



## تأثیر شکل دماغه نفوذ کننده در نفوذ شبه استاتیکی برش پانچ صفحات نانو کامپوزیتی چند لایه ای

سید عبدالوهاب حسینی<sup>1</sup>، محمد حسین پل<sup>2\*</sup>

1- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر، شوشتر  
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش  
\* تفرش، کدپستی 143-14115، m\_h\_pol@tafreshu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 24 دی 1394  
پذیرش: 11 اسفند 1394  
ارائه در سایت: 28 فروردین 1395

کلید واژگان:

نانو کامپوزیت

برش پانچ

نانو لوله های کربنی

هندسه نفوذ کننده و انرژی جذب شده

### چکیده

در این مقاله تاثیر افزودن نانولوله های کربنی روی رفتار برش پانچ شبه استاتیکی کامپوزیت چند لایه ای شیشه اپوکسی تحت نفوذ نفوذکننده هایی با سه دماغه مختلف به طور تجربی مورد بررسی قرار می گیرد. نانو کامپوزیت های هیبریدی از 12 لایه الیاف به روش لایه چینی دستی ساخته شده است. الیاف شیشه دارای بافت دوبعدی با چگالی سطحی  $2200 \text{ g/m}^2$  بوده، در حالی که سیستم رزین اپوکسی از دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ با نام تجاری ایپون 828 به عنوان پایه اپوکسی و سیکلوآلیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205 به عنوان سفت کننده، ساخته شده است. نانولوله های کربنی چند دیواره (MWCNTs) اصلاح شده با هیدروآکسید (-COOH) درون سیستم اپوکسی با درصد وزنی 0 و 1 نسبت به وزن کل ماتریس پخش شده است. در این پژوهش برای بررسی تاثیر شکل دماغه از سه نفوذکننده ی تخت، مخروطی و اجیوال استفاده شد. علاوه بر آزمایش نفوذ شبه استاتیکی برش پانچ، آزمایش کشش بر روی نمونه های نانو رزین و نانو کامپوزیت های هیبریدی انجام گردید. نتایج آزمون کشش نشان می دهد هر چند با افزودن نانولوله های کربنی در خواص کششی رزین افزایش قابل توجهی مشاهده میشود، ولیکن در خواص کششی نانو کامپوزیت های هیبریدی تغییر معناداری مشاهده نمیگردد. نتایج آزمایش برش پانچ با نفوذکننده های مختلف در هر دو نمونه حاکی از آن است که بیشترین نیروی تماسی مربوط به نفوذکننده سرتخت و بیشترین انرژی جذب شده مربوط به نفوذکننده مخروطی می باشد. علاوه بر آن در مجموع افزودن نانولوله های کربنی باعث کاهش مقدار نیروی تماسی و انرژی جذب شده میشود.

## Influence of indenter nose in quasi-static punch shear penetration of the nanostructured laminated plates

Seyed Abdolvhabe Hoseini<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Pol<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University-Shoushtar Branch, Shoushtar, Iran

2- 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 14 January 2016  
Accepted 01 March 2016  
Available Online 16 April 2016

#### Keywords:

Nanocomposite  
punch shear  
carbon nanotubes  
indenter geometry and absorbed energy

### ABSTRACT

In this paper, the effects of adding carbon nanotubes on quasi-static punch shear behavior of glass/epoxy laminated composites under penetration of three different indenters has been investigated experimentally. The hybrid laminate nanocomposites have 12 layers manufactured by Hand lay-up method. Fibers have a plain-weave configuration with density of  $200 \text{ g/m}^2$ , while the epoxy resin system is made of diglycidyl ether of bisphenol A resin (DGEBA), Epon 828, with Epikure F-205 as the curing agent. The multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) modified with hydroxide (-COOH) are dispersed into the epoxy system in a 0% and 1% weight ratio with respect to the matrix. In order to study influence of the nose shape, three different indenters, flat, conical and ogival, were used. Moreover, the tensile test was performed on the nanomatrix and the hybrid laminate nanocomposite samples. The tensile test indicated that the addition of nanotubes on the tensile properties of resin saw significant increase, but no significant changes were observed in the tensile properties of the hybrid laminate nanocomposites. Results of the quasi-static punch shear test show that the highest contact force is exhibited by flat indenter, while the highest absorbed energy is shown by conical indenter. Totally, the addition of carbon nanotubes reduces the contact force and absorbed energy.

### 1- مقدمه

کارهای حفاظتی استفاده می شود. رفتار کامپوزیت ها هنگامی که تحت ضربه قرار می گیرند به علت سرعت بالای بارگذاری و رخ دادن پدیده های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف ها، جدایش لایه ها، شکست الیاف ها و ... به

کامپوزیت ها امروزه جایگاه خاصی در صنعت پیدا کرده اند. فلزات به عنوان مواد سنتی به دلیل داشتن استحکام و سفتی پایین نسبت به وزن، کمتر در

Please cite this article using:

S. A. Hoseini, M. H. Pol, Influence of indenter nose in quasi-static punch shear penetration of the nanostructured laminated plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 196-204, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

خرابی، نفوذ و انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های ضخیم، را با آزمایش‌های بالستیک و شبه‌استاتیک به‌طور جداگانه بررسی کردند و مشاهده کردند که مکانیزم‌های خرابی در آزمایش برخورد بالستیکی می‌تواند با مکانیزم‌های خرابی در آزمایش‌های شبه استاتیکی با اعمال یک سری شرایط مرزی (دهانه‌های متفاوت) مطابقت داشته باشد. طبق این مطالعه آن‌ها یک مدل توسعه‌یافته‌ی شبه استاتیکی، جهت مدل کردن مراحل مختلف نفوذ بالستیکی و انرژی جذب شده در مکانیزم‌های خرابی در برخورد بالستیکی بدست آوردند.

