

Effect of Shear Thickening Fluid on the Soft Impact Response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fibers

Maryam Zeynalnejad, Sina Jalili*

Dynamic Behavior of Materials Lab., Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology

ABSTRACT

Present study investigates the effect of the presence of shear-thickening fluid (STF) on the soft impact behavior of ultra-high-density polyethylene fibers (with trade name of Dyneema). Ballistic gelatin was used as the soft projectile material, and STF in pure and modified states was distributed by pressure between two layers of Dyneema fibers with cross-layering. To compare Dyneema targets in the absence of STF and also impregnated with it, they were loaded with soft projectiles with a mass of 5.5 g and average initial velocity of 86 m/s. The neat Dyneema fibers were permanently damaged due to perforation of the projectile with a bulge in the range of 35 mm and 54% of kinetic energy is absorbed. The presence of STF significantly increased the strength of the targets in both pure and modified conditions and the permanent bulge fell below the 3 mm. None of impregnated samples suffered from perforation due to a significant increase in interlayer friction and the extent of damage and permanent bulge was significantly reduced. In absence of the STF solvent (dried condition), the interlayer friction increased further and the samples did not experienced measurable bulge and observable damage. The results indicate the very effective performance of STF in increasing the strength of structures against soft impact, without imposing significant weight and cost penalties.

KEYWORDS

Shear-thickening fluid, soft projectile, Dyneema fibers, bird strike

* Corresponding Author: Sjalili@sut.ac.ir

1. Introduction

Soft-body impacts, including bird strikes and liquid droplet impacts, are critical design considerations in aerospace and mechanical systems. These impacts can cause severe structural damage due to the transfer of momentum over a relatively large area. Traditional approaches to improving impact resistance include increasing thickness, adding reinforcements, and using sandwich structures. However, these approaches often increase weight and reduce efficiency.

In recent years it is suggested to use fluids as the core of sandwich structures [1]. Shear thickening fluids (STFs) are a promising alternative. STFs are dense colloidal suspensions consisting of solid nanoparticles dispersed in a liquid carrier [2]. Their viscosity increases rapidly when subjected to high shear rates, enabling them to absorb and dissipate energy effectively. When impregnated into fiber structures, STF enhances inter-fiber friction and improves load distribution, leading to improved impact resistance. The first acceptable results were obtained by impregnating fabrics with this fluid in textile structures to enhance impact resistance [3]. Other studies investigated the use of STF within the core of sandwich beams with different thicknesses and increased the damping ratio of the beams by employing this fluid [4]. Bird strike simulation using the SPH approach in LS-DYNA software was performed on the aircraft wing leading edge, and the wing structure was optimized to sustain minimal damage after impact [5]. The use of Kevlar fabrics impregnated with STF and their integration with glass fiber reinforced plastic composite structures has resulted in increased energy absorption under high-velocity impacts [6].

Although STF has been widely studied in ballistic and stab protection, its effectiveness under soft impact conditions remains insufficiently explored. In the present study, the effect of using shear thickening fluid in its conventional and modified states on the behavior of targets made of ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers subjected to soft impact has been investigated. These fibers are commercially known as Dyneema. To this end, the soft projectile was fabricated using a composition of ballistic gelatin and silicone molding, and the targets were prepared through fluid impregnation using a pressure-assisted method. No other material was used in the fiber structure in order to specifically investigate the behavior resulting from the presence of STF. Finally, the results of the impact of the soft projectile fired from a gas gun are examined and discussed.

2. Materials and Experimental Method

Ballistic gelatin projectiles were fabricated to simulate soft projectiles. The average projectile mass was 5.5 g, and impacts were conducted using a gas gun with velocities ranging from 80 to 92 m/s.

Figure 1 illustrates the prepared soft projectile as well as its technical drawing.

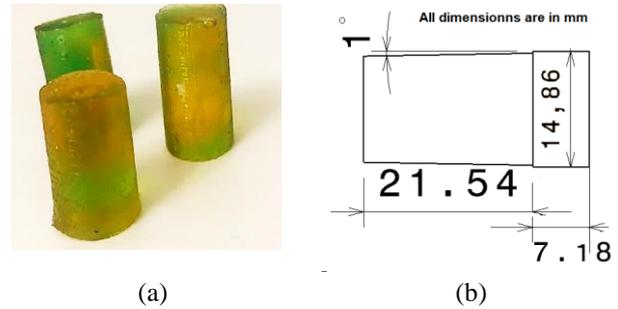


Figure 1. (a) Final prepared soft projectiles using ballistic gelatin and (b) the technical drawing of the projectile.

STF was prepared using fumed silica nanoparticles and polyethylene glycol (PEG 400) as the carrier fluid. A modified STF was also synthesized through chemical modification of PEG to enhance performance. Figure 2 depicts the nonlinear rheological behavior of synthesized STF in pure and modified conditions.

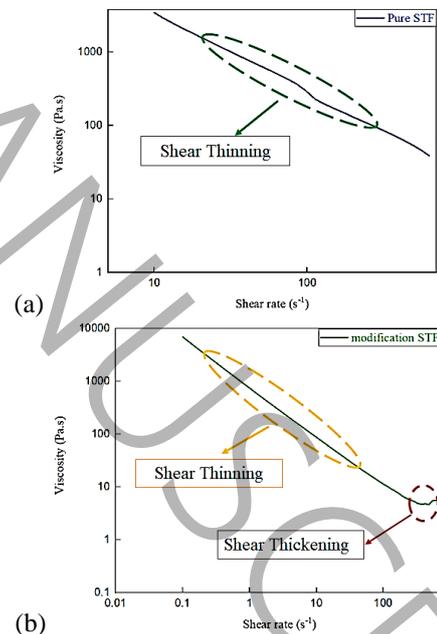


Figure 2. (a) Rheological behavior of STF in (a) pure and (b) modified conditions.

Dyneema fiber sheets were used as target materials. Two layers were arranged in a cross-ply configuration. Impregnation was performed using pressure to ensure uniform STF distribution. Some specimens were tested in wet conditions, while others were dried to remove

solvent. Three types of specimens were tested: Neat Dyneema fibers without STF, fibers impregnated with pure STF and fibers impregnated with modified STF. Impregnation was performed using pressure to ensure uniform STF distribution. Some specimens were tested in wet condition while others were dried to remove solvent.

A single-stage gas gun capable of generating medium to high velocities was used to launch soft projectiles toward the targets. This apparatus consists of a high-pressure air reservoir, a launch barrel, and a target chamber. The system is equipped with two velocity sensors at the inlet and outlet, which, in the event of target perforation and projectile passage, can be used to calculate the amount of absorbed kinetic energy.

3. Results and Discussion

The neat Dyneema specimens were perforated in all tests. Permanent bulging of approximately 35 mm was observed, and projectile exit velocity indicated that about 54% of the kinetic energy was absorbed. In contrast, STF-impregnated specimens showed dramatic improvement. No perforation occurred in any STF-treated specimen. Permanent deformation was reduced to less than 3 mm. Modified STF provided even better performance, reducing deformation to approximately 1.3 mm in wet conditions and eliminating measurable deformation in dry conditions. The improvement is primarily attributed to increased interlayer friction. STF restricts fiber movement and distributes stresses over a larger area, preventing localized failure. Drying process further increases friction by increasing nanoparticle interaction. Figure 3 (a) shows the side view of neat specimen which is thoroughly perforated by soft projectile. Also the normal view of the specimen which is impregnated by pure STF is demonstrated in figure 3 (b).

The results confirm that STF significantly enhances soft impact resistance. STF effectively improves resistance by increasing in-plane shear strength and friction. The modified STF showed superior performance due to enhanced rheological properties and stronger interaction with fibers.

4. Conclusion

This study experimentally demonstrated the effectiveness of STF in improving soft impact resistance of Dyneema fibers. Key findings include: STF prevented projectile penetration completely whereas permanent deformation was reduced by more than 90%. Also it is observed that modified STF provided the best performance. Improvements were achieved without significant weight increase. The results suggest that

STF-impregnated fiber structures are promising candidates for aerospace, protective, and energy applications where soft impacts are critical.

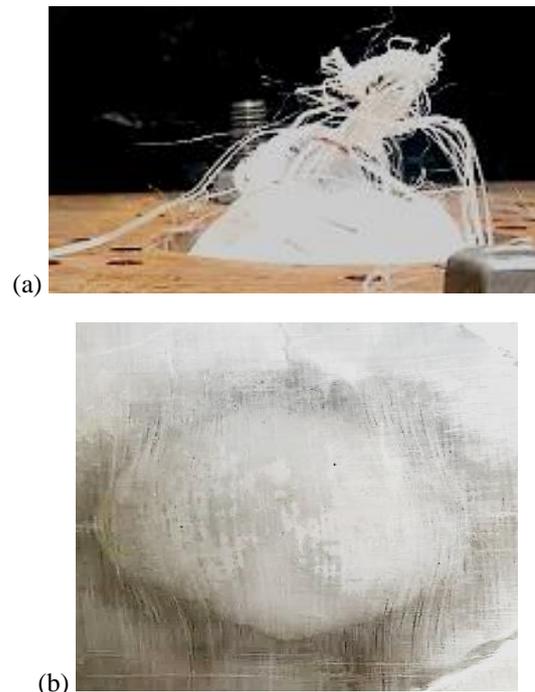


Figure 3. (a) Neat specimen perforation (b) Normal view of specimen impregnated by pure STF

4. References

1. S. Jalili, H. Alidad, Study on Energy Absorption of Water-Filled Multi-Layered Panels Subjected to High-Velocity Perforating Impacts. *International Journal of Applied Mechanics*, (2025), 2550058-2550082
2. S. Gürgeç, 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.
3. H. Taş, İ.F. Soykok, Investigation of the low velocity impact behaviour of shear thickening fluid impregnated Kevlar, hybrid (Kevlar/carbon) and carbon fabrics. *Fibers and Polymers*, 22(9) (2021) 2626-2634.
4. W. Li, K. Lin, K. Wang, B. Wang, Random vibration of sandwich beam with a shear thickening fluid core. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(25) (2024) 7336-7350.
5. H. Pahange, M.H. Abolbashri. Simulation, Analysis and Optimization of Airplane Wing Leading Edge Structure Against Bird Strike, *Scientific Research Journal of Structural and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016) 17-32.
6. E. Tang, W. Zhang, R. Wang, Y. Han, C. Chen, M. Chang, The ballistic performance of STF impregnated Kevlar fabric coating GFRP composite structure. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(30) (2024) 12364-12382.

