



## اثر نانوذرات زیرکونیای اصلاح شده بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت اپوکسی - الیاف بازالت تحت بارگذاری کششی

حسنا عزیزی<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>

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

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

\* تهران، صندوق پستی 119991-43344، eslami@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 98/07/29

پذیرش: 99/06/22

### کلیدواژگان:

کامپوزیت زمینه پلیمری

الیاف بازالت

نانوزیرکونیا

اصلاح سطحی

خواص مکانیکی

در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانوذرات زیرکونیا بر رفتار کششی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد. در گام نخست، اصلاح سطحی نانوزیرکونیا به وسیله عامل سیلانی (تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین) صورت گرفت و در ادامه، ایجاد گروه‌های عاملی روی سطح نانوزیرکونیا با طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR) تایید شد. نانوزیرکونیای اصلاح سطحی شده در درصدهای مختلف نسبت به زمینه (0، 1، 3 و 5 درصد وزنی) و از طریق روش‌های هم‌زدن مکانیکی و آلتراسونیک در اپوکسی پخش شده و مخلوط‌های حاصله به‌عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت استفاده شدند. رفتار مکانیکی کامپوزیت تحت آزمون کشش بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیش‌ترین میزان بهبود در خواص استحکام و مدول کششی، قابلیت جذب انرژی و کرنش شکست مربوط به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا و به‌ترتیب برابر با مقادیر 76، 85، 32 و 14 درصد بهبود نسبت به نمونه مشابه کامپوزیتی بدون نانوزیرکونیا بوده است. بررسی‌های میکروسکوپی مویذ این واقعیت بودند که افزودن نانوذره زیرکونیا در زمینه اپوکسی باعث بهبود خواص فصل مشترک بین الیاف بازالت و زمینه کامپوزیت شده است.

## The effect of modified zirconia nanoparticles on the mechanical response of basalt fibers- epoxy composite under tensile loading

Hosna Azizi, Reza Eslami-Farsani\*

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

\* 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Polymer matrix composite  
Basalt fibers  
Nanozirconia, Surface modification  
Mechanical properties

### Abstract

In this study, the effects of nanozirconia on the tensile properties of basalt fibers/epoxy composites was investigated. As a first step, the surface of nanozirconia was modified with a silane coupling agent (3-methoxy silil propyl amine). Fourier transform infrared (FT-IR) spectrum confirmed the reaction mechanism between the silane compound and nanozirconia. Modified nanozirconia with various loadings (0, 1, 3 and 5 wt.%) were added to the epoxy resin via mechanical and ultra-sonication routes and resultant mixtures were utilized to fabricate basalt fibers reinforced composites. Mechanical properties of the composites were investigated under tensile test. The results showed that maximum improvement in tensile strength and modulus, fracture energy and failure strain of basalt fibers-epoxy composites at filler loading 3 wt.% of modified nanozirconia were increased by 76, 85, 32 and 14 percent, respectively in comparison of composite without nanozirconia. Microscopic examinations revealed that the development of the mechanical properties of composites with the incorporation of modified nanozirconia was due to improvement in the interfacial properties of epoxy and basalt fibers.

### 1- مقدمه

قیمت مناسب می‌باشد. از این‌رو بطور گسترده‌ای به عنوان زمینه در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی را می‌توان با پرکننده‌های معدنی مثل نانوذرات تقویت کرد [3]. در ادامه به بررسی چندین نمونه از تحقیقات انجام شده در زمینه نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرداخته می‌شود. کامار<sup>1</sup> و همکاران [4]، اثر افزودن نانوذرات زیرکونیا را به عنوان تقویت‌کننده برای نانوکامپوزیت زمینه پلیمری بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزودن نانوزیرکونیا در درصدهای وزنی 0.5، 1.5 و 2، خواص

الیاف بازالت، الیاف معدنی با خواص مکانیکی مناسب، مقاوم به دمای بالا و مقاومت شیمیایی خوب هستند. الیاف بازالت از مدول الاستیک و استحکام کششی بالاتری نسبت به الیاف شیشه و تقریباً نزدیک به الیاف کربن برخوردارند. به علاوه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت پتانسیل مناسبی برای محیط‌های آب نمک، قلیایی و دریایی دارند [2,1]. رزین اپوکسی دارای خواصی نظیر مقاومت شیمیایی خوب، استحکام مکانیکی بالا و

1 Kamar

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Azizi, H, and Eslami-Farsani. R., "The effect of modified zirconia nanoparticles on the mechanical response of basalt fibers- epoxy composite under tensile loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 891-896, 2020.