تهرانی و همکارانش [3] خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف کربن و نانولوله‌های 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 راستای ضخامت و انرژی جذب شده در یک نرخ 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 نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیدرواکسید<sup>3</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 نانولوله‌های کربنی اندازه خرابی کامپوزیت کاهش و پاسخ ضربه در سرعت‌های پایین بهبود می‌یابد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که در زیر حد نفوذ<sup>4</sup> حداکثر مقدار نیرو در 1.5 درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش در انرژی جذب شده مربوط به 1.5 درصد وزنی به میزان 50 درصد می‌باشد.

موتیو و دندر [5] میزان درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند دیواره و پارامترهای مختلف ساخت را بر خواص کششی، خمشی و ضربه در کامپوزیت‌ها مطالعه کردند. مقدار بهینه الیاف شیشه از بین درصدهای وزنی 24، 32، 40 و 32 را 32 و همچنین زمان اصلاح شدن MWCNTs از بین 6، 24 و 48 ساعت، 24 ساعت بدست آوردند. طبق این پژوهش میزان درصد وزنی نانولوله‌های کربنی اصلاح شده به وسیله‌ی اسید نیتریک 0.1، 0.5 و 1 برای 32 درصد الیاف می‌باشد. همچنین آن‌ها میزان بهینه درصد وزنی نانولوله‌های کربنی را 0.5 درصد بدست آوردند.

چاندرااسکاران و همکارانش [6] تأثیر MWCNTs بر روی خواص رزین و استحکام برشی لایه میانی<sup>5</sup> که با الیاف شیشه تقویت شده است، را بررسی کردند. آن‌ها مقدار MWCNTs را 0.5 درصد وزنی در نظر گرفته و خواص برشی را با استفاده از آزمایش برش پانچ و استحکام بین الیاف و رزین را با استفاده از آزمایش میکرودراپلت<sup>6</sup> مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تغییر مهمی در مدول یانگ ماتریس بین نمونه‌های بدون نانو و نانودار مشاهده نکردند. اما نشان دادند نانوذرات باعث تغییر در استحکام برشی لایه میانی می‌شود، و در نتیجه نانولوله‌های کربنی در کیفیت اتصال الیاف و رزین بیشتر از خواص رزین تأثیر گذار است.

مانزیلا و همکارانش [7] با استفاده از برش پانچ سر تخت، تأثیر ابعاد

طور همزمان، بسیار پیچیده می‌شود. آگاهی یافتن از مکانیزم‌های نفوذ در سرعت‌های بالا بسیار سخت بوده و بارگذاری نفوذ شبه استاتیک<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].

خواص خوب و مطلوب مواد کامپوزیتی از جمله نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا باعث شده است که کاربرد آن‌ها در صنایع روز به روز افزایش یابد. مطالعه رفتار مواد و تحلیل خرابی ناشی از نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد که شکست‌ها و آسیب‌ها به عوامل و پارامترهای متعددی بستگی دارند. در این بین شکل هندسه نفوذکننده‌ها که مقدار و نوع تماس بین هدف و نفوذ کننده را مشخص می‌کند، اهمیت بسیار زیادی دارد. علی‌رغم داشتن این خواص مطلوب، نواقص و کمبودهایی در کامپوزیت‌ها احساس می‌شود که خصوصیات و ویژگی‌های کامپوزیت‌ها را دچار مشکل و ضعف می‌سازد. از جمله این ضعف‌ها می‌توان به عدم چسبندگی مناسب بین الیاف و ماتریس، به وجود آمدن حفره هنگام ساخت، وزن بالای تقویت‌کننده و کم بودن سطح تماس الیاف و رزین را اشاره کرد. مطالعات و تحقیقات فراوانی جهت رفع نواقص، بهبود خواص مکانیکی، کاهش اشتعال‌پذیری و نفوذپذیری که مورد توجه فراوان پژوهشگران بوده، انجام گرفته است که مهم‌ترین آن استفاده از نانوذرات می‌باشد. با گسترش 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، اهمیت این موضوع را دوچندان کرده است. در میان نانوذرات، نانولوله‌های 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. نانولوله‌های کربنی پیوند محکمی در بین اتم‌های خود دارد به همین دلیل نیروی کششی و استحکام زیادی داشته و مدول یانگ (خصوصاً در راستای محوری) آن‌ها بسیار زیاد است. چگالی وزنی نانولوله‌های 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. نانولوله‌های کربنی به دو شکل مختلف تقسیم می‌شوند؛ نانولوله‌های 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 آن‌ها اشاره کرد. نوع دوم نانولوله‌های کربنی چند دیواره است که خواص آن‌ها علاوه بر وابستگی به طول و قطر به تعداد دیواره‌های آن نیز وابسته می‌باشد. به‌طور 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 شبه‌استاتیکی مدل کردند. آنان در این تحقیق مکانیزم‌های

<sup>3</sup> COOH-MWCNTs

<sup>4</sup> penetration limit

<sup>5</sup> interlaminar shear strength (ILSS)

<sup>6</sup> microdroplet test

<sup>1</sup> quasi-static indentation

<sup>2</sup> Multi-wall carbon nanotube (MWCNT)

