



## بررسی تجربی تاثیر نانوسیلیکا بر مود دوم چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه

حسین موحدی آلنی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، محمدحسین پل<sup>3</sup>، علی افروزیان<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* تهران، صندوق پستی 141-14115، ghlia530@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 آذر 1393

پذیرش: 09 دی 1393

ارائه در سایت: 19 بهمن 1393

کلید واژگان:

تورق

شکست بین لایه‌ای

چقرمگی شکست

نانوسیلیکا

در این مقاله، تاثیر افزودن نانوذرات سیلیکا بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود دو مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. نانو مواد مرکب با زمینه اپوکسی و با 18 لایه الیاف شیشه بافته شده با کسر حجمی الیاف 40 درصد و به روش لایه چینی دستی تولید شده است. نانورزین اپوکسی انتخاب شده از دو بخش، یک دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع A (DGEBA) با نام تجاری ایپون 828 به عنوان پایه اپوکسی و یک پلی اکسیپروپیلن دیامین با نام تجاری جفامین دی 400 به عنوان سخت کننده، تشکیل شده است. برای بررسی تاثیر نانوذرات بر مود دوم شکست بین لایه‌ای نانوکامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی با چهار درصد وزنی مختلف صفر، 0/5 و 1 و 3 درصد نانوسیلیکا ساخته شدند. همچنین نمونه‌هایی با 1% وزنی نانوسیلیکا و با درصد حجمی الیاف 55% جهت بررسی تاثیر نسبت حجمی الیاف روی نتایج ساخته شدند. از روش نمونه خمشی با شکاف انتهایی (ENF) برای اندازه‌گیری مقاومت بین لایه‌ای نمونه‌ها استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که به ازای افزودن درصد‌های وزنی بالای نانوسیلیکا در نمونه‌های نانوکامپوزیتی تغییر چندانی در چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود دو ایجاد نمی‌شود. این در حالی است که به‌ازای افزودن 0/5 درصد نانوسیلیکا در ماتریس نمونه‌ها، چقرمگی شکست بین لایه‌ای تا 36% نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی خالص بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج، به ازای کاهش نسبت حجمی الیاف چقرمگی شکست نمونه‌ها بیشتر می‌شود.

## An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates

Hossein Movahhedi Aleni<sup>1</sup>, Gholam Hossein Liaghat<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Pol<sup>2</sup>, Ali Afrouzian<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

\*P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 December 2014  
Accepted 30 December 2014  
Available Online 08 February 2015

**Keywords:**  
Delamination  
Interlaminar fracture  
Fracture toughness  
Nano-silica

### ABSTRACT

In this research, effect of adding silica nano-particles on the mode II interlaminar fracture toughness of epoxy matrix composites reinforced with glass fibers was experimentally studied. Hand lay-up method has been used to manufacture nanocomposites with 18 layers of 2D woven glass fibers with 40% fiber volume fraction. The nano-epoxy resin system is made of diglycidyl ether of bisphenol A (epon 828) resin with jeffamine D400 as the curing agent. Nanosilica particles are dispersed with 0, 0.5, 1 and 3 wt.% (of epoxy resin) to study the effect of nanosilica content on fracture toughness. Also, a series of nanocomposites with 1 wt.% nanosilica content and containing 55 vol.% glass fibers were fabricated to investigate the effect of fiber volume fraction on results. End notch flexure (ENF) test was adopted for the measurement of mode II interlaminar fracture toughness. The results show that high loading of nanosilica has no significant effect on the interlaminar fracture toughness of nanocomposites while the addition of 0.5 wt.% nanosilica enhanced the interlaminar fracture toughness about 36% compared to the neat composites. Decreasing fiber volume fraction improved interlaminar fracture energy.

معماری و مهندسی سازه را در بر می‌گیرند [1]. استفاده از الیاف بافته شده<sup>1</sup>، به دلیل دارا بودن خواص مشابه در راستاهای طولی و عرضی، استفاده آسان، هزینه پایین و خواص مکانیکی عالی در کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. نگرانی اساسی در استفاده از الیاف از نوع بافته شده در ساخت

### 1- مقدمه

در طول چند دهه گذشته، استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت شده با الیاف توسعه چشمگیری در تولید محصولات مختلف داشته‌اند. محصولاتی که گستره آنها زمینه‌های مختلف علوم همچون مکانیک، هوافضا، برق،

1- Woven

صفحات کامپوزیتی، حساسیت آن‌ها در برابر ایراد تورق<sup>1</sup> است که می‌تواند مقاومت آن‌ها را تا حد چشمگیری کاهش دهد [2].

تورق یکی از مهمترین شکل‌های خرابی برای چندلایه‌های کامپوزیتی می‌باشد زیرا شروع و گسترش آن به‌صورت زیرسطحی بوده و نشانه ظاهری ندارد اما میزان استحکام و سفتی ماده کامپوزیتی را به شدت پایین می‌آورد. تورق می‌تواند از نقاط تمرکز تنش نظیر سوراخ‌ها، لبه‌های آزاد و ترک‌های موجود در ماتریس<sup>2</sup> کامپوزیت‌ها یا در فرآیند بارگذاری و حتی در حین ساخت ایجاد شوند [3]. در حالت کلی، تورق می‌تواند به شکل‌های (1) مود اول، حالت بازشدگی ترک، (2) مود دوم، حالت برش درون صفحه‌ای، (3) مود سوم، حالت پاره‌شدن یا برش خارج از صفحه، و یا ترکیبی از آن‌ها گسترش یابد که در عمل تمامی این شکل‌ها می‌توانند همزمان در محل نوک ترک اتفاق بیفتند [2].

طراحی بهینه سازه‌های کامپوزیتی نیازمند آگاهی از مقاومت ماده کامپوزیتی در برابر شکست بین‌لایه‌ای و همچنین مکانیزم‌های شکست مربوط به آن است [4]. با توجه به این‌که اغلب روش‌های طراحی بر مبنای خواص ماکرومکانیکی مواد می‌باشد و با توجه به وجود بارهای خمشی در اغلب سازه‌ها، مود دوم شکست بین‌لایه‌ای اهمیت می‌یابد. علاوه بر آن اهمیت مود دوم شکست بین‌لایه‌ای را می‌توان در بارگذاری‌های ضربی و نیز تخمین عمر سازه بعد از ضربه جستجو کرد [5]. تحقیقات گسترده انجام گرفته در آزمایشگاه ضربه و کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس نیز حاکی از آن است که تورق یکی از خرابی‌های عمده کامپوزیت‌های چندلایه در برابر بارگذاری‌های ضربی است [6].

