



## 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, Tabriz, Iran.

**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.

### Review History:

Received: Nov. 21, 2025

Revised: Jan. 20, 2026

Accepted: Feb. 20, 2026

Available Online: Feb. 24, 2026

### Keywords:

Shear-Thickening Fluid

Soft projectile

Dyneema Fibers

Bird Strike

### 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].

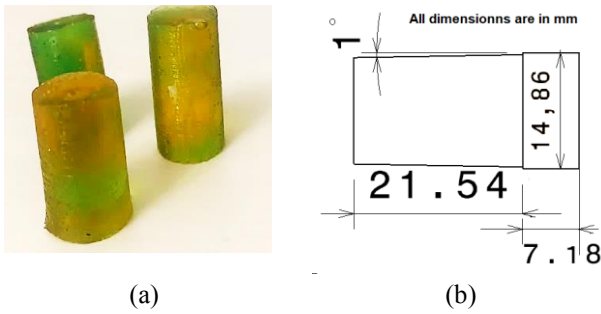
Although STF has been widely studied in ballistic and stab protection, its effectiveness under soft impact conditions remains insufficiently explored. In the present study, the effect of using shear thickening fluid in its conventional and modified states on the behavior of targets made of ultra-high-molecular-weight 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

\*Corresponding author's email: Sjalili@sut.ac.ir





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

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.

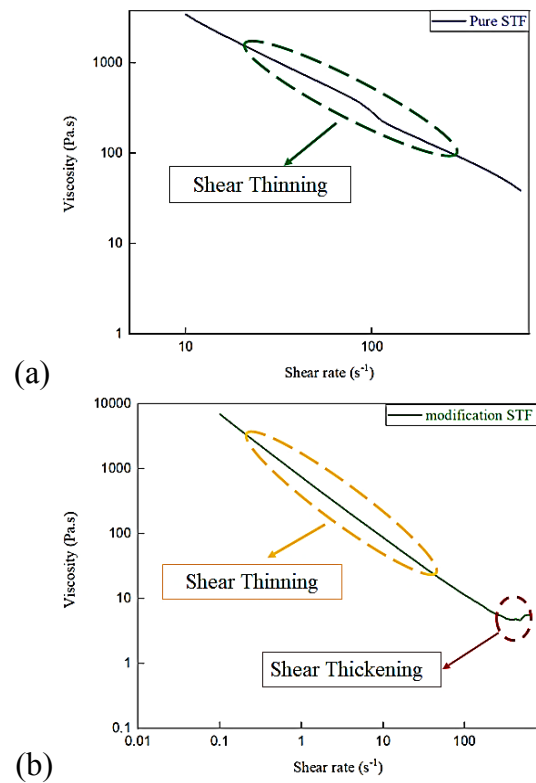
STF was prepared using fumed silica nanoparticles and polyethylene glycol (PEG 400) as the carrier fluid. A modified STF was also synthesized through chemical modification of PEG to enhance performance. Figure 2 depicts the nonlinear rheological behavior of synthesized STF in pure and modified conditions.

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



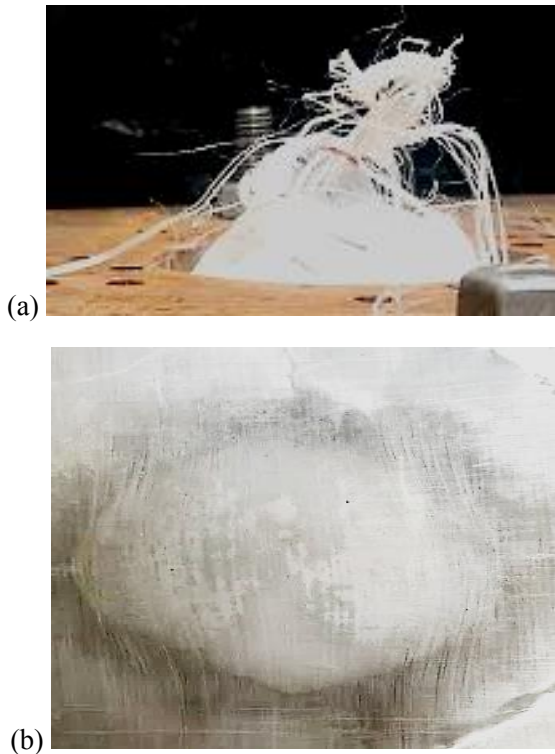
**Fig. 2. (a) Rheological behavior of STF in (a) pure and (b) modified conditions.**

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.



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

### 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. 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.
- [3] 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.
- [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 پلی اتیلن فوق‌سنگین در برابر برخورد نرم

مریم زینال‌نژاد، سینا جلیلی\*

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰  
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰  
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

### کلمات کلیدی:

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

**خلاصه:** پژوهش حاضر اثر حضور سیال غلیظ‌شونده برشی را بر رفتار الیاف پلی اتیلن فوق‌سنگین (داینیما) در برابر برخورد نرم مورد بررسی قرار داده است. ژلاتین باستیک 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 متر بر ثانیه 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 بین لایه‌های گستره آسیب و برآمدگی ماندگار به طور چشم‌گیری کاهش و به میزان کمتر از ۳ میلی‌متر رسید. در شرایط سیال اصلاح‌شده بدون حضور حلال اصطکاک بین لایه‌های 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.

