

بررسی عددی اثر سیال سخت شونده برشی با فرضیه اصطکاکی، در برخورد بالستیک پرتابه به پارچه ساخته شده از الیاف کولار ۲۹

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد نور، نور، ایران
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

حسین قهاری
ناصر کردانی*

چکیده

اثر سیال سخت شونده برشی بعنوان عامل افزایشده اتلاف انرژی اصطکاکی الیاف کولار، از اصلی ترین عوامل کاهش نفوذ پذیری در برخوردهای بالستیک، درک مناسبی از مکانیزم اتلاف انرژی را فراهم می آورد. در این مطالعه تاثیر سیال بر کاهش نفوذ پذیری الیاف، از طریق افزایش اتلافات انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف، و بین جسم هدف و پرتابه با استفاده از نرم افزار ANSYS شبیه سازی گردید. پرتابه با سرعت ۳۵۰ متر بر ثانیه به هدف برخورد داده شد. سرعت خروجی پرتابه از الیاف کولار ۳۴۱/۸۸ و از الیاف آغشته به سیال سخت شونده برشی ۳۰۶/۴۳ متر بر ثانیه گردید. نتایج مدل با نمونه آزمایشگاهی مقایسه و حد بالستیک الیاف کولار در حضور سیال و بدون حضور سیال مقایسه شد. براساس نتایج بدست آمده تاثیر سیال بر کاهش نفوذ پذیری الیاف کولار از طریق افزایش اصطکاک می باشد. همچنین افزایش ضریب اصطکاک بیشتر از ۳ تاثیر چندانی در کاهش نفوذ پذیری ندارد، بگونه ای که ضریب اصطکاک ۳ موجب افزایش ۱۷۲٪ حد بالستیک گردید اما با افزایش به عدد ۵، حد بالستیک ۱۸۷٪ افزایش یافت که افزایش قابل ملاحظه نمی باشد.

واژه‌های کلیدی: سیال سخت شونده برشی، الیاف کولار ۲۹، حد بالستیک، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون.

Numerical Analysis of Effect of STF with Frictional Hypothesis on Impact of Ballistic Projectile to Fabric Made of Kevlar 29 Fibers

H. QAHARI
N. KORDANI

Islamic Azad University, Nour Branch, Nour, Iran.

University of Mazandaran, Mechanical Engineering Department, Babolsar, Iran.

Abstract

Investigation of the effect of the STF on increasing of frictional energy on Kevlar fibers as one of the main factors of decreasing permeability in ballistic impacts is very important. In this study, for understanding the effect of STF on decreasing the permeability of fibers by increasing the frictional energy between fibers and projectile was modeled by ANSYS15 software. The projectile was impacted to the target with velocity of 350m/s. In both models the projectile penetrated and crossed the target. In modeling with Kevlar 29 fibers, the output velocity of projectile was about 341.88m/s and in second modeling the output velocity was 306.43m/s. This model was compared with previous experimental model; ballistic limit of Kevlar fiber without STF is also compared. The results demonstrated the effect of STF on decreasing the permeability of Kevlar fibers because of increasing the friction coefficient. According to the results, increasing the friction coefficient of more than 3 did not have significant effect on decreasing permeability.

Keywords: Kevlar 29, Ballistic limit, Elasticity Module, Poisson Ratio.

بررسی مقاومت الیاف کولار در مقابل ضربه چاقو و درفش پرداختند و به افزایش قابل توجه مقاومت الیاف آغشته به سیال سخت شونده برشی اذعان داشتند [۳].

وندروورف و همکاران به بررسی مدل عددی حدود بالستیک در برخورد پرتابه استوانه ای و جسم هدف ساخته شده از الیاف کامپوزیت پرداختند و به این نتیجه رسید که حدود بالستیک با چگالی سطحی پرتابه و جسم هدف و مرتبط بوده و این نتیجه با نتایج مدل آزمایشگاهی و نظری بدست آمده در مطالعات قبلی همخوانی دارند [۴]. وای دوان و همکاران به بررسی برخورد بالستیک پرتابه به جسم هدف در سه شرایط مرزی متفاوت پرداختند. حالت اول جسم هدف با چهار گوشه آزاد، حالت دوم با دو