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 نانولوله‌های کربنی چند دیواره‌ای اصلاح شده با هیدرواکسید را با درصد‌های وزنی 0 و 1 در کامپوزیت‌های بافته شده‌ی دو بعدی شیشه/اپوکسی با آزمایش شبه استاتیکی برش پانچ (QS-PST) با سه نفوذ کننده‌ی سرتخت، مخروطی و اجیوال به طور تجربی بررسی می‌گردد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر نانوذرات در شرایط نفوذ شبه استاتیکی با دماغه‌های گوناگون می‌باشد. علاوه بر آن به طور تجربی تأثیر نانولوله‌های 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 شامل دو بخش تشکیل شده است. الف) دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع 5<sup>5</sup> با نام تجاری ایپون 828 تولید شده توسط شرکت شل به عنوان پایه اپوکسی با استحکام بالای مکانیکی و سازگاری بالا و ب) سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205<sup>6</sup> به عنوان سفت کننده. نسبت مخلوط رزین به سفت کننده 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  $200 \text{ g/m}^2$  و چگالی حجمی  $2400 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. همچنین در این تحقیق از نانولوله‌های کربنی چند دیواره که با هیدرواکسید اصلاح شده، با درصد‌های وزنی 0 و 1 استفاده گردید. 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>7</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، میله آسیاب، کالندرینگ، همزن و اکستروژن می‌باشد. اصلاح کردن نانوذرات، پخش نانولوله‌های کربنی را به دلیل داشتن یون مثبت و منفی در مقابله با نیروی واندروالسی کمک می‌کند. همچنین پیوند بین

جدول 1 مشخصات کامل نانو لوله کربنی

Table 1. Details of carbon nanotubes

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

پانچ و نمونه را در کامپوزیت‌های الیاف شیشه بافته شده و رزین SC-15، تولید شده با فرایند انتقال رزین به کمک خلا<sup>1</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یافتند که کامپوزیت‌ها در یک زاویه مشخصی می‌شکنند که مستقل از ابعاد پانچ و نمونه بوده و تنش اعمال شده در شکست در یک زاویه مشخص، مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است.

رحمان و همکارانش [8] تأثیر نانولوله‌های کربنی در نمونه‌های کامپوزیتی، تحت ضربات بالستیکی را بررسی کردند. آنان از نانولوله‌های کربنی MWCNTs اصلاح شده به وسیله آمینو<sup>2</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>3</sup> جهت پخش نانولوله‌های کربنی در رزین استفاده شده است. طبق این تحقیق در 0.3 درصد وزنی نانوذرات انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد.

قاجار و رصاف [9] اثر شکل ضربه زننده و دما را در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی در ضربه‌ی سرعت کم بررسی کردند. آنان از چهار نوع شکل ضربه زننده تخت، کروی، مخروطی و سهموی و دستگاه وزنه افتان برای این کار استفاده کردند. طبق این مطالعه هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. در این پژوهش به این نتیجه دست یافتند که ناحیه آسیب ضربه زننده مخروطی از همه بیشتر است. همچنین با افزایش دما بیشینه نیروی برخورد کاهش و جابجایی افزایش می‌یابد.

مهربانی یگانه و همکارانش [10] تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی با دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال<sup>4</sup> را 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 [11] تأثیر ضخامت کل لایه‌های کامپوزیت، ضخامت زیر لایه‌ها و زاویه نفوذ را در انواع کامپوزیت‌های ایزوتروپیک بررسی کردند. آن‌ها عدم تأثیر پارامترهای کامپوزیت در پاسخ به ضربه و تأثیر مثبت ضخامت و نرخ کرنش را در بار اوج را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش ضخامت و نرخ کرنش، بار اوج افزایش می‌یابد.

صادقی و پل [12] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی را بر کامپوزیت‌ها، با فرایند نفوذ شبه استاتیکی برش پانچ مطالعه کردند. آنان در این مطالعه از نانو ذرات MWCNTs اصلاح شده با هیدرواکسید با درصد‌های وزنی 0، 0.1، 0.5 و 1 استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آنان نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی، مکانیزم شکست را تغییر می‌دهد. همچنین آن‌ها گزارش می‌دهند افزودن نانولوله‌های کربنی تأثیر کمی در کل انرژی جذب شده دارد اما در 1 درصد وزنی، باعث افزایش جابجایی کل هدف می‌شود.

پل و همکارانش [13] تأثیر نانوذرات 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 خلا 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

<sup>1</sup> vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process

<sup>2</sup> amino (NH<sub>2</sub>)

<sup>3</sup> three-roll mill process

<sup>4</sup> Ogival

<sup>5</sup> A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)

<sup>6</sup> Epikure F-205

<sup>7</sup> van der Waals force

کاری شامل دو صفحه مربعی شکل در اندازه  $20 \times 20$  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). همچنین در این مقاله از سه نفوذ کننده با ساقه استوانه‌ای شکل و بلند با دماغه‌های سر تخت به قطر 10mm، مخروطی 37 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 2.5 انتخاب شده است. نفوذ کننده‌ها با قطر 10mm از فولاد ابزار سرد کار با شماره استاندارد 2210 معروف به فولاد نقره ساخته شده‌اند. شکل 5 نفوذ کننده‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.

### 3- آزمایش‌های خواص مکانیکی

#### 3-1- آزمایش کشش

آزمایش کشش رایج‌ترین و متداول‌ترین نوع آزمون برای تعیین مشخصات اولیه خواص مکانیکی می‌باشد. این آزمون به‌طور گسترده برای مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش بر روی نانورزین‌ها و کامپوزیت‌های هیبریدی انجام می‌گیرد. با استفاده از آزمایش کشش می‌توان داده‌هایی همچون مدول ینگ، استحکام نهایی و ... بدست آورد.