اگر چه برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای<sup>3</sup> برای بارگذاری مود اول استاندارد تدوین شده است اما برای بارگذاری مود دوم تاکنون استاندارد واحدی تدوین نشده است [7]. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری چقرمگی مود دوم شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه موجود است که از میان آن‌ها روش نمونه خمشی با شکاف انتهایی<sup>4</sup> (ENF) رایج‌ترین و در عین حال ساده‌ترین این روش‌هاست [4]. روش‌ها و ابزارهای مختلفی به‌منظور تعیین شروع گسترش ترک و یا اندازه‌گیری طول ترک در حین فرآیند بارگذاری معرفی شده است که از آن جمله می‌توان به ابزارهای صوتی و همچنین ابزارهای نوری اشاره کرد [8,9].

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای پیرامون ابعاد مختلف تورق اعم از جنس مواد، نوع بارگذاری، شرایط آزمایش، شرایط محیطی و ... انجام گرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیقات گسترده تجربی شیندو و همکاران [2] پیرامون تاثیر دماهای برودتی<sup>5</sup> بر مقاومت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بافته شده شیشه در برابر مودهای مختلف تورق اشاره کرد. در حوزه تحقیقات عددی نیز می‌توان به ارایه روابط تحلیلی در ارتباط با تاثیر چیدمان الیاف بر مود دوم چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای بر مبنای نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تورق توسط جراح و همکاران اشاره نمود [10].

از طرفی پیشرفت‌های گسترده در زمینه نانو تکنولوژی آینده روشنی را برای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و سایر خواص مواد تقویت شده با نانوذرات را نوید می‌دهد. تلاش‌های گسترده‌ای به‌منظور بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه پلیمری با افزودن نانوذرات مختلف، به‌عنوان فاز

تقویت‌کننده، انجام گرفته است. از آن جمله می‌توان به افزایش چقرمگی مواد پلیمری ترد همچون اپوکسی<sup>6</sup> با افزودن نانومواد مختلف اشاره کرد. روش‌های دیگری نیز برای افزایش چقرمگی چنین موادی موجود است اما ممکن است با انجام این روش‌ها سایر خواص مکانیکی یا حرارتی و الکتریکی مواد کاهش یابد اما با افزودن نانوذرات علاوه بر تقویت خواص مکانیکی، خواص الکتریکی و حرارتی مواد نیز در اکثر موارد بهبود می‌یابد [11]. از جمله عوامل موثر بر کارایی نانومواد در بهبود خواص مکانیکی می‌توان به ابعاد، هندسه و نحوه پخش‌شدگی این مواد در ماتریس اشاره کرد.

صدیقی و همکاران [11] تاثیر افزودن ذرات نانورس<sup>7</sup> را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند. آنان تاثیر بسزای افزودن ذرات نانورس بر مقادیر چقرمگی شکست اولیه و حالت گسترش ترک این کامپوزیت‌ها را گزارش کردند بطوریکه در بعضی موارد افزودن نانورس باعث دو برابر شدن چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نمونه‌ها شده است.

تان و همکاران [12] طی تحقیقاتی تاثیر درصدهای بالای نانوسیلیکا را بر خواص کششی، برش بین لایه‌ای و همچنین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مودهای اول و دوم برای کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و الیاف کربن بررسی نمودند. آن‌ها در گزارش‌های خود از بهبود چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول به ازای افزایش درصدهای نانوسیلیکا خبر دادند اما کاهش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود دوم را به ازای افزایش درصدهای نانوسیلیکا گزارش نمودند.

داویس و همکاران [13] با افزودن و جهت‌دار کردن ذرات نانوتیوپ<sup>8</sup> کربن در ماتریس کامپوزیت‌های اپوکسی با الیاف دو بعدی کربن، مقاومت بین‌لایه‌ای این کامپوزیت‌ها را تا 27% بهبود بخشیدند. سپهان و همکاران [14] تاثیر افزودن ذرات نانوتیوپ کربن را بر خواص شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های با الیاف شیشه تحقیق کردند.

بشار و همکاران [15] تاثیر افزودن نانومواد بر مود اول شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های با الیاف بازالت<sup>9</sup> و زمینه اپوکسی را مورد تحقیق قرار دادند. آنان همچنین تاثیر کسر حجمی الیاف را نیز در آزمایش‌ها بررسی نمودند. آنان از اثرگذاری بیشتر نانوذرات در درصدهای پایین کسر حجمی الیاف خبر دادند.

ویچمن و همکاران [16] با افزودن انواع مختلف نانومواد از جمله نانوسیلیکا و نانوتیوپ کربن به کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و الیاف شیشه خواص مکانیکی این مواد را مورد بررسی قرار دادند. آنان تاثیر کمتر نانومواد بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها، نسبت به سایر خواص مکانیکی را گزارش نمودند.

هدف این تحقیق بررسی تاثیر افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیکا بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف می باشد. در این راستا نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی شیشه/ اپوکسی/ نانوسیلیکا با درصدهای وزنی مختلف نانوسیلیکا با ترک اولیه ساخته شده و تحت آزمایش ENF تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند. پایش رشد ترک با تابش نور با شدت مناسب بر محل ترک و بر اساس تاریکی ایجاد شده در اثر شکست نور در محل نوک ترک انجام گرفت. با توجه به تاثیر بیشتر نانوذرات در نمونه‌های با درصد حجمی الیاف پایین، نمونه‌ها با درصد حجمی الیاف نسبتا

6- Epoxy  
7- Nano-clay  
8- Carbon nano-tube  
9- Basalt

1- Delamination  
2- Matrix  
3- Interlaminar fracture toughness  
4- End notch flexure  
5- Cryogenic

### 2-3- ساخت نمونه‌های شکست

نمونه‌های نانوکامپوزیتی با متوسط درصد نسبت حجمی الیاف برابر با 40% ساخته شدند. نمونه‌ها دارای 18 لایه الیاف شیشه بوده و به روش لایه‌چینی دستی<sup>9</sup> تولید گردیدند. به این منظور چندلایه‌های کامپوزیتی ابتدا بصورت صفحات یکنواخت با ابعاد بزرگتر ساخته شده و در نهایت به ابعاد مورد نیاز برای نمونه‌های آزمایش برش داده شدند. با توجه به این‌که اعتمادپذیری نتایج آزمایش به یکنواخت بودن کامل نمونه‌ها، چه به لحاظ هندسی و چه به لحاظ مواد، بستگی دارد توزیع کامل و یکنواخت نانورزین تولید شده مابین الیاف از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا نمونه‌ها در نهایت دقت و سلیقه ساخته شدند.

جهت ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ها از نوارهای نازک نجسب تفلونی به ضخامت 20µm دقیقاً در لایه میانی نانوکامپوزیت‌ها استفاده گردید. شکل 1 نشان‌دهنده نمونه‌های ساخته شده و ترک اولیه با استفاده از لایه تفلونی می‌باشد.