۱- مقدمه

یکی از موضوعات علمی که در سالیان اخیر بسیار مورد توجه دانشمندان و محققان بوده است، مطالعه روی فعل و انفعال سیالات سخت شونده برشی و موارد استفاده آن می باشد. یکی از کاربردهای این سیال، پاشش بر روی الیاف کولار جهت کاهش نفوذپذیری در مقابل برخوردهای بالستیک می باشد. این امر از طریق افزایش مکانیزم های اتلاف انرژی در فرایند فوق انجام می گردد. نایک و همکاران در مطالعاتی که در همین راستا انجام گردید به تحلیل مکانیزم های اتلاف انرژی و روابط حاکم بر آن در برخورد های بالستیک پرداختند [۱] و [۲]. اگرس و همکاران به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: naser.kordani@umz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۶

۲- شبیه سازی و تحلیل عددی

جهت تحلیل و بررسی مدل مورد نظر، ابتدا مدل مطابق با نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار انسیس^۱ ایجاد و سپس جنس پرتابه و جسم هدف تعیین گردید، پس از آن مدل شبکه بندی و مواردی نظیر سرعت برخورد، جهت و راستای برخورد، شرایط مرزی مسئله، خروجی های مورد نیاز و بازه زمانی برخورد پرتابه به جسم هدف مشخص گردید. سپس به نرم افزار دستور حل داده شد و پس از آن خروجی های نرم افزار تحلیل عددی شد، در نهایت جهت تعیین میزان دقت حل و با توجه به مدل آزمایشگاهی تحلیل خطا نیز انجام گردید، در ادامه مراحل فوق به تشریح بیان گردید.

۲-۱- مدل سازی

در این مطالعه مدل برخورد بالستیک پرتابه با جسم هدف در نرم افزار کتیا^۲ ایجاد و توسط نرم افزار انسیس^۱ ۱۵ تحلیل گردید. جسم هدف متشکل از سه لایه الیاف کولار ۲۹ بوده که در هر سانتی متر مربع از آن ۷ تار و ۷ پود قرار دارد و برای هرتار و پود یک معادله خط نوشته شد و هر لایه بر روی لایه بعدی قرار داده شد. جسم هدف از چهار جهت توسط نگهدارنده ثابت شد. پرتابه استوانه ای سر تخت می باشد که طول استوانه ۲۵ میلیمتر و قطر استوانه و کره ۹ میلیمتر می باشد.

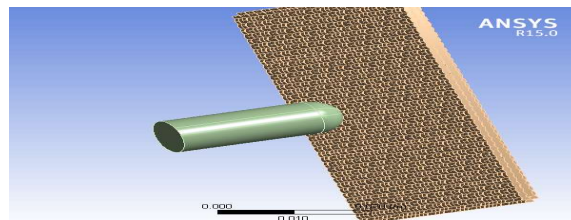
۲-۲- ضرایب اصطکاک

سه ضریب اصطکاک مختلف که تاثیر عمده ای در کاهش میزان انرژی جنبشی پرتابه دارند شامل الف) ضریب اصطکاک جنبشی بین پرتابه و جسم هدف ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین الیاف جسم هدف ج) ضریب اصطکاک جنبشی بین الیاف جسم هدف می باشند. در قسمت (اتصالات)^۳ گزینه (فعل و انفعال جسم)^۴ را اضافه نموده و در آن ضرایب اصطکاک فوق را برای مدل اول به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۶ و ۰/۲ و برای مدل الیاف آغشته به سیال ۱/۲۵ و ۱/۳۵ و ۰/۲ که در نمونه آزمایشگاهی بدست آمد تعیین گردید[۷].

۲-۳- تعیین جنس و متریال پرتابه و جسم هدف

جنس پرتابه از فولاد زنگ نزن می باشد که به صورت پیش فرض در قسمت اطلاعات مهندسی^۵ نرم افزار موجود می باشد اما با توجه به عدم وجود ماده کولار ۲۹ در لیست مواد نرم افزار ابتدا در قسمت اطلاعات مهندسی ماده کولار ۲۹ را اضافه گردید. مشخصه های مورد نیاز عبارتند از، (دانسیته، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مدول بالک و مدول برشی که از استاندارد های مواد و کامپوزیت، انجمن مواد و آزمون آمریکا^۶ اخذ گردید در جدول زیر آمده است.

