



## مطالعه تجربی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی در نرخ‌های مختلف از کرنش

سجاد زارعی دارانی<sup>1</sup>، رضا نقدآبادی<sup>2\*</sup>، عفت جوکار<sup>3</sup>، اعظم ایرجی‌زاد<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- پژوهشگر پسا دکتری، فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

4- استاد، فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* تهران، صندوق پستی 9765-11155، naghdabd@sharif.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 مرداد 1395

پذیرش: 01 آبان 1395

ارائه در سایت: 29 آبان 1395

کلید واژگان:

نانوکامپوزیت

اپوکسی

گرافن اکسید

نرخ کرنش

### چکیده

در این مقاله رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوصفحات گرافن اکسید (گرافن اکسید/اپوکسی)، در نرخ‌های مختلف از کرنش، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا ابتدا گرافن اکسید به روش شیمیایی هامر با کاهش گرافیت خشک سنتز شده و در ادامه نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی به روش مخلوط با حلال (استون)، ساخته شده است. از نانوکامپوزیت به‌دست آمده نمونه‌های استاندارد برای انجام آزمایش، تهیه شده و آزمایش‌های فشار استاتیکی و هایپکینسون فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفته است. نتایج حاصل از انجام آزمایش نشان داد که افزودن نانو صفحات گرافن اکسید به اپوکسی باعث افزایش سفتی و استحکام آن شده است. مشخص شد که رفتار اپوکسی به شدت وابسته به نرخ کرنش بوده به طوری استحکام آن در حالت دینامیکی حدود 50 درصد از حالت استاتیکی بیش‌تر است. از طرف دیگر، تأثیر افزودن این نانوصفحات در نرخ کرنش‌های پایین، بیش‌تر از نرخ کرنش‌های بالا است. به‌طوری که استحکام اپوکسی با افزودن 0.3 درصد جرمی از گرافن اکسید، در نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  و  $1100 \text{ s}^{-1}$  به ترتیب حدود 20% و 5% افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت آن بعد از آزمایش فشار استاتیکی، نشان داد که زبری سطح شکست برای نانوکامپوزیت بیش‌تر از اپوکسی است.

## Experimental study on mechanical properties of graphene oxide/epoxy nonocomposites in different strain rates

Sajad Zarei Darani<sup>1</sup>, Reza Naghdabadi<sup>1\*</sup>, Effat Jokar<sup>2</sup>, Azam Irajizad<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 9567-11155 Tehran, Iran, naghdabd@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 14 August 2016

Accepted 22 October 2016

Available Online 19 November 2016

Keywords:

Nanocomposite

Epoxy

Graphene Oxide

Strain rate

### ABSTRACT

In this paper, the mechanical behavior of the Graphene Oxide (GO)/epoxy nanocomposites has been investigated under different strain rates. To reach this goal, GO nano sheets were synthesized through Hummers method (a chemical method) and then GO/epoxy nanocomposite was prepared using the solution-based method. Standard test specimens were made from nanocomposite. In order to study the static and dynamic behavior of material, the static pressure test and the split pressure Hopkinson bar test were performed on the specimens, respectively. The results showed that the stiffness and the strength of epoxy increase by adding GO to it. It was found that the behavior of epoxy is dependent on a strain rate so intense that its dynamic strength is about 50% more than the static one. Furthermore, the effect of GO at low strain rates is more than high strain rates such that adding 0.3% weight ratio of GO increases the strength of epoxy by nearly 20% and 5% in  $0.01 \text{ s}^{-1}$  and  $1100 \text{ s}^{-1}$  of strain rates, respectively. In addition, the comparison of Scanning Electron Microscopy (SEM) images from the fracture surfaces of neat epoxy and its composite showed that the surface toughness of nanocomposite is more than that of epoxy.

