



A Study on the Ballistic Behavior of Kevlar Fabric Impregnated with Shear Thickening Fluid Containing Graphene Oxide Additive

A. Naghizadeh¹, H. Khoramishad¹, M. Jalaly^{2*}

¹ School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Nanotechnology Department, School of Advanced Technologies, Department of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: In this research, the effects of graphene oxide as an additive to Kevlar fabric impregnated with nanosilica/polyethylene glycol shear thickening fluid on the ballistic performance were investigated. In order to understand the influence of shear thickening fluid, pull-out tests were accomplished to assess the friction between yarns. The energy absorption in the high-impact ballistic test for the fabric impregnated with shear thickening fluid increased by 25.8% compared to that for the neat Kevlar fabric. This parameter for the fabric impregnated with shear thickening fluid-0.2 wt.% graphene oxide was 23.3% as compared with that of the neat fabric, demonstrating the deteriorating effect of graphene oxide additive. The results of the pull-up tests were in agreement with ballistic tests, meaning that the increase or decrease in the maximum forces in pull-up tests was followed by the increase or decrease in the energy absorption in ballistic tests. Compared to the sample impregnated with shear thickening fluid, adding graphene oxide causes the decrease in the maximum force in the pull-up test, resulting in a reduction in restriction of yarns movement, consequently facilitating their movement inside the fabric.

Review History:

Received: Mar. 31, 2021

Revised: May, 24, 2021

Accepted: Jul. 17, 2021

Available Online: Jul. 23, 2021

Keywords:

Shear thickening fluid

Graphene oxide

Kevlar

Ballistic

1. INTRODUCTION

The development of high-strength lightweight armors has been attracted considerable attention in recent decades. The advent of nanomaterials and nanotechnology has made significant progress in enhancing the performance of armors against high-velocity impact threats. With the advancement of polymer science, valuable polymeric materials such as high-strength polyamide yarns, aramid yarns, and high-density linear polyethylene yarns, and Kevlar have been produced for high-velocity impact applications. Fabrics can be strengthened by considering mechanisms of energy absorption. An approach for fulfilling this goal is promoting the interlocking between the yarns and restricting the relative movement of the yarns. This can be accomplished by impregnating the fabric with Shear Thickening Fluids (STFs), frequently composed of silica particles dispersed in Polyethylene Glycol (PEG) [1, 2].

After impregnation of the fabric with STF, the fluid containing nanoparticles penetrates the fabric yarns, preventing them from easy pull-out. In fact, using STFs leads to an increase in the friction between yarns, resulting in the improvement of the fabric impact resistance.

Other than silica (SiO_2) nanoparticles, STFs may contain second or third nanoparticles, which are called multi-phase STFs. Gurgen and Kuşhan [3] investigated the stab penetration resistance of the fabric impregnated with an STF containing SiC nanoparticles. They indicated that the

*Corresponding author's email: maisam_jalaly@iust.ac.ir

penetration resistance of the fabric increased by adding SiC to the STF. Laha and Majumdar [4] reported an improvement in the low-velocity impact resistance of aramid fabrics by adding halloysite nanotubes to the SiO_2 -based STF.

Tan et al. [5] added graphene additive to the spherical nano SiO_2 -based STF. They showed that graphene additive caused the maximum force in the pull-out test and energy absorption in the ballistic test to be increased, suggesting the fruitful influence of the graphene. On the other hand, Wang et al. [6] reported the decrease in the maximum force in the pull-out test by adding graphene to the STF, implying the destructive effect of graphene on the STF performance.

Therefore, the current work is intended to elucidate the effect of adding Graphene Oxide (GO) to the SiO_2 -based STF on the high-velocity impact performance (ballistic) of Kevlar.

2. MATERIALS AND METHODS

Spherical nano SiO_2 with an average size of 30-40 nm, Polyethylene Glycol (PEG) with a molecular weight of 400 g/mol, aqueous graphene oxide suspension with a concentration of 5 g/l, ethanol, and Kevlar fabric with an areal density of 200 g/m^2 were used in this work. The specimens were coded as follows:

- NF: the neat fabric.
- FS: the fabric impregnated with the simple STF (65 wt.% PEG, 35 wt.% nano SiO_2).
- FSG: the fabric impregnated with the STF containing GO (64.8 wt.% PEG, 35 wt.% nano SiO_2 , 0.2 wt.% GO).



Table 1. The results of the ballistic test.

Sample	Initial projectile velocity (m/s)	Residual projectile velocity (m/s)	Energy absorption (J)
NF	235	215.3	12.0
FS	235	209.9	15.1
FSG	235	210.5	14.8

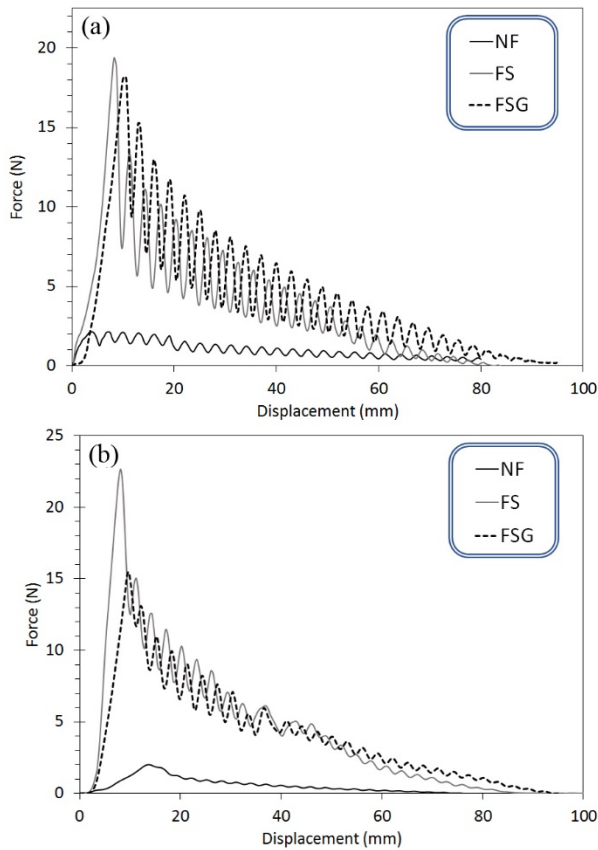


Fig. 1. The curves of force-displacement in the single yarn pull-out test performed at the velocity of (a) 50 and (b) 500 mm/min.

To assess the friction phenomenon, a yarn pull-out test was carried out. Furthermore, a high-velocity impact test was performed using the gas gun with a projectile velocity of 235 m/s.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 shows the yarn pull-out test at two different projectile velocities (50 and 500 mm/min). As the maximum force is a critical parameter to analyze the friction, the maximum forces of different samples were plotted in Fig. 2.

It is clear from Fig. 2 that the maximum force is dependent on the pull-out velocity for FS and FSG samples, while the behavior of the neat Kevlar is independent of the pull-out velocity. For the FS sample, when the STF-impregnated yarn is pulled out of the fabric, the viscosity of STF increases, and the movement of the yarn is restricted, resulting in an increase in the pull-out maximum force. For the FSG sample, however, a decrease (~26.5%) in the pull-out maximum force was observed, implying the degradation of thickening behavior and easier yarn pull-out. This may be attributed to

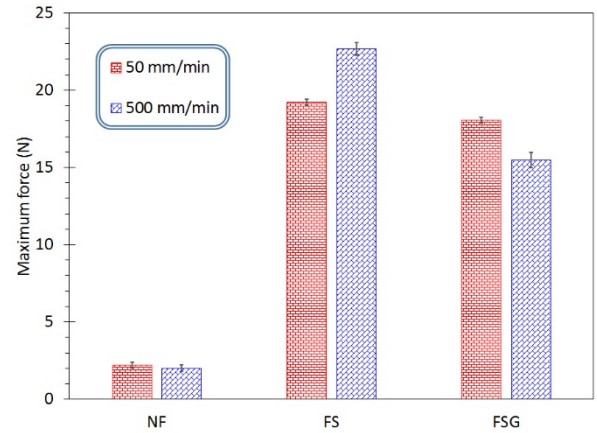


Fig. 2. The pull-out maximum force values in the tests performed at the velocity of 50 and 500 mm/min.

the lubricating nature of the graphene, which reduces the friction between yarns.

The results of the ballistic test were tabulated in Table 1. The presence of simple STF coverage on the yarn surfaces caused the reduction of residual projectile velocity, and thus, the energy absorption increased by 25.8% compared to NF. The sample FSG also had a 23% higher energy absorption compared to NF, but this is lower than that of FS. This is in agreement with the results of the pull-out test, demonstrating the deteriorating role of graphene oxide additive in the shear thickening fluids.

4. CONCLUSIONS

Kevlar was impregnated with a nanosilica-based Shear Thickening Fluid (STF). The effects of adding graphene oxide to the STF on the pull-out and high-velocity impact behaviors of the impregnated fabrics were investigated. The results revealed that the presence of graphene additive reduced the maximum pull-out force due to the increase in the lubricating nature of the yarn surfaces, suggesting that graphene had a negative effect on the shear thickening behavior. The sample impregnated with simple STF exhibited a 25.8% increase in energy absorption in the ballistic impact test compared to the neat Kevlar, while the sample impregnated with STF containing GO exhibited a 23.3% increase compared to the neat fabric, indicating GO additive weakened the ballistic performance of the STF-impregnated Kevlar.