آزمایش کشش نانورزین‌های بدون الیاف با سرعت 2mm/min مطابق با استاندارد ASTM D638 M-9 و برای کامپوزیت‌های هیبریدی با سرعت بارگذاری 2mm/min طبق استاندارد ASTM D3039 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

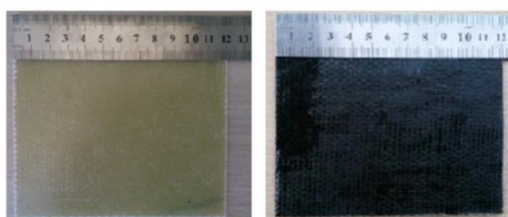


Fig2. hybrid nanocomposite specimens of punch shear test

شکل 2 نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی آزمایش برش پانچ



Fig3. Hybrid nanocomposite specimens of tensile test

شکل 3 نمونه‌های نانو کامپوزیت هیبریدی آزمایش کشش



Fig4. Fixture of Punch shear test

شکل 4 فیکسچر آزمایش برش پانچ

سطحی نانولوله‌های کربنی و زنجیره‌ی پلیمرها را افزایش می‌دهد [4]. در این پژوهش، ابتدا نانو لوله‌های کربنی را در داخل آون به مدت 24 ساعت در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده تا رطوبت‌شان از بین برود و کاملاً خشک شوند. رزین مورد نیاز برای هر کدام از درصدها تعیین می‌گردد. در این مطالعه با درصد وزنی 1، نسبت به وزن کل ماتریس (رزین+سفت کننده) برای بررسی اثر نانولوله‌ها استفاده شده است. نانولوله‌های 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 همزده تا نانوذرات در رزین پخش شوند. سپس مخلوط را در دستگاه آلتروسونیک تحت امواج فراصوتی با توان  $150 \text{ kW/cm}^2$  و دامنه 5um قرار داده تا از تشکیل کلوخه‌ها جلوگیری کرده و نانو مواد تا حد ممکن 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، سفت کننده را به آن اضافه کرده و به آرامی هم زده می‌شود. نانو ماتریس (رزین+سفت کننده+نانوذرات) را در نهایت به مدت 15 دقیقه در دمای آزمایشگاهی در آون خلاء قرار داده تا حباب‌زدایی شود.

#### 2-3- ساخت نمونه‌های نانورزین

برای تعیین خواص مکانیکی رزین خالص و نانورزین از نمونه‌های بدون الیاف استفاده می‌شود. نانورزین آماده شده را در قالب‌های سیلیکونی ریخته و در آون به مدت 1 ساعت در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده 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 درصد وزنی 1 درصد آماده می‌شود. به‌منظور 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 قالب از یک ورق نازک سیلیکونی استفاده گردید. سپس به وسیله لایه چینی دستی ساخت کامپوزیت‌ها انجام گرفت. سپس نمونه و قالب تحت فشار قرار گرفته تا صافی سطح مناسب و توزیع یکنواخت ماتریس و ضخامت یکسان در تمام سطح کامپوزیت ایجاد شود. 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  $12 \times 12$  cm و نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 در اندازه  $25 \times 2.5$  cm با ااره نواری بریده می‌شوند (شکل 2 و 3).

#### 2-5- فیکسچر

فیکسچر آزمایش شبه استاتیکی با توجه به مطالعه‌های انجام شده و تجربه



Fig1. Specimen of nano-resin

شکل 1 نمونه نانورزین

شکل 7 برای درصدهای مختلف ارائه شده است.

همان طوری که در شکل 7 می‌توان دید با اضافه کردن نانوذرات، خواص رزین دچار تغییرات می‌شود. خلاصه نتایج این آزمایش را می‌توان در جدول 2 مشاهده کرد. چنان‌که مشاهده می‌شود نانولوله‌های کربنی می‌تواند باعث افزایش استحکام 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 [14]. با اندازه‌گیری سطح زیر نمودار تنش-کرنش می‌توان تأثیر همزمان استحکام نهایی و کرنش شکست و مدول یانگ را بررسی کرد. شکل 8 نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های هیبریدی را نشان می‌دهد. باتوجه به نمودار مشاهده می‌شود که نانوذرات تأثیر زیادی در کامپوزیت‌های هیبریدی ندارد.

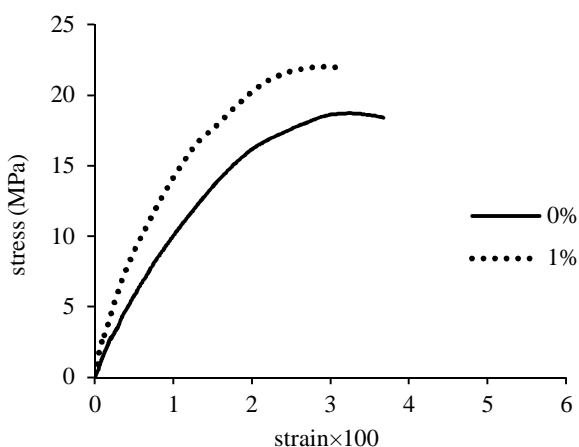


Fig7. The stress-strain curve of nanomatrix

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نانوماتریس

جدول 2 خواص مکانیکی نانورزین

Table2. mechanical properties of nanomatrix

چقرمگی MJ/m <sup>3</sup>	مدول GPa	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی MPa	نانوذرات کربنی (%)
0.30±0.02	0.5751±0.02	3.26±0.17	18.72±.38	0
0.29±0.04	0.7489±0.04	2.95±0.26	22.04±0.81	1

