



بررسی انرژی و مدهای شکست نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانولوله های کربنی واقعی

مهديه حامدی^{۱*}، شهربانو حامدی^۲، منصور فتوحیان^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شهربابک، دانشگاه آزاد اسلامی، شهربابک، ایران

۲- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شهربابک، دانشگاه آزاد اسلامی، شهربابک، ایران

* شهربابک، صندوق پستی، mahdiyehamedi@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، اثر نانولوله های کربنی بر انرژی شکست، مدهای اول و دوم نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نانوکامپوزیتی با درصد وزنی ۰/۵ نانولوله کربنی در آزمایشگاه به صورت تجربی ساخته شد و با استفاده از روش اولترامیکروتومی نمونه نانوکامپوزیت را برش داده و آن برای میکروسکوپ الکترونی تراگیسیل (TEM)، آماده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تراگیسیل (TEM)، قطر، طول و انحنا نانولوله های کربنی به دست آورده شد. سپس زمینه ای با ابعاد مشخص در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد و نانولوله های کربنی مانند تصویر واقعی توزیع شد. بار اعمال شده به صورت ترکیبی (محوری- برشی) می باشد و با استفاده روش اجزاء محدود، مود اول و دوم شکست به دست آمد. با استفاده از روش XFEM رشد ترک در نانوکامپوزیت ها بررسی شد. با استفاده از تصاویر SEM و معادلات، انرژی شکست نانوکامپوزیت به دست آورده شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی به زمینه، ضریب شدت تنش افزایش می یابد به علاوه انرژی شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله های کربنی به میزان ۲۹/۶ درصد نسبت به زمینه افزایش داشته است. نتایج به دست آمده را با نتایج عددی و تجربی مقایسه شد تطابق خوبی با یکدیگر داشتند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۲ بهمن ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۲۰ اسفند ۱۳۹۸

کلیدواژگان

انرژی شکست

میکروسکوپ الکترونی تراگیسیل

نانوکامپوزیت

مدهای شکست.

Investigation of energy and fracture modes of nanocomposites reinforced with real carbon nanotubes

Mahdiye hamedi^{1*}, Shahrbanoo hamedi², Mansoor fotohyan³.

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrbabak branch, Islamic Azad University, Shahrbabak, Iran.

2- Shahid bahonar University, Kerman. Iran.

3 Department of Mechanical Engineering, Shahrbabak branch, Islamic Azad University, Shahrbabak, Iran.

* Shahrbabak, Iran, mahdiyehamedi@yahoo.com.

Article Information

Original Research Paper

Received 12 October 2019

Accepted 11 February 2020

Available Online 10 March 2020

Keywords

Fracture energy, Transmission electron microscopy, Nanocomposite, Fracture modes.

ABSTRACT

In this paper, the effect of carbon nanotubes on the fracture energy, first and second modes of nanocomposite is investigated. For this purpose, a nanocomposite with 0.5 wt.% Carbon nanotubes was made experimentally in the laboratory. Using an ultramicrotome technique, cutting the nanocomposite sample and prepared it for transmission electron microscopy (TEM). Then, the diameter, length, and curvature of the carbon nanotubes were determined by transmission electron microscopy (TEM). Then, a matrix with specific dimensional was simulated in the Abacus software, and the carbon nanotubes were distributed like the real image. The applied load is combined (axial-shear) and by using the finite element method, the first and second modes of failure are obtained. The XFEM method investigated the crack growth in nanocomposites. Using SEM images and equations, the nanocomposite fracture energy was obtained. The results showed that by increasing the weight percentage of carbon nanotubes to the matrix, the stress intensity factor increased. Also, the fracture energy of the nanocomposite reinforced with 0.5 weight percent of carbon nanotubes increased by 29.6% compared to the matrix. The results were compared with the numerical and experimental results and were in good agreement with each other.

Please cite this article using:

Mahdiye hamedi, Shahrbanoo hamedi, Mansoor fotohyan, Investigation of energy and fracture modes of nanocomposites reinforced with real carbon nanotubes, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp. 36-43, 2020 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

