

## تحلیل تجربی نفوذ در اهداف متشکل از لایه‌های کولار و سیال STF

امین خدادادی<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲</sup> و محمدعلی اکبری<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۳۰)

### چکیده

در این مقاله، عملکرد بالستیکی الیاف پلی‌آرامید با بافت ساده که با سیال غلیظ‌شونده برشی (STF) آغشته شده مورد بررسی قرار گرفته است. سیال غلیظ برشی، از پراکنده شدن ذرات نانو سیلیکا در پلی‌اتیلن‌گلیکول حاصل شده است. سیال غلیظ برشی یک سیال غیرنیوتنی است که غلظت آن با افزایش نرخ برش زیاد می‌شود. در این تحقیق حد بالستیک و انرژی بالستیک ویژه پارچه دو و چهار لایه که با سیال غلیظ‌شونده برشی با درصدهای جرمی ۱۵، ۲۵ و ۳۵ نانوسیلیکا آغشته شده، با پارچه خشک مقایسه شده است. نتایج نشان دادند که پارچه آغشته به سیال غلیظ برشی با ۳۵ درصد جرمی نانوسیلیکا دارای بالاترین حد بالستیک برای پارچه دو و چهار لایه در بین تمامی نمونه‌ها می‌باشد. نمونه دو لایه آغشته به سیال ۳۵ درصد، دارای بهترین بهبود در انرژی بالستیک ویژه، نسبت به نمونه دو لایه خشک می‌باشد. عکس‌های دوربین سرعت بالا نشان می‌دهند که نمونه‌های خشک، تغییر شکل‌های محلی بیشتری در محل ضربه تجربه می‌کنند. همچنین یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna ایجاد شده و نشان داده شد که بهبود عملکرد بالستیکی پارچه آغشته به سیال غلیظ برشی تا حدودی مربوط به افزایش اصطکاک بین پرتابه و پارچه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ضربه، حد بالستیک، کولار، سیال غلیظ برشی

## Experimental Analysis of Penetration into Targets Made of Kevlar Laminate with STF Fluids

A. Khodadadi, Gh.H. Liaghat, and M.A. Akbari

Mech. Eng. Dept.

Tarbiat Modares Univ.

(Received: 24 June, 2012; Accepted: 18 February, 2013)

### ABSTRACT

In this paper, the ballistic performance of Kevlar plain-woven fabric impregnated with a colloidal shear thickening fluid (STF) is investigated. STF is composed of silicon dioxide nanoparticles and polyethylene glycol and is a non-newtonian fluid behavior defines as the increase of viscosity with the increase in the applied shear rate. The ballistic limit and specific ballistic energy of double and quadruple ply fabric systems impregnated with 15, 25 and 35 wt% STF particle concentration are compared to neat fabric. Results show those targets with 35 wt% STF particle concentration yield the highest ballistic limit for double and quadruple ply fabric. The double ply system with 35 wt% STF particle concentration showed the greatest improvement in specific ballistic energy over neat double ply systems. High speed photography showed that the neat Kevlar experience more localized deformation on impact. A finite element model was created using Ls-Dyna software and it was shown that the increased ballistic performance for shear thickening fluid impregnated Kevlar fabric is at least due to the increased friction between projectile and target.

**Keywords:** Impact, Ballistic Limit, Kevlar, Shear Thickening Fluid

۱- کارشناس ارشد: khodadadi.amin@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): Ghlia530@modares.ac.ir

۳- دانشجوی دکترا: m\_akbari@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

طارق الحسن<sup>۴</sup> [۱۱] و جین کانگ<sup>۵</sup> [۱۲] عملکرد پارچه کولار آغشته به سیال STF را تحت ضربه چاقو و میخ و تحت تست‌های شبه‌استاتیک بررسی کردند. لی [۱۳] و طارق الحسن [۱۴]، رئولوژی سیالات غیرنیوتنی را تحلیل کردند. در این تحقیقات، افزایش ویسکوزیته این سیالات با افزایش تنش برشی مورد تحلیل قرار گرفته است. علی‌رغم پیشرفت‌ها در زمینه تجهیزات نظامی در کشور، تاکنون به پانل‌های ضدگلوله ساخته شده از پارچه و مایع STF توجه چندانی نشده و کشورمان از این فناوری بی‌بهره مانده که پیشرفت و خودکفایی در این زمینه، نیازمند پژوهش در مورد این پانل‌ها می‌باشد. در این راستا، به اثر سیال غلیظ شونده برشی و درصد جرمی نانوسیلیکا موجود در پلیمر و میزان افزایش مقاومت زره‌ها در حضور STF پرداخته شده است.

## ۲- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت سیال STF می‌بایست نانوذرات سیلیکا به پلیمر اضافه شود. به منظور بررسی اثر غلظت نانوذرات در پلیمر، سیال STF با ۳ نسبت جرمی متفاوت سیلیکا در پلی‌اتیلن گلیکول ساخته می‌شود. در واقع ۳ نمونه سیال با غلظت‌های متفاوت تهیه شده که در آن، نسبت جرم نانو به جرم سیال STF، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد خواهد بود. برای آغشتن پارچه کولار به سیال STF، ابتدا باید سیال را رقیق شود، بدین منظور از اتانول استفاده شده است. اتانول با سیال غلیظ شونده برشی، مخلوط شده و با هم‌زنی، محلول یک‌پارچه و رقیقی حاصل می‌شود.

نمونه‌های پارچه کولار، در داخل سیال STF که با اتانول رقیق شده است قرار می‌گیرد و از سیال اشباع می‌شود. در مرحله بعد، اتانول موجود در نمونه‌های پارچه آغشته باید تبخیر شوند. بدین منظور می‌بایست از کوره استفاده شود. کوره در دمای ۸۰ درجه تنظیم می‌شود و برای تأثیر بیشتر، جریان هوایی در داخل کوره برقرار می‌شود و نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه داخل کوره باقی می‌مانند و پس از آن نمونه‌های دو و چهارلایه کولار تهیه می‌شود.