### 1- مقدمه

به مواد رایج دیگر مانند فلزها، سادگی آن برای قالب‌گیری و پایین بودن هزینه ساخت آن است [2]. از طرف دیگر اپوکسی دارای استحکام پایین‌تر و تردی بیش‌تری نسبت به فلزات بوده که می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت برای آن به حساب آید [3]. به‌منظور رفع این محدودیت، می‌توان اپوکسی را به

رزین اپوکسی یکی از پرکاربردترین پلیمرهای ترموست است. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از آن در عایق‌های الکتریکی، چسب‌ها، پوشش سطوح و سازه‌های کامپوزیتی اشاره کرد [1]. بارزترین ویژگی اپوکسی نسبت

Please cite this article using:

S. Zarei Darani, R. Naghdabadi, E. Jokar, A. Irajizad, Experimental study on mechanical properties of graphene oxide/epoxy nonocomposites in different strain rates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 61-66, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Zarei Darani, R. Naghdabadi, E. Jokar, A. Irajizad, Experimental study on mechanical properties of graphene oxide/epoxy nonocomposites in different strain rates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 61-66, 2016 (in Persian)

جدول 1 مشخصات مکانیکی اپوکسی مورد استفاده

استاندارد	مقدار (MPa)	کمیت
ASTM D638M	2700	مدول کششی
ASTM D638M	76	استحکام کششی
ASTM D695M	97	استحکام فشاری
ASTM D790M	96	استحکام خمشی

## 2-2- سنتز گرافن اکسید

GO از طریق اکسید کردن پولکی‌های گرافیت که به‌عنوان گرافیت چرب در بازار شناخته می‌شود، با روش هامر تهیه شده است [7]. به ظرفی حاوی یک گرم گرافیت، 24 میلی‌لیتر سولفوریک اسید 98-96% اضافه کرده و در دمای 83 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت نگهداشته می‌شود. بعد از این مرحله محلول برای دو بار به مدت نیم ساعت در حمام آب سونیکیت می‌شود. مخلوط بر روی یک همزن مغناطیسی در یک حمام یخ قرار داده و یک گرم سدیم نیترات به آن اضافه شده و هم زده می‌شود. در حین هم خوردن، شش گرم پتاسیم پرمنگنات به آرامی به این مخلوط اضافه می‌شود. پس از اطمینان از سرد شدن مخلوط، با هم خوردن مخلوط به مدت 15 دقیقه در حمام یخ، ظرف واکنش را از حمام یخ خارج کرده و در حمام 35-37 درجه سانتی‌گراد قرار داده تا به مدت دو ساعت در این دما هم زده شود. بعد از سپری شدن این زمان 100 ml آب بسیار آرام و به حالت قطره‌ای به مخلوط واکنش اضافه می‌شود. در این مرحله دمای واکنش بسیار سریع افزایش می‌یابد. بعد از اضافه کردن آب، در مرحله بعدی 100 ml آب نیز به یک‌باره به مخلوط واکنش اضافه‌شده و این بار دمای حمام واکنش را به 65-70 °C افزایش داده و به مدت 30 دقیقه در این دما هم زده می‌شود. در مرحله بعدی برای اتمام واکنش، هشت میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید به آرامی به مخلوط واکنش اضافه و این افزودن تا اتمام آزاد شدن گاز از مخلوط واکنش، ادامه می‌یابد. در حین اضافه شدن هیدروژن پراکسید تغییر رنگ از قهوه‌ای به رنگ زرد-نارنجی مشاهده می‌شود. پس از خنک شدن مخلوط واکنش، با کمک قیف و کاغذ صافی کار جداسازی گرافیت اکسید و شستن آن انجام می‌گیرد.

بعد از صاف کردن تمام مخلوط زرد رنگ، رسوب روی صافی را با 100 ml محلول 10% HCl حجمی شستشو داده تا ناخالصی MnO<sub>2</sub> حذف شود. بعد از آن، رسوب روی صافی را چندین بار با آب شستشو داده تا تمامی اسیدها و سایر ناخالص‌ها حذف شده و آب خروجی از صافی، pH حدود چهار تا پنج داشته باشد. در این مرحله رسوب را از سطح صافی جمع‌آوری کرده و با کمک همزن با دور 4000-5000 دور بر دقیقه در آب پخش کرده و سپس در حمام فراصوت قرار داده تا با کمک امواج فراصوت گرافیت اکسید به GO تورق یابد. در مرحله نهایی از نیروی گریز از مرکز در دور 2000 دور بر دقیقه به مدت 20 دقیقه برای جداسازی گرافیت‌های واکنش نداده و یا GO های چندلایه از GO تک لایه کمک گرفته می‌شود، و این عمل نیز دو تا سه بار تکرار می‌شود. در صورتی که واکنش به خوبی انجام گرفته باشد، مقدار رسوبات ته‌نشین شده در کف ظرف بسیار ناچیز خواهد بود. با توجه به نوع کاربرد گرافن اکسید، می‌توان حلال آن را با چندین بار شستشو با حلال جدید تغییر داد. در این کار، این روند با استون انجام می‌گیرد.

