



## بررسی تجربی تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی بر نفوذ شبه استاتیکی برش پانچ در چند لایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی

محمد صادقی<sup>1</sup>، محمد حسین پل<sup>2\*</sup>

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* تفرش، کد پستی 143-14115، m\_h\_pol@tafreshu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 شهریور 1394

پذیرش: 23 آبان 1394

ارائه در سایت: 14 آذر 1394

کلید واژگان:

نانو کامپوزیت

برش پانچ

نانو لوله‌های کربنی

خواص مکانیکی و انرژی جذب شده

### چکیده

در این مقاله تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی در رفتار خواص شبه استاتیکی برش پانچ (QS-PS) و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه‌ای هیبریدی به طور تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مواد کامپوزیتی از 12 لایه الیاف شیشه با بافت دو بعدی با چگالی سطحی  $200 \text{ g/m}^2$  به روش لایه چینی دستی ساخته شده است. سیستم رزین نیز از یک اپوکسی، دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ با نام تجاری ایپون 828 به عنوان پایه و از سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205 به عنوان سفت‌کننده ساخته شده است. در این پژوهش از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) اصلاح شده با هیدروآکسید (-COOH) استفاده شد. نانوذرات با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 نسبت به وزن کل ماتریس استفاده گردید. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد با افزودن نانو لوله‌های کربنی خواص کششی رزین تغییر می‌یابد. بیشترین تغییر در مدول نمونه 0.5 درصد وزنی با افزایش حدود 31 درصد دیده می‌شود. همچنین بیشترین تغییر در خواص کششی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی در چقرمگی شکست نمونه 0.5 درصد وزنی با افزایش حدود 14 درصد همراه با افزایش در استحکام کششی و کرنش شکست مشاهده گردید. نتایج برش پانچ نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو لوله‌های کربنی تأثیر کمی در کل انرژی جذب شده دارد به طوری که بیشترین مقدار مربوط به نمونه 0.1 با حدود 4 درصد افزایش نسبت به نمونه‌های خالص است.

## Experimental investigation of the effect of the addition of carbon nanotubes on the quasi-static punch shear penetration of the laminated glass/epoxy composite

Mohammad Sadeghi, Mohammad Hosein Pol\*

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 21 September 2015  
Accepted 14 November 2015  
Available Online 05 December 2015

#### Keywords:

Nanocomposite  
punch shear  
carbon nanotubes  
mechanical properties and energy absorbed

### ABSTRACT

In this paper, the effects of adding carbon nanotubes to quasi-static punch shear properties (QS-PS) and mechanical properties of hybrid laminated composites have been investigated experimentally. The nanocomposites have 12 layers of 2D woven glass fiber with area density of  $200 \text{ g/m}^2$ , and are manufactured by Hand lay-up method. Epoxy resin systems are made of diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), Epon 828 as the epoxy prepolymer and Epikure F-205 as the curing agent. In this study the multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) was used, modified with hydroxide (-COOH), with weight fraction 0, 0.1, 0.5 and 1 with respect to total weight of resin. Results of tensile test have shown addition of carbon nanotubes can change tensile properties of matrix. Maximum increase of around 31% can be seen in modulus of the resin of 0.5% nanotubes content. Moreover, the results of tensile properties of hybrid laminated nanocomposites show maximum change in toughness of sample of 0.5% nanotube content around 14% with increasing tensile strength and fracture strain. The results punch shear test shows that addition of carbon nanotubes has little effect on total energy absorbed so that maximum increase is around 4% in 0.5 % sample.

### 1- مقدمه

رفتار کامپوزیت‌ها هنگامی که تحت ضربه قرار می‌گیرند به علت سرعت بالای بارگذاری و رخ دادن پدیده‌های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف‌ها، جدایش لایه‌ها، شکست الیاف‌ها و غیره به طور همزمان، بسیار پیچیده می‌شود. آگاهی یافتن از مکانیزم‌های نفوذ در سرعت‌های بالا بسیار سخت بوده

کامپوزیت‌ها امروزه جایگاه خاصی در صنعت پیدا کرده‌اند. فلزات به عنوان مواد سنتی به دلیل داشتن استحکام و سفتی پایین نسبت به وزن، کمتر در کارهای حفاظتی استفاده می‌شود.

Please cite this article using:

M. Sadeghi, M.H. Pol, Experimental investigation of the effect of the addition of carbon nanotubes on the quasi-static punch shear penetration of the laminated glass/epoxy composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 416-424, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و بارگذاری نفوذ شبه استاتیکی<sup>1</sup> بدلیل سرعت کم و کنترل آسان، برای این کار مناسب است و به راحتی می‌تواند آسیب‌های ناشی از نفوذ را شناسایی کند. مطالعات و تحقیقات فراوانی در این مورد انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که داده‌های حاصل از آزمایش نفوذ شبه استاتیکی با شرایط مرزی مختلف می‌تواند رفتار مواد را در ضربه‌های سرعت بالا پیش‌بینی کند و مکانیزم‌های آسیب نفوذ شبه استاتیکی مشابه ضربه سرعت بالاست [2،1].

مواد کامپوزیتی به دلیل داشتن خواص خوب و مطلوب از جمله استحکام به وزن بالا و سفتی به وزن بالا باعث شده است که کاربرد آن‌ها در صنایع روز به روز افزایش یابد. علیرغم داشتن این خواص مطلوب، نواقص و کمبودهایی در کامپوزیت‌ها احساس می‌شود که خصوصیات و ویژگی‌های کامپوزیت‌ها را دچار مشکل و ضعف می‌سازد. عدم چسبندگی مناسب بین الیاف و ماتریس، به وجود آمدن حفره هنگام ساخت، وزن بالای تقویت‌کننده و کم بودن سطح تماس الیاف و رزین از ضعف‌های کامپوزیت‌ها می‌توان نام برد. مطالعات و تحقیقات فراوانی جهت رفع نواقص، بهبود خواص مکانیکی، کاهش اشتعال پذیری و نفوذپذیری که مورد توجه فراوان پژوهشگران بوده، انجام گرفته است که مهم‌ترین آن استفاده از نانوذرات می‌باشد. با گسترش علم و نانو تکنولوژی و استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص مکانیکی، سفتی، چقرمگی شکست، جذب انرژی بیشتر و میرایی ارتعاشات مواد و در عین حال سبکی، سهولت استفاده در به کارگیری آن، اهمیت این موضوع را دو چندان کرده است. در میان نانوذرات، نانو لوله‌های کربنی<sup>2</sup> یکی از سفت‌ترین مواد به شمار می‌رود. خواص ویژه و منحصر به فردی داشته و در عین استحکام بالا، انعطاف‌پذیر نیز می‌باشند. از طرفی دیگر، این نانوذرات مقاومت خوبی در برابر مواد شیمیایی داشته و رسانایی گرمایی آن در جهت محوری بالاست. همچنین این نانوذرات تو خالی بوده که باعث سبک شدن آن‌ها می‌شود. نانو لوله‌ای کربنی پیوند محکمی در بین اتم‌ها دارد به همین دلیل نیروی کششی و استحکام زیادی دارد و مدول یانگ بخصوص در راستای محور آن‌ها بسیار زیاد است. چگالی وزنی نانو لوله‌های کربنی پایین و استحکام ویژه آن در میان تمام مواد شناخته شده، بهترین است؛ با این وجود در حالت فشار بدلیل تو خالی بودن استحکام کمتری دارند. نانو لوله‌های کربنی به دو شکل مختلف تقسیم می‌شوند؛ نانو لوله کربنی تک دیواره که از ویژگی‌های آن می‌توان به بالا بودن هزینه‌ی تولید و خواص ویژه (نسبت خاصیت به وزن) بسیار خوب مکانیکی و الکتریکی اشاره کرد. نوع دوم نانو لوله کربنی چند دیواره است که خواص آن‌ها علاوه بر وابستگی به طول و قطر به تعداد دیواره‌های آن نیز وابسته می‌باشد. بطور کلی هزینه چند دیواره‌ها نسبت به تک دیواره‌ها کمتر بوده، قابل دسترسی و تجاری می‌باشند اما استحکام‌شان نسبت به تک دیواره‌ها کمتر است و در تقویت پلیمرها برای بهبود خواص الکتریکی، گرمایی و مکانیکی متداول‌تر می‌باشند.