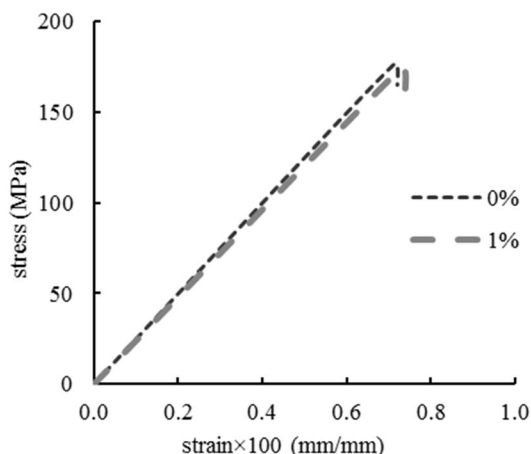


Fig8. The stress-strain curve of nanocomposites

شکل 8 نمودار تنش-کرنش نانو کامپوزیت‌ها

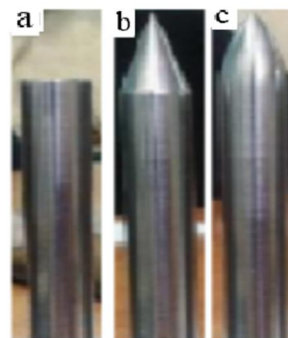


Fig5. Indenter a) Flat b) Conical c) Ogival

شکل 5 الف) نفوذکننده الف) تخت ب) مخروطی ج) اجیوال

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. به منظور دقت و تکرارپذیری، برای هر آزمایش کشش (نانورزین‌ها و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی)، 5 نمونه تهیه و آزمایش شد.

### 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 و 1 انجام می‌گیرد. به منظور دقت و تکرارپذیری، برای هر آزمایش نفوذ شبه استاتیکی، 3 نمونه تهیه و آزمایش شد.

### 4- بحث و نتایج

#### 4-1- کشش نانو رزین

بعد از انجام آزمون کشش، نتایج حاصل، توسط نمودار تنش-کرنش در

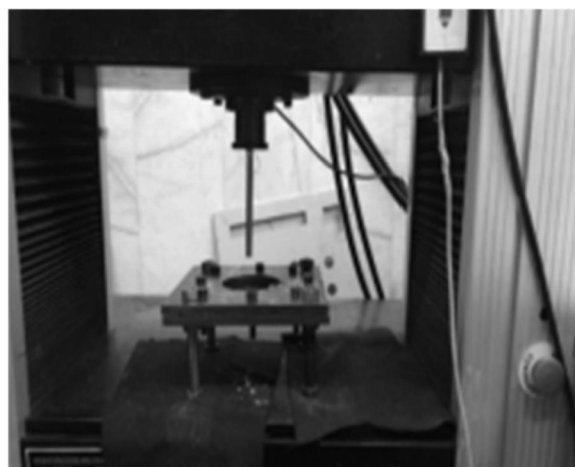


Fig6. A view of shear punch test

شکل 6 نمایی از آزمایش برش پانچ

<sup>1</sup> Tab

اندازه‌ی پتال‌ها بستگی دارد [10]. افزایش نیرو ادامه دارد تا اینکه در یک نقطه به حداکثر خود می‌رسد و ناگهان افت می‌کند (نقطه D).

مسیر DE: در نفوذکننده‌ی سر تخت پلاگ مخروطی تشکیل شده، کامل می‌شود. در نقطه D با یک افت ناگهانی نیرو تا تکامل پلاگ (نقطه E) ادامه دارد. و در نفوذکننده‌های نوک تیز در نقطه D هدف کامپوزیتی به ساقه نفوذ کننده رسیده و ناگهان نیرو افت می‌کند.

مسیر EF: این بخش برای نفوذکننده‌ی سر تخت با سرعت پایین اتفاق می‌افتد. با حرکت پانچ به سمت پایین به کامپوزیت‌های باقی مانده در راستای ضخامت و در زیر پلاگ، فشار آورده در نتیجه کامپوزیت‌های باقی مانده به حالت کشش درآمد 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 FG: در نقطه F پلاگ بریده شده به همراه پانچ به بیرون رانده می‌شوند. و بعد آن تنها نیروی مقاوم در برابر حرکت پانچ نیروی اصطکاک می‌باشد.

#### 4-2-2-2- حداکثر نیروی تماسی

نیروی تماسی مقدار نیرویی است که کامپوزیت در طول بارگذاری می‌تواند تحمل کند. بیشترین مقدار این نیرو بار بار پیک یا بار اوج می‌گویند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر نیروی تماسی وابستگی شدید به شکل هندسی نفوذکننده دارد. نتایج بار اوج در سه نفوذکننده‌ی تحت، مخروطی و اجیوال در شکل 11 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نفوذکننده سر تخت به دلیل کند بودن به نیروی بیشتری جهت نفوذ به هدف کامپوزیتی را نیاز دارد. اما تیزی بیشتر دماغه به این معنی نیست که به نیروی تماسی کمتری نیازمند است. در نفوذکننده سر مخروطی پله‌ای بودن محل اتصال دماغه به ساقه باعث شده است که نیروی تماسی بیشتری نسبت به نفوذکننده اجیوال که دماغه به ساقه مماس است نیاز داشته باشد [10]. بنابراین نفوذکننده سر تخت و سر مخروطی به ترتیب بیشترین و کمترین نیروی اوج در بین نفوذکننده‌ها دارند.