REFERENCES

- [1] V. Tan, C. Lim, C. Cheong, Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry, International Journal of Impact Engineering 28 (2003) 207-222.
- [2] V. Shim, Y. Guo, V. Tan, Response of woven and laminated

- high-strength fabric to oblique impact, *International journal of impact engineering* 48 (2012) 87-97.
- [3] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 94 (2017) 50-60.
- [4] A. Laha, A. Majumdar, Shear thickening fluids using silica-halloysite nanotubes to improve the impact resistance of p-aramid fabrics, *Applied Clay Science* 132-133 (2016) 468-474.
- [5] Z. Tan, W. Li, W. Huang, The effect of graphene on the yarn pull-out force and ballistic performance of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluids, *Smart Materials and Structures* 27 (2018) 075048.
- [6] F. F. Wang, Y. Zhang, H. Zhang, L. Xu, P. Wang, C.-b. Guo, The influence of graphene nanoplatelets (GNPs) on the semi-blunt puncture behavior of woven fabrics impregnated with shear thickening fluid (STF), *RSC advances* 8 (2018) 5268-5279.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Naghizadeh, H. Khoramishad, M. Jalaly, A Study on the Ballistic Behavior of Kevlar Fabric Impregnated with Shear Thickening Fluid Containing Graphene Oxide Additive, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 1431-1434.

DOI: [10.22060/mej.2021.19806.7119](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19806.7119)





مطالعه رفتار بالستیکی پارچه کولار آغشته به سیال غلیظشونده برشی حاوی افزودنی اکسید گرافن

امیرحسین نقی زاده^۱، هادی خرمی شاد^۱، میثم جلالی^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ گروه نانو فناوری، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

کلمات کلیدی:

سیال غلیظشونده برشی

اکسید گرافن

کولار

بالستیک

خلاصه: در این تحقیق تأثیر افزودنی اکسید گرافن در پارچه کولار دارای سیال غلیظشونده برشی متشکل از پلی اتیلن گلیکول و سیلیکای کروی تحت بارگذاری بالستیک مطالعه شده است. برای درک بهتر تأثیر نمونه های مختلف از سیال غلیظشونده برشی در عملکرد بالستیکی، آزمون بیرون کشی الیاف برای ارزیابی اصطکاک بین الیاف انجام شد. میزان افزایش انرژی در آزمون بالستیک برای پارچه دارای سیال غلیظشونده برشی در مقایسه با پارچه ساده ۲۵/۸ درصد بود. افزودن اکسید گرافن به سیال غلیظشونده برشی به اندازه ۰/۲ درصد وزنی سبب شد که میزان افزایش انرژی در مقایسه با پارچه ساده به ۲۳/۳ درصد تغییر کند، که این مقدار نشان از اثر تضعیف کنندگی اکسید گرافن دارد. نتایج آزمون بیرون کشی الیاف با نتایج آزمون بالستیک هماهنگ بود، بدین معنی که با مشاهده افزایش یا کاهش بیشینه نیرو در آزمون بیرون کشی الیاف، جذب انرژی در آزمون بالستیک به همان ترتیب افزایش یا کاهش می یافت. افزودن اکسید گرافن سبب کاهش بیشینه نیرو در مقایسه با نمونه سیال غلیظشونده برشی در آزمون بیرون کشی شده که در نتیجه قیود حرکتی الیاف کاهش یافته و حرکت گلوله در پارچه تسهیل می شود.

۱- مقدمه

نشان دادند که اگرچه غلیظشوندگی اس تی اف خالص از اس تی اف دارای کاربید سیلیسیم قوی تر است، اما پارچه آغشته به اس تی اف خالص مقاومت نفوذ کمتری دارد. برای بکارگیری نقش اس تی اف در پارچه ها بدون توجه به اثر غلیظشوندگی برشی، مطالعات عددی [۷ و ۸] اصطکاک بر مبنای آزمایش های کشش با مدل اصطکاکی کولمب^۲ در المان محدود شبیه سازی شد و تطابق خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده شد. مطالعات اخیر [۹ و ۱۰] روی آزمون های میله فشار هاپکینسون اس تی اف نشان داد که رفتار دینامیکی یک سوسپانسیون حاوی ذرات شدیداً به میزان تماس آنها در شرایط بالستیکی وابسته است. انتقال نیرو در مخلوط تحت ضربه از طریق تقابل ذرات اتفاق می افتد. پتل و همکاران [۱۱] سوسپانسیون حاوی ذرات کاربید سیلیسیم را تحت آزمایشات ضربه قرار داده و

از پارچه های آرامید مانند توارون، کولار، یا پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا معمولاً برای حفاظت در برابر پرتابه های بالستیکی استفاده می شود [۴-۱]. در سال های اخیر، سیال غلیظشونده برشی (اس تی اف)^۱ برای تقویت این گونه پارچه ها بکار گرفته شده و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. ویسکوزیته این سیال با عبور نرخ برش از نرخ برش بحرانی افزایش می یابد و به حالت شبه جامد در می آید. پس از حذف بار اعمالی سیال غلیظشونده برشی به حالت مایع باز می گردد [۵].

گورگن و همکاران [۶] مقاومت نفوذ پارچه آغشته به اس تی اف حاوی ذرات کاربید سیلیسیم را با اس تی اف خالص بررسی کردند و

1 Shear Thickening Fluid (STF)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: meisam_jalaly@iust.ac.ir

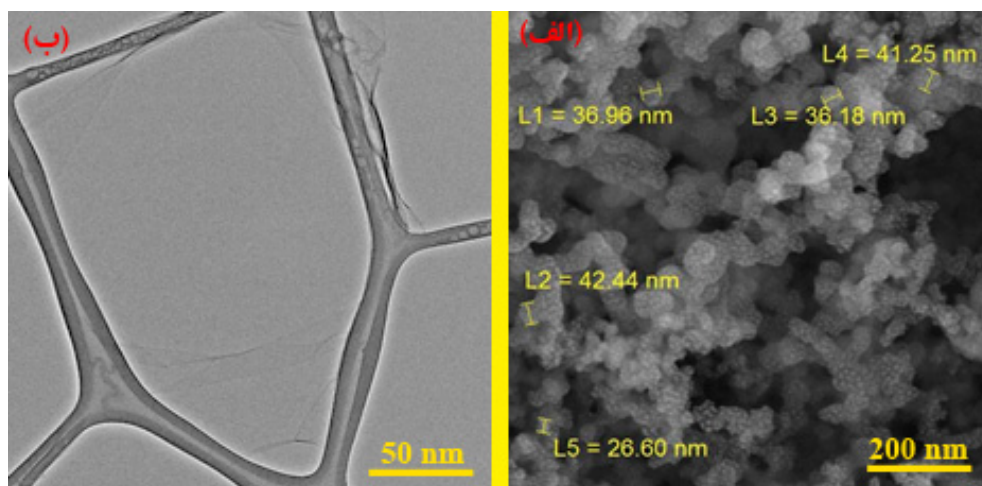
2 Coulomb



پیشنهاد کردند که جذب انرژی سوسپانسیون تحت بارگذاری نرخ بالا نه به غلیظشوندگی ماده بلکه به تراکم آن وابسته است. در حقیقت شبکه‌های نیروی بین ذرات در سوسپانسیون مسئول جذب انرژی می‌باشند. این مطالعات بدان معناست که در نظر گرفتن اصطکاک برای ارزیابی مقاومت بالستیک کافی است و مشارکت سیال برشی اساساً به افزایش اصطکاک بین الیاف‌ها وابسته است. به همین دلیل، در این تحقیق از آزمون رئولوژی که اطلاعات چندانی در مورد پیش بینی رفتار بالستیکی پارچه نمی‌دهد صرف نظر شده است. مقاومت پارچه آغشته به اس‌تی‌اف در مقابل حملات اجسام نوک تیز همچون میخ و چاقو نیز بهبود می‌یابد [۱۲]. ژو و همکاران [۱۳] گزارش کردند که درصد وزنی بیشتر و اندازه بزرگتر نانوذرات مقاومت نفوذ بهتری فراهم می‌کند. کالمن و همکاران [۱۴] عملکرد نفوذ در پارچه آغشته به نانوسیالات دارای ذرات پلی‌متیل متاکریلات و سیلیکا را بررسی کردند و دریافتند که پارچه حاوی ذرات نرم‌تر، مقاومت نفوذ کمتری در مقایسه با پارچه حاوی ذرات سخت‌تر دارد. روسن و همکاران [۱۵] آزمون شبه استاتیکی با نافذهای میخ، چاقو و سوزن را در نمونه‌های پارچه ساده، پارچه آغشته به سیال دارای سیلیکا و پارچه آغشته به سیال حاوی رُس انجام دادند. اس‌تی‌اف عملکرد بالستیکی پارچه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۶]. پتل و همکاران [۱۷] ضربه سرعت بالا در اس‌تی‌اف متشکل از ذرات مختلف را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسیدند که سوسپانسیون حاوی نشاسته، که غلیظشوندگی بهتری دارد، کارایی لازم در کاربرد بالستیک را نداشته و ذرات سخت‌تر تحمل تنش بیشتری دارند. لی و همکاران [۱۸] اثر اندازه ذرات سیلیکا بر عملکرد ضربه را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که با کاهش اندازه ذرات، مساحت فرورفتگی پشت نمونه کمتر و جذب انرژی پارچه بیشتر می‌شود. کالمن و همکاران [۱۹] نشان دادند که استفاده از ذرات نرم‌تر در پلی‌اتیلن گلیکول سبب کاهش سرعت حد بالستیک پارچه می‌شود. پارچه‌های حاوی سیال برشی که محافظت خوبی در جلیقه‌ها ایجاد می‌کنند دارای محدودیت‌های اساسی هستند. انعطاف پذیری و راحتی را محدود کرده و خواصشان در ابعاد بزرگ کاهش می‌یابد. اینگونه پارچه‌ها بیشتر به شکل صفحه استفاده شده و به سختی می‌توان آنها را در هندسه‌های پیچیده جای داد. در عین حال کامپوزیت‌های الیاف-سیال برشی به راحتی شکل‌پذیر بوده و در هندسه غیرصفحه‌ای و پیچیده قابل استفاده هستند [۲۰]. نام

