



بررسی تجربی تاثیر نانولوله‌های کربنی بر مود اول چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه/اپوکسی

میثاق کرمان‌ساروی¹، محمدحسین پل^{2*}، محمدحسن ستاری²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تدپسئ، کدپسئ 143- 14115، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 دی 1394

پذیرش: 15 بهمن 1394

ارائه در سایت: 12 اسفند 1394

کلید واژگان:

شکست بین لایه ای مود اول

کامپوزیت چند لایه

نانولوله‌های کربن

نانو کامپوزیت

چکیده

در این مقاله تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر کشش و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی، مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. به این منظور، نمونه‌های آزمایش مود اول شکست نانوکامپوزیت هیبریدی با زمینه اپوکسی که 18 لایه الیاف شیشه بافته شده دارند، به روش لایه‌چینی دستی تولید شدند. اپوکسی در این سیستم، اپون 828 می‌باشد، از 205 به عنوان سخت‌کننده، استفاده شده است. همچنین از نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با هیدرواکسید به عنوان تقویت‌کننده با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 نسبت به وزن کل زمینه استفاده گردید. علاوه بر آن نمونه‌های کشش نانو رزین و نانوکامپوزیت هیبریدی ساخته شد. با بررسی نتایج آزمون کشش رزین مشاهده شده است بیشترین تغییر در مدول ینگ، استحکام نهایی و چقرمگی شکست نانو رزین مربوط به نمونه 0.5 درصد وزنی می‌باشد که به ترتیب با افزایش 31.2، 21.4 و 16.66 درصد نسبت به نمونه خالص همراه می‌باشد. همچنین بیشترین تغییر چقرمگی شکست، استحکام نهایی کششی و کرنش شکست نانوکامپوزیت‌های هیبریدی در 0.5 درصد وزنی می‌باشد که به ترتیب 12.6، 3.7 و 9.8 درصد نسبت به نمونه خالص افزایش می‌یابد. نتایج آزمون مود اول شکست بین‌لایه‌ای حاکی از آن بود که بیشترین تغییر نیرو (در نمودار نیرو-جابجایی مود اول شکست بین‌لایه‌ای) و انرژی (شکست بین‌لایه‌ای مود اول در گسترش ترک) مربوط به نانوکامپوزیت 0.5 درصد بوده که نسبت به کامپوزیت خالص 24.4 و 24.15 درصد افزایش می‌یابد.

Experimental investigation of the influence of adding Carbon nanotubes on Mode I interlaminar fracture toughness of laminated composites

Misaq Kermansaravi, Mohammad Hosein Pol*, Mohamad Hasan sattari

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 13 January 2016

Accepted 04 February 2016

Available Online 02 March 2016

Keywords:

Mode I interlaminar fracture

Laminated composite

Carbon nanotube

nanocomposite

ABSTRACT

In this research, the influence of adding carbon nanotubes on the tensile and the mode I interlaminar fracture of glass-fiber-epoxy laminated composite has been experimentally studied. For this purpose, the hybrid glass-fiber-epoxy-nanotube laminated composites which have 18 fiber-glass plain-weave layers were manufactured by hand lay-up method. The epoxy resin system is made of Epon828 resin with Epikure F205 as the curing agent. The multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) modified with hydroxide (-COOH) is also dispersed into the epoxy system as a reinforcement in a 0%, 0.1%, 0.5% and 1% ratio in weight with respect to the matrix. In addition, the tensile nano-resin and hybrid nano-composite specimen were produced. The results of the tensile test of nano-matrixes indicate that the maximum change in Young's modulus, ultimate strength and fracture toughness of the samples is in the 0.5% sample, with a 31.2%, 21.4% and 16.66% increase with respect to neat sample, respectively. Moreover, the results of the tensile test of hybrid nano-composites indicate that the maximum change in fracture toughness, ultimate strength and fracture strain and of the samples is in the 0.5% sample, with a 12.6%, 9.8% and 12.6% increase with respect to neat sample, respectively. The result of the mode I interlaminar fracture toughness test of hybrid nano-composites shows that the maximum change in value of the force (in force-displacement diagram) and value of the energy (of crack propagation in mode I interlaminar fracture), is in 0.5% sample, with a 24.4% and 24.15% increase respect to neat sample, respectively.

1- مقدمه

این مواد جایگزین بسیاری از مواد فلزی و غیرفلزی شده است. مواد

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنعت‌های مختلف افزایش یافته است و کامپوزیتی به‌دلیل مزایای بالایی همچون مقاومت زیاد در برابر خوردگی و

Please cite this article using:

M. Kermansaravi, M. H. Pol, M. H. sattari, Experimental investigation of the influence of adding Carbon nanotubes on Mode I interlaminar fracture toughness of laminated composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 193-201, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Kermansaravi, M. H. Pol, M. H. sattari, Experimental investigation of the influence of adding Carbon nanotubes on Mode I interlaminar fracture toughness of laminated composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 193-201, 2016 (in Persian)

هندسی نمونه مانند ضخامت (h) و طول ترک اولیه (a_0) را بر منحنی مقاومت¹ نمونه‌های مود اول شکست (تیر دو لبه متقارن یک سر گیردار²) کامپوزیت تک‌جهته شیشه/اپوکسی، بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در منحنی مقاومت نمونه در بازه $8.5 < a_0/h < 19$ میزان تغییرات سه پارامتر چقرمگی شروع شکست، طول ناحیه پل‌زنی الیاف و چقرمگی گسترش ترک ناچیز است [6].

دانشمندان پیش‌بینی کرده‌اند که با افزودن نانوذرات به مواد، خواص الکتریکی، مکانیکی، حرارتی و بسیاری از خواص دیگر مواد بهبود پیدا می‌کند. تجربه و آزمایش‌ها، درستی این فرضیه را اثبات کرده‌اند [7]. همان‌طور که در بالا اشاره شده است، کامپوزیت‌ها موادی نسبتاً با چگالی کم و خواص استحکامی بالا هستند. بهبود و تقویت هر چه بیشتر خواص کامپوزیت‌ها به کمک نانوتکنولوژی، دانشمندان را بر آن داشته که در این حوزه تحقیقات فراوانی انجام دهند. از آن جمله می‌توان به بالا بردن چقرمگی کامپوزیت پایه پلیمری ترد همچون اپوکسی³ به کمک افزودن نانوذرات به زمینه⁴ یا الیاف⁵ کامپوزیت‌ها اشاره کرد [7].

تسای و همکاران نانوذرات سیلیکاتی⁶، لاستیکی⁷ و مخلوطی از نانوذرات سیلیکاتی-لاستیکی را با درصدهای وزنی مختلف به کامپوزیت شیشه/اپوکسی اضافه کردند و طی آزمایش‌هایی که بر روی اپوکسی و کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌ها 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 لایه‌ای مود اول کامپوزیت، افزایش می‌یابد، همچنین آن‌ها گزارش دادند که تاثیر نانوذرات لاستیکی در بالا بردن میزان چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی، نسبت به نانوذرات سیلیکاتی و مخلوطی از سیلیکاتی-لاستیکی، بیشتر می‌باشد [8].

بشر و همکاران نانوذرات رسی⁸ را به کامپوزیت بازالت/اپوکسی اضافه کردند و مقدار انرژی شکست بین لایه‌ای مود اول را در درصدهای حجمی مختلف الیاف اندازه‌گیری و مقایسه کردند و آن‌ها طی آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش درصد حجمی الیاف باعث بالا رفتن انرژی شکست بین لایه‌ای مود اول می‌شود [9].

اسکیزیک و همکاران نانولوله‌های کربن⁹ را به رزین به صورت مستقیم و هم به الیاف و رزین کامپوزیت شیشه/اپوکسی به کمک روش‌های شیمیایی اضافه کردند و طی آزمایش‌هایی مقدار انرژی شکست بین لایه‌ای مود اول را اندازه‌گیری و چگونگی تغییر در مقاومت بین لایه‌ای مود اول را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانولوله‌های کربنی، انرژی شکست بین لایه‌ای مود اول افزایش می‌یابد و با افزودن نانولوله‌های کربنی به سطح الیاف، بهبود قابل توجهی در مقدار مقاومت بین لایه‌ای مود اول بدست می‌آید [10].

