مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۳ - ۳۳، شماره‌ی ۱، ص. ۴۹-۵۳

Original Article

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 ونینی (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
ناصر کردانی* (استادیار)
گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران
قدرت‌الله اسکافی (کارشناس)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

در این نوشتار الیاف شیشه تقویت‌شده با سیال سخت‌شونده‌ی برشی، و سخت‌شونده‌ی برشی به‌همراه نانوذرات خاک‌رس تحت آزمون شبه‌استاتیکی بررسی شده است. یکی از مزیت‌های سیال ضخیم‌شونده‌ی برشی غلظت بالای آن است. برای تهیه‌ی سیال سخت‌شونده‌ی پلی‌اتیلن گلیکول به‌صورت سیال پایه و نانوذرات سیلیکا به آرامی به سیال اضافه می‌شود. آزمون شبه‌استاتیکی برای هرسه حالت پارچه شیشه خشک ـ سیال سخت‌شونده‌ی برشی و پارچه شیشه ـ سیال سخت‌شونده‌ی برشی ـ 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 به‌وضوح نشان‌گر افزایش قابل توجه مقاومت نفوذی پارچه‌های شیشه‌یی آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی به‌همراه نانو ذرات خاک‌رس است.

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

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

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 بافته‌شده با مدول و سختی بالا به‌طورگسترده در برابر ضربه مقاوم‌اند. با این حال، بدون تقویت و پوشش کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیقات حاضر، استفاده از پارچه‌های بافته شده به‌وسیله‌ی یک تقویت‌کننده کاربرد بسیار زیادی دارد.[۱] تمامی تحقیقات مربوطه نشان می‌دهد که یکی از راه‌های بهبود مقاومت در برابر نفوذ، افزایش اصطکاک بین تارو پود پارچه‌های بافته‌شده است. با اشباع پارچه به‌وسیله‌ی سیال سخت‌شونده‌ی برشی افزایش مقاومت در برابر نفوذ قابل توجه خواهد بود.[۲] محققین نشان داده‌اند که حضور سیال سخت‌شونده‌ی برشی در پارچه، مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهد.[۳و۴] تعداد لایه‌های پارچه‌ی آغشته‌شده 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 روی‌هم و جلوگیری از حرکت نسبی ضربه‌زننده در لایه‌ها باشد. در سال ۲۰۰۹ نقش سختی ذرات بر رفتار نفوذی پارچه‌های آرامید مورد بررسی قرار گرفت[۵و۶] 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.[۷] پارچه‌های آغشته به سیال متحمل نیروی بالاتر از ۳۵۰ نیوتنی ضربه‌ی چاقو می‌شوند، درحالی که پارچه‌ی غیرآغشته نیروی ۲۸۶ نیوتن را دفع می‌کند. در سال ۲۰۱۲، محققین پارچه‌های شیشه‌یی را در حلال اتانول ـ سیال ضخیم‌شونده‌ی برشی به نسبت ۱:۳ خیس و آغشته کردند.[۸] آزمون‌های شبه‌استاتیکی مقاومت در هر دو حالت پارچه‌های شیشه‌یی و کامپوزیت پارچه‌یی شیشه ـ سیال سخت‌شونده نشان

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۸/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۸، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۲۶.

داده که پارچه‌ی آغشته به سیال سخت‌شونده کارایی بهتری در مقابل نفوذ دارد. در سال ۲۰۱۴ نیز آزمون شبه‌استاتیکی روی پارچه‌ی آرامید آغشته شده به سیال STF در وزن مولکولی متفاوت مایع مورد بررسی قرار گرفت.[۹] نتایج حاصل از رئولوژی نشان داد که با افزایش کسر مولکولی پلیمر، گرانروی (ویسکوزیته) افزایش و نرخ کرنش بحرانی کاهش می‌یابد. همچنین آزمون شبه‌استاتیکی نشان‌گر افزایش ۴٫۵ برابری الیاف آغشته شده به STF (۳۵٪ نانوسیلیکا) نسبت به الیاف خام است. بررسی اثر ذرات سیلیکای متفاوت روی پارچه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی تحت مقاومت شبه‌استاتیکی[۱۰] نشان داد که پارچه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی با ذرات سیلیکای زیرمیکرونی مقاومت شبه‌استاتیکی بهتری نسبت به پارچه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی با ذرات سیلیکای فیومد دارند.