برای مشاهده STF موجود در تار و پود پارچه، نحوه نفوذ سیال در داخل پارچه و همچنین بررسی نحوه توزیع نانوسیلیکا در الیاف از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۶</sup> استفاده

توسعه در سیستم مواد سبک بافته شده برای مقابله در برابر نفوذ گلوله با سرعت‌های بالا، موضوع تحقیقات بسیاری در سال‌های اخیر بوده است. این پارچه‌های بافته شده یک عضو کلیدی برای حفاظت جان انسان‌ها در جنگ‌ها و میادین نبرد می‌باشد. از آنجا که میزان جذب انرژی توسط یک زره، رابطه مستقیمی با استحکام آن دارد و هر چه استحکام زره بالاتر باشد عملکرد آن بهتر خواهد بود، بنابراین الیاف کولار گزینه مناسبی برای کاربردهای بالستیکی می‌باشد. امروزه کامپوزیت‌های ساخته شده از کولار دارای کاربردهای بالستیکی زیادی بوده و کارهای زیادی در این زمینه انجام شده است [۱]. همچنین برای افزایش مقاومت زره‌های ساخته شده از الیاف کولار از سیال غلیظ‌شونده برشی استفاده می‌شود. این سیال از اختلاط نانوذرات سیلیکا در پلی‌اتیلن گلیکول حاصل می‌شود. هنگامی که این سیال تحت ضربه قرار می‌گیرد، تجمعاتی از ذرات نانو شکل گرفته و جرم‌هایی به وجود می‌آیند که هیدروکلاستر نامیده می‌شوند. در نتیجه سیال سفت شده و به حالت جامد نزدیک می‌شود. با دفع ضربه، ذرات از هم جدا شده و به حالت اولیه برمی‌گردند. آغشتن سیال به پارچه، باعث افزایش مقاومت پارچه می‌شود. در واقع با استفاده از لایه‌های کمتری می‌توان انرژی گلوله را دفع نمود. در زمینه کولار تاکنون تحقیقات زیادی انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات در زمینه تحلیلی [۲-۴]، تعدادی در زمینه عددی [۵] و همچنین تعدادی در زمینه تجربی [۶] بوده است.

در زمینه ضربه روی کولار آغشته به STF تاکنون تحقیقات متعددی انجام گرفته که بیشتر در زمینه آزمایش‌های تجربی بوده است. لی<sup>۱</sup> نشان داد که حضور سیال غلیظ شونده برشی در پارچه مؤثر است و مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد. او به این نتیجه رسید، که ۱۰ لایه پارچه آغشته به STF، مقاومت یکسانی با ۱۵ لایه پارچه غیرآغشته خواهد داشت [۷].

تان<sup>۲</sup> و همکاران عملکرد بالستیکی پارچه بافته شده تاورون آغشته شده به کلئیدی ذرات سیلیکا در آب را با غلظت‌های متفاوت ذرات سیلیکا در آب، بررسی نموده‌اند [۸]. واگنر<sup>۳</sup> چندین حالت قرارگیری سیال غلیظ شونده برشی و الیاف نسبت به هم را بررسی کرد. نتایج به وضوح نشان داد که اشباع کولار به STF برای دستیابی به افزایش خواص بالستیکی پارچه، ضروری است [۹ و ۱۰].

4- Tarig A. Hassan  
5- Jin Kang  
6- Scanning Electron Microscopy

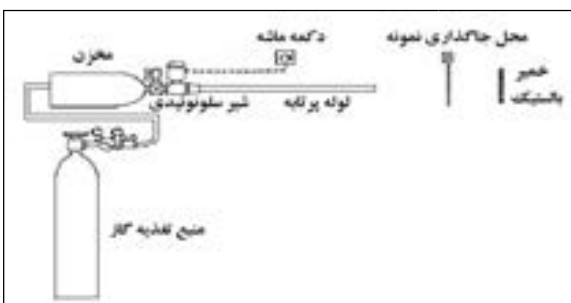
1- Lee  
2- Tan  
3- Wagner

شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی، یک پرتو الکترونی پراثری متمرکز با انرژی بالا دارد که سطح نمونه را اسکن می‌کند. در تصاویر گرفته شده، سیال موجود در تار و پود و توزیع مناسب ذرات نانوسیلیکا در الیاف نشان داده شده است. در شکل ۱ بزرگنمایی الیاف ۱۸ برابر الیاف واقعی می‌باشد. همان‌طور که در این تصویر مشخص شده است، هر یک از تار و پود پارچه از ده‌ها لیف تشکیل شده است. در شکل ۲ نیز الیاف با بزرگنمایی ۵۰۰ نشان داده شده‌اند. در این تصاویر نانوذرات موجود در سطح الیاف و لابلای آن به خوبی قابل تشخیص بوده و آغستگی مناسب می‌شود.

جدول (۱): مشخصات پارچه.

نوع بافت	ساده
وزن در واحد سطح	۲۲۰ Gr/m <sup>2</sup>
ضخامت	۰/۳۷mm

در شکل ۳ شماتیک یک تفنگ گازی آورده شده است. همچنین در شکل ۴ دستگاه تفنگ گازی مورد استفاده نشان داده شده است.



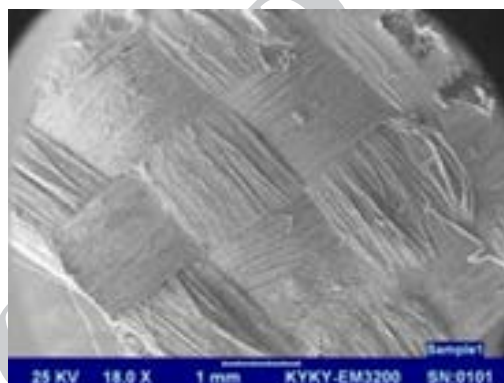
شکل (۳): شماتیک دستگاه تفنگ گازی.