و همکاران [۲۰] ضربه بالستیک در سوسپانسیون‌های دارای الیاف کوتاه مانند کربن و شیشه را بررسی کردند. اگرچه مطالعات زیادی در مورد اس‌تی‌اف دارای یک نوع ذرات انجام شده است اما اطلاعات در مورد اس‌تی‌اف حاوی ذرات ترکیبی محدود است. ذرات مکمل با توجه به نوع خواصشان رفتار اصطکاکی بین الیاف را تغییر داده و لذا مقاومت پارچه تغییر می‌کند. گورگن و همکاران [۶] مقاومت نفوذ پارچه آغشته به سیال چند ذره‌ای دارای ذرات مکمل کاربید سیلیسیم را بررسی کرده و نشان دادند که با بزرگ شدن اندازه ذرات مکمل، مقاومت در برابر نفوذ نافذ بهبود می‌یابد. همچنین گورگن و کوشان [۲۱] دریافتند که با افزایش غلظت ذرات مکمل (کاربید سیلیسیم) جذب انرژی در ضربه بالستیک افزایش می‌یابد. لاه و ماجومدر [۲۲] نیز تأثیر افزودن نانولوله‌های هالوسیت بر پارچه کولار آغشته به سیال برشی حاوی سیلیکا را در ضربه سرعت پایین بررسی کردند و بهبود مقاومت به ضربه برای نمونه‌های حاوی اس‌تی‌اف-هالوسیت را گزارش کردند. تان و همکاران [۲۳] سیال غلیظشونده حاوی نانوسیلیکای کروی ساختند و از گرافن به عنوان افزودنی در آن در غلظت‌های ۰/۸۵ و ۱/۷ درصد حجمی استفاده کردند. وجود گرافن باعث شد که بیشینه نیرو در آزمون کشش و جذب انرژی در آزمون بالستیک افزایش یابد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش درصد حجمی گرافن، خواص ذکر شده بهبود یافت. این نتایج نشان از بهبود عملکرد نانوسیال در حضور گرافن است. وانگ و همکاران [۲۴] نیز سیال غلیظشونده حاوی سیلیکای فیوم^۱ ساختند و اثر گرافن را به عنوان افزودنی در آزمون نفوذ شبه استاتیک بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استفاده از گرافن در غلظت ۰/۸ درصد وزنی، بیشینه نیرو در آزمون نفوذ شبه استاتیک نسبت به سیال حاوی تک ذره نانوسیلیکا کاهش می‌یابد. این نتیجه حاکی از اثر تضعیفی و نقش تخریبی گرافن است. حسن‌زاده و همکاران [۲۵] نیز اثر افزودنی نانو لوله کربنی در سیال پلی‌اتیلن گلیکول حاوی نانوسیلیکای فیوم را بررسی کردند. پارچه آغشته به سیال حاوی نانولوله کربنی در آزمون نفوذ شبه استاتیک نیروی بیشینه کمتری نسبت به نانوسیال فاقد نانولوله نشان داد (مشاهده اثر مخرب).

با توجه به مقالات ذکر شده، برای گرافن اثرات متناقضی در عملکرد تقویت استحکام پارچه گزارش شده است. یافتن دلیل این



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مواد اولیه. (الف) تصویر اس‌ای‌ام از ذرات سیلیکای کروی، (ب) تصویر تی‌ای‌ام از صفحات اکسید گرافن.
Fig. 1. Electron microscopy images of initial materials. (a) SEM micrograph of SiO₂ nanoparticles, (b) TEM micrograph of GO sheets.

ساده مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از ذرات سیلیکای کروی و اکسید گرافن استفاده شده در تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲-۲- آماده سازی سیال غلیظ‌شونده برشی و آغشته سازی پارچه‌ها
 نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق به شرح زیر طراحی شدند:

- نمونه با کد شناسایی اِن‌اف: پارچه ساده
- نمونه با کد شناسایی اِف‌اس: پارچه آغشته به سیال غلیظ‌شونده برشی (پارچه + پلی‌اتیلن گلايکول (۶۵ درصد وزنی) + سیلیکای کروی (۳۵ درصد وزنی))
- نمونه با کد شناسایی اِف‌اس‌جی: پارچه آغشته به سیال غلیظ‌شونده برشی حاوی اکسید گرافن (پارچه + پلی‌اتیلن گلايکول (۶۴٫۸ درصد وزنی) + سیلیکای کروی (۳۵ درصد وزنی) + اکسید گرافن (۰٫۲ درصد وزنی))

برای ساخت اِس‌تی‌اف، ذرات سیلیکای کروی توسط همزن مکانیکی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه درون سیال پلی‌اتیلن گلايکول پخش شد. افزودن گرافن سبب افزایش ویسکوزیته سیال می‌شود. بنابراین، به منظور سهولت در ساخت سیال چند ذره، ابتدا اِس‌تی‌اف با اتانول با نسبت حجمی ۱ به ۳ ترکیب می‌شد و سپس، حجم مورد نیاز از سوسپانسیون اکسید گرافن به درون ترکیب اِس‌تی‌اف و اتانول اضافه می‌شد. آغشته‌سازی پارچه به اِس‌تی‌اف با ویسکوزیته بالا بسیار مشکل است. بنابراین، اِس‌تی‌اف را با الکل با نسبت حجمی ۱ به ۳،

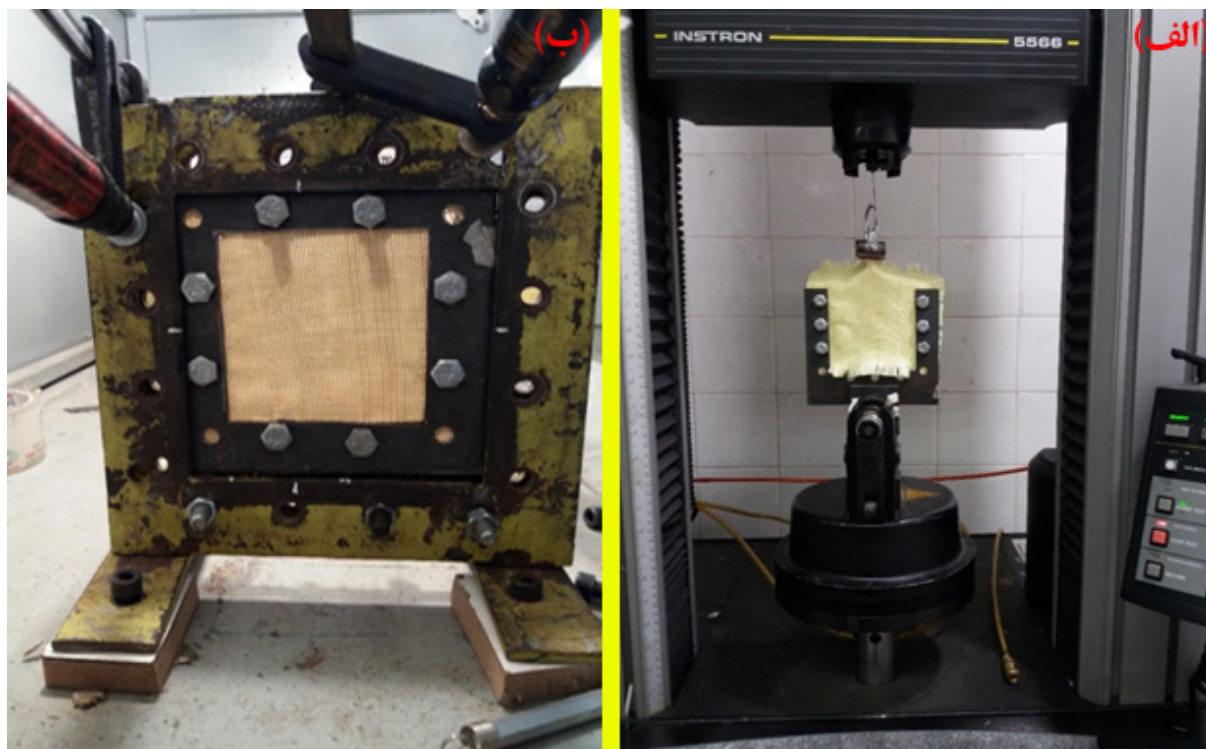
تناقضات و روشن شدن ابعاد این موضوع، نیازمند آزمایش‌های جدید و بررسی پارامترهای مؤثر است. لذا در این تحقیق، از سوسپانسیون پایه آبی اکسید گرافن (جی‌اُو^۱) به عنوان افزودنی در سیال غلیظ‌شونده برشی استفاده شد و تأثیر آن بر رفتار پارچه کولار در ضربه بالستیک به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. پارچه کولار به نمونه‌های مختلف اِس‌تی‌اف آغشته شد و برای ارزیابی اثر اِس‌تی‌اف در اصطکاک، آزمون بیرون‌کشی الیاف انجام شد. همچنین نمونه‌های مختلف تحت ضربه بالستیک قرار گرفتند و جذب انرژی و مُد شکست بررسی شد. با توجه به نتایج منتشر شده در تحقیقات گذشته [۲۶] مبنی بر عملکرد بهتر نمونه اِس‌تی‌اف حاوی سیلیکای کروی نسبت به سیلیکای فیوم، لذا در این تحقیق از ذرات سیلیکای کروی استفاده شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