گاما و گلیسپیه [1] مکانیزم خرابی و نفوذ بالستیک را با شرایط مرزی مشابهی با آزمایش شبه استاتیکی مدل کردند. آنان در این تحقیق مکانیزم‌های خرابی، نفوذ و انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های ضخیم، را با آزمایش‌های بالستیک و شبه استاتیک بطور جداگانه بررسی کردند و مشاهده کردند که مکانیزم‌های خرابی در آزمایش برخورد بالستیک می‌تواند با مکانیزم‌های خرابی در آزمایش‌های شبه استاتیکی با اعمال یک سری شرایط مرزی (دهانه‌های متفاوت) مطابقت داشته باشد. طبق این مطالعه مدل توسعه یافته‌ی شبه استاتیکی، جهت مدل کردن فازهای نفوذ بالستیک و انرژی

جذب شده در مکانیزم خرابی بالستیک بدست آوردند. ژیاو و همکارانش [2] با استفاده از بارگذاری شبه استاتیکی برش پانچ، انتشار خرابی و پارگی را در کامپوزیت‌ها (شیشه-2/S/اپوکسی) که به وسیله‌ی فرایند انتقال رزین به کمک خلأ ساخته شده است، بررسی کردند. آنان آزمایش‌های خود را در دو نسبت دهانه<sup>3</sup> 2 و 8 انجام دادند. آن‌ها یافتند که با افزایش ضخامت کامپوزیت، نیروی تماسی افزایش یافته و شکست الیاف کامپوزیت زودتر رخ می‌دهد. و اغلب مکانیزم خرابی، پارگی و شکست الیاف‌ها، بدلیل برش و کشش است.

تهرانی و همکارانش [3] خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف کربن و نانو لوله‌های کربنی را تحت ضربه و برش پانچ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره با درصد وزنی 2 برای این پژوهش استفاده کردند. آنان نتیجه گرفتند در فرایند شبه استاتیکی خواص کششی (سفتی و استحکام) در جهت الیاف‌ها با افزودن MWCNTs تغییر نمی‌کند و فقط کرنش شکست در آزمایش کشش بهبود می‌یابد. طبق این تحقیق با اضافه کردن MWCNTs استحکام برشی در ضخامت و انرژی جذب شده در یک کرنش افزایش می‌یابد.

سلیمان و همکارانش [4] پاسخ ضربه‌ی سرعت پایین را برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و نانو لوله‌های کربنی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از نانو لوله‌ای کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیدرواکسید<sup>4</sup> و با درصدهای وزنی 0، 0.5، 1 و 1.5 استفاده کردند. در این تحقیق صفحات کامپوزیتی در معرض پنج سطح انرژی 15، 24، 30، 60، 120 ژول قرار گرفتند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانو لوله‌های کربنی اندازه خرابی کامپوزیت کاهش و پاسخ ضربه در سرعت‌های پایین بهبود می‌یابد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که در زیر حد نفوذ<sup>5</sup> حداکثر مقدار نیرو در 1.5 درصد وزنی نانوتیوب می‌باشد. و همچنین بیشترین افزایش در انرژی جذب شده مربوط به 1.5 درصد وزنی به میزان 50 درصد می‌باشد.

کاستوپلوس و همکارانش [5] تأثیر نانوذرات را در خواص ضربه و بعد ضربه<sup>6</sup> بررسی کردند. آن‌ها کامپوزیت‌هایی که مقدار نانو لوله‌ای کربنی چند دیواره 0.5 درصد است را تحت ضربه‌ی سرعت پایین قرار دادند. طبق این مطالعه هیچ فرق اساسی در ناحیه لایه‌لایه شدن و انرژی جذب شده در این ناحیه، بین نمونه‌های بدون نانوذرات و نمونه‌های دارای نانوذرات مشاهده نشده است. اما استحکام بعد ضربه و مدول فشاری مؤثر بعد ضربه در همه نمونه‌های کامپوزیتی نانودار بهبود یافته است. همچنین مقاومت به خرابی بهبود یافته است.

موتیو و دندر [6] میزان درصد وزنی نانو ذرات کربنی چند دیواره و پرامترهای ساخت را براساس خواص کششی، خمشی و ضربه در کامپوزیت‌ها مطالعه کردند. مقدار بهینه الیاف شیشه از بین درصدهای وزنی 24، 32 و 40 را 32 و همچنین زمان اصلاح شدن MWCNTs از بین 6، 24 و 48 ساعت، 24 ساعت را بدست آوردند. طبق این پژوهش میزان درصد وزنی نانوذرات اصلاح شده به وسیله‌ی اسید نیتریک 0.1، 0.5 و 1 برای 32 درصد الیاف می‌باشد. که میزان بهینه درصد وزنی نانوذرات را 0.5 درصد بدست آوردند.

چاندراسکاران و همکارانش [7] تأثیر MWCNTs بر روی خواص رزین و استحکام برشی لایه میانی<sup>7</sup> که با الیاف شیشه تقویت شده است، را بررسی

3- Span diameter to punch diameter ratio (SPR)

4- COOH-MWCNTs

5- penetration limit

6- impact and after impact

7- interlaminar shear strength (ILSS)

1- quasi-static indentation

2- Multi-wall carbon nanotube (MWCNT)

پخش کننده انرژی بیشتر در کارهای ضربه استفاده گردد. بورگ و همکارانش [14] تأثیر نانو ذرات را در رفتار خستگی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی بررسی کردند. آن‌ها از نانو ذرات کربنی با درصدهای 0، 0.5 و 1 و از نانو رس با درصدهای 0، 1 و 3 برای این کار استفاده کردند. طبق این مطالعه نتیجه می‌شود که استحکام استاتیکی کششی و خمشی با افزودن نانو ذرات بهبود نمی‌یابد اما نسبت خستگی و بارگذاری خمشی با اضافه کردن 1 درصد نانو رس یا 0.5 درصد نانو تیوب کمی افزایش می‌یابد و همچنین نانو ذرات مانع انتشار ترک می‌گردد. مهربانی یگانه و همکارانش [15] تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی با دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال<sup>7</sup> مورد مطالعه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر 2.5 به نیروی کمتری برای نفوذ کامل نیازمند است و در مقایسه انرژی جذب شده، نفوذ کننده مخروطی 37 درجه بیشترین انرژی را برای نفوذ کامل نیاز دارد. همچنین طول دماغه بیشتر، افزایش جابجایی تا نفوذ کامل را به همراه دارد. نیمیس و همکارانش [16] تأثیر ضخامت کل لایه‌های کامپوزیت، ضخامت زیر لایه‌ها و زاویه نفوذ در انواع کامپوزیت‌های ایزوتروپیک تعیین کردند. آن‌ها عدم تأثیر پارامترهای کامپوزیت در پاسخ و اندازه‌گیری نمودار بار-جابجایی و تأثیر مثبت ضخامت و نرخ کرنش در بار اوج را مطالعه کردند طوری که با افزایش ضخامت و نرخ کرنش، بار اوج افزایش می‌یابد. پوتی و سان [17] برش پانچ با شبیه سازی، منحنی بار-تغییر شکل برای تشکیل پلاگ در کامپوزیت‌های کربن /اپوکسی شبه ایزوتروپیک مشخص کردند آن‌ها یافتند که نمودار بار-تغییر شکل نشان می‌دهد یک افت بار در شروع پارگی اتفاق می‌افتد. ماینز و همکارانش [18] برش پانچ شبه استاتیکی، ضربه بالستیکی و رفتار نفوذ را برای کامپوزیت‌های شیشه / پلی استر با ضخامت‌های مختلف و با استفاده از تست برش پانچ بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که همیشه انرژی نفوذ شبه استاتیکی از انرژی نفوذ بالستیکی کمتر است. مسعودی و همکارانش [19] تأثیر نانو ذرات کلوسید سی بی را بر قابلیت جذب انرژی بالستیکی فلز-مواد مرکب شیشه/اپوکسی با استفاده از آزمایش بالستیکی بررسی کردند آن‌ها نتیجه گرفتند که میزان جذب انرژی در 4 درصد وزنی نانو و بدون نانو تغییری زیادی نکرده، ولی در 7 و 10 درصد وزنی میزان جذب انرژی افزایش یافته و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به 10 درصد وزنی است. پل و همکارانش [20] فرایند نفوذ را با پرتابه‌های سرتخت، در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آنان یک مدل تحلیلی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به فواصل زمانی نفوذ کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در هر یک از این فواصل زمانی برای نفوذ پرتابه‌ها ارائه دادند. طبق این تحقیق نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی دارد. آن‌ها در یک مطالعه دیگر [21، 22] تأثیر نانو ذرات رس را بر رفتار بالستیکی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بررسی کردند. آنان برای تهیه نانو کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی که به روش انتقال رزین به کمک خلأ ساخته شده بودند، از نانو ذرات رسی با درصدهای وزنی 0، 1، 2، 3، 5 و 7 استفاده کردند. طبق این مطالعه در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک بیشترین افزایش جذب انرژی