افزایش خواص مکانیکی پلیمرها، یکی از موضوعاتی است که در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. برای افزایش خواصی همچون نرخ رهایی انرژی کرنشی راهکارهای زیادی پیشنهاد شده است. افزودن نانوذرات، به عنوان یکی از راهکارهای تاثیرگذار در زمینه بهبود خواص شکست پلیمرها مطرح شده است. در این مواد، پلیمر سازنده ی زمینه دارای مدول برشی و استحکام کمتری در مقایسه با الیاف تقویت کننده می باشد [۱]. تسودا و همکاران با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت را تحت بارگذاری کششی قرار داده و میزان بار را مرتب افزایش داده است. در طول بارگذاری ضخامت نانولوله را تغییر داده است و طی این فرآیند برخی از نانولوله ها دچار ترک و برخی دچار شکست شده اند. در ضخامت ۱۰۰ نانومتر و طول ۴۵ میکرومتر بارگذاری ۹۵-۱۱۰ مگاپاسکال شکست کامل اتفاق افتاده است [۲]. صدیقی و همکاران [۳] تاثیر افزودن ذرات نانورس را بر خواص مکانیکی کامپوزیت های با زمینه اپوکسی و تقویت شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند. آنان تاثیر بسزای افزودن ذرات نانورس بر مقادیر چقرمگی شکست اولیه و حالت گسترش ترک این کامپوزیت ها را گزارش کردند بطوریکه در بعضی موارد افزودن نانورس باعث دو برابر شدن چقرمگی شکست بین لایه ای نمونه ها شده است. زانگ و همکاران به بررسی مکانیک شکست مدل ریزمکانیکی پرداختند و سرعت انتشار ترک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می دهد که چقرمگی شکست و زبری سطح به مقدار بارگذاری وابسته است [۴]. یامایوتو کامپوزیت تقویت شده با نانولوله های چند دیواره را مورد بررسی قرار داده است. نانوکامپوزیت را تحت بارگذاری کششی قرار داده و مشاهده کرده که برخی از نانولوله ها دچار ترک، دچار شکست کوتاه شده است. نتایج نشان داده است که می توان با اضافه کردن نانولوله کربنی میزان استحکام بخشی مواد را افزایش داد [۵]. ملیانی و همکاران رفتار شکست نانوکامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانوذرات خاک رس را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از معیار شکست براساس درجه بحرانی و ضریب شدت تنش، چقرمگی شکست را محاسبه نمودند [۶]. لی و همکاران اثر نانولوله های

چند دیواره را بر روی چقرمگی شکست بررسی کرده اند. اثر سطح شیمیایی بین نانولوله و ماتریس را نیز با توجه به روش تیتراسیون بوهم بیان کردند و فاکتورهای k و G را به دست آوردند [۷]. تان و همکاران [۸]. طی تحقیقاتی تاثیر درصد های بالای نانوسیلیکا را بر خواص کششی، برش بین لایه ای و همچنین چقرمگی شکست بین لایه ای موده های اول و دوم برای کامپوزیت های با زمینه اپوکسی و الیاف کربن بررسی نمودند. آن ها در گزارش های خود از بهبود چقرمگی شکست بین لایه ای مود اول به ازای افزایش درصد های نانوسیلیکا خبر دادند اما کاهش چقرمگی شکست بین لایه ای مود دوم را به ازای افزایش درصد های نانوسیلیکا گزارش نمودند. تسای و همکاران نانوذرات سیلیکاتی، لاستیکی و مخلوطی از نانوذرات سیلیکاتی - لاستیکی را با درصد های وزنی مختلف به کامپوزیت شیشه/ اپوکسی اضافه کردند و طی آزمایش هایی که بر روی اپوکسی کامپوزیت و نانوکامپوزیت ها در مود اول شکست انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانوذرات سیلیکاتی، لاستیکی و مخلوطی از نانوذرات سیلیکاتی - لاستیکی به کامپوزیت شیشه/ اپوکسی، میزان چقرمگی شکست بین لایه ای مود اول کامپوزیت، افزایش می یابد. همچنین آن ها گزارش دادند که تاثیر نانوذرات لاستیکی در بالا بردن میزان چقرمگی شکست بین لایه ای مود اول کامپوزیت شیشه/ اپوکسی، نسبت به نانوذرات سیلیکاتی و مخلوطی از سیلیکاتی - لاستیکی، بیش تر می باشد [۹]. بشر و همکاران نانوذرات رسی را به کامپوزیت بازالت/ اپوکسی اضافه کردند و مقدار انرژی شکست بین لایه ای مود اول را در درصد های حجمی مختلف الیاف اندازه گیری و مقایسه کردند و آن ها طی آزمایش ها به این نتیجه رسیدند که کاهش درصد حجمی الیاف باعث بالا رفتن انرژی شکست بین لایه ای مود اول می شود [۱۰]. اسکیزبیک و همکاران نانولوله های کربن را به رزین به صورت مستقیم و هم به الیاف و رزین کامپوزیت شیشه/ اپوکسی به کمک روش های شیمیایی اضافه کردند و طی آزمایش هایی مقدار انرژی شکست بین لایه ای مود اول را اندازه گیری و چگونگی تغییر در مقاومت بین لایه ای مود اول را بررسی کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانولوله های کربنی، انرژی شکست بین لایه ای مود اول افزایش

۲- آنالیز

قسمت آنالیز به دو بخش تقسیم می شود: ۱- روش ساخت نانوکامپوزیت در آزمایشگاه و تصویربرداری ۲- شبیه سازی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی که در ادامه به توضیح هر کدام پرداخته شده است.

