

## اثر سیال غلیظ شونده برشی بر ضریب اصطکاک پوشش های ضد ضربه ساخته شده از کولار KM22

حسین امیری<sup>۱</sup>، ناصر کردانی<sup>۲\*</sup>، یاسر رستمیان<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ۲- استادیار، دانشگاه مازندران ۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری  
(دریافت: ۹۶/۰۱/۳۰، پذیرش: ۹۶/۰۶/۰۶)

### چکیده

در این تحقیق از روش بیرون کشی الیاف به عنوان ارزیابی خصوصیات مکانیکی پارچه استفاده شده است که با تکیه بر نقش الیاف به عنوان اجزای سازنده پارچه، جهت شناسایی برهم کنش های داخلی آن ها به کار برده شده است. یکی از فرضیات مهم در تحقیق عملی پیش رو، در نظر گرفتن پارچه به صورت کامپوزیتی از نخ های تشکیل دهنده آن است. در این پژوهش پارچه ها در دو نوع خام و آغشته به سیال غلیظ شونده برشی استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر سیال غلیظ شونده برشی بر ضریب اصطکاک، آزمایش بیرون کشی الیاف در سرعت های متفاوت ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه و با کشش عرضی ثابت صورت گرفته است. نتایج نشان داد که حضور سیال غلیظ شونده برشی سبب افزایش چشمگیر اصطکاک بین الیاف و تارو بود پارچه می شود، بنابراین الیاف به طور مؤثری با هم درگیر شده و امکان تحرک و جابه جایی از آن ها گرفته می شود. بنابراین انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف افزایش می یابد.

**کلیدواژه ها:** بیرون کشی الیاف، ضریب اصطکاک، سیال غلیظ شونده برشی، کولار خام و آغشته شده، سازه های کامپوزیتی

## The Effect of Shear Thickening Fluid on Coefficient of Friction in Anti Impact Coating Formed from Kevlar KM 22

H. Amiri, N. Kordani\*, Y. Rostamiyan

Department of Mechanical Engineering, Mazandaran University

(Received: 19/04/2017; Accepted: 28/08/2017)

### Abstract

*In this research yarn put-out has been used to evaluate mechanical features of fabric that is based on yarn role as a component to produce fabric for identifying its internal reactions. An important hypothesis in this research is defining fabric as a composite of its threads. In this research fabrics in two kinds such as raw and impregnated by Shear Thickening Fluid has been provided. In order to test the effect of velocity on put out force, this examination has been done in three different velocities such as 50, 250 and 500 mm/s with stable width pull. The Shear Thickening Fluid caused an amazing friction between yarns and texture of fabric, and makes yarns to be effectively involved with each other, therefore, it prevents and movement. Moreover there is a higher necessity of force to pull-out yarns.*

**Keywords:** Yarn Pull-Out, Coefficient of Friction, Shear Thickening Fluid, Impregnated and Pure Kevlar, Composite Constrictions

\*Corresponding Author E-mail: Naser.kordani@gmail.com

## ۱. مقدمه

استفاده از یک آزمون بیرون کشیدن نخ جدید به دست آورد و همچنین با استفاده از یک مدل رگرسیون، رفتار بیرون کشیدن الیاف پارآرامید را تحلیل کرد.

سریواستاوا و همکاران [۷]، بهبود عملکرد در برابر ضربه الیاف کولار با کمک سیال غلیظ شونده برشی سیلیکونی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اصطکاک نخ با نخ که از طریق نیروی بیرون کشیدن نخ شبه استاتیک اندازه‌گیری می‌شود، فقط تا حدودی بر عملکرد در برابر ضربه الیاف بافته‌شده کولار آغشته به STF اثر می‌گذارد. ماجومدار و همکاران [۸]، مدل‌های تغییر شکل و جذب انرژی الیاف کولار آغشته به سیال غلیظ شونده برشی را به عنوان مواد پوشش ضد ضربه نرم بدن تحلیل کردند. آن‌ها دریافتند که در الیاف کولار خام، تنها نخ‌های اولیه که با ضربه زننده در ارتباط هستند، در به اشتراک‌گذاری بار و در نتیجه جذب انرژی نقش دارند. نیلاکانتان و گلیسیپی [۹]، رفتار بیرون کشیدن نخ الیاف کولار بافته‌شده ساده و اثر اندازه نخ، نرخ خروج نخ و تنش قبلی الیاف را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تنوع در نیروهای بیرون‌کشی معمولاً برای نیروهای بیرون‌کشی پویا بالاتر از نیروهای ایستا است. نیلاکانتان و همکاران [۱۰]، بررسی تجربی اثر بیرون کشیدن و تماس نخ اصطکاکی بر پاسخ ضربه‌ای احتمالی الیاف کولار را انجام دادند نتایج نشان داد که لغزش و بیرون کشیدن نخ اصطکاکی سازوکارهای اصلی اتلاف انرژی در زمان ضربه هستند. فنگ و همکاران [۱۱]، اثر ذرات سیلیکونی مختلف را بر مقاومت ضربه شبه استاتیک سنجیدند. آن‌ها دریافتند که کدام نوع از ذرات سیلیکونی مقاومت به ضربه الیاف آغشته با سیالات غلیظ شونده برشی را بیشتر افزایش می‌دهند.

در تحقیق عملی پیش رو ارتباط بین خواص پارچه و رفتار بیرون‌کشی الیاف و مقایسه اصطکاک بین الیاف در پارچه‌ها ارزیابی شده است. در این تحقیق پارچه‌ها در دو نوع خام و آغشته به سیال غلیظ شونده برشی (STF)<sup>۲</sup> آماده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای انجام این آزمایش، از STF با ترکیب ۳۰ درصد نانوذرات سیلیکا در مایع پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) جهت آغشته‌سازی در نمونه‌ها استفاده شده است.