فالزون و همکاران نانولوله‌های کربنی را به لایه‌ی میانی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به کمک فشار و حرارت اضافه کردند و آزمون‌های مربوط به مود اول و مود دوم¹⁰ را بر روی نمونه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی انجام

عوامل شیمیایی و استحکام بالا نسبت به وزن کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند، به عنوان مثالی از این کاربردها می‌توان استفاده از کامپوزیت‌ها در ساخت بدنه هواپیما در صنعت هوافضا، بدنه‌ی کشتی‌ها در صنعت دریایی، قطعات خودروها، قسمت‌هایی از جلیقه ضدگلوله در صنعت نظامی، قسمت‌های تقویت کننده سازه‌های بتونی را نام برد. در مواد کامپوزیتی ممکن است اشکال مختلف تخریب رخ بدهد. تخریب کامپوزیت به دو دسته‌ی درون لایه‌ای و جدایش بین لایه‌ای تقسیم می‌شود. از مهمترین مودهای تخریب‌ها می‌توان، شکست بین لایه‌ای یا تورق که یکی از انواع خرابی جدایش بین لایه‌ای می‌باشد را نام برد که خرابی‌های زیادی از جمله کاهش قابلیت تحمل بار را به بار می‌آورد. تورق در مواد مرکب به دلیل رشد ترک در بین لایه‌ها می‌باشد و در اثر عواملی مثل ایجاد ترک در زمینه، ضربه، اثرات لبه آزاد، سوراخ کاری و ناپیوستگی در قطعه کامپوزیتی در حین ساخت قطعه می‌تواند ایجاد شود [1، 2]. در حالت کلی تورق در مواد به سه مود (1) مود اول، حالت بازشدگی ترک در خلاف جهت، (2) مود دوم، که در این حالت لغزیدن لبه‌های ترک در جهت عمود بر صفحه پیشانی ترک روی هم، (3) مود سوم، لغزیدن لبه‌های ترک به موازات صفحه پیشانی ترک روی هم و یا ترکیبی از این سه مود امکان پذیر است [3]. در این تحقیق تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر مقاومت شکست بین لایه‌ای مود اول بررسی شده است.

طراحی بهینه و کارآمد قطعات کامپوزیتی، نیازمند آگاهی از مقاومت ماده در برابر شکست بین لایه‌ای و همچنین مکانیزم شکست و چگونگی رفتار ماده مربوط به آن است [4]. برای سازه‌های کامپوزیتی که تحت بارگذاری ضربه‌ای و یا نیروهای کششی و برشی می‌باشند، مود اول شکست بین لایه‌ای بیشترین اهمیت را دارد. نتایج پژوهش‌ها و آزمایش‌های 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 ضربه‌ای است. آگاهی از مقدار مقاومت شکست بین لایه‌ای مود اول سازه‌های کامپوزیتی چندلایه تحت بارهای کششی یا ضربه، کمک بزرگی به طراحی این گونه سازه‌ها می‌کند و عمر سازه‌ها را قابل پیش‌بینی‌تر می‌کند. رسیدن به این آگاهی، مستلزم انجام آزمایش‌های اولیه کشش و شکست مود اول می‌باشد.

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوان و گسترده‌ای پیرامون ابعاد مختلف تورق اعم از مود شکست، جنس مواد، چگونگی ساختار مواد، شرایط آزمایشگاهی و سرعت بارگذاری انجام گرفته است. از جمله تحقیقات تجربی، می‌توان به کار یساعی و همکاران اشاره کرد که آن‌ها تاثیر جاسازی مواد مختلف در لایه میانی کامپوزیت شیشه/اپوکسی را بر چگونگی تغییر میزان انرژی مود اول شکست بین لایه‌ای بررسی کردند. آن‌ها نوار فیلم گرمانرم، ذرات ترموپلاستیک، الیاف خردشده، فیلم چسب گرماسخت و ذرات چسب گرماسخت را به صورت جداگانه در صفحه میانی و مسیر ترک هر نمونه مود اول شکست بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه/اپوکسی قرار دادند و آزمون‌های مربوط به مود اول شکست را برای نمونه‌های کامپوزیتی انجام دادند. نتایج آزمون‌ها حاکی از آن بود که جاسازی این مواد در صفحه میانی نمونه‌ها باعث انحراف و طولانی‌تر شدن مسیر ترک و در نتیجه افزایش میزان چقرمگی شکست مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌شود [5].

شکریه و همکاران نمونه‌های مود اول شکست کامپوزیت تک‌جهته شیشه/اپوکسی را با طول‌های مختلف ترک اولیه (a_0) ساختند و آزمایش مود اول شکست را بر روی نمونه‌ها انجام دادند. آن‌ها تاثیر پارامترهای ابعاد

1- R-curve
2- Double cantilever beam
3- epoxy
4- matrix
5- fibre
6- CTBN
7- CSR
8- Nano clay
9- Carbon nanotubes
10- ENF

نوع 7^ا با نام تجاری ایپون 828 و ب) سخت‌کننده سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205⁸ می‌باشد، که با نسبت وزنی 1 به 2 نسبت به رزین اپوکسی طبق دستور سازنده با آن مخلوط می‌شود. نانولوله‌های کربنی استفاده شده در نمونه‌ها، نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیدروکسید⁹ با مشخصات درج شده در جدول 1 می‌باشند.

2-2- آماده‌سازی زمینه

در ابتدا نانولوله‌های کربنی را به مدت 24 ساعت در دمای 70 درجه‌ی سلسیوس قرار داده شد، تا کاملاً خشک شود، سپس نانولوله‌های کربنی را با درصد‌های وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 نسبت به کل وزن زمینه (شامل رزین و سخت‌کننده) به ایپون 828 اضافه شد. برای اطمینان از پخش شدن یکسان نانولوله‌های کربنی در ایپون 828 و همگن بودن مخلوط حاصله، مخلوط به مدت 2.5 ساعت با دستگاه همزن سرعت بالا با سرعت دورانی 3000rpm هم‌زده شد. سپس مخلوط به مدت نیم ساعت در دستگاه اولتراسونیک با توان مخصوص 150kW/cm² و فرکانس 0.5kHz و دامنه نوسان 87.5µm قرار داده تا نانولوله‌های کربنی به صورت یکنواخت در رزین پخش شوند. در ادامه یک ساعت مجدداً مخلوط با سرعت دورانی 3000rpm هم‌زده شد. به منظور حباب‌گیری و خروج حباب‌های هوا از مخلوط، مخلوط در دستگاه آون خلا به مدت 15 دقیقه قرار داده شد. در نهایت، سخت‌کننده با نسبت وزنی 1 به 2 نسبت به رزین اپوکسی به مخلوط اضافه و به مدت 5 دقیقه بطور دستی هم‌زده شد.

2-3- ساخت نمونه‌های کشش نانو رزین

برای دستیابی به خواص مکانیکی نانو رزین‌ها، از قالب سیلیکونی به منظور ساخت نمونه‌های کشش استفاده گردید. لازم به ذکر است که از قالب‌های سیلیکونی به دلیل مقاومت حرارتی، دقت ابعادی، انتقال حرارت و انعطاف‌پذیری بالا استفاده می‌شود [15]. نمونه‌ها پس از قالب‌ریزی، به مدت یک ساعت در دستگاه آون در دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. سپس به مدت یک روز در دمای محیط قرار می‌گیرند تا پخت آن‌ها کامل گردد، در شکل 1 نمونه‌های نانو رزین نشان داده شده است.