## 1- روش تحقیق

### 1-1- مواد اولیه

رزین اپوکسی ML-506 به همراه هاردنر HA-11 (شرکت مکرر ایران) با نسبت وزنی رزین به هاردنر 100-15 (با توجه به دستورالعمل تولیدکننده) برای ساخت زمینه پلیمری نانوکامپوزیت استفاده شد. الیاف بازالت با بافت ساتن<sup>7</sup> و دانسیته سطحی 300 گرم بر مترمربع (محصول شرکت بازالتکس<sup>8</sup> بلژیک) نیز به عنوان الیاف تقویت کننده بکار گرفته شد. همچنین نانوذرات زیرکونیا با ابعاد میانگین 50 نانومتر و تقریباً کروی شکل (ساخت شرکت یو اس نانو<sup>9</sup> آمریکا) با خلوص 99.9 درصد به عنوان نانوذره تقویت کننده و عامل سیلانی تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین<sup>10</sup> (ساخت شرکت مرک<sup>11</sup> آلمان) برای اصلاح سطحی نانوذرات استفاده شدند.

### 2-2- اصلاح سطحی نانوذرات زیرکونیا

جهت اصلاح سطحی نانوذرات زیرکونیا، ابتدا نانوذرات به اتانول با غلظت 98 درصد اضافه شدند. در ادامه، عامل سیلانی تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین به آرامی به محلول افزوده شد و توسط دستگاه اولتراسونیک (ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر) توزیع شدند. در ادامه، عملیات سانتریفیوژ (با دستگاه مدل 5702 شرکت اپندورف<sup>12</sup> آلمان) جهت جداسازی نانوذرات زیرکونیا صورت گرفت. در نهایت، برای حذف عامل سیلانی اضافی نیز مخلوط با اتانول مورد شستشو قرار گرفت و در دمای 80 درجه سانتی گراد درون کوره حرارت داده شد [14-16].

### 3-2- ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی

برای بررسی تاثیر نانوذرات زیرکونیا و الیاف بازالت بر خواص کششی نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی، نمونه‌های کامپوزیتی شامل 6 لایه الیاف بازالت (با کسر حجمی 50 درصد نسبت به رزین اپوکسی) و درصد‌های مختلف نانوذرات زیرکونیا (0، 1، 3 و 5 درصد وزنی) با روش لایه‌گذاری دستی آماده شدند. با استفاده از دستگاه همزن مکانیکی<sup>13</sup> (شرکت فاین تک<sup>14</sup>، کره جنوبی)، اختلاط اولیه نانوذرات زیرکونیا و رزین اپوکسی انجام شد. برای رسیدن به توزیع یکنواخت و مطلوب ذرات نانو در زمینه نیز از امواج اولتراسونیک استفاده شد [17].

### 4-2- آزمون کشش محوری

آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM D3039 با سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد [18]. طول، عرض و ضخامت نمونه‌ها در آزمایش کشش به ترتیب 250، 25 و 2.5 میلی‌متر در نظر گرفته شد. جهت اطمینان از نتایج بدست آمده برای هر درصد وزنی از نمونه‌های کامپوزیتی، 5 نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین مقادیر برای هر یک از خاصیت‌های اندازه‌گیری

