

بررسی تجربی رفتار صفحات کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله های کربنی تحت بارگذاری برشی شبه استاتیکی

در این پژوهش، به بررسی تاثیر افزودن نانوذرات در رفتار صفحات کامپوزیتی ۱۲ لایه شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری شبه استاتیکی برشی، به صورت تجربی پرداخته شد. در طی این پژوهش، تأثیر پارامترهایی نظیر افزودن نانو لوله های کربنی اصلاح شده با هیدرواکسید به ساختار کامپوزیت، سه سرعت بارگذاری ۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه و سه شکل هندسه نفوذکننده بر نتایج آزمون شبه استاتیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به ساختار کامپوزیت، باعث افزایش استحکام، کرنش شکست و همچنین انعطاف پذیری کامپوزیت می شود که این امر موجب می شود تا نفوذکننده، دیرتر از کامپوزیت خارج شود. همچنین با افزایش سرعت بارگذاری، استحکام کامپوزیت در برابر نفوذکننده افزایش می یابد و نیز با تغییر هندسه نفوذکننده، مکانیزم شکست تغییر می یابد.

میرابوالفضل مختاری^۱

استادیار

علی اصغر نادری^۲

استادیار

کاظم ایمانی^۳

استادیار

نوید عجب شیری^۴

کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: نانو لوله، کامپوزیت، نفوذکننده، مکانیزم شکست

۱- مقدمه

کاهش وزن ساختاری تنها یک جزء از یک سیستم مکانیکی، تأثیر مثبت بسزایی در کارکرد سایر اجزا دارد. به عنوان مثال، کاهش جرم بدنه یک قطار، می تواند منجر به صرفه جویی در وزن سیستم کشش، تعلیق، ترمز و سایر بخش های آن شود. کاهش وزن کلی قطار سبب کاهش سایش در ریل ها، چرخ ها و یاطاقان ها نیز می گردد که به نوبه خود باعث کاهش تعمیرات می شود [۱]. امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می شود. با گسترش علم نانو تکنولوژی، اهمیت استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت ها دو چندان شده است. در میان نانوذرات، نانو لوله های کربنی، خواص ویژه و منحصر به فردی داشته و در عین استحکام بالا، انعطاف پذیر نیز می باشند.

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی و پرواز دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران s.abolfazl.mokhtari@aut.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران aa.naderi1@gmail.com

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران imani_ka@yahoo.com

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش navid.ajabshiri71@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷

برای مطالعه رفتار کامپوزیت‌ها در برابر ضربه و نفوذ اجسام با شکل‌های هندسی مختلف، می‌بایست رفتار و عکس‌العمل کامپوزیت‌ها به صورت دقیق و تحت بارگذاری‌های مختلف بررسی شود. به علت سرعت بالا و رخ دادن پدیده‌های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف‌ها، جدایش بین لایه‌ای و شکست الیاف به‌طور همزمان، بررسی رفتار کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای بسیار پیچیده است. در این میان، بارگذاری از نوع نفوذ شبه‌استاتیک به دلیل سرعت کم، امکان کنترل و شناسایی آسیب‌های ناشی از نفوذ دارد. مطالعات فراوانی در این زمینه توسط محققان انجام شده است. به‌طور کلی نتایج کار محققان نشان داد که داده‌های حاصل از آزمایش نفوذ شبه‌استاتیکی با شرایط مرزی مختلف می‌تواند رفتار مواد را در شرایط ضربه سرعت بالا نیز پیش‌بینی کند و مکانیزم‌های آسیب نفوذ شبه‌استاتیکی، با مکانیزم‌های آسیب ضربه سرعت بالا شباهت محسوسی دارد. بنابراین پیداست که مطالعه عوامل موثر در رفتار مواد کامپوزیتی در برابر نفوذ شبه‌استاتیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد [۲-۳].

گاما و گلیسپیه [۳] مکانیزم‌های تخریب و نفوذ با سرعت بالستیک را با شرایط مرزی مشابه با آزمایش شبه‌استاتیکی به صورت عددی بررسی کردند. آنان در این پژوهش، مکانیزم‌های تخریب، نفوذ و انرژی جذب‌شده در کامپوزیت‌های ضخیم را با آزمایش‌های بالستیک و شبه‌استاتیک به‌طور جداگانه مطالعه کردند. نتایج بررسی آنان نشان داد که مکانیزم‌های خرابی در آزمون برخورد بالستیکی می‌تواند با مکانیزم‌های خرابی در آزمون‌های شبه‌استاتیکی مطابقت داشته باشد. ژیاو و همکارانش [۴] با استفاده از بارگذاری شبه‌استاتیکی برش پانچ، به بررسی انتشار خرابی و پارگی در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی که به وسیله‌ی فرایند انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده بود پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت صفحات کامپوزیت، نیروی تماسی افزایش یافته و شکست الیاف کامپوزیت زودتر رخ می‌دهد.

تهرانی و همکارانش [۵] خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف و نانو لوله‌های کربنی را تحت ضربه برش پانچ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره با درصد وزنی ۲ استفاده شد. آنان نتیجه گرفتند که در فرایند ضربه شبه‌استاتیکی، خواص کششی (سفتی و استحکام) در جهت الیاف با افزودن MWCNTs تغییر نمی‌کند و فقط کرنش شکست در آزمایش کشش بهبود می‌یابد. طبق این تحقیق با اضافه کردن MWCNTs به ساختار کامپوزیت، استحکام برشی در جهت ضخامت و انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. سلیمان و همکارانش [۶] پاسخ کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و نانو لوله‌های کربنی در برابر ضربه‌ی سرعت پایین را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیدرواکسید و با درصدهای وزنی ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ استفاده کردند. در این تحقیق صفحات کامپوزیتی در معرض پنج سطح انرژی ۱۵، ۲۴، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ ژول قرار گرفتند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانو لوله‌های کربنی، میزان تخریب کامپوزیت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که بیشترین افزایش در انرژی جذب شده مربوط به ۱/۵ درصد وزنی و به میزان ۵۰ درصد می‌باشد. کاستوپلوس و همکارانش [۷] افزودن نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بر رفتار صفحات کامپوزیتی تحت ضربه‌ی سرعت پایین را بررسی کردند. طبق این مطالعه، تفاوت محسوسی در ناحیه لایه لایه شدگی و میزان انرژی جذب شده در این ناحیه، بین نمونه‌های بدون نانوذرات و نمونه‌های دارای نانوذرات مشاهده نشد. اما استحکام بعد ضربه و مدول فشاری موثر بعد ضربه در همه نمونه‌های کامپوزیتی نانودار بهبود یافت.

موتیو و دندر [۸] تاثیر میزان درصد وزنی نانوذرات کربنی چند دیواره و همچنین پارامترهای ساخت، بر روی خواص کششی، خمشی و ضربه‌ای کامپوزیت‌ها را مطالعه کردند. آن‌ها در این پژوهش، مقدار بهینه الیاف شیشه از بین درصدهای وزنی ۲۴، ۳۲ و ۴۰ را ۳۲ و همچنین زمان اصلاح شدن MWCNTs از بین ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت را ۲۴ ساعت بدست آوردند. چاندرااسکاران و همکارانش [۹] تاثیر MWCNTs بر روی خواص رزین و استحکام برشی لایه میانی که با الیاف شیشه تقویت شده است، را بررسی کردند. آن‌ها مقدار MWCNTs را ۰/۵ درصد وزنی در نظر گرفتند و خواص برشی را با استفاده از تست برش پانچ و استحکام بین الیاف و رزین را با استفاده از آزمایش میکرودراپلت انجام دادند. نتایج بررسی آنان نشان داد که تغییر مهمی در مدول یانگ ماتریس بین نمونه‌های بدون نانو و داراری نانو ذرات مشاهده نمی‌شود. ولی افزودن نانو ذرات باعث تغییر در استحکام برشی لایه میانی کامپوزیت‌ها می‌شود.

مانزیلا و همکارانش [۱۰] با استفاده از برش پانچ سر تخت، تاثیر ابعاد پانچ و نمونه را در کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف شیشه بافته شده و رزین SC-15 را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یافتند که تحت آزمون برش پانچ سر تخت، کامپوزیت‌ها در زاویه مشخصی می‌شکنند که مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است. همچنین دریافتند که تنش اعمال شده در رفتار شکست، در یک زاویه مشخص پدیدار می‌شود که مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است. هاردینگ و دونگ [۱۱] تاثیر نرخ بارگذاری بر استحکام برش لایه میانی نمونه‌های کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با استفاده از نمونه‌های دو لایه در سه نوع [۰،۰]، [۰،۹۰]، [±۴۵] تحت برش استاتیکی و ضربه انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش نرخ کرنش، تاثیر اندکی بر افزایش استحکام برشی لایه میانی نمونه‌ها دارد.