### ۱- مقدمه

استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش، طراحی بهینه لبه‌های توربین و استفاده از مواد مرکب و آلیاژهای پیشرفته انجام گرفته است [۲]. برخورد پرنده‌ها همانند برخورد با مایعات، یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای هواگردها است. طبق آمار، از هر ۲۰۰۰ پرواز، یک مورد برخورد پرنده رخ می‌دهد و این رقم به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است [۳]. مشکل برخورد پرنده‌ها به بال‌های هواپیما نیز بررسی شده و بهینه‌سازی بال با افزایش ضخامت پوسته و همچنین تقویت زاویه روبرش انجام شده است [۴]. استفاده از مواد مرکب تقویت‌شده لانه‌زنبوری و فوم در برابر برخورد پرنده‌ها 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

برخورد اجسام نرم با انرژی جنبشی بالا مانند برخورد پرنده‌ها و یا قطرات باران با سازه‌های هوایی و زمینی مانند هواپیماها یا پره‌های توربین بادی می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی شوند. هنگامی که انعطاف‌پذیری و تغییر شکل 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 می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی و کاهش کارایی تجهیزات شود [۱]. سایش و فرسایش لبه‌های توربین‌های پیشرفته‌ها به‌ویژه در شرایط جوئی مختلف، یکی از چالش‌های اساسی در صنعت هوافضا و نیروگاه‌ها است. برای مقابله با این مشکل، چندین رویکرد پژوهشی و فناورانه مانند

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sjalili@sut.ac.ir

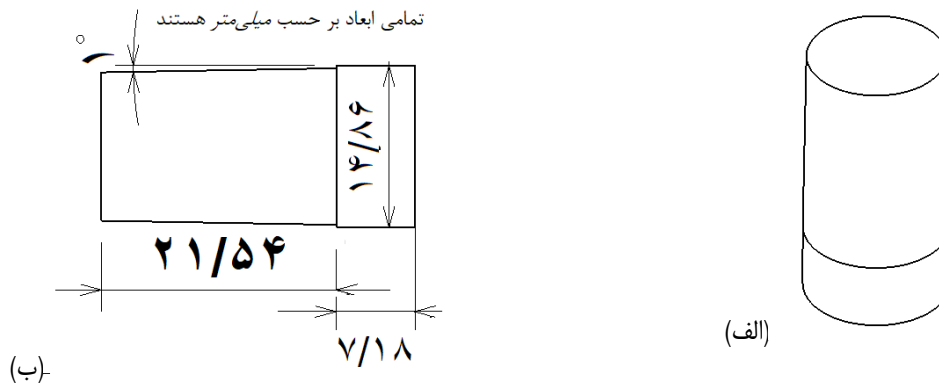


شود [۱۸]. استفاده از پارچه‌های کولار آغشته به سیال و ادغام آن با ساختار کامپوزیت پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه باعث افزایش جذب انرژی در برخوردهای با سرعت بالا شده است [۱۹]. افزودن ذرات کاربید سیلیکون به سیال‌های مبتنی بر سیلیس، عملکرد محافظتی پارچه‌های آغشته به این سیال را در برابر ضربات ناشی از میخ 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 آغشته‌کردن 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 پرکردن 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 آغشته‌سازی به سیال، آزمون بیرون کشیدن نخ در سرعت‌های مختلف انجام گرفت و نتیجه حاکی از افزایش چشمگیر پارامتر اصطکاک به‌حدی 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 گستردگی قابل توجهی نسبت به برخورد سخت دارد و همین نکته منجر به فعالیت بیشتر تنش‌های درون‌صفحه‌ای بین‌لایه‌ای برای مقاومت در برابر

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 زره‌ها دارد [۹]. با استفاده از نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی ضربه پرنده در یک مطالعه، بهینه‌سازی چیدمان کامپوزیتی پره بالگرد 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 گستره 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 آغشته‌کردن 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 آغشته‌کردن 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-داینما بر روی لبه حمله بال هواپیما انجام شد و بهینه‌سازی سازه بال انجام گرفت تا پس از ضربه کمترین آسیب را متحمل



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)

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 سیال گونه 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 تهمیدات 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 سه بعدی برای ساخت نمونه قالب از جنس پلی لاکتیک اسید برای ساخت قالب سیلیکونی استفاده شد (شکل‌های ۲ و ۳). شکل نهایی قالب سیلیکونی استفاده شده در تصویر ۴ نمایش داده شده است.

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 (۲۵ °C) حل کرده و اجازه داده می‌شود تا ژلاتین کاملاً ذوب شود و سپس ۱۴ گرم آب گرم (با دمای ۶۰ °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

نفوذ پرتابه می‌شود. این در حالی است که در برخورد سخت، تنش‌های برشی خارج صفحه‌ای که بسیار موضعی تر 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 لیاف 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 شلیک شده 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 اصلاح شده) و فرآیند آغشته‌سازی لیاف 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



شکل ۳. ریخته‌گری سیلیکون داخل قالب چاپ شده.

Fig. 3. Silicone casting into printed mold.



شکل ۲. قالب تهیه‌شده با دستگاه پرینتر سه‌بعدی.

Fig. 2. Mold made with a 3D printing.

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.

#### ۲-۲- ساخت سیال غلیظ‌شونده برشی

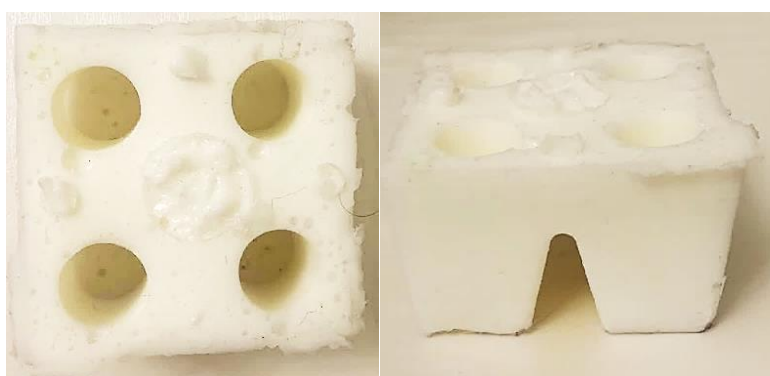
سیال غلیظ‌شونده برشی یک مخلوط کلونیدی شامل نانو ذرات و یک سیال حامل است. نانوذرات می‌توانند از جنس سیلیس، پلی متیل متاکریلات، کربنات کلسیم و سایر مواد معدنی مصنوعی یا طبیعی باشند. سیال حامل نیز موادی مانند آب، پلی اتیلن گلایکول یا اتیلن گلایکول را شامل می‌شود.

کدر به هنگام عبور از پرده فوتودیود سرعت‌سنج‌های دستگاه تفنگ گازی با دقت بیشتری قابل تشخیص هستند.