سیالات نیوتنی با افزایش نرخ برش گرانروی ثابت دارند. برای افزایش مقاومت زره‌ها از سیال سخت‌شونده‌ی برش[۱] استفاده می‌شود. سیال سخت‌شونده‌ی برشی یک سیال غیرنیوتنی 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 سخت‌شونده ناپیوستگی رخ می‌دهد. این ناپیوستگی در زمان کوتاهی نیروی اعمال‌شده را جذب می‌کند.[۹] این ویژگی سیال سخت‌شونده باعث تغییر حالت شبه مایع به حالت شبه‌جامد می‌شود. نظریه‌ی اختلال در نظم و نظریه‌ی تغییر شکل هیروکلاستر بیان‌گر این پدیده‌ی سخت‌شدن برشی است. افزایش نرخ برش، ذرات معلق ساختارهای لایه‌یی را تشکیل می‌دهد به طوری که ذرات بر یکدیگر می‌لغزند و نیروهایی به وجود می‌آورند که باعث ناپایداری جریان می‌شود. این ناپایداری جریان توسط واکنش نیروهایی همچون واندروالس، در لایه‌ها و برگروهی از ذرات ایجاد می‌شود. همچنین ذرات در لایه‌های محرک به‌وسیله‌ی این نیروها از لایه‌های نامنظم بیرون کشیده می‌شوند. لایه‌ها می‌توانند ضخامتی در محدوده‌ی یک قطر ذرات تا چند برابر قطر متوسط ذرات داشته باشند و باعث ناپایداری جریان شوند و درنتیجه در جریان منظم اختلال ایجاد شود؛ این پدیده را «اختلال نظم» می‌نامند. با افزایش بیشتر نرخ برش، تنش برشی از یک مقدار بحرانی عبور می‌کند و ذرات در لایه‌های منظم‌شان قرار می‌گیرند و با تشکیل تجمعات متراکم شده‌ی نانو به یکدیگر فشرده می‌شوند. با تشکیل این تجمعات و تولید جریان القایی انرژی بیشتری تلف می‌کنند و ذرات از طریق خوشه‌ها یا تماس‌های فیزیکی فعل و انفعالاتی انجام می‌دهند و بر اثر نیروهای لغزشی و نیروهای اصطکاکی در فرایند سخت‌شدن برشی ذرات با یکدیگر درگیر می‌شوند و باعث پایداری کلوئیدی، و افزایش گرانروی می‌شوند که این انتقال با افزایش سریع گرانروی در نرخ برشی بحرانی ظاهر می‌شود؛ این پدیده را «تغییرشکل هیدروکلاستر» می‌نامند و این تعادل هیدرودینامیکی، بی‌ثباتی و نیروهای دافعه‌ی بین ذرات را سرکوب می‌کند. بنابراین سخت‌شدن برشی به درهم ریختن لایه‌های منظم وابسته نیست، بلکه به تولید تجمعات ذرات برمی‌گردد.[۱۱و۱۲]

سیال سخت‌شونده‌ی برشی از اختلاط ذرات سخت جامد (نانوذرات سیلیکا) در یک سیال حامل (پلی‌اتیلن گلیکول) به وجود می‌آید. پلی‌اتیلن گلیکول شامل پیوندهای هیدروکسیدی است که با نانوذرات سیلیکا پیوند هیدروژنی تشکیل می‌دهد.[۱۳] اصطکاک بین نخ‌ها، تاروپود پارچه و نفوذکننده اثر بسیار زیادی در برابر سوراخ شدن پارچه دارد. در طول فرایند نفوذ اصطکاک به‌وجود آمده بین تاروپود الیاف باعث عدم لغزش تارو پود می‌شود. افزایش کارایی در کامپوزیت‌های الیاف ـ سیال سخت‌شونده‌ی برشی به دلیل افزایش اصطکاک مشاهده می‌شود.[۱۴]

دراین تحقیق، اثرکسرحجمی نانوذارت خاک‌رس بر ویژگی‌های رئولوژیکی سیال سخت‌شونده‌ی برشی و سیال سخت‌شونده‌ی برشی به همراه نانوذرات خاک‌رس مانند گرانروی و نرخ برش بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر کسر حجمی نانوذرات خاک‌رس و نیروی جذب شده توسط کامپوزیت شیشه ـ سیال سخت‌شونده و کامپوزیت‌های سیال سخت‌شونده به‌همراه نانوذرات خاک‌رس به‌وسیله‌ی ضربه‌زننده‌ی استوانه‌یی سرکروی در آزمون شبه‌استاتیکی بررسی شده است.