نمونه‌ها به صورت خام و آغشته به سیال غلیظ شونده برشی مورد آزمایش قرار گرفتند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی اثر سیال غلیظ شونده برشی، آزمون بیرون کشیدن در سه سرعت ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مقادیر شبه استاتیک و دینامیک ضریب اصطکاک به صورت جداگانه ارائه

رفتار فرآیند بیرون کشی الیاف<sup>۱</sup> در پارچه‌های بافته‌شده، شاخص مهمی از سازوکار تداخل الیاف در پارچه بوده و پیش‌بینی کننده خواص مکانیکی آن است. آزمایش بیرون‌کشی الیاف، روشی است که اطلاعات مفیدی را در خصوص پاره شدن پارچه‌ها، توانایی جذب انرژی آن‌ها به ویژه در کاربردهای بالستیک، راندمان تکمیل، هسترزیس خمشی و برشی و در نهایت رفتار اصطکاکی پارچه فراهم می‌کند. در این آزمایش، نیرو به انتهای یک سر نخ بافته شده وارد می‌شود تا آن را بیرون کشد. این نوع بارگذاری شیوه جدیدی نیست و دانشمندان زیادی از این روش جهت ارزیابی رفتار مکانیکی پارچه‌ها استفاده کرده‌اند.

پان و یون [۱]، رفتار بیرون کشیدن نخ از پارچه بافته‌شده را به دو طریق نظری و تجربی بررسی کردند. آن‌ها رفتار بیرون کشیدن نخ از الیاف بافته را شاخص مهمی از سازوکار تعاملات نخ درون الیاف دانسته و آن را پیش‌بینی کننده خواص مکانیکی مختلف در نظر گرفتند. کرکود و همکاران [۲]، اثر طول الیاف، تعداد نخ کشیده شده، آرایش نخ‌ها و تنش عرضی بر روی منحنی جابه‌جایی نیرو در آزمون بیرون کشیدن نخ بر روی الیاف کولار KM-2 را در شرایط آزمایشگاهی سنجیدند. آن‌ها مدلی نیمه تجربی برای پیش‌بینی نیرو و انرژی بیرون کشیدن نخ معرفی کردند که تابعی از فاصله بیرون کشیدن است. فاصله بیرون کشیدن شامل باز شدن نخ و تغییر شکل نخ است. دوان و همکاران [۳]، تحلیل المان محدود را برای مدل‌سازی اثر اصطکاک بر رفتار تأثیر بالستیک الیاف تک لایه با مقاومت بالا به‌کار برده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در زمان مشخص، الیاف با اصطکاک بالا انرژی بیشتری نسبت به الیاف بدون اصطکاک جذب می‌کند. آن‌ها دریافتند اصطکاک اثری غیرمستقیم بر جذب انرژی الیاف دارد و این اثر را از طریق اثرگذاری بر تعداد نخ‌های درگیر انجام می‌دهد. دونگ و سان [۴]، پژوهشی بر روی آزمون بیرون کشیدن و مدل‌سازی الیاف کولار بافته ساده انجام دادند. آن‌ها مدل المان محدود دو بعدی را پیشنهاد دادند که فرآیند بیرون کشیدن یک نخ را شبیه‌سازی کرده و نیروی بیرون کشیدن بیشینه را پیش‌بینی می‌کند. ژو و همکاران [۵]، مدل تحلیلی را استفاده کردند تا خواص اصطکاکی بین تار و پود نخ‌ها را بررسی کنند. آن‌ها حداکثر مقاومت اصطکاکی برشی ایستا و دینامیکی نخ‌ها را به دست آوردند.

بیلیسیک [۶]، رفتار اصطکاکی الیاف بافته‌شده پارآرامید (تک لایه) را تحت شرایط بیرون کشیدن نخ تک و چند تایی با

<sup>۲</sup>Shear Thickening Fluid (STF)<sup>۱</sup>Yarn Pull-Out

STFها با حل کردن ذرات سیلیکونی آب دوست تجاری (۱۴-۱۱) نانومتر) با درصد جرمی در حدود ۳۰ درصد در پلی اتیلن گلیکول ۲۰۰ به دست می‌آید.

جهت آغشته کردن الیاف بافته شده به سیال STF، سیال می‌بایست رقیق گردد، بدین منظور از اتانول ۹۹٪ استفاده می‌شود. نوعی از پارچه کولار با ضخامت نخ  $1000\text{ }\mu\text{m}$  و چگالی ناحیه‌ای  $0.02$  گرم بر سانتی‌متر مربع مورد استفاده قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوذرات سیلیکونی در شکل (۲) نشان داده شده است.

به منظور سنتز سیال غلیظ شونده برشی، پلیمر و نانوذرات به آرامی با هم مخلوط می‌شوند. پس از اضافه کردن مقدار کمی از نانوذرات به پلیمر، با استفاده از همزن مکانیکی، نیروی مورد نیاز برای مخلوط کردن مواد ایجاد می‌شود. برای ترکیب بهتر نانوذرات در پلیمر از همزنی استفاده می‌گردد که تیغه‌های متعددی داشته باشد. هر تیغه جریان‌ی مجزا با سرعتی متفاوت در سیال ایجاد می‌کند. این مرحله تا زمان پراکنده شدن کامل نانوذرات در پلیمر ادامه می‌یابد. نانوذرات با استفاده از یک همزن مافوق صوت<sup>۴</sup> کاملاً در پلیمر توزیع می‌شوند.

در این مطالعه، از یک دستگاه مافوق صوت مناسب (UP200) به منظور پراکنده کردن کامل نانوذرات در پلیمر استفاده شده است. این فعالیت تا زمانی ادامه خواهد یافت تا سوسپانسیونی همگن و پایدار به دست آید.