ژلاتین تهیه‌شده را در داخل قالب سیلیکونی ساخته‌شده، ریخته‌گری کرده و به مدت ۲ ساعت در یخچال دمای ۵ درجه سلسیوس قرار داده می‌شود تا ژلاتین مایع به طور کامل منجمد شود (شکل ۵).

در انتها پرتابه‌های شکل‌گرفته را به آرامی از داخل قالب خارج کرده تا به هندسه و جرم آنها آسیبی وارد نشود (شکل ۶).

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



(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.



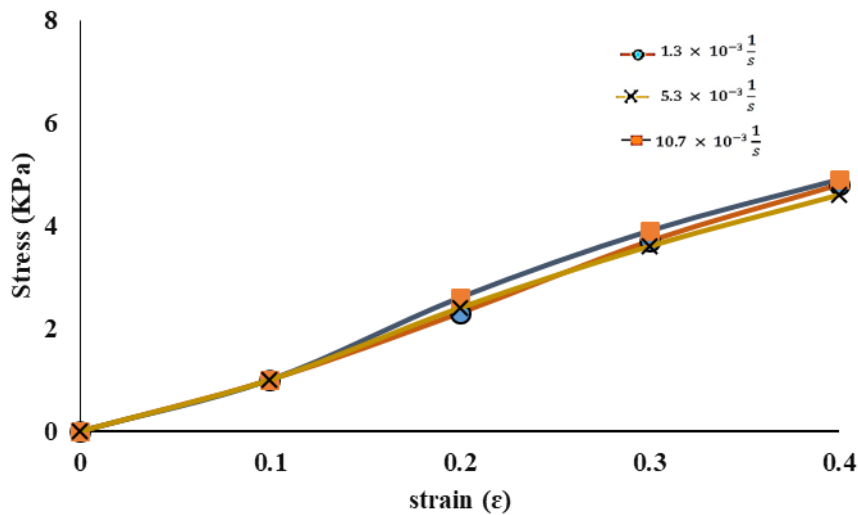
شکل ۶. شکل نهایی پرتابه نرم بعد از انجماد.

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 silicon mold.



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].

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.

#### ۲-۲-۲- آماده‌سازی سیال اصلاح‌شده

فرآیند اصلاح سیال غلیظ‌شونده برشی با اصلاح پلی‌اتیلن‌گلایکول صورت می‌گیرد. برای تهیه ۱۵ گرم از پلی‌اتیلن‌گلایکول اصلاح‌شده، ابتدا

این سیال با بالا رفتن نرخ برش، افزایش گرانیروی از خود نشان می‌دهد و در برخی موارد می‌تواند همانند یک ماده شبه‌جامد رفتار کند و با حذف بارگذاری، به حالت مایع اولیه خود برمی‌گردد. افزایش گرانیروی 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 آتروسل ساخت شرکت آوونیک آلمان در ۳۵ گرم پلی‌اتیلن‌گلایکول ۴۰۰ ساخت شرکت مرک آلمان حل می‌شود تا سیال با ۳۰ درصد وزنی به‌دست آید. اختلاط اولیه روی دستگاه همزن مغناطیسی انجام می‌گیرد در حالی که پلی‌اتیلن‌گلایکول روی همزن قرار داشته و نانو ذرات سیلیکا به





شکل ۹. استفاده از همزن دور بالا برای اختلاط نهایی فوم سیلیکا در پلی اتیلن گلایکول.

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



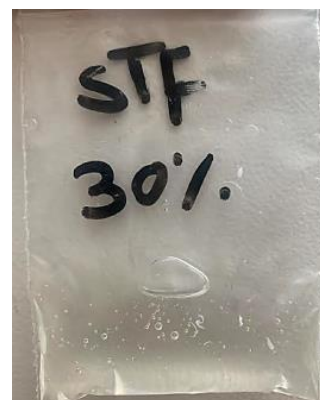
شکل ۸. اختلاط اولیه فیوم سیلیکا با پلی اتیلن گلایکول به همراه همزن فراصوت.

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



شکل ۱۱. اختلاط پلی اتیلن گلایکول و آدیپک اسید در حمام آوا دهی.

Fig. 11. Mixing PEG and Adipic acid in the sonication bath.



شکل ۱۰. بافتار نهایی سیال خالص.

Fig. 10. The final texture of pure STF.

تری اتیل آمین (تهیه شده از شرکت پتروکیما) با نسبت ۱:۲ مولی (نسبت پلی اتیلن گلایکول به تری اتیل آمین) اضافه می‌گردد. 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 می‌شود (شکل ۱۲).

در نهایت همانطور در شکل ۱۳ نشان داده شده است، ترکیب در حمام روغن با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت قرار می‌گیرند تا واکنش کامل صورت پذیرد.

باید پلی اتیلن گلایکول با آدیپک اسید (عامل اسیدی برای اصلاح سیال حامل با شناسه محصول ۹-۰۴-۱۲۴ 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 (آوا دهی) به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند (شکل ۱۱).

در مرحله بعد مخلوط حاصل در محیط نیتروژن قرار می‌گیرد تا کاتالیزگر به آن اضافه شود. پس از پرشدن محیط توسط گاز نیتروژن، کاتالیزگر



شکل ۱۳. حمام روغن برای تکمیل شدن فرآیند اصلاح

Fig. 13. Oil bath to complete the shaving process.



شکل ۱۲. اضافه کردن کاتالیزگر و حلال در محیط نیتروژن.

Fig. 12. Adding catalyst and solvent in a nitrogen environment.



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.

### ۲-۳- صحت سنجی ترکیب سیال غلیظ شونده برشی

برای راستی آزمایی مواد به کار رفته و درستی فرآیند اصلاح و نیز بررسی رفتار غلیظ شونده برشی از دو آزمون طیف سنج مادون قرمز و رئومتر



شکل ۱۴. حالت نهایی سیال حامل اصلاح شده.

Fig. 14. Final shape of the modified carrier fluid.