از نانو ذرات سیلیکای کروی با متوسط اندازه ذرات ۳۰-۴۰ نانومتر و پلی‌اتیلن گلايکول با وزن مولکولی ۴۰۰ گرم بر مول (مرک، آلمان) برای ساخت اِس‌تی‌اف استفاده شد. برای ذرات مکمل، اکسید گرافن (کلوئید آبی) با اندازه جانبی صفحات ۳-۷ میکرومتر و غلظت ۵ گرم بر لیتر (شرکت نانومواد گستران پارس، ناماگو، ایران) تأمین شد. اتانول (شرکت دکتر مجللی، ایران) برای رقیق‌سازی سیال استفاده شد. پارچه آرامید (کولار ۴۹) با چگالی ۲۰۰ گرم بر متر مربع و بافت

1 Graphene Oxide (GO)



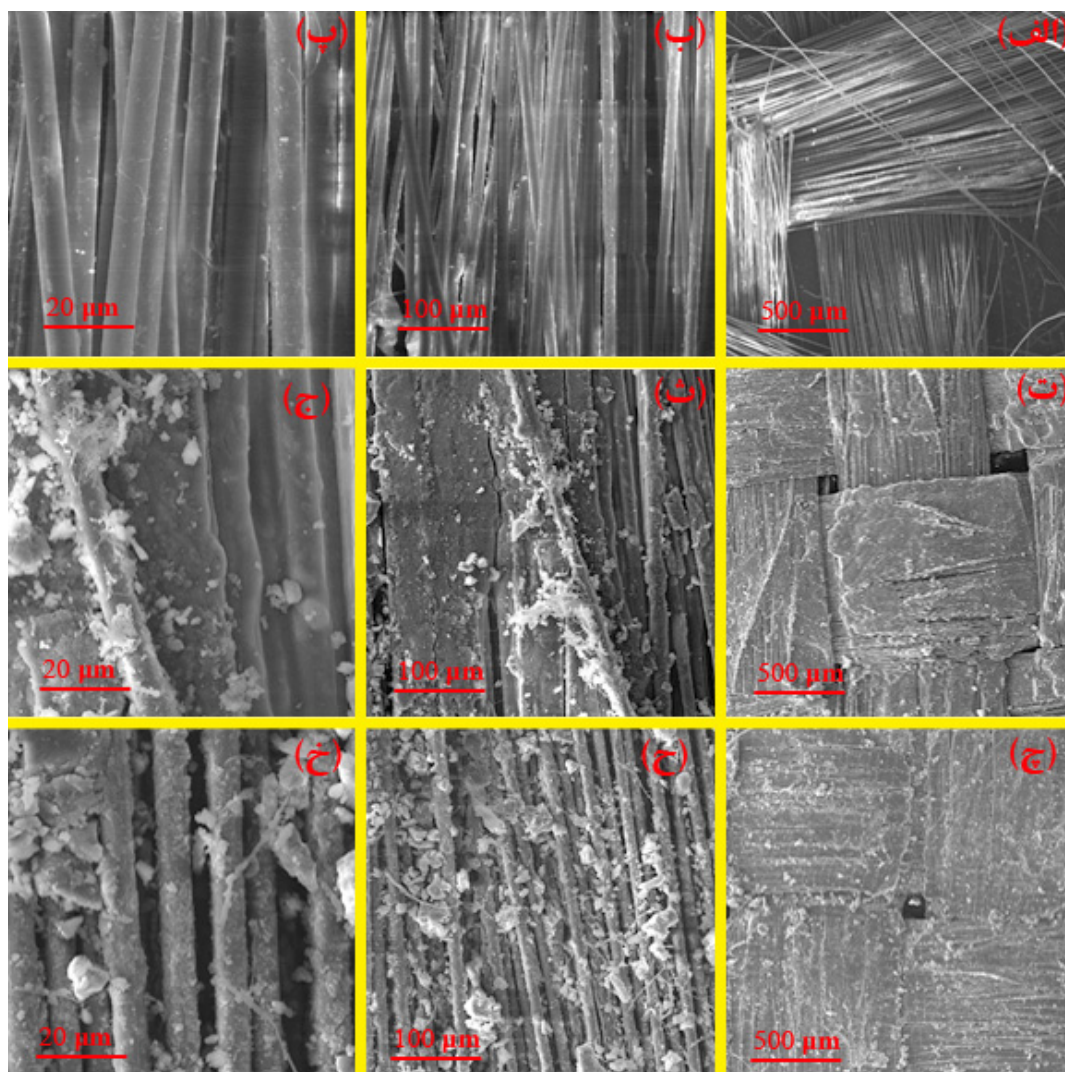
شکل ۲. قرارگیری پارچه بین دو فیکسچر در آزمون (الف) بیرون کشی و (ب) ضربه سرعت بالا.
Fig. 2. Holding the fabric in the fixtures in the (a) yarn pull-out test and (b) high-velocity impact test.

ابتدا برای حذف اثر چروکیدگی پارچه، جابجایی کمی به نمونه اعمال می‌شود. این آزمون در دستگاه کشش (اینسترون، مدل ۵۵۶۶ با ظرفیت بارگذاری ۶۰ نیوتن) در سه سرعت ۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. این آزمون برای هر نمونه ۵ بار تکرار شد. شکل ۲ (الف) پیکربندی دستگاه و نحوه قرارگیری نمونه در آن را نشان می‌دهد. آزمون ضربه سرعت بالا توسط دستگاه تفنگ گازی با سرعت ۲۳۵ متر بر ثانیه در پژوهشگاه پلیمر انجام شد. در این دستگاه گلوله در لوله تفنگ قرار داده شده و سپس توسط هوای فشرده پرتاب می‌شود. میزان فشار هوا تعیین کننده سرعت ورودی برای پرتاب گلوله به سمت نمونه است. بنابراین با استفاده از تنظیم کننده فشار، هوا را به فشار دلخواه رسانده و با شیر سلونویدی هوا آزاد می‌شود. تمام نمونه‌ها به ابعاد 14×14 سانتیمتر مربع به صورت تک لایه توسط فیکسچری گرفته شد تا از لغزش نمونه‌ها حین برخورد گلوله جلوگیری شود (شکل ۲ (ب)). پس از برخورد گلوله به نمونه و خروج از آن، سرعت خروجی به کمک یک دیود ساطع کننده نور (کرونوگراف) اندازه‌گیری می‌شود. قطر پرتابه ۸٫۷۴ میلی‌متر و جرم آن ۲٫۷۱ گرم بود. برای بررسی پخش ذرات سیلیکا و ارزیابی سطح شکست

که به عنوان نسبت بهینه گزارش شده است [۲۷ و ۲۸]، ترکیب می‌کنیم. برای نمونه اِف‌اس‌جی که دارای اکسید گرافن است، الکل در حین ساخت نمونه اضافه شد. سپس پارچه‌ها به مدت ۳ ساعت در حمام سیال غوطه‌ور شدند، و مقدار اِف‌اس‌جی اضافی با کمک یک غلطک خارج شد. برای حذف الکل و آب موجود در اکسید گرافن، نمونه‌ها به مدت ۱۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در آن قرار داده شدند. جرم پارچه‌ها برای محاسبه جذب انرژی ویژه در آزمون بالستیک اندازه‌گیری شد. جرم پارچه ساده ۳٫۳ گرم و جرم پارچه آغشته به اِس‌تی‌اف ۶ گرم بود. لازم به ذکر است که جرم پارچه‌ها با افزودن اکسید گرافن به اِس‌تی‌اف تغییر محسوسی نداشت.

۳-۲- آزمون‌ها

آزمون بیرون کشی الیاف برای بررسی اصطکاک درون نمونه‌ها در دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر انجام شد. تمام نمونه‌ها به ابعاد 14×8 سانتیمتر مربع بریده شد و بین دو فیکسچر قرار داده شد. فیکسچر در فک پایین بسته می‌شود و سپس الیاف میانی پارچه که از فیکسچر پایین جدا شده است توسط فک بالایی گرفته می‌شود.



شکل ۳. تصاویر اس‌ای‌ام از سطح پارچه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف. (الف، ب، پ) پارچه ساده، (ان‌اف؛ ت، ث، ج) پارچه آغشته به سیال برشی، (ف‌اس؛ چ، ح، خ) پارچه آغشته به سیال برشی حاوی اکسید گرافن، (ف‌اس‌جی).

Fig. 3. SEM images of fabric surface at different magnifications. (a, b, c) neat fabric (NF); (d, e, f) STF-impregnated fabric (FS); (g, h, i) STF/GO-impregnated fabric (FSG).

همچنین صفحات تقریباً تک لایه گرافن در این کار مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲-ب) که ضخامتی در حدود ۱ نانومتر دارند، مشاهده آنها در تصاویر میکروسکوپ اس‌ای‌ام دشوار می‌باشد.