گوشه آزاد و حالت سوم با چهار گوشه ثابت شده و به این نتیجه رسیدند که شرایط مرزی تاثیر قابل ملاحظه ای در تغییر شکل جسم هدف، میزان توزیع استرس و میزان زمان جذب انرژی دارد و همچنین اصطکاک به صورت غیر مستقیم موجب افزایش جذب انرژی در جسم هدف از طریق درگیر کردن تعداد بیشتری از الیاف می گرد[۵]. لیو و همکاران در مقاله ای که به بررسی آزمایشگاهی اصطکاک الیاف بر روی یکدیگر پرداختند دو روش جهت بدست آوردن ضریب اصطکاک ارائه نمودند[۶] اما علی رغم مطالعات و تحقیقات زیادی که در این خصوص انجام شد، بررسی اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف به علت پیچیدگی، و عدم امکان اندازه گیری آن با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی اندک است. بنابراین مطالعه و بررسی نرم افزاری و تحلیل انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف، تاثیر بسزایی در گسترش دامنه این حوزه از علم خواهد داشت. در نمونه آزمایشگاهی که توسط کردانی و همکاران انجام گردید، از سه لایه الیاف کولار ۲۹ به طول و عرض ۲۰ سانتی متر استفاده شد. توسط تفنگ گازی به این الیاف شلیک و حد بالستیک الیاف اندازه گیری شد. سپس سیال سخت شونده برشی به الیاف مذکور اضافه و حد بالستیک الیاف در حضور سیال، با شلیک دوباره با تفنگ گازی تعیین گردید.



شکل ۱- پرتابه و جسم هدف

در این فرایند به علت اضافه شدن سیال به الیاف، میزان اتلاف انرژی پرتابه در برخورد با جسم هدف افزایش و سرعت خروجی پرتابه از جسم هدف کاهش یافت. حد بالستیک برای الیاف کولار در آزمایش اول برابر با 52 ± 5 و در آزمایش دوم 10 ± 116 شد و ضرایب ایستایی و دینامیکی اصطکاک بین الیاف از طریق آزمایش بیرون کشیدگی الیاف جسم هدف تحت نیرویی ثابت تعیین شد[۷]. در این مطالعه تاثیر اضافه شدن سیال سخت شونده برشی، از طریق اضافه نمودن ضرایب اصطکاک که در نمونه آزمایشگاهی بدست آمد بررسی و مقایسه شد، تا میزان تاثیر اصطکاک بر کاهش نفوذ پذیری الیاف بررسی گردد. همچنین جهت آگاهی از ارتباط بین افزایش ضرایب اصطکاک و میزان نفوذ پذیری، در مراحل بعدی تحلیل ضریب اصطکاک بین الیاف بیش از نمونه های آزمایشگاهی افزایش داده شد و حد بالستیک مربوط به هر یک از ضرایب جداگانه بدست آمد این بررسی می تواند درک صحیحی از چگونگی تاثیر اصطکاک بر کاهش نفوذ پذیری الیاف کولار و کمک قابل توجهی به مطالعات آتی که در این خصوص انجام خواهد شد نماید.

⁴ Body interaction

⁵ Engineering data

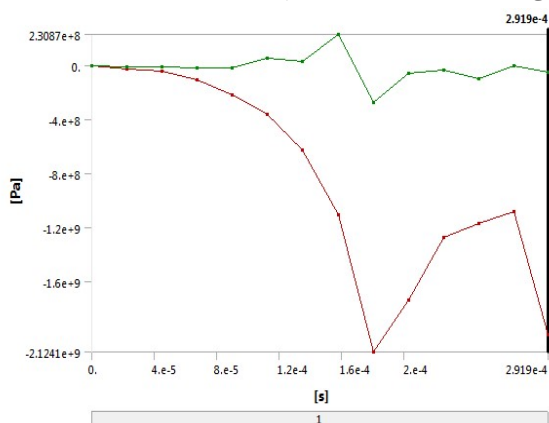
⁶ ASTM

¹ Ansys 15

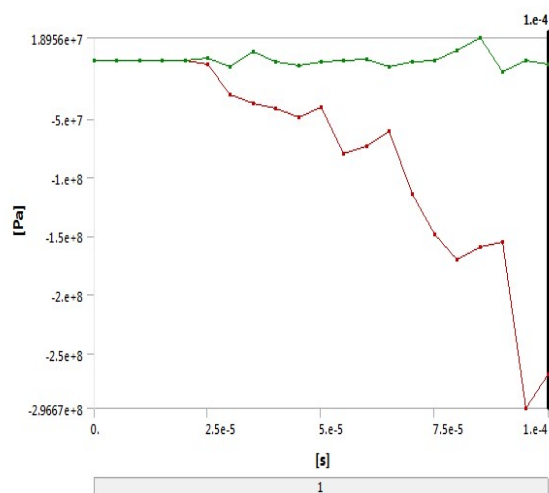
² Catia

³ connection

به سطح تماس با جسم هدف در طول برخورد و نهایتاً میزان اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف محاسبه شد.