کردند. آن‌ها مقدار MWCNTs را 0.5 وزنی در نظر گرفتند و خواص برشی را با استفاده تست برش پانچ و استحکام بین الیاف و رزین را با استفاده از آزمایش میکرودراپلت<sup>1</sup> انجام دادند. آن‌ها نشان دادند تغییر مهمی در مدول یانگ ماتریس بین نمونه‌های بدون نانو و نانودار مشاهده نکردند. اما نشان دادند نانو ذرات باعث تغییر در استحکام برشی لایه میانی می‌شود. و در نتیجه نانوذرات در روابط الیاف و رزین بیشتر از خواص رزین تأثیرگذار است. مانزیلا و همکارانش [8] با استفاده از برش پانچ سر تخت، تأثیر ابعاد پانچ و نمونه را در کامپوزیت‌هایی که با الیاف شیشه S-2 بافته شده و رزین SC-15، با فرایند انتقال رزین به کمک خلأ<sup>2</sup> ساخته شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یافتند که کامپوزیت‌ها در یک زاویه مشخصی می‌شکنند که مستقل از ابعاد پانچ و نمونه و یا جهت انجام کار است و همچنین تنش اعمال شده در رفتار شکست در یک زاویه مشخصی مشاهده شده که مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است. هاردینگ و دونگ [9] تأثیر نرخ بارگذاری بر استحکام برش لایه میانی را مطالعه کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با استفاده از نمونه‌های دو لایه در سه نوع 0، 90 و 45 $\pm$  تحت برش استاتیکی و ضربه انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که خواص گفته شده افزایش کمی با نرخ کرنش دارد. رحمان و همکارانش [10] تأثیر نانوذرات کربنی در نمونه‌های کامپوزیتی، تحت ضربات بالستیکی را بررسی کردند. آنان از نانو ذرات MWCNTs اصلاح شده به وسیله آمینو<sup>3</sup> با درصدهای وزنی 0، 0.3 و 0.5 استفاده کردند. در این مطالعه از لایه چینی دستی و فشار برای ساخت کامپوزیت‌ها و از نورد آسیاب سه غلطکی<sup>4</sup> جهت پخش نانوذرات در رزین استفاده شده است. طبق این تحقیق در 0.3 درصد وزنی نانوذرات انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. الله‌خان و همکارانش [11] رفتار شکست را با تست ضربه و شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های تقویت شده<sup>5</sup> با افزودن نانوذرات رس بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزودن نانورس استحکام و مدول خمشی و همچنین چقرمگی شکست در رزین و کامپوزیت افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار نانوذرات برای افزایش آن‌ها 0.3 درصد برای ضربه و 0.5 درصد برای آزمایش شبه استاتیکی بود. ارکندریکی و هاکیو [12] رفتار مقاومت نفوذ شبه استاتیکی را بر روی کامپوزیت‌های شیشه SC-15/ S-2، شیشه HDPE/E و شیشه HDPE /S-2 با ضخامت‌های متفاوت بررسی کردند. در این مطالعه رفتار مقاومت نفوذ، با یک سری نمودارهای نیرو-جابجایی با دهانه‌های مختلف ارائه شد. همچنین نمونه‌های کامپوزیتی بعد از آزمایش جهت مطالعه مکانیزم‌های خرابی در جوهر الکل قرار گرفتند. آنان نتیجه گرفتند که رفتار نیرو-جابجایی و شروع خرابی در نمونه‌های شیشه HDPE/E و شیشه HDPE/S-2 با کامپوزیت‌های شیشه SC-15/S-2 فرق می‌کند. همچنین آن‌ها یافتند که کامپوزیت‌های شیشه HDPE/E و شیشه HDPE /S-2 سفتی<sup>6</sup> کمتر، نیروی اوج کمتر، تغییر شکل بیشتر، ناحیه خرابی کمتر و پراکندگی انرژی کمتری نسبت به نمونه‌های شیشه SC-15/S-2 دارند. آنان در یک مطالعه دیگر [13] به کامپوزیت‌های کولار/پلی اتیلن با ضخامت‌های گوناگون پرداختند و نتیجه گرفتند که کامپوزیت‌های کولار/ پلی اتیلن می‌تواند بدلیل تحمل خرابی و

1- microdroplet test

2- vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process

3- amino (NH<sub>2</sub>)

4- three-roll mill process

5- Carbon fiber-reinforce polymer

6- stiffness

داده تا رطوبت‌شان از بین برود و کاملاً خشک شوند. رزین مورد نیاز برای هر کدام از درصدها تعیین می‌گردد. در این مطالعه از سه درصد وزنی 0.1، 0.5 و 1، نسبت به وزن کل ماتریس (رزین + سفت‌کننده) برای بررسی اثر نانو لوله‌ها استفاده شده است.



Fig.1 Specimen of without fiber in different percentages of carbon nanotube  
شکل 1 نمونه بدون الیاف در درصدهای مختلف نانو لوله‌ای کربنی

جدول 1 مشخصات کامل نانو لوله کربنی

Table1 Details carbon nanotubes

ردیف	نام فارسی مشخصه	نام لاتینی مشخصه	اندازه مشخصه
1	قطر	OD	8-15 nm
2	طول	Length	~50 um
3	مقدار هیدرواکسید	-COOH content	2.56 wt%
4	خالصی	Purity	>95 wt%
5	خاکستر	Ash	<1.5 wt%
6	سطح ویژه	SSA	> 233m <sup>2</sup> /g
7	هدایت الکتریکی	EC	s/cm10 <sup>2</sup>

نانوذرات کربنی با درصدهای وزنی مشخص را به رزین اپوکسی (پایه) معین شده، اضافه کرده و به وسیله همزن مکانیکی به مدت زمان 2.5 ساعت با دور 3000 rpm قرار داده تا نانوذرات در رزین پخش شود سپس مخلوط را در دستگاه آلتروسونیک تحت امواج فراصوتی با توان 150kW/cm<sup>2</sup> و دامنه 5µm قرار داده تا از تشکیل کلوخه‌ها جلوگیری کرده و نانو مواد به طور یکنواخت در داخل رزین پخش شوند. مدت زمان انجام آلتروسونیک 30 دقیقه می‌باشد که برای جلوگیری از شکستن ظرف و بالا رفتن بیش از حد دما در فواصل زمانی 5 دقیقه انجام می‌گیرد. در نهایت مجدداً مخلوط رزین و نانوذرات با همزن مکانیکی به مدت 1 ساعت با همان دور 3000 rpm هم‌زده شد. پس از آماده شدن مخلوط نانورزین، با توجه به نسبت مخلوط، سفت‌کننده را به آن اضافه کرده و به آرامی به هم زده می‌شود. نانو ماتریس (رزین + سفت‌کننده + نانوذرات) را در نهایت به مدت 15 دقیقه در دمای آزمایشگاهی در آن خلاء قرار داده تا حباب‌زدایی شود.

2-3- ساخت نمونه‌های بدون الیاف

برای تعیین خواص مکانیکی رزین خالص و نانورزین از نمونه‌های بدون الیاف استفاده می‌شود. نانو رزین آماده شده را در قالب‌های سیلیکونی ریخته و در آن به مدت 1 ساعت در دمای 70 درجه سانتیگراد قرارداده تا پخته شوند و سپس از قالب بیرون آورده می‌شود. (شکل 1)

2-4- ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیتی (هیبریدی)

ابتدا اندازه‌ی نمونه‌ها و تعداد آزمایش، با 12 لایه‌گذاری تعیین می‌شود و مقدار الیاف مورد نیاز بریده و با توجه به آن مقدار رزین و نانورزین با درصدهای وزنی 0.1، 0.5 و 1 آماده می‌شوند. به منظور کسب ضخامت یکسان و خواص برابر، نمونه‌ها، یکجا ساخته می‌شوند. برای این منظور یک قالب صلب به اندازه مناسب آماده کرده و جهت جلوگیری از چسبیدن رزین به

مربوط به افزودن 5 درصد وزنی نانوذرات می‌باشد. همچنین حاصل کار نشان دهنده این است که درصد بهینه نانو ذرات وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است.