در شکل 11 مقدار حداکثر نیروی تماسی برای دماغه‌های مختلف در هر دو درصد وزنی نانولوله‌های کربنی ارائه شده است. با مقایسه بار اوج مشاهده می‌شود که افزودن نانولوله‌های کربنی نه تنها موجب بهبود بار اوج نشده، بلکه بار اوج را کاهش داده است. پس اضافه شدن نانولوله‌های کربنی باعث تغییر در مکانیزم‌های شکست می‌شود که وابسته به دماغه نبوده و در تمامی

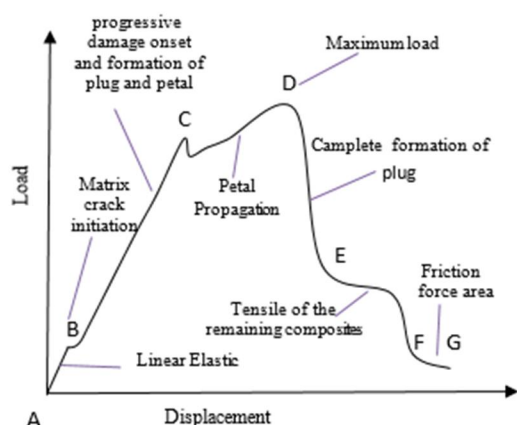


Fig10. Stages of fracture of composites under shear punch test

شکل 10 مراحل مختلف شکست کامپوزیت‌ها تحت آزمایش برش پانچ

در جدول 3 خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با درصد وزنی 0 و 1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌توان دید نتایج بسیار بهم نزدیک بوده و تاثیر قابل توجهی با افزودن نانولوله‌های کربنی مشاهده نمی‌شود.

#### 4-2-2-2- برش پانچ

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

#### 4-2-2-1- 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 6 بخش تشکیل شده است که در شکل 10 به صورت شماتیک ارائه شده است.

مسیر AB: در این مرحله سطح جلویی پانچ با کامپوزیت تماس پیدا کرده و نیرو یا تنش اعمال می‌شود و در کامپوزیت یک خیز کلی الاستیک ایجاد می‌شود که هیچ‌گونه 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. در نفوذکننده‌ی سر تخت با ادامه نیرو و افزایش تنش برشی در اطراف پانچ در صفحه بالایی کامپوزیت، باعث شروع برش الیاف می‌شود. همچنین در این مسیر تشکیل پلاگ مخروطی شروع می‌شود. در نفوذ کننده‌های نوک تیز این ناحیه محل شروع و ایجاد پتال می‌باشد.

مسیر CD: این بخش مختص نفوذکننده‌های با دماغه نوک تیز است. در این ناحیه پتال‌های ایجاد شده گسترش می‌یابند. شیب این ناحیه به زاویه و

جدول 3 خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی

Table 3. The mechanical properties of hybrid nanocomposites

ردیف	نانوذرات	استحکام	کرنش	مدول	چقرمگی
1	0	175.98±5.77	0.71±0.03	24.78±1.72	0.63±0.01
2	1	173.87±0.23	0.73±0.05	23.81±3.12	0.63±0.04

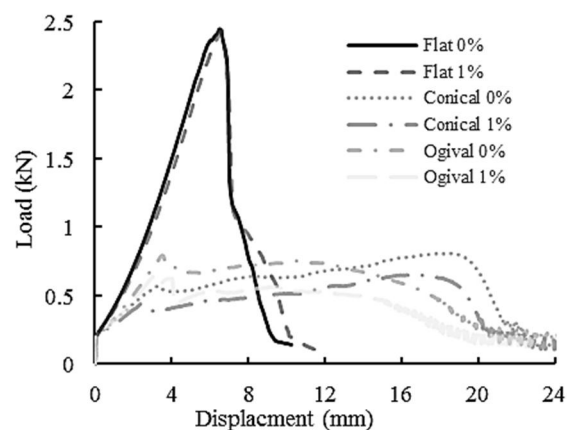


Fig9. Force-displacement curve of hybrid nanocomposites

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی

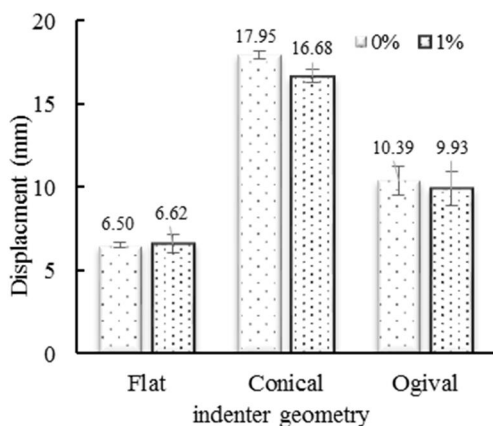


Fig12. Amount of displacement at maximum contact force

شکل 12 مقدار جابجایی در حداکثر نیروی تماسی

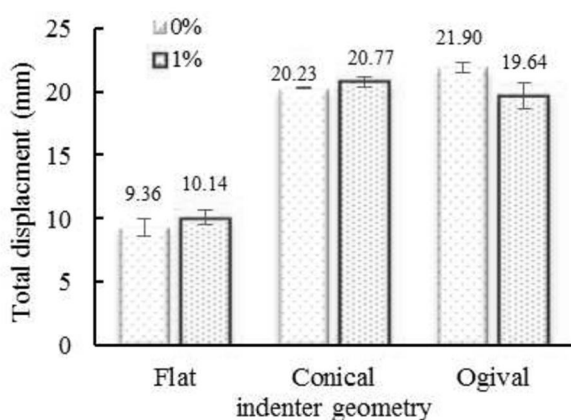


Fig13. Amount of displacement at out of nanocomposites

شکل 13 مقدار جابجایی در لحظه خروج از نانو کامپوزیت‌ها

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

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

که در آن؛

$E_T$  کل انرژی جذب شده

$E^e$  انرژی جذب شده توسط ناحیه الاستیک

$E^{cs1}$  انرژی جذب شده توسط ناحیه 1 برش - فشار

$E^P$  انرژی جذب شده توسط برش پتال

$E^{cs2}$  انرژی جذب شده توسط ناحیه 2 برش - فشار

$E^f$  انرژی جذب شده توسط ناحیه اصطکاک

همان طوری که در شکل 9 مشاهده می‌شود با تغییر دماغه مکانیزم شکست تغییر کرده و در نتیجه انرژی جذب شده توسط هدف کامپوزیتی تغییر می‌کند به طوری که هر چه طول دماغه نفوذکننده بیشتر باشد خروج نفوذکننده به تاخیر افتاده و انرژی بیشتری جذب می‌کند. بیشترین مقدار کل انرژی جذب شده مربوط به دماغه مخروطی و کمترین مقدار کل انرژی جذب شده مربوط به سر تخت می‌باشد.