شکل ۲- تنش نرمال وارد بر پرتابه، توسط الیاف آغشته نشده به سیال



شکل ۳- تنش نرمال وارد بر سطح پرتابه، توسط الیاف آغشته به سیال

۲-۶- حد بالستیک و میزان خطا

حد بالستیک با توجه به سرعت خروجی پرتابه از جسم هدف و سرعت پرتابه قبل از برخورد، تعیین گردید، میزان سرعت خروجی پرتابه از جسم هدف در نمودارهای ۴ و ۵ قابل مشاهده می باشد .
از شکل ۳ و طبق رابطه (۱) حد بالستیک جسم هدف برای نمونه اول محاسبه گردید.

جدول ۱- مشخصات کولار ۲۹

چگالی kg/ m ^۳ -3	مدول یانگ (pa)	ضریب پواسون	مدول بالک (pa)	مدول برشی (pa)
۱۴۴۰	۳/۶۹×۱۰ ^۹	۰/۳۶	۴/۳۹۲۹×۱۰ ^۹	۱/۳۵۶۶×۱۰ ^۹

۲-۴- شبکه بندی^۱

با توجه به لبه دار بودن جسم هدف، جهت شبکه بندی لبه آن از گزینه (اندازه صفحه)^۲ و بقیه قسمت آن و پرتابه به صورت پیش فرض شبکه بندی شد. جهت بررسی تاثیر نوع شبکه بندی در نتیجه محاسبات، بار دیگر با استفاده از گزینه اندازه گیری صفحه اندازه هر قسمت برابر با ۵ میلیمتر قرار در نظر گرفته شد و مجدداً جسم هدف و پرتابه شبکه بندی گردید و مشاهده شد هیچ گونه تغییری در نتایج مسئله بوجود نیامد که نشان از عدم وابستگی جواب مسئله با نوع و سایز شبکه بندی دارد که در جدول فوق مشاهده می گردد.

۲-۵- تعیین سرعت برخورد و حل مسئله

در قسمت (تنظیمات تحلیلی) برای هر دو مدل به پرتابه سرعت برخورد ۳۵۰ متر بر ثانیه داده شد. در این قسمت علاوه بر مقدار سرعت، جهت آن نیز تعیین گردید و با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی پرتابه از لوله تنفگ گازی پرتاب می گردد در نتیجه تنها در یک جهت دارای سرعت بوده و سرعت پرتابه در دو راستای دیگر برابر صفر است، به همین علت سرعت پرتابه در راستای Z و در جهت برخورد با جسم هدف تعیین گردید، سرعت در راستاهای X و Y مقدار صفر در نظر گرفته شد در شرایط مرزی هر دو مدل چهار ضلع جسم هدف، توسط گزینه (تکیه گاه ثابت)^۴، گیردار و ثابت تعیین گردید تا مانع از حرکت جسم هدف به همراه پرتابه گردد. پس از انجام مراحل فوق به نرم افزار دستور حل داده شد و موارد و نمودارهای زیر از این نرم افزار بدست آمد. در شکل های ۲ و ۳ میزان استرس وارد شده توسط سطح پرتابه به الیاف کولار مشاهده می گردد. نموداری که با رنگ قرمز مشخص شده است، حداقل تنش نرمال و نمودار سبز حداکثر تنش نرمال در هر لحظه از فرایند برخورد را نشان می دهد. چون جسم هدف از پارچه ساخته شده و انعطاف پذیر است، نمودار تنش وارده از طرف آن به جسم هدف یکنواخت نمی باشد. با استفاده از این نمودار و با توجه به مساحت پرتابه، میزان نیروی اعمال شده از طریق پرتابه