۳-۲- نتایج آزمون بیرون‌کشی الیاف

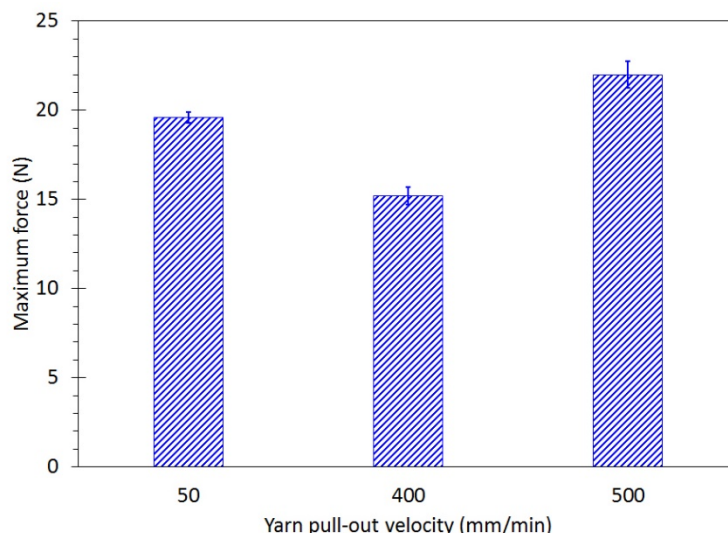
رفتار رئولوژی معیار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار بالستیکی نمی‌باشد و تنها بررسی رفتار اصطکاکی قادر به پیش‌بینی رفتار بالستیک است [۶-۸]. آزمون بیرون‌کشی الیاف برای درک رفتار اصطکاک پارچه استفاده شد. ابتدا، آزمون بیرون‌کشی الیاف برای نمونه پارچه آغشته به اس‌تی‌اف خالص در سه سرعت ۵۰، ۴۰۰ و

نمونه‌ها پس از آزمون ضربه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (اس‌ای‌ام) از نمونه‌ها پس از اعمال پوشش طلا تهیه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصات سطح پارچه آغشته به سیال غلیظ‌شونده برشی

شکل ۳ تصاویر اس‌ای‌ام از سطح ان‌اف، ف‌اس، و ف‌اس‌جی را در سه بزرگنمایی مختلف نشان می‌دهد. پخش ذرات سیلیکا در پارچه‌های آغشته به سیال برشی به خوبی مشاهده می‌شود که آغشته‌سازی مناسب پارچه‌ها را تأیید می‌کند. با توجه به این که غلظت ذرات گرافن در مقایسه با ذرات سیلیکا بسیار کم است و



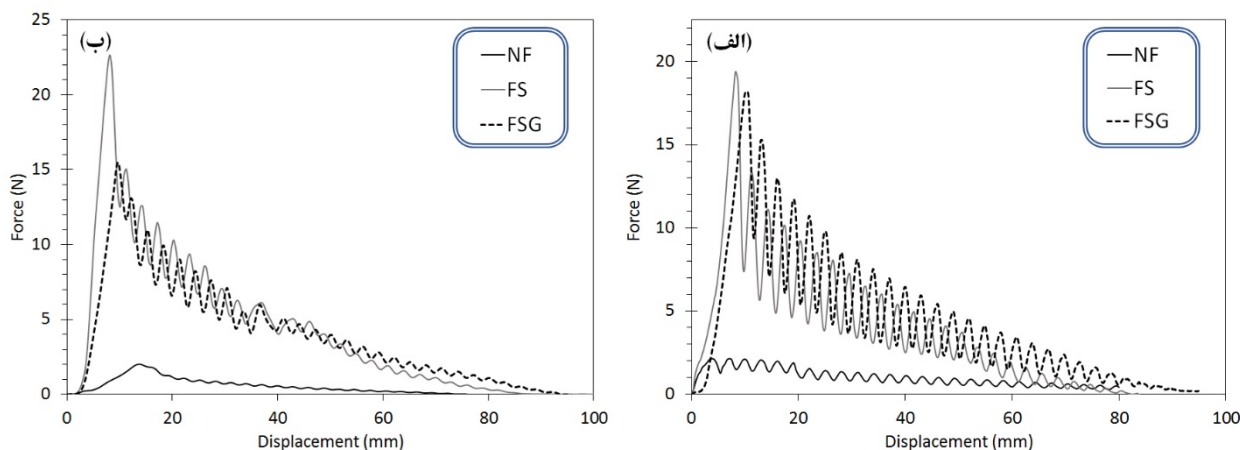
شکل ۴. بیشینه نیرو در آزمون بیرون کشیدن الیاف برای سه سرعت مختلف در خصوص نمونه اِفاِس.
Fig. 4. Maximum force in yarn pull-out test for the sample FS at three velocities.

برش در آزمون بالستیک در حدود 26887.9 یک بر ثانیه است، که از تقسیم سرعت پرتابه (235 متر بر ثانیه) به قطر پرتابه (8.74 میلیمتر) بدست می‌آید. گورگن و کوشان [۲۱] نیز از این روش برای محاسبه نرخ برش در آزمون بالستیک استفاده کردند. نمودار نیرو-جابجایی برای هر سه نمونه پارچه در دو سرعت 50 و 500 میلیمتر بر دقیقه در شکل ۵ نشان داده شده است.

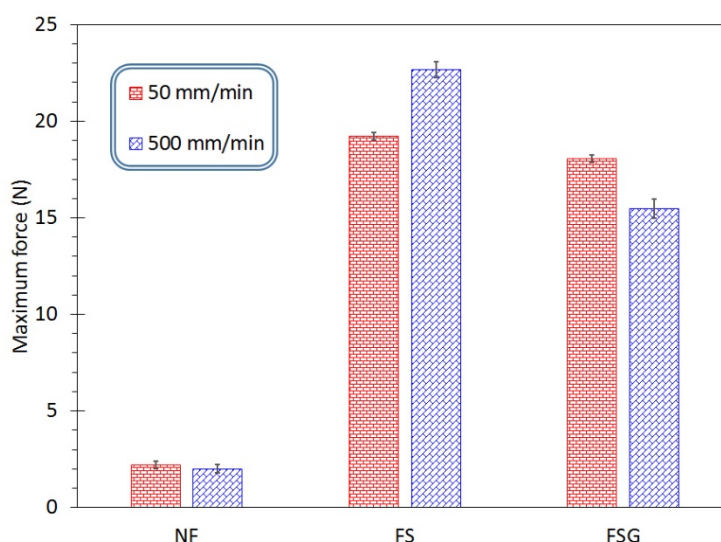
افزایش نیروی بیشینه دلیلی بر افزایش اصطکاک است؛ بنابراین برای مقایسه دقیق‌تر، بیشینه نیرو برای نمونه‌های مختلف از شکل ۵ استخراج و در شکل ۶ رسم شده است. در این شکل مشخص است که نیروی بیرون‌کشی الیاف برای پارچه‌های تقویت شده (نمونه‌های اِفاِس و اِفاِس‌جی) از سرعت بیرون‌کشی تأثیر می‌پذیرد، در حالی که نیروی بیرون‌کشی برای پارچه ساده (نمونه اِن‌اِف) مستقل از سرعت بیرون‌کشی است. در نمونه اِفاِس، وقتی الیاف آغشته به سیال اِس‌تی‌اِف از درون پارچه بیرون کشیده می‌شود، ویسکوزیته افزایش می‌یابد و حرکت الیاف را محدود می‌کند، که موجب افزایش نیروی بیرون‌کشی خواهد شد. اما در نمونه اِفاِس‌جی که سیال برشی اِس‌تی‌اِف حاوی اکسید گرافن است، کاهش نیروی بیشینه مشاهده شد (حدود 26.5 درصد افت نیرو) که حاکی از کاهش رفتار غلیظ‌شوندگی و سهولت بیشتر خروج الیاف می‌باشد. پیش‌تر محققین دیگر نیز نقش اکسید گرافن در تخریب رفتار غلیظ‌شوندگی برشی را گزارش کرده‌اند [۲۷]. گرافن خواص یکتایی دارد که برای کاربردهایی

500 میلیمتر بر دقیقه انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در مقایسه با سرعت 50 میلیمتر بر دقیقه، بیشینه نیرو در سرعت 400 میلیمتر بر دقیقه کاهش و در سرعت 500 میلیمتر بر دقیقه افزایش یافته است. علی‌کرمی و همکاران [۲۹] آزمون کشش را در سه سرعت مختلف برای پارچه ساده و تقویت شده با سیال غلیظ‌شونده برشی انجام دادند و دریافتند که افزایش سرعت بیرون کشیدن الیاف از پارچه حاوی اِس‌تی‌اِف منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌شود، چرا که نرخ کرنش‌های اعمالی در منطقه نرم شوندگی منحنی آزمون رئولوژی قرار داشت. همچنین اگر سرعت بیرون‌کشی الیاف به گونه‌ای باشد که نرخ کرنشی اعمالی به سیال درون پارچه بیش از نرخ کرنش بحرانی در آزمون رئولوژی باشد (نرخ کرنشی بحرانی مقداری است که پدیده غلیظ‌شوندگی در آن آغاز می‌شود)، بیشینه نیرو افزایش می‌یابد [۱۸].

در نتیجه، می‌توان گفت که نرخ کرنش در سرعت 400 میلیمتر بر دقیقه از نرخ کرنش بحرانی کمتر بود بنابراین، نیروی بیشینه کاهش یافت. از طرف دیگر، نرخ کرنش در سرعت 500 میلیمتر بر دقیقه از نرخ کرنش بحرانی بیشتر بوده است، بنابراین نیروی بیشینه افزایش یافت. از آنجا که نرخ کرنش اعمالی در آزمون بالستیک بسیار بزرگتر از نرخ کرنش بحرانی است، برای پیش‌بینی بهتر رفتار بالستیک، سرعت 500 میلیمتر بر دقیقه برای بقیه آزمون‌های بیرون‌کشی انتخاب شد. وقوع غلیظ‌شوندگی در شرایط بالستیک محتمل است زیرا نرخ



شکل ۵. نتایج آزمون بیرون کشی نمونه‌ها در سرعت (الف) ۵۰ و (ب) ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.
 Fig. 5. The results of pull-out test at velocity of (a) 50 and (b) 500 mm/min.



