



## مطالعه تجربی و عددی اثر وجود و جهت‌گیری آوندهای شیشه‌ای بر رفتار کششی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه

علیرضا عدلی<sup>1</sup>، کریم شلش‌نژاد<sup>2\*</sup>، محمدرضا خوشروان آذر<sup>3</sup>، محمد محمدی‌ا قدم<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران

\*تبریز، کد پستی 5166616471، shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 98/07/18

پذیرش: 99/06/22

### کلیدواژگان:

کامپوزیت اپوکسی-شیشه

آوندهای شیشه‌ای

رفتار کششی

شیشه‌سازی

در سالهای اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه خودترمیمی با استفاده از شبکه آوندی در کامپوزیت‌ها انجام شده است. با توجه به اینکه وجود شبکه آوندی در کامپوزیت‌ها منجر به افت خواص مکانیکی اولیه می‌شود، تعیین طرح بهینه شبکه آوندی برای دستیابی به حداقل افت خواص، اهمیت بسزایی دارد. در این پژوهش، به مطالعه تجربی و عددی اثر وجود و جهت‌گیری آوندهای شیشه‌ای توخالی بر رفتار کششی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه پرداخته شده است. جهت‌گیری آوندهای شیشه در سه سطح 0، 45 و 90 درجه نسبت به راستای الیاف شیشه تقویت‌کننده، و فاصله آنها از یکدیگر 200 میکرومتر در نظر گرفته شد. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که وجود آوندهای شیشه‌ای در کامپوزیت باعث افت خواص کششی می‌شود و کمترین کاهش خواص کششی در نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه‌ای در راستای 45 درجه است. وجود و شکست آوندهای شیشه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رومبی مطالعه شد. در مرحله بعد، شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی با استفاده از المان حجمی نماینده، برای نمونه‌های حاوی سیستم آوندی توخالی با جهت‌گیری‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. برای شبیه‌سازی فصل مشترک آوند شیشه‌ای-ریزین اپوکسی، از ترکیب همزمان مدل‌های ناحیه چسبان و اصطکاکی کولمب استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده اختلاف جزئی در مقادیر استحکام کششی پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی است. در مرحله بعد، عملکرد خودترمیم در کامپوزیت حاوی آوندهای شیشه پر شده با مواد خودترمیم با جهت‌گیری 45 بطور تجربی بررسی شد.

## Experimental and Numerical Studies on the Effect of Hollow Glass Fiber Presence and Orientation on the Tensile Behavior of Epoxy/Glass Fiber Composite

Alireza Adli<sup>1</sup>, Karim Shelesh-Nezhad<sup>1\*</sup>, Mohammadreza Khoshrovan Azar<sup>1</sup>, Mohammad Mohammadi-Aghdam<sup>2</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.

\* Tabriz 5166616471, Iran, shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

### Keywords

Epoxy-glass composite  
Hollow glass fiber  
Tensile behavior  
Simulation

### Abstract

In recent years, numerous investigations have been conducted on self-healing process using vascular network in composites. Since the vascular network in the composites leads to a decrease in virgin tensile properties, it is important to determine the optimal design of the vascular network in order to achieve minimum tensile properties loss. In this research, experimental and numerical studies on the effect of hollow glass fiber (HGF) presence and orientation on tensile behavior in epoxy/glass fiber composite are carried out. The orientations of HGFs were selected at three levels of 0, 45 and 90°, and the distance of HGFs was kept at 200 μm. The experimental results indicated that the presence of blank HGFs in composite lowered the tensile strength. The lowest decrease in tensile strength was observed in the composite containing HGF at angle of 45°. The presence and failure of HGFs in composite specimens were studied using scanning electron microscopy. Next, three-dimensional simulations of composite containing vascular HGF were performed using ABAQUS software and representative volume element (RVE). To simulate the interface of HGFs and epoxy matrix, a combination of cohesive zone and Columb's friction models was used. A good agreement between FEM and experimental results for tensile strength of different specimens was observed. Next, the healing performance for composite containing self-healing HGFs at angle of 45° was investigated.

### 1- مقدمه

بررسی از روی سطح تشخیص داد. بنابراین اهمیت استفاده از کامپوزیت‌هایی

که توانایی خودترمیمی را داشته باشند بسیار زیاد است. یکی از روش‌های

در سازه‌های کامپوزیتی بر خلاف فلزات، عیوب تشکیل شده را نمی‌توان با

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Adli, A., Shelesh-Nezhad, K., Khoshrovan Azar, M., and Mohammadi-Aghdam, M., "Experimental and Numerical Studies on the Effect of Hollow Glass Fiber Presence and Orientation on the Tensile Behavior of Epoxy/Glass Fiber Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 881-890, 2020.