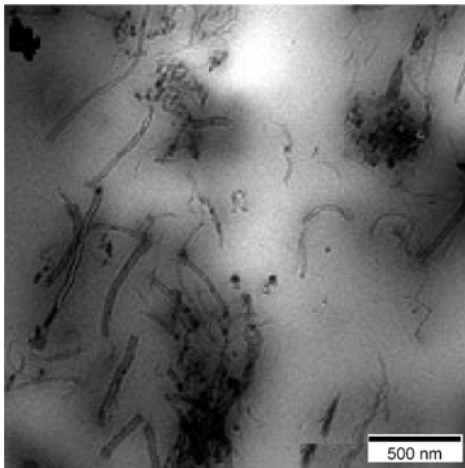
۲-۱ آنالیز تجربی

ابتدا ۱۰ گرم از رزین اپوکسی جزء یک را با ۰/۰۵ گرم نانولوله کربنی مخلوط نموده و به مدت پنج دقیقه با همزن مخلوط نموده تا باهم کاملاً مخلوط شود. سپس ماده به دست آمده را درون التراسونیک به مدت سی تا چهل دقیقه قرار داده و دمای آن را در حدود ۴۰ درجه سلسیوس تنظیم کرده تا اینکه نانولوله ها به طور یکنواخت در جزء یک پخش گردند. سپس نمونه را از التراسونیک بیرون آورده و رزین جزء دو (که مقدار آن ۱۳ / ۰ درصد جزء یک می باشد) را به آن اضافه نموده و به مدت پنج دقیقه آن را به هم زده تا کاملاً مخلوط شود. به دلیل افزایش دمای رزین اپوکسی حین فرآیند التراسونیک، از حمام آب و یخ برای پایین نگهداشتن دمای محلول استفاده شد، و پس از هر ۱۰ دقیقه فرآیند التراسونیک، ۳ دقیقه استراحت به محلول داده شد. لازم به ذکر است که دستگاه حمام مافوق صوت دارای توان و دامنه مشخص و ثابتی می باشد، به همین منظور، تنها پارامتر زمان در اینجا حائز اهمیت می باشد. زمان بهینه برای فرآیند التراسونیک براساس تجربیات به دست آمده برای زمان های مختلف به دست آمد. در مرحله ی بعد، محلول جهت حبابزدایی به مدت ۱۵ دقیقه تحت خلاء قرار گرفت. سپس جزء سخت کننده اضافه گردید، و محلول به مدت ۵ دقیقه به آرامی هم زده شد. مجدداً محلول برای مدت ۱۰ دقیقه تحت خلاء قرار گرفت. در نهایت محلول در قالب های نمونه استاندارد ریخته شد، و فرآیند پخت به مدت ۳ ساعت در دمای ۸۵ درجه سلسیوس و پس از آن ۱ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس تحت فرآیند بازپخت انجام گردید. حال که نمونه نانوکامپوزیت ساخته شد، باید برای عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی تراگسیل آماده شود که در ادامه مراحل این کار توضیح داده خواهد شد. با توجه به این که نمونه ایجاد شده باید برای تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی تراگسیل (TEM) مناسب باشد و

می یابد و با افزودن نانولوله های کربنی به سطح الیاف، بهبود قابل توجهی در مقدار مقاومت بین لایه ای مود اول به دست می آید [۱۱]. شادلو و همکاران شکست نانوکامپوزیت های زمینه اپوکسی را در سه حالت مختلف تقویت کننده (نانوالماس، نانوذرات کروی و نانوالیاف کربن) مورد بررسی قرار دادند. در این حالت ۳۶ حالت شکستگی را مورد آزمایش قرار داده و مناسب ترین حالت را که چقرمگی شکست بالایی دارد را انتخاب نموده است [۱۲]. خامنه و همکاران به بررسی رفتار شکست مود مرکب الاستیک- پیوسته ماده پلیمری براساس پارامتر کلیدی و بسیار مهم انتگرال J پرداخته شده و با استفاده از گیره اصلاح شده آرکان، رفتار شکست این ماده در سه زاویه متفاوت بارگذاری به ترتیب در مود کششی خالص، مود مرکب درون صفحه ای و مود برشی خالص مورد بررسی قرار گرفته است، این کار با دو روش آزمایشگاهی انتگرال J به نام های روش چند نمونه ای و روش نرمالیزیشن انجام شد [۱۳]. واگنر و همکاران چقرمگی نانوکامپوزیت پلیمری با استفاده از مدل کیلی تاپسون. در اینجا طول بحرانی نانولوله به دست آمده و سپس اثر ابعاد نانولوله بر انرژی مورد نیاز برای بیرون آمدن نانولوله از کامپوزیت محاسبه و در ابعاد نانو و میکرو با هم مقایسه شد [۱۴]. دای و همکاران خستگی و شکست کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با نانو صفحه های چند مقیاسی را مورد بررسی قرار دادند. در اینجا مدل ماکرو و میکرو به صورت چند مقیاسی و با استفاده از نرم افزار مدل سازی شد [۱۵]. میلکه اثر هر یک از عیوب را بر خواص شکست نانولوله کربنی بررسی کرده است. طبق نتایج بهدست آمده عیوب جای خالی بین ۱۴ تا ۲۶ درصد استحکام شکست را کاهش میدهد اما اثر عیب استون - والس بر استحکام شکست کمتر است [۱۶]. برخی تحقیقات نشان داده اند که عیب استون- والس ممکن است در اثر اعمال نیروی مکانیکی در حین بارگذاری در نانولوله کربنی ایجاد شود [۱۷]. این پدیده در رفتار پلاستیک نانولوله بیشتر مشاهده می شود. لیو و همکارانش با شبیه سازی اتمی نشان داده اند که عیب استون- والس در کرنش ۲۰ تا ۲۵ درصد در نانولوله چند جداره ایجاد می شود. در این حالت کرنش شکست نانولوله ۲۶ درصد گزارش شده است.