شکل ۶. مقادیر بیشینه نیرو برای نمونه‌های مختلف در دو سرعت مختلف در آزمون بیرون کشیدن الیاف.
 Fig. 6. Maximum force values for different samples at two velocities in yarn pull-out test.

۳-۳ نتایج آزمون ضربه سرعت بالا (شلیک بالستیک)

آزمون ضربه برای تمامی نمونه‌ها انجام شد، و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تحلیل عملکرد بالستیکی نمونه‌ها، سرعت خروجی، جذب انرژی، درصد تغییرات انرژی و جذب انرژی ویژه محاسبه شد. جذب انرژی از تغییرات انرژی جنبشی گلوله با استفاده از معادله (۱) تعریف شده است:

$$\Delta k = \frac{1}{2} m (v_{in}^2 - v_{ex}^2) \quad (1)$$

که به اصطکاک پایین نیاز است، مناسب تشخیص داده می‌شود. گرافن یکی از مستحکم‌ترین موادی است که تا به حال اندازه گیری شده است (مدول یانگ ۱ تراپاسکال) [۳۰]؛ همچنین، گرافن در مقابل گازها و مایعات نفوذناپذیر است لذا فرایند خوردگی و اکسایش که منجر به تخریب سطوح سایشی می‌شود به آرامی صورت می‌گیرد. اما گرافن ماده‌ای دو بعدی با سطح لغزنده مملو از اتم‌های کربن است که قابلیت برش و لغزش آسان روی آن فراهم می‌شود. لذا می‌تواند موجب کاهش اصطکاک نیز بشود [۳۱].

جدول ۱. نتایج آزمون شلیک بالستیک.

Table 1. The results of ballistic impact test.

درصد تغییرات	جذب انرژی ویژه	جذب انرژی (ژول)	میانگین سرعت خروجی (متر بر ثانیه)	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	کد نمونه
انرژی نسبت به پارچه ساده	(ژول بر گرم بر سانتیمتر مربع)				
-	۷۱۳٫۹	۱۲٫۰	۲۱۵٫۳	۲۳۵	ان‌اف
+۲۵٫۸	۴۹۴٫۲	۱۵٫۱	۲۰۹٫۹	۲۳۵	اف‌اس
+۲۳٫۳	۴۸۳٫۱	۱۴٫۸	۲۱۰٫۵	۲۳۵	اف‌اس‌جی

مقاومت ضربه تأثیر چندانی ندارد. لی و همکاران [۳۶] برای اثبات این بحث، عملکرد بالستیکی کولار آغشته شده به اتیلن گلاکول خالص را بررسی کردند و نشان دادند که با وجود افزایش جرم، عملکرد پارچه کامپوزیتی از پارچه ساده کمتر می‌شود. این افت خواص را می‌توان ناشی از اثرات روانکاری که اصطکاک بین الیاف حین کشیده شدن را کاهش می‌دهد، دانست.

اگرچه نمونه دارای اس‌تی‌اف جذب انرژی را بهبود داده است، اما به خاطر غلظت بالای آن (۳۵ درصد)، جرم پارچه حدود ۸۲ درصد پس از آغشته‌سازی زیاد شد. در نتیجه، جذب انرژی ویژه کم شده است (جدول ۱) و عملاً تقویت پارچه با اس‌تی‌اف کارایی لازم در سرعت بالا را ندارد. افزودن گرافن جرم پارچه را چندان تغییر نمی‌دهد. از سوی دیگر، گرافن عملکرد پارچه را تضعیف کرده است و جذب انرژی ویژه نیز کاهش یافته است.

شکل ۷ تصویر نقطه خروج پرتابه از نمونه‌های پارچه‌ای را نشان می‌دهد و از آن می‌توان مُد شکست را که اهمیت اثر اصطکاک را آشکار می‌سازد، تشخیص داد. از جمله مکانیزم‌های شکستی که در آزمون‌های نفوذ، کشش الیاف و ضربه بالستیک وجود دارد می‌توان به باز شدن چروکیدگی^۲، پنجره‌های شدن، خروج الیاف، و گسیختگی کششی، برشی و فشاری الیاف است. این مکانیزم‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف) مکانیزم‌های وابسته به خواص مکانیکی الیاف رشته‌ها و ب) مکانیزم‌های وابسته به حرکت الیاف و رشته‌ها [۱۵]. برای مثال، گسیختگی‌های کششی، برشی و فشاری بیشتر به خواص مکانیکی الیاف وابسته است. در مقابل، پنجره‌ای شدن، سُرد خوردن الیاف و خروج آن را می‌توان به طور مستقیم با محدود کردن حرکت نسبی الیاف روی یکدیگر اصلاح کرد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد

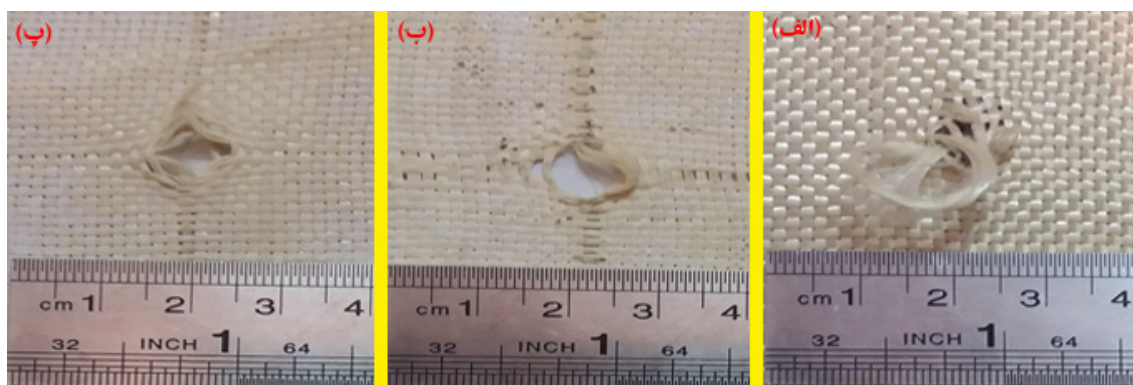
که v_{in} و v_{ex} به ترتیب جرم گلوله، سرعت ورودی پرتابه و سرعت خروجی پرتابه می‌باشند.

در مقایسه با پارچه ساده، نمونه اف‌اس (پارچه آغشته به اس‌تی‌اف) جذب انرژی در آزمون بالستیک را به میزان ۲۵٫۸ درصد افزایش داد. ذرات سخت سیلیکا با ایجاد سطحی با پستی بلندی‌های ریز میکروسکوپی^۱ مانع حرکت نسبی الیاف می‌شوند، به نحوی که یک نافذ خارجی، دشوارتر از پارچه ساده در آن نفوذ می‌کند. به علاوه، پارچه‌های تقویت شده با اس‌تی‌اف به علت پوشاندن فاصله‌های خالی، مانند سازه‌های یکپارچه عمل می‌کنند بدین معنی که برخلاف پارچه ساده که تنها الیاف‌های درگیر در ضربه مقاومت می‌کنند، در اینجا الیاف ثانویه نیز در جذب انرژی مشارکت دارند، در نتیجه انرژی در سطح وسیع‌تری پخش شده و جذب انرژی افزایش می‌یابد. بنابراین، پارچه‌های پوشش داده شده با اس‌تی‌اف مقاومت نفوذ و جذب انرژی بیشتری دارند [۳۲-۳۵]. مطابق جدول ۱، نمونه اف‌اس‌جی (پارچه آغشته به اس‌تی‌اف حاوی افزودنی گرافنی) نیز جذب انرژی را نسبت به پارچه ساده به میزان ۲۳ درصد افزایش داده است، اما این مقدار افزایش جذب انرژی (اثربخشی) نسبت به نمونه فاقد گرافن (اف‌اس) افت کرده است. در شکل ۶ نیز دیده شد که افزودن گرافن موجب کاهش نیروی بیشینه در آزمون بیرون کشیدن الیاف در مقایسه با نمونه حاوی نانوسیال سیلیکا و فاقد گرافن (اف‌اس) به اندازه حدود ۲۶٫۵ درصد شد. در آزمون ضربه سرعت بالا نیز مقدار درصد تغییرات جذب انرژی برای نمونه اف‌اس‌جی نسبت به نمونه اف‌اس حدود ۲٫۲ درصد کاهش یافته است که با روند نتایج در شکل ۶ نیز منطبق است. لذا شواهد حاکی از اثر تضعیفی گرافن در سیال برشی دارد.