کششی نانوکامپوزیت بهبود می‌یابد که بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه حاوی 1.5 درصد وزنی نانوزیرکونیا بود. رستمیان و همکاران [5]، به بررسی اثر افزودن نانوذرات زیرکونیا به زمینه پلی کربنات در درصد‌های وزنی 1، 2، 3 و 5 درصد وزنی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با افزودن نانوذرات تا 3 درصد وزنی، استحکام کششی نسبت به نمونه فاقد نانوزیرکونیا به میزان 25 درصد افزایش یافته، اما برای 5 درصد وزنی نانوذرات، کاهش استحکام نسبت به نمونه فاقد نانوزیرکونیا حاصل شده است. آسوپا<sup>1</sup> و همکاران [6]، به بررسی تقویت نانوکامپوزیت با افزودن 5-15 درصد وزنی نانوزیرکونیا به پلیمر پلی متیل متاکریلات<sup>2</sup> با خاصیت ضربه بالا پرداختند و دریافتند که با افزودن 10 درصد وزنی نانوزیرکونیا استحکام زمینه به میزان 32 درصد افزایش می‌یابد. اصلاح شیمیایی مواد تقویت کننده روشی موثر برای افزایش سازگاری فصل مشترک بین تقویت کننده و زمینه است که می‌تواند پیوندهای کووالانت تشکیل دهد. این پیوندها همانند پل منجر به افزایش چسبندگی فصل مشترک شده، بطوری که سبب بهبود انتقال بار بین نانوذرات و زمینه پلیمری می‌شوند [7]. در تحقیقات درند<sup>3</sup> و همکاران [8]، نشان داده شد که اصلاح سطح سرامیک زیرکونیا با اسپری پلاسما، بطور قابل توجهی مقاومت سیمان به سطح سرامیک را افزایش می‌دهد. همچنین دانا<sup>4</sup> و همکارانش [9]، با بررسی زیرکونیا و اصلاح شیمیایی آن با استفاده از سیلان و اسید دریافتند که بدون در نظر گرفتن اصلاح مکانیکی، اصلاح شیمیایی سطح زیرکونیا با سیلان استحکام پیوندهای سیمانی را بهبود بخشیده و سبب بهبود مقاومت برشی نسبت به حالت اصلاح نشده ذرات شدند. زولفلای<sup>5</sup> و همکاران [10]، اثر افزودن نانورس عملیات سطحی شده با سیلان را بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که افزودن 3 درصد وزنی نانورس عملیات سطحی شده، موجب افزایش 13 درصد مدول خمشی و 10 درصد استحکام خمشی در مقایسه با کامپوزیت حاوی نانورس بدون عملیات سطحی می‌شود. همچنین زولفلای و همکارانش [11]، تأثیر نانوذرات کربنات کلسیم (8-2 درصد وزنی) بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با افزودن 8 درصد وزنی نانوکربنات کلسیم، چقرمگی شکست به میزان 36 درصد در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانوکربنات کلسیم، افزایش یافته است. ژنگ<sup>6</sup> و همکارانش [12]، نشان دادند که افزودن 3 درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به اپوکسی باعث افزایش 56 درصدی استحکام ضربه نسبت به اپوکسی خالص می‌شود. اما افزایش بیش از حد نانوذرات سیلیکا به دلیل توزیع غیرهمگن نانوذرات و آگلومره شدن، کاهش استحکام ضربه را به همراه دارد. مطابق با بررسی‌های صورت گرفته، مشخص شد که مهمترین عامل در عملکرد مطلوب نانوذرات، نحوه توزیع و فصل مشترک مناسب آن‌ها درون زمینه پلیمری است. از روش‌های متداول برای دستیابی به توزیع بهتر این نانوذرات، اصلاح سطحی آن‌ها می‌باشد [13]. لذا هدف اصلی این پژوهش، بررسی تجربی تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانوزیرکونیا اصلاح سطحی شده بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت تحت بارگذاری کششی است.

7 Satin Texture  
8 Basaltex  
9 US Nano  
10 3-methoxy silil propyle amine  
11 Merck  
12 Eppendorf  
13 Mechanical Strirrer  
14 Finetech

1 Asupa  
2 Poly Methyl MethAcrylate  
3 Derand  
4 Dana  
5 Zuffli  
6 Zheng

سطح نانوزیرکونیای اصلاح شده اثبات می‌کند [20,7]. پیک‌های مشاهده شده دلالت بر حضور عامل سیلانی و انجام موفقیت آمیز اصلاح سطحی دارند.

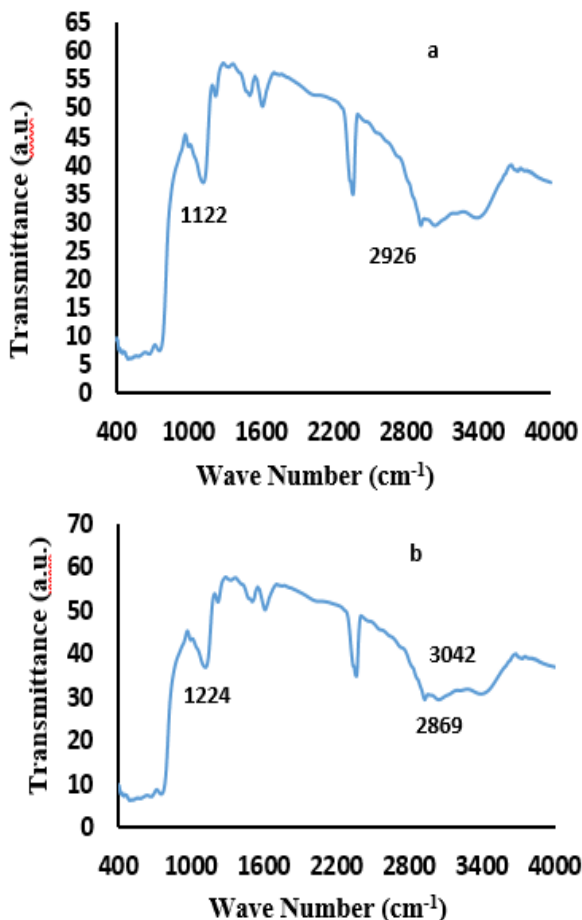


Fig. 2 Results of FT-IR analysis of nanozirconia particles, a) non treated, b) modified with silane agent