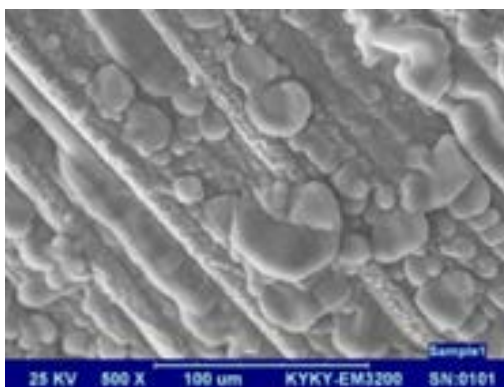
شکل (۴): دستگاه تفنگ گازی و فیکسچر مورد استفاده.

پرتابه مورد استفاده نیز یک استوانه سرکروی با قطر ۸/۷۴ میلی‌متر و جرم ۱۱/۱۸ گرم می‌باشد. قطر پرتابه طبق شعاع داخلی تفنگ گازی ساخته شده است. گلوله‌ها نیز از فولاد آلیاژی ۴۳۳۰ ساخته شده و دارای سختی ۴۰ راکول می‌باشند. برای اندازه‌گیری سرعت قبل و بعد از ضربه به هدف، از دو روش استفاده می‌شود. برای محاسبه سرعت قبل از برخورد از دستگاهی به نام کرونوگراف استفاده شده است. کرونوگراف

شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی، یک پرتو الکترونی پراثری متمرکز با انرژی بالا دارد که سطح نمونه را اسکن می‌کند. در تصاویر گرفته شده، سیال موجود در تار و پود و توزیع مناسب ذرات نانوسیلیکا در الیاف نشان داده شده است. در شکل ۱ بزرگنمایی الیاف ۱۸ برابر الیاف واقعی می‌باشد. همان‌طور که در این تصویر مشخص شده است، هر یک از تار و پود پارچه از ده‌ها لیف تشکیل شده است. در شکل ۲ نیز الیاف با بزرگنمایی ۵۰۰ نشان داده شده‌اند. در این تصاویر نانوذرات موجود در سطح الیاف و لابلای آن به خوبی قابل تشخیص بوده و آغستگی مناسب می‌شود.



شکل (۱): عکس SEM از پارچه با بزرگنمایی ۱۸.



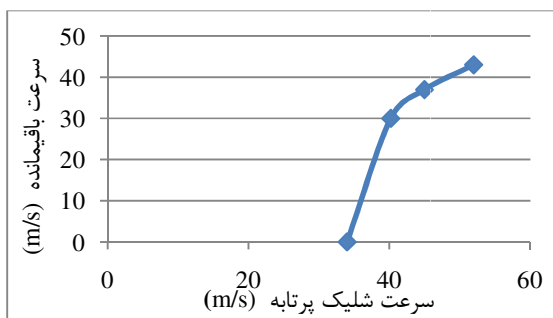
شکل (۲): تصویری از سطح الیاف با بزرگنمایی ۵۰۰.

### ۳- آزمایش‌های تجربی

در تحقیق حاضر، آزمایش‌های بالستیک با استفاده از تفنگ گازی انجام شده است. با توجه به اینکه در این تست‌ها به سرعت‌های متفاوت نیاز است، بنابراین استفاده از تفنگ گازی توجیه می‌شود. سرعت نهایی پرتابه که از انتهای لوله تفنگ گازی خارج می‌شود، تابعی از طول لوله، فشار گاز مخزن، ضریب انبساط گاز مورد استفاده و جرم پرتابه می‌باشد.

دستگاهی است که دارای دو سنسور لیزری است که با رد شدن پرتابه از بین آنها سرعت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای محاسبه سرعت خروجی از نمونه‌ها، از دوربین سرعت بالا و کرونگراف استفاده می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶).

برای سوراخ کردن نمونه‌ها می‌باشد. برای هر کدام از نمونه‌ها، تست‌های بالستیک تا آنجایی انجام می‌شود که سرعت حد به دست آید. به ازای شلیک پرتابه با سرعت‌های بالاتر از سرعت حد، پرتابه دارای سرعت خروجی خواهد بود. بدین ترتیب برای نمونه‌ها بازه‌ای از سرعت خروجی خواهیم داشت. به عنوان مثال، نتایج ۴ شلیک بر روی نمونه دولایه خشک در شکل ۷ آورده شده است.



شکل (۷): منحنی سرعت شلیک و سرعت باقیمانده متناظر با آن، برای نمونه دو لایه خشک.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، برای سرعت‌های برخورد بالاتر از سرعت حد بالستیک، افزایش سرعت برخورد باعث افزایش سرعت باقیمانده می‌شود اما این افزایش درست بعد از سرعت حد بالستیک خیلی شدید است. در جدول ۲ نتایج تست‌ها شامل سرعت حد بالستیک و حداقل انرژی لازم برای سوراخ کردن نمونه، ارائه شده است.

جدول (۲): حد بالستیک نمونه‌ها.

حداقل انرژی برای پارگی نمونه (J)	سرعت حد تجربی (m/s)	
۶/۴۶	۳۴	دو لایه خشک
۹/۸۶	۴۲	چهار لایه خشک
۸/۹۴	۴۰	دو لایه با سیال ۱۵ درصد
۲۰/۱۲	۶۰	چهار لایه با سیال ۱۵ درصد
۱۵/۱۱	۵۲	دو لایه با سیال ۲۵ درصد
۵۰/۴۵	۹۵	چهار لایه با سیال ۲۵ درصد
۴۷/۳۱	۹۲	دو لایه با سیال ۳۵ درصد
۹۰/۸۷	۱۲۷/۵	چهار لایه با سیال ۳۵ درصد



شکل (۵): دوربین سرعت بالا.