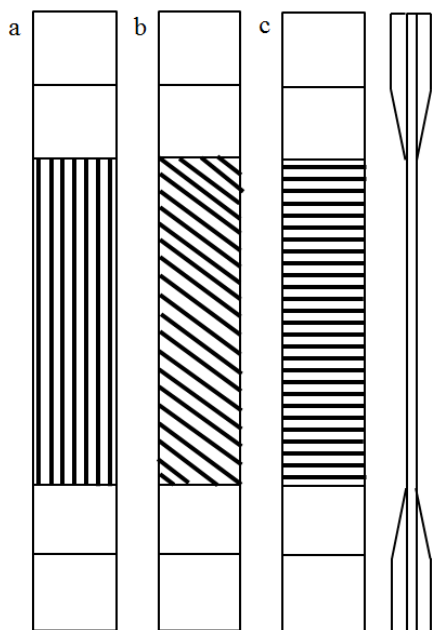
مردن جهت ترمیم ترک‌ها در مواد کامپوزیت پایه پلیمری، به‌کارگیری مفهوم خودترمیمی است. فناوری خودترمیمی از مکانیزم خودترمیمی بدن انسان تقلید شده است [1-2]. در این فرایند از میکروکپسول یا آوندهای حاوی مواد خودترمیم استفاده می‌شود. در صورت بروز ترک، میکروکپسول یا آوندهای حاوی مواد خودترمیم شکسته شده، مواد خودترمیم در ترک نفوذ می‌کند و سپس فرایند سخت‌شدن این مواد شروع می‌شود. بدین ترتیب، ترک‌ها توسط این پرکننده‌های خودترمیم، تعمیر می‌گردند [3-4]. اصول اولیه و روش‌های طراحی آزمایش مواد خودترمیم شونده با کارهای دری<sup>۱</sup> و همکارانش آغاز شد. آنها ایده استفاده از آوندهای پر شده از مواد ترمیم‌کننده در سراسر کامپوزیت و رهاسازی مواد ترمیم‌کننده در زمان‌های صدمه دیدن این آوندها را مطرح و اصول اولیه این روش‌ها را شرح دادند [5-6]. در اوایل سال 2001 وایت<sup>۲</sup> و همکارانش [7] با کپسوله کردن عامل ترمیمی دی‌سیکلو پنتادین<sup>۳</sup> در پوسته اوره-فرمالدهیدی و پخش ذرات کاتالیست گرابز<sup>۴</sup> در زمینه کامپوزیت، موفق شدند اولین سیستم ترمیمی میکروکپسولی را معرفی کنند. برخورد میکروتُرک‌ها با کپسول‌ها، سبب شکسته شدن کپسول‌ها شده و عامل خودترمیم از درون آنها خارج می‌شود. سپس عامل ترمیم در مجاورت کاتالیست پلیمره شده و ترک را ترمیم می‌کند. براون<sup>۵</sup> [8] و جریکو<sup>۶</sup> [9] کار تحقیقاتی وایت و همکارانش را با مطالعه اثر اندازه ذرات کاتالیست، غلظت کاتالیست و میکروکپسول بر چقرمگی شکست و بازدهی ترمیم در نمونه‌های TDCB<sup>۷</sup> تکمیل کردند. آنها بیان کردند که ماکزیمم بازدهی ترمیم برای میکروکپسول با قطر 51 میکرومتر با درصد وزنی 6.5% و اندازه ذرات کاتالیست بین 180-350 میکرومتر رخ می‌دهد. کسلر<sup>۸</sup> و همکارانش [10] و هایس<sup>۹</sup> و همکارانش [11] میکروکپسول‌های پر شده با دی‌سیکلوپنتادین و کاتالیست‌های گرابز را در کامپوزیتی از جنس گرافیت-اپوکسی قرار دادند و توانستند چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را در دمای اتاق به مقدار 38% و در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مقدار 66% بازیابی کنند. اولین بار بلی<sup>۱۰</sup> و همکارانش [12] آوندهای شیشه پر شده با ماده خودترمیم را در یک ورقه کامپوزیتی قرار دادند و نشان دادند که دمای فرایند سخت شدن ماده خودترمیم از عوامل موثر بر بازدهی ترمیم می‌باشد. پانگ<sup>۱۱</sup> و باند<sup>۱۲</sup> [13-14] از آوندهای شیشه توخالی برای نگهداری رزین خودترمیم در یک سیستم کامپوزیتی استفاده کردند. آنها دریافتند که حضور آوندهای شیشه توخالی سبب کاهش مقدار استحکام خمشی نسبت به نمونه شاهد خواهد شد. همچنین با استفاده از عامل خودترمیم می‌توان نسبت قابل توجهی از استحکام خمشی را بازیابی کرد. آنها در تحقیق خود از آوندهای شیشه توخالی با قطر خارجی 60 میکرومتر و کسر تهیگی<sup>۱۳</sup> 50% استفاده کردند. تراسک<sup>۱۴</sup> و همکارانش [15] نیز آوندهای شیشه پر شده با مواد خودترمیم را در داخل لایه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و الیاف کربن قرار دادند تا بازیابی

- 1 Dry
- 2 White
- 3 Dicyclopentadiene
- 4 Grubbs<sup>†</sup>
- 5 Brown
- 6 Jericho
- 7 Tapered Double Cantilever Beam
- 8 Kessler
- 9 Hayes
- 10 Belay
- 11 Pang
- 12 Bond
- 13 Hollowness
- 14 Trask

- 15 Williams
- 16 Zainuddin
- 17 Esлами
- 18 Saini
- 19 Khalili
- 20 Adli
- 21 Huang
- 22 Zhou
- 23 Darren
- 24 Ping
- 25 Nguyen

## 2-2- روش تجربی

آوندهای شیشه با استفاده از یک دستگاه اکسترودر تولید شد. دو عدد فیکسچر<sup>1</sup> به منظور ایجاد فاصله یکسان و جهت‌گیری متفاوت آوندهای شیشه ساخته شد. در شکل 2 جهت‌گیری متفاوت آوندهای شیشه‌ای در نمونه آزمون کشش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جهت‌گیری نسبت به محور اعمال بار دارای زوایای 0، 45 و 90 درجه می‌باشد.



**Fig. 2** A schematic view of locating HGFs at different angles, a) 0°, b) 45°, c) 90°

شکل 2 نمای شماتیک قرارگیری آوندهای شیشه‌ای با زوایای مختلف، الف) 0°، ب) 45°، ج) 90°

در شکل 3 فیکسچر ساخته شده و جانمایی آوندهای شیشه برای زاویه 0 درجه نشان داده شده است.



**Fig. 3** Locating HGFs at angle of 0° in the fixture

شکل 3 چیدمان آوندهای شیشه تحت زاویه 0° در فیکسچر

همکارانش [30] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی اثر شکل آوندهای شیشه توخالی بر رفتار کششی و فشاری در چندلایه کامپوزیتی پرداختند. آنها بیان کردند که آوندهای شیشه بیضوی نسبت به دایروی کاهش کمتری در خواص کششی و فشاری ایجاد می‌کند.

در سالهای اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه مطالعه فرایند خودترمیمی با استفاده از شبکه آوندی در کامپوزیت‌ها انجام شده است. اما تحقیقات اندکی در مورد اثر وجود شبکه آوندی بر خواص اولیه کامپوزیت (قبل از فرایند ترمیم) انجام شده است. با توجه به اینکه وجود شبکه آوندی در کامپوزیت‌ها منجر به افت خواص مکانیکی می‌شود، تعیین طرح بهینه شبکه آوندی برای دستیابی به حداقل افت خواص مکانیکی اولیه اهمیت بسزایی دارد. در پژوهش‌های پیشین، اثر قطر و شکل آوندهای شیشه، کسر تهیگی و نیز فاصله بین آوندهای شیشه، بر کاهش استحکام در کامپوزیت‌های آوندی مطالعه شده است. اما تاکنون پژوهشی در مورد اثر جهت‌گیری آوندهای شیشه بر کاهش استحکام انجام نشده است.

در این پژوهش، به مقایسه تجربی و شبیه‌سازی اثر جهت‌گیری آوندهای شیشه‌ای توخالی بر رفتار کششی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه، پرداخته شده است. افزون بر این، پس از تعیین جهت بهینه برای قرارگیری آوندهای شیشه‌ای، خواص کششی کامپوزیت حاوی آوندهای شیشه‌ای پر شده با مواد خودترمیم در مراحل قبل و پس از ترمیم بطور تجربی مطالعه شده است.