جدول ۲- تاثیر شبکه بندی بر حد بالستیک مدل

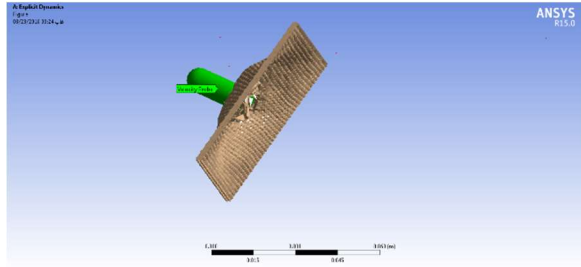
شبکه بندی	مدل آغشته نشده به سیال	مدل آغشته شده به سیال	۵میلیمتر (مدل آغشته نشده به سیال)	۵میلیمتر (مدل آغشته شده به سیال)
حد بالستیک	۷۵/۹۴	۱۶۹/۱۲	۷۵/۹۴	۱۶۹/۱۲

³ Analysis setting

⁴ Fix support

¹ Meshing

² Face sizing



شکل ۶- خروج پرتابه از جسم هدف

۳- تحلیل انرژی

۳-۱- اتلاف انرژی پرتابه

اختلاف انرژی پرتابه قبل و بعد از برخورد، ناشی از اتلاف انرژی پرتابه در طول برخورد است و با محاسبه این اختلاف انرژی و مقایسه آن با اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک، تاثیر اصطکاک در اتلاف انرژی مشخص گردید. میزان اختلاف انرژی پرتابه برابر با تفاضل انرژی جنبشی آن قبل و بعد از برخورد با جسم هدف می باشد، و طبق رابطه انرژی جنبشی محاسبه گردید:

$$\Delta K_{EP} = \frac{1}{2} M V_i^2 - \frac{1}{2} M V_0^2 \quad (3)$$

$$\Delta K_{EP} = \frac{1}{2} \times 0,011536 \times 350^2 - \frac{1}{2} \times 0,011536 \times 341,88^2 = 32,4051 \text{ J}$$

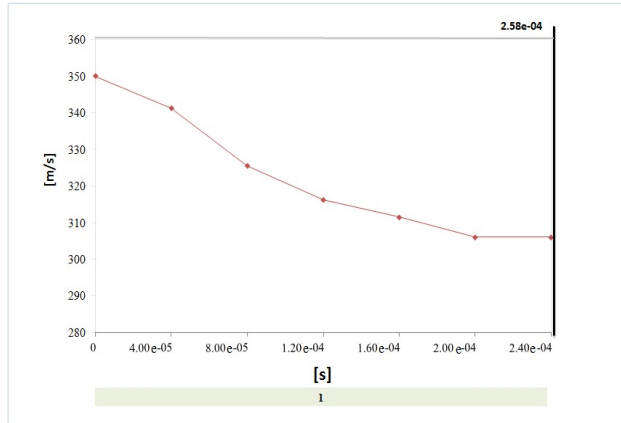
ΔK_{EP} اختلاف انرژی جنبشی پرتابه قبل و بعد از برخورد می باشد M جرم پرتابه در نتیجه میزان انرژی اتلاف شده پرتابه در طول فرایند برخورد برابر با $32/4051$ ژول گردید.

۳-۲- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف

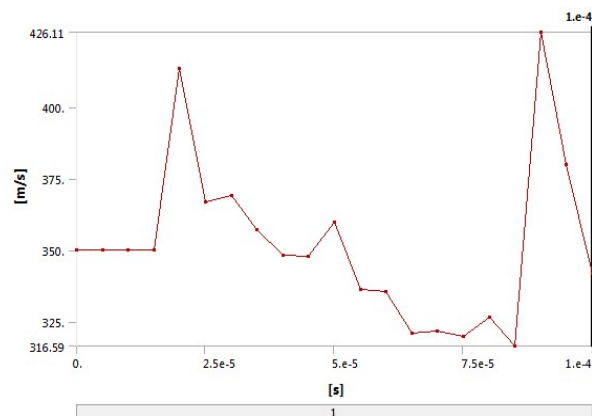
پاره شده

به منظور انجام این کار، میزان جابجایی الیاف در تماس مستقیم با پرتابه اندازه گیری گردید، با توجه به اینکه پس از ثانیه $10^{-5} \times 8$ الیاف دچار پارگی گردیدند از این زمان به بعد عملاً اصطکاک تأثیری در اتلاف انرژی نداشته؛ لذا جهت محاسبه اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک، میزان جابجایی