برای اطمینان از تورق مناسب نانو صفحات گرافن اکسید از یکدیگر، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>4</sup> (در مرکز پژوهش متالورژی رازی

کمک تقویت کننده‌هایی به شکل لیاف و یا نانوذرات، تقویت و به‌صورت کامپوزیت و نانوکامپوزیت استفاده نمود [4]. نانوتقویت‌کننده‌ها به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم در مقایسه با تقویت‌کننده‌هایی به شکل لیاف در اندازه‌های معمولی، می‌توانند درگیری و تماس بیش‌تری با بستر مجاور و خواص مکانیکی بهتری داشته باشند. به همین دلیل نانوکامپوزیت‌ها نسبت به کامپوزیت‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. از میان نانوتقویت‌کننده‌های موجود، نوع کربنی آن‌ها، به دلیل خواص ویژه پیوند کربن-کربن، مانند گرافن اکسید، نانولوله‌های کربنی و گرافن، بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته اند. گرافن اکسید به دلیل سادگی ساخت، امکان سنتز در مقادیر زیاد و استحکام مکانیکی بالا [5]، می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای تقویت پلیمرها مورد استفاده قرار گیرد. گرافن اکسید از اکسید کردن پولکی‌های گرافیت، به کمک یک اکسنده قوی مانند پتاسیم پرمنگنات، در یک محیط اسیدی مانند اسید سولفوریک به دست می‌آید [6].

در سال‌های اخیر مطالعاتی روی تأثیر گرافن اکسید بر رفتار پلیمرها به ویژه سفتی و استحکام آنها، انجام شده است [7-9]. پلیمرها رفتاری وابسته به نرخ کرنش از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل در سرعت‌های مختلف بارگذاری، رفتاری متفاوت دارند. تا به حال مطالعاتی روی اثر نانوتقویت کننده‌های کربنی بر رفتار مکانیکی پلیمر، در نرخ کرنش‌های مختلف انجام شده است. برای مثال شکرپه و همکاران [10]، رفتار وابسته به نرخ کرنش پلیمرهای تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چندلایه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها معادله یک ساختاری برای پیش‌بینی رفتار وابسته به نرخ کرنش پلیمرهای تقویت شده با نانولوله‌کربنی، پیشنهاد داده‌اند. هم‌چنین ما و همکاران [11]، به بررسی اثر نانولوله‌های کربنی بر رفتار اپوکسی، تحت بار فشاری در نرخ کرنش‌های مختلف پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار اپوکسی و نانوکامپوزیت آن، وابسته به نرخ کرنش بوده و مقاومت آن با بالا رفتن نرخ کرنش، افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزودن 1.5% نانولوله کربنی به اپوکسی، استحکام آن را حدود 50% افزایش می‌دهد.

در این مقاله اثر افزایش گرافن اکسید بر رفتار مکانیکی اپوکسی در نرخ کرنش‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا گرافن اکسید با کاهش گرافیت به روش شیمیایی هامر<sup>1</sup> سنتز شده و در ادامه نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی به روش مخلوط در حلال (استون)، ساخته شده است. سپس نمونه‌های استاندارد آزمایش از نانوکامپوزیت تهیه شده و آزمایش‌های فشار ساده و هاپکینسون فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفته است. در نهایت نمودارهای تنش-کرنش فشاری در نرخ کرنش‌های متفاوت برای آن‌ها ارائه می‌شود.

## 2- آزمایش

### 2-1- مواد آزمایش

رزین اپوکسی انتخاب شده در این مقاله، رزین بیسفنول A<sup>2</sup> با نام تجاری ML 506 (به دلیل مصارف عمده تجاری) از محصولات شرکت مهندسی مکرر است. هم‌چنین سخت‌کننده آن پلی‌آمین<sup>3</sup> با نام تجاری HA 11 از همان شرکت انتخاب شده است. خواص مکانیکی اپوکسی با هاردنر 15 درصد، برگرفته از کاتالوگ شرکت سازنده، در جدول 1 نشان داده شده است. نانوصفحات گرافن اکسید، به‌عنوان تقویت‌کننده، نیز به روش شیمیایی هامر سنتز شده‌اند [12].