گسترش خرابی زمانی که گسیختگی پتالینگ رخ می‌دهد نسبت به زمانی که پلاگ تشکیل می‌شود انرژی بیشتری از نفوذکننده جذب می‌کند و در نفوذکننده‌هایی با دماغه نوک تیز، قسمت اعظم انرژی توسط گسترش خرابی‌ها به وجود آمده جذب می‌گردد [10].

نفوذکننده‌ها حداکثر نیروی تماسی کاهش می‌یابد.

#### 4-2-3- جابجایی نفوذکننده

مقدار جابجایی پانچ از لحظه تماس با کامپوزیت تا خروج از کامپوزیت در راستای ضخامت، توسط نمودار نیرو- جابجایی قابل مشاهده است.

تأثیر دماغه نفوذکننده در جابجایی و تغییر شکل صفحه هدف در شکل 12 و 13 به‌طور واضح نشان داده شده است. کند بودن دماغه نفوذکننده باعث می‌شود که در ابتدا نفوذکننده دیرتر بر صفحه هدف نفوذ کند و صفحه هدف قبل از نفوذ نفوذکننده بیشتر تغییر شکل بدهد ولی در ادامه برش پلاگ، در جابجایی کمتر اتفاق افتاده و پانچ زودتر خارج می‌شود اما نفوذکننده‌های نوک تیز با دماغه بزرگ‌تر برای نفوذ کامل بیشتر جابجا می‌شوند.

همان طوری که مشخص است با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت‌ها، در نفوذکننده سر تخت مقدار جابجایی در حداکثر نیرو تماسی تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. اما مقدار جابجایی در لحظه خروج از کامپوزیت با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. این بدین معناست، بعد از این که مقداری از کامپوزیت آسیب دید، وجود نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت باقی مانده (ضخامتی که هنوز نفوذ در آن صورت نگرفته است) و در تغییر فرم غشایی کامپوزیت، در صفحات پشتی بیشتر تأثیر گذاشته و باعث می‌شود که شکست کامپوزیت به تأخیر افتاده و نفوذکننده دیرتر از کامپوزیت خارج شود. میزان جابجایی کل در مقدار 1 درصد وزنی با 8.3 درصد افزایش نسبت به نمونه خالص می‌باشد. اما در نفوذکننده‌ی مخروطی و اجیوال با افزودن نانو لوله‌های کربنی، تقریباً روند کاهش در جابجایی کل و جابجایی در حداکثر نیروی تماسی مشاهده می‌شود.

#### 4-2-4- انرژی جذب شده

مقدار کاری که یک نفوذکننده برای یک نفوذ کامل در یک کامپوزیت در راستای خود صرف می‌کند یا به‌طور دقیق مقدار انرژی هدف که کامپوزیتی برای شکستن می‌گیرد، انرژی جذب شده در آن هدف گفته می‌شود. این انرژی از طریق سطح زیر نمودار بار-جابجایی بدست می‌آید. چنان که قبلاً اشاره شد متفاوت بودن مکانیزم‌های شکست (نسبت نواحی مختلف نمودار بار- جابجایی به یکدیگر) در کامپوزیت در راستای ضخامت از یک طرف و غیرخطی بودن نمودار بار- جابجایی از طرف دیگر، نشانگر این است که میزان جذب انرژی در مراحل مختلف، گوناگون می‌باشد (شکل 14).

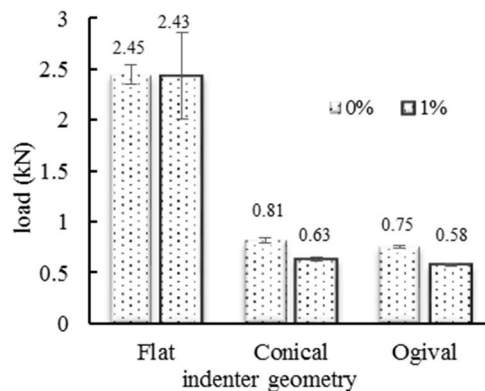


Fig 11. Maximum contact force

شکل 11 حداکثر نیروی تماسی

نمی‌شود.

نتایج آزمایش خواص برشی پانچ نشان می‌دهد بیشترین نیروی تماسی مربوط به نفوذکننده سرتخت و بیشترین انرژی جذب شده توسط نفوذکننده مخروطی می‌باشد. همچنین با افزودن نانولوله‌های کربنی حداکثر نیروی تماسی در تمامی نفوذکننده‌ها کاهش می‌یابد.

تقریباً در همه دماغه‌ها با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی جابجایی کل افزایش می‌یابد. این بدین معناست که انعطاف‌پذیری هدف کامپوزیتی افزایش یافته است.

با تغییر هندسه نفوذکننده مکانیزم شکست در نانو کامپوزیت‌ها تغییر می‌یابد به طوری که گسیختگی نفوذکننده سرتخت به صورت پلاگینگ و گسیختگی نفوذکننده‌های نوک تیز به صورت پتالینگ می‌باشد.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که انرژی جذب شده در درصد وزنی 1 در نفوذکننده سرتخت افزایش و در دماغه‌های اجیوال و مخروطی کاهش یافته است.