2-4- ساخت نمونه‌های کشش نانوکامپوزیت‌های هیبریدی

به منظور بدست آوردن خواص کششی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی، نمونه‌های کشش با درصد‌های وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 به روش لایه‌چینی دستی¹⁰ با 12 لایه و با ابعاد 25×2.5cm طبق استاندارد ASTM D3039 ساخته شد.

جدول 1 مشخصات نانولوله‌های کربنی

ردیف	نام فارسی مشخصه	نام لاتین مشخصه	اندازه مشخصه
1	قطر	OD	8-15 nm
2	طول	Length	~50 µm
3	مقدار هیدروکسید	-COOH content	2.56 wt%
4	خلوص	Purity	>95 wt%
5	خاکستر	Ash	<1.5 wt%
6	مساحت جانبی برحرم	SSA	>233 m ² /g
7	هدایت الکتریکی	EC	s/cm 10 ²

7- Diglycidyl ether of bisphenol A
8- Epikure F-205
9- COOH
10- Hand lay up

دادند و مقدار تغییر مقدار انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود اول و دوم را به‌واسطه‌ی افزودن نانولوله‌های کربنی بررسی کردند. آن‌ها شاهد افزایش مقدار چقرمگی شکست مود اول (61 درصد) و مود دوم (161 درصد) بوده‌اند [11].

سیلوا و همکاران نانولوله‌های کربنی¹ و نانوذرات رسی را با درصد‌های مختلف به کامپوزیت شیشه/اپوکسی اضافه کردند و آزمایش‌های مود اول و دوم و سوم را بر روی نمونه‌های بدون نانو و با ذرات نانو انجام دادند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند، با افزودن مقدار کم نانولوله‌های کربنی، میزان انرژی شکست بین‌لایه‌ای به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در مود اول با افزودن 0.5 درصد نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت مذکور افزایش 15 درصد در انرژی شکست بین‌لایه‌ای و با افزودن 3 درصد نانوذرات رسی افزایش 30 درصد در انرژی شکست بین‌لایه‌ای را مشاهده کرده‌اند [12].

آیت‌اللهی و همکاران با افزودن نانولوله‌های کربنی با درصد‌های وزنی مختلف به رزین اپوکسی² و سخت‌کننده³ تاثیر آن‌ها را بر روی مقدار انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود اول و دوم را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند افزودن نانولوله‌های کربنی باعث افزایش بیشتری در مقدار انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود دوم نسبت به مقدار انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود اول می‌شود. آن‌ها همچنین بیان می‌کنند که بیشترین مقدار افزایش انرژی شکست بین‌لایه‌ای در مود اول مربوط به 0.5 درصد نانولوله‌های کربنی می‌باشد [13].

موحدی آئنی و همکاران نانوذرات سیلیکاتی را با درصد‌های وزنی مختلف به کامپوزیت شیشه/اپوکسی اضافه کردند و همچنین در ساخت کامپوزیت‌ها، چند درصد حجمی الیاف مختلف به کار بردند و تاثیر نانوذرات و درصد حجمی الیاف کامپوزیت را بر روی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول و دوم بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات سیلیکاتی باعث افزایش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول و دوم می‌شود، همچنین با بالا رفتن درصد حجمی الیاف، میزان چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول و دوم کاهش می‌یابد [14].

در این تحقیق، به بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی با درصد‌های مختلف بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی پرداخته شد. به این منظور، نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی ساخته شده و مورد آزمایش شکست بین‌لایه‌ای مود اول قرار گرفتند. در نهایت تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر روی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد ارزیابی قرار گرفت.

2- مواد و ساخت نمونه‌ها

2-1- مواد

نانوکامپوزیت ساخته شده در این پژوهش شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند دیواره⁴ می‌باشد. الیاف به‌کار رفته برای ساخت نمونه‌ها، الیاف شیشه سری ای⁵ می‌باشد. این الیاف صفحه‌ای و بافته شده⁶ و دارای خواص مکانیکی یکسان در راستای طولی و عرضی می‌باشند. جرم واحد سطح الیاف 200g/m² و چگالی حجمی 2400 kg/m³ می‌باشد. رزین به کار رفته در این پژوهش اپوکسی دو جزئی (الف) پلیمر دیکلیسیدیل‌تر بیسفنول

1- MWCNT
2- ML_506
3- HA-11
4- MWCNT
5- E-glass fibre
6- woven

آزمون کشش برای نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی براساس استاندارد ASTM D3039 انجام گرفت. در دو سر نمونه‌ها تب کامپوزیتی قرار داده شده است. تب مانع از سر خوردن نمونه و ایجاد تمرکز تنش شده و باعث انتقال بهتر نیرو می‌شود. برای هر درصد وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1، تعداد تکرار آزمایش 5 بار در نظر گرفته شد. همچنین از اکستنسومتر برای اندازه‌گیری بهتر و دقیق‌تر مقدار تغییر طول استفاده گردید. در شکل 3 نمونه‌ی نانوکامپوزیت هیبریدی تحت کشش دیده می‌شود.

2-3- آزمایش مود اول شکست بین لایه‌ای

در این پژوهش برای هر درصد نانولوله‌های کربنی، 5 نمونه ساخته و مورد آزمایش مود اول شکست، مطابق با استاندارد ASTM D-5528 و به روش تیر دولبه یک سر گیردار، قرار گرفت. آزمایش‌ها به کمک دستگاه سرومکانیکی 30 تن ساخت شرکت تایمز چین طبق استاندارد با سرعت 2mm/min انجام گردید. در شکل 4 نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی تحت آزمون مد اول شکست قابل رویت است.

در این آزمایش، در قسمت سر نمونه، از دو لولا قسمت بالا و پایین استفاده شده است که نمونه به واسطه‌ی این دو لولا به فک بالا و پایین وصل می‌شود و دلیل اصلی استفاده از لولا، اعمال نیرو از فک‌ها به نمونه می‌باشد. قبل از انجام آزمایش، لبه‌های نمونه‌ها هم با دقت سمباده‌کاری می‌شوند تا دقت اندازه‌گیری بالا رود و هم بر روی سطوح جانبی نمونه‌ها لاک غلط‌گیر زده شود تا با علامت‌گذاری با فواصل مشخص بر روی لاک سطوح جانبی، رشد ترک به سادگی قابل رویت باشد. با رشد ترک در طی مدت بارگذاری و



Fig. 3 The hybrid nanocomposite specimen under tensile test

شکل 3 نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی تحت آزمون کشش

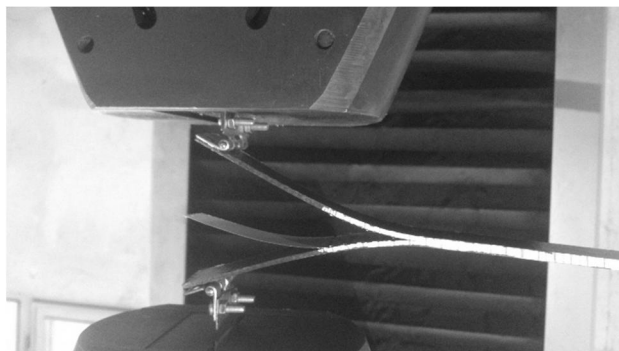


Fig. 4 The DCB hybrid nanocomposite specimen under mode I test

شکل 4 نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی DCB تحت آزمون مد اول