نکته مهم آن است که افزایش جرم پارچه تقویت شده در بهبود

2 Yarn uncrimping

1 Asperity



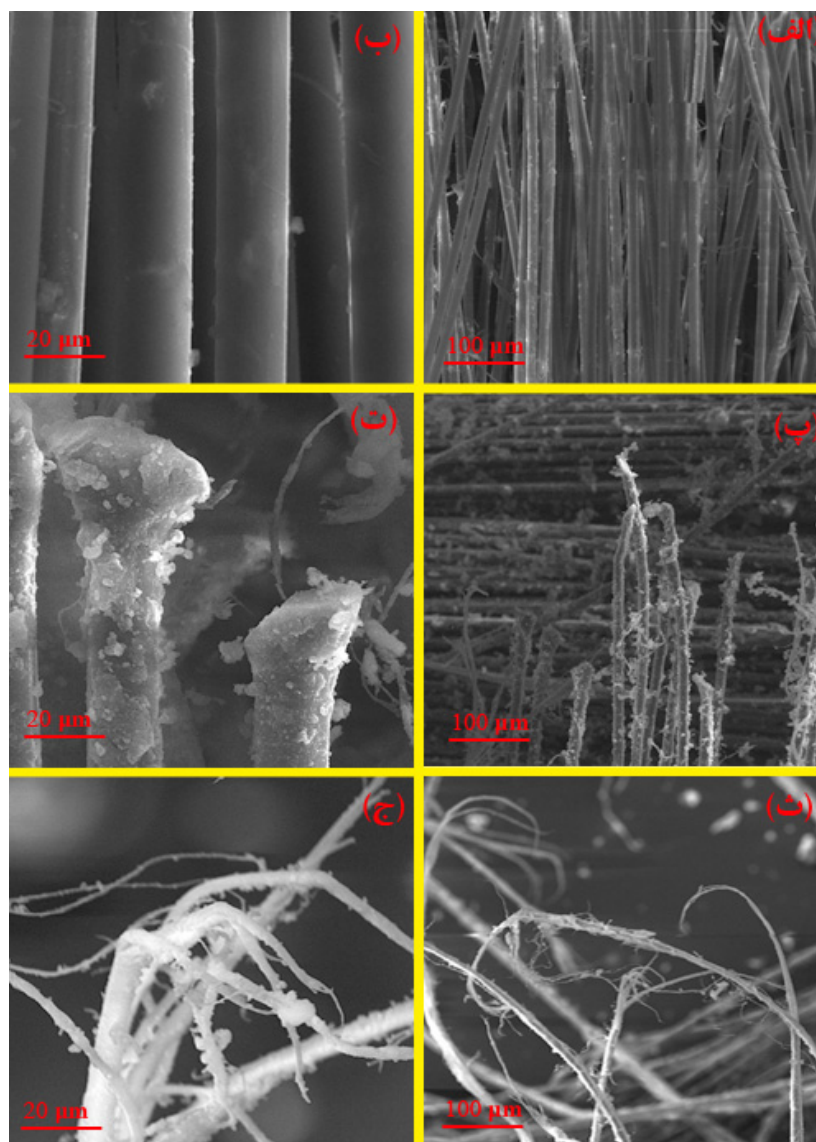
شکل ۷. تصویر دیجیتالی از سطح عبور پرتابه از درون نمونه‌ها. (الف) پارچه ساده (ان‌اف)، (ب) پارچه آغشته به سیال برشی (اف‌اس)، (پ) پارچه آغشته به سیال برشی حاوی اکسید گرافن (اف‌اس‌جی).

Fig. 7. Digital images from perforation point on the (a) neat fabric (NF), (b) STF-impregnated fabric (FS), and (c) STF/GO-impregnated fabric (FSG).

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد نتایج متناقضی در خصوص نقش افزودنی‌های کربنی (از جمله گرافن و نانولوله کربنی) مشاهده شده است. برای مثال، ماخلینگ و همکاران [۳۷] گزارش کردند که افزودنی گرافن سبب تقویت پارچه در برابر ضربه سرعت پایین نسبت به پارچه دارای اس‌تی‌اف خالص می‌شود. از سوی دیگر، وانگ و همکاران [۲۴] مشاهده کردند که گرافن باعث کاهش نیروی بیشینه در آزمون نفوذ شبه استاتیک می‌شود. حسن زاده و همکاران [۲۵] افزودنی نانولوله کربنی را نسبت به پارچه حاوی سیال غلیظ‌شونده برشی مخرب دانستند، در حالی که لیو و همکاران [۳۸] مشاهده کردند که سرعت حد بالستیک نمونه دارای نانولوله کربنی در مقایسه با سیال غلیظ‌شونده برشی خالص افزایش می‌یابد. همین تحقیق، اکسید گرافن را دارای اثری مثبت در بهبود مقاومت بالستیک معرفی کرده است [۳۸]. در تحقیق حاضر، اکسید گرافن اثر مخرب در نیروی بیرون‌کشی و ضربه سرعت بالا نشان داد، به نحوی که جذب انرژی در آزمون بالستیک در پارچه حاوی افزودنی اکسید گرافن کمتر از پارچه دارای اس‌تی‌اف خالص بود. یافتن دلیل این قبیل تناقضات در پژوهش‌های علمی کار دشواری است، اما شاید بتوان به برخی موارد مؤثر اشاره کرد. به عنوان مثال، برخی جزئیات در روش ساخت نمونه‌ها و نوع ماده بسیار حائز اهمیت است. اکسید گرافن مورد استفاده در مرجع [۳۸] به صورت کلوئید در آب نبود و برای حذف کل، پارچه فقط به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در آن قرار داده شد. اما در تحقیق حاضر، از سوسپانسیون پایه

که جایگذاری ذرات درون پارچه‌ها چه به صورت مرطوب یا خشک مقاومت بالستیک را افزایش می‌دهد. این ازدیاد مقاومت به افزایش خواص مکانیکی الیاف مربوط نیست زیرا در آزمون کشش الیاف، تنش تسلیم الیاف ساده با الیاف آغشته به سیال غلیظ‌شونده برشی تقریباً یکسان است. بنابراین، بهبود عملکرد پارچه‌ها را می‌توان به کاهش حرکت نسبی الیاف مرتبط دانست. مطابق شکل ۷ (الف)، مُد غالب در پارچه ساده، پدیده خروج الیاف است. قطر نفوذ کننده بسیار بزرگتر از پهنای الیاف است، پس منطقه باز شده بین الیاف سُر خورده به اندازه‌ای نیست که پرتابه بر خلاف اثر پنجره‌ای از آن عبور کند. از طرف دیگر، با وجود اصطکاک الیاف در نمونه‌های دارای سیال برشی تک ذره‌ای و چند ذره‌ای خروج الیاف کمتر می‌شود و شکست الیاف دیده می‌شود (شکل ۷ (ب و ج)).

ریزساختار الیاف‌ها پس از شلیک در نقطه عبور پرتابه با تصویربرداری الکترونی (اس‌ای‌ام) بررسی شد (شکل ۸). اصطکاک بین رشته‌ها در پارچه ساده کم است، و الیاف در منطقه ضربه بدون اینکه مقاومتی نشان دهد به همراه پرتابه حرکت می‌کند و از پارچه خارج می‌شود؛ لذا شکست الیاف دیده نمی‌شود. با آغشته کردن پارچه‌ها به اس‌تی‌اف خالص و اس‌تی‌اف حاوی گرافن، اصطکاک زیاد شده و چندین الیاف در کنار هم تنش‌های ناشی از برخورد پرتابه را تحمل می‌کنند. اصطکاک در نمونه‌های تقویت شده نقش خود را به خوبی ایفا می‌کند و مانع از جابجایی نسبی الیاف می‌شود لذا تنش‌ها در الیاف به مقاومت نهایی می‌رسد و می‌شکند.



شکل ۸. ریزساختار SEM در بزرگنمایی‌های مختلف از الیاف پارچه‌ها پس از شلیک پرتابه. (الف و ب) پارچه ساده (ان‌اف)، (پ و ت) پارچه آغشته به سیال برشی (اف‌اس)، (ث و ج) پارچه آغشته به سیال برشی حاوی اکسید گرافن (اف‌اس‌جی).

Fig. 8. SEM micrographs of the fabrics after projectile shooting. (a, b) neat fabric (NF), (c, d) STF-impregnated fabric (FS), and (e, f) STF/GO-impregnated fabric (FSG).

توانایی بیشتری برای تغییر فاز دارد و ذرات در منطقه وسیع‌تری متراکم می‌شوند و لذا الیاف‌های بیشتری در مقابل پرتابه مقاومت می‌کنند [۳۸]. اما بر اساس تحقیقات دیگر [۱۱]، آزمون بیرون‌کشی الیاف و خواص موجود در سیال غلیظ‌شونده برشی عامل تعیین کننده عملکرد پارچه در آزمون ضربه می‌باشد. لذا همان‌گونه که پیشتر ذکر شد در این تحقیق، تضعیف رفتار بالستیکی پارچه در حضور گرافن به کاهش نیروی بیشینه در آزمون بیرون‌کشی الیاف که به دلیل خاصیت روانسازی گرافن اتفاق می‌افتد نسبت داده شد.

آبی اکسید گرافن بهره گرفته شد و لذا برای تبخیر آب و الکل، پارچه به مدت ۱۴ ساعت در همان دما قرار داده شد که این امر ممکن است در خواص نهایی اثرگذار شود. یادآور می‌شود که لیو و همکاران [۳۸] افزایش مقاومت به ضربه در حضور گرافن را به خواص ویسکوزیته در آزمون رئولوژی نسبت می‌دهند و اکسید گرافن را عامل برهمکنش قوی بین نانوذرات معرفی می‌کند که می‌تواند منجر به ایجاد رفتار غلیظ‌شوندگی در نرخ برش پایین شود. بنابراین، وقتی پارچه تحت ضربه قرار می‌گیرد، سیال غلیظ‌شونده

Journal of Impact Engineering, 28(2) (2003) 207-222.