شکل (۶): کرونگراف.

### ۳-۱- نتایج حاصل از تست‌های بالستیک

سرعت حد بالستیک، کمترین سرعتی است که پارچه را سوراخ می‌کند و یا در یک تعریف دیگر، بیشترین سرعتی است که پارچه را سوراخ نمی‌کند. در تست‌های انجام شده سرعت، حد بالستیک و انرژی جذب شده گلوله توسط پارچه، به عنوان معیاری از عملکرد بالستیکی پارچه به دست آمده است. برای محاسبه حداقل انرژی مورد نیاز برای سوراخ کردن پارچه، باید انرژی گلوله را قبل از برخورد، از مقدار انرژی ضربه بعد از برخورد کسر نمود. بنابراین  $1/2 (m)(v_0^2 - v^2)$  انرژی گلوله بر خورد،  $v_0$  سرعت شلیک گلوله،  $1/2 (m)(v^2)$  انرژی گلوله بعد از برخورد،  $v$  سرعت خروجی پرتابه از پارچه و

## ۴- تحلیل عددی

با پیشرفت نرم‌افزارهای تحلیل عددی، استفاده از آنها باعث رسیدن به نتایج قابل قبول و مطمئنی شده و همچنین کاهش هزینه و زمان را در پی دارد. بنابراین به منظور بررسی عملکرد بالستیکی پارچه، یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار Ls-Dyna ایجاد شده است. در این مدل‌سازی، از المان‌های Solid برای پارچه و همچنین پرتابه استفاده شده است. لازم به ذکر است که کولار دارای رفتار تنش-کنش خطی می‌باشد، بنابراین برای پارچه از مدل ماده الاستیک، و برای پرتابه از مدل ماده صلب استفاده شده است.

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شبیه‌سازی‌ها، سرعت حد بالستیک به عنوان معیاری از عملکرد بالستیکی پارچه به دست آمده که نتایج، نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی با تست‌های بالستیک می‌باشد.

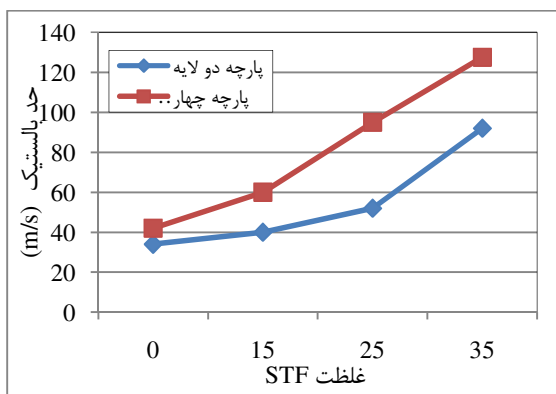
تعدادی از محققین [۹، ۱۵ و ۱۶] اثر سیال STF را افزایش اصطکاک بین گلوله و پارچه، می‌دانند. زمانی که سیال STF به داخل پارچه نفوذ می‌کند، ذرات نانوسیلیکا در درون پارچه پخش شده و حضور آنها باعث افزایش اصطکاک بین لایه‌های پارچه و همچنین گلوله و پارچه می‌شود. علاوه بر این، با برخورد گلوله به پارچه، سیال داخل آن به حالت جامد نزدیک شده و در برابر عبور گلوله از هدف مقاومت می‌کند. در این تحلیل، اصطکاک به عنوان معیاری از اثر سیال در پارچه در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی ضربه روی پارچه، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی افزایش یافت.

## ۵- نتایج و بحث

با انجام تست‌های بالستیک، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده توسط نمونه‌های پارچه خشک و آغشته به سیال غلیظ برشی به دست آمده است. به منظور بررسی تأثیر STF در سرعت حد و انرژی جذب شده، سرعت حد نمونه‌ها مقایسه و همچنین از معیار انرژی بالستیک ویژه نیز برای درک بهتر این اثر استفاده می‌شود. نمونه‌ها پس از ضربه، از لحاظ ظاهری نیز بررسی خواهند شد و تأثیر سیال غلیظ برشی در تغییر شکل و نحوه پارگی پارچه نشان داده خواهد شد. همچنین این فرضیه که اثر STF به صورت اصطکاک بین الیاف می‌باشد نیز با استفاده از مدل‌سازی انجام گرفته، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۵-۱- حد بالستیک و انرژی جذب شده

همان‌طور که اشاره شد، نمونه‌های ۲ و چهار لایه پارچه کولار خشک و پارچه آغشته به سیال STF با درصدهای جرمی متفاوت، تحت ضربه قرار گرفتند و سرعت حد با استفاده از دوربین سرعت بالا به دست آمد. در شکل ۸، نمودار حد بالستیک برای پارچه خشک و پارچه آغشته به سیال با درصدهای متفاوت جرمی نانو سیلیکا نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه خشک نسبت به نمونه‌های آغشته به سیال دارای سرعت حد کمتری است. با آغشتن نمونه‌ها به سیال STF سرعت حد افزایش می‌یابد. همچنین هرچه درصد نانو افزایش یابد سرعت حد نیز بیشتر می‌شود. این روند خطی نیست و با افزایش درصد نانو به ۳۵ درصد، سرعت حد به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. افزایش سرعت حد تا ۱۷۰٪ برای نمونه دو لایه آغشته به سیال ۳۵ درصد نسبت به پارچه دو لایه خشک، و افزایش ۲۰۰٪ سرعت حد برای نمونه چهار لایه آغشته به سیال ۳۵ درصد نسبت به پارچه چهار لایه خشک، نشان دهنده تأثیر بالای سیال STF با ۳۵ درصد جرمی نانوسیلیکا می‌باشد.



شکل ۸): حد بالستیک برای پارچه خشک و پارچه آغشته به سیال با درصدهای متفاوت جرمی نانو سیلیکا.