Fig.1 The tensile test specimens of the nano-resin

شکل 1 نمونه‌های آزمون کشش نانو رزین

2-5- ساخت نمونه‌های آزمایش مود اول شکست

نمونه‌های نانوکامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده، دارای 18 لایه دوجته (بافته شده) با درصد وزنی الیاف حدود 45 درصد می‌باشند. نمونه‌ها در ابتدا به صورت صفحات بزرگ ساخته شده‌اند و سپس برای رسیدن به ابعاد موردنظر طبق استاندارد ASTM D5528 بریده شده‌اند. ابعاد نمونه و طول ترک اولیه (4 سانتی‌متر مطابق نمونه لولای پیلانو¹ استاندارد) در شکل 2 قابل مشاهده است. برای ایجاد ترک اولیه از ورقه نجسب تفلونی به طول 5 سانتی-متر و به ضخامت 20μm استفاده گردید، ورقه تفلونی در مرحله ساخت نمونه در صفحه‌ی میانی بین لایه‌ی 9 و 10 قرار گرفت. برای پخت نمونه‌های نانوکامپوزیت باید دقت داشت که نمونه‌ها همزمان باید تحت فشار و حرارت باشند، به این منظور از دو صفحه صلب استفاده گردید به طوری که این دو صفحه صاف بعنوان قید و بند در دو طرف صفحه نمونه قرار گرفته و با متصل شدن به هم توسط پیچ و مهره، نمونه را تحت فشار قرار می‌دهد. در ادامه نمونه‌ها به مدت 1 ساعت در کوره در دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد قرار می‌گیرد تا پخته شوند. پس از پخت با توجه به ابعاد که در شکل 2 مشخص شده، نانوکامپوزیت‌ها بریده می‌شوند و در دو سر لبه‌ی ترک آن‌ها لولا نصب گردید. راستای برش موازی راستای الیاف می‌باشد [16].

در ادامه برای رسیدن به ابعاد استاندارد نمونه‌ها بریده شدند. راستای برش موازی با راستای الیاف می‌باشند.

3- آزمایش

1-3- آزمایش کشش نمونه‌های نانو رزین و نانوکامپوزیت هیبریدی

آزمون کشش به کمک دستگاه سرومکانیکی 30 تن ساخت شرکت تایمز چین و با استفاده از لودسل 500 کیلوگرمی و با سرعت 2mm/min در آزمایشگاه ضربه و کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گردید. آزمون کشش برای نمونه‌های نانو رزین براساس استاندارد ASTM D638 M-9 و

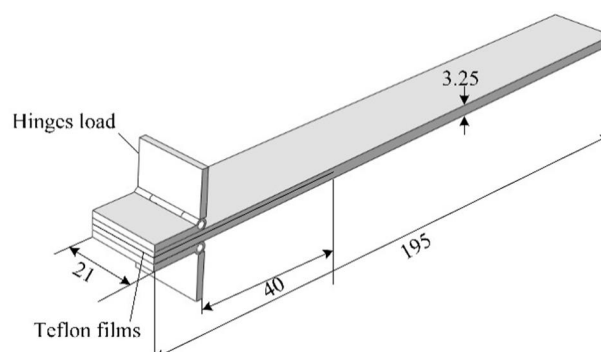


Fig. 2 Geometry and dimensions of DCB specimen (all dimensions are in mm)

شکل 2 هندسه و ابعاد نمونه DCB (تمامی ابعاد به میلی‌متر می‌باشد)

1- piano hinges

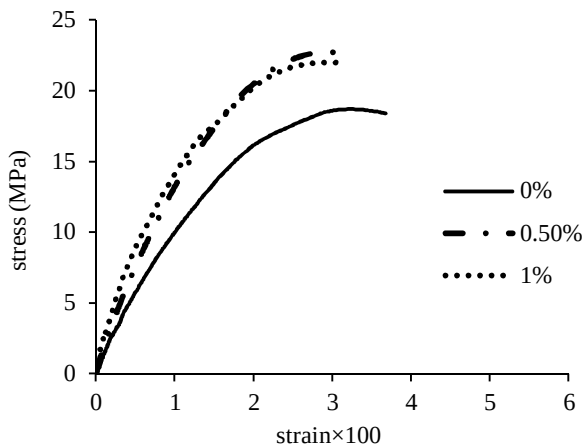


Fig. 5 The stress-strain diagrams of the nano-resin specimens

شکل 5 نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های نانورزین

جدول 2 خواص کششی نانو رزین

Table 2 The nano-resin tensile properties

چقرمگی شکست MJ/m ³	مدول یانگ GPa	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی MPa	wt %
0.30±0.02	0.5751	3.26±0.17	18.72±0.38	0
0.35±0.05	0.7547	3.03±0.3	22.74±1.6	0.5
0.29±0.04	0.7489	2.95±0.26	22.04±0.81	1

با توجه به اطلاعات جدول 3 مشاهده می‌شود، تنها در نمونه‌ی 0.5 درصد، افزایش مقدار استحکام نهایی و چقرمگی دیده می‌شود و در بقیه درصدها تغییر محسوسی در مقادیر به چشم نمی‌آید. مقدار چقرمگی شکست و استحکام نهایی در 0.5 درصد نسبت به نمونه‌ی خالص بدون نانو به ترتیب 12.6 و 3.7 درصد افزایش یافته است. در واقع نانولوله‌های کربنی موجود در نانوکامپوزیت هیبریدی 0.5 درصد، باعث ازدیاد چقرمگی شکست به دلیل افزایش استحکام نهایی توأم با افزایش کرنش شکست نانوکامپوزیت هیبریدی شده است. نمودارهای آزمون کشش نانوکامپوزیت‌ها تقریباً روی هم می‌باشند و این نشان‌دهنده این است که مقدار تغییرات در نمودار تنش-کرنش نانوکامپوزیت‌های هیبریدی اندک می‌باشد.

4-2- نتایج آزمایش‌های مود اول شکست بین لایه‌ای

شکل 7 نمودار منتخب نیرو نسبت به جابجایی محل اعمال نیرو برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌توان دید منحنی‌ها از سه ناحیه تشکیل شده است. همان‌طور که در این تقسیم‌بندی نمایش داده شده است، در تمامی نمودارها در ابتدا ناحیه خطی مشاهده می‌شود و پس از آن بعد از ناحیه خطی وارد ناحیه دوم می‌شود. در ناحیه دوم نیرو به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد تا به مقدار حداکثر خود برسد ناحیه

جدول 3 خواص کششی نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی

Table 3 The tensile properties of the hybrid nanocomposite specimens

چقرمگی شکست MJ/m ³	مدول یانگ GPa	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی MPa	wt %
0.63±0.023	24.78±0.23	0.71±0.03	175.98±5.77	0
0.65±0.045	24.31±0.30	0.73±0.03	177.52±5.08	0.1
0.71±0.068	23.41±0.14	0.78±0.04	182.64±8.20	0.5
0.63±0.044	23.81±1.6	0.73±0.05	173.87±0.23	1

رسیدن ترک به هر نقطه علامت‌گذاری شده روی سطح جانبی نمونه، یک اپراتور با تاباندن نور به لبه جانبی نمونه، رشد ترک و رسیدن نوک ترک به نقطه علامت‌گذاری شده را اعلام می‌کند و اپراتور دیگری همزمان پشت رایانه دستگاه کشش، با اعلام اپراتور اول زمان گذر ترک از نقطه علامت‌گذاری شده را (برنامه رایانه که نمودار نیرو-جابجایی را ترسیم می‌کند زمان را هم نمایش می‌دهد) ثبت می‌کند. این عمل برای تمامی نقاط علامت‌گذاری شده روی طول نمونه انجام می‌شود تا به ازای طول‌های مختلف رشد ترک، زمان‌های مربوط به آن طول‌ها مشخص شود. خروجی دستگاه کشش نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد، البته علاوه بر آن زمان‌های مربوط به جابجایی هر نقطه را می‌دهد. در نتیجه به کمک پارامتر زمان که در هنگام انجام آزمون برای طول‌های مختلف ترک ثبت شده است، مقدار جابجایی نقطه اثر نیرو و نیرو به ازای طول ترک به دست می‌آید و با روابط چقرمگی که بعداً بیان می‌شود، در نهایت نمودار چقرمگی برحسب طول ترک را می‌توان رسم کرد.