رحمان و همکارانش [۱۲] تاثیر نانوذرات کربنی در نمونه‌های کامپوزیتی، تحت ضربات بالستیکی را بررسی کردند. آنان از نانو ذرات MWCNTs اصلاح شده به وسیله آمینو با درصدهای وزنی ۰، ۰/۳ و ۰/۵ استفاده کردند. در این مطالعه از لایه‌چینی دستی و فشار برای ساخت کامپوزیت‌ها و از نورد آسیاب سه غلطکی جهت پخش نانوذرات در رزین استفاده شد. طبق این تحقیق در ۰/۳ درصد وزنی نانوذرات، انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. الله خان و همکارانش [۱۳] رفتار شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات رس را با آزمون ضربه و شبه استاتیکی 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 ۰/۳ درصد برای ضربه و ۰/۵ درصد برای آزمایش شبه استاتیکی بود.

بورگ و همکارانش [۱۴] تاثیر نانو ذرات را در رفتار خستگی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی بررسی کردند. آن‌ها از نانو ذرات کربنی با درصدهای ۰، ۰/۵ و ۱ و از نانو رس با درصدهای وزنی ۰، ۱ و ۳ 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 ۱ درصد نانو رس یا ۰/۵ درصد نانو تیوب کمی افزایش می‌یابد و همچنین نانو ذرات مانع انتشار ترک می‌گردد. مهربانی یگانه و همکارانش [۱۵] تاثیر هندسه نفوذ کننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی با دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال را مورد مطالعه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که نفوذکننده اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ به نیروی کمتری برای نفوذ کامل نیازمند است. همچنین نفوذ کننده مخروطی با زاویه ۳۷

درجه، بیشترین انرژی را برای نفوذ کامل نیاز دارد. نیمیس و همکارانش [۱۶] در مطالعه ای، تاثیر ضخامت کل لایه های کامپوزیت، ضخامت زیر لایه ها و زاویه نفوذ در انواع کامپوزیت های ایزوتروپیک را بررسی کردند. آنها عدم تاثیر پارامترهای کامپوزیت در پاسخ و اندازه گیری نمودار نیرو-جابجایی و تاثیر مثبت ضخامت و نرخ کرنش در بار اوج را مطالعه کردند و مشاهده کردند که با افزایش ضخامت و نرخ کرنش، بیشترین میزان نیرو در نمودار نیرو-جابجایی افزایش می یابد. ماینز و همکارانش [۱۷] برش پانچ شبه استاتیکی، ضربه بالستیکی و رفتار نفوذ را برای کامپوزیت های شیشه / پلی استر با ضخامت های مختلف و با استفاده از تست برش پانچ بررسی کردند. آن ها به این نتیجه دست یافتند که همیشه انرژی نفوذ شبه استاتیکی از انرژی نفوذ بالستیکی کمتر است. مسعودی و همکارانش [۱۸] تاثیر نانوذرات کلوسید سی بی را بر قابلیت جذب انرژی بالستیکی فلز-مواد مرکب شیشه / اپوکسی را با استفاده از آزمون ضربه بالستیک بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که میزان جذب انرژی در ۴ درصد وزنی نانو و بدون نانو تغییری زیادی نکرده، ولی در ۷ و ۱۰ درصد وزنی میزان جذب انرژی افزایش یافته و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به ۱۰ درصد وزنی است.

هاگو و گلیسپیه [۱۹] مدل نفوذ تئوری-نیمه تجربی را برای کامپوزیت های ضخیم به صورت تحلیلی توسعه دادند. آنان همچنین راه حل های تئوری را برای فازهای ضربه و فازهای بعدی ارائه دادند. در این مطالعه با استفاده از منحنی QS-PR و DIF، مدل نفوذ تئوری-نیمه تجربی یا مدل نفوذ S-Q-D برای پیش بینی حد بالستیک در کامپوزیت های ضخیم نتیجه گرفته شد و نتایج بدست آمده از این مدل با نتایج حاصل از عددی تطابق خوبی دارد. مطالعات صورت گرفته توسط محققان، به طور عمده با هدف بررسی پدیده نفوذ در نمونه های کامپوزیتی صورت گرفته است. در این پژوهش نیز، تاثیر پارامترهایی نظیر افزودن نانو الیاف، سرعت بارگذاری و شکل دهانه پرتابه بر رفتار نمونه های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف دوبعدی شیشه و رزین اپوکسی در برابر نفوذ شبه-استاتیکی برشی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- نمونه ها و آزمایش تجربی

۲-۱- ساخت نمونه ها

در این پژوهش، ماتریس از نوع رزین اپوکسی دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ انتخاب شد. از خواص این نوع رزین می توان به استحکام بالای مکانیکی و سازگاری با الیاف اشاره کرد. سفت کننده های زیادی برای این نوع رزین وجود دارند که هر کدام بنا به شرایط کارکرد و خواص مطلوب انتخاب می شوند. در این بررسی، از سفت کننده سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵ استفاده شده است (شکل ۱). نسبت مخلوط رزین به سفت کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده، ۲ به ۱ است. برای ساخت ماتریس، با توجه به دستور ساخت شرکت سازنده، رزین اپوکسی و هاردنر، به نسبت ۲ به ۱ در یک ظرف پلاستیکی ریخته شدند. سپس جهت مخلوط شدن دو ماده فوق به صورت یکنواخت، مایع به مدت ۵ دقیقه هم زده شد. برای تهیه نمونه های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان هستند استفاده شد.



ب

الف

شکل ۱- الف: الیاف بافته شده با چگالی 200 گرم بر متر مربع ب: رزین اپوکسی و سفت کننده اف 205



شکل ۲- نانوذرات کربنی استفاده شده

جدول ۱- مشخصات نانو لوله‌های کربنی

ردیف	نام فارسی مشخصه	نام لاتینی مشخصه	اندازه مشخصه
۱	قطر	OD	۵-۵۰ nm
۲	طول	Length	~ ۵۰ µm
۳	مقدار هیدرواکسید	-COOH content	۲/۵۶wt%
۴	خالصی	Purity	> ۹۵ wt%
۵	خاکستر	Ash	< ۱/۵ wt%
۶	سطح ویژه	SSA	> ۲۳۳ m ² /g
۷	هدایت الکتریکی	EC	۱۰ ^۲ s/cm

این الیاف با چگالی سطحی 200 g/m^2 و چگالی حجمی 2400 kg/m^3 بودند که بهترین نوع الیاف برای روش لایه چینی دستی است، زیرا در صورتی که چگالی الیاف بیشتر از این باشد احتمال آغشته نشدن کامل الیاف با رزین وجود دارد و در چگالی های کمتر الیاف نیز احتمال خارج شدن تارها از حالت عمود بر هم، وجود دارد. برای بررسی تاثیر نانو ذرات، از نانوذرات لوله‌ای کربنی چند دیواره که با هیدرواکسید اصلاح شده است، با درصدهای وزنی ۰، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ استفاده می‌شود (شکل ۲). جدول (۱) مشخصات کامل نانوذرات را نشان می‌دهد. ترکیب نانو لوله‌های کربنی با پلیمرها، پخش مناسب و یکنواخت نانو لوله‌ها در کل ماتریس، امری مهم است. در دهه‌های اخیر چندین تکنیک جهت بدست آوردن پخش همگن نانوذرات در پلیمرها و جلوگیری از تشکیل کلوخه‌های نانو توسط محققان ارائه شده است که شامل آلتروسونیک، میله آسیاب، کالندرینگ، همزن و روش اکستروژن می‌باشد [۴].

