

# تحلیل تجربی نفوذ در اهداف پارچه‌یی بافته شده آغشته به سیال سخت‌شونده‌ی برشی تقویت شده با نانوذرات خاک‌رس

اسماعیل بلالی (کارشناسی ارشد)

سید علی صدوق وینبی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ناصر کوردانی\* (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران

قدرت‌الله اسکافی (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۶ (ص. ۴۹-۵۴)  
دوری ۳ - ۳۳، شماره ۱، ص. ۴۹-۵۴

در این نوشتار الیاف شیشه تقویت‌شده با سیال سخت‌شونده‌ی برشی، و سخت‌شونده‌ی برشی به همراه نانوذرات خاک‌رس تحت آزمون شبه‌استاتیکی بررسی شده است. یکی از مزیت‌های سیال ضخیم‌شونده‌ی برشی غلظت بالای آن است. برای تهیه‌ی سیال سخت‌شونده‌ی پلی‌اتیلن گلیکول به صورت سیال پایه و نانوذرات سیلیکا به آرامی به سیال اضافه می‌شود. آزمون شبه‌استاتیکی برای هر سه حالت پارچه شیشه خشک - سیال سخت‌شونده‌ی برشی و پارچه شیشه - سیال سخت‌شونده‌ی برشی - نانوذرات خاک‌رس روی سطح مشخص انجام شده است. آزمون شبه‌استاتیکی برای هر سه حالت پارچه‌های آغشته نشده، پارچه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی، و پارچه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی به همراه نانو ذرات خاک‌رس انجام شد. نتایج مطالعات به وضوح نشان‌گر افزایش قابل توجه مقاومت نفوذی پارچه‌های شیشه‌یی آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی به همراه نانو ذرات خاک‌رس است.

واژگان کلیدی: سیال سخت‌شونده‌ی برشی، رئولوژی، الیاف شیشه، نانوذرات سیلیکا، نانوذرات خاک‌رس.

## ۱. مقدمه

محافظت در برابر نفوذ ضربه‌زننده، یکی از ضرورت‌های زندگی مدرن بوده است. هدف از ساخت زره، جذب انرژی ضربه‌زننده و جلوگیری از نفوذ کامل آن در زره است. از آنجا که میزان جذب انرژی توسط یک زره رابطه‌ی مستقیمی با استحکام آن دارد، هرچه استحکام زره بالاتر باشد عملکرد آن بهتر خواهد بود. پارچه‌های بافته شده با مدول و سختی بالا به طور گسترده در برابر ضربه مقاوم‌اند. با این حال، بدون تقویت و پوشش کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیقات حاضر، استفاده از پارچه‌های بافته شده به وسیله‌ی یک تقویت‌کننده کاربرد بسیار زیادی دارد.<sup>[۱]</sup> تمامی تحقیقات مربوطه نشان می‌دهد که یکی از راه‌های بهبود مقاومت در برابر نفوذ، افزایش اصطکاک بین تارپود پارچه‌های بافته شده است. با اشباع پارچه به وسیله‌ی سیال سخت‌شونده‌ی برشی افزایش مقاومت در برابر نفوذ قابل توجه خواهد بود.<sup>[۲]</sup> محققین نشان داده‌اند که حضور سیال سخت‌شونده‌ی برشی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۸/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۸، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۲۶

balali@aut.ac.ir  
sadough@aut.ac.ir  
naser.kordani@gmail.com  
eskafi54@yahoo.com

در پارچه، مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهد.<sup>[۳]</sup> تعداد لایه‌های پارچه‌ی آغشته شده کم‌تر از تعداد لایه‌های پارچه‌های غیر آغشته در نظر گرفته شد. بهبود عملکرد پارچه‌ی آغشته به سیال می‌تواند به دلیل تأثیر سیال در جلوگیری از لغزش لایه‌ها روی هم و جلوگیری از حرکت نسبی ضربه‌زننده در لایه‌ها باشد. در سال ۲۰۰۹ نقش سختی ذرات بر رفتار نفوذی پارچه‌های آرامید مورد بررسی قرار گرفت<sup>[۴]</sup> و نشان داده شد که ذرات سیلیکای استفاده شده کارایی بالستیکی بهتری نسبت به ذرات پلی‌متیل آغشته شده دارد. در سال ۲۰۱۰ نیز عملکرد پارچه‌های کولار و نایلون آغشته به سیال ضخیم‌شونده برشی و غیر آغشته تحت آزمون شبه‌استاتیکی قرار گرفت.<sup>[۷]</sup> پارچه‌های آغشته به سیال متحمل نیروی بالاتر از ۳۵۰ نیوتن ضربه‌ی چاقو می‌شوند، درحالی که پارچه‌ی غیرآغشته نیروی ۲۸۶ نیوتن را دفع می‌کند. در سال ۲۰۱۲، محققین پارچه‌های شیشه‌یی را در حلال اتانول - سیال ضخیم‌شونده‌ی برشی به نسبت ۱:۳ خیس و آغشته کردند.<sup>[۸]</sup> آزمون‌های شبه‌استاتیکی مقاومت در هر دو حالت پارچه‌های شیشه‌یی و کامپوزیت پارچه‌یی شیشه - سیال سخت‌شونده نشان