شکل 2 نتایج FT-IR نانوذرات زیرکونیا، الف) اصلاح نشده، ب) اصلاح سطحی شده با عامل سیلانی

### 2-3- نتایج آزمون کشش محوری

در جدول 1، خلاصه نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های کامپوزیتی حاوی 0، 1، 3 و 5 درصد وزنی نانوزیرکونیا آورده شده است. شکل 3 نیز اثر افزودن نانوزیرکونیا بر مدول کششی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت را نشان می‌دهد. با افزایش نانوزیرکونیا تا 3 درصد وزنی، مدول کششی نسبت به نمونه فاقد نانوزیرکونیا تا 85 درصد افزایش یافته، اما با افزایش مقادیر بیشتر نانوذرات (5 درصد وزنی)، مدول نسبت به نمونه حاوی 3 درصد نانوذرات کاهش یافته است. افزایش مدول ناشی از بهبود خواص مکانیکی زمینه است که به نوعی در ارتباط با تقویت فصل مشترک بین الیاف بازالت و زمینه اصلاح شده با عامل سیلانی تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین می‌باشد [21]. اصلاح نانوذرات توسط عامل سیلانی باعث افزایش اندرکنش بین زمینه اپوکسی و الیاف شده که منجر به محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری تحت بارگذاری می‌شود. دلیل کاهش مدول ناشی از توزیع نامناسب نانوذرات زیرکونیا درون زمینه پلیمری کامپوزیت و تشکیل آگلومره‌های نانوذرات زیرکونیا در مقادیر بالا بوده که منجر به کاهش کیفیت فصل

شده گزارش شد. در شکل 1، تصویر نمونه کامپوزیتی حین آزمون در دستگاه کشش مشاهده می‌شود.



Fig. 1 Nanocomposite specimen in the tensile test device

شکل 1 نمونه نانوکامپوزیتی در دستگاه آزمون کشش

### 2-5- بررسی ساختاری

برای مشاهده و اثبات حضور گروه‌های عاملی از دستگاه طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز<sup>1</sup> (مدل جسکو<sup>2</sup> plus-460) با محدوده طول موج  $cm^{-1}$  400-4000 استفاده شد. سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پس از آزمون کشش نیز با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>3</sup> مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت (مدل VEGA\\TESCAN-LMU، جمهوری چک).

### 2- نتایج و بحث

#### 1-3- طیف FT-IR

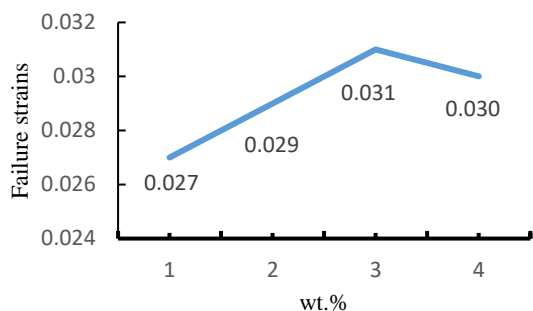
شکل 2، نتایج حاصل از FT-IR را برای نانوزیرکونیا (در دو حالت اصلاح نشده و شده) نشان می‌دهد. برای نانوزیرکونیا اصلاح نشده (شکل 2-الف)، پیک‌های بوجود آمده در طول موج  $cm^{-1}$  1122 و 2926، به ترتیب ناشی از ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل و ارتعاشات کششی پیوند Zr-OH بود. در ارتباط با نانوزیرکونیا اصلاح شده (شکل 2-ب)، پیک‌های ایجاد شده در طول موج  $cm^{-1}$  1224 مربوط به ارتعاشات کششی پیوند Si-O-Zr و پیک‌های  $cm^{-1}$  2869 و 2926 نشان‌دهنده پیوند  $CH_2$  هستند [19]. همچنین پیک به وجود آمده در طول موج  $cm^{-1}$  3042 حضور  $NH_2$  را در

1 Fourier Transform Infrared

2 Jasco

3 Scanning Electron Microscope

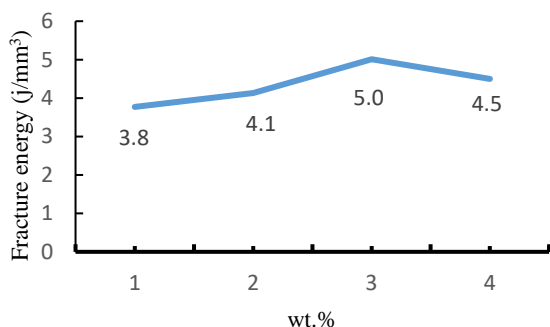
نانوزیرکونیا نسبت به کامپوزیت فاقد نانوزیرکونیا، 14 درصد است. در این حالت، نانوذرات با توزیع مطلوب و یکنواخت درون زمینه به عنوان سدی در برابر رشد ترک عمل می‌کنند و به همین دلیل ترک برای ادامه رشد مجبور به تغییر مسیر می‌شود. اما روند کاهشی برای 5 درصد وزنی نانوزیرکونیا به دلیل توزیع نامطلوب ذرات درون زمینه است که منجر به افزایش تمرکز تنش و کاهش کرنش شکست می‌شوند [24].