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). 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 ۱۸ طیف به دست آمده از آزمون طیفسنجی مادون قرمز را نشان می‌دهد. ابتدا عدد موجی  $(\text{cm}^{-1})$  ۳۳۸۲ نتیجه شده است که یک قله عریض و مختص به ارتعاش کششی گروه‌های غیرواکنشی  $\text{OH}^-$  می‌باشد که در هر دو ترکیب (STF خالص و اصلاح شده) وجود دارد. عدد موجی بعدی  $(\text{cm}^{-1})$  ۲۸۷۴ می‌باشد که نشان دهنده گروه‌های کششی  $\text{CH}_2^-$  در زنجیره اصلی پلی اتیلن گلاکول و پلی اتیلن گلاکول اصلاح شده است. همچنین برای همه طیف‌ها عدد موجی  $(\text{cm}^{-1})$  ۱۱۱۸ قابل رؤیت است که مربوط به ارتعاش کششی  $\text{C-O-C}$  می‌باشد. تنها عدد متمایز که در نتیجه اصلاح پلی اتیلن گلاکول ۴۰۰ می‌باشد، عدد موجی  $(\text{cm}^{-1})$  ۱۷۲۷ می‌باشد که مربوط به گروه کششی کربونیل  $(\text{C=O})$  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 پلی اتیلن گلاکول ۴۰۰ به درستی انجام شده است.



شکل ۱۶. حالت نهایی سیال اصلاح شده در حالت خشک.

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

صفحات موازی استفاده شد.

### ۲-۳-۱- دستگاه طیفسنج مادون قرمز

از دستگاه طیفسنج 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. طیف‌های مادون قرمز داده‌های زیادی درباره ساختار ترکیب‌های 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  $(\text{cm}^{-1})$  ۴۰۰۰-۴۰۰ 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.

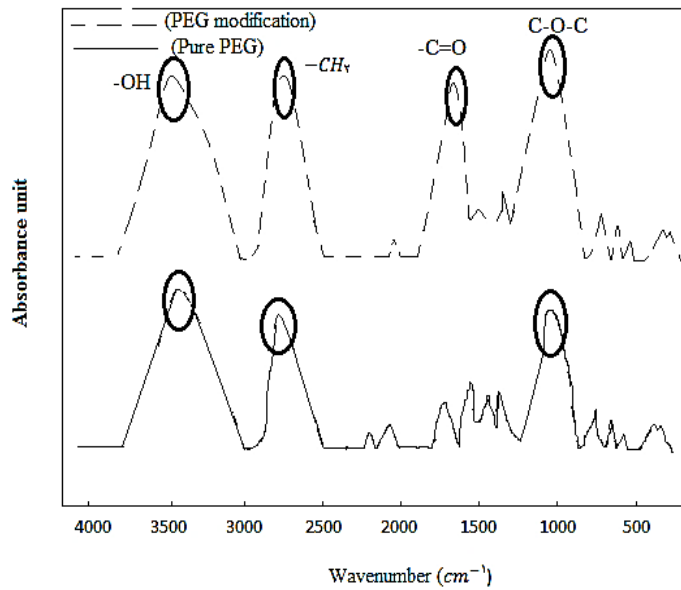
### ۲-۳-۲- دستگاه رئومتر صفحات موازی

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 گرانبوی ماده مورد بررسی بین ۰.۵ الی ۱ میلی‌متر قابل تنظیم است. هم چنین بیشینه تنش برشی دستگاه محدود به  $(\text{S}^{-1})$  ۶۲۸ می‌باشد.



شکل ۱۷. نمای بیرونی و درونی دستگاه FT-IR.

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



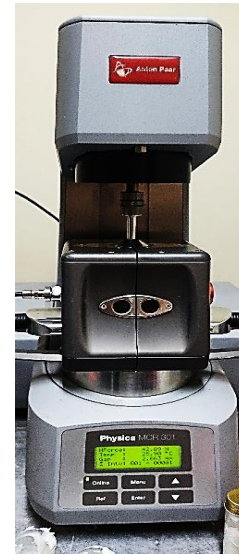
شکل ۱۸. طیف مادون قرمز پلی اتیلن گلایکول ۴۰۰ و پلی اتیلن گلایکول ۴۰۰ اصلاح شده توسط آدیپیک اسید.

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

خالص، رفتار ضخیم‌شوندگی برشی دیده نمی‌شود که به دلیل محدودیت پیشینه بسامد قابل اعمال توسط دستگاه است که محدود به  $(S^{-1})$  ۶۲۸ بوده و طبق بررسی‌های انجام شده 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، تأثیری در عملکرد آن نداشته و ایجاد اصطکاک مضاعف میان لایه‌ای در این نمونه‌ها نیز به وضوح قابل مشاهده است.

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

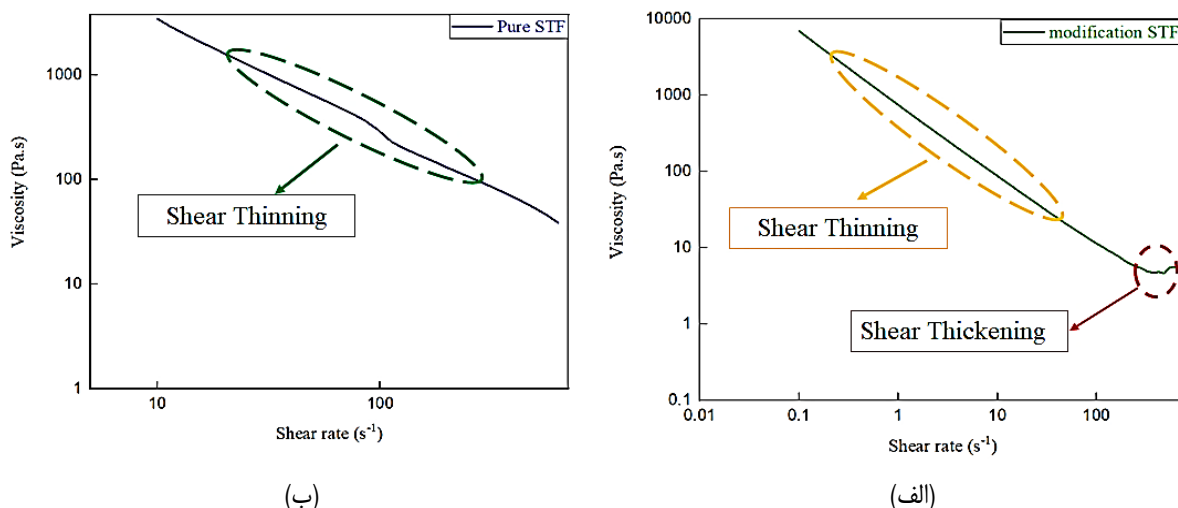
الیاف داینیما با چگالی  $(kg/m^3)$  ۹۷۰ و ضخامت  $0/3$  میلی‌متر، محصول شرکت دی اس ام، با ابعاد  $12 \times 12$  سانتی‌متر مربع برش خورده و یک لایه به جرم  $1/4$  گرم از سیال خالص و یا اصلاح‌شده با استفاده از دستگاه پرس مکانیکی در محدوده فشار میانگین سه الی چهار اتمسفر، در بین لایه‌ها قرار می‌گیرد. لازم 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



شکل ۱۹. دستگاه رئومتر صفحات موازی.