<sup>1</sup> Hummer's method

<sup>2</sup> Bisphenol A

<sup>3</sup> Polyamine

<sup>4</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)



Fig. 2 Using of probe sonicator and ice bath

شکل 2 استفاده از هموژنایزر آلتراسونیک و حمام یخ



Fig. 3 Formation of the liquid crystal

شکل 3 تشکیل کریستال مایع بر روی سطح محلول

این منظور، مخلوط به مدت 2 دقیقه با دور 1000 rpm سانتریفیوژ می‌شود تا حباب‌های گیرافتاده ناشی از هم زدن از آن خارج شود. در نهایت مخلوط درون قالب‌های آلومینیومی چرب شده با اسپری تفلون، ریخته شده و به مدت 24 ساعت در دمای محیط و سپس 12 ساعت در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  خشک می‌شود. پس از خارج نمودن نانوکامپوزیت از داخل قالب و با توجه به استاندارد آزمایش، نمونه‌های موردنیاز با استفاده از دستگاه تراش و یا دستگاه برش لیزر، استخراج می‌شوند. در "شکل 4" تعدادی از نمونه‌های به‌دست آمده با دستگاه تراش نشان داده شده است.

#### 4-2- تجهیزات و استاندارد آزمایش

در این مقاله آزمایش فشار به کمک دستگاه تک محوره Zwick/Roell Z100 موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف (شکل 5) و طبق استاندارد ASTM D695-85 (به ترتیب با طول و قطر برابر با 25.4 mm و 12.7 mm) انجام شده است. همچنین آزمایش هاپکینسون با میله‌هایی از جنس فولاد و نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر یک (طول و قطر برابر با 12.7 mm) در آزمایشگاه ضربه و دینامیک مواد



Fig. 4 Specimens that are made by using lathe machine

شکل 4 نمونه‌های به‌دست آمده با استفاده از دستگاه تراش

ایران) از آن‌ها گرفته شد. در "شکل 1" یکی از این تصاویر به نمایش گذاشته شده است. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که صفحات گرافن اکسید به شکلی تک‌لایه در حلال وجود دارند.

#### 3-2- ساخت نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی

برای ساخت نانوکامپوزیت ابتدا گرافن اکسید سنتز شده به مدت پنج دقیقه، به منظور تورق صفحات از یکدیگر، با استفاده از حمام آب سونیکیتور، در حلال استون سونیکیت می‌شود. با توجه به درصد جرمی مورد نیاز از گرافن اکسید برای نانوکامپوزیت و غلظت آن در استون، گرافن اکسید پراکنده شده در استون به رزین اضافه شده و با همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه در دور 2500 rpm همزده می‌شود. در حین این مرحله، به علت بالا بودن گرانروی رزین، دمایی مخلوط بالا خواهد رفت که برای جلوگیری از آن می‌توان از یک حمام آب استفاده نمود.

در ادامه به‌منظور توزیع بهتر گرافن اکسید در رزین، مخلوط به مدت یک ساعت با استفاده از پروب 14 میلی‌متری دستگاه هموژنایزر آلتراسونیک (Hielscher UP400S) با توان 240 W و فرکانس 12 kHz سونیکیت می‌شود [3]. در این مرحله، به دلیل انتقال انرژی زیاد به مخلوط، دما به شدت بالا خواهد رفت. برای جلوگیری از این افزایش دما، لازم است ظرف مخلوط در حمامی از یخ نگهداری شود تا دما حدود  $40^{\circ}\text{C}$  ثابت نگاه داشته شود. نمایی از دستگاه آلتراسونیک به همراه حمام یخ در "شکل 2" نشان داده شده است. در حین پراکنده کردن صفحات گرافن اکسید در محلول توسط آلتراسونیک، به علت کاهش بیش‌تر صفحات گرافن اکسید، رنگ مخلوط از قهوه‌ای به مشکی میل می‌کند. همچنین در صورت توزیع مناسب گرافن اکسید در اپوکسی، کریستال مایع<sup>1</sup> بر روی سطح رزین قابل مشاهده است. به‌عبارت دیگر تشکیل کریستال مایع در داخل محلول، نشان از باز شدن نانوصفحات از یکدیگر بوده و انباشتگی میان این صفحات بسیار کم اتفاق افتاده است. از طرف دیگر به‌دلیل این‌که نانوصفحات گرافن اکسید قبل از مخلوط شدن با اپوکسی خود دارای تورقی مناسب، با توجه به "شکل 1"، هستند و با توجه به تشکیل کریستال مایع می‌توان نتیجه گرفت که توزیع صفحات به خوبی انجام گرفته است. تشکیل کریستال مایع در بر روی محلول در "شکل 3" نشان داده شده است.