**Fig. 5** Effect of adding nanozirconia on tensile strain of basalt fibers-epoxy composites

شکل 5 تأثیر افزودن نانوزیرکونیا بر کرنش شکست کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت

در شکل 6، اثر افزودن نانوزیرکونیا بر انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت نمایش داده شده است. به ازای افزودن 1 درصد وزنی نانوزیرکونیا، انرژی مورد نیاز برای شکست کامپوزیت نسبت به نمونه بدون نانوزیرکونیا به میزان 9 درصد و به ازای افزودن 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا، انرژی شکست کامپوزیت به میزان 32 درصد افزایش را نشان می‌دهد. به ازای افزودن 5 درصد وزنی نانوزیرکونیا، انرژی شکست کامپوزیت نسبت به نمونه حاوی 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا، به میزان 10 درصد افت نموده، اما نسبت به نمونه فاقد نانوزیرکونیا، به میزان 19 درصد بهبود یافته است.



**Fig. 6** Effect of adding nanozirconia on failure energy of basalt fibers-epoxy composites

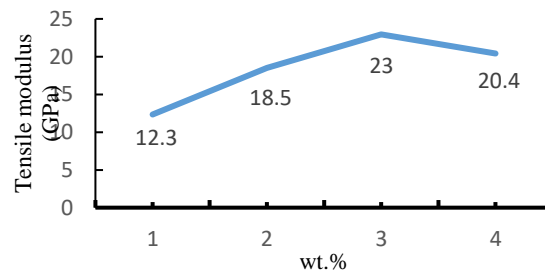
شکل 6 اثر افزودن نانوزیرکونیا بر انرژی شکست کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت

زمینه، ضعیف‌ترین نقطه در کامپوزیت‌های پلیمری محسوب می‌شود. ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری در امتداد زمینه رشد می‌نماید تا هنگامی که به فصل مشترک الیاف و زمینه برسد. اگر پیوند بین زمینه و الیاف قوی نباشد، ترک به راحتی اشاعه پیدا می‌نماید [25]. در اثر افزودن نانوزیرکونیا، فصل مشترک بین زمینه و الیاف بهبود می‌یابد و نانوزیرکونیا به دلیل هندسه کروی از باز شدن دهانه ترک در حال رشد ممانعت می‌کند. بنابراین انرژی بیشتری برای اشاعه ترک نیاز است و در نتیجه میزان جذب انرژی افزایش

مشترک شده و به عنوان محل تمرکز تنش، مکان‌هایی برای جوانه‌زنی ترک به شمار می‌روند.

**جدول 1** نتایج آزمون کشش نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف بازالت-نانوزیرکونیا  
**Table 1** Results of the tensile tests of basalt fibers-ZrO<sub>2</sub> nanoparticles/epoxy composites

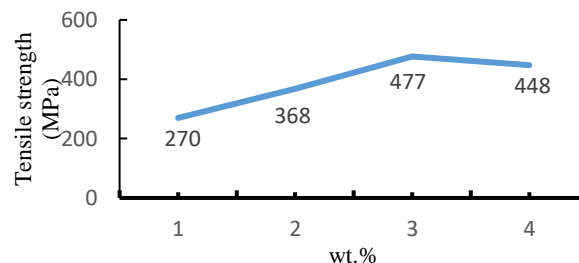
نانوذرات زیر کونیا (درصد وزنی)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	کرنش شکست	انرژی شکست (J/mm <sup>3</sup> )
0	270	12.3	0.027	3.8
1	368	18.5	0.029	4.1
3	477	23	0.031	5.0
5	448	20.4	0.030	4.5



**Fig. 3** Effect of adding nanozirconia on tensile modulus of epoxy-basalt fibers composites

شکل 3 اثر افزودن نانوزیرکونیا بر مدول کششی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت

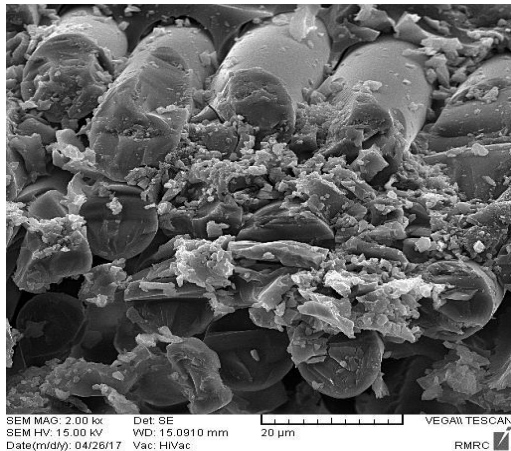
شکل 4، استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف بازالت و نانوذرات زیرکونیا را برای درصدهای وزنی مختلف نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، استحکام کششی تا 3 درصد وزنی نانوذرات افزایش یافته و برای 5 درصد وزنی با کاهش روبرو می‌شود. مقدار افزایش استحکام کششی نانوکامپوزیت حاوی 3 درصد وزنی نسبت به نمونه فاقد نانوزیرکونیا 76 درصد است. دلیل افزایش استحکام در حضور نانوذرات زیرکونیا، بهبود چسبندگی الیاف به زمینه بوده که موجب تقویت فصل مشترک و به طبع سبب انتقال بهتر بار از زمینه به الیاف شده است [22]، اما در مقادیر بیشتر نانوذرات زیرکونیا (5 درصد وزنی)، به دلیل توزیع نامطلوب و کلوخه شدن ذرات، استحکام کاهش یافته است [23].



**Fig. 4** Effect of adding nanozirconia on tensile strength of basalt fibers-epoxy composites.

شکل 4 اثر افزودن نانوزیرکونیا بر استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت شکل 5، کرنش شکست کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف بازالت و نانوزیرکونیا را نشان می‌دهد. با افزایش میزان نانوذرات تا 3 درصد وزنی، روند افزایشی در کرنش شکست مشاهده می‌شود که این مقدار افزایش برای 3 درصد وزنی

حاوی درصدهای پایین‌تر آن است. وجود آگلومرها در زمینه باعث ایجاد نواحی تمرکز تنش شده و ایجاد ترک را تسهیل می‌کنند [29].



**Fig. 9** SEM image of the fracture surface of basalt fibers/epoxy composite containing 5 wt.% nanozirconia

شکل 9 تصویر SEM سطح شکست نمونه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت حاوی 5 درصد وزنی نانوزیرکونیا

### 3- نتیجه‌گیری

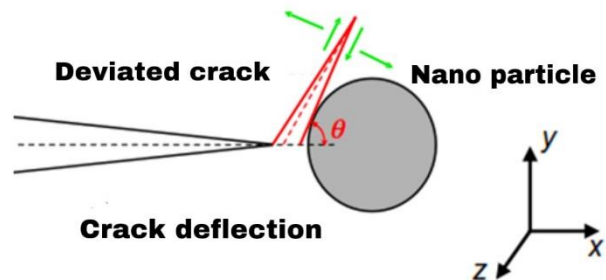
در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت حاوی درصدهای مختلف نانوذرات زیرکونیا (0، 1، 3 و 5 درصد وزنی) تحت بارگذاری کشش مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور برهم‌کنش بهتر نانوذرات زیرکونیا با اپوکسی، اصلاح سطحی آن‌ها توسط ترکیب سیلانی تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین صورت گرفت. مدول و استحکام کششی و همچنین قابلیت جذب انرژی و کرنش شکست به صورت تابعی از درصد وزنی نانوزیرکونیا تعیین شد. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- 1- نتایج FT-IR نشان دادند که اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات زیرکونیا به وسیله ترکیب سیلانی تری متوکسی سیلیل پروپیل آمین به خوبی صورت پذیرفته است.
- 2- خواص کششی، اعم از استحکام، مدول الاستیک، قابلیت جذب انرژی و کرنش شکست کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت با افزودن نانوذرات زیرکونیا بهبود یافت، بطوری‌که بیش‌ترین میزان افزایش در نمونه‌های حاوی 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا مشاهده شد. بهبود استحکام، مدول، قابلیت جذب انرژی و شکست کرنش برای این نمونه، نسبت به نمونه کامپوزیتی فاقد نانوزیرکونیا، به ترتیب 76، 85، 32 و 14 درصد بود.
- 3- برای نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت، در حالت افزودن 5 درصد وزنی نانوذرات زیرکونیا، افت خواص مکانیکی نسبت به نمونه‌های حاوی 3 درصد وزنی نانوذرات مشاهده شد که به دلیل تجمع نانوذرات در این درصد وزنی می‌باشد.

### 4- مراجع

- [1] Kazemi khasrag, E. Siadati, M. H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced

می‌یابد. در شکل 7 مکانیزم پل زنی ترک و انحراف ترک که باعث افزایش جذب انرژی کامپوزیت می‌شود، نمایش داده شده است [26,27].