پخت نانوکامپوزیت‌ها نیازمند اعمال همزمان دما و فشار با مقادیر مشخص و طبق برنامه از پیش تعیین شده می‌باشد. اعمال فشار باید طوری باشد که تمامی قسمت‌های کامپوزیت تحت فشار یکسان قرار گیرد تا نمونه‌ها بصورت کاملاً یکنواخت تولید شوند. بدین منظور با قرار دادن نمونه‌های آماده پخت در میان دو صفحه ضخیم و صلب و همچنین اعمال فشار پرس بر روی آن‌ها و قرار دادن مجموعه در داخل آون برای اعمال حرارت طبق برنامه، نمونه‌هایی با صافی سطح و یکنواختی بسیار مناسب ساخته شدند. جهت پخت کامل نانوکامپوزیت‌ها، نمونه‌ها بلافاصله بعد از آمیخته شدن با رزین به مدت 150 دقیقه تحت دمای 80 درجه سلسیوس و بلافاصله بعد از آن به مدت 150 دقیقه تحت دمای 120 درجه سلسیوس طبق پیشنهاد شرکت سازنده مواد اولیه (شرکت هانسمن) قرار گرفتند.

شکل 2 نشان‌دهنده نمونه‌های نانوکامپوزیتی بعد از فرآیند کامل پخت می‌باشد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود نمونه‌های ساخته شده از کیفیت و یکنواختی بالایی برخوردار هستند. با توجه به شفافیت مناسب نمونه‌ها پایش رشد ترک نیز به روش‌های مختلف تضمین می‌شود. در نهایت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه برش به ابعاد مناسب با دقت کافی برش داده می‌شوند. خطوط برش می‌بایست طوری تنظیم شوند که با راستای طولی الیاف موازی باشند.



شکل 1 نمونه نانوکامپوزیتی در حال ساخت دارای ترک اولیه تفلونی

پایین ساخته شدند. تمامی پارامترهای هندسی و شرایط آزمایش برای نمونه‌ها یکسان بوده و فقط درصدهای جرمی نانومواد افزوده شده متغیر در نظر گرفته شد. همچنین تاثیر درصد حجمی الیاف در مود دوم شکست بین‌لایه‌ای نیز با ساخت نمونه‌هایی با درصد حجمی الیاف متفاوت مورد تحقیق قرار گرفت. در این تحقیق، با توجه به پایین بودن چگالی نانوسیلیکا و کاهش خواص نانوکامپوزیت‌ها با درصدهای جرمی بالای نانوسیلیکا، از درصدهای جرمی پایین نانوسیلیکا برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها استفاده شد.

### 2- مواد، نمونه‌ها و آزمایش‌های تجربی

#### 2-1- مواد

نانوساختار استفاده شده در این تحقیق شیشه/اپوکسی تقویت شده با ذرات نانوسیلیکا است. الیاف استفاده شده در ساخت نمونه‌ها از جنس شیشه سری ای<sup>1</sup> می‌باشد. این الیاف بصورت صفحه‌ای و از نوع بافته شده با مشخصات کاملاً یکسان در راستاهای طولی و عرضی می‌باشند وزن واحد سطح الیاف برابر 200gr/m<sup>2</sup> است. رزین پلیمری انتخاب شده از دو بخش تشکیل شده است. قسمت نخست یک دی‌کلیسیدیل‌تر بیسفنول<sup>2</sup> نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون 828 تولید شده توسط شرکت شل<sup>3</sup> به‌عنوان پایه اپوکسی و قسمت دوم یک پلی‌اکسیپروپیلن دی‌آمین<sup>4</sup> با وزن مولکولی 400gr/mol با نام تجاری جف‌آمین<sup>5</sup> دی 400 به‌عنوان سخت‌کننده<sup>6</sup> ساخته شده توسط شرکت هانسمن<sup>7</sup> است که با نسبت وزنی 55:100 نسبت به وزن پایه رزین (ایپون 828) با آن مخلوط می‌شود. نانوذرات به کار برده شده از نوع نانوسیلیکا با ساختار کروی و با خلوص 99/99 درصد است. قطر متوسط ذرات نانوسیلیکا 10 الی 15nm بوده و ساخت شرکت تکنان<sup>8</sup> اسپانیا می‌باشد.

#### 2-2- آماده‌سازی ماتریس نمونه‌های نانوکامپوزیتی

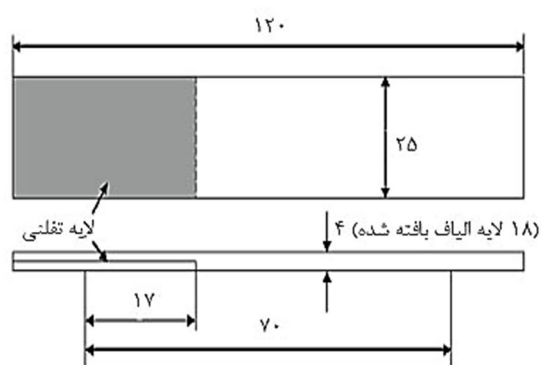
برای افزودن نانومواد و آماده‌سازی ماتریس نانوکامپوزیت‌ها، نانوذرات تهیه شده ابتدا به مدت 24 ساعت در دمای 80 درجه سلسیوس قرار داده شدند تا خشک شوند. برای ساخت نمونه‌هایی با 0/5، 1 و 3 درصد جرمی نانوسیلیکا نسبت به وزن کل ماتریس، مقادیر مختلف نانوذرات به سخت‌کننده اضافه گردید. به منظور اطمینان از پخش‌شدگی مناسب نانوذرات، مخلوط حاصل ابتدا به مدت 2 ساعت با استفاده از دستگاه همزن با سرعت 3200rpm هم زده شد. در ادامه مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک با توان مخصوص 150kW/cm<sup>2</sup> و فرکانس 24kHz و دامنه نوسان 87/5µm به مدت نیم ساعت سونیک گردید. در نهایت مخلوط مجدداً 90 دقیقه با سرعت دورانی 3200rpm هم‌زده شد.

پس از آماده‌سازی مخلوط سخت‌کننده و نانوسیلیکا، مقدار مورد نیاز رزین اپوکسی به مخلوط اضافه می‌شود. در مرحله آخر نانورزین تولید شده به مدت 20 دقیقه در دمای محیط و در داخل دستگاه آون خلاء حباب‌زدایی شده و آماده اضافه شدن به الیاف و ساخت نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها براساس روند آماده‌سازی تحقیقات مشابه که در منابع اشاره شده است می‌باشد.

