، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در نمودار شکل 8 نشان داده شده است. مطابق این شکل بیشترین بازده ترمیم حدود 89 درصد می‌باشد که برای نمونه حاوی 8 درصد حجمی مواد خودترمیمی پس از گذشت مدت زمان 5 روز پس از آسیب حاصل شده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های الیاف-فلز خودترمیم‌شونده تحت بارگذاری عرضی به صورت تجربی پرداخته شد. روش ساخت نمونه‌ها به صورت لایه‌گذاری دستی بود و ترتیب لایه‌ها 0/90/90/0 انتخاب شد تا تقارن در کامپوزیت ایجاد شود. همچنین از عوامل ترمیم دوجزئی شامل رزین و هاردنر آمینی جاسازی شده درون میکرولوله‌های شیشه‌ای که دارای سیالیت مناسب جهت جریان درون میکروتورک‌ها و پرکردن آن‌ها می‌باشند، استفاده شد. نمونه‌های حاوی درصد‌های حجمی مختلف (5، 8 و 11 درصد) از مواد ترمیمی ساخته شدند و بازده ترمیم

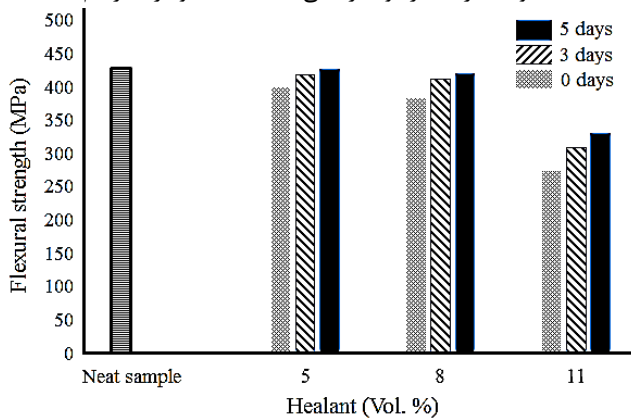


Fig. 7 The relationship between flexural strength and healing content of FML specimens after different healing time.

شکل 7 ارتباط بین استحکام خمشی و میزان ماده ترمیمی نمونه‌های FML در بازه‌های زمانی متفاوت ترمیم.

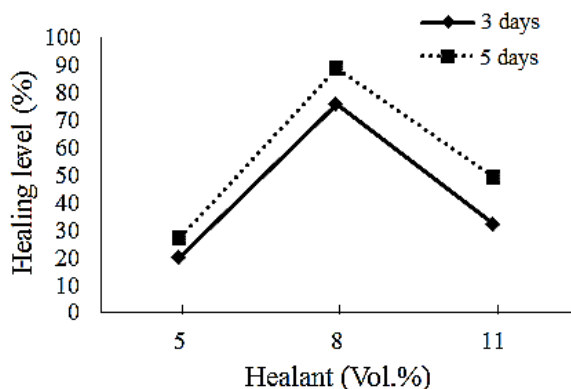


Fig. 8 The relationship between healing efficiency and healing content of FML specimens after two different healing times.

شکل 8 ارتباط بین درصد حجمی ماده ترمیمی و بازده ترمیم در نمونه‌های FML پس از گذشت دو بازه زمانی ترمیمی مختلف.

پس از گذشت مدت زمان 3 و 5 روز پس از آسیب، در حال افزایش می‌باشد. دلیل این امر، نفوذ هر چه بیشتر عوامل ترمیم با گذشت زمان درون میکروتورک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها در اثر آسیب می‌باشد.

در جدول 2 و نمودار شکل 7 استحکام خمشی میانگین برای نمونه‌های خودترمیم مورد مطالعه در تحقیق حاضر به منظور مقایسه آن‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در درصد‌های حجمی 5، 8 و 11 به صورت مجزا با افزایش زمان ترمیم، به دلیل جریان هر چه بیشتر عوامل ترمیم درون میکروتورک‌های ایجاد شده در اثر آسیب اولیه در نمونه‌ها و پخت هر چه بیشتر آن‌ها، استحکام خمشی نمونه‌ها افزایش یافته است که این موضوع نشان‌دهنده تاثیر پدیده خودترمیمی در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین استحکام خمشی تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد اولیه که بدون عامل ترمیمی می‌باشد کمتر است که دلیل آن می‌تواند کاهش استحکام ناشی از ایجاد مناطق تمرکز تنش در اطراف لوله‌های شیشه‌ای موجود در زمینه باشد.