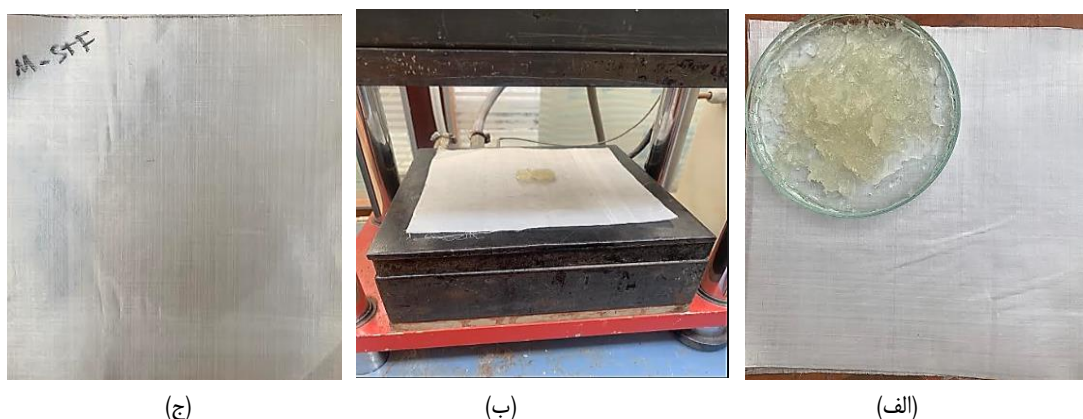
Fig. 19. Parallel plate rheometer device.

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  $(S^{-1})$  ۳۲۸، رفتار ضخیم‌شوندگی از خود نشان داده است. این در حالی است که در سیال



شکل ۲۰. نمودار گرانروی برحسب نرخ برش: الف) سیال اصلاح شده ب) سیال خالص.

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



شکل ۲۱. الف) اضافه کردن سیال به الیاف ب) قراردادن الیاف به همراه سیال زیر دستگاه پرس ج) الیاف آغشته شده به سیال.

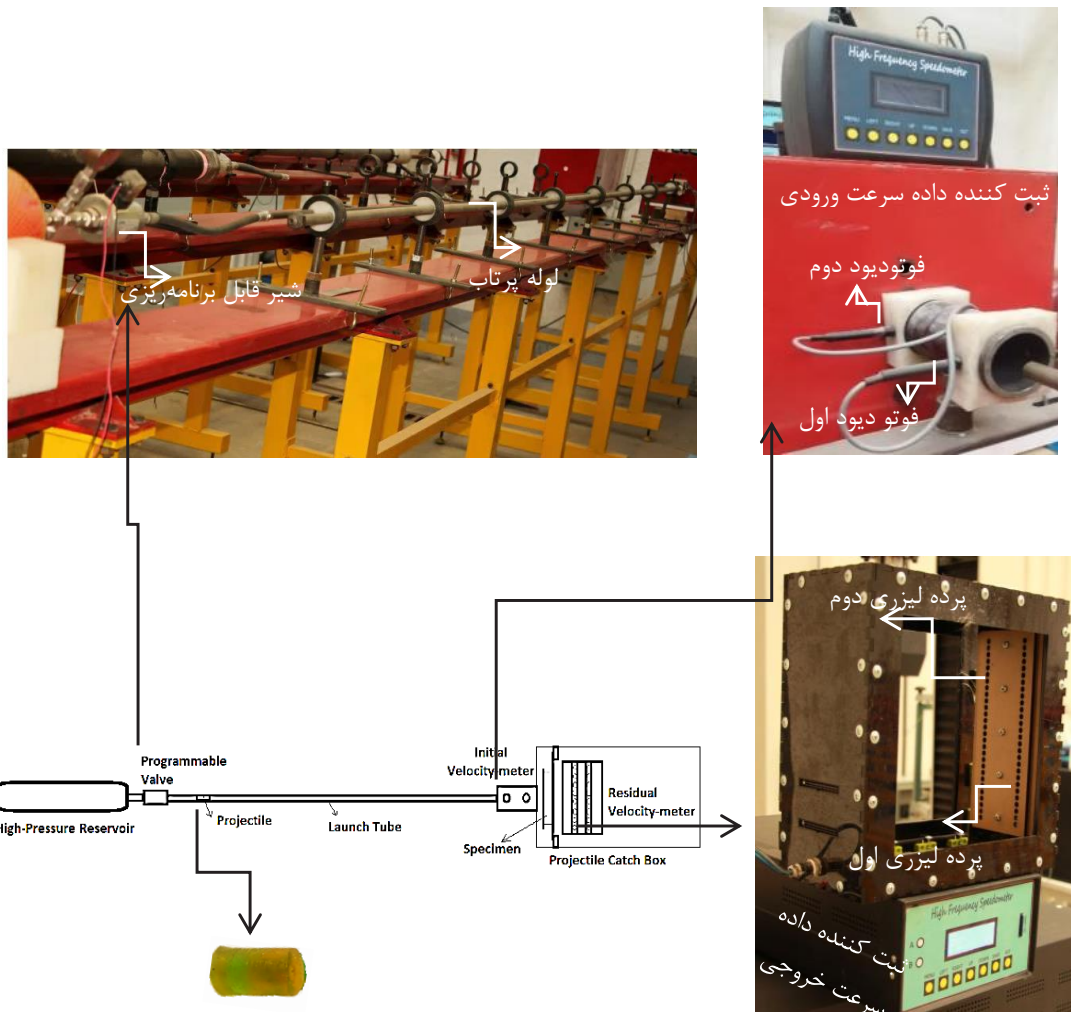
Fig. 21. (a) Adding STF to the fibers (b) Placing the fibers with STF under the press (c) Fibers impregnated with STF.