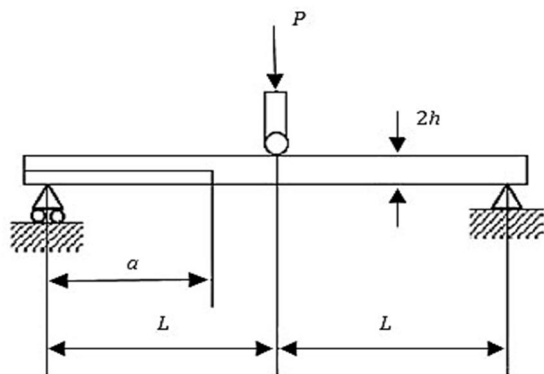
- 1- E-Glass
- 2- Diglycidyl ether of bisphenol
- 3- Shell
- 4- Polyoxo propylene diamine
- 5- Jeffamine
- 6- Hardener
- 7- Huntsman
- 8- Technan

قبل از انجام آزمایش‌ها نوار تفلونی از پیش تعبیه شده خارج شده و نمونه‌ها برای ایجاد تیزی لازم نوک ترک تحت بارگذاری مود اول شکست بین‌لایه‌ای قرار می‌گیرند طوری که لبه‌های ترک در راستای عمود بر صفحه ترک و در جهتی که لبه‌ها از هم دور می‌شوند کشیده می‌شوند تا در ادامه ترک اولیه ایجاد شده با نوار تفلونی، پیش ترک اولیه به طول تقریبی 3 میلیمتر ایجاد شود. محل نوک ترک نیز با دقت علامت‌گذاری شده تا محل قرارگیری نمونه روی تکیه‌گاه با فواصل مشخص از آن تعیین گردد.

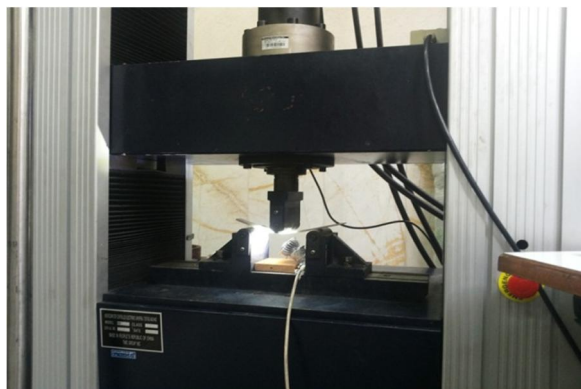
برای رسم نمودارهای نرمی<sup>3</sup> ماده در برابر طول ترک، هر نمونه قبل از آزمایش اصلی به ازای طول‌های مختلف ترک مورد آزمایش قرار می‌گیرد. با این تفاوت که میزان بارگذاری به حدی خواهد بود که ترک اجازه رشد نخواهد داشت. طول‌های مختلف ترک با جابجا کردن نمونه دارای طول ترک ثابت بر روی تکیه‌گاه‌ها حاصل می‌شود. برای رسم این نمودارها به ازای هر نمونه 5 طول ترک مورد آزمایش قرار گرفت.



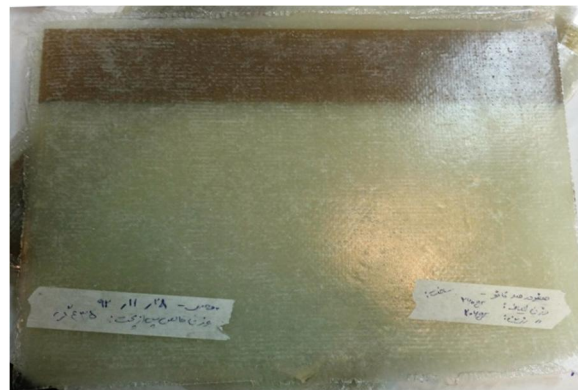
شکل 3 ابعاد نمونه (تمامی ابعاد به mm)



شکل 4 معرفی پارامترهای مربوط به نمونه



شکل 5 نمایی از انجام آزمایش و چیدمان تجهیزات



شکل 2 نمونه‌های نانوکامپوزیتی پس از پخت

جهت بررسی تاثیر نسبت حجمی الیاف بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نانوکامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی با 18 لایه الیاف شیشه و نسبت حجمی الیاف 55% و دارای 1% نسبت جرمی نانوسیلیکا ساخته شدند. فرآیند آماده سازی و ساخت این نمونه‌ها با نمونه‌های قبلی دقیقاً یکسان بوده و فقط نسبت حجمی الیاف آن‌ها متفاوت است.

#### 4-2- آزمایش‌ها

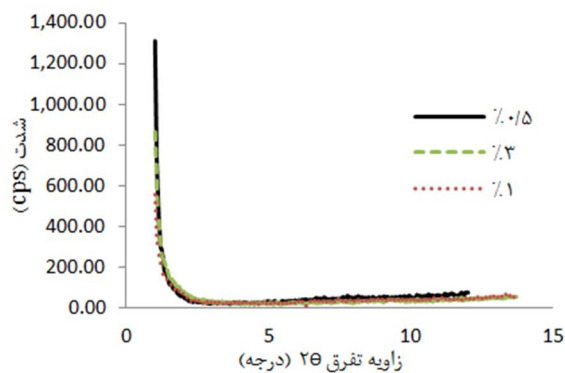
برای آگاهی از کیفیت ساخت و توزیع نانوذرات در ماتریس نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌هایی از ماتریس خالص نانوکامپوزیت‌ها که تحت شرایط کاملاً یکسان با نمونه‌های نانوکامپوزیتی اصلی آماده‌سازی و ساخته شده بودند تحت آزمایش‌های پراش اشعه ایکس<sup>1</sup> در دانشگاه تربیت مدرس قرار گرفتند. بدین منظور نقاط متعددی از هر یک از نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصد‌های مختلف نانوسیلیکا تحت این آزمایش قرار گرفتند.

آزمایش‌های مود دوم شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از روش ENF انجام شدند. این روش بر مبنای آزمایش خمش سه نقطه‌ای است با این تفاوت که در آن نمونه آزمایش دارای یک ترک بین‌لایه‌ای از پیش ایجاد شده می‌باشد. ابعاد نمونه‌ها و همچنین طول ترک اولیه در شکل 3 نشان داده شده است. شکل 4 نشان‌دهنده شماتیک تکیه‌گاه‌ها و پارامترهای مربوط به آزمایش و همچنین نحوه بارگذاری نمونه‌ها می‌باشد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست هیدرولیکی سنتام<sup>2</sup> با ظرفیت 6kN و با استفاده از فیکسچر مناسب در آزمایشگاه ضربه و کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید. در شکل 5 نمایی از نمونه در حال بارگذاری و همچنین چیدمان تجهیزات نشان داده شده است. انجام آزمایش با کنترل جابجایی فک فوقانی دستگاه تست هیدرولیکی با سرعت بارگذاری 1mm/min بوده که میزان جابجایی محل اعمال نیرو توسط دستگاه ثبت می‌شود و میزان نیرو نیز از طریق نیروسنج متصل به دستگاه به ازای هر میزان جابجایی محل اعمال نیرو ذخیره می‌شود و در نهایت نتایج آزمایش بصورت نمودارهای میزان نیرو در برابر جابجایی خروجی نمایش داده می‌شود.