## 1- مواد و روش تحقیق

### 1-2- مواد مورد استفاده

در این پژوهش، از رزین اپوکسی LR160 و سخت کننده LH160 (ساخت شرکت هکسیون، آمریکا) به عنوان فاز زمینه و از الیاف شیشه تک جهته 250 گرمی (ساخت شرکت گوریت، انگلیس) به عنوان فاز تقویت کننده برای ساخت کامپوزیت استفاده شده است. آوندهای شیشه از جنس بورسیلیکات با قطر خارجی  $450 \pm 10$  میکرومتر و کسر تهیگی 55%-50% با استفاده از دستگاه اکسترودر تولید شد. آوندهای شیشه تولید شده، در شکل 1 نشان داده شده است.



**Fig. 1** The HGFs produced by the extruder

شکل 1 آوندهای شیشه تولید شده با استفاده از اکسترودر

<sup>1</sup> Fixture

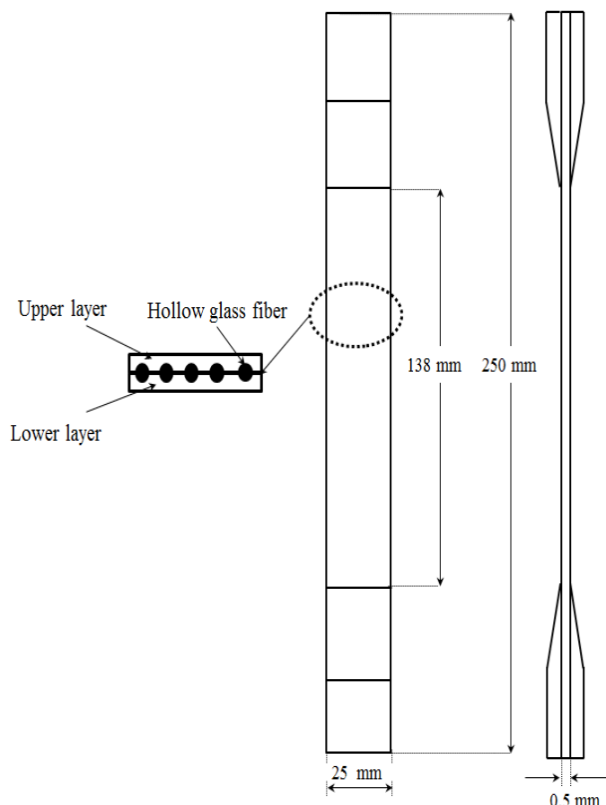


Fig. 5 A schematic view of tensile specimen

شکل 5 نمای شماتیک نمونه آزمون کشش

نام و مشخصات نمونه‌ها در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات نمونه‌ها

Table 1 Description of samples

Virgin	نمونه شاهد: شامل دو لایه شیشه-اپوکسی بدون آوندهای شیشه
Blank	نمونه حاوی آوندهای شیشه توخالی
Filled and Damaged	نمونه حاوی آوندهای شیشه پر شده با ماده خودترمیم و آسیب دیده در کرنش 1.2%
Healed	نمونه پس از ترمیم: کامپوزیت حاوی آوند خود ترمیم

آزمون‌های کشش با ۳ بار تکرار و در دمای محیط انجام شد. ابتدا استحکام کششی نمونه شاهد اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، کامپوزیت حاوی آوندهای شیشه توخالی تحت آزمون کشش قرار گرفت تا مقدار کاهش استحکام کششی به دلیل وجود آوندهای شیشه تعیین شود. سپس، نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه پر شده با رزین و سخت‌کننده (به صورت یک‌درمیان) تا کرنش 1.2% تحت کشش قرار گرفت تا در آن آسیب بوجود آید. برای انجام فرایند خودترمیم، نمونه آسیب دیده در دمای 70 °C به مدت 48 ساعت قرار گرفت. در نهایت، عملکرد خودترمیم در نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه پر شده، با اندازه‌گیری مجدد استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه کامپوزیتی در حین آزمون کشش و پس از شکست در شکل 6 نشان داده شده است.

ساخت چندلایه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی صورت گرفت. در مرحله اول، 2 لایه از الیاف شیشه تک جهت با رزین اپوکسی (شامل 4 قسمت وزنی رزین اپوکسی و یک قسمت وزنی سخت‌کننده) آغشته شد. در مرحله دوم، لایه حاوی آوندهای شیشه با استفاده از فیکسچر آماده شد (شکل 3). فاصله بین آوندهای شیشه 200 میکرومتر و زوایای آنها 0، 45 و 90 درجه در نظر گرفته شد. الیاف شیشه تک جهت آغشته شده با رزین اپوکسی بر روی سطح قالب تخت قرار داده شد و به همراه قالب تخت به فضای زیر فیکسچر انتقال داده شد (شکل 4 الف). در مرحله بعد، لایه فوقانی کامپوزیت بر روی آوندهای شیشه گذاشته شد و پس از آن چندلایه کامپوزیتی با استفاده از کیسه خلاء قالبگیری شد (شکل 4 ب).

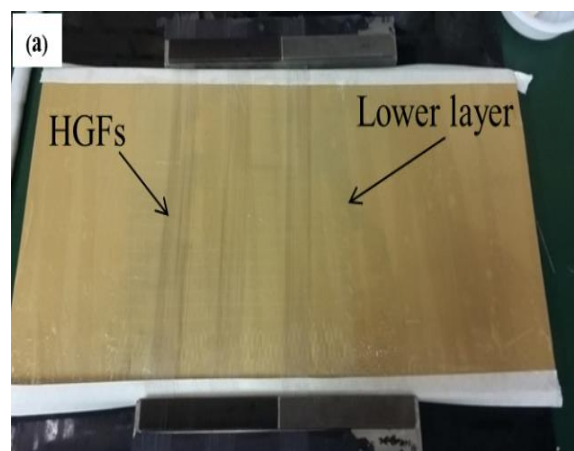
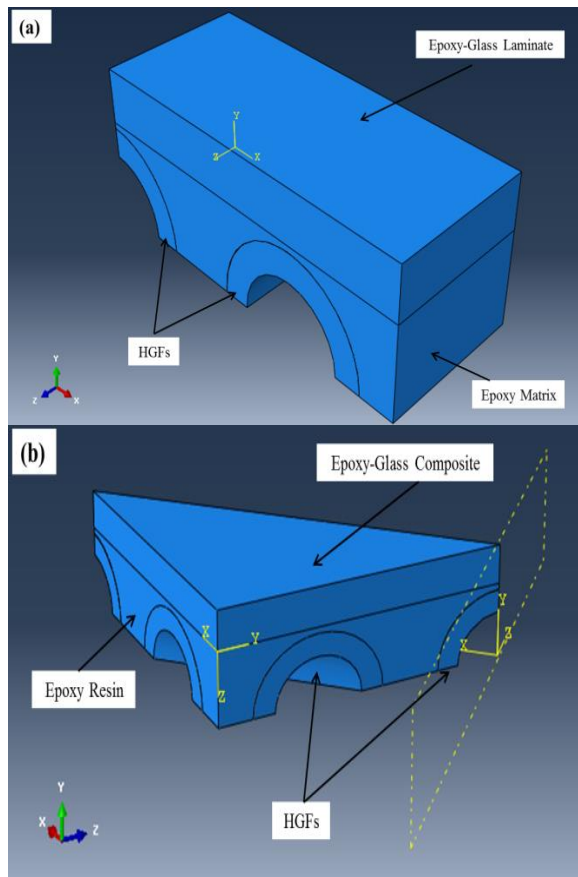