در تحقیق حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات لوله‌ای کربنی چند دیواره‌ی اصلاح شده با هیدرواکسید را با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 در کامپوزیت‌های بافته شده‌ی دو بعدی شیشه/اپوکسی با آزمایش شبه استاتیکی برش پانچ (QS-PST) بطور تجربی بررسی می‌گردد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر و میزان نانوذرات در شرایط نفوذ شبه استاتیکی می‌باشد. علاوه بر آن بطور تجربی تأثیر نانو لوله‌های کربنی در خواص مکانیکی با آزمایش کشش نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

2- روش تهیه و ساخت مواد

2-1- تهیه مواد اولیه

در این پژوهش، ماتریس از نوع رزین اپوکسی، دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع 1 با نام تجاری اپون 828 تولید شده توسط شرکت شل به عنوان پایه اپوکسی که از خواص خوب این رزین به استحکام بالای مکانیکی و سازگاری بالا با الیاف‌ها می‌توان اشاره کرد، انتخاب شده است. سفت‌کننده‌های بسیاری برای اپون 828 پیشنهاد شده است که بسته به کاربرد کامپوزیت مناسب‌ترین آن انتخاب می‌شود. در اینجا از سفت‌کننده و از سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205<sup>2</sup> برای این رزین استفاده شده است. نسبت مخلوط رزین به سفت‌کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده 2 به 1 است.

برای تهیه‌ی ماده‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان بوده، استفاده شده است. این الیاف با چگالی سطحی 200 g/m<sup>2</sup> و چگالی حجمی 2400 kg/m<sup>3</sup> می‌باشد. همچنین در این تحقیق از نانولوله‌های کربنی چند دیواره که با هیدرواکسید اصلاح شده، با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 استفاده شده است. جدول 1 مشخصات کامل نانو لوله کربنی را که توسط شرکت سازنده ارائه شده، نشان می‌دهد.

2-2- آماده سازی نانو ماتریس

یکی از چالش‌های اصلی در ترکیب نانو لوله‌های کربنی با پلیمرها، به دست آوردن پخش مناسب و یکنواخت نانولوله‌ها در کل ماتریس است. وجود نیروی واندروالس<sup>3</sup> پخش نانوها را سخت کرده است. در دهه‌های اخیر چندین تکنیک جهت بدست آوردن پخش همگن نانوذرات در پلیمرها و جلوگیری از تشکیل کلوخه‌های نانو توسعه پیدا کرده است. این تکنیک‌ها شامل آلتروسونیک<sup>4</sup>، میله آسیاب<sup>5</sup>، کالندرینگ<sup>6</sup>، همزن<sup>7</sup> و اکستروژن<sup>8</sup> می‌باشد. اصلاح کردن نانوذرات، پخش نانو لوله‌های کربنی را به دلیل داشتن یون مثبت و منفی در مقابله با نیروی واندروالسی کمک می‌کند. و همچنین پیوند بین سطحی نانو لوله‌های کربنی و زنجیره‌ی پلیمرها را افزایش می‌دهد [4].

در این پژوهش، با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده، ابتدا نانو لوله‌های کربنی را در داخل آن به مدت 24 ساعت در دمای 70 درجه سانتیگراد قرار

1- A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)  
2- Epikure F-205  
3- van der Waals force  
4- ultrasonication  
5- calendaring  
6- ball milling  
7- shear mixing  
8- extrusion

برای پخت تکمیلی کامپوزیت‌های ساخته شده در آون به مدت 1 ساعت در دمای 70 درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. نهایتاً بعد از پخت، نمونه‌های برش در اندازه‌های 12×12cm و نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 در اندازه 12×2.5cm با اره نواری بریده می‌شوند. (شکل 2 و 3) برای هر آزمایش 5 نمونه تهیه شده است.

### 2-5- فیکسچر

فیکسچر آزمایش شبه استاتیکی با توجه به مطالعه‌های انجام شده و تجربه کاری شامل دو صفحه مربعی شکل در اندازه 20×20 cm از جنس فولاد به ضخامت 15mm با یک سوراخ در مرکز آن، به شعاع 5mm می‌باشد. صفحه زیری روی چهار پایه محکم شده است. صفحه کامپوزیتی می‌تواند در بین دو صفحه فولادی قرار گرفته با هشت پیچ که در اطرافش قرار دارد سفت شود (شکل 4). نفوذ کننده با قطر 10mm از فولاد ابزار سرد کار با شماره استاندارد 2210 معروف به فولاد نقره ساخته شده است.

### 3- آزمایش‌های خواص مکانیکی

#### 3-1- آزمایش کشش

رایج‌ترین و متداول‌ترین نوع آزمون برای تعیین مشخصات اولیه خواص مکانیکی بکار می‌رود. این آزمون به طور گسترده برای مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش بر روی نانو رزین‌ها و کامپوزیت‌های هیبریدی انجام می‌گیرد. با استفاده از آزمایش کشش می‌توان داده‌هایی همچون مدول یانگ، استحکام نهایی و غیره بدست آورد. این کار توسط دستگاه کشش انجام می‌گیرد.

آزمایش کشش نانورزین‌های بدون الیاف مطابق استاندارد ASTM D638 M-9 با سرعت 2 mm/min و برای کامپوزیت‌های هیبریدی آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM D3039 با سرعت بارگذاری 2 mm/min انجام گردید. با توجه به اینکه در محل اتصال فک‌های دستگاه با نمونه ایجاد تمرکز شده و باعث شکست در این محل و عدم دقت در آزمایش می‌شود. برای جلوگیری از این کار و حصول اطمینان شکست در میان نمونه، استفاده از تب<sup>1</sup> با شیب کم (حدود 8 درجه) بهترین نتیجه را می‌دهد. آزمایش‌ها در دانشگاه تربیت مدرس و توسط دستگاه کشش 30 تنی ساخت شرکت تایمز چین و لودسل 500 کیلوگرمی انجام گردید. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر کرنش علاوه بر جابجایی خود دستگاه از یک اکتسنومتر برای اندازه‌گیری کرنش استفاده گردید. (شکل 5)

#### 3-2- آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

علاوه بر آزمایش کشش، آزمایش نفوذ شبه استاتیکی یا پانچ برشی نیز انجام گردید. انجام آزمایش با کنترل جابجایی فک بالایی دستگاه، میزان جابجایی و محل اعمال نیرو صورت می‌گیرد (شکل 6). آزمایش‌ها باید تا نفوذ کامل نفوذکننده در داخل نمونه ادامه یابد تا اینکه نمودار تنش-کرنش به صورت افقی و ثابت بماند. تمام این آزمایش‌ها برای کامپوزیت‌های هیبریدی با درصدهای 0، 0.1، 0.5 و 1 انجام می‌گیرد.

قالب از یک ورق نازک سیلیکونی استفاده می‌شود. سپس به وسیله لایه چینی دستی ساخت کامپوزیت‌ها انجام می‌گیرد بعد تحت فشار قرار گرفته تا صافی سطح مناسب و توزیع یکنواخت ماتریس و ضخامت یکسان در تمام سطح کامپوزیت ایجاد شود.



Fig.2 Typical of punch shear test specimens hybrid nanocomposite

شکل 2 نمونه آزمایش برش پانچ نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی



Fig.3 Typical of tensile test specimens hybrid nanocomposite

شکل 3 نمونه آزمایش کشش نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی



Fig.4 Fixture of punch shear for hybrid nanocomposite specimen

شکل 4 فیکسچر آزمایش برش پانچ نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی



Fig. 5 Composite specimen under tension

شکل 5 نمونه کامپوزیتی تحت کشش

تأثیر قرار می‌دهد. اما با افزایش مقدار نانو ذرات در رزین از 0.5 به 1 درصد وزنی خواص مکانیکی افزایش نمی‌یابد، بلکه کاهش هم در آن دیده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به تجمع توده‌های نانوذرات با افزایش نانو که خود باعث تمرکز تنش و زمینه ساز رشد ترک بشود اشاره کرد [23]. با اندازه‌گیری سطح زیر نمودار تنش-کرنش می‌توان تأثیر همزمان استحکام نهایی و کرنش شکست و مدول یانگ را بررسی کرد که در این میان 0.5 درصد وزنی با داشتن  $MJ/m^3$  0.35 انرژی بیشترین مقدار چقرمگی را دارد.

#### 4-2- کشش نانو کامپوزیت‌های هیبریدی

شکل 8 نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های هیبریدی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که نانو ذرات تأثیر زیادی در کامپوزیت‌های هیبریدی ندارد.