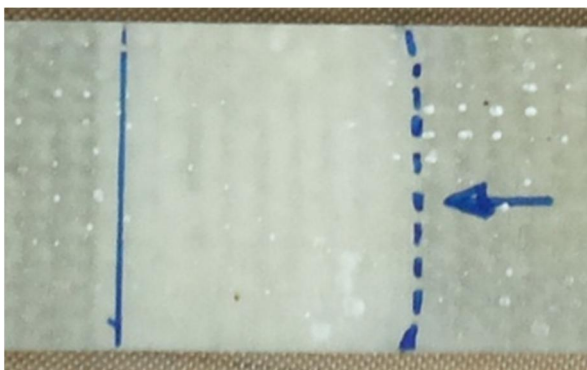
همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود با توجه به شفافیت مناسب نمونه‌های نانوکامپوزیتی، با تاباندن نور با شدت مناسب به نمونه و با بهره‌گیری از شکست نور ایجاد شده در محل نوک ترک می‌توان شروع گسترش و همچنین طول ترک را در حین آزمایش پایش نمود. بدین منظور لبه‌های جانبی نمونه‌ها بعد از برش سمباده‌کاری می‌شوند تا دقت اندازه‌گیری‌ها بالا رود.

بصورت ملایم تغییر می‌کند. با توجه به شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی هر نمونه را می‌توان به سه ناحیه: الف) ناحیه خطی نمودار (ب) از ناحیه شروع رفتار غیرخطی تا نیروی ماکزیمم (ج) بعد از نیروی ماکزیمم، تقسیم نمود. رفتار عمومی کلیه نمونه‌ها در ناحیه الف خطی بوده و با شروع گسترش ترک وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. علی‌رغم وجود این سه ناحیه در تمامی نمونه‌ها، می‌توان برخی تفاوت‌ها را بین رفتار آن‌ها مشاهده نمود. تفاوت پاسخ نمونه‌ها در هر سه ناحیه، اعم از شیب ناحیه خطی، موقعیت شروع رفتار غیرخطی و رفتار ماده در ناحیه غیرخطی می‌تواند نشانگر تاثیر نانوذرات بر شکست بین-لایه‌ای نانوکامپوزیت‌های هیبریدی باشد.

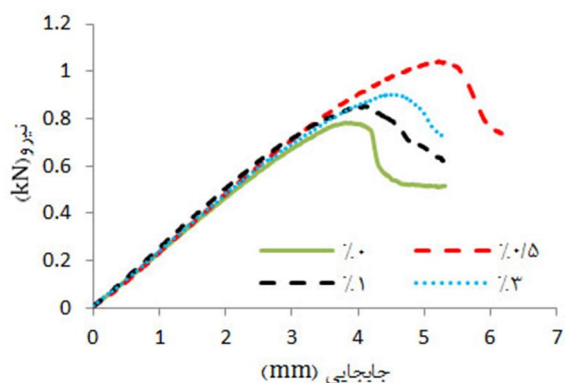
چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه غالباً با کمیتی به نام نرخ رهاسازی انرژی بحرانی که با نماد  $G_{IIC}$  نشان داده می‌شود، گزارش می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه این مقدار موجود است که در تحقیق حاضر از دو روش استفاده از تئوری تیرها و همچنین استفاده از روش کالیبراسیون نرمی در محاسبات چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نانوکامپوزیت‌ها



شکل 7 منحنی‌های پراش اشعه ایکس برای نانوکامپوزیت‌ها



شکل 8 نمونه آزمایش بعد از گسترش ترک



شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های نانوکامپوزیتی



شکل 6 تعیین محل نوک ترک با روش نورپردازی

برای انجام آزمایش‌های مربوط به رسم نمودارهای نرمی در برابر طول ترک نانوکامپوزیت‌ها، ابتدا یک نمونه از نانوکامپوزیت‌ها با درصدهای وزنی مختلف نانوسیلیکا با طول ترک مشخص تحت آزمایش قرار گرفت تا مقدار تقریبی ماکزیمم نیروی منجر به رشد ترک برای آن حاصل شود سپس به ازای طول ترک‌های مختلف برای حصول اطمینان از عدم رشد ترک در حین آزمایش نمونه‌ها تا 30 درصد این مقدار نیروی ماکزیمم بارگذاری شدند.

### 3- نتایج

#### 3-1- نتایج آزمایش‌های پراش اشعه ایکس

نتایج آزمایش‌های پراش اشعه ایکس انجام شده روی نمونه‌ها در شکل 7 نشان داده شده است. آزمون‌های پراش اشعه ایکس در تعداد متعددی از نقاط مختلف هر یک از نمونه‌ها با درصدهای وزنی متفاوت نانوسیلیکا انجام گرفت که نتایج بدست آمده از نقاط مختلف در نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای یکسان نانوذرات دارای هم‌پوشانی می‌باشند. این امر می‌تواند بیان‌گر یکنواختی و توزیع همگن نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شده باشد. با توجه به ساختار کروی نانوذرات سیلیکای استفاده شده در تحقیق حاضر، نمودارهای مربوط به آزمایش‌های پراش اشعه ایکس دارای هیچ پیکی نمی‌باشند.

#### 3-2- نتایج آزمایش‌های شکست بین‌لایه‌ای

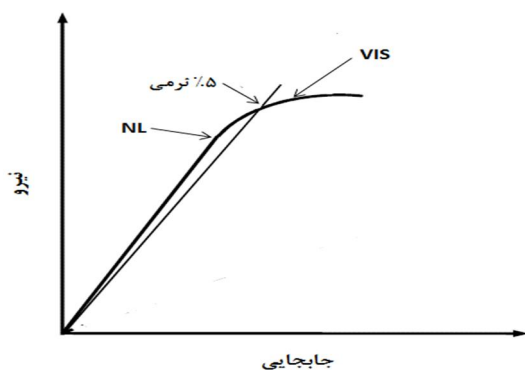
شکل 8 نمای فوقانی نمونه نانوکامپوزیتی را بعد از بارگذاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شفافیت نمونه‌ها جبهه ترک و همچنین ناحیه تورق با چشم غیر مسلح قابل رویت می‌باشد. مقایسه جبهه ترک مربوط به نمونه‌های با درصدهای مختلف نانوسیلیکا بیانگر آن است که جبهه ترک آن‌ها تفاوت محسوسی با یکدیگر نداشته و ترک از ناحیه میانی عرض نمونه‌ها شروع و به لبه‌ها امتداد می‌یابد. استفاده از الیاف بافته شده در ساخت نمونه‌ها باعث ایجاد جبهه ترک تقریباً یکنواخت در امتداد عرض نمونه‌ها شده است.