Fig. 4 The manufacturing steps of specimens: a) laying-up of lower composite layer on the flat mold and placing the flat mold under the fixture and HGFs b) vacuum bagging of laminate

شکل 4 مراحل تولید نمونه‌ها: الف) قرار دادن لایه تحتانی کامپوزیت بر روی سطح قالب تخت و انتقال دادن قالب به زیر فیکسچر و آوندهای شیشه، ب) ساخت چندلایه کامپوزیتی با استفاده از کیسه خلاء

پس از اینکه فرایند پخت نمونه‌های کامپوزیتی (در دمای 100 °C و به مدت 4 ساعت) انجام شد، نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 آماده شد. نمای شماتیک نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه با فاصله 200 میکرومتر در شکل 5 نشان داده شده است.



**Fig. 7** Representative volume element (RVE): a) for HGFs with angle of 0° and 90°, b) for HGFs with angle of 45°  
**شکل 7** المان حجمی نماینده (RVE): الف) برای جهت‌گیری 0 و 90 درجه آوندهای شیشه‌ای، ب) برای جهت‌گیری 45 درجه آوندهای شیشه‌ای با در نظر گرفتن سیستم مختصات محلی

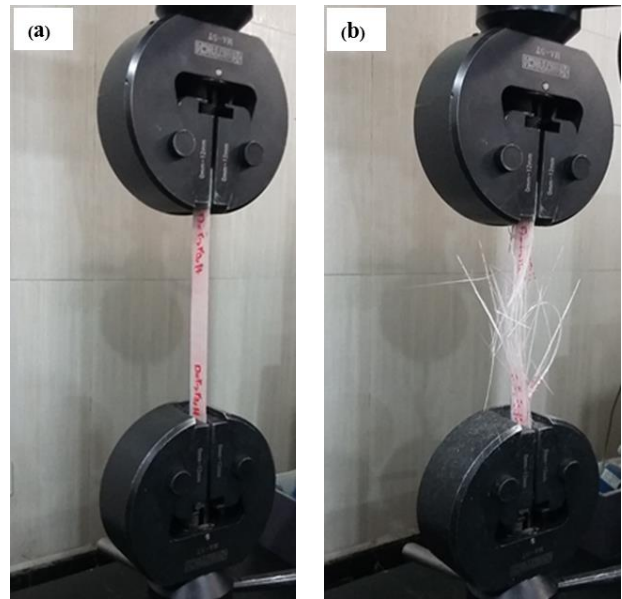
### 2-3-2- خواص مواد

خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه و آوند شیشه‌ای طبق جدول ۲ در نرم‌افزار آباکوس تعریف شد. خواص مکانیکی رزین اپوکسی و آوندهای شیشه‌ای به صورت همسانگرد، و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به صورت ناهمسانگرد با استفاده از ثوابت مهندسی تعریف شد. رفتار تنش-کرنش در نمونه‌های کامپوزیتی به صورت مدل پلاستیک کامل<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. مقادیر نسبت پواسون و مدول برشی به ترتیب با استفاده از فرمول‌های 1 تا 3 بدست آمد [31].

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (1)$$

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (2)$$

$$G_{ij} = \frac{E_i}{2(1 + \nu_{ji})} \quad (3)$$



**Fig. 6** Tensile test: a) during the test, b) end of the test

**شکل 6** آزمون کشش الف) حین آزمون، ب) انتهای آزمون

### 2-3-3- روش عددی

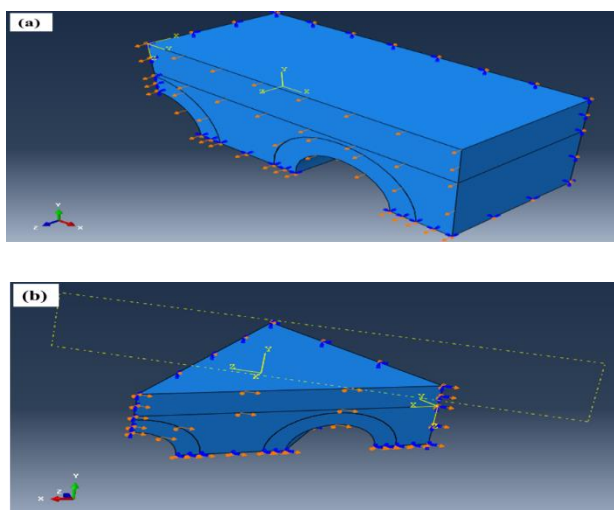
شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.10 انجام شد. اثر راستای آوندهای شیشه‌ای در کامپوزیت اپوکسی-شیشه (50/50) بر رفتار تنش-کرنش مطالعه شد. از المان حجمی نماینده برای مدل‌سازی نمونه‌های کامپوزیتی مختلف حاوی آوندهای شیشه‌ای با فاصله 200 میکرومتر و راستاهای 0، 45 و 90 درجه استفاده شد. تعریف المان‌های حجمی نماینده، خواص مواد، شرایط مرزی، بارگذاری و مش‌بندی در بخش‌های بعدی به تفکیک شرح داده شده است.