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 جذب شده به کار گرفته شوند. شکل ۲۲ اجزای تشکیل دهنده 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

سیال به وزن کل نمونه، نسبت وزنی نمونه‌ها به صورت میانگین به میزان  $1 \pm 14$  درصد گزارش می‌شود. شکل ۲۱ گام‌های آماده‌سازی نمونه مورد نظر را نشان می‌دهد.

## 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 پرتابه‌های نرم به



شکل ۲۲. دستگاه تفنگ گازی و اجزای تشکیل‌دهنده آن.

Fig. 22. Gas gun device and its components.

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.

برای بررسی تأثیر سیال غلیظ‌شونده برشی روی عملکرد الیاف داینیما، این آزمون با شرایط الیاف داینیما ساده (بدون حضور سیال)، الیاف داینیما پرس‌شده با سیال خالص و اصلاح‌شده درحالت‌های خشک‌شده 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

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



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

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

می‌دهد. همان‌طور که این تصاویر نشان می‌دهند، میزان و گستردگی آسیب بسته به شرایط استفاده از سیال غلیظ‌شونده برشی، به صورت محسوسی متفاوت است. شکل ۲۴ نمایشگر آسیب به‌جامانده در الیاف داینیمای ساده و در غیاب سیال است و در این مورد، اهداف به‌طور میانگین دچار برآمدگی  $34/6$  میلی‌متری شده و پرتابه موفق به عبور از آن‌ها گردید. سرعت پرتابه بعد از خروج به صورت میانگین برابر با  $56/3$  متربرثانیه ثبت گردید و این به معنای جذب انرژی جنبشی میانگین تقریباً  $54$  درصدی، توسط این نوع از هدف است. برخورد پرتابه نرم، منجر به گسسته‌شدن تارهای الیاف از هم‌دیگر و ایجاد فضای عبور مناسب برای آن شده است. با مقایسه کردن شکل ۲۴ و شکل ۲۵ (الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص) به سادگی می‌توان به نقش مؤثر سیال در جذب انرژی و بهبود مقاومت بین‌لایه‌ای الیاف پی برد.

در حالت کلی استفاده از سیال در حالت‌های خالص و اصلاح‌شده مانع از عبور پرتابه شده است. با این‌حال، سطح توسعه آسیب در نمونه‌ها 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 تنش‌های برشی ویسکوز غشایی که به صورت گسترده در هدف توزیع می‌شود، کافی نیست. فرآیند خشک کردن نمونه‌ها در آون بر میزان اصطکاک میان‌لایه‌ای ناشی از حضور سیال افزوده است، به ترتیبی که در اهداف آماده‌شده به این روش، هیچ‌گونه آسیب جزئی یا تورم قابل اندازه‌گیری مشاهده نمی‌شود. استفاده از سیال اصلاح شده منجر به کاهش برآمدگی میانگین به  $1/33$  میلی‌متر شده در حالی که در وضعیت خالص میزان برآمدگی میانگین برابر با  $2/9$  میلی‌متر در شرایط خیس است. این نشانگر کاهش  $54$  درصدی برآمدگی در حضور سیال اصلاح شده است. این در حالی

پرتابه‌ها در محدوده  $80-92$  متربرثانیه قرار داشتند. محدوده سرعت اولیه پرتابه در محدوده سرعت هواپیما در زمان برخاست و فرود (تقریباً  $250$  تا  $300$  کیلومتر بر ساعت) انتخاب گردید و همچنین باید به این نکته نیز توجه داشت که محدوده جرمی پرتابه‌ها شبیه‌سازی کننده برخورد پرتادگان 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  $12$  میلی‌متر که توسط چهار پیچ به هم‌دیگر متصل می‌شوند، تثبیت شد. شکل ۲۳ یک نمونه هدف بسته‌شده به فیکسچرهای محفظه هدف دستگاه تفنگ گازی را نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج و بررسی

برای مقایسه نمونه‌ها و بررسی تأثیر سیال روی عملکرد الیاف داینیمای سه مؤلفه مهم مدنظر 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 آسان‌تر 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.

تکانه انتقال‌یافته در برخورد نرم به واسطه تغییرشکل قابل ملاحظه پرتابه منجر به تغییرشکل‌های گسترده‌تر و در عین حال با عمق کمتر در هدف می‌شود. 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، تغییرشکل درون‌صفحه‌ای نقش پررنگ‌تری نسبت به پرتابه‌های با صلابت بالاتر دارد. به همین دلیل تنش‌های درون‌صفحه‌ای (غشایی) برشی میان‌لایه‌ای مشارکت قابل ملاحظه‌ای در برابر برخورد از خود نشان خواهند داد. در برخورد نرم، توزیع نرخ کرنش در هدف نیز پیچیده‌تر و وسیع‌تر بوده و اغلب مقدار آن پایین‌تر از حالت برخورد سخت است. در حالی که در برخورد پرتابه‌های سخت با سرعت بالا، تنش‌های برشی موضعی بیرون‌صفحه‌ای نقش اصلی را در ایجاد مقاومت در برابر عبور پرتابه، بازی می‌کنند.