پس از عملیات توزیع نانوذرات در بستر، به‌منظور خارج‌سازی استون، مخلوط به مدت 24 ساعت در دمای  $65^{\circ}\text{C}$  داخل کوره گذاشته می‌شود [7]. پس از خارج شدن کامل حلال از رزین، سخت‌کننده با نسبت 10 به 100 به مخلوط اضافه شده و به مدت 5 دقیقه به خوبی همزده می‌شود. قبل از قالب‌ریزی، لازم است که هیچ‌گونه حبابی در مخلوط وجود نداشته باشد. برای

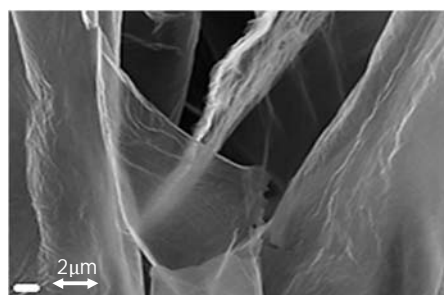
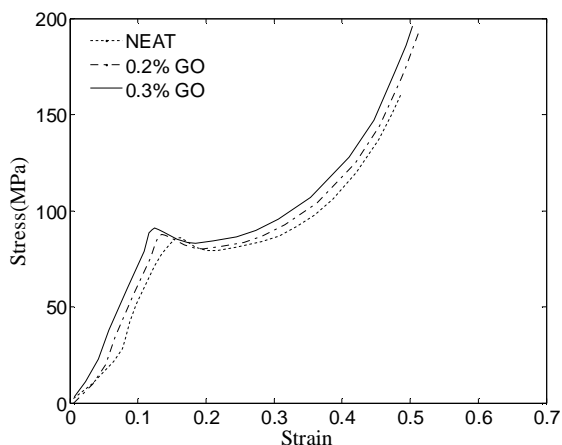


Fig. 1 SEM image of the GO plates

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوصفحات گرافن اکسید

<sup>1</sup> Liquid Crystal



**Fig. 7** Epoxy and GO/epoxy nanocomposite stress-strain diagram for different amount of GO in 0.01/s of strain rate.

شکل 7 نمودار تنش-کرنش فشاری اپوکسی و نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی برای درصد جرمی‌های متفاوت از گرافن اکسید در نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$

### 3- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش در سه بخش آزمایش فشار، هاپکینسون و بررسی سطح شکست نمونه‌ها آورده شده است.

#### 3-1- آزمایش فشار استاتیکی

"شکل 7" نمودار تنش-کرنش فشاری مهندسی اپوکسی و نانوکامپوزیت آن را با درصد جرمی 0.2 و 0.3 از گرافن اکسید، در نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جرمی گرافن اکسید به اپوکسی، سفتی و استحکام آن زیاد شده است. به طوری که برای 0.3% از تقویت‌کننده، استحکام نهایی حدود 20% افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش گرافن اکسید، سطح زیر نمودار نیز افزایش پیدا کرده که بیانگر بالا رفتن قابلیت اپوکسی در جذب انرژی است.