### 2-3-3-1- توصیف مدل المان محدود

مدل المان محدود حجمی برای جهت‌گیری 0 و 90 درجه آوندهای شیشه‌ای در شکل 7 الف و مدل المان محدود حجمی برای جهت‌گیری 45 درجه آوندهای شیشه‌ای در شکل 7 ب نشان داده است. مطابق شکل 7، المان حجمی نماینده از قرار گرفتن نیمی از آوند شیشه در کنار یک چهارم آن، یک لایه رزین اپوکسی نازک در اطراف آوندهای شیشه و یک لایه معادل کامپوزیت اپوکسی-شیشه تشکیل شده است.

مدل المان حجمی برای راستای 0 و 90 درجه آوندهای شیشه، دارای ارتفاع  $y=0.4 \text{ mm}$ ، عرض  $z=0.4 \text{ mm}$  و طول  $x=1 \text{ mm}$ ، و برای راستای 45 درجه آوندهای شیشه‌ای دارای ارتفاع  $y=0.4 \text{ mm}$ ، عرض  $z=1 \text{ mm}$  و طول  $x=1 \text{ mm}$  می‌باشد. المان حجمی نماینده در راستای 0 و 90 درجه آوندهای شیشه توخالی به صورت مکعبی (شکل 7 الف) و در راستای 45 درجه به صورت نیمه‌مکعبی (شکل 7 ب) در نظر گرفته شد. برای المان حجمی حاوی آوندهای شیشه‌ای 45 درجه محورهای مختصات اصلی و محلی تعریف شده است. ارتفاع المان حجمی نماینده برابر با نصف ضخامت نمونه کامپوزیتی، و فاصله آوندهای شیشه‌ای توخالی 200 میکرومتر در نظر گرفته شد.

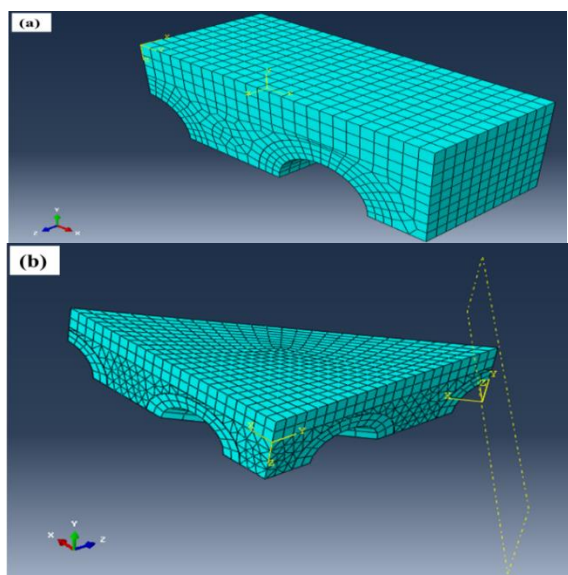
<sup>1</sup> Perfect plastic



**Fig. 8** Boundary condition of RVE: a) for HGFs with angle of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , b) for HGFs with angle of  $45^\circ$   
**شکل 8** شرایط مرزی المان حجمی نماینده (RVE): الف) برای جهت‌گیری  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه آوندهای شیشه‌ای، ب) برای جهت‌گیری  $45^\circ$  درجه آوندهای شیشه‌ای

### 2-3-5- مش‌بندی

مدل مش‌بندی استفاده شده برای لایه معادل کامپوزیتی و نیز آوند شیشه‌ای در این تحلیل‌ها مش سه‌بعدی، شش‌وجهی با 8 گره با مشخصه C3D8R بوده که در شکل 9 نشان داده شده است. در حدفاصل لایه کامپوزیتی و آوندهای شیشه‌ای در زمینه پلیمری از المان ریزتر استفاده شد. همچنین استقلال نتایج بدست آمده از ابعاد مش بررسی شد و ابعاد بهینه در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.



**Fig. 9** Meshing of representative volume element (RVE): a) for HGFs with angle of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , b) for HGFs with angle of  $45^\circ$

**شکل 9** مش‌بندی المان حجمی نماینده (RVE): الف) برای جهت‌گیری  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه آوندهای شیشه‌ای، ب) برای جهت‌گیری  $45^\circ$  درجه آوندهای شیشه‌ای

**جدول 2** مشخصات رزین اپوکسی، کامپوزیت شیشه-اپوکسی و آوندهای شیشه‌ای [31]

**Table 2** Specifications of epoxy resin, epoxy-glass composite and HGF [31]

Parameter	Value		
	Epoxy resin	Epoxy-glass composite	HGF
$(\text{Kg/m}^3)\rho$	1250	2100	2200
$E_1$ (GPa)	3.5*	25*	64
$E_2$ (GPa)	3.5	5*	64
$E_3$ (GPa)	3.5	3.5	64
$_{12\nu}$	0.28	0.32*	0.25
$_{13\nu}$	0.28	0.35	0.25
$_{23\nu}$	0.28	0.30	0.25
$G_{12}$ (GPa)	-	12	-
$G_{13}$ (GPa)	-	2	-
$G_{23}$ (GPa)	-	2	-
$(\text{MPa})\sigma_{yp}$	70*	428.5*	32
$(\%) \varepsilon_p$	0	0	0

\* این مقادیر با استفاده از آزمون‌های تجربی در این تحقیق بدست آمده‌اند.

### 2-3-3- تعریف خواص در فصل مشترک آوند شیشه‌ای با زمینه پلیمری

برای شبیه‌سازی ناحیه میانی آوند شیشه‌ای-رزین پلیمری از ترکیب همزمان دو مدل شامل ناحیه چسبان و اصطکاکی استفاده شده است. مدل اصطکاکی بر اساس قانون کولمب می‌باشد که تنها یک ضریب اصطکاک برای سطوح میانی تعریف می‌شود. همچنین سطح میانی آوندهای شیشه و زمینه نیز به صورت رفتار چسبان شبیه‌سازی شده که در این مدل فرایند شروع و توسعه خرابی سطح میانی در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب اصطکاک برابر با 0.2 و مقادیر ضرایب چسبان در جهت‌های مختلف شامل  $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$  و  $K_{tt}$  برابر با 75 در نظر گرفته شد [32].

### 2-3-4- شرایط مرزی و بارگذاری

با توجه به تقارن موجود در هندسه مدل و همچنین بار اعمالی، شرایط مرزی مورد استفاده برای المان حجمی نماینده در راستاهای  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  درجه به صورت  $ZSYM$ ،  $YSYM$ ،  $XSYM$  و  $ZSYM$  تعریف شد. با در نظر گرفتن این شرایط ضمن کاهش زمان حل مسئله، مدل به صورت کاملاً معین تعریف شده و بر اثر جابجایی‌های اعمالی حل مسئله همگرا خواهد شد. جابجایی محوری ( $0.2 \text{ mm}$ ) در جهت الیاف به انتهای آزاد مدل در جهت Z سیستم مختصات اصلی اعمال شد. نیروی واکنش به وجود آمده ( $F$ ) با جمع کردن نیروهای عکس‌العمل وارده به گره‌های المان‌های موجود در سطحی که جابجایی به آن وارد شده، بدست آمد. شرایط مرزی و جهت جابجایی اعمالی در شکل 8 نشان داده شده است.