گرانروی و نرخ برش بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر کسر حجمی نانوذرات خاک رس و نیروی جذب شده توسط کامپوزیت شیشه - سیال سخت شونده و کامپوزیت های سیال سخت شونده به همراه نانوذرات خاک رس به وسیله ی ضرب زنده ی استوانه یی سرکروی در آزمون شبه استاتیکی بررسی شده است.

## ۲. مواد و روش آزمایش ها

### ۲.۱. مواد مورد استفاده

پلی اتیلن گلیکول با جرم مولکولی ۲۰۰ گرم بر مول (مرک - آلمان) به عنوان فاز پیوسته (سیال حامل) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، نانوذرات سیلیکا ۱۲ نانومتری و نانوذرات خاک رس به عنوان ذرات پراکنده در محیط پلیمری (پلی اتیلن گلیکول ۲۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. پارچه ی مورد استفاده در این نوشتار الیاف شیشه نوع E است. از جمله خواص این الیاف می توان به استحکام کششی و فشاری و سفتی خوب و قیمت نسبتاً ارزان آن اشاره کرد.

### ۲.۲. تهیه ی سیال سخت شونده ی برشی و سیال سخت شونده ی برشی

#### به همراه نانوذرات خاک رس

برای ساخت سیال سخت شونده ی برشی، ابتدا پلیمر را در داخل ظرف ریخته و نانوذرات سیلیکا را به آرامی به پلیمر در حال دوران اضافه می کنند. پس از افزودن مقدار کمی از نانوذرات به پلیمر با استفاده از هم زن مکانیکی، نیروی لازم برای اختلاط مواد به وجود خواهد آمد (شکل الف). در هر بار، حدود ۱ گرم نانو به پلیمر اضافه می شود و این روند اختلاط ادامه می یابد. با افزایش دور هم زن، جریان های گردابی و آشفتگی شکل می گیرد که باعث تلاطم و اختلاط کامل سیال می شود. در سرعت پایین، پودرها از یکدیگر باز می شوند، تا حدودی خیس می خورند و با سیال مخلوط می شوند و در دوره های بالا همگن می شوند و یک سوسپانسیون پایدار و شفاف حاصل می شود (شکل ب).

بعد از ساخت سیال سخت شونده ی برشی با ۳۰٪ جرمی نانوذرات سیلیکا برای به وجود آوردن سیال هیبریدی از نانوذرات خاک رس استفاده شده است؛ در آزمایش ها، سیال بدون نانو خاک رس و با نانو خاک رس مقایسه می شود. برای مخلوط کردن ذرات نانو خاک رس در هر مرحله حدود ۰/۵ درصد وزنی سیال سخت شونده ی برشی ساخته شده نانوذرات خاک رس به محلول اضافه می شود. سیال سخت شونده دارای غلظت بالایی است؛ ابتدا سرعت دستگاه ۲۰۰ دور بر دقیقه است تا تجمع نانوذرات شکسته شود و سیال رقیق شود (ایجاد شدن حباب). سپس به مرور سرعت دستگاه افزایش می یابد تا سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه به دست آید. با سرعت بالای

داده که پارچه ی آغشته به سیال سخت شونده کارایی بهتری در مقابل نفوذ دارد. در سال ۱۴۰۲ نیز آزمون شبه استاتیکی روی پارچه ی آرامید آغشته شده به سیال STF در وزن مولکولی متفاوت مایع مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۹]</sup> نتایج حاصل از رتولوژی نشان داد که با افزایش کسر مولکولی پلیمر، گرانروی (ویسکوزیته) افزایش و نرخ کرنش بحرانی کاهش می یابد. همچنین آزمون شبه استاتیکی نشانگر افزایش ۴/۵ برابری الیاف آغشته شده به STF (۳۵٪ نانوسیلیکا) نسبت به الیاف خام است. بررسی اثر ذرات سیلیکای متفاوت روی پارچه های آغشته شده به سیال سخت شونده ی برشی تحت مقاومت شبه استاتیکی<sup>[۱۰]</sup> نشان داد که پارچه های آغشته شده به سیال سخت شونده ی برشی با ذرات سیلیکای زیر میکرونی مقاومت شبه استاتیکی بهتری نسبت به پارچه های آغشته شده به سیال سخت شونده ی برشی با ذرات سیلیکای فیومد دارند.