میزان افزایش سرعت حد بالستیک برای نمونه‌های ۲ و چهار لایه آغشته به سیال نسبت به نمونه‌های خشک، در جدول ۳ آورده شده است.

در این تحقیق، با به دست آوردن سرعت حد، حداقل انرژی لازم برای سوراخ شدن نمونه‌ها نیز محاسبه شده است. با افزایش درصد نانو، انرژی لازم برای سوراخ شدن نمونه نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که انرژی با توان دو سرعت رابطه دارد بنابراین، شیب نمودار مربوط به انرژی به ازای افزایش درصد نانوذرات بیشتر از نمودار سرعت حد می‌باشد. شکل ۹ انرژی

شود و نیروی ضربه از الیاف به الیاف، نخ به نخ و یا از لایه‌ای به لایه دیگر منتقل شود. این فعل و انفعال باعث بهبود عملکرد پارچه شده و این امکان را به تار و پود پارچه می‌دهد که به صورت مؤثرتری نسبت به پارچه خشک بارگذاری شود. در توضیحی دیگر می‌توان گفت که خود STF مقداری از انرژی گلوله را جذب می‌کند. به دلیل اینکه STF تحت ضربه سفت شده و حالت جامد به خود می‌گیرد بنابراین باعث اتلاف انرژی گلوله می‌شود. اما از آنجا که میزان افزایش سیال به پارچه ناچیز است بنابراین نمی‌تواند باعث افزایش زیادی، در حد بالستیک باشد، بنابراین جذب انرژی توسط خود سیال، دلیل مناسبی برای بهبود عملکرد پارچه آغشته نمی‌باشد.

یکی دیگر از فرضیات این است که حضور سیال غلیظ شونده برشی باعث افزایش اصطکاک بین الیاف و تار و پود پارچه شده و امکان تحرک و جابه‌جایی نخ‌ها را می‌گیرد. افزایش اصطکاک، باعث می‌شود که نخ‌ها به‌طور مؤثرتری درگیر شده و انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن نخ افزایش می‌یابد. این نظریه مطابقت بیشتری با واقعیت داشته و بهتر از دیگر نظریه‌ها عملکرد پارچه را توصیف می‌کند.

#### ۵-۲- انرژی بالستیک ویژه

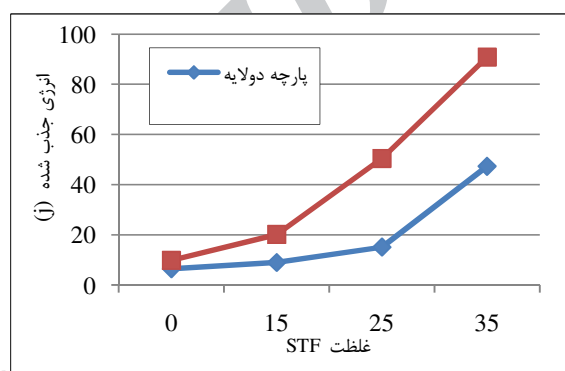
استحکام یک زره به عنوان یکی از مشخصه‌های اساسی آن، با محاسبه انرژی جذب شده توسط هر زره مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از عوامل دیگری که در زره‌ها بسیار مهم است، عامل وزن می‌باشد. اگر زرهی دارای قابلیت جذب بالای انرژی باشد اما به راحتی قابل حمل نباشد مطلوب نخواهد بود. بنابراین در یک زره باید هم وزن و هم استحکام مورد بررسی قرار گیرد. در قسمت قبل نشان داده شد که هر چه درصد جرمی نانو در سیال STF بالاتر رود، انرژی جذب شده در نمونه افزایش می‌یابد. از طرفی وزن نمونه‌ها نیز با آغشته شدن به سیال افزایش می‌یابد. برای بررسی اثر وزن نمونه همراه انرژی جذب شده، از معیاری به نام انرژی بالستیک ویژه استفاده شده است. این معیار عبارت است از انرژی جنبشی جذب شده توسط نمونه نسبت به وزن آن. هر چه انرژی بالستیک ویژه برای نمونه‌ای بیشتر باشد به این معنی است که با افزایش کمی وزن، انرژی جذب شده توسط نمونه زیاد می‌شود و این پارامتریست که در زره‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. در شکل ۱۰ انرژی بالستیک ویژه برای نمونه‌های تحت آزمایش نشان داده شده است.

$$\text{انرژی جذب شده} = \frac{\text{انرژی بالستیک ویژه}}{\text{جرم نمونه}}$$

لازم برای سوراخ شدن نمونه‌های دارای درصد متفاوت نانوسیلیکا را نشان می‌دهد.

**جدول (۳):** افزایش حد بالستیک برای نمونه‌های دو و چهار لایه آغشته به سیال نسبت به نمونه‌های خشک.

پارچه با سیال ۳۵ درصد	پارچه با سیال ۲۵ درصد	پارچه با سیال ۱۵ درصد	
٪۱۷۰	٪۵۳	٪۱۸	افزایش حد بالستیک نمونه دو لایه
٪۲۰۴	٪۱۲۶	٪۴۳	افزایش حد بالستیک نمونه چهار لایه



**شکل (۹):** انرژی جذب شده پارچه خشک و پارچه آغشته به سیال با درصد‌های متفاوت جرمی نانو سیلیکا.

در جدول ۴ میزان افزایش انرژی جذب شده توسط پارچه‌های آغشته به سیال نسبت به پارچه‌های خشک آورده شده است.