در این پژوهش، با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده، ابتدا نانو لوله‌های کربنی در داخل آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا رطوبت شان از بین برود و کاملاً خشک شوند. در طی این مطالعه از سه درصد وزنی ۰/۱، ۰/۵ و ۱، نسبت به وزن کل ماتریس (رزین + سفت کننده) برای بررسی اثر نانو لوله‌ها در نتایج پژوهش استفاده شده است. بدین منظور، نانوذرات کربنی با درصدهای وزنی مشخص به رزین اپوکسی اضافه شده و به وسیله همزن مکانیکی (شکل ۳)) به مدت ۲/۵ ساعت با دور ۳۰۰۰ rpm به هم زده شدند تا نانوذرات در رزین پخش شود. سپس مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه آلتروسونیک (شکل ۴)) تحت امواج فراصوتی با توان 150 kw/cm^2 و دامنه $5 \mu\text{m}$ قرار داده شد تا از تشکیل کلوخه‌ها جلوگیری به عمل آمده و نانو مواد به طور یکنواخت در داخل رزین پخش شوند. در نهایت مجدداً مخلوط رزین و نانوذرات با همزن مکانیکی به مدت ۱ ساعت با همان دور ۳۰۰۰ rpm هم‌زده شد. پس از آماده شدن مخلوط نانورزین، با توجه به نسبت مخلوط، سفت کننده به آن اضافه شده و به آرامی به هم زده شد. پس از آن نانو ماتریس (رزین + سفت کننده + نانوذرات) به مدت ۱۵ دقیقه در دمای آزمایشگاهی در آون خلاء قرار داد شد تا حباب‌زدایی شود.

۲-۱-۱- ساخت نمونه‌های بدون الیاف

برای تعیین خواص مکانیکی رزین بدون نانوذرات و نانورزین از نمونه‌های بدون الیاف استفاده شد. ماتریس و نانو ماتریس آماده شده، در قالب‌های سیلیکونی ریخته و در آون به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا پخته شوند (شکل ۵)).

۲-۱-۲- ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیتی (هیبریدی)

برای ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیتی، ابتدا مقدار الیاف مورد نیاز بریده شد و با توجه به آن، مقدار رزین و نانورزین با درصدهای وزنی ۰/۵ و ۱ آماده شد. به منظور ایجاد ضخامت یکسان و خواص برابر در نمونه‌ها، تمام نمونه ها به صورت یکجا ساخته شدند. برای این منظور یک قالب صلب، آماده و جهت جلوگیری از چسبیدن رزین به قالب از یک ورق نازک سیلیکونی استفاده شد. سپس به وسیله لایه چینی دستی ساخت کامپوزیت‌ها انجام می‌گیرد (شکل ۶)). برای پخت تکمیلی کامپوزیت‌های ساخته شده، نمونه ها در آون به

مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. نهایتاً بعد از پخت، نمونه‌های آزمون نفوذ شبه‌استاتیکی، در اندازه‌های ۱۲*۱۲ سانتی متر شکل (الف-۷) و نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 در اندازه ۵,۲*۲۵ سانتی متر شکل (ب-۷) بریده شدند. به منظور افزایش دقت آزمون‌ها و اطمینان از نتایج آن‌ها، برای هر آزمون ۵ نمونه تهیه شد.

rpm ۳۰۰۰



شکل ۳- دستگاه همزن مکانیکی



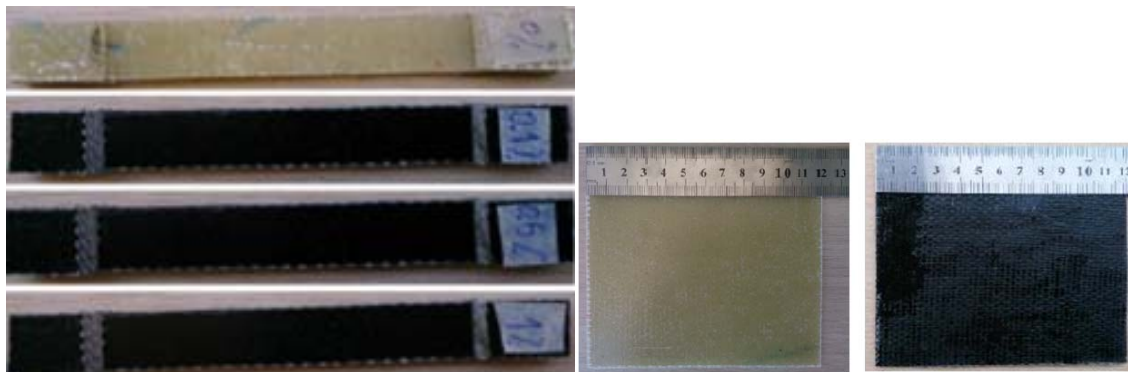
شکل ۴- دستگاه آلتروسونیک



شکل ۵- آماده سازی نمونه‌های بدون الیاف برای تست کشش

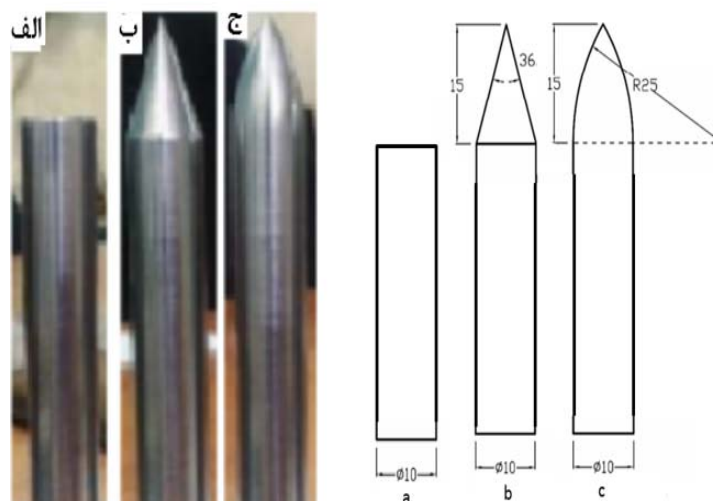


شکل ۶- ساخت نمونه‌ها به روش لایه چینی دستی



شکل ۷- نمونه‌های آماده شده برای آزمایش الف: نفوذ شبه استاتیکی. ب: کشش

در این پژوهش از سه نفوذکننده با ساقه استوانه‌ای شکل و بلند با سرهای تخت، مخروطی و اجیوال استفاده شده است. نفوذکننده‌ها با قطر ۱۰ mm از فولاد ابزار سرد کار با شماره استاندارد ۲۲۱۰ معروف به فولاد نقره ساخته شده‌اند. شکل (۸) نفوذکننده‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.



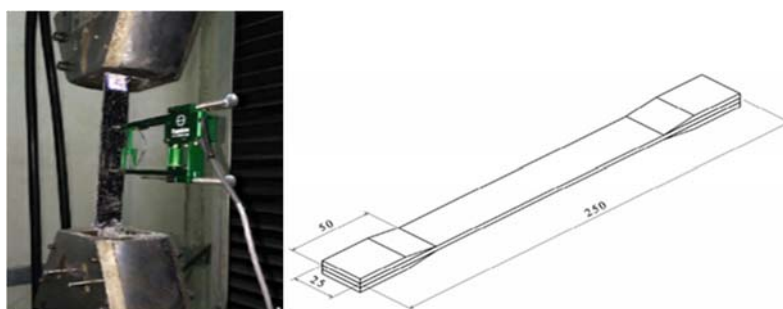
شکل ۸- نفوذکننده الف: سرتخت . ب: سر مخروطی. ج: اجیوال

۲-۲- آزمون کشش

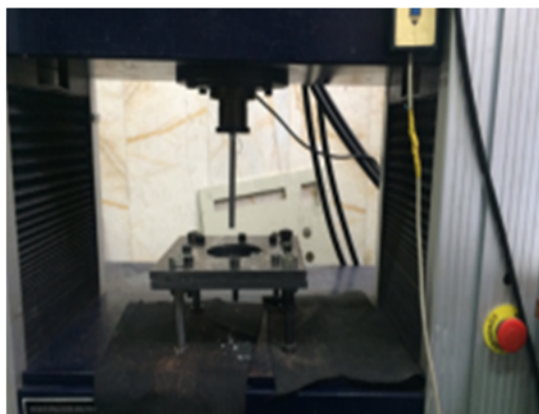
آزمایش کشش نانورزین‌های بدون الیاف، مطابق استاندارد ASTM D638 M-9 توسط دستگاه کشش ۳۰ تنی ساخت شرکت تایمز چین و لودسل ۵۰۰ کیلوگرمی دانشگاه تربیت مدرس، با سرعت بارگذاری ۲mm/min انجام شد. برای جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در محل اتصال نمونه به فک‌های دستگاه کشش، از تب با شیب کم (حدود ۸ درجه) در دو انتهای نمونه بهره گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر کرنش، علاوه بر جابجایی خود دستگاه از یک کرنش‌سنج استفاده گردید. همچنین برای انجام آزمایش کشش کامپوزیت‌های هیبریدی از استاندارد ASTM D3039 استفاده شد. شکل (۹) نمونه تست کشش را با تب و ابعاد نمونه‌های ساخته شده، نشان داده شده است.