سیالات نیوتنی با افزایش نرخ برش گرانروی ثابت دارند. برای افزایش مقاومت زره ها از سیال سخت شونده ی برش<sup>۱</sup> استفاده می شود. سیال سخت شونده ی برشی یک سیال غیر نیوتنی است که ویژگی اصلی آن افزایش نرخ کرنش با افزایش گرانروی است. افزایش شیب گرانروی پارامتر مهمی است؛ اگر این شیب خیلی تند باشد در سیال سخت شونده ناپیوستگی رخ می دهد. این ناپیوستگی در زمان کوتاهی نیروی اعمال شده را جذب می کند.<sup>[۹]</sup> این ویژگی سیال سخت شونده باعث تغییر حالت شبه مایع به حالت شبه جامد می شود. نظریه ی اختلال در نظم و نظریه ی تغییر شکل هیروکلستر بیانگر این پدیده ی سخت شدن برشی است. افزایش نرخ برش، ذرات معلق ساختارهای لایه یی را تشکیل می دهد به طوری که ذرات بر یکدیگر می لغزند و نیروهایی به وجود می آورند که باعث ناپایداری جریان می شود. این ناپایداری جریان توسط واکنش نیروهایی همچون واندروالس، در لایه ها و برگره های از ذرات ایجاد می شود. همچنین ذرات در لایه های محرک به وسیله ی این نیروها از لایه های نامنظم بیرون کشیده می شوند. لایه ها می توانند ضخامتی در محدوده ی یک قطر ذرات تا چند برابر قطر متوسط ذرات داشته باشند و باعث ناپایداری جریان شوند و در نتیجه در جریان منظم اختلال ایجاد شود؛ این پدیده را «اختلال نظم» می نامند. با افزایش بیشتر نرخ برش، تنش برشی از یک مقدار بحرانی عبور می کند و ذرات در لایه های منظم شان قرار می گیرند و با تشکیل تجمعات متراکم شده ی نانو به یکدیگر فشرده می شوند. با تشکیل این تجمعات و تولید جریان القایی انرژی بیشتری تلف می کنند و ذرات از طریق خوشه ها با تماس های فیزیکی فعل و انفعالاتی انجام می دهند و بر اثر نیروهای لغزشی و نیروهای اصطکاکی در فرایند سخت شدن برشی ذرات با یکدیگر درگیر می شوند و باعث پایداری کلوتیدی، و افزایش گرانروی می شوند که این انتقال با افزایش سریع گرانروی در نرخ برشی بحرانی ظاهر می شود؛ این پدیده را «تغییر شکل هیدروکلاستر» می نامند و این تعادل هیدرودینامیکی، بی ثباتی و نیروهای دافعه ی بین ذرات را سرکوب می کند. بنابراین سخت شدن برشی به درهم ریختن لایه های منظم وابسته نیست، بلکه به تولید تجمعات ذرات برمی گردد.<sup>[۱۱، ۱۲]</sup>

سیال سخت شونده ی برشی از اختلاط ذرات سخت جامد (نانوذرات سیلیکا) در یک سیال حامل (پلی اتیلن گلیکول) به وجود می آید. پلی اتیلن گلیکول شامل پیوندهای هیدروکسیدی است که با نانوذرات سیلیکا پیوند هیدروزنی تشکیل می دهد.<sup>[۱۳]</sup> اصطکاک بین نخ ها، تارپود پارچه و نفوذکننده اثر بسیار زیادی در برابر سوراخ شدن پارچه دارد. در طول فرایند نفوذ اصطکاک به وجود آمده بین تارپود الیاف باعث عدم لغزش تارپود می شود. افزایش کارایی در کامپوزیت های الیاف - سیال سخت شونده ی برشی به دلیل افزایش اصطکاک مشاهده می شود.<sup>[۱۴]</sup>

در این تحقیق، اثر کسر حجمی نانوذرات خاک رس بر ویژگی های رتولوژیکی سیال سخت شونده ی برشی و سیال سخت شونده ی برشی به همراه نانوذرات خاک رس مانند



ب) سوسپانسیون شفاف و پایدار.



الف) هم زن مکانیکی؛

شکل ۱. ساخت سیال سخت شونده برشی.



شکل ۳. قاب نگه دارنده‌ی نمونه‌ها و شکل نفوذکننده‌ی کروی.