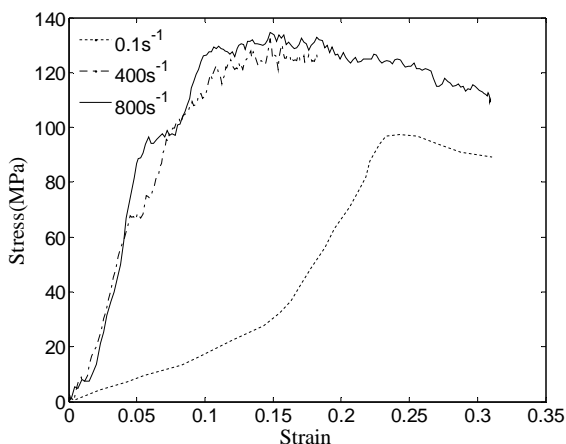
#### 3-2- آزمایش هاپکینسون

"شکل 8 و شکل 9" به ترتیب نمودار تنش-کرنش اپوکسی و نانوکامپوزیت 0.1% گرافن اکسید/اپوکسی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که رفتار اپوکسی و همچنین نانوکامپوزیت آن به شدت وابسته به نرخ کرنش بوده و با افزایش این کمیت، سفتی و استحکام آنها افزایش پیدا می‌کند. به طوری که با تغییر نرخ کرنش از  $0.1 \text{ s}^{-1}$  به  $800 \text{ s}^{-1}$  استحکام فشاری در اپوکسی و همچنین نانوکامپوزیت آن حدود 40 درصد افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر با مقایسه این دو نمودار، در نرخ کرنش‌های بالا، مشاهده می‌شود که افزودن مقدار 0.1% از گرافن اکسید تغییری را در رفتار اپوکسی ایجاد نمی‌کند.

برای اپوکسی و نانوکامپوزیت 0.3% جرمی از تقویت‌کننده، نمودارهای تنش-کرنش برای نرخ کرنش  $1100 \text{ s}^{-1}$  در "شکل 10" آورده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش این میزان از گرافن اکسید، تنها حدود 5% استحکام اپوکسی را بالا برده است.

#### 3-3- سطح شکست نمونه‌ها

نمونه‌های شکسته شده آزمایش فشار برای اپوکسی و نانوکامپوزیت 0.3% از



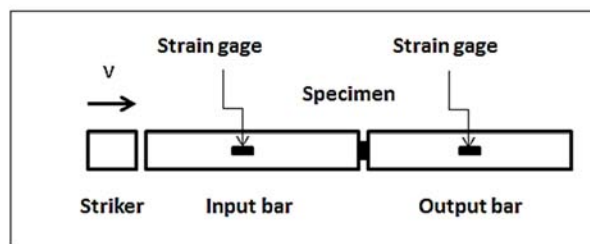
**Fig. 8** Compression stress-strain diagram of neat epoxy in different strain rates.

شکل 8 نمودار تنش-کرنش فشاری اپوکسی در نرخ کرنش‌های مختلف



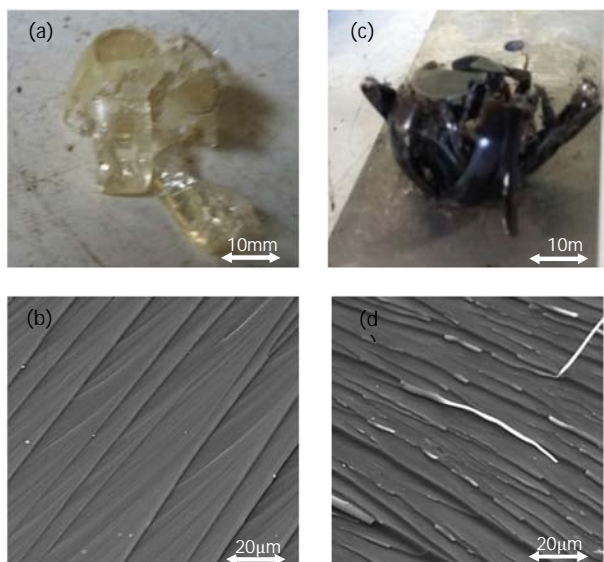
**Fig. 5** Split Hopkinson Pressure Bar and Uniaxial Compression Tests

شکل 5 دستگاه هاپکینسون فشاری و دستگاه تست فشار



**Fig. 6** Split Hopkinson Pressure Bar components

شکل 6 اجزای دستگاه هاپکینسون فشاری



**Fig. 11** Surface fracture of neat epoxy (a,b) and GO/epoxy nanocomposite (c,d) after compression test

شکل 11 سطح شکست اپوکسی (a,b) و نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی 0.3% (c,d) بعد از آزمایش فشار