شکل‌های ۲۴ تا ۲۸ وضعیت اهداف پس از برخورد پرتابه نرم را نشان

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				اول	دوم	سوم	
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 داینیمای 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 داینیمای 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 داینیمای 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 داینیمای آغشته به سیال اصلاح شده (در حالت خیس)
آسیبی قابل مشاهده نبود	-----					غیرقابل اندازه‌گیری	۹۱/۵	۸۶/۳	۸۱	دو لایه الیاف داینیمای آغشته به سیال اصلاح شده (در حالت خشک)

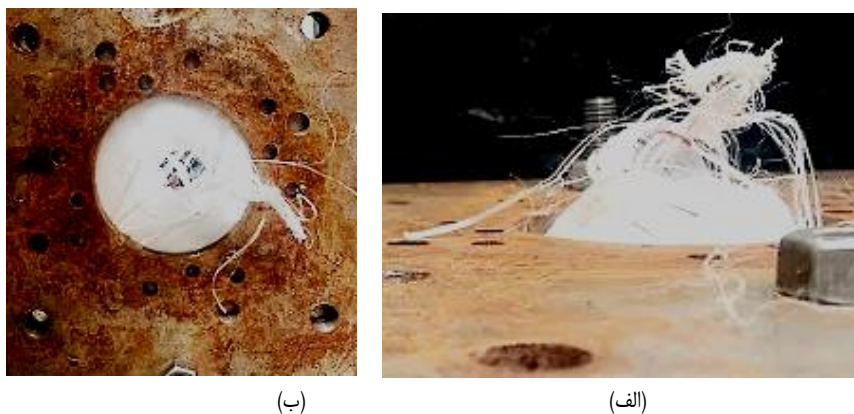
در وضعیت‌های خیس و خشک بوده و همانطور که مشخص است در هر دو وضعیت عملاً با چشم غیرمسلح نمی‌توان آسیب ماندگاری را مشاهده کرد. برای مقایسه بهتر، تغییرات برآمدگی ماندگار در نمونه‌ها تحت شرایط متفاوت استفاده از سیال در شکل ۲۹ به صورت نمودار میله‌ای نمایش داده شده است. با توجه به مشاهده‌های انجام شده، سیال غلیظ شونده برشی با افزایش اصطکاک درون‌صفحه‌ای میان الیاف در سطحی وسیع‌تر و جلوگیری از لغزش لایه‌ها در نواحی پیرامونی، باعث افزایش استحکام قابل توجه نمونه‌ها در برابر برخورد شده و ویژگی ارتجاعی سازه به طرز چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. با توجه به ضخامت بسیار اندک لایه سیال، سایر مکانیزم‌های مرتبط با استهلاک سیال همانند قفل‌شدگی و یا جامدشدگی ناشی از افزایش فشار نقش موثری در ایجاد استحکام مضاعف در الیاف ندارند.

است که در شرایط خشک‌شده و خالص برآمدگی میانگین ۲/۷۶ میلی‌متر است که تفاوت چندانی نسبت به شرایط خیس خالص (۲/۹ میلی‌متر) دیده نمی‌شود.

شکل‌های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب مربوط به الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص در وضعیت‌های خیس و خشک هستند و با توجه به میزان خیز باقی‌مانده بسیار اندک این نمونه‌ها، به جای نمای جانب تصاویر صرفاً از نمای عمود بر هدف نمایش داده شده‌اند. با دقت در تصاویر فوق می‌توان به انحراف ماندگار هرچند اندک تارهای الیاف نسبت به حالت اولیه در وضعیت خیس پی برد. در حالیکه در نمونه خشک عملاً هیچ‌گونه تغییر شکل محسوس ماندگاری در هدف دیده نمی‌شود.

تصاویر ۲۷ و ۲۸ نیز به ترتیب نمایشگر اهداف آغشته‌شده به سیال اصلاح‌شده



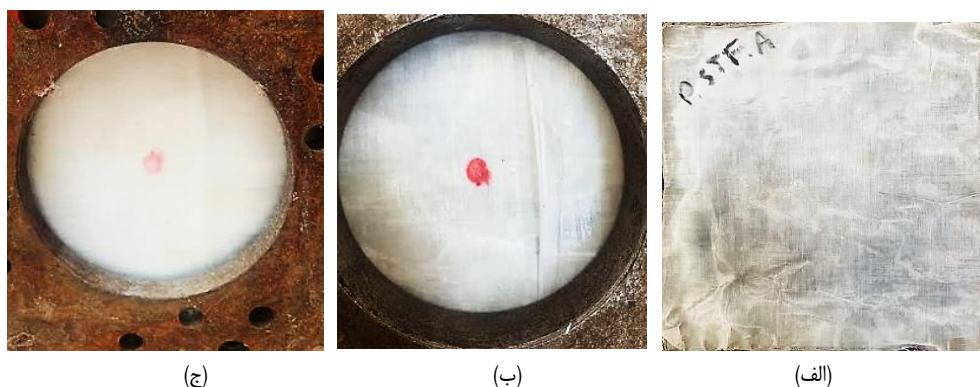


شکل ۲۴. آسیب برخورد جسم نرم بر روی الیاف داینیمای خالی (بدون سیال) (الف) نمای جانبی و (ب) از نمای روبه‌رو پشت محل برخورد. **Fig. 24. Soft object impact damage on neat Dyneema fibers (without STF) (a) side view and (b) from the front view behind the impact site.**



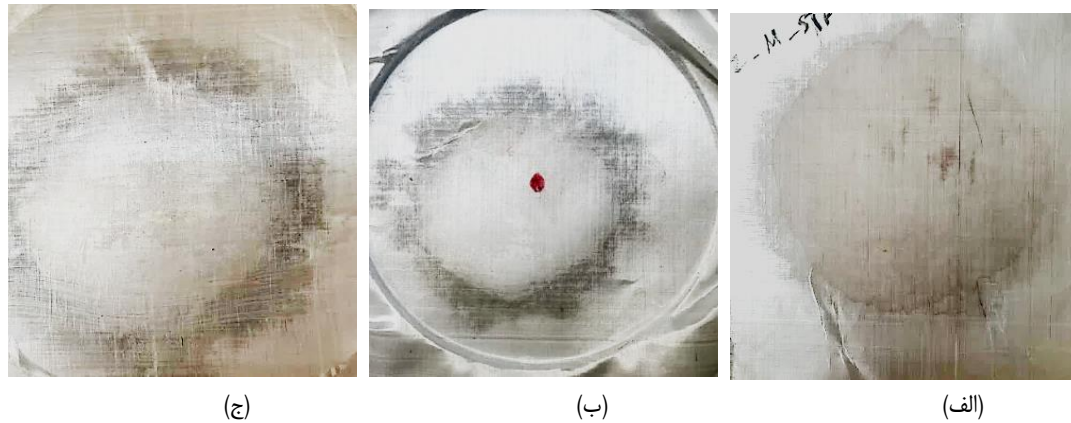
شکل ۲۵. الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص در حالت خیس (ب) آسیب الیاف در برابر ضربه جسم نرم در صفحه پشتی (به انحراف ماندگار الیاف توجه شود) (ج) آسیب الیاف در صفحه جلو.

