نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیست** http://jstc.iust.ac.ir



اثر جهت گیری عامل خودترمیم آوندی بر بازدهی ترمیم در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه

علیرضا عدلی¹، کریم شلشنژاد^{1*}، محمدرضا خوشروان آذر¹، محمد محمدیاقدم²

1-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز 2-دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز 3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تهران 4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران *تبریز، کد پستی 1166616471 shelesh-nezhad

چکیدہ	اطلاعات مقاله
 در این پژوهش به مطالعه تجربی اثر جهتگیری عامل خودترمیم آوندی بر استحکام کششی و بازدهی ترمیم در کامپوزیت اپوکسی-الیاف	دريافت: 98/01/26
شیشه پرداخته شده است. ابتدا الیاف شیشه توخالی (با قطر خارجی 10±450 میکرومتر و کسر تهینگی %55-%50) با استفاده از یک	پذيرش: 99/01/11
دستگاه اکسترودر تولید شد. سپس، الیاف شیشه توخالی با اجزای خود ترمیم پر شد و به عنوان خودترمیم آوندی در چند لایه کامپوزیتی استفاده شد. جهتگیری آوندهای خودترمیم در سه سطح 0، 45 و 90 درجه نسبت به راستای الیاف شیشه تقویت کننده، و فاصله آوندها از یکدیگر 200 میکرومتر در نظر گرفته شد. نمونههای شاهد، آسیب دیده و ترمیم شده تحت آزمون کشش قرار گرفتند و بازدهی ترمیم مطالعه شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که وجود آوندهای خالی در زوایای 0، 45 و 90 درجه در ساختار کامپوزیت سبب به ترتیب %۲۱، %14 و %21 کاهش در استحکام کششی می شود. آسیب در نمونههای کشش با کرنش %2.1 ایجاد شد و سپس فرایند خودترمیم در دمای ک° 70 و مدت زمان 48 ساعت انجام شد. در مرحله بعد، بازدهی ترمیم با استفاده از آزمون کشش اندازه گیری شد. نتایج آزمون های کشش و بازدهی ترمیم نشان داد که بهترین جهتگیری برای چینش آوندهای حاوی عامل خودترمیم، زاویه 45 درجه نسبت به راستای الیاف شیشه تقویت کننده می باشد، بطوریکه در این حالت بازدهی ترمیم هاست. شکل شناسی آوندهای شکسته شده و محل های ترمیم شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد.	کلیدواژگان: کامپوزیت خودترمیم عامل خودترمیم آوندی رفتار کششی، اپوکسی الیاف شیشه

The Effect of Vascular Self-Healing Orientation on Healing Efficiency of Epoxy/Glass Fiber Composite

Alireza Adli¹, Karim Shelesh-Nezhad^{1*}, Mohammadreza Khoshravan Azar¹, Mohammad Mohammadi-Aghdam²

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. 2- Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. * P.O.B. 5166616471, Tabriz , Iran, shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

Keywords	Abstract
Self-healing composite Vascular self-healing Tensile properties Epoxy Glass fiber	In this study, the effect of vascular self-healing orientation on tensile strength and healing efficiency of epoxy- glass composite has been experimentally studied. Hollow glass fiber (HGF) of 450±10 µm diameter and 50%-55% hollowness was produced by using an extruder. Following, the HGFs were filled with healing components, and subsequently employed as vascular healing system in composite laminate. The orientations of HGFs were selected at three levels of 0, 45 and 90°. The distance of HGFs was kept at 200 µm. The virgin, damaged and healed specimens were characterized in term of tensile behavior and subsequently the healing efficiency was studied. The results of tensile tests indicated that the presence of blank HGFs in composite lowered the tensile strength as high as 17, 14 and 21% for HGFs angles of 0, 45 and 90°, respectively. As a damage, a strain of 1.2% was initiated in the tensile specimen and afterward the self-healing process was accomplished at temperature of 70 °C for a time period of 48 hours. Subsequently, the healing efficiency was measured by tensile testing. The results indicated that the best orientation of the filled HGFs was 45°, where the healing efficiency was equal to 42%. The morphology of fractured HGFs and healed zones was studied by employing scanning electron microscopy.