4- نتایج

4-1- نتایج آزمایش کشش

4-1-1- نتایج آزمایش کشش نانو رزین

نمودارهای حاصل از آزمون کشش نانو رزین در شکل 5 نشان شده است. همان‌طور که می‌توان دید اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به رزین باعث تغییر در خصوصیات مکانیکی رزین می‌شود و این امر به واسطه درگیر شدن نانولوله‌های کربنی با زنجیره‌های پلیمری بوده که با ایجاد پیوند چسبندگی بین آن‌ها، تحرک و جابجایی زنجیره‌های پلیمری در هنگام بارگذاری کمتر می‌شود.

حضور نانولوله‌های کربنی در رزین می‌تواند باعث افزایش استحکام و کاهش کرنش شکست رزین شود. با دقت در جدول 2 مشاهده می‌شود که بیشترین مدول یانگ مربوط به نانو رزین 0.5 درصد می‌باشد که نسبت به رزین بدون نانو به مقدار 31.2 درصد افزایش یافته است این در حالیست که مقدار مدول یانگ نانو رزین 1 درصد کمی کمتر و نزدیک به این مقدار می‌باشد. در خصوص استحکام نهایی هم همین‌گونه می‌باشد، یعنی مقدار استحکام نهایی نانو رزین 0.5 درصد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و به مقدار 21.5 درصد نسبت به استحکام نهایی رزین بدون نانو افزایش پیدا کرده است. با انتقال‌گیری از سطح زیر نمودار تنش-کرنش مقدار چقرمگی نانو رزین‌ها مشخص می‌شود که با توجه به جدول، این مقدار برای 0.5 درصد دارای بیشترین مقدار می‌باشد و برای نانو رزین 1 درصد این مقدار نسبت به چقرمگی شکست رزین بدون نانو کاهش می‌یابد. تجمع توده نانولوله‌های کربنی در رزین اپوکسی مثل جسم صلب عمل می‌کند و مانع از رشد ترک در مسیر مستقیم و باعث طولانی شدن مسیر ترک می‌شود، در نتیجه چقرمگی شکست نمونه 0.5 درصد نسبت به نمونه خالص بیشتر است. ولی در نمونه‌های با درصد بیشتر نانولوله‌ها، تجمع بیشتر همین نانولوله‌ها، باعث ایجاد تمرکز تنش شده و باعث تسهیل در گسترش ترک می‌شود. در نتیجه چقرمگی شکست نمونه 1 درصد نسبت به نمونه خالص کمتر می‌شود، این نتیجه در مراجع [15] و [17] نیز برای موارد مشابه دیده شده است.

4-1-2- نتایج آزمایش کشش نانوکامپوزیت هیبریدی

نمودارهای میانگین حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های نانوکامپوزیت‌های هیبریدی و خلاصه نتایج بدست آمده از آن‌ها، در شکل 6 و جدول 3 نمایش داده شده است.

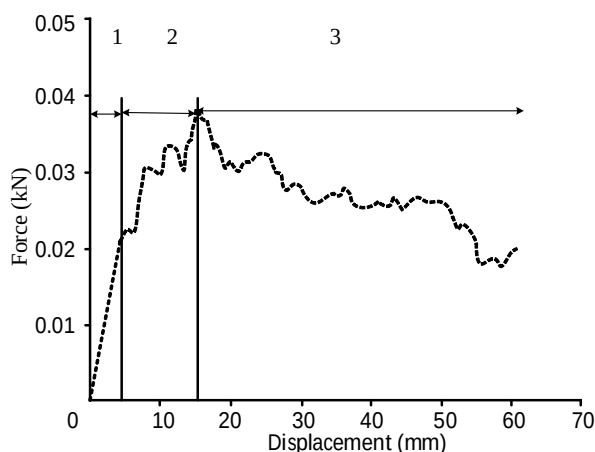


Fig. 7. Force-displacement diagram of the mode I test of glass/epoxy composite

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش مود اول کامپوزیت شیشه/اپوکسی

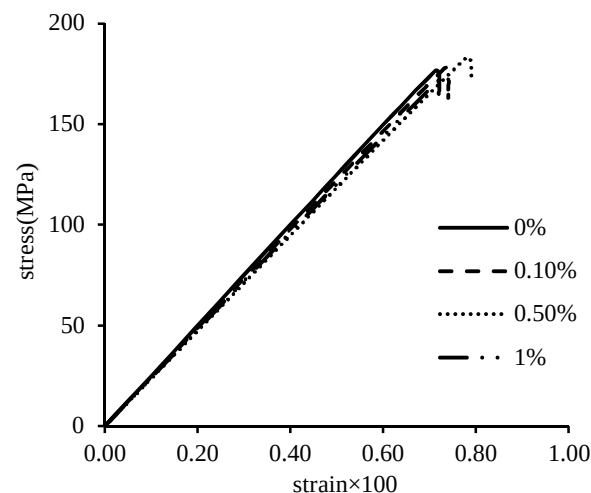


Fig. 6 The stress-strain diagrams of the nanocomposite specimens

شکل 6 نمودار تنش-کرنش نمونه های نانوکامپوزیت هیبریدی

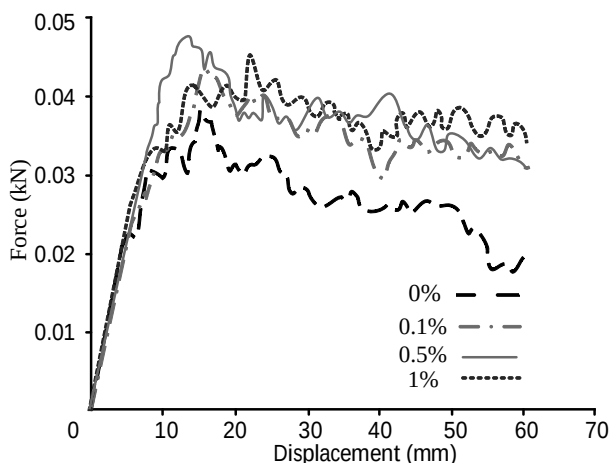


Fig. 8 The force-displacement diagrams of the mode I test of the hybrid nanocomposites

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش مود اول نانوکامپوزیت های هیبریدی

برای محاسبه انرژی کرنشی آزاد شده (انرژی شکست بین لایه ای) مود اول مطابق با استاندارد ASTM D 5528 سه روش وجود دارد:

تیر ساده³

تیر اصلاح شده⁴

کالیبراسیون نرمی⁵

در روش تیر ساده، رفتار نمونه آزمایش مود اول مانند تیر یکسرگیردار

در نظر گرفته می شود، رابطه نرخ انرژی کرنشی آزاد شده به صورت [16]:

$$G = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

که در آن a طول ترک، P نیرو، δ مقدار جابجایی نقطه اثر نیرو در راستای نیرو و b عرض نمونه می باشد.

پارامتر نرمی C از تقسیم جابجایی (نقطه اثر نیرو) δ در هر نقطه، بر نیرو P در همان نقطه از نمودار نیرو-جابجایی مود اول شکست به دست می آید. از

پارامتر نرمی و طول ترک a برای پیدا کردن عامل تصحیح کننده Δ در روش

دوم به ناحیه پل زنی الیاف¹ نیز مشهور است، چرا که در این ناحیه به موازات دور شدن دو سر نمونه از هم، الیاف به واسطه ی رزین موجود در نمونه، به سر دیگری که در حال دور شدن می باشد چسبیده و تارهای نازک بین دو سر نمونه، شکلی شبیه به پل را تشکیل می دهند. این تارهای نازک چسبناک، عامل مقاومی در برابر باز شدن دو سر نمونه می باشند و همین دلیلی بر صعودی شدن نمودار نیرو نسبت به جابجایی می شود تا نمودار به نقطه حداکثر برسد و پل را بشکند. بعد از نقطه حداکثر، ناحیه سوم شروع می شود. در ناحیه جدید همچنان تارهای نازک متصل کننده یا به عبارتی پل زنی الیاف وجود دارد و همچنین شکسته شدن آن ها هم صورت می گیرد. به علت دورتر شدن دو سر نمونه از یکدیگر و تاثیر ضعیف تر پل زنی الیاف، نیرو در این ناحیه کم تر از مقدار بیشینه بوده و با شیب ملایمی کاهش می یابد، در واقع گسترش پایدار طول ترک² در این ناحیه رخ می دهد [18].