- [2] V. Shim, Y. Guo, V. Tan, Response of woven and laminated high-strength fabric to oblique impact, International journal of impact engineering, 48 (2012) 87-97.
- [3] A. Majumdar, B.S. Butola, A. Srivastava, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials, Materials & Design, 51 (2013) 148-153.
- [4] Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, A numerical and experimental analysis of the influence of crimp on ballistic impact response of woven fabrics, Composite Structures, 140 (2016) 44-52.
- [5] A. Srivastava, A. Majumdar, B.S. Butola, Improving the Impact Resistance of Textile Structures by using Shear Thickening Fluids: A Review, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 37(2) (2012) 115-129.
- [6] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 94 (2017) 50-60.
- [7] Y. Park, Y. Kim, A.H. Baluch, C.-G. Kim, Numerical simulation and empirical comparison of the high velocity impact of STF impregnated Kevlar fabric using friction effects, Composite Structures, 125 (2015) 520-529.
- [8] B.-W. Lee, C.-G. Kim, Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts, Advanced Composite Materials, 21(2) (2012) 177-192.
- [9] A.S. Lim, S.L. Lopatnikov, N.J. Wagner, J.W. Gillespie, Investigating the transient response of a shear thickening fluid using the split Hopkinson pressure bar technique, Rheologica acta, 49(8) (2010) 879-890.
- [10] A. Bragov, L. Igumnov, A.Y. Konstantinov, A. Lomunov, F. Antonov, P. Mossakovskii, Impact compressibility of a poly (ethylene glycol)-based nanocomposite fluid, Technical Physics Letters, 40(10) (2014) 923-925.
- [11] O.E. Petel, D.L. Frost, A.J. Higgins, S. Ouellet, Formation of a disordered solid via a shock-induced transition in a dense particle suspension, Physical Review E, 85(2) (2012) 021401.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، سیال غلیظشونده برشی (اس-تی-اف) تهیه شده و به پارچه کولار اضافه شد. رفتار ضربه بالستیکی برای کولار در سه حالت (۱) پارچه ساده، (۲) پارچه آغشته به اس-تی-اف، و (۳) پارچه آغشته به اس-تی-اف حاوی افزودنی اکسید گرافن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیال غلیظشونده جذب انرژی را در مقایسه با پارچه ساده ۲۵٫۸ درصد افزایش داد، اما افزودنی گرافنی سبب کاهش مقاومت پارچه دارای سیال غلیظشونده شد و درصد افزایش انرژی در مقایسه با پارچه ساده به ۲۳٫۳ درصد رسید. آزمون بیرون کشی الیاف برای کمک به تحلیل نتایج بالستیک در دو سرعت ۵۰ و ۵۰۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شد و مشخص شد بیشینه نیرو در سرعت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه برای پارچه آغشته به سیال غلیظشونده بیش از پارچه ساده است، و با افزایش سرعت بیرون کشی به ۵۰۰ میلیمتر بر دقیقه به دلیل پدیده غلیظشوندگی، بیشینه نیرو افزایش می‌یابد. اما افزودنی اکسید گرافن خروج الیاف از پارچه را تسهیل می‌کند و بیشینه نیرو در هر دو سرعت کاهش می‌یابد و این امر به منزله تخریب رفتار غلیظشوندگی توسط اکسید گرافن است. اثر تضعیفی گرافن را می‌توان به ساختار دو بعدی و سطح صاف لغزنده گرافن نسبت داد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که اکسید گرافن، افزودنی مناسبی برای تقویت مقاومت به ضربه بالستیکی برای پارچه‌های آغشته به سیال غلیظشونده برشی (اس-تی-اف) نیست. برای درک بهتر مکانیزم‌های جذب انرژی، سطح سوراخ شدن نمونه‌ها در آزمون شلیک بالستیک بررسی شد. خروج الیاف به وضوح در پارچه ساده دیده می‌شود که نشان می‌دهد مقاومت کششی الیاف نقش چندانی در جذب انرژی نداشته است. اما، با حضور سیال غلیظشونده برشی در پارچه، قفل مکانیکی بین الیاف برقرار می‌شود و یک ریزساختار تقریباً یکپارچه و به هم پیوسته تشکیل می‌شود. در این حالت تنش‌های کششی در الیاف افزایش می‌یابد که منجر به شکست الیاف می‌شود. بنابراین با حضور سیال غلیظشونده ظرفیت بیشتری از پارچه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

منابع

- [1] V. Tan, C. Lim, C. Cheong, Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry, International

- [22] A. Laha, A. Majumdar, Shear thickening fluids using silica-halloysite nanotubes to improve the impact resistance of p-aramid fabrics, *Applied Clay Science*, 132-133 (2016) 468-474.
- [23] Z. Tan, W. Li, W. Huang, The effect of graphene on the yarn pull-out force and ballistic performance of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluids, *Smart Materials and Structures*, 27(7) (2018) 075048.
- [24] F.-F. Wang, Y. Zhang, H. Zhang, L. Xu, P. Wang, C.-b. Guo, The influence of graphene nanoplatelets (GNPs) on the semi-blunt puncture behavior of woven fabrics impregnated with shear thickening fluid (STF), *RSC advances*, 8(10) (2018) 5268-5279.
- [25] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitlab, H. Babaei, M. Rezaei, The influence of carbon nanotubes on quasi-static puncture resistance and yarn pull-out behavior of shear-thickening fluids (STFs) impregnated woven fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88 (2016) 263-271.
- [26] X. Feng, S. Li, Y. Wang, Y. Wang, J. Liu, Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids, *Materials & Design*, 64 (2014) 456-461.
- [27] W. Huang, Y. Wu, L. Qiu, C. Dong, J. Ding, D. Li, Tuning rheological performance of silica concentrated shear thickening fluid by using graphene oxide, *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015 (2015).
- [28] N. Kordani, A.S. Vanini, Optimizing the ethanol content of shear thickening fluid/fabric composites under impact loading, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(2) (2014) 663-667.
- [29] S. Alikarami, N. Kordani, A. SadoughVanini, H. Amiri, Effect of the yarn pull-out velocity of shear thickening fluid-impregnated Kevlar fabric on the coefficient of friction, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(8) (2016) 3559-3565.
- [30] C. Lee, Q. Li, W. Kalb, X.-Z. Liu, H. Berger, R.W. Carpick, J. Hone, Frictional characteristics of atomically thin sheets, *Science*, 328(5974) (2010) 76-80.
- [31] D. Berman, A. Erdemir, A.V. Sumant, Graphene: a new
- [12] T.A. Hassan, V.K. Rangari, S. Jeelani, Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites, *Materials Science and Engineering: A*, 527(12) (2010) 2892-2899.
- [13] Y. Xu, X. Chen, Y. Wang, Z. Yuan, Stabbing resistance of body armour panels impregnated with shear thickening fluid, *Composite Structures*, 163 (2017) 465-473.
- [14] D.P. Kalman, R.L. Merrill, N.J. Wagner, E.D. Wetzel, Effect of Particle Hardness on the Penetration Behavior of Fabrics Intercalated with Dry Particles and Concentrated Particle-Fluid Suspensions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1(11) (2009) 2602-2612.
- [15] B.A. Rosen, C.N. Laufer, D.P. Kalman, E.D. Wetzel, N.J. Wagner, Multi-threat performance of kaolin-based shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, *Proceedings of SAMPE*, 3(7) (2007).
- [16] Z. Lu, Z. Yuan, X. Chen, J. Qiu, Evaluation of ballistic performance of STF impregnated fabrics under high velocity impact, *Composite Structures*, 227 (2019) 111208.
- [17] O.E. Petel, S. Ouellet, J. Loiseau, D.L. Frost, A.J. Higgins, A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction, *International Journal of Impact Engineering*, 85 (2015) 83-96.
- [18] B.-W. Lee, I.-J. Kim, C.-G. Kim, The Influence of the Particle Size of Silica on the Ballistic Performance of Fabrics Impregnated with Silica Colloidal Suspension, *Journal of Composite Materials*, 43(23) (2009) 2679-2698.
- [19] D. P Kalman, J. B Schein, J. M Houghton, C. H N Laufer, E. D Wetzel, N. Wagner, Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications, 2007.
- [20] C.H. Nam, M.J. Decker, C. Halbach, E.D. Wetzel, N.J. Wagner, Ballistic and rheological properties of stfs reinforced by short discontinuous fibers, *Proceedings of SAMPE: New Horizons for materials and processing Technologies*. Long Beach, CA: SAMPE, (2005).
- [21] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multi-phase shear thickening fluids, *Polymer Testing*, 64 (2017) 296-306.

- Polymers, 11(5) (2010) 719-724.
- [36] Y.S. Lee, E.D. Wetzel, N.J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *Journal of materials science*, 38(13) (2003) 2825-2833.
- [37] U. Mawkhlieng, A. Majumdar, D. Bhattacharjee, Graphene Reinforced Multiphase Shear Thickening Fluid for Augmenting Low Velocity Ballistic Resistance, *Fibers and Polymers*, 22(1) (2021) 213-221.
- [38] L. Liu, M. Cai, X. Liu, Z. Zhao, W. Chen, Ballistic impact performance of multi-phase STF-impregnated Kevlar fabrics in aero-engine containment, *Thin-Walled Structures*, 157 (2020) 107103.
- emerging lubricant, *Materials Today*, 17(1) (2014) 31-42.
- [32] M. Tomita, T. Van De Ven, The structure of sheared ordered lattices, *Journal of Colloid and Interface Science*, 99(2) (1984) 374-386.
- [33] M. Alizadeh, F. Lohrasby, R. Khajavi, N. Kordani, H. Baharvandi, M. Rezanejad, Studying the mechanical properties of composites made of Kenaf-Nylon 66 fabric, silica nanoparticles, and epoxy resin, 2014.
- [34] H. Rao, M. Hosur, J. Mayo, S. Burton, S. Jeelani, *Stab Characterization of Hybrid Ballistic Fabrics*, 2009.
- [35] T.J. Kang, K.H. Hong, M.R. Yoo, Preparation and Properties of Fumed Silica/Kevlar Composite Fabrics for Application of Stab Resistant Material, *Fibers and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Naghizadeh, H. Khoramishad, M. Jalaly, A Study on the Ballistic Behavior of Kevlar Fabric Impregnated with Shear Thickening Fluid Containing Graphene Oxide Additive, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 5725-5738.

DOI: [10.22060/mej.2021.19806.7119](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19806.7119)