۲-۳- آزمون نفوذ شبه استاتیکی

برای انجام آزمایش‌های مکانیک و نفوذ درگسترده متنوعی از نرخ کرنش‌ها می‌توان، از دستگاه کشش استفاده کرد. همچنین با تغییر سطح مقطع نفوذکننده می‌توان تاثیر شکل هندسه نفوذکننده در میزان نفوذ را بررسی کرد. در این پژوهش، برای انجام آزمون‌ها، نمونه‌های کامپوزیتی در فیکسچر قرار داده شد.



شکل ۹- ابعاد نمونه ساخته شده برای تست کشش با تب تنظیمات دستگاه تست کشش



شکل ۱۰- آزمون نفوذ شبه استاتیکی با نفوذکننده استوانه‌ای

سپس فیکسچر در روی میز دستگاه بسته و آزمون‌ها انجام شد. انجام آزمایش‌ها با کنترل جابجایی فک بالایی دستگاه، میزان جابجایی و محل اعمال نیرو صورت گرفت. نیروی وارد شده بر نمونه‌ها، توسط لودسل که در بالای محل اتصال نفوذکننده قرار گرفته است اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها تا نفوذ کامل نفوذکننده در داخل نمونه ادامه یافت تا جایی که نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها، به صورت افقی و ثابت مشاهده شود. (شکل ۱۰)). برای بررسی تاثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی در رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری، نمونه‌ها مطابق جدول (۲) ساخته شدند. مشخصات نمونه‌ها و تنظیمات مربوط به هر آزمایش، در این جدول گنجانده شده است. برای هر آزمایش تعداد ۵ نمونه ساخته شد تا جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش، ۵ بار انجام گیرد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نمونه‌های ساخته شده و تنظیمات آزمون‌های شبه استاتیکی

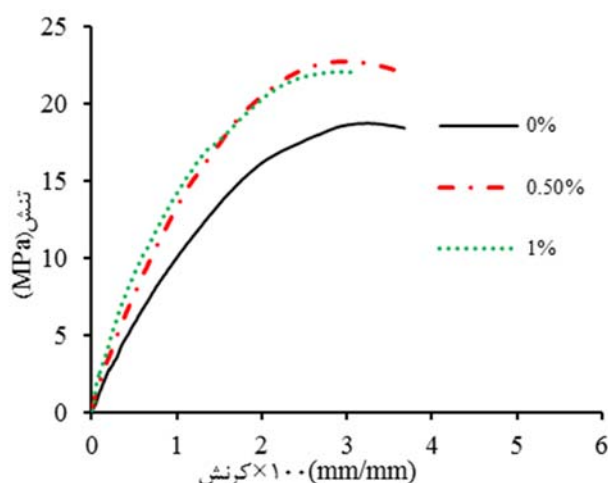
شماره دسته آزمون	چگالی الیاف (gr/m^2)	زاویه چیدمان (درجه)	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	سرعت بارگذاری (mm/min)	نوع ضربه زننده	درصد وزنی	تعداد نمونه
۱	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	سر تخت	۰	۵
۲	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	سر تخت	۰,۵	۵
۳	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	سر تخت	۱	۵
۴	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵۰۰	سر تخت	۰	۵
۵	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵۰۰	سر تخت	۰,۵	۵
۶	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵۰۰	سر تخت	۱	۵
۷	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۲۵۰	سر تخت	۰	۵
۸	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	سر مخروطی	۰	۵
۹	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	سر مخروطی	۱	۵
۱۰	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	اجیوال	۰	۵
۱۱	۲۰۰	[۰,۹۰]	۲,۶	۵	اجیوال	۱	۵

۳- نتایج

۳-۱- آزمون‌های کششی

برای بررسی تاثیر افزودن نانو ذرات در ماتریس، نتایج نمودار تنش- کرنش نمونه ماتریس بدون نانوذرات و با نانوذرات، در شکل (۱۱) آورده شده است. همانطور که در شکل (۱۱) ملاحظه می شود، افزودن نانو لوله های کربنی به رزین، می تواند باعث افزایش استحکام و تردی ماتریس شود. چرا که پخش شدن مناسب ذرات نانو در زمینه پلیمری باعث افزایش پیوند چسبندگی بین نانو ذرات و زمینه پلیمری شده و موجب می شود حرکت و جنبش زنجیره های پلیمری هنگام بارگذاری محدود بشود [۱۲].

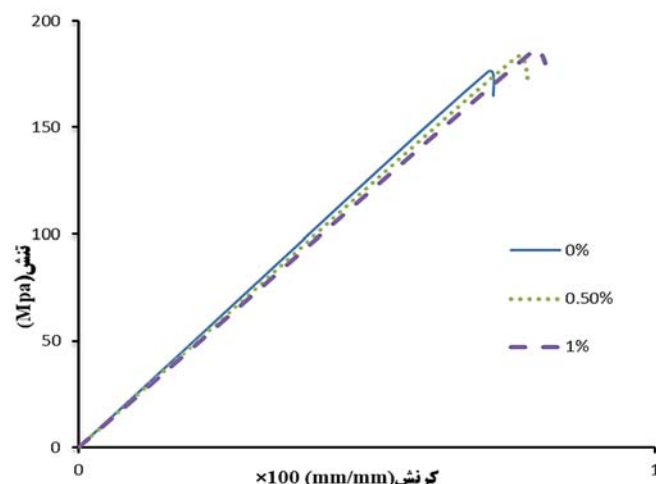
با توجه به شکل (۱۱)، خواص مکانیکی رزین در درصد های مختلف نانو لوله های کربنی در جدول (۳) آورده شده است. همانطور که در نتایج جدول (۳) مشاهده می شود، با افزودن نانوذرات به میزان ۰٫۵ درصد وزنی به ساختار رزین، استحکام نهایی و مدول یانگ رزین نسبت به رزین خالص، افزایش چشمگیری می یابد. همچنین تغییر درصد وزنی نانولوله های کربنی در ساختار رزین از ۰٫۵ به ۱ درصد وزنی، تغییر محسوسی در استحکام رزین ایجاد نمی کند.



شکل ۱۱- نمودار تنش-کرنش نانو ماتریس در درصد های مختلف نانو لوله های کربنی

جدول ۳- خواص مکانیکی رزین در درصد های مختلف نانو لوله های کربنی

چقرمگی MJ/m^3	مدول GPa	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی MPa	نانوذرات کربنی (%)	ردیف
۰/۳۰	۰/۵۷۵۱	$۳,۲۶ \pm ۰,۱۷$	$۱۸,۷۲ \pm ۰,۳۸$	۰	۱
۰/۳۵	۰/۷۵۴۷	$۳,۰۳ \pm ۰,۳$	$۲۲,۷۴ \pm ۱,۶$	۰/۵	۳
۰/۲۹	۰/۷۴۸۹	$۲,۹۵ \pm ۰,۲۶$	$۲۲,۰۴ \pm ۰,۸۱$	۱	۴



شکل ۱۲- نمودار تنش-گرنش کامپوزیت در درصدهای مختلف نانو لوله‌های کربنی

اما میزان چقرمگی رزین به دلیل تجمع توده های نانوذرات همزمان با افزایش درصد وزنی ذرات نانو که عامل افزایش تمرکز تنش و رشد ترک است، کاهش می یابد. در ادامه خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیتی با درصد های مختلف وزنی نانولوله های کربنی در ساختار آن ها، با آزمون کشش بررسی شد. در شکل (۱۲) نمودار تنش گرنش نمونه های کامپوزیتی مشاهده می شود. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می شود که افزودن نانوذرات به ساختار کامپوزیت، تاثیر محسوسی در نتایج نمودار تنش-گرنش کامپوزیت های هیبریدی ندارد. در جدول (۴)، خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیتی دارای درصد های مختلف وزنی نانوذرات، آورده شده است. نتایج جدول (۴) نشان می دهد که افزودن نانولوله های کربنی در درصد های وزنی ۰/۱ و ۱ به ساختار نمونه های کامپوزیتی، تغییر محسوسی در استحکام نهایی آن ها ایجاد نمی کند. اما در درصد وزنی ۰/۵، به دلیل افزایش در استحکام کششی و ازدیاد گرنش شکست، چقرمگی شکست افزایش می یابد. مشاهده می شود که میزان چقرمگی در نمونه های کامپوزیتی با ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات، ۱۳/۶ درصد نسبت به نمونه های خالص، افزایش یافته است. به نظر می رسد که حضور نانوذرات در ساختار کامپوزیت، موجب ایجاد چسبندگی مناسب بین نانو رزین و الیاف شده است [۲۰].