با افزایش درصد حجمی عامل ترمیمی از 5 به 8 و از 8 به 11 درصد به دلیل ایجاد تمرکز تنش و مکان‌های گسسته بیشتر درون زمینه، استحکام خمشی کاهش یافته است. برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم ( $\eta$ )، از رابطه (2) استفاده شد [4].

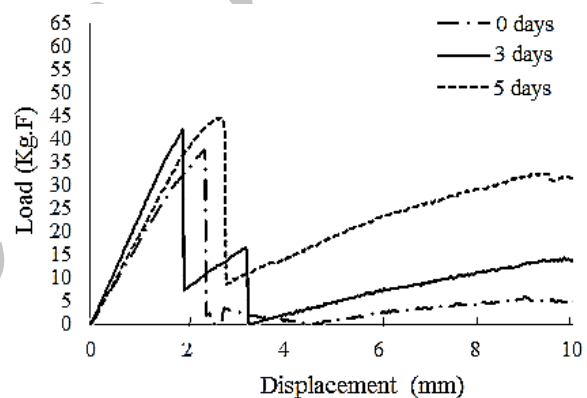


Fig. 6 The bending response of FML specimens with 11 vol.% healing agent after different healing time.

شکل 6 رفتار خمشی نمونه‌های FML با 11 درصد حجمی عوامل ترمیم در سه زمان ترمیم مختلف.

جدول 2 استحکام خمشی نمونه‌ها در درصد‌های حجمی متفاوت.

Table 1 Flexural strength at different volume percentages.

11 درصد	8 درصد	5 درصد	(نمونه شاهد)
---	---	---	429.55
---	---	---	استحکام خمشی نمونه شاهد (صفر درصد)
275.12	383.41	399.9	---
---	---	---	استحکام خمشی نمونه آسیب دیده بدون ترمیم (صفر روز)
310.49	413.28	418.45	---
---	---	---	استحکام خمشی نمونه آسیب دیده با ترمیم 3 روز
329.31	418.67	425.78	---
---	---	---	استحکام خمشی نمونه آسیب دیده با ترمیم 5 روز

- [16] Bleay, S.M. Loader, C.B. Hawyes, V.J. Humberstone, L. and Curtis, P.T., "A Smart Repair System for Polymer Composites", *Composites: Part A*, Vol. 32, No. 1, pp. 1767-1776, 2001.
- [17] Pang, J.W.C. and Bond, I.P., "A Hollow Fiber Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-healing and Enhanced Damage Visibility", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 1791-1799, 2005.
- [18] Trask, R.S. and Bond I.P., "Biomimetic Self-healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibers", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 1, pp. 704-710, 2006.
- [19] Williams, G.J. Bond, I.P. and Trask, R.S., "Compression after Impact Assessment of Self-healing CFRP", *Composites: Part A*, Vol. 40, No. 1, pp. 1399-1406, 2009.
- [20] Tan, W.C.K., "Self-Healing of Epoxy Composite for Aircraft's Structural Applications", *Solid State Phenomena*, Vol. 136, No. 1, pp. 39-44, 2008.
- [21] Teoh, S.H. Chia, H.Y. Lee, M.S. Luqman, A.J.N. Nasyitah H.B.S.M. Nurhidaya, S. and Tan W. C. K., "Self-healing Composite for Aircraft's Structural Application", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, No. 1, pp. 157-163, 2010.
- [22] Cortes, P. and Cantwell, W.J., "The Prediction of Tensile Failure in Titanium-based Thermoplastic Fiber-metal Laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 2306-2316, 2006.
- [23] Voegesang, L.B. and Vlot, A. "Development of Fiber Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 1, pp. 1-5, 2000.
- [24] Boay, C.G. and Manikandan, P., "Low Velocity Impact Response of Fiber-metal Laminates-A review", *Composite Structures*, Vol. 107, No. 1, pp. 363-381, 2014.