Please cite this article using:

کامپوزیت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Adli, A. Shelesh-Nezhad, K. Khoshravan 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, Vol. 7, No. 1, pp. 723-730, 2020.

1– مقدمه

یکی از روشهای مدرن جهت ترمیم ترکها در مواد کامپوزیت پایه پلیمری، به کارگیری مفهوم خودترمیمی است. فناوری خودترمیمی از مکانیزم خودترمیمی بدن انسان تقلید شده است. در این فرایند از میکروکپسول یا الیاف توخالی حاوی مواد خودترمیم استفاده می شود. در صورت بروز ترک، میکروکپسول یا الیاف تو خالی حاوی مواد خودترمیم شکسته شده، مواد خودترمیم در ترک نفوذ میکند و سپس فرایند سخت شدن این مواد شروع می شود. بدین ترتیب، ترکها توسط این پرکننده های خودترمیم، تعمیر می گردد[1-4]

اصول اولیه و روش های طراحی آزمایش مواد خودترمیم شونده با کارهای دری و همکارانش آغاز شد. آنها ایده استفاده از الیاف پر شده از مواد ترمیم کننده در سراسر کامپوزیت و رهاسازی مواد ترمیم کننده در زمانهای صدمه دیدن این الیاف را مطرح و اصول اولیه این روش ها را شرح دادند -5] [6. در اوایل سال 2001 وایت و همکارانش [7] برای اولین بار مواد مهندسی با خاصیت خود ترمیم شوندگی را با وارد نمودن کاتالیزور و میکروکپسول های حاوی عامل ترمیم کننده در ماتریس پلیمری معرفی نمودند. آنها بیان کردند که با این روش حدود 75 درصد ترکها و شکستگیها میتواند بهبود یابد. نراون [8] و جریکو [9] کار تحقیقاتی وایت و همکارانش را با مطالعه اثر اندازه ذرات کاتالیست، غلظت کاتالیست و میکروکپسول بر تافنس شکست و بازدهی ترمیم در نمونههای TDCB¹ تکمیل کردند. آنها همچنین بیان کردند وزنی %6.5 و اندازه ذرات کاتالیست بین 350-180 میکرومتر را می دوسد. کسلر و همکارانش [10]، کسلر و وایت [11] و هایس و همکارانش [12]

میکروکپسولهای پر شده با دی سیکلوپنتادی ان^۲ و کاتالیستهای گرابز⁷ را در کامپوزیتی از جنس گرافیت-اپوکسی قرار دادند و توانستند تافنس شکست بین لایه ای را در دمای اتاق به مقدار %38 و در دمای 80 درجه سانتی گراد به مقدار 66% بازیابی کنند.

اولین بار بلی و همکارانش [13] الیاف شیشه توخالی 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 می باشد. پانگ و سخت شدن ماده خودترمیم از عوامل موثر بر بازدهی ترمیم می باشد. پانگ و سیستم کامپوزیتی استفاده کردند. آنها دریافتند که تحت بارگذاری خمشی، نسبت قابل توجهی از استحکام خمشی را می توان با استفاده از عامل خودترمیم کننده بازیابی کرد. آنها در تعیق خود از الیاف شیشه توخالی با قطر خارجی 60 میکرومتر و کسر تهینگی[†] %50 استفاده کردند. تراسک و ممکارانش [16] و کوپولا و همکارانش [17] نیز الیاف شیشه توخالی پر شده با مواد خودترمیم را در داخل لایههای کامپوزیتی الیاف شیشه و الیاف کربن قرار دادند تا بازیابی خواص را با اعمال بار ضربهای بررسی کنند. نتایج بازیابی اقرار دادند که بخش قابل توجهی از استحکام کششی در کامپوزیتها را نشان دادند که بخش قابل توجهی از استحکام کششی در کامپوزیتها را

