



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## بررسی تجربی رفتار لوله‌های کامپوزیتی لاینر دار رشته پیچی شده با الیاف شیشه و ذرات نانو سیلیکا تحت بار ضربه محلی

حامد رحیمی شرفاف<sup>۱</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>۲\*</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۶-۱۴۱۱۵، rahimi\_gh@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۱/۲۰

پذیرش: ۹۵/۴/۱

### کلیدواژگان:

کامپوزیت

لوله

نانو ذرات سیلیکا

ضربه

با توجه به کاربرد گسترده‌ی مواد مرکب در صنایع مختلف، شناخت مدل‌های شکست سازه‌های مرکب از این مواد در برابر بارهای وارده حائز اهمیت است. در این مقاله رفتار و مدل‌های شکست لوله‌های کامپوزیت ساخته شده به روش رشته پیچی با الیاف شیشه، دارای لاینر داخلی و ذرات نانو سیلیکا، تحت بار ضربه محلی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. با استفاده از دستگاه رشته پیچی نیمه اتوماتیک، عمل رشته پیچی الیاف انجام شده است. ذرات نانو سیلیکا در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند و طی فرآیند مخلوط کردن با ماده‌ی زمینه برای همگن سازی بهتر با بهره گیری از دستگاه فراصوت مخلوط شدند. ۱۶ نمونه‌ی لوله‌ی کامپوزیت با زاویه‌ی پیش الیاف  $\pm 55^\circ$  ساخته شد. آزمایش ضربه، با استفاده از دستگاه تفنگ گازی و با سرعت‌های ۱۱۸، ۱۱۳، ۱۰۸ و ۱۰۰ متر بر ثانیه انجام شده است. افزودن ذرات نانو سیلیکا باعث افزایش مدول الاستیک و استحکام در ماده‌ی زمینه می‌شود. این در حالی است که وجود لاینر ترد رفتار پوسته‌ی کامپوزیت را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. در تمام آزمایش‌های انجام شده نفوذ پرتابه به داخل لوله رخ داده و مشاهدات تجربی شامل سطح شکست به وجود آمده در اثر برخورد و همچنین شکست ماده‌ی زمینه اصلی و پارگی الیاف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading

Hamed Rahimi Sharbaf, GholamHossein Rahimi\*, GholamHossein Liaghat

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 116-14115, Tehran, Iran, rahimi\_gh@modares.ac.ir

### Keywords

Composite  
Tube  
Silica nano particles  
Impact

### Abstract

Due to the extensive use of composite materials in various industries, recognizing the failure models of these materials is very important. In this article, the behavior and failure models of composite pipes made by filament-wound with fiberglass, with internal liner and silica nanoparticles under local impact tested and examined. Filament winding is performed using a semi-automatic filament-wound device. Nano particles of silica that are used in the manufacturing the samples during the process of mixing and for better homogenization, the ultrasound is used. The filament winding angle of all 16 tubes was  $\pm 55^\circ$ . Impact test, using a gas gun with speeds of 118, 113, 108 and 100 meters per second is done. Add silica nanoparticles increases the elastic modulus and strength of the matrix. However, the existence of brittle liner, the composite shell behavior puts under its effect. In all tests, penetration of the projectile into the tube were occurred. The failure area due to impact, were same to the diameter of the projectile. Rupture of fibers failures in the matrix is the most important models of failure that were observed in impacted composite tubes. The experimental observation were reported, discussed and commented upon.

### ۱- مقدمه

پیچی شده به دلیل استحکام بالا در جهت‌های مورد نظر، مورد توجه ویژه هستند. سازه‌های کامپوزیت را می‌توان به روش‌های مختلف تقویت نمود. استفاده از ذرات نانو در ساختار مواد کامپوزیت استحکام آنها را بالا برده و خواص مکانیکی آنها را افزایش می‌دهند.

امروزه مواد کامپوزیتی کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارند. لوله‌های کامپوزیتی از جمله سازه‌های پرکاربرد در صنایع نفت و گاز، پزشکی، حمل و نقل و دیگر صنایع می‌باشد. در میان انواع لوله‌های کامپوزیت، لوله‌های رشته

### Please cite this article using:

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", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

آویلا و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۰ اثر لایه لایه شدن نانو کامپوزیت ساندویچی را تحت بار ضربه بررسی کردند. آنها ضربه با دو انرژی مختلف ۵ و ۷۵ ژول را آزمایش نمودند. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن ۵٪ نانو، میزان انرژی جذب شده را افزایش می‌دهد. فویوک و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ اثر ذرات نانو دوتایی و سه‌تایی را بر روی افزایش مقاومت در مقابل ضربه و مکانیزم تقویت‌کنندگی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که ترکیب سه‌تایی خواص مکانیکی را در مقایسه با ترکیب دوتایی، بیشتر افزایش می‌دهد. وینکاتارایانان و استانلی [۳] در سال ۲۰۱۲ پنج مدل مختلف از ورق‌های نانو کامپوزیت شش لایه را با سه نوع رزین مختلف تحت برخورد پرتابه‌ی سرعت متوسط مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که با افزایش درصد مواد نانو میزان استهلاک انرژی در ماده‌ی کامپوزیت افزایش می‌یابد و همچنین میزان آسیب در رزین معمولی بیشتر از نانو کامپوزیت می‌باشد. جاجام و تیپور [۴] در سال ۲۰۱۲ رفتار شکست کامپوزیت در مقابل بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیک را بررسی کردند. هدف آنها مقایسه‌ی بین میکرو کامپوزیت و نانو کامپوزیت بوده‌است. در این بررسی از رزین اشباع از سیلیکا بهره گرفته‌اند. نتایج بررسی آنها نشان می‌دهد که افزودن مواد نانو و میکرو به کامپوزیت استحکام شکست را در بار گذاری شبه استاتیکی و دینامیکی افزایش می‌دهد. همچنین سطح شکست در نانو کامپوزیت دارای زبری کمتری نسبت به میکرو کامپوزیت می‌باشد. ژانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ با اضافه نمودن ذرات نانو سیلیکون اکساید به کامپوزیت، چقرمگی کامپوزیت را تحت بار ضربه بررسی کردند. آنها نمونه‌هایی را با ترکیبات مختلف نانو بررسی نمودند که از نتایج به دست آمده از بررسی آنها می‌توان به تفاوت در چقرمگی در مقابل ضربه در سه نوع کامپوزیت اشاره نمود. این در حالی است که دیگر خواص مانند استحکام کششی، خواص پیچشی و دمایی تغییری نکرده‌اند. ذبیح اله و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ رفتار دینامیک تیرهای کامپوزیتی لایه لایه تقویت شده با درصد بالای ذرات نانو مورد بررسی تجربی قرار دادند. پاسخ‌های دینامیکی سازه در شرایط بارگذاری‌های مختلف و با درصدهای مختلف ذرات نانو مورد آزمایش واقع شدند. تغییرات در فرکانس طبیعی و ضریب میرایی در درصدهای مختلف نانو مشاهده شده‌است. ماجومدار و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ اثر جذب انرژی تحت ضربه را بر روی مواد کامپوزیتی با ذرات نانو سیلیکا مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی میزان جذب انرژی کامپوزیت تحت ضربه و اندازه گیری تأثیر همگن سازی ماده‌ی نانو، دست یافتند که جذب انرژی با همگن‌تر شدن کامپوزیت افزایش می‌یابد. سیواساروانان و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۴ نانو کامپوزیت‌های ساخته شده به روش دستی، با الیاف شیشه و اپوکسی را با درصد حجمی‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد که اضافه نمودن ۵ درصد نانو به رزین بهترین نتیجه را نسبت به دیگر درصدهای نانو بدست می‌دهد. نانو کامپوزیت با داشتن ۵ درصد نانو دارای خواص مکانیکی خوبی می‌باشد. پل و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۴ تأثیر نانو ذرات رس و سیلیکا بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها درصدهای مختلف ذرات نانو را مورد آزمایش قرار داده و تغییرات در مدول الاستیک، استحکام و چقرمگی را مشاهده نمودند. مسعودی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ تأثیر ذرات نانو رس را بر روی خواص بالستیک ماده‌ی مرکب به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. با درصدهای مختلف ذرات نانو موجود در