استحکام خمشی در دو زمان متفاوت (3 و 5 روز) پس از آسیب اولیه نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که بیشترین میزان ترمیم نمونه‌ها مربوط به درصد‌های حجمی 8 درصد پس از گذشت مدت زمان 5 روز از آسیب نمونه‌ها بود که در این حالت بازده ترمیم به میزان 89 درصد حاصل شد.

هرچند که با افزایش درصد حجمی مواد ترمیم درون میکرولوله‌های شیشه‌ای درون ساختار، خواص مکانیکی از جمله استحکام خمشی، به دلیل افزایش میزان تمرکز تنش در ساختار کاهش یافت، ولی با گذشت هر چه بیشتر زمان پس از آسیب و جریان عوامل ترمیم درون میکروتورها، ترک‌های ایجاد شده در ساختار ترمیم شده و کاهش استحکام بهبود یافتند.

## 5- مراجع

- [1] Mangun, C.L. Mader, A.C. Sottos, N.R. and White, S.R., "Self-Healing of a High Temperature Cured Epoxy Using Poly (Dimethylsiloxane) Chemistry", *Polymer*, Vol. 51, No. 1, pp. 4063-4068, 2010.
- [2] Zhang, J. Lin, T. Cheung, S.C.P. and Wang C.H., "The Effect of Carbon Nanofibres on Self-healing Epoxy/poly ( $\epsilon$ -caprolactone) Blends", *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 1, pp. 1952-1959, 2012.
- [3] Jin, H. Mangun, C.L. Stradley, D.S. Moore, J.S. and Sottos, N.R., "Self-healing Thermoset Using Encapsulated Epoxy-amine Healing Chemistry", *Polymer*, Vol. 53, No. 1, pp. 581-587, 2012.
- [4] Yuan, Y.C. Yin, T. Rong, M.Z. and Zhang, M.Q., "Self-healing Inpolymers and Polymer Composites. Concepts, Realization and Outlook: A Review", *EXPRESS Polymer Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 238-250, 2008.
- [5] Jones, A.R. Blaiszik, B.J. White, S.R. and Sottos N.R., "Full Recovery of Fiber/matrix Interfacial Bond Strength Using a Microencapsulated Solvent-based Healing System", *Composites Science and Technology*, Vol. 79, No. 1, pp. 1-7, 2013.
- [6] Brown, E.N. White, S.R. and Sottos, N.R., "Retardation and Repair of Fatigue Cracks in a Microcapsule Toughened Epoxy Composite-Part II: In Situ Self-healing", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 2474-2480, 2005.
- [7] Blaiszik, B.J. Kramer, S.L.B. Olugebefola, S.C. Moore, J.S. Sottos, N.R. and White, S.R., "Self-Healing Polymers and Composites", *Annual Review Materials Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 179-211, 2010.
- [8] Prem, B.N. James, K.K., and Rao, K.J., "Self-Healing Of Aircraft Structures By Effective Arrangement of Carbon Nano-Tubes", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2, No. 1, 2013.
- [9] Ghosh, S.K., "Self-healing Material: Fundamentals, Design Strategies, and Applications", *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co*, 2009.
- [10] Emami, M. Aram, E. and Mahdavian, A.R., "Smart Polymers: III. Self-Healing Polymers", *Polymerization, Quarterly*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-38, 2013.
- [11] Eslami-Farsani, R. Sari, A. and Khosravi, H., "Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading", *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 285-290, 2016.
- [12] Rosen, B.W., "Hollow Glass Fiber Reinforced Laminates", *General Electric Missile and Space Division, General Electric Company, Philadelphia, Pa*, Vol. 63, No. 1, 1964.
- [13] Hucker, M.J. and Bond, I.P., "Optimization of Hollow Glass Fibres and Their Composites", *Department of Aerospace Engineering, University of Bristol*, 1999.
- [14] Hucker, M. Bond, I. Bleay, S. and Haq, S., "Experimental Evaluation of Unidirectional Hollow Glass Fibre/epoxy Composites under Compressive Loading", *Composites: Part A*, Vol. 34, No. 1, pp. 927-932, 2003.
- [15] Murphy, E.B. and Wudl, F., "The World of Smart Healable Materials", *Progress in Polymer Science*, Vol. 35, No. 1, pp. 223-251, 2010.