تأثیر حضور سیال غلیظ‌شونده برشی بر رفتار الیاف پلی‌اتیلن فوق‌سنگین در برابر برخورد نرم

مریم زینال‌نژاد، سینا جلیلی*

آزمایشگاه خواص دینامیکی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول: sjalili@sut.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر اثر حضور سیال غلیظ‌شونده برشی را بر رفتار الیاف پلی‌اتیلن فوق‌سنگین (داینیما) در برابر برخورد نرم مورد بررسی قرار داده است. ژلاتین بالستیک به عنوان ماده سازنده پرتابه نرم مورد استفاده قرار گرفت و سیال در وضعیت‌های خالص و اصلاح‌شده با فشار میان دو لایه از الیاف داینیما با لایه‌چینی متقاطع توزیع شد. نمونه‌ها در شرایط بدون حضور سیال و همچنین آغشته به آن توسط پرتابه‌های نرم با جرم میانگین ۵/۵ گرم و سرعت اولیه میانگین ۸۶ متربرثانیه مورد بارگذاری قرار گرفتند. الیاف داینیما خالی در برابر برخورد نرم دچار برآمدگی ماندگار ۳۵ میلی‌متری و سوراخ‌شدگی شدند و به طور میانگین ۵۴ درصد از انرژی جنبشی اولیه پرتابه جذب گردید. حضور سیال باعث افزایش قابل ملاحظه استحکام اهداف در هر دو وضعیت خالص و اصلاح‌شده گردید و در هیچ‌یک از این نمونه‌ها، پرتابه موفق به عبور نشد و به دلیل افزایش قابل ملاحظه اصطکاک بین‌لایه‌ای گستره آسیب و برآمدگی ماندگار به طور چشم‌گیری کاهش و به میزان کمتر از ۳ میلی‌متر رسید. در شرایط سیال اصلاح شده بدون حضور حلال اصطکاک بین‌لایه‌ای افزایش بیشتری داشته و نمونه‌ها بدون برآمدگی قابل اندازه‌گیری و همچنین بدون آسیب ظاهری بودند. نتایج حاکی از عملکرد بسیار مؤثر سیال در افزایش استحکام سازه‌های مرکب در برابر برخورد نرم، بدون تحمیل وزن و هزینه قابل ملاحظه است.

کلمات کلیدی

سیال غلیظ‌شونده برشی، پرتابه نرم، الیاف داینیما، برخورد سرعت بالا، برخورد پرنده

برخورد اجسام نرم با انرژی جنبشی بالا مانند برخورد پرندگان و یا قطرات باران با سازه‌های هوایی و زمینی مانند هواپیماها یا پره‌های توربین بادی می‌توانند منجر به آسیب‌های جدی شوند. هنگامی که انعطاف‌پذیری و تغییرشکل پرتابه در هنگام برخورد قابل توجه باشد و باعث انتقال تکانه مؤثر به هدف شود، می‌توان نوع برخورد را از نوع نرم طبقه‌بندی کرد. در این نوع برخورد انتقال تکانه قابل-توجهی از پرتابه به سمت هدف صورت می‌گیرد که منجر به آسیب مانا و یا حتی سوراخ شدن هدف می‌شود. مطالعات اولیه در این زمینه با بررسی خوردگی سطوح توربین‌های بخار در اثر برخورد قطرات باران آغاز گردید. این پژوهش‌ها نشان داد که برخورد مداوم قطرات آب میعان شده می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی و کاهش کارایی تجهیزات شود [۱]. سایش و فرسایش لبه‌های توربین‌های پیشرفته‌ها به‌ویژه در شرایط جوی مختلف، یکی از چالش‌های اساسی در صنعت هوافضا و نیروگاه‌ها است. برای مقابله با این مشکل، چندین رویکرد پژوهشی و فناوریانه مانند استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش، طراحی بهینه لبه‌های توربین و استفاده از مواد مرکب و آلیاژهای پیشرفته انجام گرفته است [۲]. برخورد پرندگان همانند برخورد با مایعات، یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای هواگردها است. طبق آمار، از هر ۲۰۰۰ پرواز، یک مورد برخورد پرندگان رخ می‌دهد و این رقم به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است [۳]. مشکل برخورد پرندگان به بال‌های هواپیما نیز بررسی شده و بهینه‌سازی بال با افزایش ضخامت پوسته و همچنین تقویت زاویه روبروش انجام شده است [۴]. استفاده از مواد مرکب تقویت‌شده لانه‌زنبوری و فوم در برابر برخورد پرندگان نیز مورد بررسی قرار گرفت که منجر به بهبود مقاومت در برابر ضربه شد [۵]. برخی محققان نیز با افزودن یک جزء ساختاری بهبودیافته به لبه جلویی هواپیما، موفق شدند جذب انرژی جنبشی ناشی از برخورد را ۱۱ درصد بهبود بخشند [۶]. با شبیه‌سازی عددی برخورد پرنده به پره موتور جت، نتیجه گرفته شد که استفاده از دو الیاف به جای یک پره کامپوزیتی تک الیافی می‌تواند از لایه‌لایه شدن پوسته در حین ضربه جلوگیری کند [۷]. مطالعه دیگری استفاده از چندلایه‌های مارپیچی الهام‌گرفته از طبیعت را به جای چندلایه‌های متقاطع و شبه‌همسانگرد توصیه می‌کند که آسیب کمتری در اثر برخورد اجسام نرم نشان می‌دهند [۸]. ژائو و همکارانش توانستند با ترکیب پارچه‌های کولار با ژل ضخیم‌شونده برشی به ماده مرکب جدیدی دست یابند و اعلام کردند که به دلیل ضخیم‌شوندگی برشی ژل و افزایش اصطکاک بین الیاف، این ساختار جدید قابلیت بالایی برای ساخت انواع زرها دارد [۹]. با استفاده از نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی ضربه پرنده در یک مطالعه، بهینه‌سازی چیدمان کامپوزیتی پره‌ها با لگد انجام گرفت [۱۰]. برای دستیابی به استحکام بیشتر ریشه بال در برابر برخورد پرنده، محققان از یک چندلایه با ماده IM7/8552 و چیدمان ویژه استفاده شد [۱۱].

استفاده از ساختارهای ساندویچی برای مهار و مدیریت انرژی جنبشی ناشی از برخورد مورد توجه بوده است. تنوع مواد قابل استفاده در هسته ساختار ساندویچی گسترده وسیعی از طرح‌های مقاوم در برابر بارگذاری برخورد سخت و نرم را در اختیار محققین و طراحان گذارده است. در این میان، مواد متخلخل همچون فوم‌ها نقش پررنگی داشته‌اند و در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران مورد مطالعه تحلیلی، تجربی و عددی قرار گرفته‌اند [۱۲]، [۱۳]. در سال‌های اخیر استفاده از سیال نیز در هسته سازه‌های ساندویچی و کامپوزیتی برای کاهش آسیب برخورد پیشنهاد شده است. جلیلی و علی‌داد [۱۴] تأثیر ضخامت هسته پر از آب را در سازه ساندویچی تحت ضربه با سرعت بالا بررسی کردند. فرآیند آغشته کردن الیاف در ساختار مرکب با یک ماده سیال سبک که ویژگی ضخیم شدن برشی به هنگام بالارفتن نرخ برش دارد، می‌تواند روشی نویددهنده برای حفظ ماهیت سبک ساختار و انعطاف‌پذیری الیاف باشد. سیال غلیظ‌شونده برشی که از این به بعد به اختصار سیال نامید می‌شود، مخلوط کلئیدی متراکمی از نانوذرات در یک سیال حامل است که در آن گرانی با افزایش نرخ برشی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این خاصیت سیال باعث جذب انرژی محسوسی به هنگام برخورد می‌شود. با ظهور فناوری نانو در اواسط دهه ۱۹۹۰، محققان برای اولین بار موفق به ساخت یک سیال جدید شدند که برای توسعه مواد و سازه‌های هوشمند مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. اولین نتایج قابل قبول با آغشته کردن پارچه‌ها با این سیال در سازه‌های نساجی برای بالا بردن مقاومت در برابر برخورد به دست آمد [۱۶]. مطالعات دیگر استفاده از سیال در داخل هسته تیرهای ساندویچی با ضخامت‌های مختلف را بررسی کردند و با استفاده از این سیال نسبت میرایی تیر را افزایش دادند [۱۷]. شبیه‌سازی ضربه پرنده با رویکرد هیدرودینامیک ذرات هموار در نرم‌افزار ال‌اس-داینرا بر روی لبه حمله بال هواپیما انجام شد و بهینه‌سازی سازه بال انجام گرفت