شکل ۱ نحوه قرارگیری نمونه برش داده شده در میکروسکوپ الکترونی تراگسیل

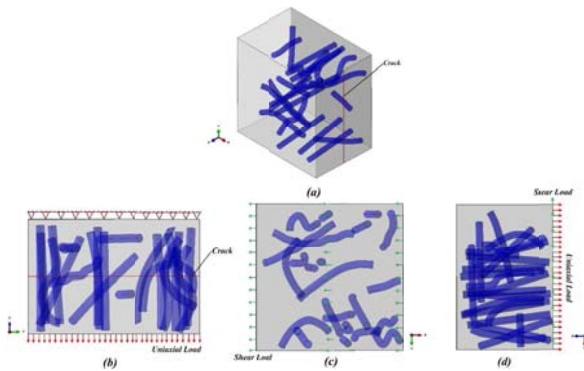


شکل ۲ تصویر واقعی نانولوله های کربنی

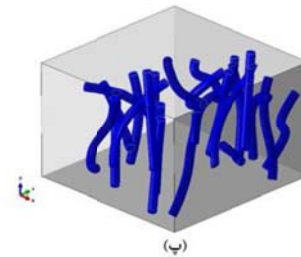
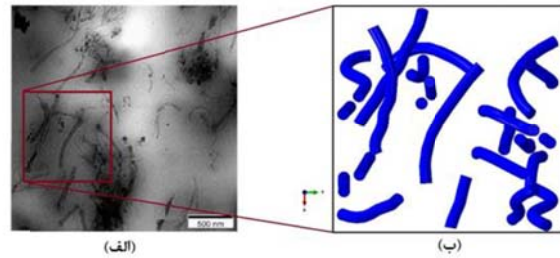
۲-۲- شبیه سازی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی

در این قسمت نحوه شبیه سازی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی انجام شده است. ابتدا با استفاده از تصویر به دست آمده در شکل (۲)، طول، قطر و انحنای نانولوله های کربنی به دست آمد که به ترتیب ۳۴۰، ۲۶ نانومتر و انحنای متفاوتی می باشد. سپس زمینه ای با ابعاد $600 \times 600 \times 400$ شبیه سازی و نانولوله های کربنی را به صورت واقعی همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، توزیع شد. روند شبیه سازی در شکل (۳) نشان داده شده است.

میکروسکوپ های الکترونی تراگسیل با دریافت سیگنال های حاصل از برخورد پرتوی الکترونی به نمونه و عبور آن، داده های قابل استنادی فراهم می سازند. این دستگاه ها ابزارهایی مناسب جهت شناسایی ساختار مواد بلورین و مطالعات ریزساختاری تفصیلی مواد هستند که قادر به ارائه بزرگنمایی زیاد و دارای قدرت تفکیک پذیری بالایی هستند. این امر باعث به کارگیری این دستگاه ها در تحقیقات پیشرفته کانی شناسی، بلورشناسی، علم مواد شده است. عبور الکترون از نمونه باعث آشکارسازی اطلاعات داخلی و ساختاری نمونه می شود از اینرو نیاز است نمونه های بسیار نازک از نمونه ی اصلی برش داده شود. در این راستا نمونه استاندارد در مطالعه و بررسی توسط میکروسکوپ های الکترونی تراگسیل باید داری شرایط زیر باشد: ۱- نمونه تحت آنالیز، مبین کل ماده مورد نظر باشد. ۲- پایداری نمونه باید در مدت آزمایش حفظ شود. ۳- ضخامت نمونه باید به قدری باشد که الکترون از آن عبور کند. ۴- عدم ایجاد تغییرات در مدت آماده سازی نمونه. فراهم آوردن تمامی شرایط، دشوار و به ندرت قابل انجام است با این وجود باید تا حد امکان دقت در امر آماده سازی نمونه لحاظ شود. یکی از قابلیت های روش ها و تکنیک های جدید، آماده سازی مجدد نمونه پس از پردازش توسط دستگاه است. تهیه لایه و فیلم های بسیار نازک توسط روش اولترامیکروتومی انجام شد، که روشی استاندارد در تهیه نمونه های بسیار نازک در بیولوژی و همچنین بسیار مفید در آماده سازی نمونه ها برای میکروسکوپ های الکترونی تراگسیل است. در این روش برشهای کمتر از 1×1 میلیمتری با چاقوی الماسه انجام شد. سپس برش ها را در یک مایع جمع آوری کرده و پیش از به کارگیری در دستگاه بر یک شبکه قرار می دهند. در این مقاله نیز از همین روش استفاده شده و نمونه با ابعاد کمتر از 1×1 میلیمتری با چاقوی الماسه برش داده شده که قابل استفاده برای تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی تراگسیل (TEM) باشد. قسمتی از نمونه که مطابق روش اولترامیکروتومی با ابعاد کوچک برش داده شده است، روی شبکه میکروسکوپ الکترونی تراگسیل قرار داده و تصویربرداری انجام شد. نمونه برش داده شده و تصاویر به دست آمده به ترتیب در شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۵ نحوه اعمال بار ترکیبی (محوری- برشی) به نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی



شکل ۳ روند شبیه سازی نانولوله های کربنی و نانوکامپوزیت

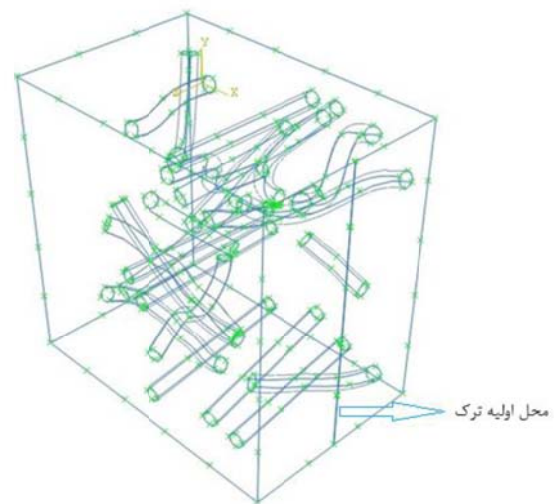
برای به دست آوردن انرژی شکست و مدهای شکست، ترکی به طول ۱ نانومتر همانطور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، ایجاد شد. نحوه اعمال بار به صورت ترکیبی (محوری- برشی) در نظر گرفته شد. که در شکل (۵) به صورت واضح و جداگانه نشان داده شده است.

۳- انرژی شکست

انرژی شکست نانوکامپوزیت حاصل از انرژی نانولوله های بیرون آمده، حفره های ایجاد شده در سطح نانوکامپوزیت و انرژی حاصل از سطح تماس بین نانولوله ها و زمینه می باشد. در ادامه نحوه به دست آوردن انرژی شکست هر کدام به صورت جداگانه توضیح داده شده است. مقدار انرژی شکست ناشی از بیرون آمدن نانولوله های کربنی به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\Delta G_{pull-out} = \frac{V_{fpo} l_e^2 \tau_i}{3r_f} \quad (1)$$

در شکل (۶) نانولوله هایی که در طی فرآیند رشد ترک، از زمینه بدون شکسته شدن بیرون آمده اند نشان داده شده است. در طی فرآیند بیرون آمدن از زمینه مقداری انرژی نیاز دارد که در این جا مطابق با فرمول (۱) به دست آمده است که در آن V_{fpo} درصد حجمی نانولوله های کربنی بیرون آمده، l_e طول موثر نانولوله های کربنی بیرون آمده، τ_i تنش برشی سطح تماس زمینه و نانولوله های کربنی و r_f شعاع نانولوله های کربنی می باشد



شکل ۴ محل قرارگیری ترک

مقداری انرژی حاصل از رشد فضای خالی:

$$\Delta G_v = \left(1 - \frac{\mu_m^2}{3}\right) (V_{fv} - V_{fp}) \sigma_{yc} r_{yu} K_{vm}^2 \quad (2)$$

V_{fv} : درصد حجمی فضای خالی و V_{fp} : درصد حجمی نانولوله کربنی و

$$r_{yu} = \frac{1}{6\pi} \frac{E_m G_{CU}}{(1-\nu^2) \sigma_y^2} \quad (3)$$

علاوه بر نانولوله های بیرون آمده و فضاهای خالی، سطح تماس بین نانولوله و زمینه نیز مقداری از انرژی را به خود اختصاص می دهد که با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است.

مقدار انرژی حاصل از سطح تماس:

$$\Delta G_{db} = \frac{V_{fdb} l_f G_i}{D_f} \quad (4)$$

V_{fdb} : درصد حجمی نانولوله های کربنی که به عنوان سطح تماس می باشد. در نهایت انرژی شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی برابر است با مجموع انرژی های حاصل از زمینه بدون نانولوله های کربنی در این مقاله مقدار انرژی شکست ماتریس برابر ۱۳۳ ژول بر متر مربع می باشد، نانولوله های بیرون آمده، فضای خالی و سطح تماس می باشد که در فرمول (۵) نشان داده شده است، قابل محاسبه می باشد.

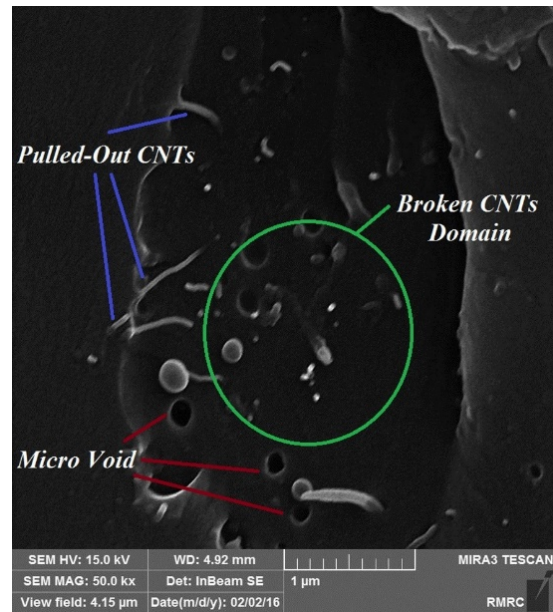
$$G_c = G_c + \Delta G_{pull-out} + \Delta G_v + \Delta G_{db} \quad (5)$$