**جدول (۴):** افزایش انرژی جذب شده توسط پارچه‌های آغشته به سیال نسبت به پارچه‌های خشک.

پارچه با سیال ۳۵ درصد	پارچه با سیال ۲۵ درصد	پارچه با سیال ۱۵ درصد	
٪۶۳۲	٪۱۳۴	٪۳۹	افزایش جذب انرژی نمونه دو لایه
٪۸۲۲	٪۴۱۲	٪۱۰۴	افزایش جذب انرژی نمونه چهار لایه

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد جرمی نانوسیلیکا حد بالستیک افزایش می‌یابد اما به‌طور دقیق عملکرد STF مشخص نیست. یکی از فرضیه‌ها این است که STF باعث می‌شود که اتصال مناسب بین اجزاء پارچه برقرار

**جدول (۵): نسبت انرژی جذب شده توسط نمونه‌های چهار**

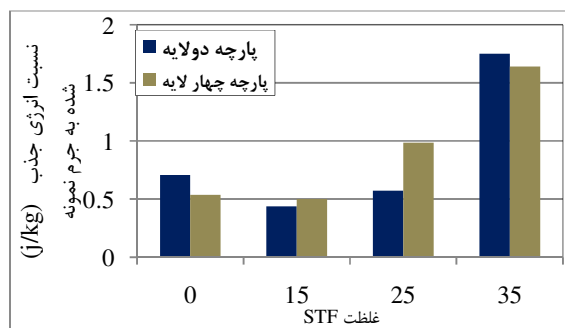
لایه به نمونه‌های دو لایه.

پارچه خشک	پارچه با سیال ۱۵ درصد	پارچه با سیال ۲۵ درصد	پارچه با سیال ۳۵ درصد	نسبت انرژی نمونه چهار لایه به دو لایه
۱/۵۳	۲/۲۵	۳/۳۴	۱/۹۲	

**۵-۴- بررسی نمونه‌ها بعد از ضربه**

عوامل زیادی در فرآیند جذب انرژی توسط الیاف کولار نقش دارند. از مهمترین این عوامل می‌توان به انرژی جذب شده به واسطه تغییر شکل پارچه، شکست الیاف و نخ‌ها، تغییر شکل پرتابه و اصطکاک الیاف با هم و اصطکاک بین الیاف و گلوله اشاره کرد. استحکام بالای کولار و کرنش شکست بالای آن باعث می‌شود که پارچه پس از برخورد اولیه گلوله پاره نشده و خیز عرضی در زمان کوتاهی به انتهای لبه پارچه برسد. بدین ترتیب تمام الیاف در جذب انرژی سهم دارند. اصطکاک بین الیاف نیز باعث می‌شود که الیاف با هم بیشتر درگیر شده و جذب انرژی بیشتری صورت بگیرد.

در شکل ۱۱ نمونه پارچه کولار خشک و تغییر شکل‌ها به واسطه ضربه گلوله بر روی آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه خشک، نخ‌ها و الیاف در محل ضربه از داخل پارچه کاملاً بیرون کشیده شده و پاره شده‌اند. این امر به دو دلیل اتفاق می‌افتد. دلیل اول این است که در پارچه خشک، هنگامی که گلوله به پارچه برخورد می‌کند چون اصطکاک نخ با گلوله کم است بنابراین نخ‌ها به طور مؤثر با پارچه درگیر نمی‌شوند و گلوله به راحتی الیاف را کنار زده و از لابه‌لای آن خارج می‌شود. دلیل دوم این است که اصطکاک نخ‌ها در پارچه با هم کم است و این باعث می‌شود که بین نخ‌ها و پارچه درگیری مناسبی نباشد، بنابراین تعداد محدودی از نخ‌هایی که در ناحیه ضربه هستند نیز مقاومت زیادی در برابر ضربه گلوله نخواهند کرد و از درون پارچه بیرون کشیده می‌شوند. با نزدیک شدن سرعت گلوله به سرعت حد، میزان کشیدگی الیاف از داخل نمونه بیشتر شده اما پس از کشیده شدن الیاف، گلوله آنها را پاره نمی‌کند. در شکل ۱۲ نیز تصویری از پارچه آغشته به سیال ۳۵ درصد جرمی نانو سیلیکا نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر

**شکل (۱۰): انرژی بالستیک ویژه برای نمونه‌های**

دو و چهار لایه.

انرژی بالستیک ویژه پارچه خشک به عنوان مبنا قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه دو و چهار لایه آغشته به سیال ۳۵ درصد، دارای بالاترین مقادیر انرژی بالستیک ویژه می‌باشد. در واقع گرچه این نمونه‌ها دارای وزن بالاتری نسبت به پارچه خشک می‌باشد اما میزان انرژی جذب شده آن نسبت به نمونه پارچه خشک خیلی بالاتر است و در نتیجه انرژی بالستیک ویژه آن مقدار بالایی می‌باشد. بنابراین استفاده از سیال ۳۵ درصد جرمی نانو، کاملاً قابل توجیه و نشان دهنده تأثیر بسیار خوب آن است.

اما پارچه دو لایه آغشته به سیال با درصد جرمی ۱۵ و ۲۵ درصد و همچنین نمونه چهارلایه آغشته به سیال ۱۵ درصد، انرژی بالستیک ویژه کمتری نسبت به انرژی بالستیک ویژه نمونه پارچه خشک دارند. این نشان دهنده این است که افزایش سیال ۱۵ درصد نانو به پارچه، هر چند که باعث افزایش جذب انرژی پارچه خشک می‌شود، قابل توجیه نیست. این موضوع برای نمونه دولایه ۲۵ درصد نیز صادق است.

**۵-۳- نسبت جذب انرژی نمونه چهار لایه به دو لایه**

در تحلیلی دیگر، تأثیر لایه‌ها نیز بررسی شده است. بدین منظور، اثر تعداد لایه‌ها در نمونه‌های شامل دو و چهار لایه بر انرژی جذب شده نمونه‌ها بررسی شده است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده، نمونه چهار لایه آغشته به سیال ۲۵ درصد دارای افزایش جذب انرژی چشمگیری نسبت به پارچه دو لایه آغشته به همان سیال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با دو برابر شدن لایه‌ها، انرژی جذب شده افزایش می‌یابد اما لزومی ندارد که میزان افزایش ۲ برابر باشد.