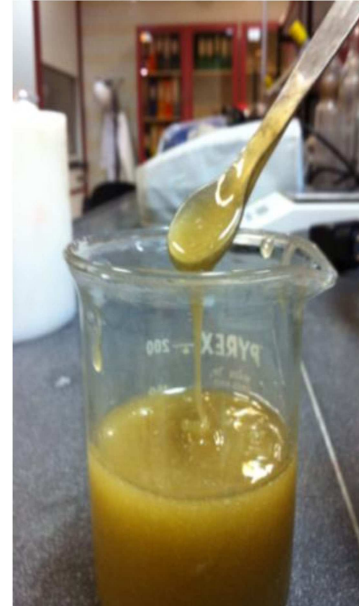
متمركز بر سطح پارچه‌یی با ابعاد  $16 \times 16$  سانتی‌متر مربع، از نفوذگر فولادی به قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شده است. پارچه‌ها به صورت خام و تقویت شده با درصد‌های مختلفی از نانوذرات، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بدین منظور پارچه‌ها را به صورت مربعی، بین دو قاب فولادی دارای طول  $30^\circ$  میلی‌متر و عرض  $200^\circ$  میلی‌متر قرار می‌دهند. طول ضلع مربع داخلی صفحه‌ی فلزی برابر با  $100^\circ$  میلی‌متر است (شکل ۳). این دوصفحه به وسیله‌ی شش پیچ و همچنین فک‌های نگه‌دارنده به هم متصل می‌شوند. برای این که هیچ فضای خالی بین نمونه و قاب باقی نماند از سنباده‌ی مربعی استفاده شده است. این امر از سرخوردن پارچه به هنگام آزمایش جلوگیری می‌کند و نیز ما را از مقید شدن قطعه و آمادگی آنها برای انجام آزمایش مطمئن می‌سازد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. آزمون رئولوژی

در تمام موارد شکل ۴ هر دو رفتار نازک شدن برشی و ضخیم‌شوندگی برشی مشاهده می‌شود. نازک شدن برشی در نرخ‌های سرعت پایین و ضخیم‌شوندگی در نرخ‌های سرعت بالاتر اتفاق می‌افتد. رفتار رئولوژی، نرخ کرنش برحسب گرانروی برای سیال‌های سخت‌شونده با  $30\% \text{ SiO}_2 + 1\% \text{ clay}$  و  $30\% \text{ SiO}_2 + 3\% \text{ clay}$ ، ارائه شده است. براساس این نتایج، در نمونه سیال سخت‌شونده‌ی برشی  $30\%$ ، در نرخ کرنش پایین شاهد کاهش آرام گرانروی (نازک شدن برشی) هستیم، اما هنگامی که نرخ برش به  $19 \text{ s}^{-1}$  و گرانروی به  $5.7 \text{ Pa-s}$  می‌رسد (نرخ برش بحرانی) شاهد افزایش ناگهانی گرانروی هستیم. نمونه سیال سخت‌شونده  $30\% - 1\%$  نانوآخاک رس با افزایش نرخ کرنش گرانروی در حال کاهش است. در نرخ برش بحرانی ( $13 \text{ s}^{-1}$ ) گرانروی از  $13.2$  تا  $9.5 \text{ Pa-s}$  با شیب بیشتری شروع به افزایش می‌کند. نمونه سیال سخت‌شونده  $30\% - 3\%$  نانوآخاک رس با افزایش نرخ کرنش گرانروی در حال کاهش است، در نرخ برش بحرانی ( $10 \text{ s}^{-1}$ ) گرانروی از  $24$  تا  $1120 \text{ Pa-s}$  با شیب بیشتری شروع به افزایش می‌کند (شکل ۴).

نازک شدن برشی به عنوان افت ناگهانی گرانروی مشاهده می‌شود. این رفتار زمانی به وجود می‌آید که هیدروکلاسترهای قرار گرفته در لایه‌های منظم سوسپانسیون شکسته می‌شوند و باعث کاهش گرانروی می‌شوند. افت گرانروی در سیال سخت‌شونده با کسر حجمی کم‌تر، بیشتر است.<sup>[۱۵]</sup> با افزایش کسر حجمی ذرات جامد، پیوندهای



شکل ۲. سیال سخت‌شونده با حضور نانوذرات خاک رس.

$1600^\circ$  دور بر دقیقه عملیات مخلوط کردن در حدود  $30^\circ$  دقیقه انجام شده است تا اختلاط کاملی بین نانوذرات خاک رس و سیال مورد نظر انجام شود (شکل ۲). نمونه‌های سیال هیبریدی به مدت یک روز در آزمایشگاه قرار داده شد تا حباب‌های درون سیال خارج شوند.

### ۳.۲. آماده‌سازی کامپوزیت سیال سخت‌شونده - الیاف شیشه و

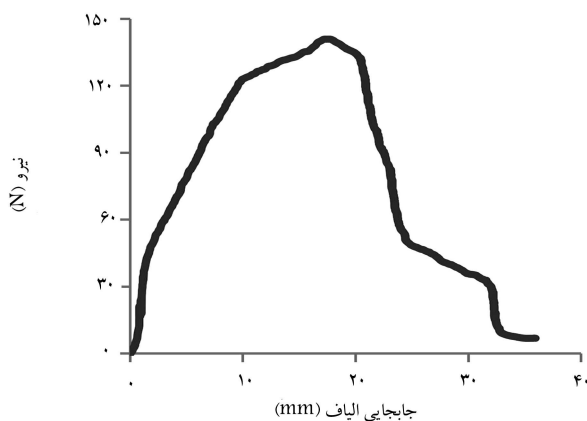
#### کامپوزیت سیال سخت‌شونده‌ی الیاف شیشه