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از هر کدام از قسمت های پیشین که شرح داده شد، به طور جداگانه مورد تحلیل و بحث قرار می گیرد. که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

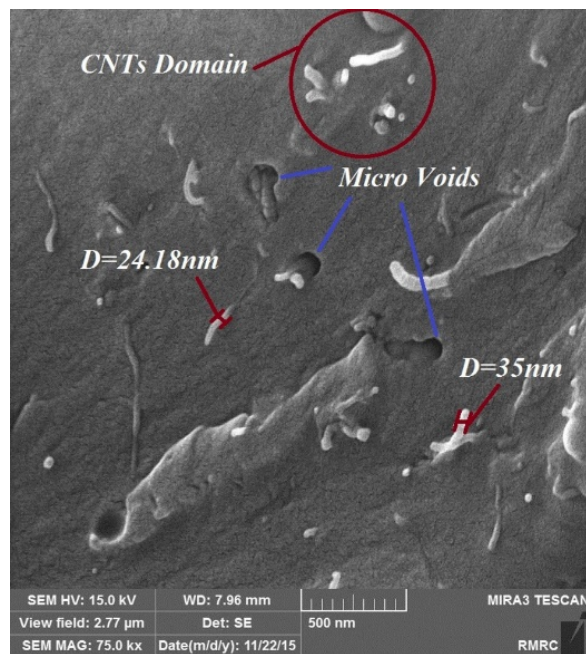
۴-۱- نتایج شبیه سازی نانوکامپوزیت به شکل واقعی

در این بخش قصد داشته مدل دقیق تری از نانوکامپوزیت ساخته و تحلیل واقعی تری ارائه شود. جهت دستیابی به این هدف از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی

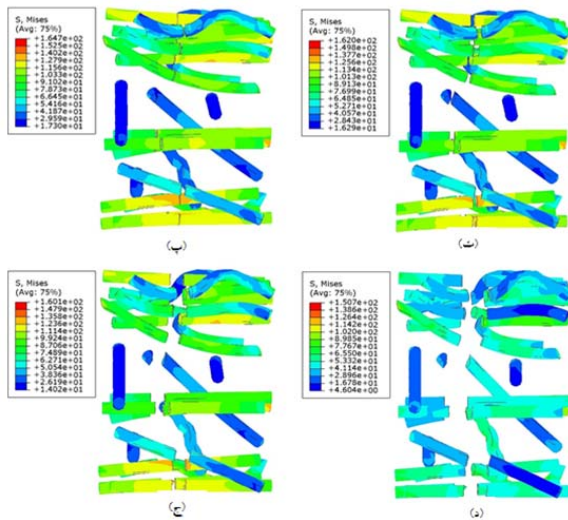


شکل ۶ تصویر SEM نشان دهنده بیرون آمدن نانولوله های کربنی

علاوه بر نانولوله های بیرون آمده، فضاهای خالی ایجاد شده مقداری از انرژی را به خود اختصاص می دهد که در شکل (۷) حفره ها نشان داده شده است. مقدار این انرژی با توجه به فرمول (۲) قابل محاسبه می شود.

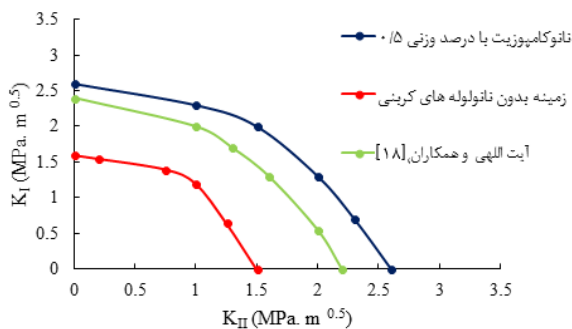


شکل ۷ تصویر SEM نشان دهنده فضاهای خالی ایجاد شده در نانوکامپوزیت



شکل ۹ روند شکست نانولوله های کربنی

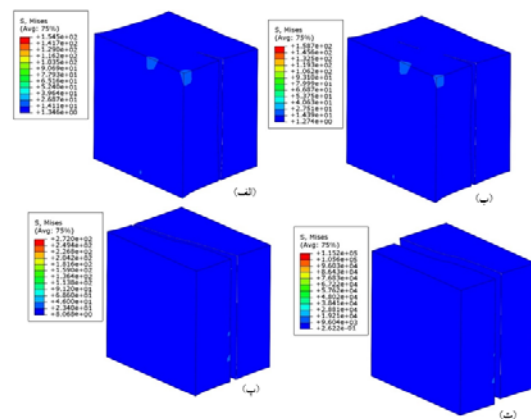
پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفت، چقرمگی شکست نانوکامپوزیت با کسر وزنی ۰/۵ می باشد. نمودار مود اول شکست نسبت به مود دوم در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با اضافه شدن نانولوله کربنی میزان چقرمگی شکست نسبت به چقرمگی شکست رزین خالص ۳۵ درصد افزایش می یابد. با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آیت اللهی و همکاران [۱۸]، درصد تفاوت ۵ می باشد. این مشاهدات دلالت دارد بر این که نتایج تطابق خوبی دارد.