#### ۲-۱. آغشته‌سازی الیاف بافته شده

جهت ساخت کامپوزیت‌های نانو سیال و الیاف، ابتدا STF به نسبت ۳:۱ در اتانول (نسبت حجم اتانول به STF) رقیق می‌شود. الیاف تک لایه کولار KM22 که هر کدام به ابعاد  $25 \times 25$  سانتی-متر مربع هستند، به مدت یک دقیقه با محلول آغشته شده و سپس فشرده می‌شوند تا مایع‌های اضافی از آن‌ها خارج شوند. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دمای  $60^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس قرار داده تا اتانول حذف و کامپوزیت کولار-STF ایجاد شود.

از دستگاه SEM استفاده شده است تا چگونگی پراکندگی STF در میان الیاف مشخص گردد. ابتدا نمونه‌ها با کمک دستگاه اسپاترکوتر با روکش طلای ۳۰ نانومتری پوشش داده می‌شوند و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصویربرداری انجام می‌شود.

شده است. با استفاده از تحلیل DOE<sup>۱</sup> و تعیین ضریب اصطکاک به عنوان متغیر وابسته و سرعت و نوع نمونه به عنوان متغیر مستقل، عوامل مؤثر بر ضریب اصطکاک به دست آمد.

این مقاله، مطالعه تجربی بیرون کشیدن الیاف و محاسبه ضریب اصطکاک است. نمونه‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: خام و الیاف آغشته شده به STF. علاوه بر این، به منظور ارزیابی ضریب اصطکاک، آزمون بیرون کشیدن در سه سرعت ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌گردد. مقادیر شبه استاتیک و دینامیک ضریب اصطکاک به صورت جداگانه ارائه شده است. با استفاده از تحلیل DOE و تعیین ضریب اصطکاک به عنوان متغیر وابسته و سرعت و نوع نمونه به عنوان متغیر مستقل، عوامل مؤثر بر ضریب اصطکاک به دست می‌آید. همان طور که نتایج نشان می‌دهند، با افزایش سرعت بیرون کشی، نیروی بیرون کشیدن نمونه‌های تمیز افزایش می‌یابد. در مقابل، در نمونه آغشته شده به STF، نیروی بیرون کشیدن کاهش می‌یابد. این مسئله با ناحیه نازک شونده برشی منحنی در شکل (۸)، نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر بیرون کشیدن الیاف، مشاهده شده است که نمونه‌های آغشته شده به STF بالاترین مقدار را داشته و ارزش مقدار آن‌ها سه برابر نمونه‌های تمیز است.

#### ۲. روش تحقیق

برای انجام آزمایش‌های لازم، نیاز به ساخت نمونه و تجهیزات خاص است که به شرح زیر ارائه می‌شود:

- نانوذرات سیلیس کلئیدی (اندازه دانه ۱۴-۱۱ نانومتر).
- مایع پلی اتیلن گلیکول ۲۰۰ (PEG)، ساخت شرکت مرک آلمان.
- پارچه کولار KM22، ۲۰۰ گرمی، بافت PLAIN.
- اتانول ۹۹٪، ساخت شرکت بیدستان.
- دستگاه همزن مکانیکی، ساخت ایران.
- دستگاه همزن مافوق صوت (آلتراسونیک) مدل UP200، ساخت آلمان.
- آون (جهت تبخیر اتانول)، ساخت ایران.
- دستگاه اسپاترکوتر.
- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).
- دستگاه استحکام سنج Elima.
- فیکسچر<sup>۲</sup> (به منظور نگهداشتن پارچه در وضعیت دلخواه و همچنین تأمین کشش مورد نظر در سطح پارچه).

<sup>3</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>4</sup> Ultrasonic Mixer

<sup>1</sup> Design of Experiments

به منظور محاسبه زاویه تغییر شکل پارچه حین انجام آزمایش، از فرایند بیرون‌کشی با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه توسط دوربین فیلم‌برداری Sony که روبه‌روی نمونه جاسازی شده فیلم‌برداری شد. این فیلم توسط نرم‌افزار Adobe Premier به اسلایدهای مختلف در فواصل زمانی مساوی تبدیل شد. تصاویر تهیه شده از آزمایش بیرون‌کشی نخ از پارچه به برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب تغذیه می‌شوند. این برنامه با تبدیل تصویر RGB به تصویر سیاه و سفید، انتخاب ناحیه مدنظر تصویر برای اندازه‌گیری  $\alpha$  و در نهایت قرار دادن مرز روی ناحیه سیاه و سفید در بخش انتخاب شده، تصویر قادر به تشخیص زاویه تغییر شکل پارچه بود. بیش‌ترین مقدار زاویه  $\alpha$  اندازه‌گیری شده،  $\alpha_s$  (زاویه تغییر شکل پارچه در نقطه بیشینه استاتیکی) نامیده شد و زوایای اندازه‌گیری شده پس از این نقطه،  $\alpha_D$  (زاویه تغییر شکل پارچه در منطقه دینامیکی) در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مقادیر  $\alpha$ ،  $\theta$  و  $\theta'$  اندازه‌گیری شده (بر حسب درجه)

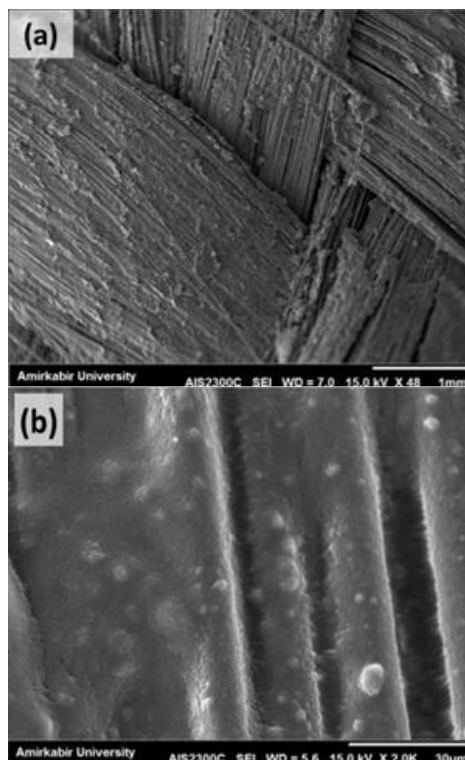
پارچه	$\theta$	$\theta'$	$\alpha$
KM22	۱۴/۱۶	۱۳/۲۵	۱۵