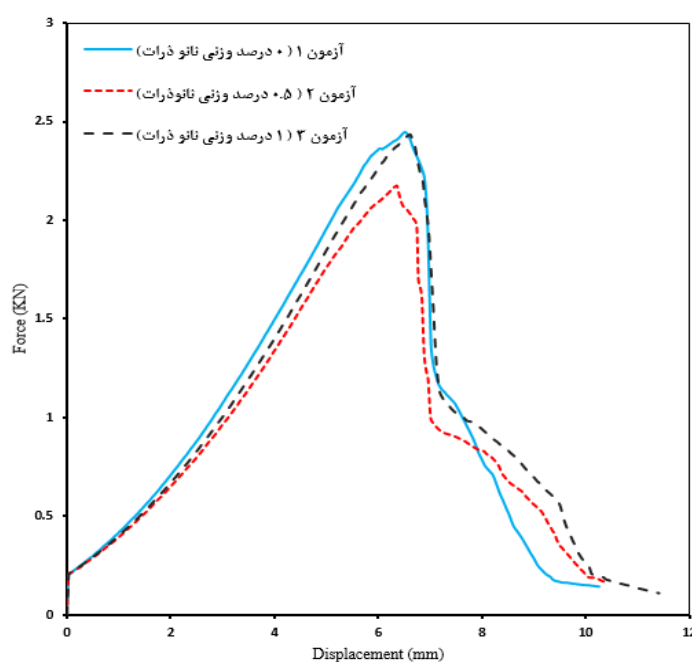
جدول ۴- خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های هیبریدی در درصد های مختلف نانو لوله های کربنی

چقرمگی	مدول	گرنش	استحکام نهایی	نانوذرات	ردیف
MJ/m ³	Gpa	(%)	Mpa	کربنی (%)	
۰/۶۳	۲۴/۷۸	۰,۷۱±۰,۰۳	۵,۷۷± ۱۷۵,۹۸	۰	۱
۰/۷۱	۲۳/۴۱	۰,۷۶±۰,۰۴	۱۸۲,۶۴±۸,۲۰	۰/۵	۲
۰/۷۳	۲۲/۸۱	۰,۷۹±۰,۰۵	۱۸۶,۳۵±۰,۲۳	۱	۳

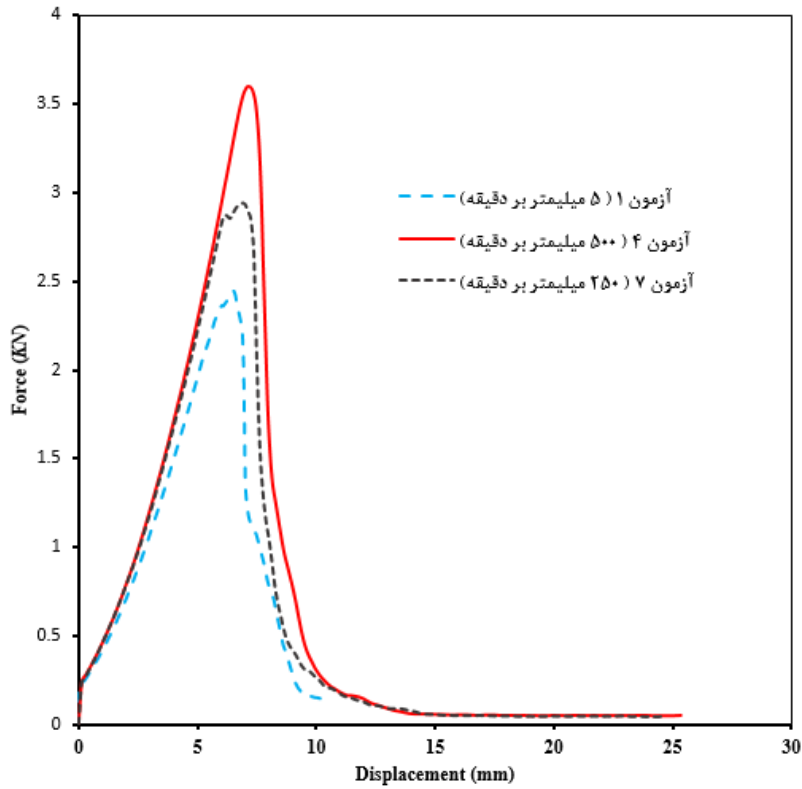
۳-۲- آزمون های برشی شبه استاتیکی

به طور معمول، به منظور بررسی رفتار دینامیکی کامپوزیت های چند لایه از نمودار نیرو-جابجایی استفاده می شود. با استفاده از این نمودار، مدل های شکست و مکانیزم های خرابی ناشی از بارگذاری فوق، شناسایی و ارزیابی می شوند تا تدابیر خوبی جهت جلوگیری از شکست های ناگهانی در سازه ها اتخاذ شود. در طول فرآیند آزمون های شبه استاتیکی، اطلاعات آزمون، توسط لودسل دستگاه، ثبت و به رایانه متصل به دستگاه، انتقال پیدا کرد. خروجی نتایج آزمون ها به صورت نمودار نیرو-جابجایی بودند. همانطور که ذکر شد، برای هر آزمون، ۵ نمونه مورد تست قرار گرفت و پس از بررسی نمودار نیرو-جابجایی این ۵ نمونه، به دلیل اختلاف کم نمودارها (حدود ۵ درصد)، نمودار میانگین این ۵ آزمون، به عنوان نمودار نهایی برای هر آزمون انتخاب شد. مطابق جدول (۲)، آزمون شماره ۱ به عنوان آزمون مرجع انتخاب شد و نتایج سایر آزمون ها، جهت بررسی تاثیر تغییر پارامترهای مطرح شده در نتایج پژوهش، با آزمون ۱ مقایسه شد.

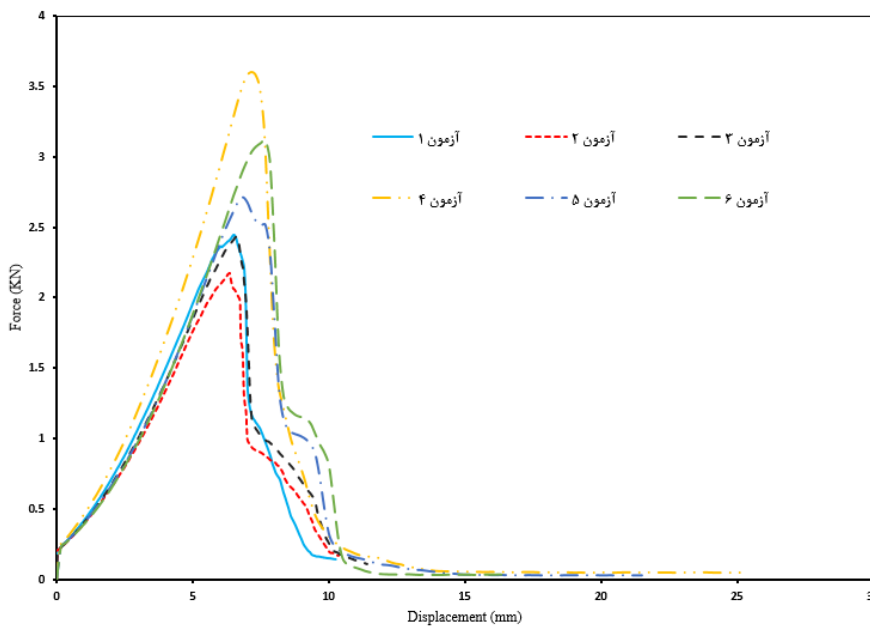
برای بررسی تاثیر افزودن نانو ذرات در نتایج آزمون شبه استاتیکی با نفوذکننده سر تخت، نمودار آزمون ۲ و ۳ با نمودار آزمون ۱ در شکل (۱۳) مقایسه شد. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می شود که در طی بارگذاری شبه استاتیک با نفوذکننده سر تخت، افزودن نانوذرات به ساختار کامپوزیت، تاثیر زیادی در نتایج نمودار نیرو-جابجایی ندارد. با این وجود، افزودن ۰٫۵ درصد نانوذرات به ساختار کامپوزیت، نسبت به ۱ درصد وزن نانوذرات و نمونه بدون نانوذرات، نیروی اوج کمتری برای شروع نفوذ در نمونه نیازمند است. علت این امر، افزایش تمرکز تنش در نمونه، همزمان با افزودن نانوذرات است. به طوری که در ۰٫۵ درصد وزنی نانوذرات، به وجود آمدن تمرکز تنش، مانع افزایش نیروی اوج در نمودار نیرو-جابجایی می شود. در آزمونهای شماره ۴ تا ۷، به بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر رفتار نمونه های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی با نفوذکننده سر تخت پرداخته شد.



شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمون های ۱، ۲ و ۳.



شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی آزمون های ۱، ۴ و ۷.



شکل ۱۵- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی آزمون های ۱ تا ۶.

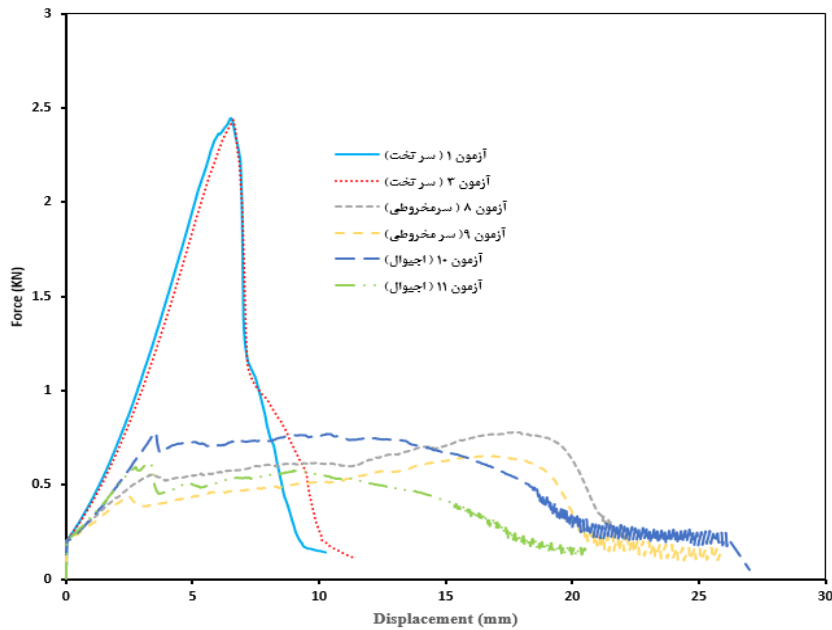
در شکل (۱۴)، نمودارهای آزمون های ۱، ۴ و ۷ با هم مقایسه شد تا تاثیر سرعت بارگذاری در نتایج آزمون ها، بدون حضور نانوذرات بررسی شود. در ادامه، در شکل (۱۵)، نمودار آزمون های ۱ تا ۶ با یکدیگر مقایسه شدند تا تاثیر پارامتر سرعت بارگذاری، در حضور نانوذرات، بر نتایج آزمون ها بررسی شود.

همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در بارگذاری شبه استاتیکی با نفوذکننده سرتخت، با افزایش سرعت بارگذاری از ۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار اوج بار برای نمودار نیرو-جابجایی افزایش می‌یابد. به طوریکه این میزان در بارگذاری با سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، حدود ۱٫۵ برابر اوج بار در بارگذاری با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه است. پژوهش محققان نیز نشان دهنده این مسئله است که با افزایش سرعت بارگذاری در آزمون‌های نفوذ شبه استاتیکی، دمای نمونه در ناحیه نفوذ، افزایش می‌یابد [۲۱-۲۲]. این افزایش دما باعث افزایش نرمی نمونه شده که این امر موجب می‌شود تا شروع و گسترش خرابی در نمونه به تاخیر بیافتد و نمونه قبل از شکست بیشتر جابجا شود.

با توجه به شکل (۱۵) ملاحظه می‌شود که در نمونه‌هایی که در ساختار آن‌ها از نانوذرات استفاده شده است نیز، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش بار اوج و میزان جابجایی در طول شکست، در نمودار نیرو-جابجایی را در پی دارد. اما با مقایسه این تغییرات در نمونه‌های دارای نانوذرات، نسبت به نمونه‌های مشابه بدون نانوذرات در شرایط آزمون یکسان، می‌توان به این نکته پی برد که افزودن نانوذرات به ساختار کامپوزیت، میزان تاثیر پارامتر سرعت بارگذاری در نتایج آزمون شبه استاتیکی را کاهش می‌دهد. به طوریکه که در نمونه‌ها با ۰٫۵ درصد وزنی نانوذرات، میزان اوج بار در سرعت بارگذاری ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به بارگذاری با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه، حدود ۱٫۲۷ برابر است. این میزان، برای نمونه‌ها با ۱ درصد وزنی نانوذرات، طی شرایط مشابه حدود ۱٫۱۹ برابر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از عوامل تاثیرگذار در شکل نفوذ و تخریب نمونه‌های کامپوزیتی، هندسه نفوذکننده می‌باشد. در این پژوهش، جهت بررسی تاثیر هندسه نفوذکننده در رفتار صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی، علاوه بر نفوذکننده سرتخت، از نفوذکننده سر مخروطی و اجیوال نیز استفاده شد. جهت این بررسی، آزمون‌های ۸ تا ۱۱ با شرایط بارگذاری ذکر شده در جدول (۲) انجام شدند.

شکل (۱۶) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمون‌های ۸ تا ۱۱ با آزمون ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. همانطور از مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نفوذکننده‌ها با هندسه مختلف در شکل (۱۶) پیداست، نفوذکننده سرتخت، نسبت به نفوذکننده سر مخروطی و اجیوال، به نیروی بیشتری جهت نفوذ در نمونه و ایجاد شکست در نمونه‌ها نیازمند است. ولی جابجایی نفوذکننده سرتخت در طول نمودار نیرو-جابجایی، نسبت به دو هندسه دیگر، کمتر است. دلیل این امر، مکانیزم‌های متفاوت شکست نمونه در بارگذاری با نفوذکننده‌ها با هندسه متفاوت است. چرا که در بارگذاری با نفوذکننده سرتخت، با برخورد نفوذکننده به نمونه، به دلیل بالا بودن سطح تماس اولیه نسبت به نفوذکننده‌های سر مخروطی و اجیوال، نیروی بالاتری جهت شروع شکست نمونه و نفوذ، نیاز است.

شکست در نمونه‌هایی که با نفوذکننده سرتخت، تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، به صورت جدایش تکه‌های کامپوزیتی در محل اعمال نیرو که در اصطلاح، پلاگینگ نامیده می‌شود، رخ می‌دهد. اما در نفوذکننده سر مخروطی و اجیوال، به دلیل نوک تیز بودن نفوذکننده، شروع و ادامه شکست نمونه به صورت پارگی موضعی در محل اعمال نیرو است که در اصطلاح پتالینگ نامیده می‌شود. در شکل (۱۷)، شکست و تخریب نمونه‌ها بعد از اعمال نیرو توسط نفوذکننده‌های سرتخت، سر مخروطی و اجیوال مشاهده می‌شود.

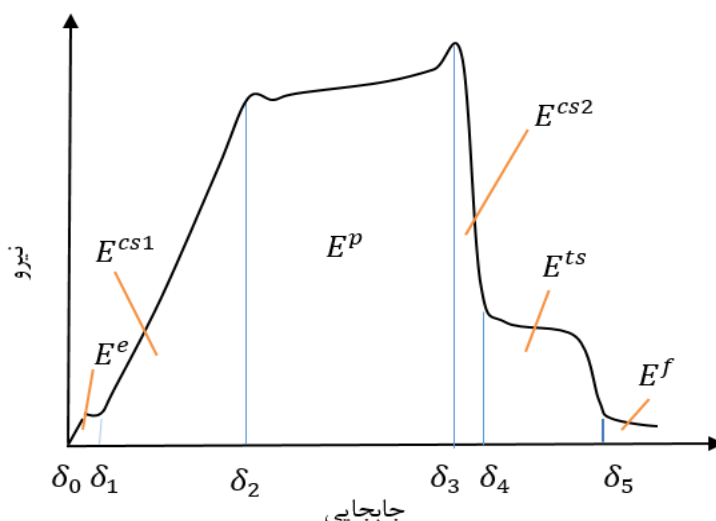


شکل ۱۶- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی آزمون‌های با هندسه ضربه زن متفاوت.