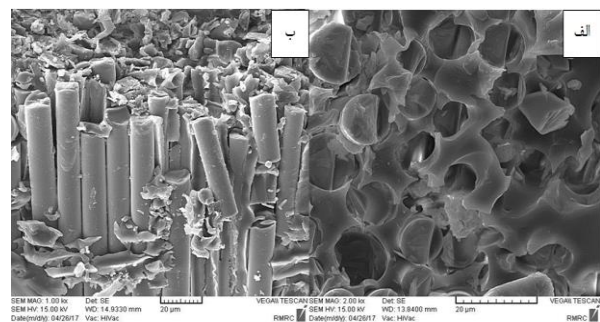


**Fig. 7** Schematic of crack deflection by nanozirconia particles [26].

شکل 7 شماتیکی از انحراف ترک توسط نانوزیرکونیا [26].

### 3-3- بررسی میکروسکوپی

در شکل 8، تصویر SEM سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت با و بدون نانوزیرکونیا آورده شده است. مطابق این شکل، سطح شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت فاقد نانوزیرکونیا (شکل 8-الف)، صاف و هموار بوده که مویید شکست ترد می‌باشد. اما در مقابل، سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت حاوی 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا (در شکل 8-ب)، ناهموار و به صورت لایه لایه است که موییدی بر نقش موثر نانوذرات در اشاعه ترک است. این موضوع، دلیل اصلی برای افزایش میزان جذب انرژی در سازه‌های نانوکامپوزیتی به‌شمار می‌رود [27]. در ارتباط با زمینه اپوکسی، تنش برشی به‌احتی از یک لایه به لایه دیگر انتقال می‌یابد و اختلافی بین لایه‌ها دیده نمی‌شود، اما در حالتی که کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت، به‌وسیله نانوذرات تقویت شده باشد، به‌علت نقش آن‌ها در ارتباط با انحراف مسیر ترک به وسیله نانوذرات زیرکونیا اختلاف لایه‌ها مشهود است [28].



**Fig. 8** SEM images of the fracture surface of basalt fibers/epoxy composite after tensile test, a) without nanozirconia, b) reinforced with 3wt.% nanozirconia

شکل 8 تصویر SEM از سطح شکست کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت پس از آزمون کششی، الف) نمونه فاقد نانوزیرکونیا، ب) تقویت شده با 3 درصد وزنی نانوزیرکونیا شکل 9، سطح شکست زمینه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت حاوی 5 درصد وزنی نانوزیرکونیا را نشان می‌دهد که مویید وجود تجمع نانوذرات در زمینه کامپوزیت است. این مورد عامل اصلی افت برخی از خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی این درصدهای تقویت کننده فاز نانو در مقایسه با نمونه‌های