### ۲-۳. آزمون بیرون کشیدن الیاف

بر اساس مقادیر جدول (۱)، سرعت‌های مختلف بر نرخ کشش اثر می‌گذارند. به منظور ارزیابی تأثیر سرعت‌های مختلف بر الیاف کولار آغشته به STF، این آزمون در سرعت‌های مختلف انجام گرفت. کرکوود و همکاران [۲]، مدلی نیمه تجربی برای پیش‌بینی نیروی بیرون‌کشی الیاف طراحی و از سرعت متوسط ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه برای تمامی آزمایش‌ها استفاده کردند. همچنین، بیلیسک و همکاران [۶]، تحلیل و بررسی تجربی بیرون‌کشی الیاف را در سرعت آزمایشی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام داده‌اند. کرکوود و همکاران [۱۳]، آزمون بیرون کشیدن را در سرعت‌های ۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام داده‌اند.

برای انجام آزمون از دستگاه استحکام سنج Elima استفاده شد (شکل ۲). این دستگاه، به منظور ایجاد نیروی اولیه در الیاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش پارچه به صورت نمونه مستطیل شکل بر روی فیکسچر (که قبلاً برای این کار طراحی شده است) ثابت می‌شود. به منظور ایجاد تنش اولیه در الیاف از پیچی که بر روی فیکسچر به این منظور طراحی شده است، استفاده می‌شود و نیروی کشش عرضی ۲۰ نیوتن اعمال می‌گردد. جهت ارزیابی نیروی کشش در الیاف، آزمون کشیدن نخ برای هر پارچه انجام شد. با در نظر گرفتن دو متغیر مستقل (سرعت و نوع نمونه) و سه سطح متفاوت هر متغیر مستقل ۱۲ آزمایش بر روی الیاف انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، الیاف به طور مستقیم به گیره متصل می‌شود و به منظور عدم

در میان نمونه‌های رقیق‌شده با اتانول، برخی از الیاف با STF پوشانده شده و الیاف از یکدیگر جدا شده‌اند. ارتباط بین الیاف با کمک STF قابل مشاهده است. شکل (۱) توزیع یکسان سیال و ذرات را بر سطح الیاف در نمونه آغشته شده با سوسپانسیون ۳۰ درصدی ذرات سیلیکونی در پلی‌اتیلن گلیکول را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصاویر SEM از نمونه ۳۰ درصدی ذرات سیلیکونی در پلی‌اتیلن گلیکول (a) مقیاس ۱mm (b) مقیاس ۳۰  $\mu\text{m}$

### ۲-۲. معادله مدل

مدلی تحلیلی ساده‌ای جهت محاسبه ضریب اصطکاک در بیرون کشیدن الیاف پارچه‌های کولار بافته‌شده، طراحی شد. مدل به صورت زیر خلاصه می‌شود [۱۲]:

$$\mu = \frac{f}{N \times F_N} \quad (1)$$

که در آن،  $\mu$ ،  $f$ ،  $N$  و  $F_N$  به ترتیب ضریب اصطکاک، نیروی بیرون کشی الیاف، تعداد تقاطع‌ها در مسیر الیاف کشیده شده و بار هر تقاطع هستند.  $F_N$  به طریق زیر به دست می‌آید:

$$F_N = 2T_y \sin\theta \quad (2)$$

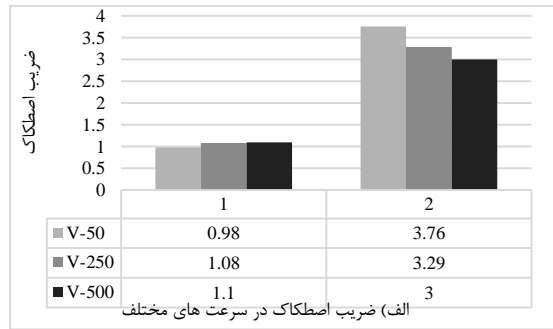
$T_y$  نیروی منتشرشده در خلاف جهت نخ بوده و در این پژوهش، فرض می‌شود که  $N \times T_y$  برابر با نیروی عرضی پارچه است.  $\theta'$  نشان‌دهنده زاویه بافت در حین کشیده شدن است و از طریق زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\theta' = \text{Arc tan}(\tan\theta \cos^2\alpha) \quad (3)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه بافت قبل از کشیده شدن و  $\alpha$  زاویه تغییر شکل پارچه است. جدول (۱) مقادیر  $\theta$ ،  $\theta'$  و  $\alpha$  را نشان می‌دهد.

زمانی که انتهای آزاد نخ وارد بافت گردد، نقاط تلاقی را یکی پس از دیگری رها کرده تا اینکه نخ به طور کامل از داخل بافت بیرون آید، به همین دلیل نمودار به صورت نزولی و کاهشی خواهد بود (منطقه III، شکل ۳).

شکل (۴) مقادیر تجربی ضرایب اصطکاک در آزمون‌های بیرون‌کشی الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقادیر تجربی ضریب اصطکاک پارچه کولار KM22 در آزمون بیرون‌کشی الیاف. نمونه ۱: نمونه خام نمونه ۲: نمونه آغشته شده به STF

رابطه تحلیلی ساده‌ای جهت محاسبه ضریب اصطکاک در بیرون کشیدن الیاف پارچه‌های کولار بافته‌شده، ارائه گردید که همان روابط (۱-۳) هستند. اگر مقادیر با یکدیگر مقایسه شوند، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های آغشته شده به STF بالاترین مقدار را داشته و مقدار آن‌ها سه برابر بیشتر از نمونه‌های خام است. همان‌طور که دیده می‌شود، در نمونه‌های خام با افزایش سرعت بیرون‌کشی، اصطکاک بیشتر می‌شود. در تضادی کامل، در نمونه آغشته شده به STF، با افزایش سرعت، اصطکاک کاهش می‌یابد.