نمودارهای تغییرات نیرو در برابر جابجایی به ازای نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای مختلف نانوسیلیکا در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب قسمت خطی نمودار، مقادیر بیشینه نیروی وارد شده به نمونه‌ها و جابجایی متناظر با نیروی ماکزیمم به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا متفاوت می‌باشند. با در نظر گرفتن شکل 9 با توجه به این‌که نمونه‌ها قبل از آزمایش پیش ترک داده شده‌اند، نمودار نیرو-جابجایی آن‌ها بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم افت ناگهانی نداشته و

شکل 11 موقعیت تقریبی مقادیر مختلف نیرو که به روش‌های مختلف تعیین می‌شوند را نشان می‌دهد. مقادیر  $P$  به ازای روش‌های مختلف و برای درصدهای مختلف نانوسیلیکا همچنین مقادیر مربوط به پارامتر  $m$  در جدول 1 گزارش شده است.

شکل 12 مربوط به تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از رابطه (1) می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای چقرمگی شکست بین لایه‌ای با استفاده از روش تئوری تیرها فقط با استفاده از داده‌های مربوط به طول اولیه ترک مورد محاسبه قرار می‌گیرند و رفتار ماده به‌ازای طول‌های مختلف ترک در آن لحاظ نمی‌شود. مقدار نیروی استفاده شده در محاسبات متناظر با روش NL می‌باشد. با توجه به شکل 12 مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مربوط به نمونه‌های 0/5 درصد نانوسیلیکا به میزان 40% نسبت به مقادیر متناظر با نمونه‌های کامپوزیتی خالص افزایش یافته است. با افزایش درصدهای وزنی نانوسیلیکا در نانوکامپوزیت‌ها هیبریدی این مقدار کاهش می‌یابد اما با این وجود نتایج مربوط به این نمونه‌ها بهتر از نمونه‌های کامپوزیتی خالص است و چقرمگی شکست نمونه‌های 1 و 3 درصد نانوسیلیکا به ترتیب 16 و 23% نسبت به مقادیر مشابه نمونه‌های کامپوزیتی خالص بهبود می‌یابد.

مقادیر محاسبه شده چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از روش کالیبراسیون نرمی و به ازای نیروهای محاسبه با سه روش NL، نرمی 5% و VIS در شکل 13 ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج مربوط به استفاده از روش NL نرخ‌های رهاسازی انرژی کمتری نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد و محافظه‌کارانه است و به همین دلیل این روش نسبت به دو روش دیگر ارجحیت دارد. با توجه به شکل 13 مشاهده می‌شود که مقادیر مربوط به  $G_{IIC}$  که با روش NL محاسبه شده‌اند از مقدار  $1058/7 \text{ J/m}^2$  به ازای نمونه‌های کامپوزیتی خالص شروع شده و با افزایش 36 درصدی این مقدار به  $1442/1 \text{ J/m}^2$  برای نمونه‌های حاوی 0/5 درصد نانوسیلیکا می‌رسد. نتایج مربوط به نمونه‌های 0/5 درصد نانوسیلیکا بهترین نتایج بوده و با افزایش درصدهای نانوسیلیکا در نمونه‌ها، مقادیر  $G_{IIC}$  کاهش می‌یابد. بطوریکه مقادیر



شکل 11 مکان تقریبی معیارهای مختلف تعیین مقادیر بار بحرانی

جدول 1 مقادیر  $P$  تعیین شده با استفاده از روش‌های مختلف و مقادیر  $m$  به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا

| درصد نانوسیلیکا | $m$ ( $1/(\text{Nm}^2)$ ) | $P$ -VIS (N) | نرمی 5%- $P$ (N) | $P$ -NL (N) |
|-----------------|---------------------------|--------------|------------------|-------------|
| 0               | 0/1696                    | 752          | 720              | 600         |
| 0/5             | 0/1367                    | 1010         | 930              | 780         |
| 1               | 0/1338                    | 820          | 770              | 640         |
| 3               | 0/1063                    | 910          | 865              | 703         |

استفاده شده است. رابطه (1) نحوه محاسبه  $G_{IIC}$  براساس استفاده از روش تئوری تیرها می‌باشد [17].

$$G_{IIC} = \frac{9P^2a^2}{16E_{eff}b^2h^3} \quad (1)$$

که در آن:

$P$ : بار بحرانی اعمال شده در محل اعمال نیرو

$a$ : طول ترک بین‌لایه‌ای

$h$ : نصف ضخامت نمونه

$b$ : عرض نمونه

$E_{eff}$ : مدول الاستیک موثر نمونه

می‌باشد. مدول موثر نمونه برای بارگذاری مود دوم از رابطه (2) قابل محاسبه است [17]:

$$E_{eff-modeII} = \frac{P}{8bh^3\Delta} (2L^3 + 3a^3) \quad (2)$$

که در آن  $L$ ، نصف طول دهانه تکیه‌گاه،  $\Delta$  برابر میزان جابجایی محل اعمال نیرو و سایر پارامترها مطابق با پارامترهای رابطه (1) می‌باشند.

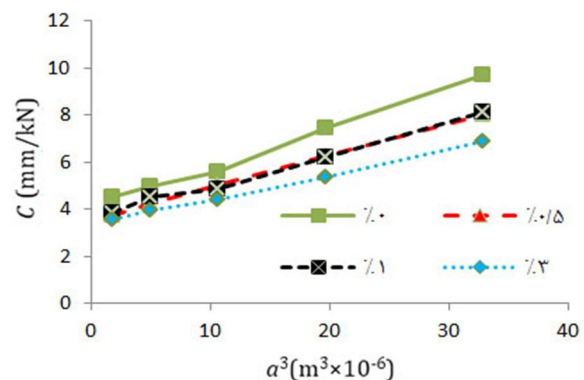
روش دوم محاسبه چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود دو، بر مبنای رسم نمودارهای نرمی ماده می‌باشد که در آن نرخ رهاسازی انرژی بحرانی از رابطه (3) محاسبه می‌شود [18]:

$$G_{IIC} = \frac{3P^2ma^2}{2b} \quad (3)$$

که در آن  $m$  برابر شیب خط راست حاصل از رسم نمودارهای نرمی نانوکامپوزیت‌ها در برابر مکعب طول ترک می‌باشد که از طریق انجام آزمایش روی نمونه‌های با طول‌های ترک مختلف بدست می‌آید. شکل 10 نمودار نرمی در برابر مکعب طول ترک را برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی با درصدهای مختلف نانوسیلیکا را نشان می‌دهد.

برای تعیین مقدار نیروی منجر به شروع رشد ترک ( $P$ ) سه روش زیر ارائه شده است:

- 1- در روش اول نیروی ماکزیمم برابر با مقدار نیرویی است که به ازای آن نمودار نیرو- جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود (روش NL).
- 2- در روش دوم  $P$  متناسب با افزایش 5 درصدی نرمی نمونه می‌باشد (روش نرمی 5%).
- 3- در روش سوم مقدار  $P$  برابر بار متناظر با تشخیص چشمی شروع رشد ترک می‌باشد (روش VIS). در این تحقیق برای سهولت در تشخیص شروع رشد ترک با استفاده از این روش از روش تاباندن نور به محل ترک استفاده شده است.