برای تزریق بهتر سیال سخت‌شونده‌ی برشی میان تاروپود الیاف، ابتدا سیال به نسبت ۳:۱ (سیال سخت‌شونده: اتانول) در اتانول با درصد خلوص  $99\%$  رقیق‌سازی شده است. سپس هر لایه پارچه شیشه به ابعاد  $16 \times 16$  سانتی‌متر مربع مدت ۲ دقیقه در محلول اتانول - سیال قرار داده شده تا به خوبی سیال در میان تاروپود پخش شود. نمونه‌ی آغشته شده به سیال هیبریدی روی یک صفحه‌ی صاف قرار گرفته و به کمک غلطک (حرکت رفت و برگشتی روی نمونه‌ها) سیال اضافی از نمونه‌ها خارج شد. اتانول موجود در پارچه‌های آغشته شده باید تبخیر شود. بدین منظور نمونه‌ها مدت  $30^\circ$  دقیقه در دمای  $60^\circ$  درجه سانتی‌گراد درون کوره قرار داده شد. نمونه‌ها بعد از ساخت به مدت ۱ روز در آزمایشگاه قرار داده شد.

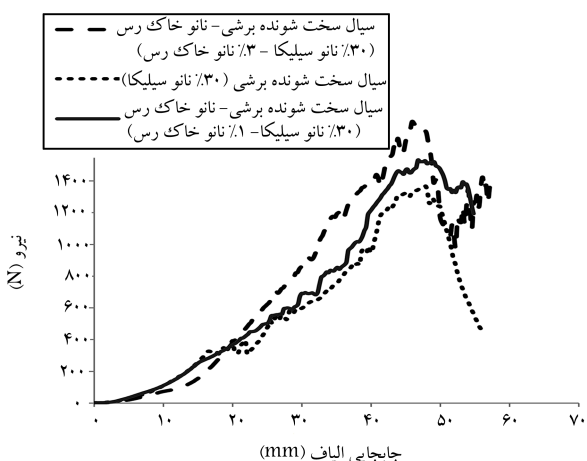
### ۴.۲. مشخصات و آزمایش‌ها

برای شناخت رفتار سیال هیبریدی و نحوه‌ی تغییرات گرانروی تحت تنش اعمالی به آن، آزمایش‌های رئولوژی انجام شده است. دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها عبارت است از رئومتر  $MCR301$  ساخت شرکت استرالیا؛ و این آزمایش به منظور بررسی رفتار نمونه‌ها در یک فرکانس ثابت و نرخ کرنش‌های مختلف انجام می‌شود. هر نمونه در فرکانس ثابت  $1^\circ \text{ rad/s}$  و با توجه به غلظت سیال سخت‌شونده‌ی برشی، تحت رویش کرنشی از  $0.1$  تا  $1000$  نرخ کرنش قرار گرفته است.

برای بررسی رفتار تغییر شکل کیفی تحت بار، آزمون شبه‌استاتیکی براساس سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام شده است. در این آزمون برای وارد کردن نیروی



شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای الیاف خام.

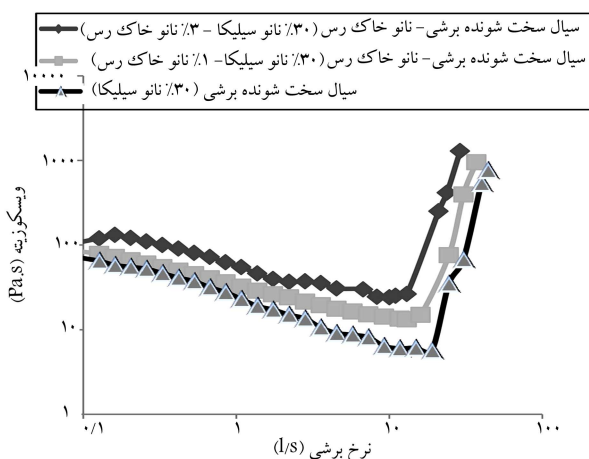


شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ها.

جدول ۲. عملکرد ضرر به شبه‌استاتیکی به هدف برای سرعت نفوذ ۳۰۰ mm/min.