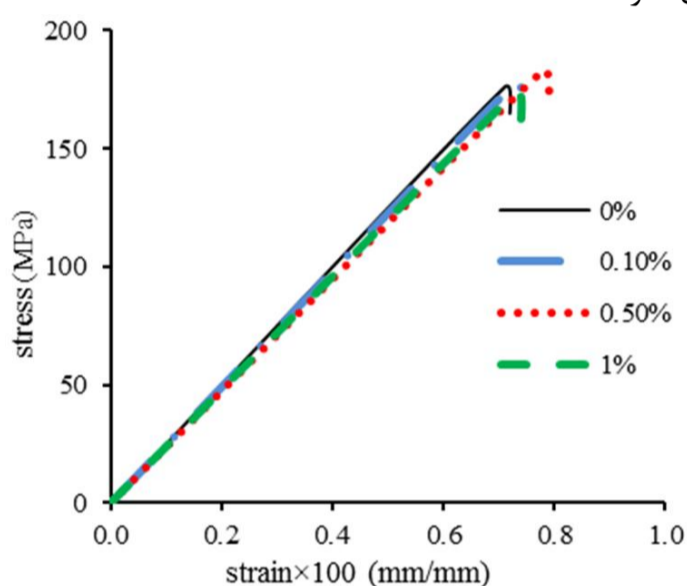


Fig. 8 The stress-strain curve nanocomposit in different percentages of carbon nanotubes

شکل 8 نمودار تنش-کرنش کامپوزیت در درصدهای مختلف نانو لوله‌های کربنی

جدول 3 خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی در درصدهای مختلف نانو لوله‌های کربنی

Table 3 The mechanical properties of nano-hybrid composites in different percentages of carbon nanotubes

چقرمگی (MJ/m <sup>3</sup> )	مدول (GPa)	کرنش (%)	استحکام نهایی (MPa)	نانوذرات کربنی (%)	ردیف
0.63	24.78	0.71±0.03	175.98±5.77	0	1
0.65	24.31	0.73±0.03	177.52±5.08	0.1	2
0.71	23.41	0.78±0.04	182.64±8.20	0.5	3
0.63	23.81	0.73±0.05	173.87±0.23	1	4

همچنین در جدول 3 خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها با درصد وزنی مختلف نانوذرات را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات در درصدهای وزنی 0.1 و 1 تغییر محسوسی در رفتار کامپوزیت‌ها ایجاد نمی‌کند اما در درصد وزنی 0.5 به دلیل افزایش در استحکام کششی و ازدیاد کرنش شکست باعث افزایش چقرمگی شکست می‌شود. در نتیجه نانوذرات لوله‌ای کربنی باعث انعطاف‌پذیری و چقرمگی کامپوزیت می‌شود. بطوری که میزان چقرمگی در 0.5 درصد وزنی، 13.6 درصد نسبت به نمونه خالص افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که حضور نانوذرات موجب چسبندگی خوب بین نانو رزین و الیاف شده است [24].

#### 4-3- برش پانچ

بعد از آزمایش برش پانچ، نتایج آن که از میانگین‌گیری تکرار آزمایش‌ها حاصل می‌شود، برای هر یک از نانو کامپوزیت‌ها به صورت منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده است. (شکل 9)

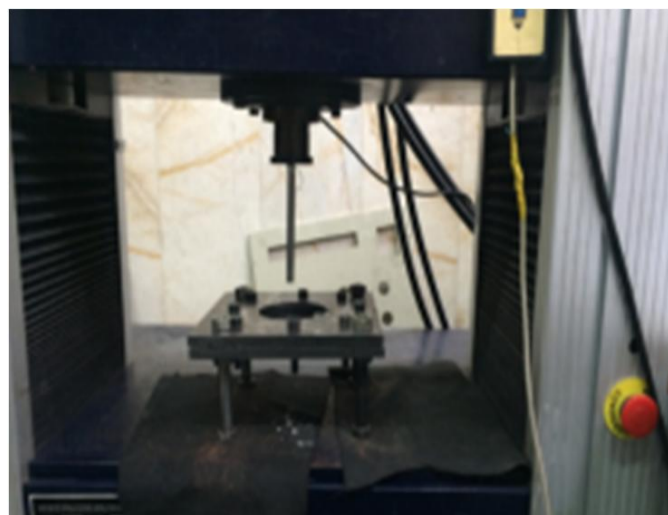


Fig.6 A view of the fixture and indenters ready to shear punch test

شکل 6 نمایی از دستگاه فشار همراه با فیکسچر و نفوذکننده آماده برای برش پانچ

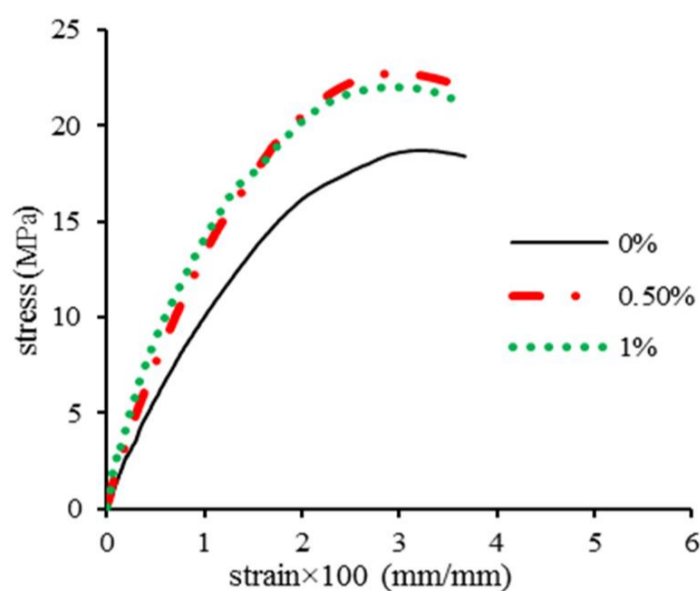


Fig.7 The stress-strain curve nano matrix in different percentages of carbon nanotubes

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نانو ماتریس در درصدهای مختلف نانو لوله‌های کربنی

جدول 2 تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی در خواص مکانیکی رزین

Table 2 The effect of adding carbon nanotubes on mechanical properties of resin

چقرمگی (MJ/m <sup>3</sup> )	مدول (GPa)	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی (MPa)	نانوذرات کربنی (%)	ردیف
0.30	0.5751	3.26±0.17	18.72±.38	0	1
0.35	0.7547	3.03±0.3	22.74±1.6	0.5	2
0.29	0.7489	2.95±0.26	22.04±0.81	1	3

#### 4- بحث و نتایج

##### 4-1- کشش نانو رزین

بعد از انجام آزمون کشش، نتایج حاصل، توسط نمودار تنش-کرنش در شکل 7 برای درصدهای مختلف ارائه شده است.

همانطوری که در شکل 7 می‌توان دید با اضافه کردن نانو ذرات، خواص رزین دچار تغییرات می‌شود. خلاصه نتایج این آزمایش را می‌توان در جدول 2 مشاهده کرد. چنانچه مشاهده می‌شود نانو لوله‌های کربنی می‌تواند باعث افزایش استحکام و تردی در رزین شوند. پخش شدن مناسب ذرات نانو در زمینه پلیمری باعث افزایش پیوند چسبندگی بین نانو ذرات و زمینه پلیمری شده و موجب می‌شود حرکت و جنبش زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری محدود بشود [23]. چنانچه مشاهده می‌شود بیشترین استحکام نهایی در بین نانو رزین‌ها مربوط به درصد وزنی 0.5 می‌باشد و همچنین بیشترین مدول یانگ نیز مربوط به همین درصد وزنی می‌باشد که 31.23 درصد نسبت به رزین خالص افزایش داشته است. در ارتباط با کرنش شکست کمترین مقدار به 0.5 درصد وزنی می‌باشد. با تغییر درصد وزنی نانو از 0 به 0.5 نوع چسبندگی پیوند ساختار بین نانو ذرات با ماتریس پلیمری تغییر می‌کند و خواص مکانیکی رزین را تحت

به حالت کشش درآمده و مقاومت می‌کنند. که این با تغییر شیب نمودار بار-جابجایی قابل مشاهده است. با افزایش جابجایی کامپوزیت‌های کشیده شده استحکام خود را از دست داده، تحت نیروی کشش-برش شکسته می‌شوند. مسیر EF: در نقطه E پلاگ بریده شده به همراه پانچ به بیرون رانده می‌شوند. و بعد آن تنها نیروی مقاوم در برابر حرکت پانچ نیروی اصطکاک می‌باشد.