## ۲- مواد، تجهیزات و روش‌های آزمایش

### ۲-۱- ساخت لوله‌های لاینر دار رشته پیچی شده همراه ذرات نانو

مواد کامپوزیتی، موادی هستند که از یک فاز زمینه و الیاف تشکیل شده باشند. در واقع به لحاظ ماکروسکوپی، دارای دو یا چند فاز باشند که سطح مشترکی بین آنها وجود داشته‌باشد. در این تحقیق برای ساخت لوله‌های کامپوزیت از رزین اپوکسی ای‌پون ۸۲۸<sup>۱</sup> و سخت‌کننده‌ی ای‌کیور اف ۲۰۵<sup>۲</sup> استفاده شده‌است. همچنین ذرات نانو مورد استفاده در این تحقیق، ذرات نانو سیلیکا می‌باشد. ذرات نانو سیلیکا، ساخت شرکت تکنان<sup>۳</sup> می‌باشد. ذرات نانو به صورت پودر بوده و دارای چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند.<sup>۴</sup>

1 Epon 828  
2 Epikure F205  
3 TECNAN  
4 CAS# 7631-86-9

ذرات نانو سیلیکا با ۰،۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی ماده‌ی زمینه مورد استفاده قرار گرفتند.

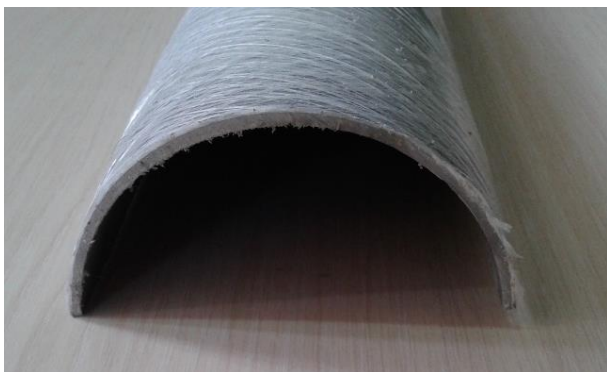
برای ساخت لوله‌های لاینر دار کامپوزیت از دستگاه رشته پیچی استفاده می‌شود. برای اینکه بتوان یک لوله‌ی کامپوزیتی داشت، از یک لوله پلی اتیلن کمک گرفته شده‌است. رشته پیچی با زاویه‌ی  $\pm 55^\circ$  به دور این لوله انجام می‌شود، که در نتیجه لوله‌ای متشکل از دو بخش پوسته‌ی کامپوزیتی رشته پیچی شده و لاینر پلی اتیلنی به دست می‌آید. این دو بخش پس از ساخت به طور کامل به یکدیگر متصل شده‌اند و بصورت یک لوله‌ی یکپارچه می‌باشند. برای انجام عمل رشته پیچی ابتدا ترکیب میزان مورد نیاز از رزین و مخلوط سخت کننده و ذرات نانو سیلیکا تهیه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه رشته پیچی، عمل رشته پیچی انجام می‌شود. عمل رزین زنی به صورت دستی صورت می‌گیرد.

رشته پیچی لوله‌ها در صنعت بیشتر در زاویه‌ی  $\pm 55^\circ$  صورت می‌گیرد. از این رو این زاویه برای رشته پیچی لوله‌ها ساخته شده انتخاب شده‌است.

پس از ساخت لوله، برای اینکه ماده‌ی زمینه یکنواخت گردد و در نقطه‌ای از لوله انباشته نشود، از استوانه‌ی هرزگرد استفاده شده‌است. لوله‌ی ساخته شده به مدت ۸ ساعت روی این استوانه قرار می‌گیرد تا ماده‌ی زمینه خشک شود (شکل ۳).

لوله‌های ساخته شده دارای قطر ۹۰ میلی‌متر هستند. ضخامت کل لوله ۴ میلی‌متر بوده که لایه‌ی کامپوزیتی ساخته شده بر روی لاینر دارای ضخامت ۲ میلی‌متر بوده و لاینر ضخامت ۲ میلی‌متر دارد. پس از ساخته لوله‌ها، از هر درصد وزنی از ذرات نانو، نمونه‌هایی جهت اندازه گیری کسر حجمی الیاف و ماده‌ی زمینه تهیه شد. پس از سوزاندن ماده‌ی زمینه در نمونه‌های تهیه شده، مشاهده شد که در حدود ۳۰ درصد پوسته‌ی کامپوزیتی از الیاف تشکیل شده‌است.

برای انجام دقیق هر آزمایش و همچنین کم کردن خطاهای احتمالی، آزمایش‌ها بر روی ۱۶ لوله‌ی ساخته شده، انجام گرفته‌است. ۱۶ لوله‌ی ساخته شده در تمام مشخصات مشابه یکدیگر هستند. در آزمایش بالستیک، هر درصد ذرات نانو در چهار سرعت مورد آزمایش قرار گرفته‌است. در بخش بعد نحوه‌ی انجام آزمایش بالستیک توضیح داده شده‌است.