## 3- نتایج و بحث

## 1-3- ساختار میکروسکوپی

ریزساختار مقطع شکست نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه در شکل 10 نشان داده شده است. وجود آوندهای شیشه باعث ایجاد فضاهای خالی در کامپوزیت می‌شود.

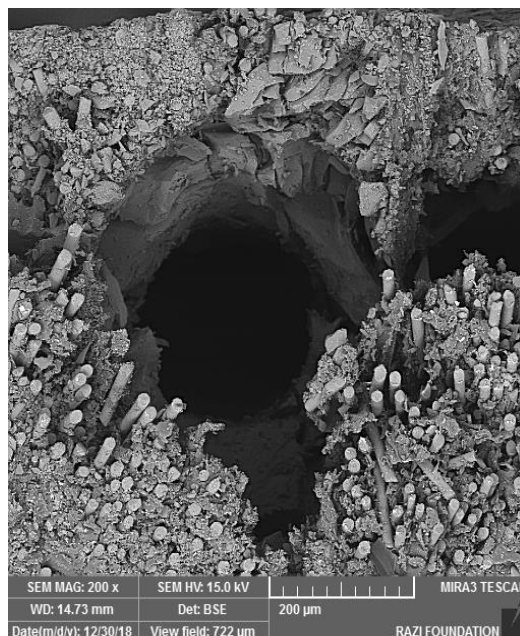


Fig. 10 Fracture microstructure indicates the HGFs in host laminate

شکل 10 ریزساختار مقطع شکست نمونه‌های کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه

نمونه‌های حاوی آوندهای شیشه‌ای تا کرنش 1.2% بارگذاری شد و شکسته شدن آوند شیشه‌ای توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل 11 مشاهده می‌شود کرنش 1.2% باعث جدایش آوند شیشه‌ای از زمینه پلیمری و نیز شکسته شدن دیواره آوندهای شیشه‌ای شده است.

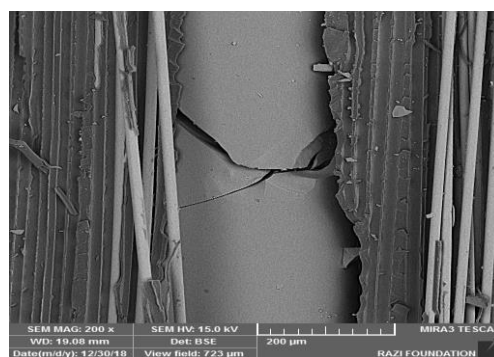


Fig.11 Microstructure of HGF fracture at strain of 1.2%.

شکل 11 ریزساختار شکست آوند شیشه‌ای در کرنش 1.2%.

## 2-3- خواص مکانیکی و مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی

نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی رفتار کششی کامپوزیت‌های حاوی آوندهای شیشه با زوایای 0، 45 و 90 درجه در فاصله الیاف 200 میکرومتر از یکدیگر در شکل‌های 12 تا 14 و جدول 3 آورده شده است.

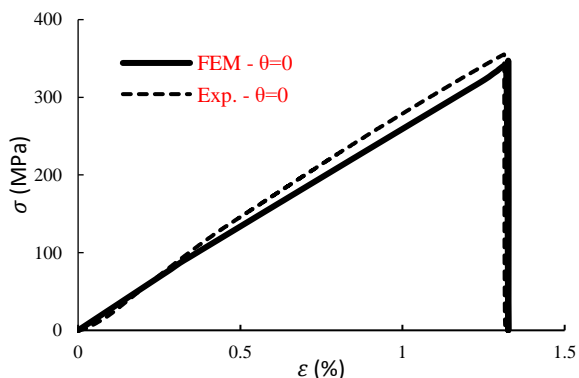


Fig.12 The comparison of experimental and simulation stress-strain values for samples containing blank HGFs with angle of 0°

شکل 12 مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی تنش-کرنش نمونه حاوی آوندهای شیشه با زاویه 0 درجه

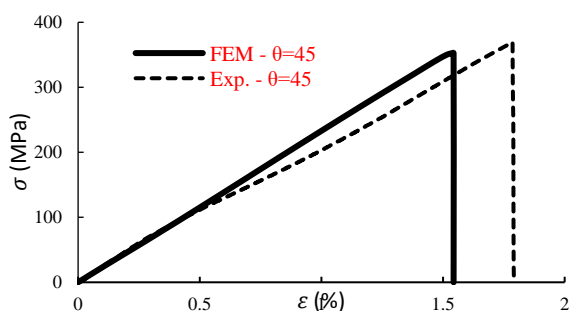


Fig.13 The comparison of experimental and simulation stress-strain values for samples containing blank HGFs with angle of 45°

شکل 13 مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی تنش-کرنش نمونه حاوی آوندهای شیشه با زاویه 45 درجه

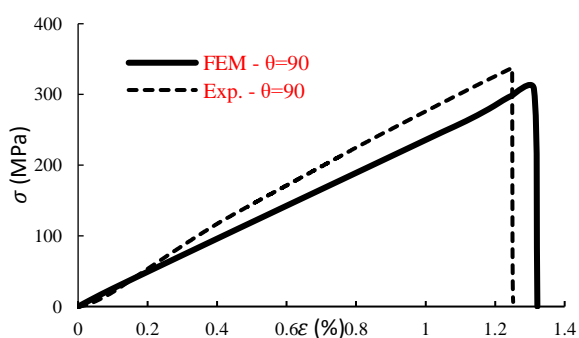
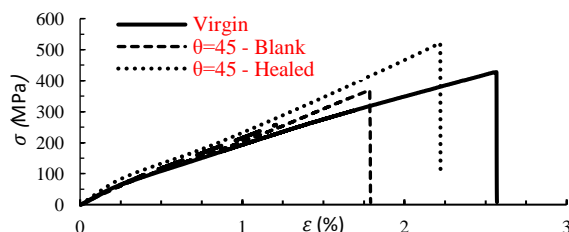


Fig.14 The comparison of experimental and simulation stress-strain values for samples containing blank HGFs with angle of 90°

شکل 14 مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی تنش-کرنش نمونه حاوی آوندهای شیشه با زاویه 90 درجه

با توجه به اینکه کمترین کاهش استحکام کششی در شرایط قرارگیری آوندهای شیشه در راستای 45 درجه مشاهده شد، در مرحله بعد به بررسی عملکرد ترمیم کامپوزیت حاوی آوندهای شیشه پر شده با مواد خودترمیم با جهت‌گیری 45 درجه پرداخته شد. در شکل 16، نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی شاهد، حاوی آوندهای شیشه توخالی (در راستای 45 درجه)، حاوی آوندهای شیشه پر شده آسیب دیده (کرنش 1.2%) و حاوی آوندهای شیشه پر شده ترمیم شده، مقایسه شده است.