از الیاف شیشه پر شده در آزمون ضربه با سرعت پایین پرداختند. نتایج، بازیابی %55 در خواص ضربهای را نشان داد. نادمی و همکارانش [20] به بررسی ترمیم ترک در کامپوزیت با استفاده از الیاف توخالی به قطر خارجی 80 میکرومتر و کسر تهینگی %50 پرداختند. نتایج آزمون خمش سهنقطهای، بازیابی %70 در استحکام خمشی را نشان داد. اسلامی و همکارانش [21-25] و ساراب و همکارانش [26] نیز از با استفاده از الیاف توخالی شیشه به بررسی کسر حجمی و زمان مناسب برای مشاهده پدیده شیشه پرداختند. آنها با تعیین کسر حجمی و زمان مینه به، مقدار بازیابی در استحکام خمشی را بیش از %80 گزارش کردند. خلیلی و همکارانش [27] یک سیکل دمایی بهینه برای دستیابی به مقدار بیشینه ترمیم را بدست آوردند و %7 بازیابی در استحکام خمشی را گزارش کردند.

در پژوهشهای پیشین، اثر قطر الیاف شیشه توخالی، کسر تهینگی و نیز فاصله بین الیاف شیشه پرشده، بر بازدهی ترمیم در کامپوزیت های خودترمیم آوندی مطالعه شده است. اما تاکنون پژوهشی در مورد اثر جهتگیری الیاف شیشه پرشده با ماده خودترمیم بر بازدهی ترمیم انجام نشده است. در این پژوهش، اثر جهت گیری عامل خودترمیم آوندی، بر بازدهی ترمیم در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه، مطالعه شده است.

2- مواد و روش تحقيق

1-2- مواد مورد استفاده

در این پژوهش، از رزین اپوکسی LY160 و سخت کننده HY160 (ساخت شرکت هکسیون) به عنوان فاز زمینه و از الیاف شیشه تک جهته 250 گرمی به عنوان فاز تقویت کننده برای ساخت کامپوزیت استفاده شده است. الیاف شیشه توخالی از جنس بورسیلیکات با قطر خارجی 10±450 میکرومتر و کسر تهینگی %55-%50 با استفاده از دستگاه اکسترودر تولید شد. الیاف شیشه توخالی تولید شده، در شکل 1 نشان داده شده است.



Fig. 1 The HGFs produced by the extruder شكل 1 الياف شيشه توخالي توليد شده با استفاده از اكسترودر

2-2- روش ساخت نمونهها

الیاف شیشه توخالی با استفاده از یک دستگاه اکسترودر تولید شد. مواد خودترمیم شامل رزین اپوکسی و سخت کننده به صورت مجزا در درون الیاف

Tapered Double Cantilever Beam

² Dicyclopentadiene ³ Grubbs'

⁴ Hollowness

علیرضا عدلی و همکا*ر*ان

شیشه توخالی با استفاده از خلاء قرار داده شدند. دو عدد فیکسچر^۱ به منظور ایجاد فاصله یکسان و جهتگیری متفاوت الیاف شیشه حاوی مواد خودترمیم ساخته شد. در شکل 2 شیارهای موجود بر روی فیکسچر به منظور ایجاد فاصله یکسان بین الیاف شیشه توخالی (یا پر شده) نشان داده شده است. در شکل 3 جهت گیری متفاوت الیاف شیشه توخالی و یا پر شده در نمونه آزمون کشش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود جهت گیری نسبت به محور اعمال بار دارای زوایای 0، 45 و 90 درجه می باشد.

در شکل 4 فیکسچر ساخته شده و جانمایی الیاف شیشه توخالی برای زاویه 0 درجه نشان داده شده است.



Fig. 2 A schematic view of locating either the blank or filled HGFs in the fixture at distance of 200 μm شکل 2 نمای شماتیک قرارگیری الیاف شیشه توخالی (یا پـر شـده) در فیکسـچر بـا

فاصله 200 ميكرومتر



Fig. 3 A schematic view of locating either the blank or filled HGFs at different angles, a) 0°, b) 45°, c) 90°

شکل 3 نمای شماتیک قرارگیری الیاف شیشه توخالی یا پر شده بـا زوایـای مختلـف، الف) ۰۵، ب) ۰۶۶۰، ج) ۰۹۵