در شکل 8 نمودار نیرو نسبت به جابجایی نقطه اثر نیرو میانگین برای درصد های مختلف نانوکامپوزیت آورده شده است. با توجه به شکل بیشینه ی نیرو برای درصد های وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 به ترتیب مقادیر 38.4، 43.2، 47.8 و 45.6 می باشد. مقادیر بیشینه ی نیرو برای نانوکامپوزیت های هیبریدی با درصد های وزنی 0.1، 0.5 و 1 نسبت به کامپوزیت خالص به ترتیب به مقدار 12.5، 24.4 و 18.7 درصد افزایش یافته است. نتایج مشاهدات اولیه نشان می دهد نانولوله های کربنی باعث افزایش بیشینه نیروی نمودار نیرو نسبت به جابجایی (نقطه اثر نیرو) می شود.

مطابق با استاندارد ASTM D5528 سه روش برای پیدا کردن نیروی بحرانی برای شروع ترک وجود دارد:

روش NL، در این روش نیروی بحرانی مطابق با زمانی است که نمودار نیرو-جابجایی از حالت خطی خارج شود.

روش نرمی 5 درصد، در این روش نیروی بحرانی مطابق با افزایش 5 درصدی نرمی نمونه است.

روش VIS، در این روش نیرویی که به ازای آن با چشم رشد ترک قابل مشاهده باشد.

در جدول 4 مقادیر نیروی بحرانی براساس سه روش فوق را نشان می دهد.

1- Fibre bridging
2- Stable crack growing

3- Simple beam
4- Modified beam
5- Compliance calibration

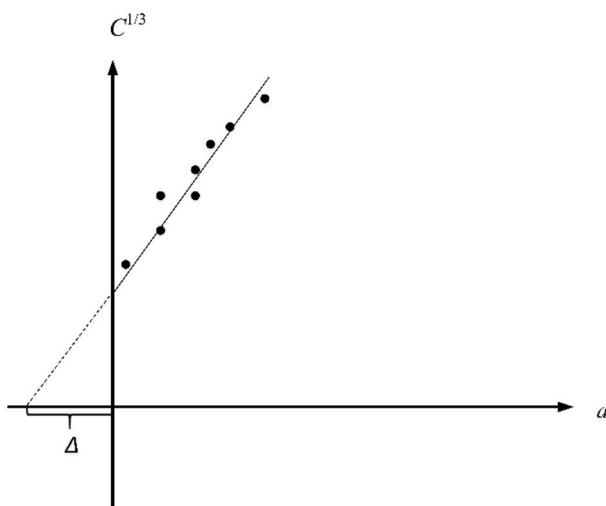
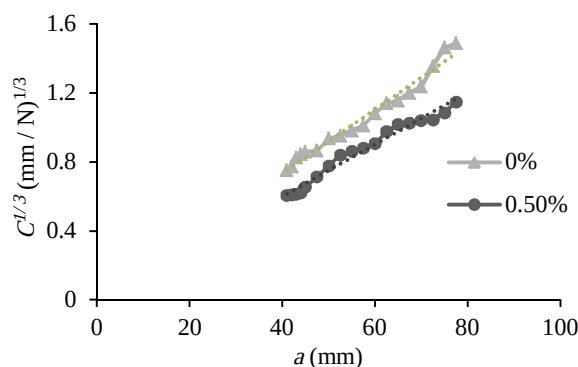
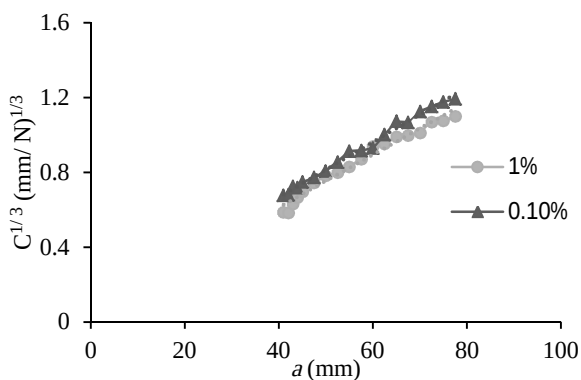


Fig. 10 how to calculate the correction factor for the crack length in the modified beam method [16]

شکل 10 نحوه محاسبه عامل تصحیح کننده طول ترک در روش تیر اصلاح شده [16]



الف) درصد های وزنی 0 و 0.5



ب) درصد های وزنی 0.1 و 1

Fig. 11 The linear charts to calculate a correction factor Δ a) 0 wt % and 0.5 wt % b) 0.1 wt % and 1 wt %

شکل 11 نمودارهای خطی برای محاسبه عامل تصحیح کننده Δ الف) درصد های

وزنی 0 و 0.5 ب) درصد های وزنی 0.1 و 1

در نمودارهای شکل 13 ترک برحسب میلی متر و نرمی برحسب میلی متر بر نیوتن می باشد.

دو روش تیر اصلاح شده و کالیبراسیون نرمی به دلیل نتایج دقیق تری که می دهند، کاربرد بیشتری در محاسبه انرژی کرنشی آزاد شده دارند و در این پژوهش از این دو روش برای محاسبه چقرمگی شکست بین لایه ای مود اول

جدول 4 نیروی بحرانی براساس سه روش

Table 4 The critical force by three methods

درصد نرمی 0.5	VIS	NL	wt%	ردیف
33.6	32.4	20.8	0	1
37.2	36	22.8	0.1	2
44.8	33.9	31.5	0.5	3
34.8	27.2	26.4	1	4

تیر اصلاح شده و ضریب n در روش کالیبراسیون نرمی استفاده می شود که روش محاسبه Δ و n جلوتر بیان می شود. رابطه نرمی به صورت [16]:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

نمودار نرمی برحسب طول ترک برای نمونه های نانوکامپوزیت در درصد های مختلف نانولوله های کربنی در شکل 9 آمده است. در این نمودار واحد نرمی، میلی متر بر نیوتن و طول ترک برحسب میلی متر می باشد.

روش تیر اصلاح شده، روشی برای اصلاح روش تیر ساده می باشد. در این روش مقدار طول ترک را به اندازه Δ بیشتر از a در نظر گرفته می شود. Δ با رسم نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک به دست می آید. رابطه انرژی کرنشی آزاد شده بر اساس روش تیر اصلاح شده به صورت [16]:

$$G = \frac{3P\delta}{2b(a + \Delta)} \quad (3)$$

که در آن، Δ عامل تصحیح کننده ی طول ترک می باشد. پارامتر Δ عرض از مبدا نمودار ریشه ی سوم نرمی برحسب طول ترک می باشد در شکل 10 نحوه محاسبه این پارامتر مشخص است، در شکل 11 نمودارهای مربوط به محاسبه عامل تصحیح کننده ی طول ترک برای درصد های مختلف آورده شده است.

در روش کالیبراسیون نرمی، ضریب 3 در رابطه روش تیر یکسرگیردار اصلاح می شود و n جایگزین آن می شود. n برابر شیب نمودار لگاریتمی نرمی برحسب طول ترک می باشد. در شکل 12 نحوه محاسبه n مشخص می باشد. در نهایت رابطه انرژی کرنشی آزاد شده براساس روش کالیبراسیون نرمی به صورت [16]:

$$G = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (4)$$

که در آن n ضریب تصحیح کننده در روش کالیبراسیون نرمی می باشد. در شکل 13 نمودارهای لگاریتم نرمی به ازای درصد های مختلف نانولوله های کربنی قابل مشاهده است.