شکل 10 منحنی‌های نرمی نمونه در برابر مکعب طول ترک

های هیبریدی، نتیجه عکس شده و در بعضی موارد این امر سبب کاهش نرخ رها سازی انرژی می‌شود.

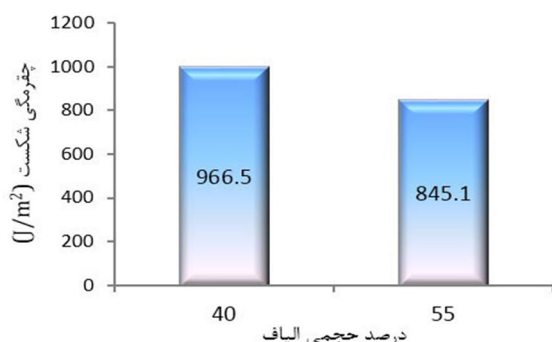
یکی از تفاوت‌های نتایج مربوط به نانوکامپوزیت‌های هیبریدی تفاوت رفتار آن‌ها در نمودار نیرو-جابجایی بعد از مقدار بیشینه نیرو (ناحیه ج) می‌باشد. با توجه به شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه کامپوزیتی خالص بعد از رسیدن به مقدار بیشینه نیرو با شیب تندتری نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی نزل می‌کند. علاوه بر آن نمودارهای نمونه‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی در ناحیه ج دارای افت و خیزهایی هم می‌باشد. این امر بیانگر آن است که رشد ترک در نمونه‌های کامپوزیتی خالص سریعتر و آسانتر از نمونه‌های نانوکامپوزیتی انجام می‌گیرد. البته مقادیر محاسبه شده برای نرخ رها سازی انرژی کرنشی با استفاده از روش ENF فقط مربوط به شروع رشد ترک بوده و نسبت به این تفاوت حساس نمی‌باشد [3,19].

با توجه به این‌که ساختار نانوذرات سیلیکای استفاده شده در این تحقیق از نوع کروی می‌باشد، وقوع مکانیزم‌هایی همچون پین‌زدن نانوذرات، انحراف ترک از مسیر اولیه و ایجاد حفره‌های پلاستیکی را می‌توان از عوامل بروز این تفاوت‌ها در نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها بر شمرد.

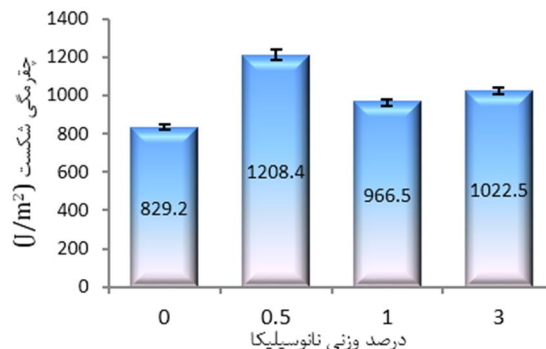
ذرات نانوسیلیکا می‌توانند همانند پین لبه‌های ترک را به هم متصل کرده و در برابر گسترش ترک مقاومت نمایند. ایجاد حفره‌های پلاستیکی ناشی از تغییر فرم‌های پلاستیک تیزی نوک ترک را گرفته و باعث توقف یا کندی گسترش ترک‌ها می‌شود. ریز ترک‌های ایجاد شده در مواد کامپوزیتی در مواجهه با ذرات نانوسیلیکا از مسیر اولیه خود منحرف شده و این امر باعث کندی رشد ترک‌ها و در نتیجه باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌گردد. همچنین حضور نانوذرات سیلیکا می‌تواند باعث بهبود چسبندگی مابین ماتریس و الیاف شود [20].

با توجه به مقدار کم چگالی نانوذرات سیلیکای مورد استفاده در تحقیق حاضر، با افزایش درصدهای جرمی نانوذرات اضافه شده به نمونه‌ها، حجم اشغال شده توسط نانوذرات افزایش یافته و این امر می‌تواند با تغییر مکانیزم‌های شکست باعث کاهش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای بالای نانوسیلیکا گردد.

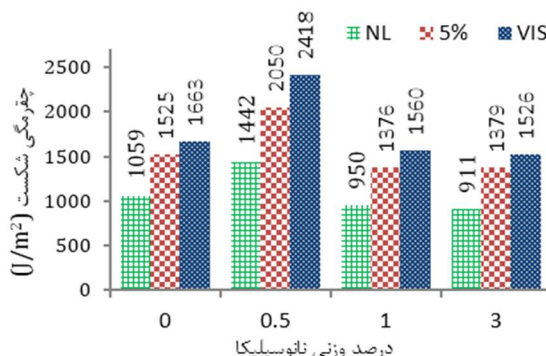
وابستگی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه به عوامل متعددی از جمله استحکام و نرمی ماتریس، چیدمان و شکل الیاف، نحوه اتصال و چسبندگی الیاف به ماتریس، تنش‌های پسماند احتمالی و نسبت حجمی الیاف اثبات گردیده است که در این میان نرمی ماتریس یا چقرمگی شکست ماتریس اهمیت فراوانی در این زمینه دارد. اضافه کردن نانوذرات می‌تواند بر روی عواملی همچون چقرمگی شکست ماتریس و همچنین نحوه اتصال ماتریس به الیاف کامپوزیت‌های چندلایه تاثیر فراوانی داشته باشد.



شکل 14 تغییر چقرمگی شکست در برابر نسبت حجمی الیاف



شکل 12 مقادیر چقرمگی شکست با استفاده از روش تئوری تیرها



شکل 13 مقادیر چقرمگی شکست با استفاده از روش کالیبراسیون نرمی

مربوط به چقرمگی شکست این نمونه‌ها برخلاف نتایج روش قبلی حتی از مقادیر مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی خالص نیز کمتر است. این بدین معناست که افزودن این مقدار نانوسیلیکا به نمونه‌ها، نه تنها باعث بهبود این خاصیت نانوکامپوزیت‌ها نمی‌شود بلکه نتیجه عکس نیز دارد.

تفاوت نتایج روش‌های اول و دوم به ازای نمونه‌های 1 و 3% نانوسیلیکا می‌تواند ناشی از این امر باشد که رفتار ماده در طول ترک‌های مختلف در محاسبات مربوط به روش دوم تاثیرگذار بوده اما در محاسبات مربوط به روش تئوری تیرها دخیل نمی‌باشند.

نتایج مربوط به چقرمگی شکست محاسبه شده با روش کالیبراسیون نرمی و با استفاده از و معیارهای نیروی نرمی 5% و VIS نیز روند مشابهی با نتایج مربوط به معیار NL دارند یعنی مقادیر  $G_{IIC}$  به ازای افزودن 0/5 درصد نانوسیلیکا افزایش چشمگیری داشته ولی با اضافه‌تر کردن نانوذرات این مقدار کاهش می‌یابد.