تا پس از ضربه کمترین آسیب را متحمل شود [۱۸]. استفاده از پارچه‌های کولار آغشته به سیال و ادغام آن با ساختار کامپوزیت پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه باعث افزایش جذب انرژی در برخوردهای با سرعت بالا شده است [۱۹]. افزودن ذرات کاربرد سیلیکون به سیال‌های مبتنی بر سیلیس، عملکرد محافظتی پارچه‌های آغشته به این سیال را در برابر ضربات ناشی از میخ و چاقو افزایش داده و در عین حال انعطاف‌پذیری آنها را نیز حفظ کرده است [۲۰]. از طرفی افزودن اکسید گرافن به سیال غلیظ‌شونده برشی باعث ضعیف شدن سیال شده و سبب کاهش بیشینه نیرو در آزمون بیرون‌کشی نخ گردیده تا جایی که حرکت گلوله در پارچه آسان‌تر شده است [۲۱]. اثر افزایش کسر جرمی نانوذرات به کار رفته نسبت به سیال حامل در الیاف کولار مورد مطالعه قرار گرفته و بهبودهایی در جذب انرژی مشاهده شد [۲۲]. فرآیند ادغام سیال با غلظت کم نیز با پارچه‌های پارا-آرامید انجام شده است که عملکرد خوبی در برابر آزمایش ضربه نشان داده‌اند [۲۳]. استفاده از نانوذرات دیگر مانند دی‌اکسید سیلیکون در ساختار سیال و آغشته کردن این نوع سیال به الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت بیشتری در برابر سوراخ شدن زره‌های نرم در سناریوهای ضربه با سرعت بالا و پایین ایجاد کرده است [۲۴]. با پر کردن هسته سازه‌های ساندویچی از سیال میزان جذب انرژی نسبت به سازه‌های ساندویچی توخالی در آزمایش سقوط وزنه، افزایش قابل توجهی را نشان داده است [۲۵]. در یک پژوهش به منظور بررسی افزایش اصطکاک بین تار و پود الیاف بعد از آغشته-سازی به سیال، آزمون بیرون کشیدن نخ در سرعت‌های مختلف انجام گرفت و نتیجه حاکی از افزایش چشمگیر پارامتر اصطکاک به-حدی بود که تار و پود درهم درگیر شده و امکان جابجایی از آنها گرفته شد [۲۶].

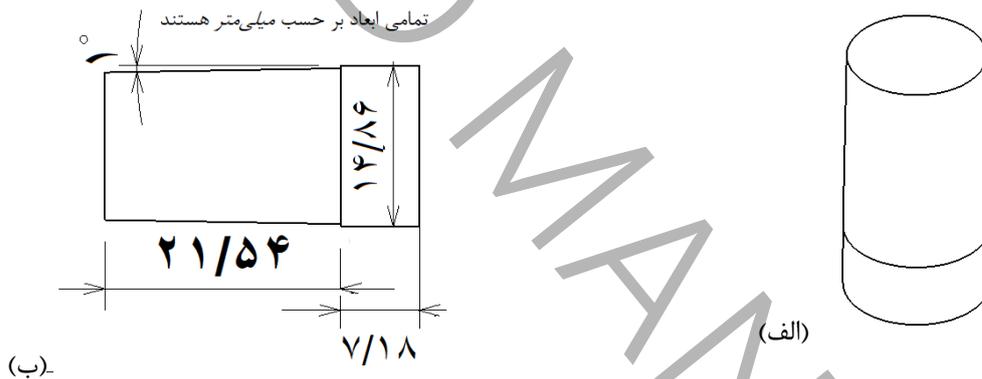
در پژوهش پیش‌رو، تأثیر استفاده از سیال غلیظ‌شونده برشی در وضعیت‌های ساده و اصلاح‌شده بر روی رفتار اهداف ساخته شده از الیاف پلی‌اتیلن فوق‌سنگین که در برابر برخورد نرم قرار گرفته‌اند، بررسی شده است. این الیاف با نام تجاری داینیما شناخته می‌شوند و از این پس برای اختصار از این نام استفاده خواهد شد. مطالعه منابع و جستجوی نویسندگان متن حاضر نشانگر آن است که تاکنون پژوهشی در زمینه رفتار الیاف آغشته‌شده به سیال که به صورت ویژه در برابر برخورد نرم قرار گرفته باشد، منتشر نشده است. از این رو پژوهش حاضر برای اولین بار به بررسی بارگذاری برخورد نرم بر روی الیاف پلی‌اتیلن فوق‌سنگین آغشته به سیال می‌پردازد. با توجه به تغییر شکل قابل توجه پرتابه نرم در هنگام برخورد، سطح بارگذاری گسترده‌تری قابل توجهی نسبت به برخورد سخت دارد و همین نکته منجر به فعالیت بیشتر تنش‌های درون‌صفحه‌ای بین‌لایه‌ای برای مقاومت در برابر نفوذ پرتابه می‌شود. این در حالی است که در برخورد سخت، تنش‌های برشی خارج‌صفحه‌ای که بسیار موضعی‌تر هستند، نقش بسیار مؤثرتری ایفا می‌کنند. بدین منظور پرتابه نرم با استفاده از ترکیب ژلاتین بالستیک و قالب‌گیری سیلیکونی ساخته شد و اهداف به روش نفوذ سیال به روش فشاری آماده شدند. در زمینه الیاف از ماده‌ای دیگر استفاده نشده است تا رفتار ناشی از حضور سیال به صورت ویژه مورد بررسی قرار گیرد. در پایان نتایج ناشی از برخورد پرتابه نرم شلیک‌شده از تفنگ گازی مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرند.

۲- فرآیند ساخت پرتابه و سیال غلیظشونده برشی

این بخش از مقاله، به بررسی فرایندهای مورد نیاز برای مطالعه تجربی اختصاص داشته و شامل ساخت ژلاتین بالستیک به عنوان ماده اصلی سازنده پرتابه نرم، آماده‌سازی سیال غلیظشونده برشی (خالص و اصلاح‌شده) و فرآیند آغشته‌سازی الیاف به سیال است.

۲-۱- ساخت پرتابه نرم

در حالت عمومی بافتار بدن موجودات زنده بسیار پیچیده و ناهمگن است و استفاده از آن به صورت مستقیم برای پژوهش‌های مرتبط با برخورد مطلوب نیست. با توجه به تشابه رفتاری ژلاتین با بافتار نرم در موجودات زنده (انسان و پرندگان) اغلب از این ماده به عنوان ماده جایگزین استفاده می‌شود. معمولاً از ژلاتینی که در مطالعات مرتبط با برخورد استفاده می‌شود و فرآیند آماده‌سازی مشخص دارد، تحت عنوان ژلاتین بالستیک یاد می‌شود. در این پژوهش از ژلاتین بالستیک به عنوان ماده سازنده پرتابه‌های نرم استفاده شد و هندسه استوانه‌ای با نسبت ارتفاع دو برابر قطر مد نظر قرار گرفت. نقشه فنی مرتبط با هندسه پرتابه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به ماهیت سیال‌گونه ژلاتین بالستیک در مرحله پیش از ریخته‌گری و همچنین انعطاف بالای آن بعد از انجماد، ساخت پرتابه‌های نرم که به لحاظ هندسه و وزن دارای تکرارپذیری مناسب باشند، نیازمند تهیمیدات خاصی خواهد بود. به منظور تهیه قالب‌های مخصوص سیلیکونی جهت ریخته‌گری ژلاتین، ابتدا طراحی هندسه اولیه قالب متناسب با ابعاد پرتابه انجام گرفت و از دستگاه پرینتر سه‌بعدی برای ساخت نمونه قالب از جنس پلی لاکتیک اسید برای ساخت قالب سیلیکونی استفاده شد (شکل‌های ۲ و ۳). شکل نهایی قالب سیلیکونی استفاده‌شده در تصویر ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱: الف) نمای ایزومتریک و ب) نقشه فنی پرتابه نرم (برای سهولت در خروج پرتابه از قالب، یک درجه شیب مثبت در نظر گرفته شده است)

Fig. 1. a) Isometric view and (b) the technical map of the soft projectile (for easy to exit the projectile from the)
(mold is considered a positive slope degree)



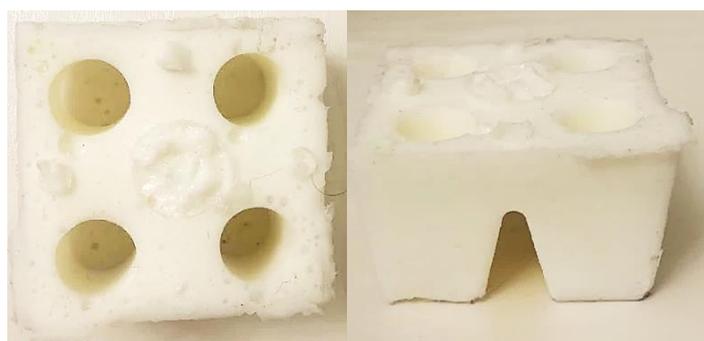
شکل ۳: ریخته‌گری سیلیکون داخل قالب چاپ شده

Fig.3. Silicone casting into printed mold



شکل ۲: قالب تهیه‌شده با دستگاه پرینتر سه‌بعدی

Fig2. Mold made with a 3D printing



(ب)

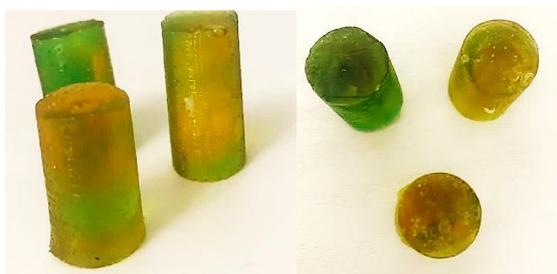
(الف)

شکل ۴: شکل نهایی قالب سیلیکونی پرتابه نرم (الف) از نمای بالا (ب) از نمای روبه‌رو

Fig. 4. The final shape of the soft projectile silicone mold (a) from the top view (b) from the front view

پودر ژلاتین بلوم ۲۵۰ تهیه شده از بازار داخلی به عنوان ماده پایه در نظر گرفته شد و فرآیند ساخت ژلاتین بالستیک به عنوان جسم نرم با استفاده از دستورالعمل مندرج در مرجع [۲۷] به ترتیب مراحل زیر انجام گرفت:

۱. ۲ گرم از پودر ژلاتین را در ۴ گرم آب مقطر در دمای محیط (25°C) حل کرده و اجازه داده می‌شود تا ژلاتین کاملاً ذوب شود و سپس ۱۴ گرم آب گرم (با دمای 60°C) به محلول مورد نظر اضافه کرده و در فواصل زمانی سه دقیقه هر بار به میزان ۱۵ ثانیه هم زده می‌شود تا پودر کاملاً در محلول حل شود. در میانه مراحل چند قطره رنگ خوراکی اضافه می‌شود تا پرتابه‌های نرم مورد نظر شفاف نباشند. زیرا پرتابه‌های کدر به هنگام عبور از پرده فوتودبود سرعت‌سنج‌های دستگاه تفنگ گازی با دقت بیشتری قابل تشخیص هستند.
۲. ژلاتین تهیه شده را در داخل قالب سیلیکونی ساخته شده، ریخته‌گری کرده و به مدت ۲ ساعت در یخچال دمای 5°C درجه سلسیوس قرار داده می‌شود تا ژلاتین مایع به طور کامل منجمد شود (شکل ۵).
۳. در انتها پرتابه‌های شکل گرفته را به آرامی از داخل قالب خارج کرده تا به هندسه و جرم آنها آسیبی وارد نشود (شکل ۶).