#### 4-3-2- حداکثر نیروی تماسی

نیروی تماسی مقدار نیرویی است که کامپوزیت در طول بارگذاری می‌تواند تحمل کند. بیشترین مقدار این نیرو را بار پیک یا بار اوج<sup>1</sup> می‌گویند. مقدار حداکثر نیروی تماسی برای کامپوزیت‌ها با درصد‌های مختلف در شکل 11 نشان داده شده است.

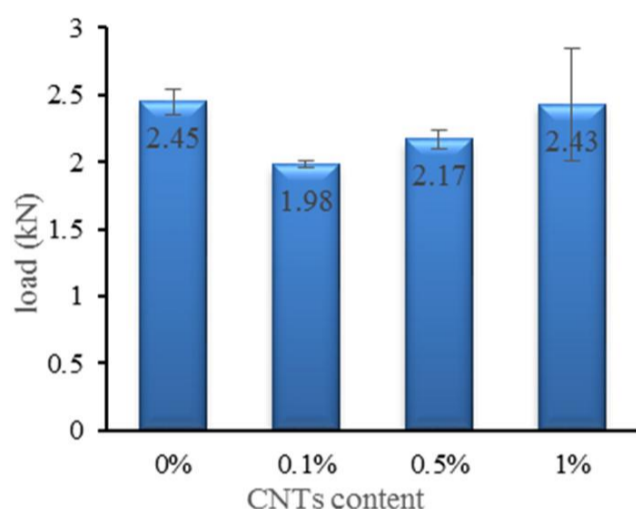


Fig.11 Maximum contact force at different percentages of nanotube

شکل 11 تغییرات نیروی تماسی حداکثر در درصد‌های مختلف نانو لوله‌ای کربنی

جدول 4 مقدار جابجایی در لحظه حداکثر نیروی تماسی و خروج از نانو کامپوزیت‌ها

Table 4 Amount of displacement at maximum contact force and out of nanocomposites

ردیف	نانو ذرات کربنی (%)	خیز در حداکثر نیروی تماسی (mm)	خیز در نفوذ کامل (mm)
1	0	6.5±0.17	9.36±0.69
2	0.1	5.92±0.02	9.64±0.63
3	0.5	6.36±0.037	10.06±0.32
4	1	6.62±0.057	10.14±0.95

با مقایسه بار اوج متوجه می‌شود که افزودن نانوذرات نه تنها موجب بهبود بار اوج نشده، بلکه بار اوج را کاهش داده است. پس اضافه شدن نانوذرات تغییر در مکانیزم‌های شکست می‌شود که این با تغییر در مقادیر درصد‌های نانوذرات که باعث تغییر بار اوج می‌شود کاملاً مشهود است. یک روند در کامپوزیت‌های هیبریدی، با افزودن نانوذرات در بار اوج دیده می‌شود که با افزایش میزان درصد نانوذرات، بار اوج افزایش می‌یابد بطوری که در مقدار درصد وزنی 1 میزان بار اوج تقریباً برابر بار اوج نمونه‌ی خالص است.

#### 4-3-3- جابجایی نفوذکننده

مقدار جابجایی پانچ از لحظه تماس با کامپوزیت تا خروج از کامپوزیت در راستای ضخامت، توسط نمودار نیرو-جابجایی قابل مشاهده است. در جدول 4 مقدار جابجایی در حداکثر نیروی تماسی و همچنین در نفوذ کامل در لحظه خروج از کامپوزیت، در درصد‌های مختلف از نانوذرات لوله‌ای کربنی ارائه شده است.

همانطوری که مشخص است با اضافه کردن نانوذرات به کامپوزیت‌ها، مقدار جابجایی در حداکثر نیروی تماسی تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. اما مقدار جابجایی در لحظه خروج از کامپوزیت با اضافه کردن نانوذرات

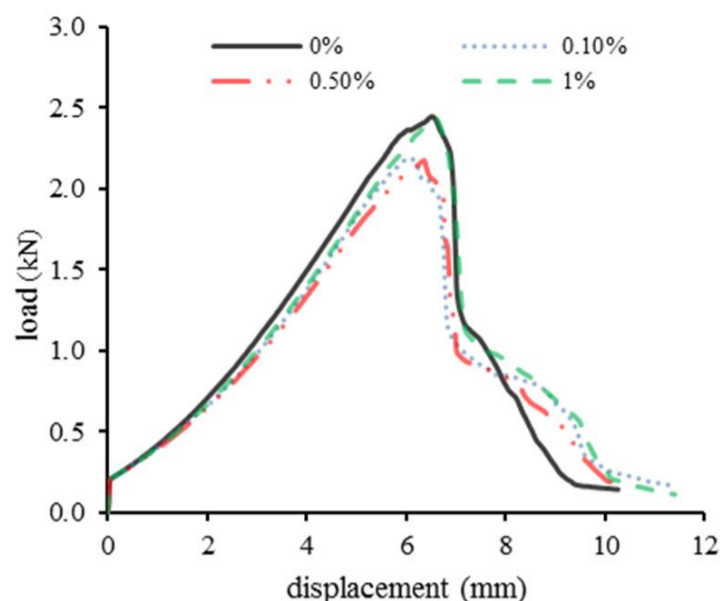


Fig.9 Force-displacement curve nano-hybrid composites

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی

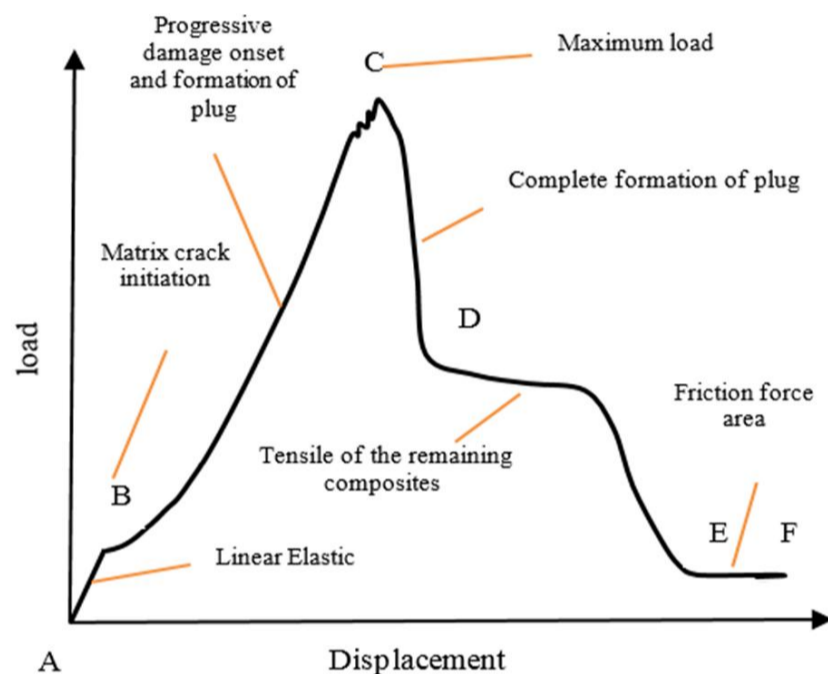


Fig.10 Stages of fracture mechanism in the force-displacement curve

شکل 10 مراحل مختلف مکانیزم شکست در منحنی نیرو-جابجایی

#### 4-3-1- مکانیزم شکست

به منظور درک و فهم درست و بررسی رفتار دینامیکی در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی استفاده می‌شود. با استفاده از این نمودار مدل‌های شکست و مکانیزم‌های خرابی شناسایی و ارزیابی می‌شوند تا تدابیر خوبی جهت جلوگیری از شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها انجام گیرد.

به طور کلی نمودار نیرو-جابجایی از 5 بخش تشکیل شده است؛ (شکل 10)

مسیر AB: در این مرحله پانچ با کامپوزیت تماس پیدا کرده و نیرو یا تنش اعمال می‌شود و در کامپوزیت یک خیز کلی الاستیک ایجاد می‌شود که هیچ گونه خرابی و پارگی در این مرحله دیده نمی‌شود به طوری که اگر نیرو برداشته شود دوباره به حالت اولیه برمی‌گردد.