۲. مواد و روش آزمایش‌ها

۱.۲. مواد مورد استفاده

پلی‌اتیلن‌گلیکول با جرم مولکولی ۲۰۰ گرم بر مول (مرک ـ آلمان) به‌عنوان فاز پیوسته (سیال حامل) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، نانوذرات سیلیکا ۱۲ نانومتری و نانوذرات خاک‌رس به‌عنوان ذرات پراکنده در محیط پلیمری (پلی‌اتیلن گلیکول ۲۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. پارچه‌ی مورد استفاده در این نوشتار الیاف شیشه نوع E است. از جمله خواص این الیاف می‌توان به استحکام کششی و فشاری و سفتی خوب و قیمت نسبتاً ارزان آن اشاره کرد.

۲.۲. تهیه‌ی سیال سخت‌شونده‌ی برشی و سیال سخت‌شونده‌ی برشی به‌همراه نانوذرات خاک‌رس

برای ساخت سیال سخت‌شونده‌ی برشی، ابتدا پلیمر را در داخل ظرف ریخته و نانوذرات سیلیکا را به‌آرامی به پلیمر در حال دوران اضافه می‌کنند. پس از افزودن مقدار کمی از نانوذرات به پلیمر با استفاده از هم‌زن مکانیکی، نیروی لازم برای اختلاط مواد به وجود خواهد آمد (شکل ۱الف). در هر بار، حدود ۱ گرم نانو به پلیمر اضافه می‌شود و این روند اختلاط ادامه می‌یابد. با افزایش دور هم‌زن، جریان‌های گردابی و آشفته‌یی شکل می‌گیرد که باعث تلاطم و اختلاط کامل سیال می‌شود. در سرعت پایین، پودرها از یکدیگر باز می‌شوند، تا حدودی خیس می‌خورند و با سیال مخلوط می‌شوند و در دورهای بالا همگن می‌شوند و یک سوسپانسیون پایدار و شفاف حاصل می‌شود (شکل ۱ب).

بعد از ساخت سیال سخت‌شونده‌ی برشی با ۳۰٪ جرمی نانوذرات سیلیکا برای به وجود آوردن سیال هیبریدی از نانوذرات خاک‌رس استفاده شده است؛ در آزمایش‌ها، سیال بدون نانو خاک‌رس و با نانو خاک‌رس مقایسه می‌شود. برای مخلوط کردن ذرات نانو خاک‌رس در هر مرحله حدود ۰٫۵ درصد وزنی سیال سخت‌شونده‌ی برشی ساخته شده نانوذرات خاک‌رس به محلول اضافه می‌شود. سیال سخت‌شونده 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 می‌یابد تا سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آید. با سرعت بالای

الف) هم زن مکانیکی ؛ ب) سوسپانسیون شفاف و پایدار.

شکل ۱. ساخت سیال سخت شونده برشی.

شکل ۲. سیال سخت‌شونده با حضور نانوذرات خاک‌رس.

۱۶۰۰ دور بر دقیقه عملیات مخلوط کردن در حدود ۳۰ دقیقه انجام شده است تا اختلاط کاملی بین نانوذرات خاک‌رس و سیال مورد نظر انجام شود (شکل ۲). نمونه‌های سیال هیبریدی به‌مدت یک روز در آزمایشگاه قرار داده شد تا حباب‌های درون سیال خارج شوند.