نمونه	جابه‌جایی الیاف (mm)	نیرو (N)	انرژی به‌دست‌آمده
۴ لایه پارچه شیشه خشک	۱۶٫۷	۱۴۰٫۱۴۱	۲٫۷۵
۴ لایه پارچه STF (۳۰٪ نانوسیلیکا)	۴۷٫۹	۱۳۸۰٫۸	۳۳٫۵
۴ لایه پارچه STF + نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۱٪ نانوخاک رس)	۴۶٫۷	۱۵۲۰٫۶	۳۷
۴ لایه پارچه STF + نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک رس)	۴۵٫۹۱	۱۷۷۰٫۷	۴۳٫۴

رسیدن به مقدار نیروی بیشینه تحمل می‌کند، نشان داده شده است. همچنین مقدار انرژی به دست آمده از مساحت سطح زیر نمودار بار - جابه‌جایی، ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود الیاف خام نیروی ۱۴۱ نیوتن را تحمل می‌کند. نیروی الیاف آغشته شده به سیال سخت‌شونده برشی - نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک رس) ۱۷۷۰٫۷ نیوتن است که این مقدار در حدود ۱۲٫۶ برابر الیاف خام است و این اختلاف ناشی از تار و پود بین الیاف است، چون سیال سخت‌شونده در برش اصطکاک را بین تار و پود الیاف به وجود می‌آورد که از حرکت نفوذکننده جلوگیری می‌کند. نیروی الیاف آغشته شده به سیال STF - نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و



شکل ۴. نمودار نرخ کرنش برحسب گرانروی برای سیال هیبریدی.

جدول ۱. نمونه‌های آماده برای آزمون شبه‌استاتیکی.

نمونه‌های مورد استفاده
۴ لایه پارچه شیشه خشک
۴ لایه پارچه STF (۳۰٪ نانوسیلیکا)
۴ لایه پارچه STF + نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۱٪ نانوخاک رس)
۴ لایه پارچه STF + نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک رس)

بیشتری بین ذرات و زنجیرهای پلیمر به وجود می‌آید. بنابراین ساختارهای هیدروکلاستر بیشتری تشکیل می‌شوند، این بدان معنی است که ساختارهای هیدروکلاستر بیشتری در افزایش گرانروی شرکت می‌کنند. بنابراین نیروی انتقال داده شده به وسیله ذرات به آسانی در کل سیال پخش می‌شود و افزایش کسر ذرات باعث کاهش نیروی دافعه بین ذرات در زنجیره‌های پلیمر می‌شود و در نرخ برش بحرانی کم‌تر نیروها جذب می‌شوند. [۱۶]

### ۲.۳. نتایج آزمون شبه‌استاتیکی

آزمون شبه‌استاتیکی به وسیله یک نفوذگر استوانه‌ای سرکروی به صورت نیروی کنترل شده روی نمونه‌ها، که در بین دو صفحه فولادی قرار داده شده و به وسیله گیره‌ها مهار شده‌اند، انجام شده است. برای انجام آزمون شبه‌استاتیکی نمونه‌ها طبق جدول ۱ آماده شده است.

پیک نمودار بار - جابه‌جایی در نمونه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده برشی (نانوذرات سیلیکا - نانوخاک رس) افزایش می‌یابد. سیال سخت‌شونده همراه با نانوخاک رس آغشته به پارچه شیشه کارایی بیشتری در مقابل نفوذگر دارد. در حالی که نفوذگر در پارچه شیشه خشک در جابه‌جایی کوچک و بار نفوذ کم‌تر نفوذ می‌کنند. بنابراین در برابر ضربه‌زنده مقاومت نفوذ کمی دارد.

نمودار نیرو - جابه‌جایی برای اهداف تحت بار شبه‌استاتیکی با سرعت ۳۰۰ mm/min (معادل ۵ mm/s) در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. براین اساس بیشینه نیرو در نمودار بار - جابه‌جایی برای اهداف آغشته شده بالاتر از اهداف آغشته نشده است. در شکل ۵ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای الیاف خام نشان داده شده است. مقدار نیرویی که الیاف خام تحمل می‌کنند، ۱۴۰٫۸۲۵ نیوتن در جابه‌جایی ۱۶٫۷۵ میلی‌متر است.