شکل ۳ لوله‌ی رشته پیچی شده دارای لاینر

## ۲-۲- آزمایش بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در آزمایشگاه ضربه‌ی دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از دستگاه تفنگ گازی انجام شده‌است (شکل ۴). مشخصات پرتابه در جدول ۱ آمده‌است. برای قرار دادن لوله‌ها داخل دستگاه از یک نگه‌دارنده که شرایط مرزی گیردار در دو انتها و پینی در لبه‌های لوله ایجاد می‌کند، استفاده شده

برای ساخت لوله‌های کامپوزیت دارای ذرات نانو، همگن بودن مخلوط ذرات نانو و ماده‌ی زمینه بسیار اهمیت دارد. برای تحقق این امر، می‌بایست ذرات نانو سیلیکا در رزین<sup>۱</sup> و با سخت کننده<sup>۲</sup> مخلوط شود و سپس در زمان مورد نظر برای ساخت لوله‌ها با یکدیگر ترکیب شوند. در این تحقیق ذرات نانو سیلیکا در سخت کننده مخلوط و یکنواخت شده‌است. فرآیند مخلوط کردن و همگن سازی از ۴ بخش تشکیل شده‌است. ابتدا ذرات نانو برای رطوبت گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شوند. سپس با میزان مورد نظر از سخت کننده و ذرات نانو سیلیکا، عمل همزن زدن صورت می‌گیرد که ۶۰ دقیقه به طول می‌انجامد (شکل ۱).



شکل ۱ دستگاه همزن

پس از انجام عمل مخلوط کردن، به مدت ۳۰ دقیقه، مخلوط در دستگاه فراصوت با تناوب ۰/۵ و دامنه ۶۰ قرار داده می‌شود (شکل ۲). بعد از انجام عمل فراصوت، ۳۰ دقیقه‌ی دیگر مخلوط هم زده می‌شود. در فرآیندهای انجام شده مقداری هوا داخل مخلوط وارد شده‌است که برای ساخت لوله‌ها اشکال ایجاد می‌کند. در انتهای فرآیند مخلوط کردن ۱۵ دقیقه مخلوط در دستگاه خلا قرار داده می‌شود تا حباب‌های هوای موجود در مخلوط خارج شود [۹].



شکل ۲ دستگاه فراصوت

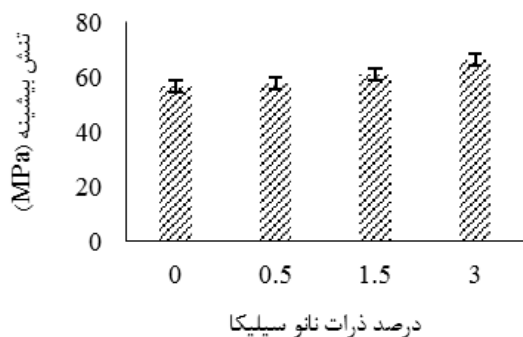
1 Resin  
2 Hardner

نمونه‌های دمبلی شکل با درصدهای ۰، ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد ذرات نانو سیلیکا نشان داده شده‌است. نمونه‌های آماده شده، در آزمایشگاه خواص مواد دانشگاه تربیت مدرس مورد آزمایش قرار گرفتند.

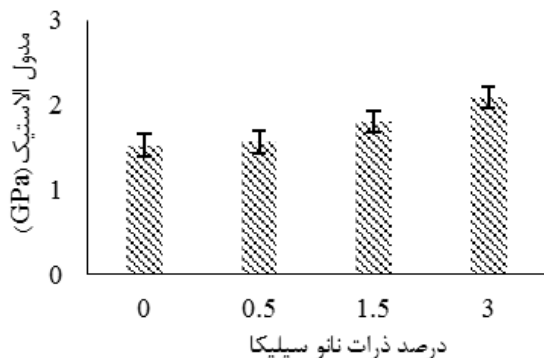


شکل ۶ نمونه‌های تست کشش از چپ به راست دارای ۰، ۰.۵، ۱.۵ و ۳ درصد ذرات نانو سیلیکا

از نتایج آزمایش نمونه‌های استاندارد مشاهده شد که با افزایش درصد ذرات نانو سیلیکا در ماده‌ی زمینه، مدول الاستیک و تنش نهایی (شکست) افزایش یافته‌است. رفتار این نمونه‌ها در این آزمایش به صورت ترد و نمودار تنش کرنش تقریباً به صورت خطی بوده‌است. افزایش ۳ درصد ذرات نانو به ماده‌ی زمینه، افزایش ۱۷ درصد برای تنش نهایی، افزایش ۳۶ درصد برای مدول الاستیسیته را نسبت به نمونه‌ی بدون ذرات نانو داشته‌است. در شکل ۷ نمودار حداکثر تنش شکست و در شکل ۸ نمودار مدول یانگ نمایش داده شده‌است.



شکل ۷ نمودار حداکثر تنش شکست بر حسب درصد ذرات نانو سیلیکا



شکل ۸ نمودار مدول الاستیک بر حسب درصد ذرات نانو سیلیکا

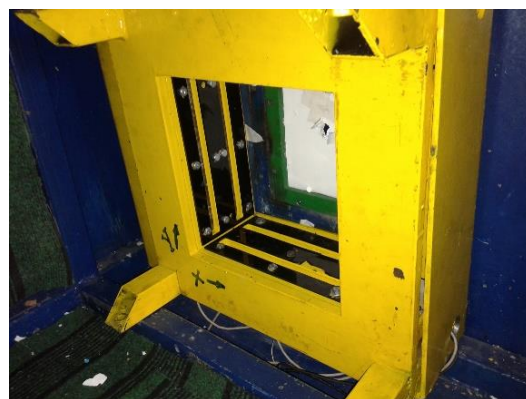
است. این نگه‌دارنده کاملاً به دستگاه محکم شده تا از حرکت‌های نامطلوب آن جلوگیری گردد. به دلیل اینکه لازم است در آزمایش‌ها پرتابه دقیقاً در وسط لوله برخورد کند، محل دقیق برخورد پرتابه با لوله به وسیله‌ی لیزر تعیین شده‌است. پس از آماده سازی شرایط مورد نیاز آزمایش، پرتابه به سرعت‌های ۱۱۸، ۱۱۳، ۱۰۸ و ۱۰۰ متر بر ثانیه با لوله‌ها برخورد داده شد. برای انتخاب این سرعت‌ها اختلاف در حدود ۲۰ درصد بین بیشترین سرعت و کمترین آن در نظر گرفته شده‌است که بتوان مقایسه‌ی خوبی بین رفتار لوله‌ها در این سرعت‌ها داشت. سرعت‌های انتخاب شده به گونه‌ای بوده است که بتوان سرعت حد بالستیک را پیدا کرد. به همین دلیل لازم بود که نفوذ در این سرعت‌ها رخ دهد. سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه با استفاده از سنسورهای نوری، مطابق شکل ۵، اندازه شده‌اند. با اندازه گیری سرعت‌های ورودی و خروجی و همچنین سطح خرابی، داده‌های آزمایش بدست آمده‌اند که در بخش بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