الیاف تا این زمان در نظر گرفته شد. جابجایی الیاف در ثانیه $10^{-5} \times 8$ در راستای Z برابر با $0/018163$ متر بوده و تعداد الیاف در تماس با پرتابه در هر لایه ۶ تا می باشد که با توجه به سه لایه بودن آن در مجموع ۱۸ تا در تماس با پرتابه هستند. جهت محاسبه انرژی ناشی از اصطکاک، نیروی عمود ناشی از پرتابه که بر الیاف وارد می نماید محاسبه گردید. در پشت جسم هدف، یک خیمه در راستای محور Z و جهت حرکت پرتابه تشکیل گردید. میزان جابجایی الیاف در راستای Z برابر با طول ارتفاع مثلث متساوی الساقین فرضی و مقدار آن $0/018163$ متر می باشد. همچنین قاعده مثلث برابر با قطر پرتابه که الیاف جسم هدف را با خود به



شکل ۴- تغییرات سرعت پرتابه در نمونه آغشته نشده به سیال



شکل ۵- تغییرات پرتابه در نمونه آغشته به سیال

$$V_{b2} = V_i^2 - V_0^2 \quad (1)$$

$$V_{b1} = 350^2 - 341.88^2 = 74,95$$

V_{b1} سرعت بالستیک V_i سرعت پرتابه هنگام قبل از برخورد V_0 سرعت پرتابه پس از خروج از جسم هدف با توجه به اینکه در نمونه آزمایشگاهی انجام شده حد بالستیک برابر 5 ± 52 گردید خطای محاسبات به صورت زیر بدست آمد:

حد بالستیک نرم افزاری - حد بالستیک آزمایشی

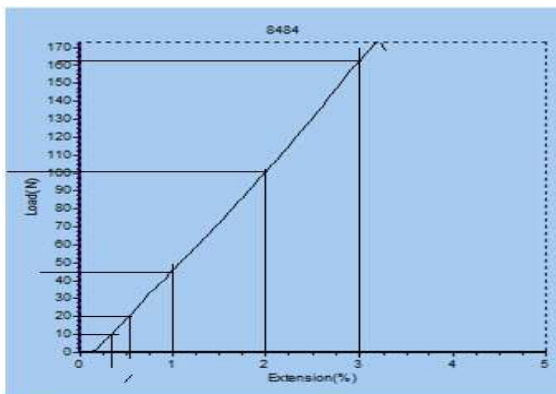
$$\text{حد بالستیک آزمایشی} \quad (2)$$

$$\text{خطا} = \frac{57-74,95}{57} = 3\%$$

در مدل دوم سرعت خروجی پرتابه، طبق نمودار ۴، برابر (m/s) $306/43$ گردید، در نتیجه حد بالستیک و میزان خطا برابر است با:

$$V_{b2} = 350^2 - 306,43^2 = 169,12^2 \quad (1) \text{ طبق رابطه}$$

$$\text{خطا} = \frac{126-169,12}{126} = 34\% \quad (2) \text{ طبق رابطه}$$



شکل ۷- نیرو جابجایی الیاف کولار ۲۹

جابجایی الیاف برابر با ۰/۰۰۶ متر یا ۶ میلی متر می باشد، با توجه به اعمال نیروی ۱۶۰ نیوتن مساحت زیر نمودار بدست می آید:

$$\frac{1}{2} \times 160 \times 0,006 = 0,48J$$

$$18 \times 0,48 = 8,64J$$

میزان انرژی لازم برای پارگی هر تار برابر با ۰/۴۸ ژول می باشد و با توجه به اینکه تعداد الیاف پاره شده ۱۸ تار می باشد کل انرژی لازم برای پارگی الیاف برابر ۸/۶۴ ژول می باشد.