شکل ۶: شکل نهایی پرتابه نرم بعد از انجماد

Fig.6. The final shape of the soft projectile after solidification

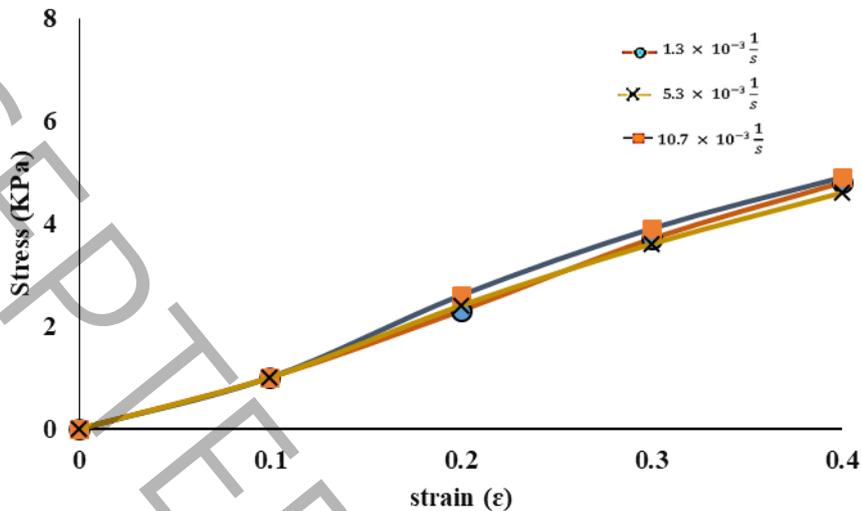


شکل ۵: تزریق ژلاتین رنگی داخل قالب سیلیکونی

Fig.5. Injection colored gelatin into the silicone mold

پرتابه‌های ساخته شده با روش فوق قابلیت تکرارپذیری شکلی و وزنی قابل قبولی داشته و جرم میانگین پرتابه‌ها به میزان ۵/۵ گرم با تغییرات بیشینه در جهت افزایش و یا کاهش در حد ۰/۲ گرم قابل اندازه‌گیری بود. با توجه به اینکه برای ساخت ژلاتین بالستیک از

دستورالعمل‌های مرجع [۲۷] استفاده شده است، به منظور درک بهتر رفتار مکانیکی این ماده، منحنی تنش- کرنش واقعی در شرایط نرخ‌های مختلف کرنش با توجه به داده‌های منتشرشده در مرجع فوق در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷: منحنی تنش-کرنش واقعی ژلاتین بالستیک در نرخ کرنش‌های متفاوت [۲۵]

Fig. 7. True stress-strain curve of ballistic gelatin at different strain rates [25]

۲-۲- ساخت سیال غلیظ‌شونده برشی

سیال غلیظ‌شونده برشی یک مخلوط کلئیدی شامل نانو ذرات و یک سیال حامل است. نانوذرات می‌توانند از جنس سیلیس، پلی متیل متاکریلات، کربنات کلسیم و سایر مواد معدنی مصنوعی یا طبیعی باشند. سیال حامل نیز موادی مانند آب، پلی اتیلن گلیکول یا اتیلن گلیکول را شامل می‌شود. این سیال با بالا رفتن نرخ برش، افزایش گرانیوی از خود نشان می‌دهد و در برخی موارد می‌تواند همانند یک ماده شبه جامد رفتار کند و با حذف بارگذاری، به حالت مایع اولیه خود برمی‌گردد. افزایش گرانیوی منجر به افزایش قابلیت جذب انرژی ماده فوق در برخوردهای با سرعت بالا می‌شود.

۲-۲-۱- آماده‌سازی سیال خالص

برای تهیه ۵۰ گرم سیال خالص، ۱۵ گرم نانوذرات فیوم سیلیکا نوع ۲۰۰ آئروسول ساخت شرکت آوونیک آلمان در ۳۵ گرم پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰ ساخت شرکت مرک آلمان حل می‌شود تا سیال با ۳۰ درصد وزنی به دست آید. اختلاط اولیه روی دستگاه همزن مغناطیسی انجام می‌گیرد در حالی که پلی اتیلن گلیکول روی همزن قرار داشته و نانو ذرات سیلیکا به آرامی به آن اضافه می‌گردد و با گردش یک میله آهنربایی اختلاط صورت گرفته و برای بهتر حل شدن نانو ذرات در سیال حامل به صورت همزمان از همزن فراصوت نیز استفاده می‌شود (شکل ۸). پس از این مرحله با استفاده از همزن دور بالای پره‌دار اختلاط نهایی در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ ساعت انجام می‌گیرد (شکل ۹). نهایی سیال ساخته شده در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



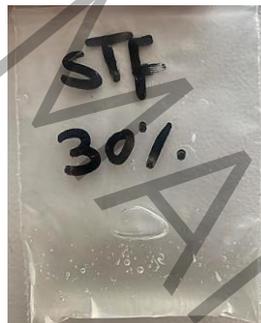
شکل ۹: استفاده از همزن دور بالا برای اختلاط نهایی فوم سیلیکا در پلی اتیلن گلايکول

Fig.9. Use a high-speed mixer for the final mixing of silica fume into PEG



شکل ۸: اختلاط اولیه فیوم سیلیکا با پلی اتیلن گلايکول به همراه همزن فراصوت

Fig. 8. Initial mixing of silica fume with PEG using an ultrasonic mixer



شکل ۱۰: بافتار نهایی سیال خالص

Fig. 10. The final texture of pure STF

۲-۲-۲- آماده سازی سیال اصلاح شده

فرآیند اصلاح سیال غلیظ شونده برشی با اصلاح پلی اتیلن گلايکول صورت می گیرد. برای تهیه ۱۵ گرم از پلی اتیلن گلايکول اصلاح شده، ابتدا باید پلی اتیلن گلايکول با آدپیک اسید (عامل اسیدی برای اصلاح سیال حامل با شناسه محصول ۹-۴-۱۲۴ تهیه شده از شرکت شیمی سنتز) با نسبت یک به سه مولی با یکدیگر ادغام شوند. در ادامه محلول شامل ترکیبات فوق، داخل ظرف مخصوص در حمام سونیکیت (آوادهی) به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده می شوند (شکل ۱۱). در مرحله بعد مخلوط حاصل در محیط نیتروژن قرار می گیرد تا کاتالیزگر به آن اضافه شود. پس از پرشدن محیط توسط گاز نیتروژن، کاتالیزگر تری اتیل آمین (تهیه شده از شرکت پتروکیمیا) با نسبت ۱:۲ مولی (نسبت پلی اتیلن گلايکول به تری اتیل آمین) اضافه می گردد. همزمان با این گام، دی متیل فرم آمید (با کد ۱۰۳۰۵۳ ساخت شرکت مرک آلمان) به عنوان حلال نیز با نسبت ۱:۱ حجمی به کار گرفته می شود (شکل ۱۲). در نهایت همانطور در شکل ۱۳ نشان داده شده است، ترکیب در حمام روغن با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت قرار می گیرند تا واکنش کامل صورت پذیرد.



شکل ۱۲: اضافه کردن کاتالیزگر و حلال در محیط نیتروژن
Fig.12. Adding catalyst and solvent in a nitrogen environment



شکل ۱۱: اختلاط پلی اتیلن گلیکول و آدیپیک اسید در حمام آوا دهی
Fig.11. Mixing PEG and Adipic acid in the sonication bath



شکل ۱۳: حمام روغن برای تکمیل شدن فرآیند اصلاح
Fig. 13. Oil bath to complete the shaving process

در انتهای این گام، سیال حامل اصلاح شده باید به رنگ زرد تغییر رنگ بدهد که یکی از نشانگان کامل بودن فرآیند اصلاح است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: حالت نهایی سیال حامل اصلاح شده
Fig. 14. Final shape of the modified carrier fluid

در ادامه پلی اتیلن گلیکول اصلاح شده در داخل آون به مدت ۲۴ ساعت قرار می گیرد تا حلال آن تبخیر شود. از طرفی فوم سیلیکا با نسبت ۳۰٪ وزنی (نسبت به پلی اتیلن گلیکول اصلاح شده پس از تبخیر حلال) توزین شده و با اتانول (خلوص ۹۹/۹ درصد ساخت کیمیا الکل زنجان) توسط همزن دور بالا ترکیب می شود. ترکیب فوم سیلیکا و اتانول به آرامی به پلی اتیلن گلیکول اصلاح شده روی دستگاه همزن صفحه ای با دور پایین اضافه می گردد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: اضافه شدن فوم سیلیکا به پلی اتیلن گلیکول اصلاح شده

Fig. 15. Addition of silica foam to modified PEG

در گام بعدی، همزن مکانیکی دور بالا (با دور حدود ۷۰۰۰-۹۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۲ ساعت به کار گرفته می شود و پس از آن برای تبخیر شدن حلال، ترکیب به مدت ۴ ساعت داخل دستگاه آون قرار می گیرد. شکل ۱۶ محصول نهایی این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۱۶: حالت نهایی سیال اصلاح شده در حالت خشک

Fig. 16. Final shape of modified STF in dry state

۳-۲- صحت سنجی ترکیب سیال غلیظ شونده برشی

برای راستی آزمایی مواد به کار رفته و درستی فرآیند اصلاح و نیز بررسی رفتار غلیظ شوندگی برشی از دو آزمون طیف سنج مادون قرمز و رئومتر صفحات موازی استفاده شد.