بر اساس سرعت‌های مختلف و تأثیر این سرعت‌ها بر ضریب اصطکاک بیرون‌کشی الیاف، این آزمایش در سه سرعت متفاوت انجام گرفت. این سه سرعت ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. در این پژوهش، الیاف در دو حالت آزمایش شدند: خام و آغشته به سیال غلیظ شونده برشی مبتنی بر ذرات سیلیکونی (STF).

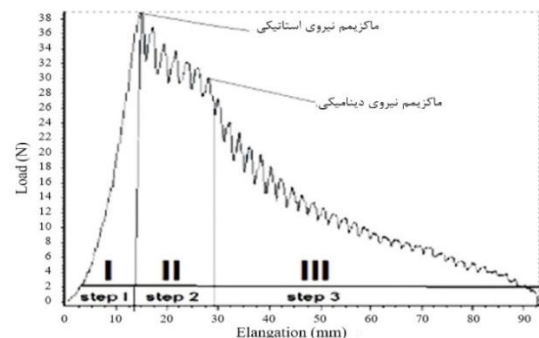
لغزش الیاف از سناده‌ای نرم به منظور افزایش اصطکاک استفاده می‌شود. به منظور جلوگیری از تداخل بین الیاف، الیاف با فاصله مناسب نسبت به هم، بیرون کشیده می‌شوند.



شکل ۲. آزمون بیرون‌کشی الیاف

### ۳. نتایج و بحث

زمانی که نیرو به نخ وارد می‌شود، این نیرو در ابتدا صرف غلبه بر اصطکاک استاتیکی میان نقاط تلاقی می‌گردد. مقاومت اصطکاک پارچه در برابر این اعمال نیرو سبب تغییر شکل برشی پارچه می‌شود. این نیرو دائماً افزایش یافته تا به بیش‌ترین مقدار خود برسد که نیروی اصطکاک بی‌شینه نامیده می‌شود. تا این مرحله نخ کوچک‌ترین لغزشی در داخل پارچه نداشته است (منطقه I روی شکل (۳)). زمانی که نخ دچار لغزش می‌شود و اولین نقطه تلاقی را طی می‌کند، نیرو از حالت استاتیکی به دینامیکی تبدیل شده و کاهش می‌یابد، به واسطه ایجاد چسبندگی جدید در این نقاط نیرو افزایش می‌یابد. بنابراین سبب ایجاد حرکت چسبنده-لغزنده (stick-slip) در داخل پارچه می‌شود، این پدیده تا زمانی که انتهای آزاد نخ به داخل پارچه برسد، ادامه خواهد داشت (منطقه II روی شکل (۳)).

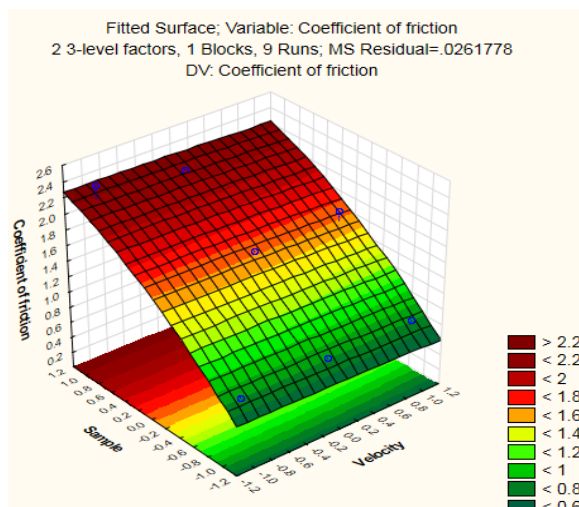


شکل ۳. نمودار تغییرات نیرو-جابه‌جایی در آزمایش بیرون‌کشی نخ از پارچه

(۹) مورد استفاده قرار گرفتند. این مطالعه یک رویکرد تجربی است و با جایگزین کردن داده‌های تجربی در معادله تحلیلی، نمودارها رسم شده‌اند.

در این مقاله از روش تاگوچی (طراحی فاکتوریل جزئی) استفاده شده است. آن‌چنان که داده‌های تجربی در دو سطح به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده است، درنهایت با خطایی در محدوده ۰/۲۶-۰/۲۲ نتایج قابل قبولی به دست آمده است. قابل ذکر است که برای هر داده تجربی، سه مرتبه تکرار آزمایش انجام شده است.

در شکل (۶)، محور Z نشان‌دهنده مقادیر ضریب اصطکاک است و محورهای X و Y متغیرهای سرعت و نوع نمونه هستند. DOE تعاملات فاکتورها را اندازه‌گیری می‌کند و معادله پیش‌بینی ارائه می‌دهد. داده‌های تجربی وارد DOE می‌شوند. این ابزار یک فرمول و معادله مبتنی بر X و Y به عنوان ورودی و Z به عنوان خروجی تعریف می‌کند. نیاز به انجام آزمون بیرون‌کشی الیاف ناست، زیرا معادله نتایج یکسانی تولید می‌کند.