جدول 4 انرژی جذب شده در مراحل مختلف آزمایش پانچ برشی

Table 4. The energy absorbed at different stages of shear punch test

تخت					
$E^T$ (J)	$E^{ts}$ (J)	$E^{cs2}$ (J)	$E^{cs1}$ (J)	نانوذرات کربنی (%)	
10.97±0.32	1.48±0.68	1.37±0.36	8.54±0.54	0	
11.39±1.62	2.25±1.26	1.11±1.05	8.30±1.32	1	
مخروطی					
$E^T$ (J)	$E^P$ (J)	$E^{ts}$ (J)	$E^{cs2}$ (J)	$E^{cs1}$ (J)	نانوذرات کربنی (%)
13.47±0.50	9.79±0.50	-	2.24±0.51	1.27±0.51	0
9.91±0.35	7.20±0.25	-	0.74±0.34	1.97±0.12	1
اجیوال					
$E^T$ (J)	$E^P$ (J)	$E^{ts}$ (J)	$E^{cs2}$ (J)	$E^{cs1}$ (J)	نانوذرات کربنی (%)
12.22±0.52	5.04±0.91	-	5.53±0.72	1.65±0.72	0
9.34±0.36	3.70±0.71	-	4.36±0.67	1.28±0.05	1

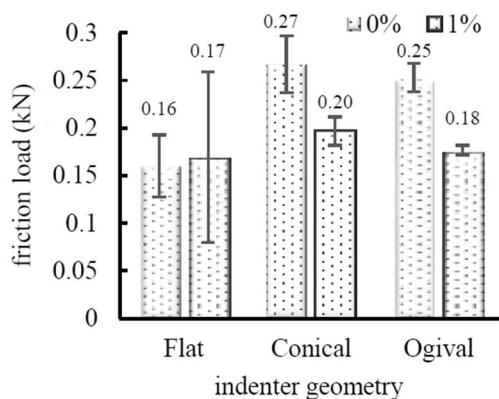


Fig15. Friction force values

شکل 15 مقادیر نیروی اصطکاک

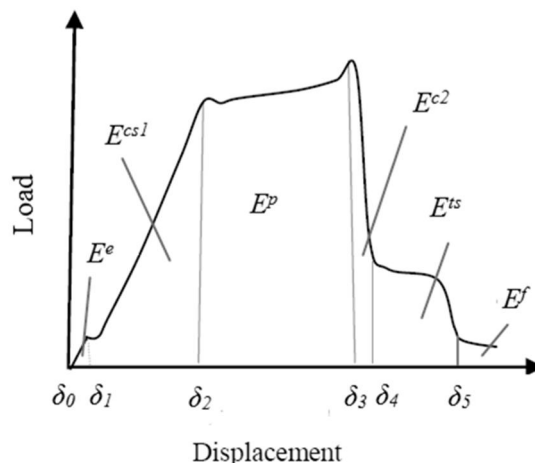


Fig14. Different areas of energy absorption at force-displacement curve

شکل 14 نواحی مختلف جذب انرژی در منحنی نیرو-جابجایی

با افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت، نحوه اتصال الیاف و رزین تغییر کرده و خواص مکانیکی و مکانیزم شکست در کامپوزیت تغییر می‌کند. بنابراین میزان جذب انرژی در هر یک متفاوت می‌باشد. در جدول 4 میزان جذب انرژی در نواحی گوناگون با درصد‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که می‌توان دید تنها در دماغه سرتخت، افزودن نانولوله‌های کربنی باعث افزایش انرژی کل نفوذ (به مقدار 4 درصد) می‌شود.

#### 4-2-5- 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 تغییر دماغه نفوذکننده، سطح تماس نفوذکننده با کامپوزیت و همچنین نیروی وارد از طرف سطح کامپوزیت به نفوذکننده (نیروی سطح تماس) تغییر کرده و باعث می‌شود که نیروی اصطکاک تغییر کند. عامل مؤثر دیگر جنس کامپوزیت‌های هیبریدی که با اضافه شدن نانولوله‌های کربنی میزان نیروی اصطکاک تغییر می‌کند (شکل 15).

#### 5- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثرات نانولوله‌های کربنی (MWCNTs) بر روی خواص برش پانچ و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی (شیشه/اپوکسی/نانولوله‌های کربنی) و همچنین خواص مکانیکی نانو ماتریس با استفاده از فرآیند شبه استاتیکی (QS) و آزمایش کشش بررسی گردید. در این تحقیق از نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیدرواکسید (MWCNTs-COOH) با درصد‌های وزنی 0 و 1 استفاده شده است. همچنین از سه نفوذکننده با دماغه‌های سر تخت به قطر 10mm، مخروطی 37 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 2.5 استفاده گردید. اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

نتایج آزمایش کشش در نانو ماتریس نشان می‌دهد که استحکام رزین بیشتر می‌شود.

نتایج آزمایش کشش نانو کامپوزیت‌های هیبریدی نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی، باعث تغییر معناداری در کامپوزیت



## 6- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر جهت تامین هزینه انجام طرح تحقیقاتی، که مقاله حاضر مستخرج از نتایج آن می‌باشد، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## 7- مراجع

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] R. Ghajar, A. Rassaf, Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014. (in Persian فارسی)
- [10] 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 فارسی)
- [11] 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.
- [12] 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 فارسی)
- [13] 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 فارسی)
- [14] 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)
- [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] 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.
- [6] 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.