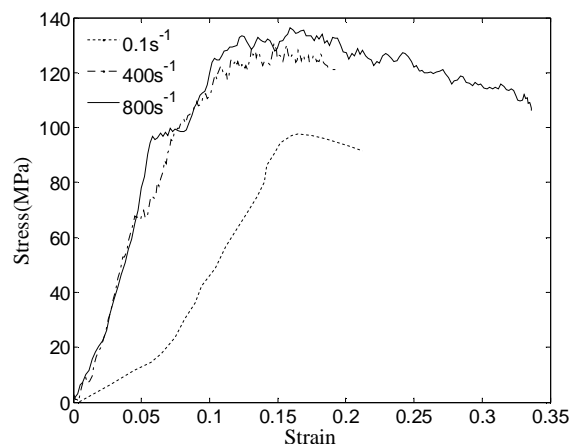
اپوکسی به شکل قابل قبولی انجام گرفته است. نتایج نشان داد که رفتار اپوکسی و نانوکامپوزیت آن به شدت وابسته به نرخ کرنش بوده به طوری که با افزایش نرخ کرنش از  $0.1 \text{ s}^{-1}$  به  $800 \text{ s}^{-1}$ ، استحکام فشاری آن حدود 40 درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که به طور کلی افزودن گرافن اکسید به اپوکسی، باعث بالا رفتن سفتی و استحکام آن می‌شود. این افزایش در نرخ کرنش‌های پایین، بیش‌تر از نرخ‌های بالا بوده و به عبارت دیگر، در نرخ‌های بالا، اثر افزودن گرافن اکسید بسیار کم بوده به طوری که افزودن مقدار 0.1% از گرافن اکسید تقریباً تغییری را در رفتار اپوکسی ایجاد نمی‌کند. برای ایجاد تغییری محسوس، لازم است که گرافن اکسید به مقدار بیش‌تری به اپوکسی افزوده شود. با افزودن 0.3% جرمی از گرافن اکسید به اپوکسی، استحکام فشاری آن در نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  و  $1100 \text{ s}^{-1}$  به ترتیب حدود 20% و 5% افزایش می‌یابد. می‌توان گفت، اثر افزودن گرافن اکسید به اپوکسی در نرخ‌های پایین از کرنش، حدوداً 4 برابر اثر آن در نرخ‌های بالا است. همچنین از مقایسه سطح شکست میان نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت آن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مشاهده شد که سطح شکست نانوکامپوزیت دارای زبری بیش‌تری نسبت به اپوکسی است. این افزایش زبری دلیلی بر جذب انرژی بیش‌تر برای نانوکامپوزیت به هنگام شکست در مقایسه با اپوکسی است. به عبارت دیگر به دلیل ایجاد میکرو ترک‌های بیشتر، به دلیل وجود نانوصفحات گرافن اکسید در نانوکامپوزیت، میزان جذب انرژی در نانوکامپوزیت بیش‌تر از اپوکسی است.

#### 5- مراجع

- [1] Y.-J. Wan, L.-C. Tang, L.-X. Gong, D. Yan, Y.-B. Li, L.-B. Wu, J.-X. Jiang, G.-Q. Lai, Grafting of epoxy chains onto graphene oxide for epoxy composites with improved mechanical and thermal properties, *Carbon*, Vol. 69, No. 1, pp. 467-480, 2014.
- [2] A. Kinloch, *Adhesion and adhesives: science and technology*, Oneth Edition, pp. 2-16, New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] A. Montazeri, J. Javadpour, A. Khavandi, A. Tcharhktchi, A. Mohajeri, Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4202-4208, 2010.
- [4] H. Lorenz, J. Fritzsche, A. Das, K. Stöckelhuber, R. Jurk, G. Heinrich, M. Kluppel, Advanced elastomer nano-composites based on CNT-hybrid filler systems, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 13, pp. 2135-2143, 2009.