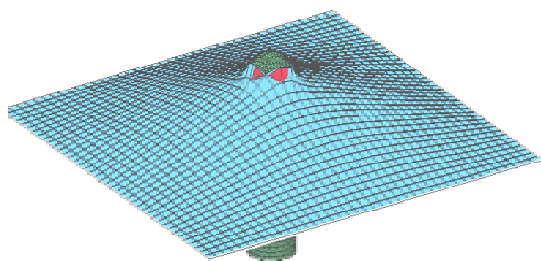
می‌دهد که تار و پود جدا شده همراه گلوله از پارچه خارج می‌شود.



شکل (۱۳): الیاف کشیده شده از پارچه خشک تحت ضربه.

#### ۵-۵- تحلیل نتایج عددی

همان‌طور که بیان شد، پارچه به همراه گلوله مدل و پس از مش‌بندی گلوله و پارچه، تحلیل عددی ضربه روی پارچه انجام شد. همان‌گونه که اشاره شد در تحقیقات پیشین، تأثیر سیال STF به صورت اصطکاک بین الیاف پارچه و پرتابه در نظر گرفته شده است. در این تحلیل نیز اصطکاک به عنوان معیاری از اثر سیال در پارچه در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از شبیه‌سازی ضربه روی پارچه در شکل ۱۴ آورده شده است.



شکل (۱۴): مدل‌سازی ضربه روی پارچه دو لایه.

افزایش اصطکاک بین لایه‌های پارچه، موجب درگیری بیشتر لایه‌ها می‌شود. لایه‌های پارچه روی هم لغزشی نداشته و اثرگذاری آنها روی هم بیشتر می‌شود. همچنین اصطکاک بین گلوله و پارچه موجب درگیری بیشتر بین پارچه و گلوله شده و گلوله به راحتی نمی‌تواند از پارچه عبور نماید.

در شکل ۱۵ نمونه‌ای از شبیه‌سازی ضربه روی پارچه دو لایه با اصطکاک بالا آورده شده است. در شکل ۱۶ نیز شبیه‌سازی ضربه روی پارچه دو لایه با اصطکاک پایین آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زمانی که مقدار

شکل و پارگی پارچه منحصر به نقطه ضربه بوده و الیاف از داخل پارچه بیرون کشیده نشده‌اند. در واقع انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن نخ‌ها بسیار زیاد می‌شود و تمامی پارچه تحت ضربه گلوله عکس‌العمل نشان داده و منجر به اتلاف بیشتر انرژی گلوله می‌شود. در واقع زمانی که گلوله به پارچه آغشته به STF برخورد می‌نماید، انرژی گلوله از طریق نخ‌های محل ضربه به کل پارچه منتقل شده و کل پارچه در مهار ضربه گلوله سهیم می‌شوند. پس از تغییر شکل کل پارچه و کشیده شدن تمامی الیاف، در صورتی که انرژی گلوله به طور کامل دفع نشده باشد، الیاف در محل ضربه پاره خواهند شد.

با کاهش درصد جرمی نانوسیلیکا در سیال غلیظ شونده برشی، میزان اثرگذاری سیال رو به کاهش می‌گذارد به طوری که در نمونه‌های پارچه آغشته به سیال ۱۵ درصد جرمی نانوسیلیکا مشاهده شده که در برخی مواقع تعدادی تار و پود از داخل پارچه کشیده می‌شوند.



شکل (۱۱): سطح جلوی پارچه خشک تحت ضربه.



شکل (۱۲): سطح جلوی پارچه آغشته به STF تحت ضربه.

در تصاویر گرفته شده با دوربین سرعت بالا، نشان داده شده که در تمامی نمونه‌های خشک، تعدادی الیاف از داخل پارچه کشیده شده و همراه گلوله از نمونه خارج می‌شود. شکل ۱۳ تصویری از گلوله پس از برخورد با پارچه را نشان



آن بالاتر شده و در نتیجه باعث بهبود خواص بالستیکی پارچه شود.

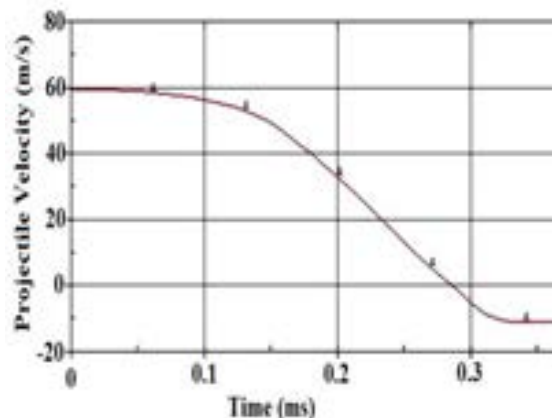
با توجه به افزایش وزن نمونه‌ها، از معیار انرژی بالستیک ویژه استفاده شد که نشان دهنده انرژی جذب شده نسبت به وزن نمونه می‌باشد. مقادیر بالای انرژی بالستیک ویژه برای نمونه ۳۵ درصد، حاکی از آن بود که میزان افزایش جذب انرژی نسبت به میزان افزایش وزن پارچه خشک با آغشته شدن به سیال ۳۵ درصد، بالاتر بوده و این توجیه کننده استفاده از این نمونه می‌باشد.

در تست‌های ضربه روی پارچه خشک، همواره تار و پود در ناحیه ضربه از داخل پارچه کشیده می‌شدند و سطح وسیعی از پارچه دچار کشیدگی می‌شد و این در حالی است که در پارچه آغشته به سیال، خرابی منحصر به نقطه ضربه بوده و الیاف تنها در نقطه ضربه آسیب دیده یا پاره می‌شوند. در تحلیل‌های عددی نشان داده شد که تأثیر سیال غلیظ شونده برشی تا حدودی مربوط به افزایش اصطکاک بین تار و پود پارچه و اصطکاک گلوله با پارچه می‌باشد. از دیگر عواملی که در بهبود عملکرد پارچه نقش دارد، می‌توان به غلیظ شدن سیال و اتلاف انرژی گلوله به واسطه این غلیظ‌شدگی اشاره نمود.