- [17] Bagheri-Tirtash, A. Montazeri, A. Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A.R., "An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, 2018.
- [18] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3039, 2000.
- [19] Gholamian, F., Lavasani, S., Garshasbi, M., Ansari, M., Ansari, M., Moraveji, A., and Ranjbar, Z., "The effects of water absorption and surface treatment on mechanical properties of epoxy nanocomposite using response surface methodology," Polymer Bulletin, Vol. 70, No. 5, pp. 1677-1695, 2013.
- [20] Luo, K., Zhou, S., Wu, L., and Gu, G., "Dispersion and Functionalization of Nonaqueous Synthesized Zirconia Nanocrystals via Attachment of Silane Coupling Agents," Langmuir, Vol. 24, pp. 11497-11505, 2008.
- [21] Derradi, M., Feng, T., Wang, H., Ramdani, N., Zhang, T., Wang, H., Henniche, A., and Liu, W., "New oligomeric containing aliphatic moiety phthalonitrile resins: their mechanical and thermal properties in presence of silane surface-modified zirconia nanoparticles," Iranian Polymer Journal, Vol. 25, No. 6, pp. 503-514, 2016.
- [22] Eslami Farsani, R., and Shahrabi Farahani, A., "Investigation on the flexural response of multiscale anisogrid composite panels reinforced with carbon fibers and multi-walled carbon nanotubes," Journal of Composite Materials, Vol. 52, No. 2, pp. 225-233, 2018.
- [23] Pak, S., Park, S., Song, Y. S., and Lee, D., "Micromechanical and dynamic mechanical analyses for characterizing improved interfacial strength of maleic anhydride compatibilized basalt fiber/polypropylene composites," Composite Structures, Vol. 193, pp. 73-79, 2018.
- [24] Medina, R., Haupe, F., and Schlarb, A. K., "Improvement of tensile properties and toughness of an epoxy resin by nanozirconium-dioxide reinforcement," Journal of materials science, Vol. 43, No. 9, pp. 3245-3252, 2008.
- [25] Eslami Farsani, R., and Shahrabi Farahani, A., "Investigation on the High-velocity Impact Resistance in Grid Composite Plates Containing Carbon Nanotubes," In Persian, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48, No. 1, pp. 19-26, 2017.
- [26] Khvostenko, D., "Bioactive glass filled resin composites: mechanical properties and resistance to secondary tooth decay," Graduate Thesis, Oregon State University, 2014.
- [27] Quaresimin, M., Schulte, K., Zappalorto, M., and Chandrasekaran, S., "Toughening mechanisms in polymer nanocomposites: From experiments to modelling," Composite Science and Technology, Vol. 123, pp. 187-204, 2016.
- [28] Shariati, M., Farzi, G., and Dadrasi, A., "Mechanical properties and energy absorption capability of thin-walled square columns of silica/ epoxy nanocomposites," Construction and Building Materials, Vol. 78, pp. 362-368, 2015.
- [29] Eslami-Farsani, R., Khalili, S. M. R., and Hedayatnasab, Z., "Influence of thermal conditions on the tensile properties of basalt fiber reinforced polypropylene-clay nanocomposites," Materials and Design, Vol. 53, pp. 540-549, 2014.
- Polymer-Based Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 109-116, 2018.
- [2] Lee, D., "Local anisotropy analysis based on the Mori-Tanaka model for multiphase composites with fiber length and orientation distributions," Composites Part B: Engineering, Vol. 148, pp. 227-234, 2018.
- [3] Lee, J. J., Nam, I., and Kim, H., "Thermal stability and physical properties of epoxy composite reinforced with silane treated basalt fiber," Fibers and Polymers, Vol. 18, No. 1, pp. 140-147, 2017.
- [4] Kumar, R., Upadhyaya, P., and Chand, N., "Effect of chemically modified nano zirconia addition on properties of LLDPE/LDPE/PLA/MA-g-PE bio-nanocomposite blown films for packaging applications," International Journal of Physical Science, Vol. 3, pp. 2319-2326, 2014.
- [5] Rostamiyan, Y. and Ferasat, A. J., "High-speed impact and mechanical strength of ZrO<sub>2</sub>/polycarbonate nanocomposite," International Journal of Damage Mechanics, Vol. 26, No. 7, pp. 986-1002, 2017.
- [6] Asupa, V., Suresh, S., Khandelwal, M., Sharma, V., Asupa, S., and Kaira, L. S., "A comparative evaluation of properties of zirconia reinforced high impact acrylic resin with that of high impact acrylic resin," The Saudi Journal for Dental Research, Vol. 6, pp. 146-151, 2015.
- [7] Shan, S., Chen, X., and Xi, Z., "The effect of nitrile-functionalized nano-aluminum oxide on the thermomechanical properties and toughness of phthalonitrile resin," High Performance Polymers, Vol. 29, No. 1, pp. 113-123, 2017.
- [8] Derand, T., Molin, M., and Kvam, K., "Bond strength of composite luting cement to zirconia ceramic surfaces," Dental Materials, Vol. 21, No.12, pp. 1158-1162, 2005.
- [9] Qeblawi, D. M., Carlos, A. M., De Brewer, J., and Monaco, A. M., "The effect of zirconia surface treatment on flexural strength and shear bond strength to a resin cement," The Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.103, No. 4, pp. 210-220, 2010.
- [10] Zulfli, M., and Chow, W. S., "Mechanical and Thermal Behaviours of Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites Containing Organ Montmorillonite Clay," Malaysian Polymer Journal, Vol. 1, pp. 8-15, 2012.
- [11] Zulfli, N. H. M., Bakar, A. A., and Chow, W. S., "Mechanical and thermal properties improvement of nano calcium carbonate-filled epoxy/glass fiber composite laminates," High Performance Polymers, Vol. 26, No. 2, pp. 223-229, 2014.
- [12] Zheng, Y., Zheng, Y., and Ning, R., "Effects of nanoparticles SiO<sub>2</sub> on the performance of nanocomposite," Materials Letters, Vol. 57, No. 19, pp.2940-2944, 2003.
- [13] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016.
- [14] Salon, M. C., and Belgacem, M., "Hydrolysis-Condensation Kinetics of Different Silane Coupling Agents," Phosphorus Sulfur, and Silicon, Hydrolysis-condensation kinetics of different silane coupling agents, Vol. 186. No. 2, pp. 240-254, 2011.
- [15] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na<sup>+</sup>-montmorillonite nanoclay," Polymer Testing, Vol. 55, p. 135-142, 2016.
- [16] Khosravi, H., and Eslami-Farsani, R., "On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 35, No. 5, pp. 421-434, 2016.