جدول ۱ مشخصات پرتابه

جنس	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	وزن (gr)	شکل دماغه فولاد
فولاد	۱۰ میلی‌متر	۱۶/۸	۹/۳	نیم کروی



شکل ۴ تنگ گازی



شکل ۵ دیوار لیزری دو بعدی

### ۲-۳- آزمایش کشش

با توجه به توضیحات داده شده برای ساخت و همگن سازی ماده‌ی زمینه دارای ذرات نانو، از ماده‌ی زمینه‌ای که آماده شده برای ساخت لوله‌های کامپوزیتی، نمونه‌های دمبلی شکل مطابق با استاندارد ASTM D638 ساخته شده‌است. برای انجام این آزمایش ۱۶ نمونه آماده شد که در شکل ۶ تصویر

## ۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌های بالستیک بر روی لوله‌های کامپوزیتی، داده‌های آزمایش شامل سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه در زمان برخورد، میزان سطح خرابی و نوع شکست رخ داده شده در لوله‌ی کامپوزیتی ثبت گردید که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۳-۱- نفوذ

در پدیده‌ی برخورد پرتابه با هدف اگر نفوذ رخ دهد، نشان دهنده‌ی آن است که هدف در مقابل پرتابه مقاومت کافی را نداشته و دچار شکست کامل شده و اگر نفوذ رخ ندهد، نشانگر آن است که هدف در مقابل پرتابه مقاومت کرده و دچار شکست کامل نشده و سطح آن دچار آسیب شده‌است. البته عمق آسیب بستگی به عوامل مختلفی نظیر تندی و نرمی، استحکام و ضخامت دارد. در آزمایش برخورد پرتابه با لوله‌های با لاینر، ابتدا آزمایش با سرعت بالاتر انجام شد و سپس سرعت کاهش داده شده و آزمایش بر روی لوله‌های دارای ذرات نانو در سرعت‌های پایین‌تر نیز انجام گرفت. در تمام آزمایش‌های انجام گرفته بر روی ۱۶ نمونه‌ی لوله‌های با لاینر دارای ذرات نانو، پدیده‌ی نفوذ مشاهده شده‌است. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که لوله‌های دارای لاینر با افزایش درصد نانو مقاومت کافی برای جلوگیری از نفوذ پرتابه را نداشته و استحکام لوله‌های دارای لاینر در مقابل انرژی وارد شده توسط پرتابه به لوله کمتر می‌باشد. با این که در تمام لوله‌ها نفوذ رخ داده‌است، سرعت خروجی پرتابه پس از برخورد در نمونه‌های متناظر با یکدیگر متفاوت بوده که عامل اصلی این تفاوت، وجود درصدهای مختلف ذرات نانو در لوله‌ها می‌باشد. در جدول ۲ سرعت ورودی و خروجی پرتابه و وضعیت پرتابه پس از برخورد ارائه شده‌است که با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد ذرات نانو در لوله‌ها سرعت خروجی کاهش یافته‌است. در نتایج ارائه شده، مشاهده شد که با افزایش درصد ذرات نانو سیلیکا، سرعت خروجی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش استحکام پوسته‌ی کامپوزیت، با افزودن درصد بیشتر ذرات نانو می‌باشد.

جدول ۲ سرعت ورودی، خروجی و وضعیت پرتابه

نانوذرات %	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	وضعیت پرتابه پس از برخورد
۰	۱۰۰	۴۸/۴۴	برخورد
۰	۱۰۸	۶۷/۰۴	نفوذ
۰	۱۱۳	۷۷/۳۷	
۰	۱۱۸	۸۵/۶۰	
۰.۵	۱۰۰	۴۶/۴۳	
۰.۵	۱۰۸	۶۷/۵۹	نفوذ
۰.۵	۱۱۳	۷۶/۴۹	
۰.۵	۱۱۸	۸۳/۳۳	
۱.۵	۱۰۰	۴۵/۲۹	
۱.۵	۱۰۸	۶۴/۹۳	نفوذ
۱.۵	۱۱۳	۷۴/۵۲	
۱.۵	۱۱۸	۸۳/۹۹	
۳	۱۰۰	۴۰/۲۱	
۳	۱۰۸	۶۱/۷۸	نفوذ
۳	۱۱۳	۷۲/۴۴	
۳	۱۱۸	۸۰/۴۹	

همان طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، افزایش استحکام در ماده‌ی زمینه در آزمایش کشش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. استفاده از چنین موادی در ساخت کامپوزیت، افزایش استحکام در سازه‌ی کامپوزیت می‌گردد. این نتایج موافقت خوبی با نتایج آزمایش کشش نشان می‌دهند.

## ۳-۲- جذب انرژی

در پدیده‌ی برخورد پرتابه با هدف، میزان جذب انرژی یکی از عوامل مهم در انتخاب هدف می‌باشد. هدف می‌تواند به صورت یک محافظ عمل نماید که در این صورت باید بتواند تمام انرژی پرتابه را جذب کرده و کم‌ترین میزان از انرژی را به اجسام پشت خود انتقال دهد. این محافظت می‌تواند برای حفاظت از جان انسان‌ها و موجودات زنده استفاده گردد و یا برای محافظت از مواد و وسایل خاص مورد استفاده قرار گیرد. لوله‌ها غیر از وظیفه‌ی هدایت سیال داخل خود، وظیفه‌ی محافظت از آن را نیز بر عهده دارند. میزان جذب انرژی توسط لوله بستگی به عوامل مختلفی دارد. در لوله‌های کامپوزیت، سازه لوله نظیر جنس الیاف و ماده‌ی زمینه، تعداد لایه‌ها، چیدمان لایه‌ها، ضخامت، نحوه‌ی ساخت، تقویت شدگی و دیگر مسائل مربوط به ساخت کامپوزیت‌ها دارد.

زمانی که پرتابه دارای سرعت باشد، دارای انرژی جنبشی می‌باشد. این انرژی به وزن و سرعت پرتابه بستگی دارد. در رابطه‌ی (۱) مقدار این انرژی آمده‌است.