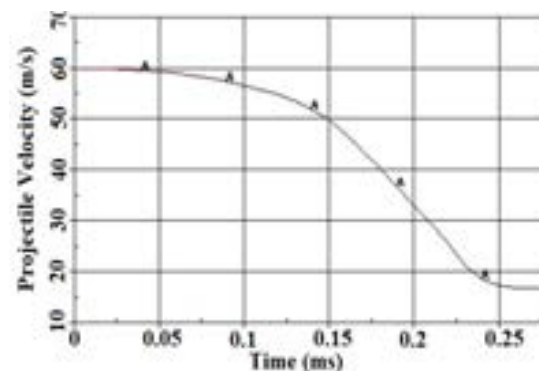
#### ۷- منابع

1. Moshtaghian, M. and Vahedi, Kh. "Penetration Analysis of a Projectile into a Ceramic/Composite Armor", Int. J. of Aerospace Mech., Vol. 6, No.4, pp.81-94, 2010 (In Persian).
2. Hedayat Rasa, S. and Liaghat, Gh. "Analysis of Projectile Penetration into Kevlar and Representation an Analytical Model", MSc. Thesis, Tarbiat Modares Univ., 2002 (In Persian).
3. Mamivand, M. and Liaghat, Gh. "Modeling Projectile Penetration into Fabrics and Compared with the Experiment Results", MSc. Thesis, Tarbiat Modares Univ., 2006 (In Persian).
4. Mamivand, M. and Liaghat, GH. "A Model for Ballistic Impact on Multi-Layer Fabric Targets", Int. J. of Impact Eng., Vol. 37, No.7, pp. 806-812, 2010.
5. Lim, C., Tan, V., and Cheong, C. "Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric System by Varying Shaped Projectiles", Int. J. of Impact Eng., Vol. 27, No. 6, pp. 577-591, 2002.
6. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T., and Cheeseman, B. "Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-Ply High-Strength Fabric", Int. J. of Impact Eng., Vol. 31, No. 8, pp. 996-1012, 2005.
7. Egres, R., Lee, Y., Kirkwood, J., Kirkwood, K., Wetzel, E., and Wangner, N. "Liquid Armor" Protective Fabrics Utilizing Shear Thickening

ضرب اصطکاک بین گلوله و پارچه و همچنین لایه‌های پارچه در شبیه‌سازی مقدار بالایی است، سرعت حد مقدار ۶۰ متر بر ثانیه خواهد بود. به این معنی که گلوله پارچه را سوراخ نموده ولی سرعت آن به صفر رسیده و متوقف شده است. این در حالی است که برای پارچه با اصطکاک پایین، گلوله با سرعت ۶۰ متر بر ثانیه به هدف برخورد نموده و باعث پارگی آن می‌شود. سرعت خروجی گلوله از هدف، تقریباً برابر ۱۶ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین افزایش اصطکاک باعث درگیری بیشتر گلوله و پارچه و همچنین لایه‌های پارچه با همدیگر می‌شود که بهبود عملکرد بالستیکی پارچه را به همراه دارد.



شکل (۱۵): شبیه‌سازی ضربه روی پارچه با اصطکاک بالا.



شکل (۱۶): شبیه‌سازی ضربه روی پارچه با اصطکاک پایین.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی اثر آغشته شدن پارچه کولار به سیال غلیظ برشی برای مقاومت و افزایش استحکام آن پرداخته شد. آغشته شدن پارچه به سیال غلیظ شونده برشی باعث شد که نمونه در آزمایش‌های بالستیک، دارای سرعت حد بالستیک بالاتری نسبت به پارچه خشک باشد و انرژی جذب شده توسط

12. Kang, T.J., Hong, K.H., Yoo, M.R. "Preparation and Properties of Fumed Silica/Kevlar Composite Fabrics for Application of Stab Resistant Material", *Fibers and Polymers*, Vol. 11, No. 5, pp. 719–724, 2010.
13. Lee, Y.S. and Wagner, N.J. "Dynamic Properties of Shear Thickening Colloidal Suspensions", *Rheologica Acta*, Vol. 42, No. 3, pp. 199–208, 2003.
14. Hassan, T.A., Rangari, V.K. and Jeelani, S. "Sonochemical Synthesis and Rheological Properties of Shear Thickening Silica Dispersions", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 17, No. 5, pp. 947–952, 2010.
15. Duan, Y., Keefe, M., Wetzel, E.D., Bogetti, T.A., Powers, B., Kirkwood, J.E., and Kirkwood, K.M. "Effects of Friction on the Ballistic Performance of a High-Strength Fabric Structure", *Int. Conf. on Impact Loading of Lightweight Structure*, Alves M., Jones N. (Editors), Vol. 49, 219-229, 2005.
16. Egres Jr, R. "Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF)-Kevlar Composites for Body Armor Applications", DTIC Document, 2004.
8. Tan, V., Tay, T., and Teo, W. "Strengthening Fabric Armour with Silica Colloidal Suspensions", *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 1561–1576, 2005.
9. Lee, Y.S., Wetzel, E.D., and Wagner, N.J. "The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar® Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid", *J. of Materials Sci.*, Vol. 38, No. 13, pp. 2825–2833, 2003.
10. Wagner, N. and Wetzel, E.D. "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids", Center for Composite Materials and Dept. of Chemical Eng., U. of Delaware, Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, 2004.
11. Hassan, T.A., Rangari, V.K., and Jeelani, S. "Synthesis, Processing and Characterization of Shear Thickening Fluid (STF) Impregnated Fabric Composites", *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 527, No. 12, pp. 2892–2899, 2010.

Archive of SID