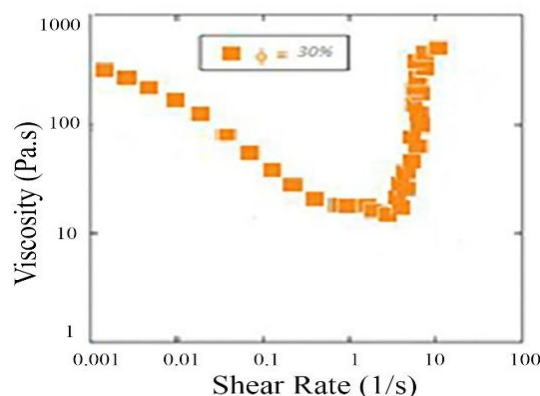
شکل ۶. نمودار سه بعدی تحلیل DOE

روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) یکی از روش‌های بهبود کیفیت است که در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به عنوان یک مزیت رقابتی در کشورهای غربی و ژاپن مطرح شد. استفاده صحیح از روش‌های طراحی آزمایش‌های آماری می‌تواند باعث سهولت در مراحل طراحی و تولید محصولات جدید و بهبود محصولات موجود شود. این اصول در اغلب صنایع نظیر؛ صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی، تجهیزات پزشکی، صنایع غذایی، الکترونیک، نیمه-هادی‌ها، داروسازی، صنایع شیمیایی و فرآیندی به‌کار گرفته شده است. محققان برای شناخت پدیده‌ها، آزمایش‌هایی را انجام می‌دهند تا واقعیت‌هایی را در مورد سامانه یا فرآیندی کشف کنند. انجام آزمایش همواره متضمن هزینه و زمان است. از این

با توجه به مقادیر کشش و نرخ کشش در جدول (۲) و بررسی آن‌ها در نمودار شکل (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که این مقادیر در محدوده افت منحنی (ناحیه نازک شده برشی) قرار دارند و مشخص می‌گردد که رفتار نزولی منحنی در اثر سرعت بیرون‌کشی الیاف ایجاد می‌شود.

جدول ۲. مقادیر کشش و نرخ کشش الیاف کولار آغشته به STF در سرعت‌های مختلف

پارچه	سرعت (mm/min)	بیشینه کشش (%)	زمان آزمایش (s)	نرخ تنش (1/s)
کولار KM 22	۵۰	۷۶/۱۵	۲۰۶/۱	۰/۳۷
	۲۵۰	۷۶/۴۶	۴۶/۵۳	۱/۶۴
	۵۰۰	۷۰/۵۹	۲۰/۵۹	۳/۴۳



شکل ۵. رئولوژی سیال غلیظ شونده برشی در سوسپانسیون ۳۰ درصد نانوذرات سیلیکونی

### ۳-۱. طراحی تحلیل پژوهش (DOE)

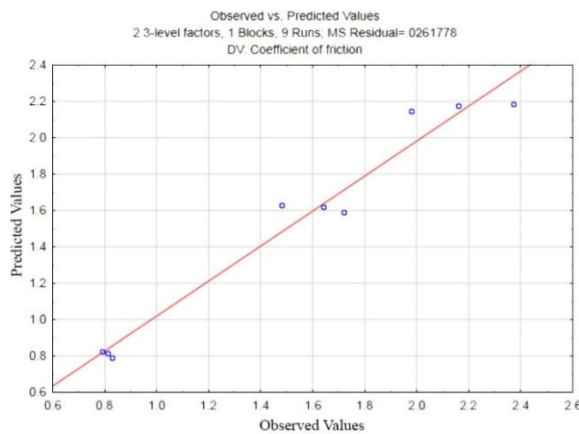
روش DOE یکی از روش‌های بهینه‌سازی کیفیت است. این روش مشخص می‌کند که کدام متغیرها بیش‌ترین تأثیر را بر یک فرآیند دارند و متغیرهایی را بهبود می‌بخشد که بر نتایج پژوهش تأثیرگذار باشند. سه متغیر در این پژوهش هستند که باید در تحلیل تعریف شوند. ضریب اصطکاک متغیر وابسته بوده و سرعت بیرون‌کشی الیاف و نوع نمونه‌ها (از نظر خام و آغشته بودن) متغیرهای مستقل هستند. در انواع نمونه‌های بیرون‌کشی الیاف، مقادیر ۱- و ۱+ به ترتیب به الیاف خام و الیاف آغشته شده به STF داده می‌شوند. همچنین مقادیر ۱-، ۰ و ۱+ به ترتیب نماینده سرعت‌های ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه هستند. با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA که یک نرم‌افزار تحلیل آماری و مدل‌های مبتنی بر روش تحلیل است، خروجی‌های زیر به دست آمدند. با توجه به تأثیر متغیرهای مستقل بر ضریب اصطکاک (متغیر وابسته)، برخی از نمودارها (شکل‌های (۶) تا

محدودی آزمایش انجام شده است، تقریباً بدون استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها غیرقابل حصول است.

با در نظر گرفتن معادله (۴)، رابطه بین ضریب اصطکاک (Z) و سرعت (X) و متغیرهای نمونه (Y) حتماً غیرخطی است. کاربرد دیگر این معادله این است که می‌تواند جایگزین معادله اتلاف انرژی شود.

$$Z = -0.008x^2 - 0.123y^2 - 0.018x + 0.68y + 1.62 \quad (4)$$

شکل (۷) مقادیر مشاهده شده ضریب اصطکاک الیاف خام و الیاف آغشته شده به STF را با مقادیر پیش‌بینی شده آزمون بیرون کشیدن نخ مقایسه می‌کند. مقادیر سرعت بیرون کشیدن نخ نیز نشان داده شده است. نقاط تجمع در سه محدوده هستند. همان طور که قبلاً اشاره شد، بالاترین و پایین‌ترین مقادیر به ترتیب متعلق به نمونه‌های آغشته شده به STF و نمونه‌های خام هستند. تفاوت مقادیر هر محدوده به دلیل سرعت‌های مختلف است.