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

پرتابه در هنگام برخورد دارای این میزان انرژی می‌باشد. برای نفوذ به لوله، پرتابه باید انرژی لازم برای ایجاد شکست در لوله را داشته باشد. پس از ساخت لوله اصلی‌ترین عامل تأثیر گذار در شکست آن سفتی لوله می‌باشد. پرتابه اگر انرژی لازم برای شکست لوله را دارا باشد به دلیل جدار نازک بودن این لوله، در آن نفوذ می‌کند. وقتی که لوله جدار نازک باشد، زمانی که پرتابه در لوله نفوذ می‌کند به غیر از انرژی لازم برای نفوذ، اتلاف انرژی دیگری که قابل ملاحظه باشد، ندارد. از جمله اتلاف‌هایی که در مقابل انرژی نفوذ قابل صرف نظر کردن است، اصطکاک بین پرتابه و دیواره‌ی لوله می‌باشد. به دلیل نازک بودن دیواره‌ی لوله، نیروی اصطکاک اتلاف شده بین پرتابه و دیواره بسیار اندک می‌باشد. در این مقاله از این اتلاف صرف نظر شده‌است. پرتابه پس از برخورد نیز دارای انرژی است. انرژی پرتابه پس از برخورد نیز به سرعت آن بستگی دارد. مقدار این انرژی از رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید. تغییر در انرژی پرتابه به معنای این است که مقداری از انرژی آن، در هنگام برخورد به لوله منتقل شده‌است. مقدار انرژی انتقال یافته از پرتابه به لوله بستگی به سرعت ورودی و خروجی آن دارد. کاهش میزان انرژی جنبشی پرتابه به دلیل جذب انرژی به وسیله‌ی لوله می‌باشد. اختلاف انرژی پرتابه قبل و پس از برخورد میزان انرژی جذب شده توسط لوله را نشان می‌دهد (رابطه‌ی (۲)).

$$E = \frac{1}{2} m(V_i^2 - V_o^2) \quad (2)$$

با توجه به اینکه در آزمایش بر روی لوله‌های دارای لاینر، تمامی پرتابه‌ها در هدف نفوذ کرده‌اند نشان می‌دهد که در لوله‌های دارای لاینر استحکام و سفتی لوله در مقابل پرتابه به قدری نبوده که از نفوذ پرتابه جلوگیری نماید. نمودار شکل ۹ میزان جذب انرژی بر حسب سرعت ورودی را برای چهار نوع لوله با درصدهای صفر، ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد ذرات نانو نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در سرعت ورودی ثابت، میزان انرژی جذب شده در لوله‌های



می‌باشد. افزایش سطح شکست به معنای افزایش انرژی جذب شده باشد. زیرا برای ایجاد سطح شکست گسترده در یک جسم نیاز به انرژی بیشتری می‌باشد. به همین دلیل مطالعه‌ی سطح شکست اهمیت فراوانی دارد.

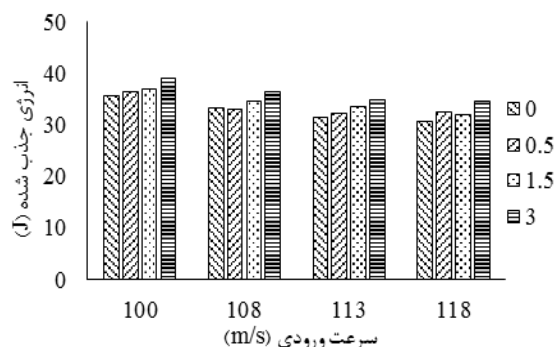
با توجه به مطالب گذشته در دو بخش قبل، مشاهده شده که وجود لاینر در جذب انرژی و همچنین در نحوه‌ی شکست لوله‌ی کامپوزیتی تأثیر بسزایی دارد. وقوع پدیده‌ی نفوذ در برخورد پرتابه با لوله‌های دارای لاینر سطح شکست را متفاوت می‌نماید. برای مشاهده و اندازه‌گیری سطح شکست از میز نوری بهره گرفته شده‌است. به دلیل وجود لاینر در بخش داخلی لوله، زمانی که لوله بر روی میز نوری قرار می‌گیرد، تمام بخش‌های لوله تیره دیده می‌شوند. نور تنها از بخش آسیب دیده عبور می‌کند که در نتیجه این بخش از لوله به صورت نورانی مشاهده می‌گردد. در شکل ۱۰ لوله‌ی با لاینر بر روی میز نوری نشان داده شده‌است. دیده می‌شود که نور از بخش آسیب دیده عبور کرده و در تصویر به وضوح مشاهده می‌گردد. برای اندازه‌گیری سطح شکست، بر روی لوله‌ها یک شاخص قرار داده شد و سپس از لوله‌ها بر روی میز نوری تصویر برداری صورت گرفت. سپس با انتقال اطلاعات به رایانه، با کمک نرم افزار فتوشاپ<sup>۱</sup>، سطوح شکست لوله‌ها به همان صورتی که ایجاد شده بودند، به صورت دقیق اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل شده در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۰ لوله‌ی دارای لاینر روی میز نوری

بیان شد زمانی که پرتابه به یک هدف برخورد می‌کند، در پشت هدف اثری می‌گذارد. در آزمایش بر روی لوله‌های کامپوزیتی دارای لاینر مشاهده می‌شود که پرتابه برای نفوذ کامل باید از لاینر نیز عبور کند. با توجه به خاصیت تردی لاینر مشاهده می‌شود که سطح شکست کامپوزیت همانند سطح شکست لاینر می‌باشد. در واقع لاینر سطح شکست کامپوزیت را نیز تعیین می‌کند. در شکل ۱۱ دیده می‌شود که پرتابه تنها یک سوراخ به اندازه‌ی قطر خود در پوسته‌ی کامپوزیتی ایجاد کرده و سپس با شکستن لاینر، به طور کامل در لوله نفوذ نموده‌است. در جدول ۳ سطح شکست برای لوله‌های دارای درصد‌های مختلف ذرات نانو آمده‌است. اختلاف در طرح شکست ناشی از میزان انحراف و کیفیت ساخت لاینر می‌باشد. تأثیر پوسته‌ی کامپوزیتی در میزان سطح شکست ناچیز بوده‌است. زیرا دیده می‌شود که در پوسته‌ی کامپوزیتی تنها سوراخ به قطر پرتابه ایجاد شده که این در حالی است که لاینر دارای سوراخ بزرگ‌تری می‌باشد. تفاوت موجود در مساحت‌های شکست، در حالت بیشینه در حدود ۳۰ درصد می‌باشد. دلیل به وجود آمدن این تفاوت، میزان مساحت شکست لاینر می‌باشد.