شکل ۱۰ تغییرات مود اول نسبت به مود دوم شکست زمینه و نانوکامپوزیت

۲-۴- نتایج انرژی شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی به شکل واقعی همانطور که در بخش قبل بیان شد، با استفاده از تصاویر و

تراکسیل، نحوه توزیع و ابعاد واقعی نانولوله های کربنی به دست آمد و نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی به شکل واقعی تر شبیه سازی شد. مسیر رشد ترک و چقرمگی شکست برای نانوکامپوزیت به دست آورده شد. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود ترک به آهستگی پیش می رود و در برخورد با نانولوله های کربنی پل می زند یعنی به عبارتی نانولوله را دور می زند و دوباره برمی گردد مسیر خود را ادامه می دهد که این پدیده ها را در شکل (۸) قسمت های (پ) و (ت) می توان مشاهده کرد. در شکل (۹) نانولوله هایی که با رشد ترک دچار شکست شده اند به صورت مرحله به مرحله نشان داده شده است.



شکل ۸ مسیر رشد ترک در نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های

کربنی

وزنی ۰/۵ نانولوله کربنی ساخته شد و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی *TEM* و *SEM* تصاویری از نانوکامپوزیت و سطح شکست آن گرفته شد. سپس نانوکامپوزیت به شکل واقعی را شبیه سازی نموده و نتایج به دست آورده شد. که در ادامه به جمع بندی نتایج پرداخته خواهد شد.

(۱) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تراگسیل، می توان توزیع و ابعاد به شکل واقعی نانولوله های کربنی را مشاهده کرد و با نرم افزار شبیه سازی نمود. با استفاده از تصاویر به دست آمده می توان مدل واقعی تر نانوکامپوزیت را شبیه سازی نمود.

(۲) ترک به دو صورت با نانولوله های کربنی برخورد می نماید ۱- برخورد عمودی، در این صورت ترک نانولوله کربنی را دور می زد و سپس مسیر خود را ادامه می دهد. ۲- برخورد مورب، در این صورت نانولوله کربنی را بریده و مسیر خود را ادامه می دهد. بررسی ها نشان می دهد زمانی که نانولوله های کربنی عمود بر ترک قرار می گیرند، قادرند تا با پل زنی در مسیر ترک، سرعت رشد ترک را کاهش می دهند. نانولوله های کربنی علاوه بر تقویت نانوکامپوزیت ها، خواص لایه ای و خارج از صفحه آن ها را نیز بهبود می دهند.

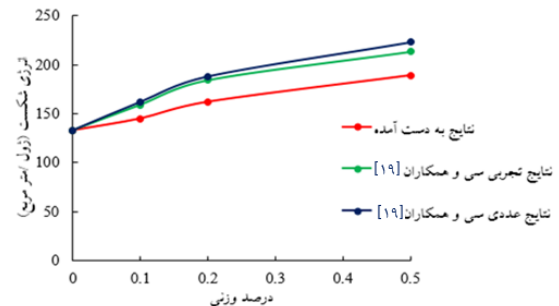
(۳) با اضافه کردن نانولوله های کربنی، انرژی شکست نانوکامپوزیت افزایش می یابد. زیرا انرژی شکست شامل انرژی شکست نانولوله های کربنی بیرون شده، سطح تماس بین نانولوله های کربنی و زمینه، حفره ها و فضای خالی می باشد. در این پایان نامه انرژی شکست زمینه ۱۳۳ ژول بر متر مربع و برای نانوکامپوزیت ۱۸۹ ژول بر متر مربع می باشد. انرژی شکست به مقدار ۲۹/۶ درصد افزایش یافته است.

(۴) با اضافه کردن نانولوله های کربنی به زمینه، مقدار چقرمگی شکست ۵۷ درصد افزایش می یابد.

(۵) انرژی شکست حاصل از نانولوله های بیرون آمده، حفره های موجود در نانوکامپوزیت و سطح بین نانولوله های کربنی و زمینه می باشد.

۶- منابع

معادلات ذکر شده انرژی شکست زمینه تقویت شده با نانولوله های کربنی به دست آورده شد و نتایج حاصل با زمینه مقایسه شد. همچنین برای وضوح بیشتر، نمودار اثر درصد وزنی نانولوله های کربنی بر انرژی شکست در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در شکل مشخص است که با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی، مقدار انرژی شکست افزایش می یابد.



شکل ۱۱ تاثیر نانولوله های کربنی بر انرژی شکست نانوکامپوزیت

نتایج حاصل را با نتایج تجربی و عددی سی و همکاران [۱۹] مقایسه شد که در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که در جدول دیده می شود، انرژی شکست نانوکامپوزیت نسبت به زمینه اپوکسی خاص افزایش یافته است و به میزان ۲۹/۶ درصد انرژی شکست بهبود یافته است.