۳.۲. آماده‌سازی کامپوزیت سیال سخت‌شونده ـ 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 ۹۹٪ رقیق‌سازی شده است. سپس هر لایه پارچه شیشه به ابعاد ۱۶ × ۱۶ سانتی‌متر مربع مدت ۲ دقیقه در محلول اتانول ـ سیال قرار داده شده تا به‌خوبی سیال در میان تاروپود پخش شود. نمونه‌ی آغشته شده به سیال هیبریدی روی یک صفحه‌ی صاف قرارگرفته و به‌کمک غلطک (حرکت رفت و برگشتی روی نمونه‌ها) سیال اضافی از نمونه‌ها خارج شد. اتانول موجود در پارچه‌های آغشته‌شده باید تبخیر شود. بدین منظور نمونه‌ها مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره قرار داده شد. نمونه‌ها بعد از ساخت به‌مدت 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 MCR۳۰۰ ساخت شرکت استرالیا؛ و این آزمایش به‌منظور بررسی رفتار نمونه‌ها در یک فرکانس ثابت و نرخ کرنش‌های مختلف انجام می‌شود. هر نمونه در فرکانس ثابت ۱۰ rad/s و با توجه به غلظت سیال سخت‌شونده‌ی برشی، تحت روبش کرنشی از ۰٫۱ تا ۱۰۰۰ 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 ۳. قاب نگه‌دارنده‌ی نمونه‌ها و شکل نفوذکننده‌ی کروی.

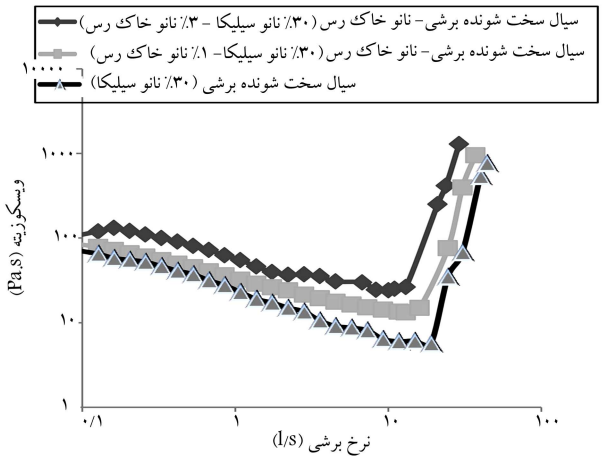
متمرکز بر سطح پارچه‌یی با ابعاد ۱۶ × ۱۶ سانتی‌متر مربع، از نفوذگر فولادی به‌قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شده است. پارچه‌ها به‌صورت خام و تقویت‌شده با درصدهای مختلفی از نانوذرات، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بدین‌منظور پارچه‌ها را به‌صورت مربعی، بین دو قاب فولادی دارای طول ۳۰۰ میلی‌متر و عرض ۲۰۰ میلی‌متر قرار می‌دهند. طول ضلع مربع داخلی صفحه‌ی فلزی برابر با ۱۰۰ میلی‌متر است (شکل ۳). این دوصفحه به‌وسیله‌ی 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 به‌هنگام 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 نازک‌شدن برشی و ضخیم‌شوندگی برشی مشاهده می‌شود. نازک شدن برشی در نرخ‌های سرعت پایین و ضخیم‌شوندگی در نرخ‌های سرعت بالا اتفاق می‌افتد. رفتار رئولوژی، نرخ کرنش برحسب گرانروی برای سیال‌های سخت‌شونده با ۳۰٪ Sio_2 و ۳٪clay + ۳۰٪ Sio_2+۱٪clay, ۳۰٪ Sio_2، ارائه شده است. براساس این نتایج، در نمونه سیال سخت‌شونده‌ی برشی ۳۰٪، در نرخ کرنش پایین شاهد کاهش آرام گرانروی (نازک‌شدن برشی) هستیم، اما هنگامی که نرخ برش به $19\ s^{-1}$ و گرانروی به ۵٫۷ Pa-s می‌رسد (نرخ برش بحرانی) شاهد افزایش ناگهانی گرانروی هستیم. نمونه سیال سخت‌شونده ۱-۳۰٪ نانوخاک‌رس با افزایش نرخ کرنش گرانروی در حال کاهش است. در نرخ برش بحرانی ($13\ s^{-1}$) گرانروی از ۱۳٫۲ تا ۹۵۰ Pa-s با شیب بیشتری شروع به افزایش می‌کند. نمونه‌ی سیال سخت‌شونده ۳-۳۰٪ نانوخاک‌رس با افزایش نرخ کرنش گرانروی در حال کاهش است، در نرخ برش بحرانی ($10\ s^{-1}$) گرانروی از ۲۴ تا ۱۱۲۰ Pa-s با شیب بیشتری شروع به افزایش می‌کند (شکل ۴).