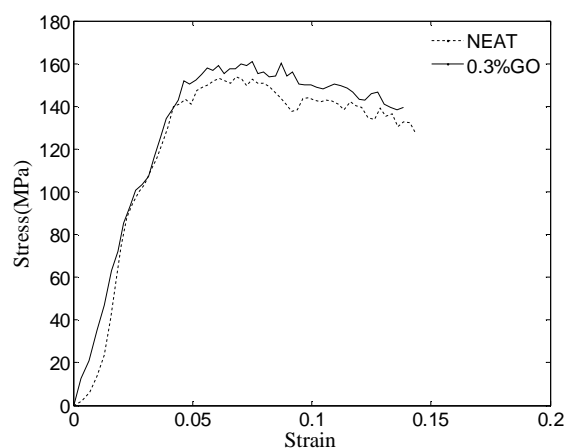
#### 4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی در نرخ کرنش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نانوکامپوزیت به روش مخلوط در حلال سنتز شد و آزمایش‌های استاتیکی فشار و هایپکینسون فشاری بر روی آن انجام گرفت. به دلیل تک لایه بودن نانوصفحات گرافن سنتز شده (از طریق مشاهده تصاویر SEM) و همچنین تشکیل کریستال مایع در محلول نانوکامپوزیت، نتیجه گرفته شد که توزیع نانوصفحات گرافن اکسید در



**Fig. 9** Compression stress-strain diagram of 0.01% GO/epoxy nanocomposite in different strain rates

شکل 9 نمودار تنش-کرنش فشاری نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی با درصد جرمی 0.1 در نرخ کرنش‌های مختلف



**Fig. 10** Compression stress-strain diagram of epoxy and 0.03% GO/epoxy nanocomposite in 1100/s of strain rate

شکل 10 نمودار تنش-کرنش فشاری اپوکسی و نانوکامپوزیت گرافن اکسید/اپوکسی با درصد جرمی 0.3 در نرخ کرنش  $1100 \text{ s}^{-1}$

گرافن اکسید و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست آن‌ها در "شکل 11" نشان داده شده است. دیده می‌شود که نحوه شکست اپوکسی با کامپوزیت آن متفاوت بوده، به طوری که نمونه کامپوزیتی بعد از انجام گرفتن آزمایش روی آن، به تعداد قطعه بیش‌تری شکسته می‌شود. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که زبری سطح شکست در کامپوزیت بیش‌تر از اپوکسی است. در واقع وجود صفحات گرافن اکسید باعث انشعاب ترک شده و این امر باعث لایه‌لایه شدن و افزایش زبری سطح شکست می‌شود [13].

- graphene oxide/polypropylene nanocomposite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 196-206, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] M. M. Shokrieh, R. Mosalmani, M. J. Omid, Strain rate dependent micromechanical modeling of reinforced polymers with carbon nanotubes, *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 27, pp. 3381-3393, 2013.
- [11] P. Ma, G. Jiang, Q. Chen, H. Cong, X. Nie, Experimental investigation on the compression behaviors of epoxy with carbon nanotube under high strain rates, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 69, No. 1, pp. 526-533, 2015.
- [12] E. Jokar and S. Shahrokhian, Growth control of cobalt oxide nanoparticles on reduced graphene oxide for enhancement of electrochemical capacitance, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 36, pp. 21068-21075, 2014.
- [13] Y. Zhou, F. Pervin, L. Lewis, S. Jeelani, Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 452, No. 1, pp. 657-664, 2007.
- [5] J. T. Paci, T. Belytschko, G. C. Schatz, Computational studies of the structure, behavior upon heating, and mechanical properties of graphite oxide, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 111, No. 49, pp. 18099-18111, 2007.
- [6] W. S. Hummers Jr and R. E. Offeman, Preparation of graphitic oxide, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 80, No. 6, pp. 1339-1339, 1958.
- [7] Q. Liu, X. Zhou, X. Fan, C. Zhu, X. Yao, Z. Liu, Mechanical and thermal properties of epoxy resin nanocomposites reinforced with graphene oxide, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 251-256, 2012.
- [8] N. Norhakim, S. H. Ahmad, C. H. Chia, N. M. Huang, Mechanical and thermal properties of graphene oxide filled epoxy nanocomposites, *Sains Malaysiana*, Vol. 43, No. 4, pp. 603-609, 2014.
- [9] M. Gharebeiglou, M. Sh. Izadkhah, H. Erfan-Niya and A. A. Entezami, Improving the mechanical and thermal properties of chemically modified