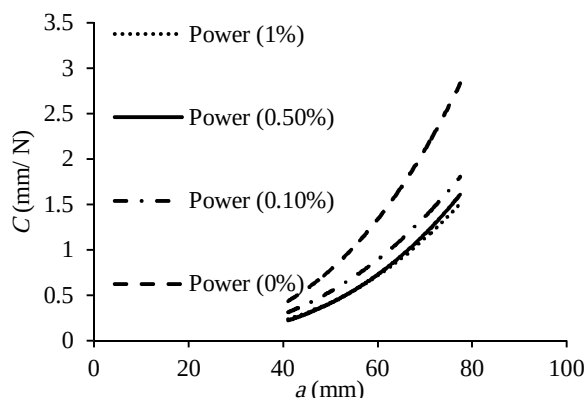


Fig.9 The compliance-crack length curve of mode I test of nanocomposite specimens

شکل 9 نمودار نرمی برحسب طول ترک حاصل از آزمون مد اول نمونه های

نانوکامپوزیت

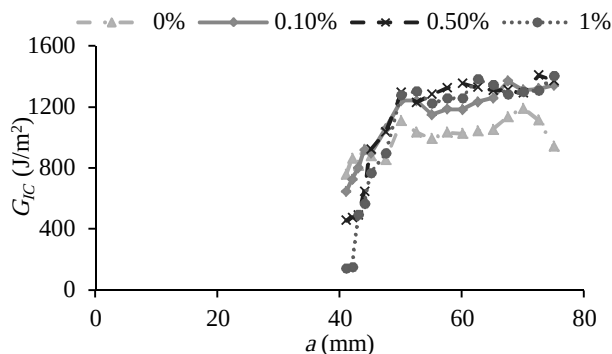


Fig. 14 The R-curves diagram of DCB specimens

شکل 14 نمودار R-curve نمونه‌های DCB

حالت بعدی که مربوط به گسترش ترک می‌باشد (G_{IC-pro}). ابتدای نمودار منحنی مقاومت چقرمگی شروع شکست می‌باشد. همزمان با رشد ترک، مقدار چقرمگی شکست با شیب تندی افزایش می‌یابد تا به مقدار پایداری برسد. در ناحیه پشت پیشانی ترک، پل زنی الیاف اتفاق می‌افتد، به این صورت که پس از گذر ترک بین‌لایه‌ای از بین دو لایه، تعدادی از الیاف شکسته نشده دو بازوی نمونه را به یکدیگر اتصال داده (و به اصطلاح پل می‌زنند، برای گسترش ترک لازم است تا الیاف پل زنی از رزین تحت شرایط تنش کششی کنده شوند) و این عاملی مقاوم در برابر رشد ترک شده و باعث افزایش میزان چقرمگی شکست می‌شود. فاصله بین نقطه شروع رشد تورق و چقرمگی حالت پایدار را طول ناحیه پل زنی الیاف می‌نامند. بعد از این ناحیه، مقدار چقرمگی شکست به حالت پایدار می‌رسد [20, 19]. مقدار چقرمگی شکست گسترش ترک به دو روش تیر اصلاح شده و کالیبراسیون نرمی محاسبه شده است، نتایج حاصله از این دو روش به هم نزدیک می‌باشند. در شکل 15 مقایسه‌ای بین چقرمگی گسترش ترک برای نانوکامپوزیت‌ها با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی آورده شده است.

چنانکه در قبل با توجه به شکل 8 و جدول 4 اشاره شد، در نمودار نیرو-جابجایی نقطه اثر نیرو آزمایش مود اول شکست بین‌لایه‌ای، بیشینه نیرو مربوط به نمونه نانوکامپوزیت با 0.5 درصد نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در ادامه بررسی نتایج، همچنان که در شکل 15 می‌توان دید، مقدار چقرمگی گسترش ترک برای نانوکامپوزیت هیبریدی 0.5 درصد نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر بوده و این مقدار نسبت به چقرمگی گسترش ترک کامپوزیت خالص به مقدار 24.15 درصد افزایش یافته است. به نظر می‌آید

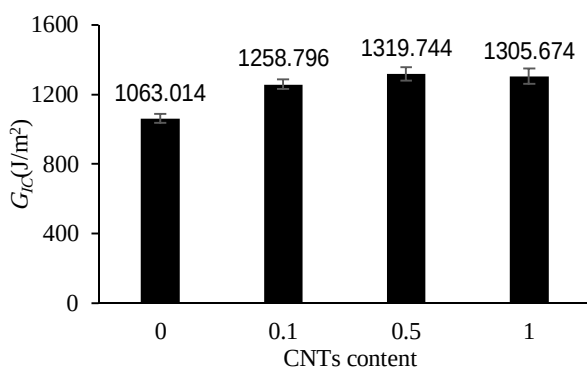


Fig. 15 The crack propagation mode I fracture toughness of nanocomposite calculated by compliance calibration method

شکل 15 چقرمگی گسترش ترک مود اول شکست نانوکامپوزیت با روش کالیبراسیون نرمی

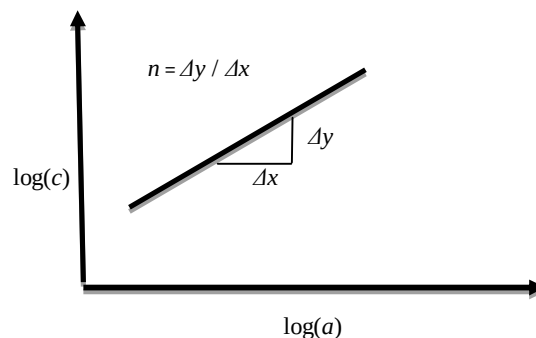


Fig. 12 How to calculate factor n in a compliance calibration method [14]

شکل 12 نحوه محاسبه ضریب n در روش کالیبراسیون نرمی [14]

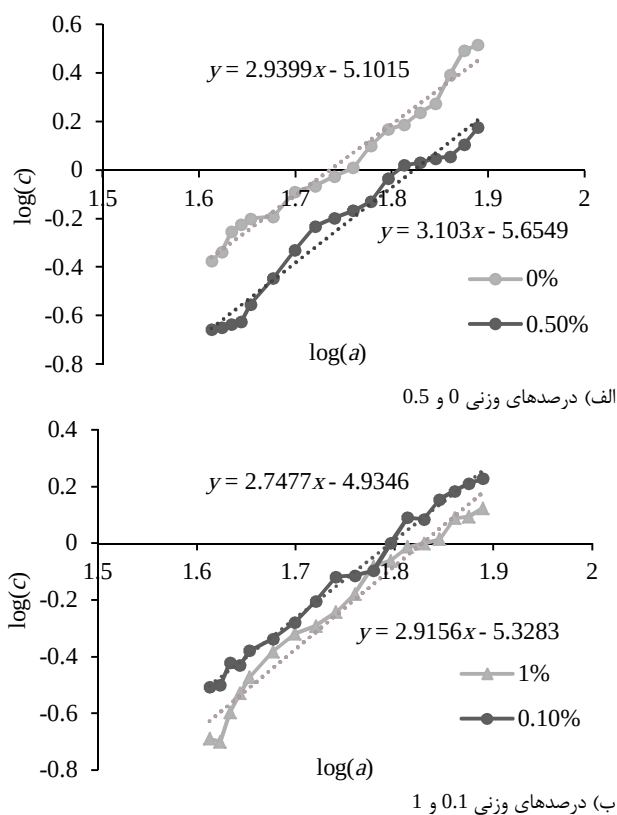


Fig. 13 Comparison the value of n in $\log(c)$ - $\log(a)$ diagram a) 0 wt % and 0.5 wt % b) 0.1 wt % and 1 wt %

شکل 13 - مقایسه مقادیر n در نمودار لگاریتم نرمی-لگاریتم ترک (الف) درصد‌های وزنی 0 و 0.5 (ب) درصد‌های وزنی 0.1 و 1

استفاده شده است. به کمک نمودار پارامترهای نیرو و جابجایی شکل 8، طول ترک متقابل و عرض نمونه، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول نسبت به طول ترک به دست می‌آید. نمودار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نسبت به طول ترک (نمودار منحنی مقاومت¹) اهمیت زیادی در پیش‌بینی رشد ترک در کامپوزیت دارد. در شکل 14 نمودار منحنی مقاومت برای درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی موجود در نانوکامپوزیت ترسیم شده است.