مسیر BC: در نقطه B خرابی کامپوزیت با ترک برداشتن ماتریس شروع می‌شود. خرابی در این مرحله شامل آسیب دیدن ماتریس و لایه لایه شدن در داخل کامپوزیت است. با ادامه نیرو و افزایش تنش برشی در اطراف پانچ در صفحه بالایی کامپوزیت، باعث شروع برش فایبرها می‌شود. همچنین در این مسیر تشکیل پلاگ مخروطی شروع می‌شود. این افزایش نیرو ادامه دارد تا اینکه در یک نقطه به حداکثر خود می‌رسد و ناگهان افت می‌کند (نقطه C).

مسیر CD: در این مرحله پلاگ مخروطی تشکیل شده، کامل می‌شود. در نقطه C با یک افت ناگهانی تا تکامل پلاگ (نقطه D) ادامه دارد.

مسیر DE: با حرکت پانچ به سمت پایین به کامپوزیت‌های باقی مانده در راستای ضخامت و در زیر پلاگ، فشار آورده در نتیجه کامپوزیت‌های باقی مانده

1- Peak load

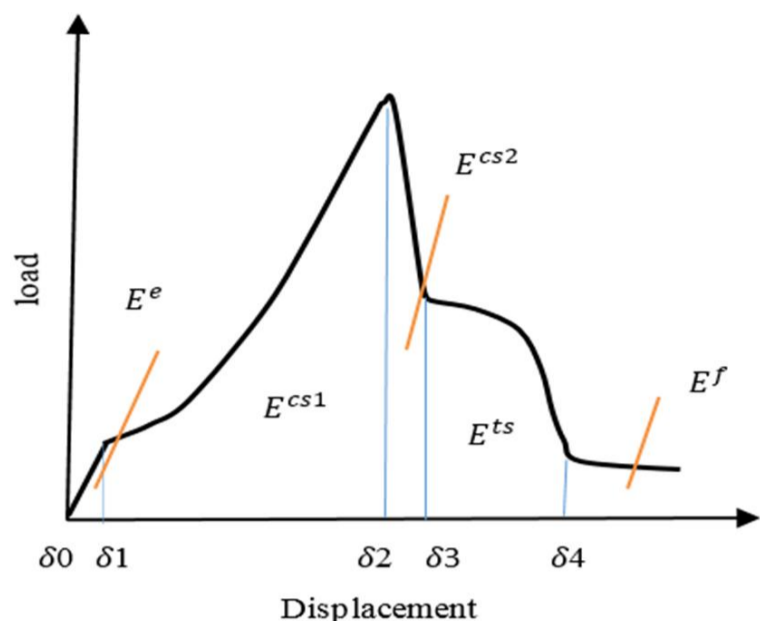


Fig.12 Different areas of energy absorption at force-displacement curve

شکل 12 نواحی مختلف جذب انرژی در منحنی نیرو-جابجایی

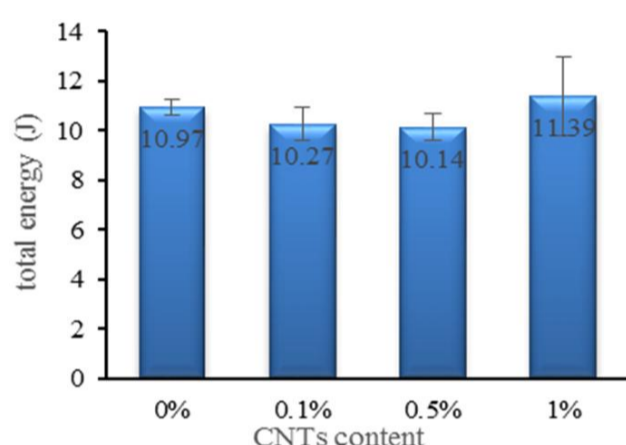


Fig.13 The total amount of energy absorbed at different percentages of carbon nanotube

شکل 13 میزان کل انرژی جذب شده در درصد‌های مختلف نانو لوله‌های کربنی

جدول 6 مقادیر نیروی اصطکاک در درصد‌های مختلف نانو لوله‌ای کربنی

Table 6 Friction force values at different percentages of carbon nanotube

ردیف	نانو ذرات کربنی (%)	نیروی اصطکاک (kN)
1	0	0.16±0.03
2	0.1	0.27±0.06
3	0.5	0.17±0.03
4	1	0.17±0.09

با افزودن نانوذرات لوله‌ای کربنی به کامپوزیت‌ها، نحوه اتصال الیاف و رزین تغییر کرده و خواص مکانیکی و مکانیزم شکست در کامپوزیت‌ها تغییر می‌کند. بنابراین میزان جذب انرژی در هر یک متفاوت می‌باشد. در جدول 5 میزان جذب انرژی در نواحی گوناگون در درصد‌های مختلف ارائه شده است.

همانطوری که از شکل 13 مشاهده می‌شود با افزودن نانوذرات ابتدا انرژی کل کاهش، ولی با اضافه کردن میزان درصد نانو، افزایش می‌یابد به طوری که مقدار کل انرژی جذب شده مربوط به 1 درصد وزنی با افزایش 3.8 درصد می‌باشد. این درحالی است که میزان انرژی جذب شده در حداکثر خیز و در ناحیه  $E^{cs}$  با افزایش درصد نانوذرات دچار کاهش شده است. (جدول 5)

وقتی که صفحه پشتی تحت کشش-برش قرار می‌گیرد نانو ذرات تغییر در رفتار کامپوزیت داده و شکست کامپوزیت باقی مانده را به تأخیر می‌اندازد. یعنی کامپوزیت چقرمگی‌تر و انعطاف‌پذیرتر شده است و این زمانی محسوس‌تر است که ضخامت کامپوزیت کم و تحت کشش-برش قرار گرفته باشد. مطالعات نشان می‌دهد، نانوذرات اصلاح شده مسیر ترک در کامپوزیت‌ها را در هنگام بارگذاری به سمت دور از روابط بین ماتریس و فایبر منتقل می‌کند [7] و تاخیر در شکست کامپوزیت رخ می‌دهد.

افزایش می‌یابد. این بدین معناست، بعد از اینکه مقداری از کامپوزیت آسیب دید، وجود نانوذرات در کامپوزیت باقی مانده (ضخامت کم) و در تغییر فرم و غشایی کامپوزیت، در صفحه پشتی بیشتر تأثیر گذاشته و باعث می‌شود که شکست کامپوزیت به تأخیر افتاده و نفوذکننده دیرتر از کامپوزیت خارج شود. بیشترین میزان جابجایی در مقدار 1 درصد وزنی با 8.3 درصد افزایش نسبت به نمونه خالص می‌باشد

#### 4-3-4- انرژی جذب شده

مقدار کاری که یک نفوذکننده برای یک نفوذ کامل در یک کامپوزیت در راستای خود صرف می‌کند یا بطور دقیق مقدار انرژی هدف کامپوزیتی برای شکستن می‌گیرد، انرژی جذب شده در آن هدف گفته می‌شود. این انرژی از طریق سطح زیر نمودار بار-جابجایی بدست می‌آید. چنانکه قبلاً اشاره شد متفاوت بودن مکانیزم‌های شکست (نسبت نواحی مختلف نمودار بار-جابجایی به یکدیگر) در کامپوزیت در راستای ضخامت از یک طرف و غیر خطی بودن نمودار بار-جابجایی از طرف دیگر، نشانگر این است که میزان جذب انرژی در مراحل مختلف، گوناگون می‌باشد.

به منظور درک درست از مراحل گوناگون جذب انرژی در مکانیزم‌های خرابی مختلف سطح زیر نمودار بار-جابجایی به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است. (شکل 12)

ناحیه 1: از  $\delta_0$  تا  $\delta_1$  که سطح زیر قسمت الاستیک خطی است، انرژی جذب شده در این ناحیه ( $E^e$ ) بدلیل خمش کلی نمونه می‌باشد. به علت کم بودن مقدار کشسانی کامپوزیت‌ها، مقدار این انرژی ناچیز است.

ناحیه 2: از  $\delta_1$  تا  $\delta_3$  کامپوزیت چند لایه تحت فشار قرار می‌گیرد. با افزایش جابجایی در این ناحیه، انرژی جذب شده جهت صرف خرابی ماتریس در  $\delta_1$  و در ادامه، پیشروی خرابی ماتریس و لایه لایه شدن لایه میانی، پارگی و انتشار فایبر در اطراف پانچ و تشکیل پلاگ می‌شود. این ناحیه خودش به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ ناحیه  $\delta_1$  تا  $\delta_2$  مقدار انرژی  $E^{cs1}$  و ناحیه  $\delta_2$  تا  $\delta_3$  با مقدار انرژی  $E^{cs2}$  می‌باشد. اگرچه مکانیزم‌های خرابی و جذب انرژی در این نواحی متفاوت است اما درحالت کلی در این نواحی جذب انرژی ناشی از فشار برش می‌باشد. این دو ناحیه حداکثر جذب انرژی در کامپوزیت‌ها را به خود اختصاص داده است. مقدار آن  $E^{cs}$  می‌باشد.