۳-۲-۱- دستگاه طیف سنج مادون قرمز

از دستگاه طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوریه مدل تنسور بروکر ۷۲ برای سنجش صحت ترکیب پلیمر اصلاح شده و همچنین بررسی کیفی مواد شیمیایی تهیه شده، استفاده شده است. طیف های مادون قرمز داده های زیادی درباره ساختار ترکیب های آنالیز شده،

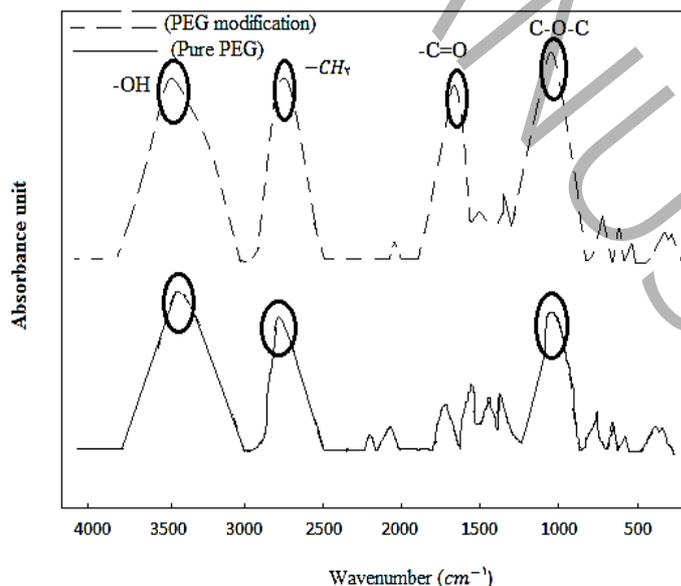
ارائه می‌دهند که از تابیدن اشعه مادون قرمز به ماده مورد نظر و بررسی کسر میزان جذب تابش ورودی به جسم، یک طیف مادون قرمز حاصل می‌شود. آزمایش در بازه عدد موجی $(4000 - 400 \text{ cm}^{-1})$ با دقت ۲۶ اسکن با تهیه قرص پتاسیم برماید با نسبت ۱:۱۰۰ انجام شده است. دستگاه مورد استفاده در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: نمای بیرونی و درونی دستگاه FT-IR

Fig.17. Exterior and interior view of the FT-IR device

شکل ۱۸ طیف به دست آمده از آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز را نشان می‌دهد. ابتدا عدد موجی (3382 cm^{-1}) نتیجه شده است که یک قله عریض و مختص به ارتعاش کششی گروه‌های غیرواکنشی -OH می‌باشد که در هر دو ترکیب (STF خالص و اصلاح شده) وجود دارد. عدد موجی بعدی (2874 cm^{-1}) می‌باشد که نشان‌دهنده گروه‌های کششی -CH_2 در زنجیره اصلی پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌اتیلن گلیکول اصلاح شده است. همچنین برای همه طیف‌ها عدد موجی (1118 cm^{-1}) قابل رؤیت است که مربوط به ارتعاش کششی C-O-C می‌باشد. تنها عدد متمایز که در نتیجه اصلاح پلی‌اتیلن گلیکول (400 cm^{-1}) می‌باشد، عدد موجی (1727 cm^{-1}) می‌باشد که مربوط به گروه کششی کربونیل (C=O) مربوط به یک استر آلیفاتیک است که تنها در ساختار آدیپیک اسید موجود است. بنابراین می‌توان با مقایسه مقادیر فوق با مراجعی همچون پایگاه داده فراهم شده توسط سازمان ملی استاندارد آمریکا [۲۸] نشان داد که سنتز و اصلاح پلی‌اتیلن گلیکول (400) به درستی انجام شده است.



شکل ۱۸: طیف مادون قرمز پلی‌اتیلن گلیکول (400) و پلی‌اتیلن گلیکول (400) اصلاح شده توسط آدیپیک اسید

Fig.18. Infrared spectra of PEG 400 and PEG 400 modified by adipic acid

۲-۳-۲- دستگاه رئومتر صفحات موازی

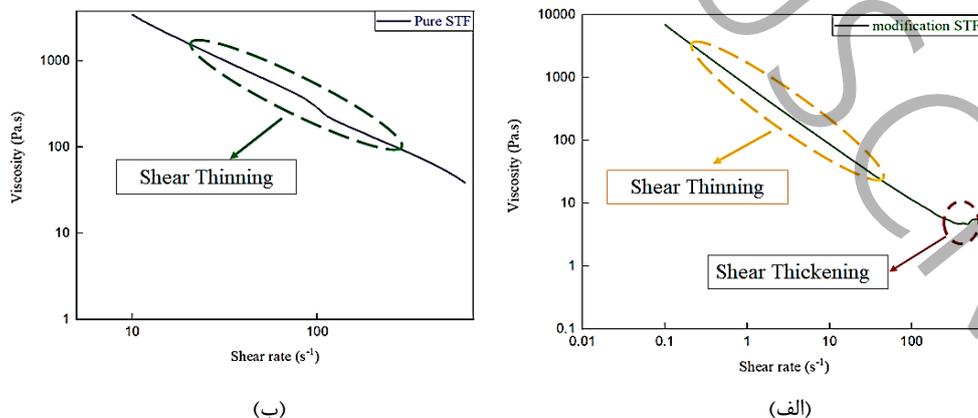
به منظور بررسی رفتار ضخیم‌شوندگی سیال، از دستگاه رئومتر صفحات موازی مدل آنتون پار استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۱۹ قابل مشاهده است. این دستگاه، شامل دو دیسک موازی است که یکی از آنها آزادی دورانی دارد. در این آزمایش، نمونه در دمای محیط قرار دارد و فاصله بین دیسک‌ها، بسته به نوع نمونه و ویژگی گرانروی ماده مورد بررسی بین ۰/۵ الی ۱ میلی‌متر قابل تنظیم است. هم‌چنین بیشینه تنش برشی دستگاه محدود به $628 \text{ (S}^{-1}\text{)}$ می‌باشد.



شکل ۱۹: دستگاه رئومتر صفحات موازی

Fig. 19. Parallel plate rheometer device

نمودار گرانروی برحسب نرخ برش در شکل ۲۰ نشان داده شده است که مطابق با آن می‌توان رفتار ضخیم‌شوندگی برشی سیال را بررسی کرد. با توجه به شکل، سیال اصلاح‌شده در نرخ برشی حدود $328 \text{ (S}^{-1}\text{)}$ ، رفتار ضخیم‌شوندگی از خود نشان داده است. این در حالی است که در سیال خالص، رفتار ضخیم‌شوندگی برشی دیده نمی‌شود که به دلیل محدودیت بیشینه بسامد قابل اعمال توسط دستگاه است که محدود به $628 \text{ (S}^{-1}\text{)}$ بوده و طبق بررسی‌های انجام‌شده انتظار می‌رود که در نرخ برش‌های بالاتر رفتار ضخیم‌شوندگی آن شروع شود. لازم به ذکر است که با توجه به مشاهدات تجربی که در بخش‌های بعدی ارائه خواهند شد، عدم مشاهده ناحیه ضخیم‌شدگی برشی در خالص در این محدوده نرخ برشی، تاثیری در عملکرد آن نداشته و ایجاد اصطکاک مضاعف میان لایه‌ای در این نمونه‌ها نیز به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۲۰: نمودار گرانروی برحسب نرخ برش: (الف) سیال اصلاح‌شده (ب) سیال خالص

Fig. 20. Viscosity graph versus shear rate: a) Modified STF b) Pure STF

۲-۴- آغشته‌سازی الیاف داینیما به سیال غلیظ شونده برشی

الیاف داینیما با چگالی (970 kg/m^3) و ضخامت 0.3 میلی‌متر، محصول شرکت دی اس ام، با ابعاد 12×12 سانتی‌متر مربع برش خورده و یک لایه به جرم $1/4$ گرم از سیال خالص و یا اصلاح‌شده با استفاده از دستگاه پرس مکانیکی در محدوده فشار میانگین سه الی چهار اتمسفر، در بین لایه‌ها قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که الیاف تک‌جهته بوده و دو لایه از آن‌ها با لایه‌چینی متقاطع (صفر و ۹۰ درجه) بر روی همدیگر قرار می‌گیرند. با توجه فشار اعمال شده و ضخامت بسیار کم سیال، افزایش ضخامت نمونه‌ها نسبت به حالت بدون حضور سیال قابل اندازه‌گیری نیست. با توجه به وزن سیال به وزن کل نمونه، نسبت وزنی نمونه‌ها به صورت میانگین به میزان 1 ± 14 درصد گزارش می‌شود. شکل ۲۱ گام‌های آماده‌سازی نمونه مورد نظر را نشان می‌دهد.