شکل ۷. مقادیر مشاهده شده ضریب اصطکاک در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده در آزمون بیرون کشی الیاف

در شکل (۸)، خطوط دو بعدی ضرایب اصطکاک الیاف خام و الیاف آغشته شده به STF در مقایسه با سرعت بیرون کشی الیاف نشان داده شده است. همان طور که در بالا نشان داده شد، هر چه سرعت بیرون کشی الیاف افزایش یابد، نیروی بیرون کشی الیاف نمونه‌های خام افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رابطه مستقیم آن‌ها است. اما در الیاف آغشته شده به STF، وضعیت کاملاً متفاوت است. شکل (۹)، نمودار پارتو است که خروجی تحلیل DOE است و نشان‌دهنده تأثیر متغیرهای بیرون کشی الیاف بر نتایج آزمون است. همان طور که در نمودار دیده می‌شود، نمونه‌های الیاف در مقایسه با انواع سرعت، تأثیر بسیار بیشتری بر آزمون بیرون کشی الیاف دارند.

رو انجام آزمایش‌های مؤثر که با صرف حداقل هزینه و زمان، بیش‌ترین اطلاعات را به دست آورد، آرمان هر مهندس یا محقق است و این هزینه و زمان هنگامی که تعداد عوامل افزایش یابد به صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند.

بنابراین به روشی نیاز است که در آن بتوان با صرف حداقل هزینه و زمان به بیش‌ترین اطلاعات در مورد فرآیند دست پیدا کرد و نتیجه‌گیری‌های منطقی ارائه و مدارک مستند در خصوص فرآیند به دست آورد. روشی که به بهترین شکل اهداف ذکر شده را برآورده سازد، طراحی آزمایش‌های صنعتی نام دارد. مدیران و مهندسان، امروزه لازم است که قبل از تصمیم‌گیری در مورد میزان بهبود و توسعه محصول و فرآیند، اطلاعات کافی از روش‌های طراحی آزمایش داشته باشند. به همین خاطر است که شرکت‌های بین‌المللی نظیر تویوتا سالانه تعداد زیادی از مهندسان خود را تحت دوره‌های آموزشی DOE قرار می‌دهند و شرکتی مانند فورد در آمریکا، حتی تأمین‌کنندگان قطعات خود را ملزم به استفاده از این روش می‌نماید. با توجه به آنچه گذشت می‌توان دریافت که روش DOE را می‌توان در اغلب فرآیندها جهت بهبود کیفیت مورد استفاده قرار داد. فرایندهایی که در خروجی آن‌ها یک مشخصه کیفی، یک خواسته مشتری یا هر مشخصه دیگری مورد نیاز است.

در هر آزمایش تعدادی از متغیرها در اختیار تحلیل‌گر بوده و آن‌ها را با توجه به نیاز آزمایشی که انجام می‌دهد، تغییر می‌دهد. به همین دلیل به این متغیرها، متغیرهای قابل کنترل نیز می‌گویند. عوامل تحت کنترل آن دسته از عواملی هستند که با چرخاندن یک شیر، تغییر جهت یک کلید، تغییر یک قطعه یا کم و زیاد کردن مقدار مواد، تغییر یابند. متغیرهای غیرقابل کنترل موجب ایجاد پارازیت (Noise) در فرآیند شده و امکان شناسایی متغیرهای قابل کنترل را کاهش می‌دهند. بنابراین شناسایی این متغیرها نیز از اهمیت خاصی برخوردار بوده و باید نسبت به جمع‌آوری اطلاعات در مورد آن‌ها اقدام شود. به عنوان مثال در سنگ‌زنی یک آلیاژ آلومیناید تیتانیوم که در نسل آینده موتورهای هواپیما و جت به طور گسترده به کار گرفته خواهد شد، عدم وجود آسیب‌های سطحی نظیر ترک و تنش پسماند در سطح بالایی از اهمیت قرار دارد. بر این اساس پروژه‌ای جهت بررسی اثر ۵ پارامتر، شامل پارامترهای سنگ‌زنی (سرعت برش و عمق برش) و پارامترهای چرخ‌سنگ (اندازه دانه، سختی، تخلخل) بر چگالی و عمق ترک‌های سطحی تعریف شده تا مشخص گردد که کدامیک از عوامل به تنهایی و یا در تعامل با دیگر پارامترها تأثیرگذار هستند. نتایج حاصل از این تحقیق که با تعداد

#### ۴. نتیجه‌گیری

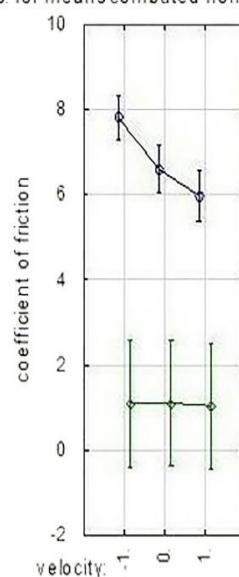
این مقاله مطالعه‌ای تجربی را توضیح می‌دهد که به بررسی ضریب اصطکاک در بیرون‌کشی الیاف پرداخته است. نمونه‌های الیاف مورد آزمایش قرار گرفته دو نوع بودند: خام و آغشته شده به STF. سپس، با توجه به اثر سرعت بر آزمون بیرون‌کشی الیاف، آزمون در سه سرعت ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. با تعیین ضریب اصطکاک به عنوان متغیر وابسته و سرعت و نوع نمونه به عنوان متغیرهای مستقل، عوامل تأثیرگذار بر ضریب اصطکاک با کمک تحلیل DOE به دست آمدند. در مرحله بعد، مقادیر بحرانی سرعت جهت نتیجه بهینه آزمون بیرون‌کشی الیاف به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت بیرون‌کشی، ضرایب اصطکاک نمونه‌های خام افزایش می‌یابند. در مقابل، برای نمونه آغشته شده به STF، افزایش سرعت سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. مشاهده شد که این مقادیر در حیطه نزولی منحنی قرار دارند که به آن منطقه نازک شونده برشی می‌گویند. با مقایسه مقادیر بیرون‌کشی الیاف، به نظر می‌رسد که نمونه‌های آغشته شده به STF بالاترین مقدار را داشته و مقدار آن‌ها سه برابر نمونه‌های خام است. با استفاده از تحلیل DOE، مقدار بحرانی سرعت بیرون‌کشی در حدود ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه برآورد شد.