Fig. 4 a) The manufactured fixture, b) Locating HGFs at angle 0° 0° 0° بناخت چندلایه کامپوزیتی خودترمیم با استفاده از روش لایه گذاری دستی ساخت چندلایه کامپوزیتی خودترمیم با استفاده از روش لایه گذاری دستی صورت گرفت. در مرحله اول، 2 لایه از الیاف شیشه تک جهته با رزین اپوکسی آغشته شد. در مرحله دوم، لایه حاوی الیاف شیشه توخالی با استفاده از فیکسچر آماده شد (شکل 4). فاصله بین الیاف شیشه توخالی با استفاده میکرومتر و زوایای آنها 0، 45 و 90 درجه در نظر گرفته شد. الیاف تقویت به همراه قالب تخت به فضای زیر فیکسچر انتقال داده شد (شکل 5 الف و به همراه قالب تخت به فضای زیر فیکسچر انتقال داده شد (شکل 5 الف و به همراه قالب تخت به فضای زیر فیکسچر انتقال داده شد (شکل 5 الف و کناشته شد (شکل 5 ج) و پس از آن چندلایه کامپوزیتی با استفاده از کیسه خلاء قالبگیری شد (شکل 5 د). الیاف شیشه توخالی در دو حالت خالی و پرشده با ماده خودترمیم در ساخت نمونه ها استفاده شد.

پس از اینکه فرایند پخت نمونه های کامپوزیتی (در دمای ² 100 و به مدت 4 ساعت) انجام شد، نمونه های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 آماده شد (شکل 6). به منظور اندازه گیری بازدهی ترمیم, نمونه ها تحت آزمون کشش با 3 بار تکرار قرار گرفتند. نمای شماتیک نمونه کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه توخالی با فاصله 200 میکرومتر درشکل 6 نشان داده شده است. نام و مشخصات نمونه ها در جدول 1 آورده شده است.

¹ Fixture



Fig. 5 The manufacturing steps of specimens: a) locating HGFs into the fixture and preparing the flat mold, b) laying-up of lower composite layer on the flat mold and placing the flat mold under the fixture or HGFs c) laying-up of upper composite layer on the HGFs, d) vacuum bagging of laminate

شکل 5 مراحل تولید نمونه ها: لف) جاگذاری الیاف شیشه توخالی در فیکسچر و آماده سازی قالب تخت، ب) قرار دادن لایه تحتانی کامپوزیت بر روی سطح قالب تخت و انتقال دادن قالب به زیر فیکسچر یا الیاف شیشه توخالی، ج) قرار دادن لایه فوقانی کامپوزیت بر روی الیاف شیشه توخالی ، د) ساخت چندلایه کامپوزیتی با استفاده از کیسه خلاء

ابتدا استحکام کششی نمونه شاهد اندازه گیری شد. در مرحله بعد، کامپوزیت محتوی الیاف شیشه توخالی تحت آزمون کشش قرار گرفت تا مقدار کاهش استحکام کششی به دلیل وجود الیاف شیشه توخالی تعیین شود. سپس، نمونه های کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه توخالی پرشده با ماده خودترمیم، تا کرنش 1.2% تحت کشش قرار گرفتند تا در آنها آسیب بوجود آید. برای انجام فرایند خودترمیم، نمونههای آسیب دیده در دمای 2° 70 به مدت 48

ساعت قرار گرفتند. در نهایت، مقدار بازدهی ترمیم و بازیابی استحکام کششی با اندازه گیری مجدد استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه کامپوزیتی در حین آزمون کشش و پس از شکست در شکل 7 نشان داده شده است.