جدول (۱): تاثیر نانولوله های کربنی بر انرژی شکست

درصد تفاوت نتایج تجربی و نتایج عددی	نتایج تجربی سی و همکاران [۱۹]	نتایج عددی سی و همکاران [۱۹]	نتایج به دست آمده	درصد
۰	۱۳۳	۱۳۳	۱۳۳	۰
۱۰/۵	۱۵۹	۱۶۲	۱۴۵	۰/۱
۲۴	۱۸۴	۲۱۳	۱۶۲	۰/۲
۱۵/۲۵	۲۱۳	۲۲۳	۱۸۹	۰/۵

مقاله

انجام گرفته به منظور تعیین پارامترهای شکست و مسیر رشد ترک در نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی واقعی می باشد. برای رسیدن به این هدف، نانوکامپوزیتی با درصد

- Secondary Nanoplatelet Reinforcement: 3D Computational Analysis, *Composites Science and Technology*, Vol. 91, pp.71-81, 2014.
- [16] C. Li, T. W. Chou, Modeling of elastic buckling of carbon nanotubes by molecular structural mechanics approach, *Mechanics of Materials*, Vol. 36, No. 11, pp. 1047-1055, 2004.
- [17] M. Ouyang, J. Huang, C. L. Cheung, C. M. Lieber, Atomically resolved single-walled carbon nanotube intramolecular junctions, *Science*, Vol. 291, No. 5501, pp. 97-100, 2001.
- [18] M. R. Ayatollahi, S. Shadlou, M. M. Shokrieh, Mixed Mode Brittle Fracture in Epoxy/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, pp. 2620-2632, 2011.
- [19] T. H. Hsieh, A. J. Kinloch, A. C. Taylor, I. A. Kinloch, The effect of carbon nanotubes on the fracture toughness and fatigue performance of a thermosetting epoxy polymer, *Journal of Materials and Science*, Vol. 46, pp. 7525-7535, 2011.
- [1] M. Shokrieh, A. Zeinedini, Effect of CNTs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites, *Materials & Design*, Vol. 101, pp. 56 - 65, 2016.
- [2] T. Tsuda, T. Ogasawara, S. Y. Moon, K. N. Nobuo-Takeda Shimamura, Y. Inoue, Nanoscopic Observations for Evaluating the Failure Process of Aligned Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites, *Composite*, Vol. 8, No. 34, pp. 120 - 128, 2013.
- [3] N. A. Siddiqui, R. S. Woo, J. K. Kim, C. C. Leung, A. Munir, Mode I Inter Laminar Fracture Behavior and Mechanical Properties of CFRPs with Nano Clay-filled Epoxy Matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 2, pp. 449-460, 2007.
- [4] Q. B. Zhang, J. Zhao, Effect of Loading Rate on Fracture Toughness and Failure Micro Mechanisms in Marble, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 40, No. 3, pp. 288-309, 2013.
- [5] G. Yamamoto, K. Shirasu, T. Hashida, T. Takagi, J. Won, J. A. Suk, D. P. Richard, S. R. Rodney, Nanotube Fracture During the Failure of Carbon Nanotube/Alumina Composites, *Composite*, pp. 304-315, 2011.
- [6] M. H. Meliani, Z. Azari, M. A. Qadhi, N. Merah, G. Pluinage, A Two-Parameter Approach to Assessing Notch Fracture Behavior in Clay/Epoxy Nanocomposites, *Composites Part B*, Vol. 80, pp.126-133, 2015.
- [7] S. O. Lee, S. H. Choi, S. H. Kwon, K. Y. Rhee, S. J. Park, Modification of Surface Functionality of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Fracture Toughness of Basalt Fiber-Reinforced Composites, *Composites Part B*, Vol. 79, pp. 47-52, 2015.
- [8] Y. Tang, L. Ye, D. Zhang, S. Deng, Characterization of Transverse Tensile, Interlaminar Shear and Interlaminar Fracture in CF/EP Laminates with 10wt% and 20wt% Silica Nanoparticles in Matrix Resins, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 12, pp. 1943-1950, 2011.
- [9] J. L. Tsai, B. H. Huang, Y. L. Cheng, Enhancing Fracture Toughness of Glass/Epoxy Composites for Wind Blades Using Silica Nanoparticles and Rubber Particles, *Procedia Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 1982-1987, 2011.
- [10] M. T. Bashar, U. Sundararaj, P. Mertiny, Mode I Interlaminar Fracture Behaviour of Nanoparticle Modified Epoxy/Basalt Fibre Reinforced Laminates, *Polymer Testing Roger Brown*, Vol. 32, No. 2, pp. 402-412, 2011.
- [11] V. Eskizeybek, A. Avci, and A. Gulce, The Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Chemically Carbon Nanotube Grafted Glass Fabric/Epoxy Multiscale Composite Structures, *Composites: Part A*, Vol. 63, No. 9, pp. 94-102, 2013.
- [12] S. Shadlou, E. Alishahi, M. R. Ayatollahi, Fracture Behavior of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Different Carbon Nano-Reinforcements, *Composite Structures*, Vol. 95, pp. 577-581, 2013.
- [13] M. S. Khamneh, N. Choupani, Investigation on Mixed Mode Elastic-Plastic Fracture Behavior of ABS Polymeric Material, Vol. 15, No. 4, pp. 272-280, 2015. (in Persian).
- [14] H. D. Wagner, P.M. Ajayan, K. Schulte, Nanocomposite Toughness from a Pull-out Mechanism, *Composites Science and Technology*, Vol. 83, pp. 27-31, 2013.
- [15] G. Dai, L. M. Jr, Fatigue of Multi-Scale Composites with