#### ۵. مراجع‌ها

- [1] Pan, N.; Yoon, M. Y. "Behavior of Yarn Pull-Out from Woven Fabrics: Theoretical and Experimental"; Text. Res. J. 1993, 63, 629-637.
- [2] Kirkwood, K. M.; Kirkwood, J. E.; Young, S. L.; Egres, R. G. Jr.; Wetzel, E. D.; Wagner, N. J. "Yarn Pull-Out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 Fabric, Part I: Quasistatic Characterization of Yarn Pull-Out"; Text. Res. J. 2004, 74, 920-928.
- [3] Duan, Y.; Keefe, M. T.; Bogetti, A.; Cheeseman, B. A. "Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-Ply High-Strength Fabric"; Int. J. Impact Eng. 2005, 31, 996-1012.
- [4] Dong, Z.; Sun, C. T. "Testing and Modeling of Yarn Pull-Out in Plain Woven Kevlar Fabrics"; Composites A. 2009, 40, 1863-1869.
- [5] Zhu, D.; Soranakom, C.; Mobasher, B.; Rajan, S. D. "Experimental Study and Modeling of Single Yarn Pull-Out Behavior of Kevlar 49 Fabric"; Composites A. 2011, 42, 868-879.
- [6] Bilisik, K. "Properties of Yarn Pull-out in Para-aramid Fabric Structure and Analysis by Statistical Model"; Composites A. 2011, 42, 1930-1942.
- [7] Srivastava, A.; Majumdar, A.; Butola, B. S. "Improving the Impact Resistance Performance of Kevlar Fabrics using Silica Based Shear Thickening Fluid"; Mater. Sci. Eng. A-Struct. 2011, 529, 224-229.
- [8] Majumdar, A.; Butola, B. S.; Srivastava, A. "An Analysis of Deformation and Energy Absorption Modes of Shear Thickening Fluid Treated Kevlar Fabrics as Soft Body

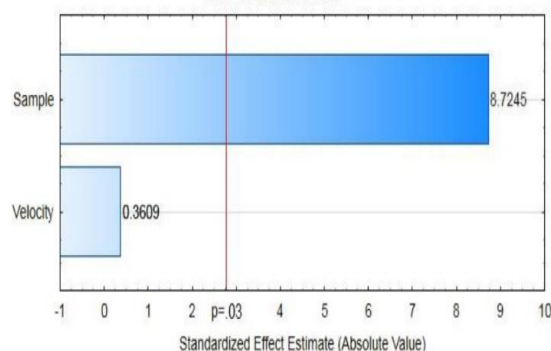
تحلیل DOE مقدار بحرانی سرعت بیرون‌کشی الیاف را مشخص می‌کند. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقدار بهینه سرعت بیرون‌کشی الیاف تقریباً ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه است. با مقایسه مقادیر ضرایب اصطکاک در سرعت‌های مختلف، مشخص می‌شود که ضریب اصطکاک متوسط سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر از بقیه است. این نتیجه دقت و پایایی تحلیل DOE را نشان می‌دهد.

Plot of Marginal Means and Conf. Limits (97.%)  
DV: coefficient of friction  
Design: 2 2-level factors, 1 Blocks, 8 Runs  
NOTE: Std Errs. for means computed from MS Error= 2276742



شکل ۸. خطوط دو بعدی ضرایب اصطکاک الیاف خام و آغشته شده به STF

Pareto Chart of Standardized Effects; Variable: Coefficient of friction  
2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual= 5240167  
DV: Coefficient of friction



شکل ۹. نمودار پارتو نشان‌دهنده تأثیر متغیرها بر نتایج آزمون بیرون‌کشی الیاف.

جدول ۳. مقادیر بهینه سرعت بیرون‌کشی الیاف

Factor	کمینه مشاهده‌شده	مقدار بحرانی	بیشینه مشاهده‌شده
سرعت	-۱/۰۰۰	-۱/۱۰۰	+۱/۰۰۰



- [12] Valizadeh, M.; Ravandi, S. A. H.; Salimi, M.; Sheikhzadeh, M. "Determination of Internal Mechanical Characteristics of Woven Fabrics using the Force-balance Analysis of Yarn Pull-out Test"; *J. Text. Inst.* 2008, 99, 47-55.
- [13] Kirkwood, J. E.; Kirkwood, K. M.; Young, S. L.; Egres, R. G. Jr.; Wetzel, E. D.; Wagner, N. J. "Yarn Pull-Out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 Fabric, Part I: Quasistatic Prediction of Ballistic Performance"; *Text. Res. J.* 2004, 74, 939-948.
- [14] Kordani, N.; Vanini, Sadough A. "Optimizing the Ethanol Content of Shear Thickening Fluid/Fabric Composites under Impact Loading"; *J. Mech. Sci. Tech.* 2014, 28, 1-5.
- [15] Naik, N. K.; Shrirao, P.; Reddy, B. C. K. "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Formulation"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 32, 1521-1552.
- Armor Materials"; *Mater. Des.* 2013, 51, 148-153.
- [9] Nilakantan G.; Gillespie, J. W. Jr. "Yarn pull-out behavior of Plain Woven Kevlar Fabrics: Effect of Yarn Sizing, Pull-out Rate, and Fabric Pre-tension"; *Compos. Struct.* 2013, 101, 215-224.
- [10] Nilakantan, G.; Merrill, R. L.; Keefe, M.; Gillespie, J. W. Jr.; Wetzel, E. D. "Experimental Investigation of the Role of Frictional Yarn Pull-out and Windowing on the Probabilistic Impact Response of Kevlar Fabrics"; *Compos. Part B-Eng.* 2014, 68, 215-229.
- [11] Feng, X.; Li, S.; Wang, Y.; Wang, Y. C.; Liu J. "Effects of Different Silica Particles on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Fabrics Impregnated with Shear Thickening Fluids"; *Mater. Des.* 2014, 64, 456-461.