Fig. 6 A schematic view of tensile specimen شکل $\mathbf{6}$ نمای شماتیک نمونه آزمون کشش $\mathbf{6}$

جدول 1 مشخصات نمونهها

Table 1 Description of samples

مشخصات	نمونه
Virgin	نمونه شاهد: شامل دو لايه شيشه⊣پوكسي
	بدون الياف شيشه توخالى
Blank	نمونه محتوى الياف شيشه توخالى
Filled and	نمونه محتوى الياف شيشه پرشده با ماده خودترميم
Damaged	و آسیب دیده در کرنش 1.2%
Healed	نمونه پس از ترمیم: کامپوزیت محتوی آوند خود ترمیم



 Fig. 7 Tensile test: a) during the test, b) end of the test

 شکل 7 آزمون کشش الف) حین آزمون، ب) انتہای آزمون

علیرضا عدلی و همکا*ر*ان

3- نتايج و بحث

1-3- ساختار ميكروسكوپى

به منظور مشاهده ریزساختار، مقاطع شکست نمونههای کامپوزیتی مختلف شامل شاهد، حاوی الیاف شیشه توخالی و حاوی الیاف شیشه پر شده با عامل ترمیم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. شکل 8 ریزساختار مقطع شکست نمونه کامپوزیتی شاهد را نشان میدهد. الیاف شیشه با قطر حدود 14 میکرومتر در زمینه اپوکسی مشاهده میشوند.

ریزساختار مقطع شکست نمونه کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه توخالی در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود وجود الیاف شیشه توخالی باعث ایجاد فضاهای خالی در کامپوزیت می شود [16].

همچنین به منظور بررسی ریزساختار سطح شکست بین لایه ین نمونههای کامپوزیتی، تعدادی از نمونههای حاوی الیاف توخالی تا کرنش %2.1 بارگذاری شد و سطح بین لایه ای آنها توسط میکروسکوپ الکترون روبشی مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل 10 مشاهده می شود ریزتر کهای ایجاد شده در زمینه اپوکسی با برخورد به دیواره الیاف شیشه توخالی سبب شکست آن شده است.

ریزساختار مقطع شکست بین لایه ای نمونه کامپوزیتی ترمیم شده حاوی الیاف شیشه پرشده در شکل 11 نشان داده شده است. این نمونهها ابتدا تا کرنش %12 بارگذاری شدند و پس از قرارگیری در دمای 70 درجه سانتی گراد به مدت 48 ساعت، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. مطابق شکل 11، آثار وجود ماده خودترمیم در کامپوزیت مشاهده می شود. با توجه به اینکه فاز موجود در داخل الیاف شیشه توخالی پر شده با عامل خودترمیم کاملا مشابه با فاز ظاهر شده در زمینه کامپوزیت میباشد، میتوان نتیجه گرفت که ماده خودترمیم پس از ترک خوردن جداره الیاف شیشه پرشده، در ریزترکهای بوجود آمده در فاز زمینه جاری شده است. این فرایند میتواند باعث ترمیم و بهبود رفتار کششی کامپوزیت شود[16, 28].



شکل 8 ریزساختار مقطع شکست نمونه شاهد



Fig. 9 Fracture microstructure indicates the HGFs in host laminate

شکل 9 ریزساختار مقطع شکست نمونههای کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه توخالی



Fig.10 Microstructure of interlaminar section for sample containing blank HGFs in the host laminate

شكل 10 ريزساختار مقطع شكست بين لايهاي نمونه كامپوزيتي حاوى الياف شيشه





Fig.12 The comparison between stress-strain values of virgin, blank HGFs, damaged and healed specimens for HGFs angle of 0° شكل 12 مقايسه مقادير تنش-كرنش نمونههاى شاهد، حاوى الياف توخالى (با زاويـه 0 درجه)، حاوى الياف ير شده ترميم شده



Fig.13 The comparison between stress-strain values of virgin, blank HGFs, damaged and healed specimens for HGFs angle of 45° شكل 13 مقايسه مقادير تنش-كرنش براى نمونههاى كامپوزيتى شاهد، حاوى الياف شكل 13 متوايي (با زاويه 45 درجه)، حاوى الياف پرشده آسيب ديده و حاوى الياف پر شده ترميم شده



Fig.14 The comparison between stress-strain values of virgin, blank HGFs, damaged and healed specimens for HGFs angle of 90° شكل 14 مقايسه مقادير تنش-كرنش نمونههاى شاهد، حاوى الياف توخالى (با زاويـه 90 درجه)، حاوى الياف پر شده ترميم شده