با توجه به نمودار شکل 14، دو حالت چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول دیده می‌شود. حالت اول برای زمان شروع تورق می‌باشد (G_{IC-ini}) و

1- R-curve

- carbon/epoxy composite material, MSc Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 2009.
- [2] M. M. Shokrieh, A. Zeinedini, A novel procedure for Prediction of mixed mode I/II in fracture toughness of laminate composites, *Iran University of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 111-120, 2014. (in Persian فارسی)
 - [3] KB Armstrong, LG Bevan, WF Cole, *Care and repair of advanced composites*, second edition, Society of Automotive Engineers, USA, pp. 112-115, 2005.
 - [4] A. Masodi, G. Liaghat, M. Pol, The effect of the nanoclay on ballistic properties of glare, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014. (in Persian فارسی)
 - [5] M. Yasaee, I.P. Bond, R.S. Trsak, E.S. Greenhalgh, Mode I interfacial toughening through discontinuous interleaves for damage suppression and control, *Composites Part A*, Vol. 34, No. 1, pp. 198-207, 2012.
 - [6] M. M. Shokrieh, M. Heidari-Rarani, M.R. Ayatollahi, Delamination R-curve as a material property of unidirectional glass/epoxy composites, *Materials and Design*, Vol. 34, No. 1, pp. 211-218, 2012.
 - [7] H. Movahhedi Aleni, *Investigation on interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)
 - [8] 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.
 - [9] 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, 2013.
 - [10] V. Eskizeybek, A. Avci, A. Gülce, The Mode I interlaminar fracture toughness of chemically carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composite structures, *Composites: Part A*, Vol. 63, No. 9, pp. 94-102, 2013.
 - [11] B.G. Falzon, S. C. Hawkins, CH. P. Huynh, R. Radjef, C. Brown, An investigation of Mode I and Mode II fracture toughness enhancement using aligned carbon nanotubes forests at the crack interface, *Composite Structures*, Vol. 106, No. 12, pp. 65-73, 2013.
 - [12] H. Silva, J. A. M. Ferreira, J. D. M. Costab, C. Capela, A study of mixed mode interlaminar fracture on nanoclay enhanced epoxy/glass fiber composites, *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, Vol. 25, No. 2, pp. 92-97, 2013.
 - [13] M. R. Ayatollahi, S. Shadlou, M. M. Shokrieh, Fracture toughness of epoxy/multi-walled carbon nanotube nano-composites under bending and shear loading conditions, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2115-2124, 2011.
 - [14] H. Movahhedi Aleni, G. H. Liaghat, M.H. Pol, A. Afrouzian, An experimental investigation on mode II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 283-290, 2014. (in Persian فارسی)
 - [15] R. Zamani, GH. R. Rahimi, M. H. Pol, Studies on the reinforcing effect of modified nanoclay on tensile and flexural properties of TETA- and F205-cured epoxy resins, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 9-16, 2014. (in Persian فارسی)
 - [16] Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, D5528-01, pp. 1-12, 2007.
 - [17] M. H. Pol, Gh. H. Liaghat, E. Mehrabani Yeganeh, A. Afrouzian, Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particle effects on mechanical properties of glass epoxy composites, *Modare Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015. (in Persian فارسی)
 - [18] M. Saadedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini 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 فارسی)
 - [19] M. Heidarni-Rarani, *Modeling of delamination propagation in composite double cantilever beam (DCB) under quasi-static loading*, Phd Thesis, Iran University Of science Technology Mechanical Engineering Department, Iran, 2012. (in Persian فارسی)
 - [20] M. Salamat-talab Tajangouke, *Simulation of delamination growth in double cantilever beam specimen made of laminated composites*, MSc Thesis, Iran University Of science and Technology Mechanical Engineering Department, Iran, 2011. (in Persian فارسی)

مقدار چقرمگی گسترش ترک برای نانوکامپوزیت‌های با درصدهای 0.1 و 1 نسبت به کامپوزیت خالص به ترتیب 18.41 و 22.82 درصد افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، با افزودن نانولوله‌های کربنی با درصدهای مختلف 0.1، 0.5 و 1 به زمینه، مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول نسبت به کامپوزیت خالص، به ترتیب 18.41، 24.15 و 22.82 درصد افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های گسترش چقرمگی شکست، بهینه‌ترین درصد نانولوله‌های کربنی افزوده شده به زمینه 0.5 درصد می‌باشد. در سایر درصدها همچنین بهبود چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول به چشم می‌آید ولی مقدار بهبود این خاصیت در 0.5 درصد بیشتر می‌باشد.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی با درصدهای 0.1، 0.5 و 1 به زمینه کامپوزیت شیشه/اپوکسی (ساخته شده از الیاف شیشه سری ای و رزین اپوکسی (اپون 828 به همراه سفت‌کننده اف 205)) بر چگونگی تغییر خواص کششی و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود اول بررسی گردید. طی آزمایش‌ها و بررسی نتایج آزمایشگاهی، افزودن نانولوله‌های کربنی، خواص کششی نانوکامپوزیت را بسته به درصد نانولوله‌های کربنی تغییر می‌دهد. چنانچه در آزمون کشش نانو رزین مشاهده شد، بیشترین افزایش همزمان 31.2 درصدی مدول یانگ، 21.5 درصدی استحکام کششی و 24.15 درصدی چقرمگی مربوط به نانو رزین 0.5 درصد نانولوله‌های کربنی می‌باشد. نتایج آزمون کشش کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی حاکی از آن بود که مقدار چقرمگی و استحکام نهایی در 0.5 درصد نسبت به نمونه‌ی خالص بدون نانو به ترتیب 13.6 و 3.7 درصد افزایش یافته است. نانولوله‌های کربنی موجود در نانوکامپوزیت 0.5 درصد، باعث افزایش چقرمگی شکست در کشش به دلیل افزایش استحکام نهایی توام با کرنش شکست نانوکامپوزیت‌های هیبریدی می‌شوند. همچنین در نمونه‌های 1 و 0.1 درصد تغییر محسوس‌ی در خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی مشاهده نمی‌شود. با بررسی آزمون مود اول شکست بین‌لایه‌ای، در نمودار نیرو نسبت به جابجایی نقطه نیرو، بیشینه‌ی نیرو مربوط به نانوکامپوزیت 0.5 درصد بوده که نسبت به کامپوزیت خالص 24.4 درصد افزایش پیدا کرده است. شایان ذکر است که در نانوکامپوزیت‌های هیبریدی 0.1 و 1 درصد، مقدار بیشینه‌ی نیرو نیز افزایش پیدا کرده است. افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت شیشه/اپوکسی باعث بالا رفتن انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود اول شده و بسته به درصد وزنی نانولوله‌های کربنی اضافه شده، میزان افزایش انرژی شکست بین‌لایه‌ای مود اول نانوکامپوزیت تغییر می‌کند. مقدار انرژی شکست بین‌لایه‌ای در گسترش ترک نانوکامپوزیت هیبریدی حاوی 0.5 درصد نانولوله‌های کربنی نسبت به کامپوزیت خالص به مقدار 24.15 درصد افزایش پیدا کرده است. در مجموع براساس نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت تاثیرگذارترین درصد وزنی افزودن نانولوله‌های کربنی به رزین و کامپوزیت شیشه/اپوکسی جهت افزایش خواص کششی و شکست مود اول، 0.5 درصد وزنی می‌باشد.

6- مراجع

- [1] Y. Zhu, *Characterization of interlaminar fracture toughness of a*