ناحیه 4: از  $\delta_3$  تا  $\delta_4$  مکانیزم خرابی تغییر می‌کند. وقتی تشکیل برش پلاگ کامل شد با افزایش جابجایی مقدار لایه‌های کامپوزیتی باقی مانده در زیر پلاگ، در صفحه پشتی کامپوزیت به صورت غشای کششی درآمد که این قسمت علاوه بر بارگذاری برشی تحت کشش قرار می‌گیرد. بنابراین انرژی جذب شده در این ناحیه ناشی از کشش-برش می‌باشد. مقدار آن  $E^{ts}$  است. ناحیه 5: از  $\delta_4$  به بعد سطح زیر نمودار مربوط به انرژی جذب شده توسط نیروی اصطکاک می‌باشد که با  $E^f$  نشان داده شده است.

به طور خلاصه کل انرژی جذب شده از رابطه (1) قابل محاسبه است؛

$$E_T = \int_0^{\delta} p(\delta)d\delta = E^e + E^{cs1} + E^{cs2} + E^{ts} + E^f \quad (1)$$

جدول 5 انرژی جذب شده در مراحل گوناگون در درصد‌های مختلف از نانوذرات کربنی  
Table 5 The energy absorbed at different stages in different percentages of carbon nanotube

ردیف	نانو ذرات کربنی (%)	$E^{cs1}$ (J)	$E^{cs2}$ (J)	$E^{ts}$ (J)
1	0	8.11	1.37	1.48
2	0.1	6.65	1.44	2.19
3	0.5	6.95	1.22	1.90
4	1	8.30	1.11	2.25



#### 4-3-5- نیروی اصطکاک

بعد از اینکه سر (دماغه) نفوذکننده از نمونه کامپوزیتی خارج شد نیروی اصطکاک تنها نیروی مقابل حرکت نفوذکننده می‌باشد. نیروی اصطکاک یکی از عوامل جذب انرژی است که بعد از ناحیه کشش - برش که تقریباً بصورت افقی در انتهای نمودار بار-جابجایی نمایان می‌شود. این نیرو علاوه بر نیروی عمودی سطح (که توسط پتال‌ها وارد می‌شود) و مساحت سطح تماس نفوذکننده و کامپوزیت، به جنس این دو سطح بستگی دارد. با توجه به ثابت بودن جنس نفوذکننده و پتال‌های یکسان (مساحت سطح تماس یکسان) با انجام آزمایش‌های یکسان تنها عامل مؤثر جنس کامپوزیت‌های هیبریدی که با تغییر مقدار نانوذرات لوله‌ای کربنی میزان نیروی اصطکاک تغییر می‌کند که بیشترین مقدار مربوط به 0.1 درصد نانوذرات، با 68.8 درصد نسبت به حالت خالص افزایش یافته است.

#### 5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثرات نانو لوله‌های کربنی (MWCNTs) بر روی خواص برش پانچ و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی (شیشه/اپوکسی/نانو لوله‌های کربنی) و همچنین خواص مکانیکی نانو ماتریس با استفاده از فرآیند شبه استاتیکی (QS) و آزمایش کشش بررسی گردید. در این تحقیق از نانو لوله‌های کربنی اصلاح شده با هیدرواکسید (MWCNTs-COOH) با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 استفاده شده است. بررسی نتایج آزمایش کشش در نانو ماتریس نشان می‌دهد که رزین به درصد نانوذرات لوله‌ای کربنی وابسته است. به طوری که تغییری در مقادیر تنش و کرنش، بویژه در درصد وزنی 0.5 دیده می‌شود. نتایج آزمایش کشش حاصل از کامپوزیت‌های هیبریدی نشان می‌دهد که با افزودن نانو ذرات، در درصدهای وزنی 0.1 و 1 تغییر محسوسی در رفتار کامپوزیت وجود ندارد اما در درصد وزنی 0.5 با افزایش استحکام و کرنش شکست، انعطاف‌پذیری افزایش گردیده، به طوری که انرژی جذب شده 13.6 درصد افزایش یافته است. نتایج مربوط به خواص برشی پانچ نشان می‌دهد با وجود اینکه نانوذرات باعث کاهش حداکثر نیروی تماسی شده ولیکن 8.3 درصد افزایش در جابجایی کل نفوذکننده، در درصد وزنی 1 دیده می‌شود و همچنین میزان کل انرژی جذب شده 3.8 درصد در همین درصد وزنی افزایش یافته است.

#### 6- مراجع

- [1] B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 4, pp. 356-369, 2008.
- [2] J. R. Xiao, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, Progressive damage and delamination in plain weave S-2glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading, *Composite Structures*, Vol. 78, No. 2, pp. 182-196, 2007.
- [3] M. Tehrani, A. Y. Boroujeni, T. B. Hartman, T. P. Haugh, S. W. Case, M. S. Al-Haik, Mechanical characterization and impact damage assessment of a woven carbon fiber reinforced carbon nanotube-epoxy composite, *Composites Science and Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 42-48, 2013.
- [4] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, M. R. Taha, Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 39-47, 2012.
- [5] V. Kostopoulos, A. Baltopoulos, P. Karapappas, A. Vavouliotis, A. Paipetis, Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 4, pp. 553-563, 2010.
- [6] J. Muthu, C. Dendere, Functionalized multiwall carbon nanotubes strengthened GRP hybrid composites: Improved properties with optimum fiber content, *Composites: Part B*, Vol. 67, No. 1, pp. 84-94, 2014.
- [7] V. C. S. Chandrasekaran, S. G. Advani, M. H. Santare, Influence of resin properties on interlaminar shear strength of glass/epoxy/MWNT hybrid composites. *Composites: Part A*, Vol. 42, No. 1, pp. 1007-1016, 2011.
- [8] A. F. Manzella, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, Effect of punch and specimen dimensions on the confined compression behavior of S-2 glass/epoxy composites, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 7, pp. 1726-1737, 2011.
- [9] J. Harding, L. Dong, Effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon-fiber-reinforced laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 53, No. 3, pp. 347-358, 1994.
- [10] M. Rahmana, M. Hosur, Sh. Zainuddin, U. Vaidya, A. Tauhid, A. Kumar, J. Trovillion, Sh. Jeelani, Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 57, No. 1, pp. 108-118, 2013.
- [11] S. U. Khan, K. Iqbal, A. Munir, J. K. Kim, Quasi-static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. *Composites: Part A*, Vol. 42, No. 3, pp. 253-264, 2011.
- [12] Ö. F. Erkendirici, B. Z. (Gama) Haque, Quasi-static penetration resistance behavior of glass fiber reinforced thermoplastic composites, *Composites: Part B*, Vol. 43, No. 8, pp. 3391-3405, 2012.
- [13] Ö. F. Erkendirici, B. Z. (Gama) Haque, Investigation of penetration mechanics of PW Kevlar fiber reinforced HDPE composites, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 22, No. 3, pp. 304-322, 2012.
- [14] L. P. Borrego, J. D. M. Costa, J. A. M. Ferreira, H. Silva, Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles. *Composites: Part B*, Vol. 62, No. 1, pp. 65-72, 2014.
- [15] E. Mehrabani Yeganeh, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015. (in Persian)
- [16] J. A. Nemes, H. Eskandari, L. Rakitch, Effect of laminate parameters on the penetration of graphite/epoxy composites, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 97-112, 1998.
- [17] SV. Potti, CT. Sun, Prediction of impact induced penetration and delamination in thick composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No.1, pp. 31-48, 1997.
- [18] RAW. Mines, AM. Roach, N. Jones, High velocity perforation behavior of polymer composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 61-88, 1999.
- [19] A. Masoudi, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE-Experimental and numerical investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014. (in Persian)
- [20] M. H. Pol, G. H. Liaghat, M. Sedighi, Analytical modeling of perforation of projectiles into glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp.11-19, 2012. (in Persian)
- [21] M. H. Pol, G. Liaghat, F. Hajiarazi, Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 13, pp. 1563-1573, 2013.
- [22] M. Pol, G. Liaght, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (in Persian)
- [23] 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)
- [24] Gh. H. Rahimi, R. Zamani, M. H. Pol, Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with clay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014. (in Persian)