شکل ۱۷- الف) پلاگینگ ب) پتالینگ در کامپوزیت

همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، در نمونه‌هایی که با نفوذکننده های سر مخروطی و اجیوال، تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته اند، افزودن نانوذرات به ساختار کامپوزیت، باعث کاهش نیروی قابل تحمل از طرف نمونه برای شروع شکست می شود. چرا که تمرکز تنش بوجود آمده در اثر افزودن نانوذرات به ساختار نمونه های کامپوزیتی در نفوذکننده های نوک تیز، باعث رشد سریع تر پارگی ناشی از نفوذ در محل اعمال نیرو شده و نیروی لازم جهت عبور نفوذکننده سر مخروطی و اجیوال از نمونه کاهش می یابد. همچنین مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمون های ۸ و ۹ با آزمون های ۱۰ و ۱۱ نشان می دهد که با وجود نوک تیز بودن نفوذکننده سر مخروطی نسبت به نفوذکننده اجیوال، اوج بار برای نمودار نفوذکننده سر مخروطی بیش تر از نفوذکننده اجیوال بوده و جابجایی کم تر است. دلیل این امر، وجود پله در محل اتصال دماغه نفوذکننده سر مخروطی به ساقه آن است که این پله، باعث افزایش اصطکاک و نیروی تماسی در طی فرآیند نفوذ می شود. حال آنکه محل اتصال دماغه نفوذ کننده اجیوال به ساقه، مماس با ساقه بوده و نیروی تماسی کمتری برای ادامه فرآیند نفوذ نیاز دارد.



شکل ۱۸- نواحی مختلف جذب انرژی در منحنی نیرو-جابجایی

۳-۳- انرژی جذب شده

مقدار کاری که یک نفوذکننده برای نفوذ کامل در نمونه کامپوزیتی، صرف می‌کند یا بطور دقیق مقدار انرژی که هدف کامپوزیتی برای شکستن، از نفوذکننده می‌گیرد، انرژی جذب شده نامیده می‌شود. در آزمون های شبه استاتیکی، انرژی جذب شده، برابر با مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی است. شایان ذکر است که متفاوت بودن مکانیزم‌های شکست (نسبت نواحی مختلف نمودار نیرو-جابجایی به یکدیگر) در کامپوزیت‌ها در راستای ضخامت از یک طرف و غیرخطی بودن نمودار نیرو-جابجایی از طرف دیگر، نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در مراحل مختلف بارگذاری، متفاوت می‌باشد. به منظور درک درست از مراحل گوناگون جذب انرژی در مکانیزم‌های خرابی مختلف، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است. (شکل (۱۸))

ناحیه ۱: از δ_0 تا δ_1 که سطح زیر قسمت الاستیک خطی است و انرژی جذب شده در این ناحیه (E^e) بدلیل خمش کلی نمونه در ابتدای بارگذاری می‌باشد. به علت پایین بودن خاصیت کشسانی کامپوزیت‌ها، مقدار این انرژی ناچیز است. در این ناحیه، نفوذکننده سر تخت، به علت بیشتر بودن تغییر شکل صفحه هدف نسبت به نفوذکننده‌های نوک تیز، انرژی بیشتری را از دست می‌دهد.

ناحیه ۲: از δ_1 تا δ_4 نمونه‌های کامپوزیتی، تحت فشار قرار می‌گیرند. در بارگذاری با نفوذکننده‌ی سر تخت، با افزایش جابجایی در این ناحیه، انرژی جذب شده، صرف تخریب ماتریس و پیشروی خرابی ماتریس و لایه لایه شدن لایه میانی، پارگی و انتشار الیاف در اطراف پانچ و تشکیل پلاگ می‌شود. این ناحیه از نمودار، به سه ناحیه ریزتر تقسیم می‌شود. ناحیه δ_1 تا δ_2 با مقدار انرژی E^{cs1} ، ناحیه δ_2 تا δ_3 (E^p) که ناشی از وجود دماغه‌ی در نفوذکننده‌های نوک تیز است و انرژی جذب شده در این ناحیه، ناشی از ایجاد پتال و در ادامه برای گسترش و باز کردن پتال‌ها توسط نفوذکننده است که با حرکت نفوذکننده به سمت پایین، چهار پتال متقارن شروع به رشد می‌کنند. ناحیه δ_3 تا δ_4 با مقدار انرژی E^{cs2} می‌باشد. اگرچه مکانیزم‌های

خرابی و جذب انرژی در این نواحی متفاوت است اما در حالت کلی در این ناحیه، جذب انرژی، ناشی از فشار-برش می‌باشد. بیشترین انرژی جذب شده در بارگذاری بر روی کامپوزیت‌ها، در این ناحیه رخ می‌دهد. ناحیه ۳: مکانیزم جذب انرژی از δ_4 تا δ_5 با دماغه نفوذکننده تغییر می‌کند به طوری که این ناحیه (مسیر) از منحنی مربوط به نفوذکننده سر تخت می‌باشد و در نفوذکننده‌های نوک تیز ایجاد نمی‌شود. در نفوذکننده سر تخت با سرعت بارگذاری کم، 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 ۴: از δ_5 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 ۱ قابل محاسبه است؛

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

مقدار انرژی جذب شده مطابق با رابطه ۱ محاسبه و برای تمامی آزمون‌ها، در جدول (۵) آورده شده است. جدول (۵)، میزان انرژی جذب شده در هر مرحله از فرآیند نفوذ را برای تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. محققان در پژوهش‌های خود نشان داده‌اند که 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 از نمونه‌ها متفاوت می‌باشد [۱۴].

جدول ۵- مقدار انرژی جذب شده در هر مرحله از بارگذاری برای تمام آزمون‌ها

شماره آزمایش	E^{cs1} (J)	E^{cs2} (J)	E^{ts} (J)	E^p (J)	E^T (J)
۱	۸,۵۴	۱,۳۷	۱,۴۸	-	۱۰,۹۷
۲	۶,۹۵	۱,۲۲	۱,۹۰	-	۱۰,۱۴
۳	۸,۳۰	۱,۱۱	۲,۲۵	-	۱۱,۳۹
۴	۱۱,۹۴	۴,۲۴	-	-	۱۶,۱۷
۵	۱۰,۱۷	۲,۰۶	۱,۵۶	-	۱۵,۱۹
۶	۹,۶۸	۶,۹۲	۱,۲۶	-	۱۳,۸۶
۷	۱۰,۲۴	۴,۵۹	-	-	۱۴,۸۳
۸	۱,۲۷	۲,۲۴	-	۹,۷۹	۱۳,۴۷
۹	۱,۹۷	۰,۷۴	-	۷,۲۰	۹,۹۱
۱۰	۱,۶۵	۵,۵۳	-	۵,۰۴	۱۲,۲۲
۱۱	۱,۲۸	۴,۳۶	-	۳,۷۰	۹,۳۴

همان طوری که در جدول (۵) مشاهده می‌شود با افزودن نانوذرات برای نمونه هایی که با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت باگذاری با نفوذکننده سرتخت قرار گرفتند، ابتدا انرژی جذب شده کل کاهش، ولی با افزایش میزان درصد نانو، افزایش می‌یابد. زمانی که لایه های پستی صفحه کامپوزیتی تحت نیروی کششی-برشی قرار می‌گیرند، نانو ذرات باعث بوجود آمدن تغییر در رفتار کامپوزیت شده و شکست کامپوزیت باقی مانده را به تاخیر می‌اندازند. بدین معنی که نمونه کامپوزیتی چقرمه تر و انعطاف‌پذیرتر شده و این زمانی محسوس‌تر است که ضخامت لایه های کامپوزیتی کم و تحت نیروی کششی-برشی قرار گرفته باشد. مطالعات نشان می‌دهد، در هنگام بارگذاری بر روی نانوکامپوزیت ها، نانوذرات اصلاح شده، مسیر ترک را به سمت دور از روابط بین ماتریس و فایبر منتقل می‌کند [۷] و بدین جهت، تاخیر در شکست کامپوزیت رخ می‌دهد.

در بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر انرژی جذب شده، با افزایش سرعت بارگذاری به دلیل ازدیاد تغییر شکل صفحه هدف جابجایی و افزایش بار اوج مساحت سطح زیر نمودار بار-جابجایی افزایش یافته و در نتیجه انرژی جذب شده بیشتر می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که در فرآیندهای سرعت بالا مکانیزم شکست به صورت موضعی است [۲۱-۲۲] و از طرفی توجه به شکل (۱۴) و (۱۵) و حذف شدن ناحیه کشش-برش در سرعت بارگذاری‌های بالا موید این مطلب می‌باشد. با بیشتر شدن انرژی جذب شده با افزایش سرعت بارگذاری در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای چکش‌خواری (انعطاف پذیری) نمونه افزایش یافته و در نتیجه در بارگذاری‌های بالاتر حجم و شدت شکست کاهش می‌یابد [۲۱-۲۲]. همان طوری که در شکل (۱۵) برای سرعت بارگذاری‌های بالاتر مشاهده می‌شود مدل شکست در مسیر EF تغییر کرده (نسبت به نرخ کرنش پایین) و ادامه مسیر DE می‌باشد. بنابراین مکانیزم شکست و جذب انرژی در مسیر (D تا F) برای نرخ کرنش‌های بالا مشابه هم هستند و به صورت برش-فشار موضعی می‌باشد. چنان که اشاره شد در نرخ کرنش‌های بالاتر مکانیزم شکست به صورت موضعی است بطوری که ناحیه کشش-برش در نمودار بار-جابجایی در شکل (۱۵) در درصدوزنی ۰ حذف شده است اما با افزایش نانوذرات گسیختگی هدف کامپوزیتی تغییر یافته و ناحیه کشش-برش در نمودار بار-جابجایی ظاهر می‌شود (در درصد وزنی ۰/۵ و ۱). و مقداری از انرژی، توسط این ناحیه جذب می‌شود (جدول (۵)). دلیل آن را به چقرمگی‌تر شدن هدف کامپوزیتی و تغییر رفتار مواد با اضافه کردن نانو لوله‌ای کربنی می‌توان اشاره کرد.

همان طوری که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با تغییر هندسه 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. همچنین با توجه به جدول (۵) در نفوذکننده‌های مخروطی و اجیوال با اضافه کردن نانوذرات لوله‌ای کربنی انرژی جذب شده در تمامی نواحی کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی اصلاح شده، تحت بارگذاری برشی شبه استاتیکی پرداخته شد. آزمون‌ها برای ۳ درصد وزنی نانو ذرات، ۳ سرعت بارگذاری و ۳ هندسه دماغ نفوذکننده مختلف انجام شدند. نتایج زیر، از آزمون‌های انجام شده به دست آمد:

(۱) با افزودن نانوذرات به میزان ۰,۵ درصد وزنی به ساختار رزین، استحکام نهایی و مدول یانگ رزین نسبت به رزین خالص، افزایش چشمگیری می‌یابد.

(۲) میزان چقرمگی در نمونه‌های کامپوزیتی با ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات، ۱۳/۶ درصد نسبت به نمونه‌های خالص، افزایش یافته است.

(۳) افزودن ۰,۵ درصد نانوذرات به ساختار کامپوزیت، نسبت به ۱ درصد وزن نانوذرات و نمونه بدون نانوذرات، نیروی اوج کمتری برای شروع نفوذ در نمونه نیازمند است.

(۴) با افزایش سرعت بارگذاری از ۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار اوج بار برای نمودار نیرو-جابجایی افزایش می‌یابد.

(۵) نفوذکننده سر تخت، نسبت به نفوذکننده سر مخروطی و اجیوال، به نیروی بیشتری جهت نفوذ در نمونه و ایجاد شکست در نمونه‌ها نیازمند است.

(۶) با وجود نوک تیز بودن نفوذکننده سر مخروطی نسبت به نفوذکننده اجیوال، اوج بار برای نمودار نفوذ کننده سر مخروطی بیش تر از نفوذ کننده اجیوال بوده و جابجایی کم تر است.

مراجع

- [1] Rahimi Sharbaf, H., Rahimi, G.H., and Liaghat, G.H., "Experimental Study of Behavior of Filament Winding Composite Pipes with Liner using Glass Fibers and Silica Nanoparticles under Impact Loading", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, (2017). (in Persian)
- [2] Kakogiannis, D., Chung Kim Yuen, S., Palanivelu, S., Van Hemelrijck, D., Van Paeppegem, W., and Wastiels, J., "Response of Pultruded Composite Tubes Subjected to Dynamic and Impulsive Axial Loading", In *Composites Part B: Engineering*, Vol. 55, pp. 537-547, (2013).
- [3] Huang, J., and Wang, X., "Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes", *Composite Structures*, Vol. 91, Issue. 2, pp. 222-228, (2009).
- [4] Gama, B.A., and Gillespie, J.W., "Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-section Composites", *Composite Structures*, Vol. 86, No. 4, pp. 356-369, (2008).

- [5]Xiao, J.B., Gama, A., and Gillespie, J.W., “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).
- [6]Tehrani, M., Boroujeni, A.Y., Hartman, T.B., Haugh, T.P., and Case, S.W., “Mechanical Characterization and Impact Damage Assessment of a Woven Carbon Fiber Reinforced Carbon Nanotube–epoxy Composite”, *Composites Science and Technology*, Vol. 75, pp. 42-48, (2013).
- [7]Soliman, E.M., Sheyka, M.P., and Taha, M.R., “Low-velocity Impact of Thin Woven Carbon Fabric Composites Incorporating Multi-walled Carbon Nanotubes”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, pp. 39-47, (2012).
- [8]Kostopoulos, V., Baltopoulos, A., Karapappas, P., Vavouliotis, A., and Paipetis, A., “Impact and After-impact Properties of Carbon Fibre Reinforced Composites Enhanced with Multi-wall Carbon Nanotubes”, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 553-563, (2010).
- [9]Muthu, J., and Dendere, C., “Functionalized Multiwall Carbon Nanotubes Strengthened GRP Hybrid Composites: Improved Properties with Optimum Fiber Content”, *Composites: Part B*, Vol. 67, pp. 84-94, (2014).
- [10] Chandrasekaran, V.C.S., Advani, S.G., and Santare, M.H., “Influence of Resin Properties on Interlaminar Shear Strength of Glass/epoxy/MWNT Hybrid Composites”, *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 1007-1016, (2011).
- [11] Manzella, A.F., Gama, B.A., and Gillespie Jr, J.W., “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).
- [12] Harding, J., and Dong, L., “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).
- [13] Rahmana, M., Hosur, M., Zainuddin, Sh., and Vaidya, U., “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, pp. 108-118, (2013).
- [14] Khan, S.U., Iqbal, Munir, K.A., and Kim, J.K., “Quasi-static and Impact Fracture Behaviors of CFRPs with Nanoclay-filled Epoxy Matrix”, *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 253-264, (2011).
- [15] Yeganeh, E.M., Liaghat, Gh. H., and Pol, H., “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] Nemes, J.A., Eskandari, H., and Rakitch, L., “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] Mines, R.A.W., Roach, A.M., and Jones, N., "High Velocity Perforation Behavior of Polymer Composite Laminates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 61-88, (1999).
- [18] Masoudi, A., Liaghat, Gh.H., Pol, M.H., "Experimental and Numerical Investigation, Effects of Nanoclay on the Ballistic Behavior of GLARE A.M.", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, (2014). (In Persian).
- [19] B.Haque, B.Z., and Gillespie Jr, J.W., "A Combined Theoretical-semiempirical Penetration Model of Ballistic Penetration of Thick Section Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 631-659, (2012).
- [20] Bye, B.X., Han, J.H., Lu, L., Zhou, X.M., Qi, M.L., Zhang, Z., and Luo, S.N., "Dynamic Fracture of Carbon Nanotube/epoxy Composites under High Strain-rate Loading", *Composites: Part A*, Vol. 68, No. 4, pp. 282-288, (2015).
- [21] Hosura, M.V., Waliul Islam, S.M., Vaidya, U.K., Kumar, A., Dutta, P.K., and Jeelani, S., "Dynamic Punch Shear Characterization of Plain Weave Graphite/epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures", *Composite Structures*, Vol. 70, No. 3, pp. 295-307, (2005).
- [22] Hosura, M.V., Waliul Islam, S.M., Vaidya, U.K., Dutta, P.K., and Jelani, S., "Experimental Studies on the Punch Shear Characterization of Satin Weave Graphite/epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 368, No. 1-2, pp. 269-279, (2004).

Abstract

In this study, the effect of nanoparticles addition on the behavior of 12-layer glass/epoxy composite plates, under quasi-static shear loading, was investigated experimentally. In this research, the effect of parameters such as the addition of hydroxide modified carbon nanotubes to the composite structure, three loading speeds of 5, 250 and 500 mm/min and three forms of permeable geometry on quasi-static test results were investigated. The results showed that adding nanoparticles to the composite structure increased the strength, fracture strain and flexibility of the composite, which would allow the penetrant to exit the composite later. Also, as the loading rate increases, the strength of the composite against the permeant increases and as the permeate geometry changes, the fracture mechanism changes.