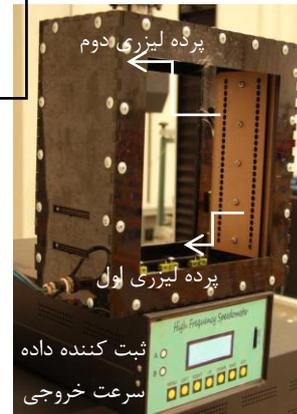
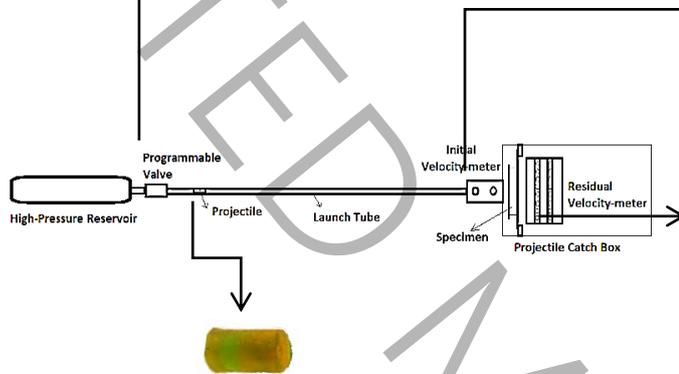
شکل ۲۱: (الف) اضافه کردن سیال به الیاف (ب) قراردادن الیاف به همراه سیال زیر دستگاه پرس (ج) الیاف آغشته‌شده به سیال

Fig.21. (a) Adding STF to the fibers (b) Placing the fibers with STF under the press (c) Fibers impregnated with STF

۲-۵- آزمون برخورد نرم

در این بخش از پژوهش از دستگاه تفنگ گازی تک‌مرحله‌ای مناسب برای ایجاد سرعت‌های متوسط و بالا برای شلیک کردن پرتابه های نرم به سمت اهداف استفاده شده است. این دستگاه شامل کپسول فشار بالای هوا، لوله پرتابگر و محفظه قرارگیری هدف می‌باشد. دستگاه دارای دو سرعت سنج ورودی و خروجی برای پرتابه است که در صورت سوراخ شدن هدف و عبور پرتابه، می‌تواند برای محاسبه میزان انرژی جنبشی جذب‌شده به کار گرفته شوند. شکل ۲۲ اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه تفنگ گازی و همچنین سرعت‌سنج‌های آن و محل قرارگیری پرتابه را نشان می‌دهد.

به منظور سنجش سرعت ورودی و با توجه به مستقیم بودن مسیر حرکت پرتابه از دو جفت یکسوساز نوری گیرنده - فرستنده که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از همدیگر واقع شده‌اند، استفاده شده است. هر کدام از این جفت‌ها همانند کلید نوری لحظه‌ای هستند و با عبور پرتابه کدر از میان پرتو ساخته شده، کلیدها عمل کرده و یک ثبت‌کننده داده مدت زمان بین عملکرد جفت نوری را با سرعت داده‌برداری ۱۵ کیلوهرتز را ثبت می‌کند. در هنگام خروج پرتابه از هدف، مسیر آن می‌تواند از حالت مستقیم منحرف شود و از این رو برای سنجش سرعت باقیمانده پرتابه، از یک جفت پرده نوری استفاده می‌شود. این پرده‌ها در فاصله ۶ سانتی‌متری از هم قرار دارند و هر پرده از ۳۰ عدد یکسوسازهای گیرنده- فرستنده که به صورت سری با هم متصل هستند، تشکیل شده است. با عبور پرتابه از روبروی هر پرده و قطع شدن هر پرتو کلید نوری عمل کرده و مدت زمان بین عملکرد توسط ثبت‌کننده داده با بسامد داده‌برداری ۲۰ کیلوهرتز ثبت خواهد شد. بدین ترتیب با داشتن فاصله و زمان بین عملکرد کلیدهای نوری، می‌توان سرعت پرتابه را در ورود و خروج از هدف با دقت بالایی سنجید.



شکل ۲۲: دستگاه تفنگ گازی و اجزای تشکیل دهنده آن
Fig.22. Gas gun device and its components

برای بررسی تأثیر سیال غلیظ‌شونده برشی روی عملکرد الیاف داینیما، این آزمون با شرایط الیاف داینیما ساده (بدون حضور سیال)، الیاف داینیما پرس شده با سیال خالص و اصلاح شده در حالت‌های خشک شده و خیس انجام شده است. حالت خشک اشاره به قراردادن نمونه پس از آغشته‌سازی به سیال در آن دارد و منظور از حالت خیس، تنها آغشته‌سازی الیاف به سیال می‌باشد. فشار کپسول تفنگ گازی روی ۱۰۰ اتمسفر قرار داده شد و سرعت پرتابه‌ها در محدوده ۸۰-۹۲ متر بر ثانیه قرار داشتند. محدوده سرعت اولیه پرتابه در محدوده سرعت هواپیما در زمان برخاست و فرود (تقریباً ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) انتخاب گردید و همچنین باید به این نکته نیز توجه داشت که محدوده جرمی پرتابه‌ها شبیه‌سازی کننده برخورد پرنده‌گان سبک و کوچک است که احتمال برخورد با آنها در ارتفاعات نزدیک به زمین بیشتر است. پیرامون نمونه‌ها توسط دو صفحه ضخیم فولادی به ضخامت ۱۲ میلی‌متر که توسط چهار پیچ به همدیگر متصل می‌شوند، تثبیت شد. شکل ۲۳ یک نمونه هدف بسته شده به فیکسچرهای محفظه هدف دستگاه تفنگ گازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳. نمونه قرارداده شده در محفظه هدف دستگاه تفنگ گازی

Fig. 23. Sample placed in the target chamber of the gas gun device

۳- نتایج و بررسی

برای مقایسه نمونه‌ها و بررسی تأثیر سیال روی عملکرد الیاف داینیما، سه مؤلفه مهم مد نظر قرار گرفتند که عبارتند از: میزان برآمدگی صفحه پشتی پس از برخورد، سرعت خروجی پرتابه (در صورت سوراخ شدن هدف) و آسیب قابل مشاهده در الیاف. جدول ۱ به منظور گردآوری تمامی نتایج و مقایسه آسان تر تنظیم شده است. شایان ذکر است که برای هر پیکری بندی هدف، آزمون‌ها سه بار تکرار شدند و در نهایت مقادیر میانگین به منظور ارزیابی عملکرد مورد توجه قرار گرفتند.

جدول ۱. خلاصه نتایج آزمون‌های برخورد نرم

Table 1. Summary of soft impact test results

وضعیت قابل مشاهده الیاف	سرعت باقیمانده (m/s)			میزان تقریبی برآمدگی (mm)			سرعت ورودی (m/s)			نمونه
	سوم	دوم	اول	۳۵	۳۵	۳۰	سوم	دوم	اول	
عبور پرتابه از الیاف به همراه توسعه آسیب گسترده، جدایش و کشیدگی تارها	۶۲/۱	۵۵/۳	۵۱/۵	۳۵	۳۵	۳۰	۸۲/۹	۸۴/۴	۸۱/۲	دو لایه الیاف داینیما ساده (بدون حضور سیال)
پرتابه موفق به عبور نشد و انحراف مشهود الیاف در ساختار تاروپود مشاهده شد	-----			۲/۵	۳/۲	۳	۸۹/۷	۸۲/۳	۸۱	دو لایه الیاف داینیما آغشته به سیال خالص (در حالت خیس)
عدم عبور پرتابه و انحراف جزئی در برخی تارها مشاهده شد	-----			۲/۸	۲/۵	۳	۹۱/۸	۹۰/۱	۸۵	دو لایه الیاف داینیما آغشته به سیال خالص (در حالت خشک)
عدم عبور پرتابه و برآمدگی موضعی دیده شد	-----			۱/۵	۱/۵	۱	۹۱/۶	۸۶/۵	۸۲	دو لایه الیاف داینیما آغشته به سیال اصلاح شده (در حالت خیس)
آسیبی قابل مشاهده نبود	-----			غیر قابل اندازه گیری			۹۱/۵	۸۶/۳	۸۱	دو لایه الیاف داینیما آغشته به سیال اصلاح شده (در حالت خشک)

تکانه انتقال یافته در برخورد نرم به واسطه تغییر شکل قابل ملاحظه پرتابه منجر به تغییر شکل های گسترده تر و در عین حال با عمق کمتر در هدف می شود. تکانه اولیه پرتابه به صورت زیر قابل تعریف است:

$$P = mV_0 \quad (1)$$

که در آن m جرم پرتابه و V_0 سرعت اولیه پرتابه پیش از برخورد با هدف است. در این نوع از برخورد، تغییر شکل درون صفحه ای نقش پررنگ تری نسبت به پرتابه های با صلابت بالاتر دارد. به همین دلیل تنش های درون صفحه ای (غشایی) برشی میان لایه ای مشارکت قابل ملاحظه ای در برابر برخورد از خود نشان خواهند داد. در برخورد نرم، توزیع نرخ کرنش در هدف نیز پیچیده تر و وسیع تر بوده و اغلب مقدار آن پایین تر از حالت برخورد سخت است. در حالی که در برخورد پرتابه های سخت با سرعت بالا، تنش های برشی موضعی بیرون صفحه ای نقش اصلی را در ایجاد مقاومت در برابر عبور پرتابه، بازی می کنند.