نازک‌شدن برشی به‌عنوان افت ناگهانی گرانروی مشاهده می‌شود. این رفتار زمانی به وجود می‌آید که هیدروکلاسترهای قرارگرفته در لایه‌های منظم سوسپانسیون شکسته می‌شوند و باعث کاهش گرانروی می‌شوند. افت گرانروی در سیال سخت‌شونده با کسر حجمی کم‌تر، بیشتر است.[۱۵] با افزایش کسر حجمی ذرات جامد، پیوندهای



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

جدول ۱. نمونه‌های آماده برای آزمون شبه‌استاتیکی.

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

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 به‌وسیله‌ی ذرات به‌آسانی 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]

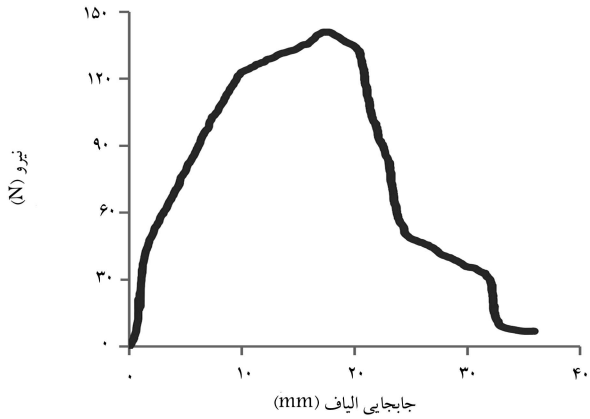
۲.۳. نتایج آزمون شبه‌استاتیکی

آزمون شبه‌استاتیکی به‌وسیله‌ی یک نفوذگر استوانه‌یی سرکروی به‌صورت نیروی کنترل شده روی نمونه‌ها، که در بین دو صفحه‌ی فولادی قرار داده شده و به‌وسیله‌ی گیره‌ها مهار شده‌اند، انجام شده است. برای انجام آزمون شبه‌استاتیکی نمونه‌ها طبق جدول ۱ آماده شده است.

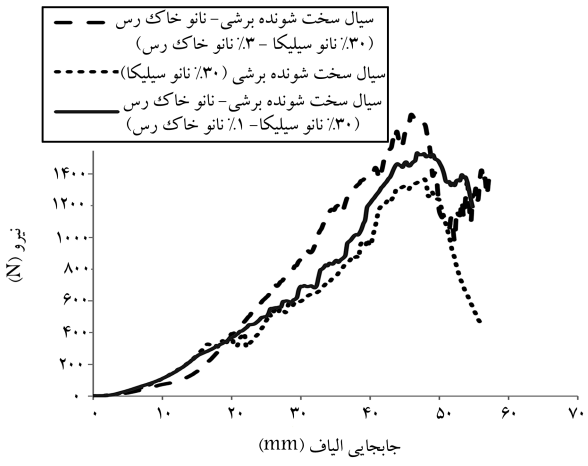
پیک نمودار بار ـ جابه‌جایی در نمونه‌های آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی (نانوذرات سیلیکا ـ نانوخاک‌رس) افزایش می‌یابد. سیال سخت‌شونده همراه با نانوخاک‌رس آغشته به پارچه شیشه کارایی بیشتری در مقابل نفوذگر دارد. درحالی که نفوذگر در پارچه شیشه‌ی خشک در جابه‌جایی کوچک و بار نفوذ کم‌تر نفوذ می‌کنند. بنابراین در برابر ضربه‌زننده مقاومت نفوذ کمی دارد.

نمودار نیرو ـ جابه‌جایی برای اهداف تحت بار شبه‌استاتیکی با سرعت mm/min ۳۰۰ (معادل mm/s ۵) در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. براین اساس بیشینه نیرو در نمودار بار ـ جابه‌جایی برای اهداف آغشته‌شده بالاتر از اهداف آغشته‌نشده است. در شکل ۵ نمودار نیرو ـ 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



شکل ۵. نمودار نیرو ـ جابه‌جایی برای الیاف خام.

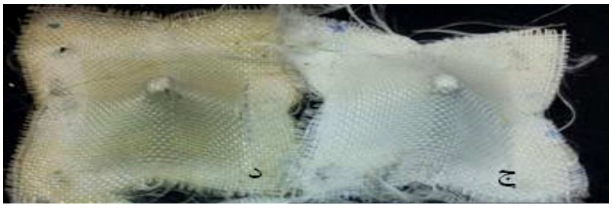


شکل ۶. نمودار نیرو ـ جابه‌جایی برای نمونه‌ها.