شکل 14 مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را برای نمونه‌هایی با درصدهای یکسان نانوسیلیکا (1%) ولی با مقادیر مختلف نسبت حجمی الیاف مقایسه می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود به ازای افزایش نسبت حجمی الیاف و کاهش نسبت حجمی رزین میزان چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود دوم کاهش می‌یابد. بطوری‌که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مربوط به نمونه‌های نانوکامپوزیتی با نسبت حجمی الیاف 55% به میزان 14% از مقادیر مشابه مربوط به نمونه‌های با نسبت حجمی الیاف 40% کمتر می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها، مشاهده می‌شود که افزودن ذرات نانوسیلیکا به ماتریس مواد کامپوزیتی می‌تواند باعث بهبود خواص بین‌لایه‌ای آن‌ها شود. بهترین نتایج چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های دارای 0/5 درصد وزنی نانوسیلیکا می‌باشد که نتایج مربوط به نرخ رها سازی انرژی این نمونه‌ها افزایش چشمگیری نسبت به مقادیر مشابه نمونه‌های کامپوزیتی خالص داشته‌اند. با اضافه‌تر کردن مقادیر نانوسیلیکا در ماتریس نانوکامپوزیت-

- [3] F. Moroni, R. Palazzetti, A. Zucchelli, A. Pironi, A numerical investigation on the interlaminar strength of nanomodified composite interfaces, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 55, pp. 635-641, 2013.
- [4] W. X. Wang, M. Nakata, Y. Takao, T. Matsubara, Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 9, pp. 1447-1455, 2009.
- [5] Y. Tang, L. Ye, Z. Zhang, K. Friedrich, Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles-A review, *Composites Science and Technology*, Vol. 86, pp. 26-37, 2013.
- [6] A. Masoudi, G. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014. (In Persian)
- [7] A. De Morais, Analysis of mode II interlaminar fracture of multidirectional laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 1, pp. 51-57, 2004.
- [8] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014. (In Persian)
- [9] M. H. Rarani, *Interlaminar fracture toughness of unidirectional DCB specimens*, Thesis, Iran university of science and technology, pp. 80-88, 2012. (In Persian)
- [10] H. Jarrah, *Mode II fracture toughness of the layer Use of Equivalent Layup in ENF specimens*, Thesis, Iran university of science and technology, pp. 62-67, 2013. (In Persian)
- [11] N. A. Siddiqui, R. S. Woo, J.-K. Kim, C. C. Leung, A. Munir, Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Vol. 38, No. 2, pp. 449-460, 2007.
- [12] 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.
- [13] D. C. Davis, B. D. Whelan, An experimental study of interlaminar shear fracture toughness of a nanotube reinforced composite, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp. 105-116, 2011.
- [14] A. Tugrul Seyhan, M. Tanoglu, K. Schulte, Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 18, pp. 5151-5162, 2008.
- [15] M. T. Bashar, U. Sundararaj, P. Mertiny, Mode-I interlaminar fracture behaviour of nanoparticle modified epoxy/basalt fibre-reinforced laminates, *Polymer Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 402-412, 2013.
- [16] M. H. Wichmann, J. Sumfleth, F. H. Gojny, M. Quaresimin, B. Fiedler, K. Schulte, Glass-fibre-reinforced composites with enhanced mechanical and electrical properties-benefits and limitations of a nanoparticle modified matrix, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No. 16, pp. 2346-2359, 2006.
- [17] R. Rikards, F.-G. Buchholz, A. Bledzki, G. Wacker, A. Korjakin, Mode I, mode II, and mixed-mode I/II interlaminar fracture toughness of GFRP influenced by fiber surface treatment, *Mechanics of composite materials*, Vol. 32, No. 5, pp. 439-462, 1996.
- [18] Y. Zhu, *Characterization of Interlaminar Fracture Toughness of a Carbon/epoxy Composite Material*, Thesis, The Pennsylvania State University, pp. 126-145, 2009.
- [19] N. R. Mathivanan, J. Jerald, Interlaminar fracture toughness and low-velocity impact resistance of woven glass epoxy composite laminates of EP3 Grade, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 11, No. 03, pp. 321, 2012.
- [20] L. Sun, R. F. Gibson, F. Gordaninejad, J. Suhr, Energy absorption capability of nanocomposites: a review, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, pp. 2392-2409, 2009.

بطورکلی نانوذرات از طریق مکانیزم‌های مختلفی می‌توانند بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تاثیر گذارند و خروجی نهایی آزمایش‌ها برآیندی از تاثیرهای مثبت و منفی مکانیزم‌های مختلف دخیل بر اثرگذاری حضور نانوذرات بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌هاست. با توجه به تنوع انواع نانومواد کاربردی و همچنین نیاز به تدوین اصول کاربردی به منظور درک مکانیزم‌های جذب انرژی در نانوکامپوزیت‌ها، پیشرفت‌ها در راستای درک شیوه و میزان توانایی اثرگذاری نانوذرات در بهبود خواص مواد کامپوزیتی در گام‌های اولیه خود می‌باشد.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبلی انجام شده در آزمایشگاه ضربه و کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس بر خواص کششی و برشی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانوسیلیکا هم‌خوانی دارد. با توجه به آزمون‌های کشش و برش انجام گرفته در این تحقیقات، مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های 0/5 درصد نانوسیلیکا در بارگذاری‌های کششی با افزایش 26 درصدی نسبت به نتایج مشابه در نمونه‌های کامپوزیتی خالص بهترین نتایج را دارا بوده‌اند.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن ذرات نانوسیلیکا بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از آزمایش ENF مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمون‌ها با استفاده از معیارهای مختلف و با استفاده از دو روش 1- روش تئوری تیرها و 2- روش کالیبراسیون نرمی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مربوط به نمونه‌های 0/5 درصد نانوسیلیکا با افزایش 36 درصدی نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی خالص بهترین نتایج را داشته است و میزان بهینه نانوسیلیکا برای بهبود خواص شکست مود دوم بین‌لایه‌ای این کامپوزیت‌ها می‌باشد. همچنین تاثیر نسبت حجمی الیاف بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده این است که با افزایش نسبت حجمی الیاف، مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود دو نمونه‌های نانوکامپوزیتی کاهش می‌یابد به‌طوری که با افزایش 15 درصدی نسبت حجمی الیاف چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای 14 درصد کاهش می‌یابد.

#### 5- مراجع

- [1] M. Arai, Y. Noro, K.-i. Sugimoto, M. Endo, Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 2, pp. 516-525, 2008.
- [2] Y. Shindo, T. Takeda, F. Narita, N. Saito, S. Watanabe, K. Sanada, Delamination growth mechanisms in woven glass fiber reinforced polymer composites under mode II fatigue loading at cryogenic temperatures, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1904-1911, 2009.