دارای درصد بیشتری از ذرات نانو سیلیکا افزایش یافته‌است. همچنین با افزایش سرعت ورودی دیده می‌شود که انرژی جذب شده توسط لوله کاهش یافته‌است. دلیل این پدیده زمان کمتر رسیدن پرتابه به مقدار انرژی لازم برای نفوذ می‌باشد. وقتی سرعت پرتابه بیشتر باشد، سریع‌تر به تنش شکست لوله می‌رسد و در لوله نفوذ می‌کند. که در نتیجه اتلاف انرژی کمتر بوده و اختلاف سرعت ورودی و خروجی آن کمتر خواهد بود. با توجه به آزمایش کشش ساده دیده شد که با افزایش درصد ذرات نانو موجود در لوله، مدول الاستیک و تنش لوله، افزایش می‌یابد. به همین دلیل در برخورد پرتابه، با افزایش درصد ذرات نانو، میزان جذب انرژی در لوله افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که در ۰/۵ و ۱/۵ درصد ذرات نانو، تفاوت در میزان انرژی بسیار اندک می‌باشد. این موضوع نشان دهنده‌ی تأثیر کم ذرات نانو در این دو درصد می‌باشد.



شکل ۹ نمودار انرژی جذب شده بر حسب سرعت برخورد

وجود لاینر ترد مانند پلی اتیلن رفتار لوله‌ی کامپوزیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. قبل از آزمایش بر روی لوله‌های کامپوزیتی، دو آزمایش برخورد پرتابه بر روی لاینر ساده انجام شده‌است که نشان می‌دهد این ماده در بارگذاری ضربه‌ی محلی، شکست ترد داشته و سطح شکست در مکان بارگذاری با سطحی محدود بوده‌است. این سطح محدود به دلیل ترد بودن این ماده می‌باشد. چرا که در مواد ترد نیروی برشی است که شکست ایجاد می‌کند و این مواد قبل از تغییر شکل پلاستیک قابل توجه، به شکست می‌رسند. این موضوع باعث می‌شود که لوله‌ی کامپوزیت در زمان شکست تغییر شکل کمتری داشته‌باشد. بخشی از انرژی پرتابه به وسیله‌ی لاینر جذب می‌شود که در نهایت مقدار جذب انرژی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل است که اختلاف انرژی بین لوله‌های کامپوزیت دارای درصد‌های مختلف ذرات نانو در حدود ۱۰-۱۵ درصد می‌باشد. این در حالی است که بهبود خواص با افزایش درصد ذرات نانو در حدود ۲۰ درصد بوده‌است. وجود لاینر در لوله، عامل جذب انرژی می‌باشد. پرتابه برای نفوذ کامل به جز بخش پوسته‌ی کامپوزیتی، باید در لاینر پلی اتیلن نیز نفوذ نماید. می‌توان مشاهده نمود که وجود لاینر باعث شده‌است که لوله‌های دارای ذرات نانو سیلیکا با ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی، تفاوتی با لوله‌ی بدون نانو نداشته‌باشند. به همین دلیل در شکل ۹ در سرعت‌های ورودی ۱۰۸ و ۱۱۸، لوله‌های آزمایش شده با ۰/۵ و ۱/۵ درصد ذرات نانو تفاوت چندانی در جذب انرژی با یکدیگر ندارند.

### ۳-۳- سطح شکست

سطح شکست در پدیده‌ی برخورد ضربه بسیار اهمیت دارد. عامل دیگری که می‌توان با آن میزان آسیب وارد شده به هدف را مشاهده نمود، سطح شکست

<sup>1</sup> Photoshop

## ۳-۴- مدل‌های شکست

کامپوزیت‌ها به دلیل ساختار تقویت شده‌ای که دارند، مدل‌های شکست متفاوتی از خود نشان می‌دهند. ترک و شکست در ماده‌ی زمینه، پارگی الیاف، جدایش الیاف، لایه لایه شدن، گسترش ترک در ماده‌ی زمینه و ... اینها مهم‌ترین مدل‌های شکست در مواد مرکب می‌باشند. در شکست مواد مرکب، هر کدام از مدل‌ها می‌توانند به تنهایی رخ دهند و یا به صورت ترکیبی از چند مدل شکست اتفاق بیفتند. در کنار این مدل‌های شکست، مدل‌های شکست مواد همگن نیز می‌تواند در کامپوزیت‌ها رخ دهد. این موضوع که کامپوزیت‌ها می‌توانند در چند مدل مختلف شکست داشته‌باشند، تحلیل شکست این مواد را پیچیده می‌کند. با توجه به این مطلب تحلیل و بررسی شکست مواد مرکب اهمیت ویژه‌ای دارد.

در لوله‌های دارای ذرات نانو و لاینر، انعطاف پذیری به دلیل وجود لاینر کاهش پیدا کرده‌است. همچنین رفتار این لوله‌ها در شکست شبیه مواد ترد می‌باشد. وجود لاینر پلی اتیلنی که ماده‌ای ترد می‌باشد، عامل این رفتار بوده و در نوع شکست پوسته‌ی کامپوزیتی نیز تأثیر گذار است. در بخش قبل شکل شکست بیان شد که نشان داد شکست به صورت محلی و تنها در موضع برخورد پرتابه رخ داده‌است. در پوسته‌ی کامپوزیتی پارگی الیاف و شکست ماده‌ی زمینه در محل برخورد پرتابه مشاهده شده‌است. در شکل ۱۳ مدل‌های شکست پوسته‌ی کامپوزیتی دیده می‌شود. پارگی الیاف مهم‌ترین مدل شکست در پوسته‌ی کامپوزیتی می‌باشد. دلیل این موضوع ترد بودن ماده‌ی زمینه و همچنین استحکام پایین آن در مقابل الیاف می‌باشد. الیاف با استحکام بیشتر، باید دچار پارگی شوند تا آسیب رخ دهد، در حالی که ماده‌ی زمینه با استحکام کمتر دچار شکست ترد می‌شود و در عمل با ایجاد ترک و گسترش آن، شکست در ماده‌ی زمینه کامل می‌گردد. در لاینر شکست ترد مشاهده شده‌است.