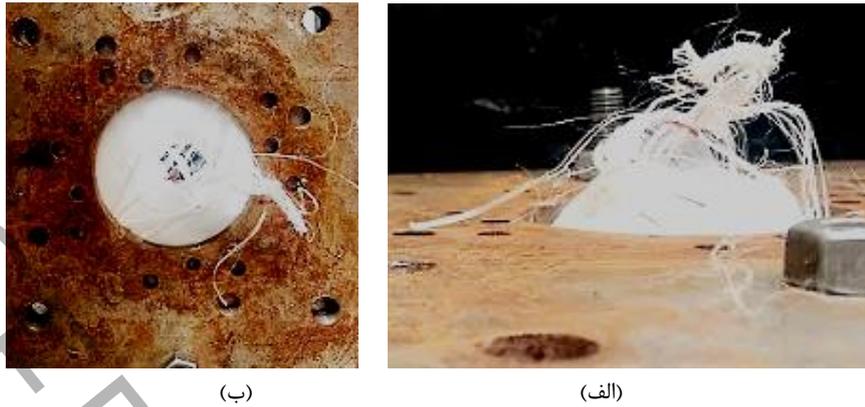
شکل های ۲۴ تا ۲۸ وضعیت اهداف پس از برخورد پرتابه نرم را نشان می دهد. همان طور که این تصاویر نشان می دهند، میزان گستردگی آسیب بسته به شرایط استفاده از سیال غلیظ شونده برشی، به صورت محسوسی متفاوت است. شکل ۲۴ نمایشگر آسیب به جامانده در الیاف داینیمای ساده و در غیاب سیال است و در این مورد، اهداف به طور میانگین دچار برآمدگی $34/6$ میلی متری شده و پرتابه موفق به عبور از آن ها گردید. سرعت پرتابه بعد از خروج به صورت میانگین برابر با $56/3$ متر بر ثانیه ثبت گردید و این به معنای جذب انرژی جنبشی میانگین تقریباً 54 درصدی، توسط این نوع از هدف است. برخورد پرتابه نرم، منجر به گسسته شدن تارهای الیاف از همدیگر و ایجاد فضای عبور مناسب برای آن شده است. با مقایسه کردن شکل ۲۴ و شکل ۲۵ (الیاف داینیمای آغشته شده به سیال خالص) به سادگی می توان به نقش مؤثر سیال در جذب انرژی و بهبود مقاومت بین لایه ای الیاف پی برد.

در حالت کلی استفاده از سیال در حالت های خالص و اصلاح شده مانع از عبور پرتابه شده است. با این حال، سطح توسعه آسیب در نمونه ها متفاوت است. استفاده از سیال باعث افزایش چشمگیر نیروی اصطکاک بین الیاف و در نتیجه افزایش مقاومت هدف شده و انرژی جنبشی اولیه پرتابه برای غلبه بر تنش های برشی ویسکوز غشایی که به صورت گسترده در هدف توزیع می شود، کافی نیست. فرآیند خشک کردن نمونه ها در آون بر میزان اصطکاک میان لایه ای ناشی از حضور سیال افزوده است، به ترتیبی که در اهداف آماده شده به این روش، هیچ گونه آسیب جزئی یا تورم قابل اندازه گیری مشاهده نمی شود. استفاده از سیال اصلاح شده منجر به کاهش برآمدگی میانگین به $1/33$ میلی متر شده در حالی که در وضعیت خالص میزان برآمدگی میانگین برابر با $2/9$ میلی متر در شرایط خیس است. این نشانگر کاهش 54 درصدی برآمدگی در حضور سیال اصلاح شده است. این در حالی است که در شرایط خشک شده و خالص برآمدگی میانگین $2/76$ میلی متر است که تفاوت چندانی نسبت به شرایط خیس خالص ($2/9$ میلی متر) دیده نمی شود.

شکل های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب مربوط به الیاف داینیمای آغشته شده به سیال خالص در وضعیت های خیس و خشک هستند و با توجه به میزان خیز باقی مانده بسیار اندک این نمونه ها، به جای نمای جانب تصاویر صرفاً از نمای عمود بر هدف نمایش داده شده اند. با دقت در تصاویر فوق می توان به انحراف ماندگار هر چند اندک تارهای الیاف نسبت به حالت اولیه در وضعیت خیس پی برد. در حالیکه در نمونه خشک عملاً هیچ گونه تغییر شکل محسوس ماندگاری در هدف دیده نمی شود.

تصاویر ۲۷ و ۲۸ نیز به ترتیب نمایشگر اهداف آغشته شده به سیال اصلاح شده در وضعیت های خیس و خشک بوده و همانطور که مشخص است در هر دو وضعیت عملاً با چشم غیر مسلح نمی توان آسیب ماندگاری را مشاهده کرد. برای مقایسه بهتر، تغییرات برآمدگی ماندگار در نمونه ها تحت شرایط متفاوت استفاده از سیال در شکل ۲۹ به صورت نمودار میله ای نمایش داده شده است.

با توجه به مشاهده های انجام شده، سیال غلیظ شونده برشی با افزایش اصطکاک درون صفحه ای میان الیاف در سطحی وسیع تر و جلوگیری از لغزش لایه ها در نواحی پیرامونی، باعث افزایش استحکام قابل توجه نمونه ها در برابر برخورد شده و ویژگی ارتجاعی سازه به طرز چشم گیری افزایش پیدا کرده است. با توجه به ضخامت بسیار اندک لایه سیال، سایر مکانیزم های مرتبط با استهلاک سیال همانند قفل شدگی و یا جامد شوندگی ناشی از افزایش فشار نقش مؤثری در ایجاد استحکام مضاعف در الیاف ندارند.



شکل ۲۴: آسیب برخورد جسم نرم بر روی الیاف داینیمای خالی (بدون سیال) (الف) نمای جانبی و (ب) از نمای روبه‌رو پشت محل برخورد
Fig. 24. Soft object impact damage on neat Dyneema fibers (without STF) (a) side view and (b) from the front view behind the impact site



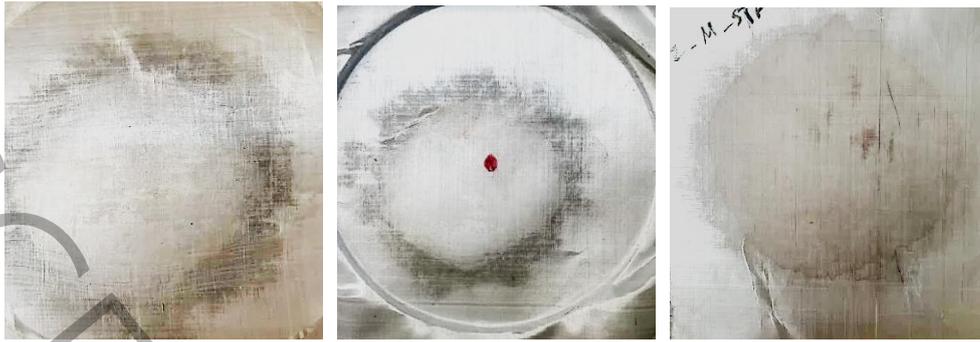
شکل ۲۵: (الف) الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص در حالت خیس (ب) آسیب الیاف در برابر ضربه جسم نرم در صفحه پشتی (به انحراف ماندگار الیاف توجه شود) (ج) آسیب الیاف در صفحه جلو

Fig. 25. (a) Dyneema fibers impregnated with pure STF in the wet state (b) Fiber damage from soft object impact on the back-sheet (note permanent fiber deflection) (c) Fiber damage on the front-sheet



شکل ۲۶: (الف) الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص در حالت خشک (ب) آسیب الیاف در برابر ضربه جسم نرم در صفحه جلو (ج) آسیب الیاف در صفحه پشتی

Fig. 26. (a) Dyneema fibers impregnated with pure STF in the dry state (b) Fiber damage from soft object impact on the front panel (c) Fiber damage on the back panel



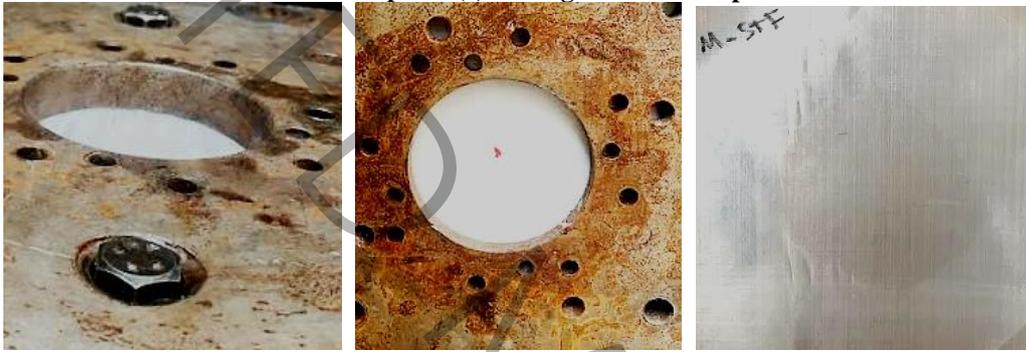
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲۷: (الف) الیاف داینیمای آغشته شده به سیال اصلاح شده در حالت خیس (ب) آسیب الیاف در برابر ضربه جسم نرم در صفحه جلو (ج) آسیب در صفحه پشتی

a) Dyneema fibers impregnated with modified STF in the wet state (b) Fiber damage from soft object impact on the front panel (c) Damage on the back panel



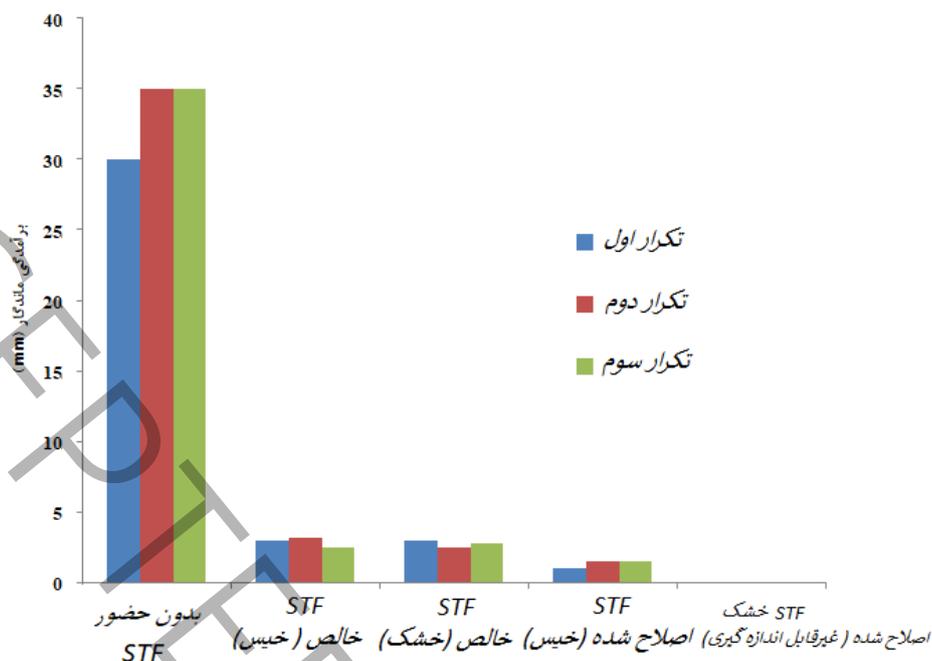
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲۸: (الف) الیاف داینیمای آغشته شده به سیال اصلاح شده در حالت خشک (ب) صفحه جلو از نمای روبه رو (ج) صفحه پشتی از نمای جانبی

a) Dyneema fibers impregnated with modified STF in dry state (b) Front panel from front view (c) Back panel from side view