**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.**



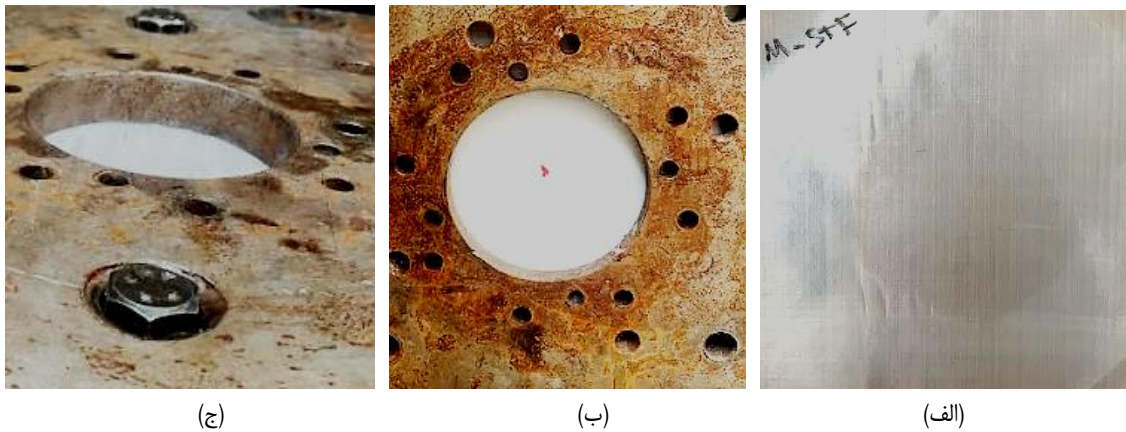
شکل ۲۶. الیاف داینیمای آغشته‌شده به سیال خالص در حالت خشک (ب) آسیب الیاف در برابر ضربه جسم نرم در صفحه جلو (ج) آسیب الیاف در صفحه پشتی

**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.**



شکل ۲۷. (الف) الیاف داینیما 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.

Fig. 27. 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.



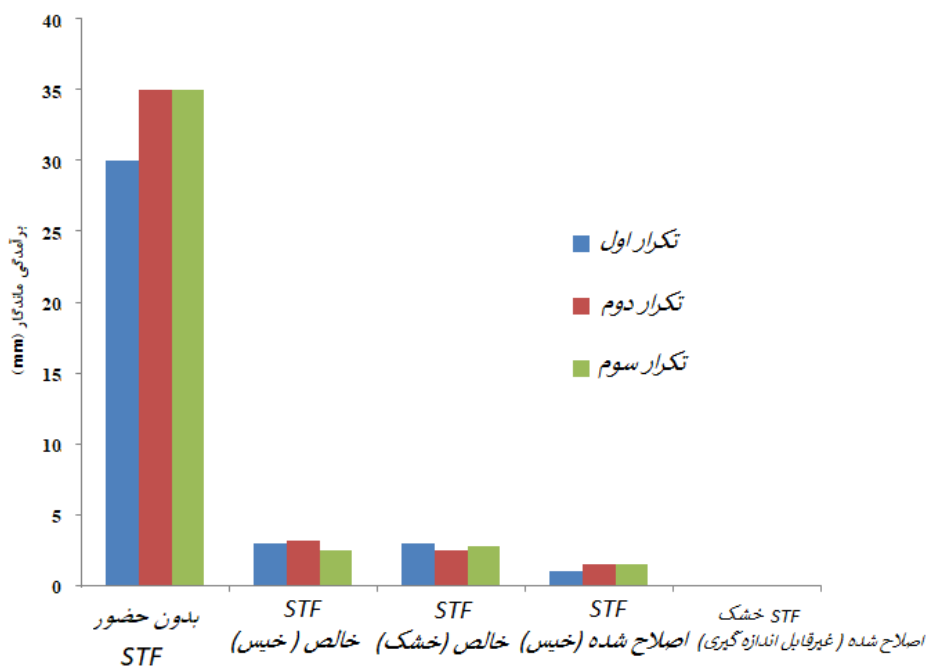
شکل ۲۸. (الف) الیاف داینیما آغشته شده به سیال اصلاح شده در حالت خشک (ب) صفحه جلو از نمای روبه رو (ج) صفحه پشتی از نمای جانبی.

Fig. 28. a) Dyneema fibers impregnated with modified STF in dry state (b) Front panel from front view (c) Back panel from side view.

### نتیجه گیری

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 درحالی 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.

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار اهداف ساخته شده از الیاف پلی اتیلن فوق سنگین (داینیما) در برابر برخورد نرم زمانی که در شرایط آغشته شده به سیال خالص و یا اصلاح شده 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 گسترده تر بودن سطح زیربارگذاری در شرایط برخورد نرم، تغییر شکل‌ها وسیع تر بوده و در نتیجه فعالیت تنش‌های درون صفحه‌ای و اصطکاک میان لایه‌ها نقش مؤثرتری در کاهش شدت ضربه ایفا می‌کند.



شکل ۲۹. نمودار میله‌ای برای مقایسه میان برآمدگی ماندگار در شرایط مختلف استفاده از سیال.

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

[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. Seshiah, 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,

## منابع

[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. Yasae, Effect of bird-strike on sandwich composite aircraft wing leading edge. *Advances in Engineering Software*, 148 (2020) 102839.

- 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>
- 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Zeynalnejada, S. Jalili, Effect of Shear Thickening Fluid on the Soft Impact Response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fibers, Amirkabir J. Mech Eng., 57(9) (2025) 1165-1186.*

DOI: [10.22060/mej.2026.25142.7925](https://doi.org/10.22060/mej.2026.25142.7925)