همان طور که بیان شد کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن مدل‌های مختلف شکست دارای رفتارهای پیچیده در زمان شکست هستند. ولی در آزمایش‌های انجام شده بر روی لوله‌های دارای لاینر، تنها دو مدل شکست (پارگی الیاف و شکست ماده‌ی زمینه) دیده شده‌است. یکی از دلایل این پدیده می‌تواند وجود لاینر باشد. لاینر پلی اتیلن به دلیل خاصیت ترد خود اجازه‌ی تغییر شکل و جابجایی را به پوسته‌ی کامپوزیتی نداده و آن را مجبور می‌سازد تا از رفتار آن تبعیت کند. یعنی تا زمانی که لاینر سالم باشد، اجازه‌ی تغییر شکل به پوسته‌ی کامپوزیتی داده نمی‌شود و زمانی که لاینر دچار آسیب شود، کامپوزیت نیز آسیب می‌بیند.



شکل ۱۳ پارگی الیاف و شکست در ماده‌ی زمینه در پوسته‌ی کامپوزیتی

جدول ۳ مساحت شکست (cm<sup>2</sup>) بر حسب سرعت ورودی و درصد ذرات نانو

سرعت ورودی پرتابه	درصد ذرات نانو		
	۰	۰/۵	۱/۵
۱۰۰ (m/s)	۲۰/۰۴۳	۱۶/۴۲۴	۱۷/۸۱۱
۱۰۸ (m/s)	۱۶/۳۷۲	۲۲/۵۲۹	۲۳/۲۵۳
۱۱۳ (m/s)	۱۸/۷۳۶	۲۳/۷۴۱	۱۸/۴۱۱
۱۱۸ (m/s)	۲۲/۹۵۳	۳۵/۷۳۳	۱۳/۸۴۰

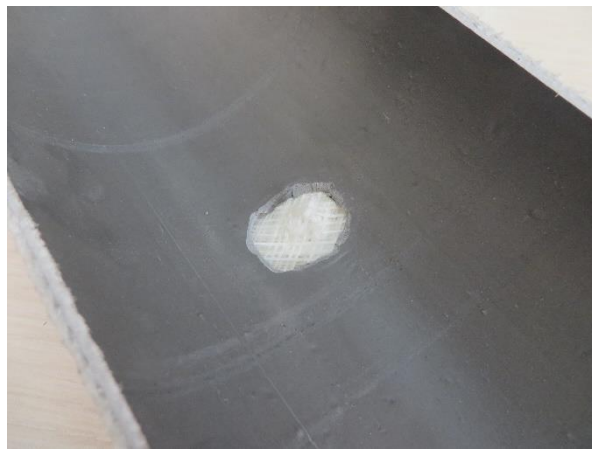
شکست در پوسته‌ی کامپوزیتی به اندازه‌ی قطر پرتابه می‌باشد ولی در بعضی لوله‌ها لاینر دارای سطح شکست بیشتری است. این در حالی است که بیشتر جذب انرژی توسط پوسته‌ی کامپوزیتی صورت گرفته‌است.

## ۳-۳-۱- شکل شکست

شکل شکست تمامی لوله‌های به صورت یک سوراخ به قطر پرتابه بر روی بخش کامپوزیت و سطح دایره‌ای شکل در لاینر می‌باشد. تغییرات سطح شکست بسیار اندک می‌باشد. عامل کیفیت ساخت لاینر تعیین کننده‌ی سطح شکست آن می‌باشد. این شکل شکست لوله، به دلیل شکل شکست لاینر می‌باشد در عمل پوسته‌ی کامپوزیتی تنها به میزان یک سوراخ به قطر پرتابه سطح شکست داشته‌است. در شکل ۱۱ سوراخ ایجاد شده روی پوسته-ی کامپوزیت نشان داده شده‌است. در شکل ۱۲ سوراخ ایجاد شده بر روی لاینر مشاهده می‌گردد. سوراخ روی لاینر تقریباً به شکل دایره می‌باشد. در تمام لوله‌ها سوراخ روی لاینر شکل شبیه دایره دارد.



شکل ۱۱ سوراخ ایجاد شده در بخش پوسته‌ی کامپوزیت بر اثر برخورد پرتابه



شکل ۱۲ سوراخ دایره‌ای شکل ایجاد شده بر روی لاینر

که ترک‌ها در آن دارای گستره‌ی بیشتری هستند. در شکل ۱۵-ب ترک در لوله با ۰/۵ درصد ذرات نانو نمایش داده شده‌است. در شکل ۱۵-پ ترک در لوله با ۳ درصد ذرات نانو نشان داده شده‌است که گستره‌ی آن کمتر از لوله‌های با درصد ذرات نانو کمتر می‌باشد.



الف



ب



پ

شکل ۱۵ موج تنش در لوله‌ها، الف) بدون ذرات نانو، ب) ۰.۵ درصد و پ) ۳ درصد

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار تحت ضربه‌ی لوله‌های کامپوزیتی دارای لاینر و ذرات نانو سیلیکا که به روش رشته پیچی ساخته شده، به صورت تجربی مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها و تحقیق‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ذرات نانو سیلیکا در ساخت کامپوزیت‌ها باعث افزایش استحکام و مدول الاستیک آنها می‌شود. این در حالی است که وجود لاینر در لوله رفتار شکست پوسته‌ی کامپوزیت را محدود کرده و انرژی جذب شده توسط

در زمان برخورد پرتابه به دلیل انرژی جنبشی پرتابه، لاینر نیز دچار آسیب گشته و شکسته می‌شود. تنها در سطح شکست لاینر پوسته‌ی کامپوزیتی می‌تواند گسترش شکست داشته‌باشد. به دلیل اینکه ابتدا پوسته‌ی کامپوزیتی تخریب می‌شود و سپس لاینر، شکست در پوسته‌ی کامپوزیت به محل برخورد پرتابه محدود می‌گردد. بدین معنا که در پوسته‌ی کامپوزیتی سطح شکست گسترش پیدا نکرده است. به همین دلیل مدل‌های شکست جدایش الیاف و لایه لایه شدن در هیچ کدام از نمونه‌ها مشاهده نشده‌است. بخش دیگری که می‌تواند از فرآیند برخورد انرژی جذب کند، جدایش پوسته‌ی کامپوزیتی از لاینر می‌باشد. در آزمایش‌ها مشاهده شده‌است که تنها بخش شکسته شده از لاینر که در قسمت قبل بیان شد و به شکل دایروی می‌باشد، از پوسته‌ی کامپوزیتی جدا شده و از لاینر نیز کنده شده‌است. مشاهده می‌شود که وجود پوسته‌ی کامپوزیتی سطح شکست در لاینر را کاهش می‌دهد و به دلیل اتصال بین پوسته‌ی کامپوزیتی و لاینر سطح کمتری از لاینر در برخورد پرتابه دچار شکست می‌گردد. این موضوع به دو دلیل رخ می‌دهد. اول جذب بخشی از انرژی پرتابه توسط پوسته‌ی کامپوزیتی می‌باشد. و دیگر اتصال بین لاینر و پوسته‌ی کامپوزیتی اجازه‌ی افزایش سطح شکست را نمی‌دهد. شکل ۱۴ شکست را لاینر را نشان می‌دهد که در آن بخشی از لاینر که دچار شکست شده، به دلیل اتصال با پوسته از لوله جدا نشده‌است.