Fig.11 a,b) Microstructure of interlaminar section of healed specimen (منه الله و ب) ريزساختار مقاطع شكست بين لايهاى نمونه كامپوزيتى ترميم شده شده

جدول 2 خواص کششی کامپوزیت شیشه-اپوکسی شاهد و نمونه هـای شـامل الیـاف شیشه توخالی و پر شده با زوایای 0، 45 و 90 درجه

Table 2 The tensile properties of virgin sample and glass/epoxy composites containing hollow and filled HGFs with locating angles of 0, 45 and 90 $^{\circ}$

نمونەھاي كامبوزىتى	استحكام كششى	كرنش شكست
	(MPa)	(%)
Virgin	428.5±3.5	2.53±0.04
$\theta = 0^{\circ}$, Blank HGFs	355.3±1.2	1.31 ± 0.10
$\theta = 45^{\circ}$, Blank HGFs	367.2±2.1	1.76 ± 0.09
$\theta = 90^{\circ}$, Blank HGFs	337.6±6.1	1.25 ± 0.16
$\theta = 0^{\circ}$, Filled HGFs, Healed	493.8±6.2	2±0.12
$\theta = 45^{\circ}$, Filled HGFs, Healed	521.4±8.2	2.22 ± 0.11
$\theta = 90^{\circ}$, Filled HGFs, Healed	480.1±4.4	1.99±0.13

2-3- خواص مكانيكى

مقادیر استحکام کششی و کرنش شکست کامپوزیتهای شاهد، حاوی الیاف شیشه توخالی و حاوی الیاف شیشه پرشده با عامل ترمیم با زوایای 0، 45 و 90 درجه در فاصله الیاف 200 میکرومتر از یک دیگر در جـدول 2 آورده شـده است.

در شكل 12 تا 14، نمودارهاى تنش-كرنش براى نمونههاى كامپوزیتى شیشه⊣پوكسى شاهد، حاوى الیاف شیشه توخالى (به ترتیب در راستاى 0، 45 و 90 درجه)، حاوى الیاف شیشه پرشده آسیب دیده (كرنش %1.2) و حاوى الیاف شیشه پر شده ترمیم شده، مقایسه شده است. همانطور كه مشاهده مىشود استحكام كششى نمونه حاوى الیاف شیشه توخالى نسبت به نمونه شاهد كاهش یافته است. استحكام كششى نمونه ترمیم شده در مقایسه با نمونه شاهد و نمونه حاوى الیاف شیشه توخالى افزایش یافته است. این نتیجه بیانگر رخ دادن ترمیم در نمونه كامپوزیتى خودترمیم مى باشد. مقدار بازدهى ترمیم با توجه به راستاى آوند خودترمیم شامل 0، 45 و 90 درجه به ترتیب برابر با %38.98 % 41.99 و 42.21 است.

درصد کاهش استحکام کششی نمونه کامپوزیتی شیشه اپوکسی حاوی الیاف شیشه توخالی با زوایای 0، 45 و 90 درجه در شکل 15 نشان داده شده است. نتایج استحکام کششی نشان داد که وجود الیاف شیشه توخالی 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 می،اشد. وجود الیاف شیشه توخالی در ساختار کامپوزیت همانند حفرههایی عمل کرده و سبب عدم یکپارچگی، تمرکز تنش و کاهش استحکام کششی می شود [28-29]. همانطور که مشاهده می شود کمترین کاهش استحکام مربوط به نمونه کامپوزیتی حاوی الیاف توخالی با زاویه 45 درجه می،اشد. الیاف شیشه توخالی در زاویه 45 درجه در جهت خارج از محور ^۱ بوده و در این حالت مقدار تنش برشی ماکزیمم می،اشد.



Fig.15 Tensile strength reduction versus orientation angle of HGFs شكل 15 كاهش استحكام كششى بر حسب زاويه قرارگيرى الياف شيشه توخالى





3-3- بازدهی ترمیم

در شکل 16 درصد بازیابی استحکام کششی در حضور الیاف شیشه حاوی عامل خودترمیم با زوایای 0، 45 و 90 درجه نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که مقدار بازدهی ترمیم برای زوایای 45 و 90 درجه تا حدود 42% می باشد. طبق جدول 2، بیشینه استحکام کششی (521.4 MPa) در نمونه خودترمیم با زاویه آوند 45 درجه مشاهده شد، بطوریکه این مقدار

22% در مقایسه با استحکام نمونه کامپوزیتی شاهد (428.5MPa) بیشتر است.