**Fig.16** The comparison between stress-strain values of different samples: virgin, containing blank HGFs, damaged and healed specimens

**شکل 16** مقایسه مقادیر تنش-کرنش برای نمونه‌های شاهد، حاوی الیاف توخالی، حاوی الیاف پر شده آسیب دیده و حاوی الیاف پر شده ترمیم شده

بر طبق جدول 3 و شکل 16، استحکام کششی نمونه ترمیم شده (521.4 MPa) در مقایسه با نمونه شاهد (428.5 MPa) و نمونه حاوی آوندهای شیشه توخالی (367.2 MPa) به ترتیب 22% و 42% بیشتر است. وجود عامل خودترمیم در کامپوزیت و نفوذ آن به درون ریزترک‌ها می‌تواند باعث ترمیم و افزایش استحکام شود. ریزترک‌ها در مرحله بروز آسیب تحت اعمال بار در نمونه بوجود می‌آیند. ریز ترک‌ها همچنین می‌توانند در نتیجه وجود عیوب و یا تنش‌های پس‌ماند بوجود آمده در مراحل ساخت نمونه‌های کامپوزیتی تشکیل شوند. بنابراین، این امکان وجود دارد که استحکام نمونه کامپوزیتی با قابلیت خودترمیم بیشتر از استحکام نمونه کامپوزیتی شاهد باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

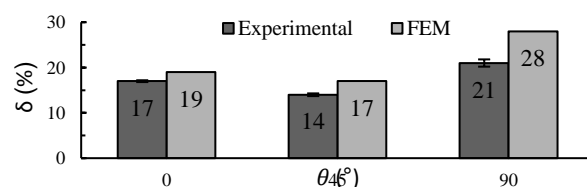
در این پژوهش به مطالعه نتایج تجربی و شبیه‌سازی اثر جهت‌گیری آوندهای شیشه‌ای بر رفتار کششی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه پرداخته شد. آوندهای شیشه‌ای توخالی در میان دو لایه کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه قرار داده شد. راستای آوندهای شیشه‌ای در سه سطح شامل 0، 45 و 90 درجه در نظر گرفته شد. نمونه‌های شاهد و حاوی آوندهای شیشه تحت آزمون کشش قرار گرفتند. در مرحله بعد، شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی با استفاده از المان حجمی نماینده و بکارگیری نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی رفتار کششی چندلایه کامپوزیتی نشان دهنده اختلاف جزئی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد. مقدار کاهش استحکام کششی برای جهت‌گیری 0، 45 و 90 درجه در آزمون تجربی به ترتیب 17%، 14% و 21% و در شبیه‌سازی به ترتیب 19%، 17% و 28% می‌باشد. کمترین کاهش استحکام مربوط به نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه با زاویه 45 درجه می‌باشد. استحکام کششی نمونه ترمیم شده حاوی آوندهای شیشه پر شده با مواد خودترمیم در زاویه 45 درجه در مقایسه با نمونه شاهد و نمونه حاوی آوندهای شیشه توخالی به ترتیب 22% و 42% بیشتر است.

**جدول 3** نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی رفتار کششی کامپوزیت شیشه-اپوکسی شاهد و حاوی آوندهای شیشه توخالی با زوایای 0، 45 و 90 درجه

**Table 3** The result of experimental and simulation of tensile properties of virgin sample and glass/epoxy composites containing blank HGFs with locating angles of 0, 45 and 90 °

نمونه‌های کامپوزیتی	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)
Virgin	428.5±3.5	2.53±0.04
, Blank HGFs, $\theta = 0^\circ$ Experimental	355.3±1.2	1.31±0.10
, Blank HGFs, $\theta = 45^\circ$ Experimental	367.2±2.1	1.76±0.09
, Blank HGFs, $\theta = 90^\circ$ Experimental	337.6±6.1	1.25±0.16
, Blank HGFs, FEM $\theta = 0^\circ$	339.1	1.32
, Blank HGFs, FEM $\theta = 45^\circ$	351.9	1.54
, Blank HGFs, FEM $\theta = 90^\circ$	307.8	1.31

همانطور که در شکل‌های 12 تا 14 مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی نشان‌دهنده اختلاف جزئی در مقادیر استحکام کششی پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی است. وجود آوندهای شیشه توخالی در ساختار کامپوزیتی سبب بوجود آمدن فضاهای خالی شده، که همین امر سبب کاهش مقدار استحکام کششی نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. طبق جدول 3، استحکام کششی نمونه حاوی آوندهای شیشه نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. درصد کاهش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی حاوی آوندهای شیشه در شکل 15 نشان داده شده است. نتایج تجربی استحکام کششی نشان داد که وجود آوندهای شیشه در ساختار کامپوزیتی سبب کاهش اولیه مقدار استحکام کششی شده که این مقدار برای زوایای 0، 45 و 90 درجه به ترتیب 17%، 14% و 21% می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی استحکام کششی نیز نشان داد که وجود آوندهای شیشه در ساختار کامپوزیتی سبب کاهش اولیه مقدار استحکام کششی شده که این مقدار برای زوایای 0، 45 و 90 درجه به ترتیب 19%، 17% و 28% می‌باشد. وجود آوندهای شیشه‌ای در ساختار کامپوزیت همانند حفره‌هایی عمل کرده و سبب عدم یکپارچگی، تمرکز تنش و کاهش استحکام کششی می‌شود [15, 23]. کمترین کاهش استحکام مربوط به نمونه کامپوزیتی حاوی آوندهای شیشه با زاویه 45 درجه می‌باشد. این نتیجه می‌تواند به دلیل بیشینه بودن سطح مقطع موثر در نمونه‌های آزمون کشش محتوی آوندهای شیشه‌ای در زاویه 45 درجه در مقایسه با زوایای 0 و 90 درجه باشد.