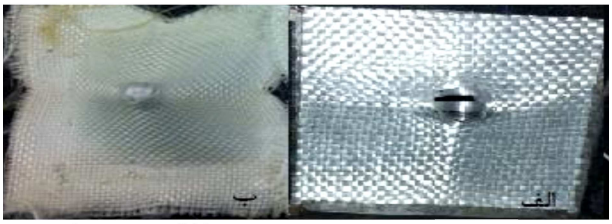
جدول ۲. عملکرد ضربه شبه‌استاتیکی به هدف برای سرعت نفوذ mm/min ۳۰۰.

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 + نانوخاک‌رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۱٪ نانوخاک‌رس)	۴۶٫۷	۱۵۲۰٫۶	۳۷
۴ لایه پارچه STF + نانوخاک‌رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک‌رس)	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 ـ جابه‌جایی، ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود الیاف خام نیروی ۱۴۱ نیوتن را تحمل می‌کند. نیروی الیاف آغشته شده به سیال سخت‌شونده‌ی برشی ـ نانوخاک‌رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک‌رس) 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 آغشته‌شده به سیال STF ـ نانوخاک‌رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و



ج) STF – نانو خاک رس (۳۰٪ نانو سیلیکا– ۱٪ نانو خاک رس)؛ د) نانو خاک رس (۳۰٪ نانو سیلیکا– ۳٪ نانو خاک رس).



الف) الیاف خام؛ ب) STF (۳۰٪ نانو سیلیکا)؛

شکل ۷. نمونه‌ها بعد از آزمون شبه‌استاتیکی.

۱٪ نانوخاک‌رس)، سیال STF (۳۰٪ نانوسیلیکا) و به‌ترتیب ۱۵۲۰٫۶، ۱۳۸۰٫۸ نیوتن است. مقدار انرژی به دست آمده از مساحت زیر نمودار بار ـ جابه‌جایی، در نمونه‌ی سیال سخت‌شونده ـ نانوخاک‌رس (۳۰٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانوخاک‌رس) 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 بارگزاری در غیاب اصطکاک شکسته می‌شود. اصطکاک موجب تماس الیاف بافته‌شده در اطراف محل بارگزاری با یکدیگر و درنتیجه 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 بافته‌شده 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 ۷الف مرتبط با نمونه الیاف خام، نفوذگر به‌راحتی 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 به‌راحتی بر هم می‌لغزند و نفوذگر به‌راحتی در بین تاروپود الیاف نفوذ می‌کند و نخ‌ها و الیاف به‌راحتی از داخل پارچه کاملاً کشیده و پاره شده‌اند.[۱۷]

در شکل ۷ب، ۷ج و ۷د الیاف آغشته شده به سیال سخت‌شونده و سیال سخت‌شونده به همراه نانوخاک‌رس نشان داده شده است. در هنگام ورود نفوذگر به پارچه، نیروی منعکس شده به‌وسیله‌ی پارچه بر نفوذکننده اعمال می‌شود. کرنش ایجاد شده در منطقه‌ی بارگزاری به لبه‌های پارچه انتقال داده می‌شود و کل پارچه در فرایند نفوذ دخالت می‌کند. سیال سخت‌شونده‌ی برشی باعث می‌شود بین اجزا پارچه اتصال برقرار شود و نیروی اعمال‌شده الیاف به الیاف، نخ به نخ و یا لایه‌یی 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 به‌صورت 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 بارگزاری 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 به‌طور طبیعی به اثرات جابه‌جایی نخ و تاروپود پارچه مرتبط است. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود هیچ شکستگی در نخ دیده نمی‌شود؛ به‌عبارت دیگر، با افزایش نانوذرات خاک‌رس در سیال، ساختار نخ‌ها و الیاف در منطقه‌ی اعمال بار به‌خوبی با هم درگیر می‌شوند و این باعث می‌شود که نخ‌های کم‌تری از پارچه بیرون کشیده شود، و درنتیجه انرژی بیشتری جذب می‌شود.[۹]

۴. نتیجه‌گیری

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

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

پانوشت

1. shear thickening fluid

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).

2. Kalman, D.P., Schein, J.B. and Houghton, J.M. "Polymern 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_2 nanoparticles", *16TH International Conferenceon 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).