شکل ۲۹: نمودار میله‌ای برای مقایسه میان برآمدگی ماندگاری در شرایط مختلف استفاده از سیال

Fig. 29. Bar chart comparing the residual bulge under different conditions of STF use

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار اهداف ساخته شده از الیاف پلی‌اتیلن فوق‌سنگین (داینیما) در برابر برخورد نرم زمانی که در شرایط آغشته‌شده به سیال خالص و یا اصلاح‌شده قرار داشت، پرداخته شد. به منظور تمرکز بر روی تأثیر رفتار سیال از کاربرد سایر مواد بعنوان زمینه در ساختار الیاف پرهیز شد. به علت گسترده‌تر بودن سطح زیربارگذاری در شرایط برخورد نرم، تغییرشکل‌ها وسیع‌تر بوده و در نتیجه فعالیت تنش‌های درون‌صفحه‌ای و اصطکاک میان لایه‌ها نقش مؤثرتری در کاهش شدت ضربه ایفا می‌کند. نتایج تجربی آزمون سرعت بالا با پرتابه نرم نشان داد که حضور سیال نقش بسیار مؤثری در کاهش آسیب‌های وارده به اهداف داشته است. این در حالی است که در غیاب سیال، همگی اهداف سوراخ شده و آسیب‌های جدی به بافتار الیاف وارد گردید. روش نفوذ سیال به کمک فشار و همچنین خشک کردن سیال از حلال تأثیر محسوسی بر روی افزایش اصطکاک میان لایه‌ای داشت و آسیب ماندگاری در اهداف مشاهده نشد. نتایج پژوهش حاضر می‌توانند به عنوان پیشنهادی نو برای افزایش استحکام سازه‌های مختلف که در برابر تهدید برخورد نرم قرار دارند، مورد توجه قرار گیرند.

۵- منابع و مراجع

- [1] P. Kœchlin, S. Potapov, Classification of soft and hard impacts, Application to aircraft crash. Nuclear Engineering and Design, 239(4) (2009) 613-618.
- [2] S. Zhang, K. Johansen, S. Nørkjær, P. Bernard S. Kiil, Erosion of wind turbine blade coatings- design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation. Progress in Organic Coatings, 78 (2015) 103-115.
- [3] Part, F.A.R., 25: Airworthiness standards: Transport category airplanes. Federal Aviation Administration, Washington, DC 7 (2007)

- [4] V. Timhede, S. Timhede, S. Winyangkul, S. Slesongsom, Aircraft Wing Design Against Bird Strike Using Metaheuristics. *Aerospace*, 12(5) (2025) 436.
- [5] B. Arachchige, H. Ghasemnejad, and M. Yasaei, Effect of bird-strike on sandwich composite aircraft wing leading edge. *Advances in Engineering Software*, 148 (2020) 102839.
- [6] M.Y. Zhao, J.J. Li, Efficiency Metallic Leading Edge Structure Bird Strike Resistant Design. *Advanced Materials Research*, 338 (2011) 84-89.
- [7] G. Yella, P. Jadhav, and C. Lande, Bird-Strike Analysis on hybrid composite fan blade: Blade-level Validation. *Aerospace*, 10(5) (2023) 435.
- [8] A. Garg, L. Li, Influence of speed of soft body projectile on damage in bio-inspired helicoidal laminates using SPH-FEM model. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (2024) 1-28.
- [9] C. Zhao, C. Xu, S. Cao, S. Xuan, W. Jiang, X. Gong, Anti-impact behavior of a novel soft body armor based on shear thickening gel (STG) impregnated Kevlar fabrics. *Smart Materials and Structures*, 28(7) (2019) 075036.
- [10] S.A. Kalam, T. Sessaiah, K. Srividya, Damage behaviour and failure response of aircraft composite structure by soft body impact. *Materials Today: Proceedings*, 52 (2022) 867-872.
- [11] A.D. Cochrane., J. Serra, J.K. Lander, I.K. Partridge, H. Bohm, et.al, Experimental investigation of large-scale high-velocity soft-body impact on composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 161 (2022) 104089.
- [12] A. Alavinia, M. Kazemi, Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets. *Modares Mechanical Engineering* 15.6 (2015). (In persian)
- [13] M. Kazemi, A. Alavinia, High velocity impact on sandwich panels with graded foam-cored and aluminum face-sheet: numerical and experimental assessment. *Modares Mechanical Engineering* 19.4 (2019) 1039-1047. (In persian)
- [14] S. Jalili, H. Alidad, Study on Energy Absorption of Water-Filled Multi-Layered Panels Subjected to High-Velocity Perforating Impacts. *International Journal of Applied Mechanics*, (2025) 2550058.
- [15] 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.
- [16] H. Taş, I.F. Soykok, Investigation of the low velocity impact behaviour of shear thickening fluid impregnated Kevlar, hybrid (Kevlar/carbon) and carbon fabrics. *Fibers and Polymers*, 22(9) (2021) 2626-2634.
- [17] W. Li, K. Lin, K. Wang, B. Wang, Random vibration of sandwich beam with a shear thickening fluid core. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(25) (2024) 7336-7350.
- [18] H. Pahange, M.H. Abolbashri. Simulation, Analysis and Optimization of Airplane Wing Leading Edge Structure Against Bird Strike, *Scientific Research Journal of Structural and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016) 17-32 (In persian)
- [19] E. Tang, W. Zhang, R. Wang, Y. Han, C. Chen, M. Chang, The ballistic performance of STF impregnated Kevlar fabric coating GFRP composite structure. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(30) (2024) 12364-12382.
- [20] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The effect of silicon carbide additives on the stab resistance of shear thickening fluid treated fabrics. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 24(16) (2017) 1381-1390.
- [21] A. Naghizadeh, H. Khoramishad, M. Jalaly. A study on the ballistic behavior of Kevlar fabric impregnated with shear thickening fluid containing graphene oxide additive. *AUT Journal of Mechanical Engineering.*, 53(12) (2022) 1431-1434. (In persian)

- [22] M.B. Zeka, A. Aytac, Investigation of impact performance of STF impregnated composites. *Mechanics*, 29(2) (2023) 88-96.
- [23] C. SARIÇAM, N. OKUR, Yarn pull-out and drop weight impact performance of shear thickening fluid impregnated ballistic fabrics. *Journal of Textiles & Engineers/Tekstil ve Mühendis*, 30(131) (2023).
- [24] S. Deepak, D. Thirumalaikumarasamy, M. Ashakumar, S.K. Nayak, Experimental analyzing the static puncture resistance performance of shear thickening fluid impregnated polypropylene hybrid composite target structures for armour application. *The Journal of The Textile Institute*, 114(3) (2022) 351-363.
- [25] S. Astarki, E. Zamani, M.H. Pol, Experimental Investigation of the Effect of Using Shear-Thickening Fluid in the Structure of Honeycomb Core Sandwich Panels on Energy Absorption in Low-Velocity Impact Loading. *Modares Mechanical Engineering*, 23(09) (2023) 531-541. (In persian)
- [26] H. Amiri, N. Kordani, Y. Rostamiyan. The Effect of shear thickening fluid on coefficient of friction in anti impact coating formed from Kevlar KM22. *Scientific Research Journal of Modern Defense Sciences and Technologies*, (3) (2017) 303-311 (In persian)
- [27] J. Kwon, G. Subhash, Compressive strain rate sensitivity of ballistic gelatin. *Journal of biomechanics*, 43(3) (2010) 420-425.
- [28] <https://Webbook.nist.gov/Chemistry>

Effect of Shear Thickening Fluid on the Soft Impact Response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fibers

Maryam Zeynalnejad^a, Sina Jalili^{a1}

^a Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology

ABSTRACT

The present study investigates the effect of the presence of shear-thickening fluid (STF) on the soft impact behavior of ultra-high-density polyethylene fibers (Dyneema). Ballistic gelatin was used as the soft projectile material, and STF in pure and modified states was distributed by pressure between two layers of Dyneema fibers with cross-layering. To compare Dyneema targets in the absence of STF and also impregnated with it, they were loaded with soft projectiles with a mass of 5.5 g and average initial velocity of 86 m/s. The neat Dyneema fibers were permanently damaged due to perforation of the projectile with a bulge in the range of 35 mm and 54% of kinetic energy is absorbed. The presence of STF significantly increased the strength of the targets in both pure and modified conditions and the permanent bulge fell below the 3 mm. None of impregnated samples suffered from perforation due to a significant increase in interlayer friction and the extent of damage and permanent bulge was significantly reduced. In absence of the STF solvent (dried condition), the interlayer friction increased further and the samples did not experienced measurable bulge and observable damage. The results indicate the very effective performance of STF in increasing the strength of structures against soft impact, without imposing significant weight and cost penalties.

KEYWORDS

Shear-thickening fluid, soft projectile, Dyneema fibers, high-velocity impact, bird strike

¹ Corresponding Author: sjalili@sut.ac.ir