در جدول ۲ مقدار بیشینه نیرو برای نمونه‌ها و مقدار جابه‌جایی که پارچه تا زمان

سخت‌شونده به همراه نانوخاک رس نشان داده شده است. در هنگام ورود نفوذگر به پارچه، نیروی منعکس شده به وسیله پارچه بر نفوذکننده اعمال می‌شود. کرنش ایجاد شده در منطقه بارگذاری به لبه‌های پارچه انتقال داده می‌شود و کل پارچه در فرایند نفوذ دخالت می‌کند. سیال سخت‌شونده برشی باعث می‌شود بین اجزا پارچه اتصال برقرار شود و نیروی اعمال شده الیاف به الیاف، نخ به نخ و یا لایه‌ی به لایه‌ی دیگر منتقل می‌شود. این فعل و انفعالات باعث بهبود عملکرد پارچه می‌شود و این امکان را در تاروپود پارچه به وجود می‌آورد که به صورت موثرتری نسبت به پارچه‌ی خشک بارگذاری شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت که خود سیال سخت‌شونده‌ی برشی مقداری از انرژی را جذب می‌کند. در واقع چون سیال سخت‌شونده تحت بارگذاری سفت شده و حالت جامد به خود می‌گیرد، موجب اتلاف انرژی نفوذگر می‌شود. حضور سیال سخت‌شونده‌ی برشی موجب افزایش اصطکاک بین الیاف و تاروپود پارچه شده و امکان تحرک و جابه‌جایی نخ‌ها را می‌گیرد. افزایش اصطکاک باعث درگیری مؤثرتر نخ‌ها می‌شود و انرژی لازم برای بیرون کشیدن نخ افزایش یابد. آزمایش شبه‌استاتیکی در این مطالعه به بررسی سازوکار پاره‌شدن پارچه می‌پردازد که به طور طبیعی به اثرات جابه‌جایی نخ و تاروپود پارچه مرتبط است. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود هیچ شکستگی در نخ دیده نمی‌شود؛ به عبارت دیگر، با افزایش نانوذرات خاک رس در سیال، ساختار نخ‌ها و الیاف در منطقه‌ی اعمال بار به خوبی با هم درگیر می‌شوند و این باعث می‌شود که نخ‌های کم‌تری از پارچه بیرون کشیده شود، و در نتیجه انرژی بیشتری جذب می‌شود.<sup>[۹]</sup>

#### ۴. نتیجه‌گیری

سیال سخت‌شونده‌ی برشی از مخلوط نانوذرات سیلیکا درون پلی‌اتیلن گلیکول تهیه شد. مقایسه‌ی بین رفتار سیال سخت‌شونده بدون نانوذرات خاک رس و با حضور نانوذرات خاک رس انجام شده است.

- در آزمون رئولوژی نمودارهای نرخ کرنش برحسب گرانروی در سیال سخت‌شونده‌ی برشی بدون حضور نانوذرات خاک رس، در نرخ کرنش بیشتری از حالت نازک شدن برشی به حالت سخت‌شونده‌ی برشی می‌رسد. به عبارت دیگر نمونه‌ی سیال سخت‌شونده‌ی برشی ۳۰ درصد نانوسیلیکا، نرخ کرنش بحرانی ۱۹ و در نمونه سیال سخت‌شونده ۳۰ درصد نانوسیلیکا - ۳ درصد نانو خاک رس نرخ برش بحرانی ۱۰ است.
- نتایج شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد که کامپوزیت پارچه شیشه/سیال سخت‌شونده‌ی برشی به همراه نانوذرات خاک رس نتایج بهتری نسبت به پارچه‌ی خام و کامپوزیت پارچه شیشه/سیال سخت‌شونده‌ی برشی بدون حضور نانوذرات خاک رس دارد. نیروی تحمل شده در پارچه‌ی آغشته شده به سیال سخت‌شونده ۳۰ درصد نانوسیلیکا - ۳ درصد نانو خاک رس در حدود ۱۲/۶ برابر پارچه خام است.



شکل ۷. نمونه‌ها بعد از آزمون شبه‌استاتیکی. (ج) STF - نانو خاک رس (۳۰٪ نانو سیلیکا- (د نانو خاک رس (۳۰٪ نانو سیلیکا- (۳٪ نانو خاک رس).



شکل ۷. نمونه‌ها بعد از آزمون شبه‌استاتیکی. (ب) STF (۳۰٪ نانو سیلیکا)؛ (الف) الیاف خام؛

۱٪ نانو خاک رس)، سیال STF (۳۰٪ نانوسیلیکا) و به ترتیب ۱۵۲۰/۶، ۱۳۸۰/۸ نیوتن است. مقدار انرژی به دست آمده از مساحت زیر نمودار بار - جابه‌جایی، در نمونه‌ی سیال سخت‌شونده - نانوخاک رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانو خاک رس) ۴۳/۴ ژول است که این مقدار در حدود ۱۵/۸ برابر الیاف خام است.

عملکرد پارچه توسط بسیاری از عوامل مانند سبک بافت، تراکم و تعداد لایه‌ها و اصطکاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تأثیر اصطکاک بر عملکرد بالستیکی پارچه‌های بافته شده نشان داد که اصطکاک ساختار پارچه را در محل وارد نمودن بار تحت تأثیر قرار می‌دهد و الیاف کم‌تری در محل بارگذاری در غیاب اصطکاک شکسته می‌شود. اصطکاک موجب تماس الیاف بافته شده در اطراف محل بارگذاری با یکدیگر و در نتیجه استحکام ساختار می‌شود و انرژی جذبی را افزایش می‌دهد. نخ‌ها در ابتدا به صورت انفرادی کشیده می‌شوند تا زمانی که بار به مقدار نهایی‌اش برسد؛ نخ شروع به حرکت عرضی می‌کند و زمانی که نخ از طریق بخش بافته شده عبور می‌کند، نیروی کششی در طول یک نیروی کششی ثابت نوسان می‌کند و جابه‌جایی در این مرحله به انتهای نخ منتقل می‌شود. در نهایت نیروی کششی به سمت صفر حرکت می‌کند.