شکل ۱۴ شکست در لاینر و اتصال آن به پوسته

#### ۳-۴-۱- ترک‌های شکل موج

پدیده‌ی دیگری که در لوله‌های دارای ذرات نانو تحت بار ضربه‌ی محلی مشاهده شده‌است، ترک‌هایی است که در پوسته‌ی کامپوزیتی به صورت موج انتشار پیدا کرده‌اند. شکل این ترک‌ها تداعی کننده‌ی موج دایره‌ای شکل است که در حول نقطه‌ی برخورد یک سنگ به داخل آب ایجاد می‌شود. شکل ۱۵ سه نمونه از این ترک‌ها را نشان می‌دهد. این ترک‌ها در تمام نمونه‌ها مشاهده شده‌اند ولی میزان شدت آن بستگی به درصد ذرات نانوی موجود در لوله دارد. با افزایش درصد ذرات نانوی موجود در لوله، شدت این ترک‌ها کاهش پیدا کرده‌است. در شکل ۱۵-الف لوله بدون ذرات نانو مشاهده می‌شود



- composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 116, No. pp. 41-49, 2015.
- [13] Rostamiyan, Y. Fereidoon, A. Mashhadzadeh, A. H. Ashtiyani, M. R. and Salmankhani, A., "Using response surface methodology for modeling and optimizing tensile and impact strength properties of fiber orientated quaternary hybrid nano composite", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 69, No. pp. 304-316, 2015.
- [14] Matadi Boumbimba, R. Froustey, C. Viot, P. and Gerard, P., "Low velocity impact response and damage of laminate composite glass fibre/epoxy based tri-block copolymer", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 76, No. pp. 332-342, 2015.
- [15] Zamani, R. Rahimi, G. H. Pol, M. H. and Hedayatian, M., "Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Nanocomposite Grid Shells: Experimental Investigation", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015.

پوسته‌ی کامپوزیت کاهش می‌یابد. انتظار می‌رفت که وجود لاینر به دلیل افزایش ضخامت، مقاومت لوله را افزایش دهد ولی به دلیل اثراتی مانند کاهش سطح و مدل‌های شکست، استحکام کلی لوله را کاهش می‌دهد. به دلیل رفتار ترد لاینر سطح شکست به اندازه‌ی وسعت محل عبور پرتابه بوده و در پوسته‌ی کامپوزیت گسترش پیدا نکرده‌است. پارگی الیاف و شکست در ماده‌ی زمینه تنها مدل‌های شکست مشاهده شده در این آزمایش بوده و شکست ترد لاینر نیز پس از شکست در پوسته‌ی کامپوزیتی مشاهده شده‌است. از نتایج آزمایش‌های فوق و با توجه به اینکه که وجود لاینر برای جلوگیری از نشتی سیال داخل لوله به خارج به خصوص در لوله‌هایی که سیال، تحت فشار می‌باشد، لازم است؛ برای حفاظت از این لوله‌ها که در معرض بارهای ضربی قرار می‌گیرند، استفاده از لاینر ترد پیشنهاد نمی‌گردد.

#### ۵- فهرست علائم

$E$	انرژی جذب شده (J)
$m$	جرم (Kg)
$V_i$	سرعت ورودی ( $m.s^{-1}$ )
$V_o$	سرعت خروجی ( $m.s^{-1}$ )

#### ۶- مراجع

- [1] Ávila, A. F. Carvalho, M. G. R. Dias, E. C. and da Cruz, D. T. L., "Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact", *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, pp. 745-751, 2010.
- [2] Ke, F. Jiang, X. Xu, H. Ji, J. and Su, Y., "Ternary nano-CaCO<sub>3</sub>/poly(ethylene terephthalate) fiber/polypropylene composites: Increased impact strength and reinforcing mechanism", *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 5, pp. 574-579, 2012.
- [3] Venkatanarayanan, P. S. and Stanley, A. J., "Intermediate velocity bullet impact response of laminated glass fiber reinforced hybrid (HEP) resin carbon nano composite", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 75-83, 2012.
- [4] Jajam, K. C. and Tippur, H. V., "Quasi-static and dynamic fracture behavior of particulate polymer composites: A study of nano- vs. micro-size filler and loading-rate effects", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 8, pp. 3467-3481, 2012.
- [5] Zhang, Z. Zhao, X. Zhang, J. and Chen, S., "Effect of nano-particles-induced phase inversion on largely improved impact toughness of PVC/ $\alpha$ -methylstyrene-acrylonitrile copolymer ( $\alpha$ -MSAN)/CPE-matrix composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 86, No. pp. 122-128, 2013.
- [6] Zabihollah, A. Pol, M. H. SelkGhafari, A. and Momeni, S., "Dynamic response of laminated hybrid composite beams reinforced with high weight fraction of nano-particles", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 150-153, 2013.
- [7] Majumdar, A. Butola, B. S. and Srivastava, A., "Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid", *Materials & Design*, Vol. 54, No. pp. 295-300, 2014.
- [8] Sivasarayanan, S. Raja, V. K. and Manikandan, B., "Impact Characterization of Epoxy LY556/E-Glass Fibre/ Nano Clay Hybrid Nano Composite Materials", *Procedia Engineering*, Vol. 97, No. pp. 968-974, 2014.
- [9] Pol, M. H. Liaghat, G. H. Mehrabani Yeganeh, E. and Afrouzian, A., "Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2014.
- [10] Masoudi, A. Liaghat, G. H. and Pol, M. H., "Effects of nanoclay on the ballist behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014.
- [11] Koricho, E. G. Khomenko, A. Haq, M. Drzal, L. T. Belingardi, G. and Martorana, B., "Effect of hybrid (micro- and nano-) fillers on impact response of GFRP composite.", *Composite Structures*, Vol. 134, No. pp. 789-798, 2015.
- [12] Manero Ii, A. Gibson, J. Freihofer, G. Gou, J. and Raghavan, S., "Evaluating the effect of nano-particle additives in Kevlar® 29 impact resistant