**Fig.15** Comparison between experimental and simulation values of tensile strength reduction versus orientation angle of HGFs

**شکل 15** مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی درصد کاهش استحکام کششی برحسب زاویه قرارگیری آوندهای شیشه



- Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 399-404, 2018.
- [21] Mohammadi, M. A. Babolhavaeji, M. Eslami-Farsani, R. and Zamani, M. R., "Effect of time on healing behavior of microvascular channels based self-healing E-glass fibers/epoxy composite under flexural and tensile loadings condition", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, In-Press.
- [22] Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. Khademololati, A. and Saeedi, A., "Tensile and creep behavior of microvascular based self-healing composites: Experimental study", Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2019, DOI: 10.1080/15376494.1567882. In-Press.
- [23] Saini, S. and Jain, D. "The Effect of Healing Time on the Self-Healing Efficiency of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", Materials Today: Proceedings, Vol. 4, pp. 2903-2909, 2017.
- [24] Khalili, S. M. R. Zarei, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental study of the mechanical behavior of self-healing polymer composite under heating cycles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, In-Press.
- [25] Adli, A. Shelesh-Nezhad, K. Khoshrovan-Azar, M.R. Mohammadi-Aghdam, M., "The Effect of Vascular Self-Healing Orientation on Healing Efficiency of Epoxy/Glass Fiber Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, In-Press.
- [26] Huang, C. Y. Trask, R. Bond, I., "Characterization and analysis of carbon fiber-reinforced polymer composite laminates with embedded circular vasculature", Journal of The Royal Society Interface, Vol.7, pp. 1229-1241, 2010.
- [27] Zhou, F. Wang, C. Mouritz, A., "Computational analysis of the structural integrity of self-healing composites", Materials Science Forum, Vol. 654, 2567-2578, 2010.
- [28] Darren, J.H. Geoffrey, J. Jeffrey, W.B., "Effects of microchannels on the mechanical performance of multifunctional composite laminates with unidirectional laminae", Composite Structures, pp.1-35, 2016.
- [29] Ping, K. Wang, C. Varley, R., Mouritz, A., "Mechanical properties of mendable composites containing self-healing thermoplastic agents", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 65, pp.10-18, 2014.
- [30] Nguyen, A. T. Orifici, A. C., "Structural assessment of microvascular self-healing laminates using progressive damage finite element analysis", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 43, 1886-1894, 2012.
- [31] Kaw, K., Mechanics of composite materials, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [32] Aghdam, M.M. Pavier, M.J. Smith, D.J., "Micro-mechanics of off-axis loading of metal matrix composites using finite element analysis," international journal of solid and structures, Vol. 38, 3905-3925, 2001.
- [1] Zeng, C. Seino, H. Ren, J. Hatanaka, K. and Yoshie, N., "Self-healing Biobased Furan Polymers Cross-linked with Various Bis-maleimides", Polymer, Vol. 54, pp. 5351-5357, 2013.
- [2] Trask, R.S. Williams, H.R and Bond, I.P., "Self-Healing Polymer Composites: Mimicking Nature to Enhance Performance", Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 2, pp. 1-9, 2007.
- [3] Wang, Y. Pham, T.D. and Ji, C., "Self-healing composites: A review", Cogent Engineering, Vol. 2, pp. 107-121, 2015.
- [4] Kanua, N.J. Gupta, E. Vates, U.K. and Singh, G.K., "Self-healing composites: A state-of-the-art review", Composites Part A, Vol 121, pp. 474-486, 2019.
- [5] Dry, C., "Matrix Cracking Repair and Filling Using Active and Passive Modes for Smart Timed Release of Chemicals from Fibers into Cement Matrices", Smart Materials and Structures, Vol. 3, pp. 118-123, 1994.
- [6] Dry, C., "Procedures Developed for Self-Repair of Polymeric Matrix Composite Materials", Composite Structures, Vol. 35, pp. 263-269, 1996.
- [7] White, S.R. Sottos, N.R. Geubelle, P.H. Moore, J.S. Kessler, M.R. Sriram, S.R. Brown, E.N. and Viswanathan, S., "Autonomic Healing of Polymer Composites, Nature", Vol. 409, pp. 794-797, 2001.
- [8] Brown, E.N. Sottos, N.R. and White, S.R., "Fracture Testing of a Self-Healing Polymer Composite", Experimental Mechanics, Vol. 42, pp. 372-379, 2002.
- [9] Jericho, L.M. Scott, R. White, S.R. and Sottos, N.R., "A Self-Sealing Fiber-Reinforced Composite", Journal of Composite Materials, Vol. 44, pp. 1-13, 2010.
- [10] Kessler, M. R. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing Structural Composite Materials", Composites Part A, Vol. 34A, pp. 743-753, 2003.
- [11] Hayes, S.A. Jones, F.R. Marshiya, K. and Zhang, W., "A self-healing thermosetting composite material", Composites Part A, Vol. 38, pp. 1116-1120, 2007.
- [12] Belay, S.M. Leader.C.B. Hawyes V.J. Humberstone.L. and Curits P.T., "A Smart Repair System for Polymer Matrix Composite", Composite Part A, Vol. 32, pp. 1767-1776, 2001.
- [13] Pang, J. W. C. and Bond, I. P., "Bleeding Composites-Damage Detection and Self-Repair Using a Biomimetic Approach", Composites Part A, Vol. 36A, pp. 183-188, 2005.
- [14] Pang, J. W. C. and Bond, I. P., "A Hollow Fibre Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-Healing and Enhanced Damage Visibility", Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 1791-1799, 2005.
- [15] Trask R. S. and Bond I. P., "Biomimetic Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 704-710. 2006.
- [16] Williams, G. Trask, R. and Bond, I., "A Self-healing Carbon Fiber Reinforced Polymer for Aerospace Applications", Composites Part A, Vol. 38, pp. 1525-1532, 2007.
- [17] Zainuddin, S. Arefin, T. Fahim, A. Hosur, M. V. Tyson, J. D. Kumar, A. Trovillion, J. and Jeelani, S., "Recovery and Improvement in Low-Velocity Impact Properties of E-Glass/Epoxy Composites Through Novel Self-Healing Technique", Composite Structures, Vol. 108, pp. 277-286, 2014.
- [18] 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.
- [19] Abbasnia, Sh. Eslami-Farsani, R. and 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.
- [20] Eslami-Farsani, R. Mohabbati, F. and Khosravi, H., "Experimental study of tensile behavior of self-healing fiber-metal laminates composites with chopped hollow glass fibers", In Persian, Journal of