در شکل ۷ الف مرتبط با نمونه الیاف خام، نفوذگر به راحتی در یک جابه‌جایی کم تاروپود الیاف را کنار زده و از میان آن عبور می‌کند. در پارچه‌ی خام چون تاروپود پارچه آزادانه حرکت می‌کنند و اصطکاک کمی بین تاروپود پارچه وجود دارد، الیاف به راحتی بر هم می‌لغزند و نفوذگر به راحتی در بین تاروپود الیاف نفوذ می‌کند و نخ‌ها و الیاف به راحتی از داخل پارچه کاملاً کشیده و پاره شده‌اند.<sup>[۱۷]</sup> در شکل ب، ج و د الیاف آغشته شده به سیال سخت‌شونده و سیال

#### منابع (References)

1. Lee, B.W. and Kim, C.G. "Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts", *Advanced Composite Materials*, 21(2), pp. 177-192 (April 2012).

#### پانویس

1. shear thickening fluid

2. Kalman, D.P., Schein, J.B. and Houghton, J.M. "Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective application", In: *Proceedings of SAMPE*, Baltimore, MD, pp. 35-38 (3-7 June 2007).
3. Egres, R.G., Jr., Lee, Y.S., Kirkwood, J.E., Kirkwood, K.M., Wetzel, E.D. and Wagner, N.J. "Liquid armor": Protective fabrics utilizing shear thickening fluids", in *Proceedings of the 4th International Conference on Safety and Protective Fabrics*, Pittsburgh, PA (26-27 October 2004).
4. Decker, M., Halbach, C., Nam, C., Wagner, N. and Wetzel, E. "Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics", *Composites Science and Technology*, **67**(3-4), pp. 565-578 (2007).
5. Lee, B.W., Kim, I.J. and Kim, C.G. "The influence of the particle size of silica on the ballistic performance of fabrics impregnated with silica colloidal suspension", *Journal of Composite Materials*, **43**, pp. 2679-2698 (2009).
6. Kalman, D.P., Merrill, R.L., Wagner, N.J. and Wetzel, E.D. "Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle-fluid suspensions", *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, pp. 2602-2612 (2009).
7. Hassan, T.A., Rangari, V.K. and Jeelani, S. "Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites", *Materials Science and Engineering: A*, **527**(12), pp. 2892-2899 (2010).
8. Yu, K., Cao, H., Qian, K., Jiang, L. and Li, H. "Synthesis and stab resistance of shear thickening fluid (STF) impregnated glass fabric composites", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, **95**(6), pp. 126-128 (2012).
9. Baharvandi, H.R., Khaksari, P., Kordani, N. and Alebouyeh, M. "Analyzing the quasi-static puncture resistance performance of shear thickening fluid enhanced P-aramid composite", *Fibers and Polymers*, **15**(10), pp. 2193-2200 (2014).
10. Feng, X., Li, S., Wang, Y., Wang, Y. and Liu, J. "Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids", *Materials & Design*, **64**, pp. 456-461 (2014).
11. Egres, R.G. and Wagner, N.J. "The rheology and rheo-SANS microstructure analysis of shear thickening acicular precipitated calcium carbonate dispersions", in *Proceedings of the XIVth International Congress on Rheology*, Seoul, South Korea (22-27 August 2004).
12. Srivastava, A., Majumdar, A. and Butola, B.S. "Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: A review", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **37**(2), pp. 115-119 (2012).
13. Clements, F.E. and Mahfuz, H. "Enhancing the stab resistance of flexible body armor using functionalized SiO<sub>2</sub> nanoparticles", *16TH International Conference on Composite Materials* (2008).
14. Duan, Y., Keefe, M. and Bogetti, T.A. "Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric", *International Journal of Impact Engineering*, **31**(8), pp. 996-1012 (2005).
15. Woo, K., Jang, D., Kim, Y. and Moon, J. "Relationship between printability and rheological behavior of ink-jet conductive inks", *Department of Materials Science and Engineering, Ceramics International*, **39**(6), pp. 7015-7021 (2013).
16. Wu, Q.M., Ruan, J.M., Huang, B.Y., Zhou, Z.C. and Zou, J.P. "Viscoelastic properties of monodisperse spherical silica suspension", *Journal of Central South University of Technology*, **14**(6), pp. 737-741 (2007).
17. Rao, H., Hosur, M.V., Mayo, J., Burton, S. and Jeelani, S. "Stab characterization of hybrid ballistic fabrics", In: *Proceedings of the SEM Annual Conference*, Albuquerque, New Mexico, 11 p. (1-4 June 2009).