4- نتیجهگیری

در این پژوهش به مطالعه تجربی اثر جهتگیری عامل خودترمیم آوندی بر استحکام کششی و بازدهی ترمیم در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه پرداخته شد. الیاف شیشه توخالی با استفاده از یک دستگاه اکسترودر تولید شد. در مرحله بعد، الیاف شیشه توخالی و پرشده با ماده خودترمیم در میان دو لایه کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه قرار داده شد. راستای آوندهای شیشه ای در سه سطح مختلف شامل 0، 45 و 90 درجه در نظر گرفته شد. آسیب در نمونه خودترمیم تحت بار کششی و در کرنش %12 ایجاد شد. نمونههای شاهد، محتوی الیاف شیشه توخالی و ترمیم شده تحت آزمون کشش قرار گرفتند و داد که وجود الیاف شیشه توخالی در داخل ساختار کامپوزیت سبب کاهش داد که وجود الیاف شیشه توخالی در داخل ساختار کامپوزیت سبب کاهش داد که وجود الیاف شیشه توخالی در داخل ساختار کامپوزیت برب کاهش داد که وجود الیاف شیشه توخالی در داخل ساختار کامپوزیت برب کاهش داد که وجود الیاف شیشه توخالی در داخل ساختار کامپوزیت برب کاهش مات درجه به ترتیب %17، %14 و %21 می باشد. نمونه خودترمیم با زاویه آوند درجه دارای بیشینه استحکام کششی و بازدهی ترمیم به ترتیب برابر با درجه دارای بیشینه استحکام کششی و بازدهی ترمیم به ترتیب برابر با داد 2014 MPa

5- مراجع

- Sottos, N. White, S. and Bond, I., "Introduction: Self-Healing Polymers and Composites", Journal of The Royal Society Interface, Vol. 4, pp. 347-353, 2007.
- [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, 2010, Vol. 44, pp. 1-13, 2010.
- [10] Kessler, M. R. and White, S. R., "Self-Activated Healing of Delamination Damage in Woven Composites", Composites Part A, Vol. 32, pp. 683-699, 2001.
- [11] Kessler, M. R. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing Structural Composite Materials", Composites Part A, Vol. 34A, pp. 743–753, 2003.
- [12] Hayes, S.A. Jones, F.R. Marshiya, K. and Zhang, W., "A selfhealing thermosetting composite material", Composites Part A, Vol. 38, pp. 1116–1120, 2007.
- [13] 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.
- [14] 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.

نشریه علوم و فناو*ر*ی **کامید** *ز***ینت**

729

¹ Off-axis

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Coppola, A.M. Thakre, P.R. Sottos, N.R. and White, S.R., "Tensile properties and damage evolution in vascular 3D woven glass/epoxy composites", Composites Part A, Vol. 59, pp. 9-17, 2014.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Nademi, M. Mozaffari, A. and Farrokhabadi, A., "A New Self Healing Method in Composite Laminates Using the HollowGlass", Key Engineering Materials, Vol. 471, pp. 548-551, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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. 5, No. 02, pp. 185-190, 2018.
- [23] 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 Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 399-404, 2018.
- [24] 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.
- [25] Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. Khademoltoliati, 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.
- [26] Saurabh, S. and Deepak, J., "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.
- [27] 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.
- [28] Norris, C. J. Bond, I. P. and Trask, R. S., "Interactions between Propagating Cracks and Bioinspired Self-Healing Vascules Embedded in Glass Fiber Reinforced Composites", Composites Science and Technology, Vol. 71, pp. 847–853, 2011.
- [29] Norris, C. J. Bond, I. P. and Trask, R. S., "Healing of Low-Velocity Impact Damage in Vascularised Composites", Composites Part A, Vol. 44A, pp. 78–85, 2013.