۳-۴- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه

و جسم هدف

برای محاسبه اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین جسم هدف و پرتابه ابتدا میزان تنش نرمال وارد بر سطح پرتابه را استخراج و در مساحت پرتابه ضرب می شود تا نیروی وارد بر سطح بدست بیاید، سپس نیروی وارد شده را در ضریب اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف و طول پرتابه که برابر با میزان جابجایی نیروی اعمال شده می باشد، ضرب نموده تا مقدار انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف بدست بیاید. تنش نرمال وارد بر پرتابه با توجه به شکل ۱ برابر با ۴۲۵۲۹۴۱ پاسکال بوده و انرژی تلف شده از رابطه انرژی اصطکاکی بدست می آید [۲].

$$E_{fp} = \sigma_p \times \mu_p \times L_p \times L_p \quad (5)$$

E_{fp} انرژی تلف شده ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف، L_p طول پرتابه، μ_p ضریب اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف، A_p مساحت سطح پرتابه، σ_p تنش نرمال وارد شده بر سطح پرتابه می باشد. لذا انرژی تلف شده برابر است با:

$$4252941 \times 0,17 \times 0,009 \times 3,14 \times 0,018 \times 0,018 = 6,62J$$

بنابراین میزان انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف برابر با ۶/۶۲ ژول به دست آمد. با توجه به محاسبات فوق میزان اختلاف انرژی پرتابه قبل و بعد از برخورد با جسم هدف برابر با ۳۲/۴۰۵۱ ژول بوده و اتلافات انرژی در برخورد شامل:

۱- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف پاره شده، برابر با ۱۵/۱۷ ژول

جلو می برد می باشد که برابر با ۰/۰۹ متر است. راستای عمل نیرو در راستای ارتفاع مثلث و میزان جابجایی هر تار برابر با ضلع مثلث است.

$$L = \sqrt{0,009^2 + 0,018163^2} = 0,02027m$$

باتوجه به محاسبات فوق، میزان جابجایی الیافی که در تماس مستقیم پرتابه می باشند برابر با ۰/۰۲۰۲۷ متر می باشد، حال زاویه θ را محاسبه نموده تا مولفه نیروی اعمالی در راستای عمود بر محور جابجایی الیاف محاسبه گردد. با توجه به اینکه قائده مثلث ۰/۰۰۹ متر می باشد، نصف قائده برابر با ۰/۰۰۴۵ متر می باشد لذا داریم:

$$\sin \theta = \frac{0,0045}{0,02027} = 0,0222 \quad \text{و} \quad \theta = 12,82$$

با توجه به اینکه تعداد الیافی که در تماس با پرتابه هستند، ۱۸ تار بوده و میزان جابجایی هر تار برابر با ۰/۰۲۰۲۷ متر می باشد و همچنین با توجه به ضریب اصطکاک بین الیاف و مولفه عمود نیروی پرتابه بر الیاف، میزان انرژی تلف شده ناشی از اصطکاک محاسبه می گردد. اما ابتدا جهت تعیین نیروی اعمالی پرتابه که در راستای نشان داده شده در مثلث فوق، می بایست شتاب میانگین پرتابه در طول برخورد محاسبه گردد که برای این کار از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$a = \frac{V_{in} - V_{out}}{t} = \frac{350 - 341,88}{0,0001} = 81200 \frac{m}{s^2}$$

با توجه به جرم پرتابه، نیروی وارد شده از طرف آن به جسم هدف طبق رابطه نیوتن برابر است با:

$$F = m \times a \rightarrow 81200 \times 0,011536 = 936,7232N$$

$$E_{fr} = 936,7232 \times 0,222 \times 0,2 \times 18 \times 0,02027 = 15,1747J$$

اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک الیاف در تماس با پرتابه، طبق رابطه کار اصطکاک محاسبه گردید [۵].

$$E_{fr} = F_p \times \sin \theta \times \mu \times 18 \times L \quad (4)$$

E_{fr} انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف پرتابه F_p نیروی وارد شده توسط پرتابه μ ضریب اصطکاک این میزان ۴۶/۸٪ انرژی تلف شده پرتابه می باشد.

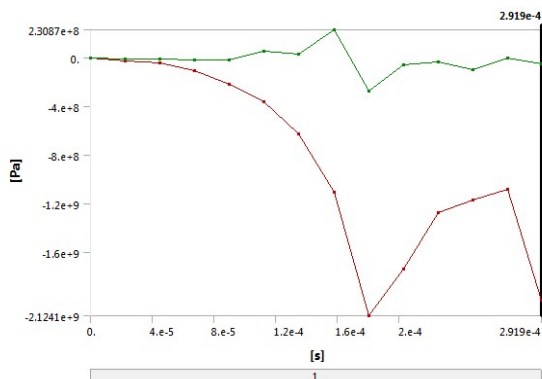
۳-۳- انرژی مورد نیاز جهت پارگی الیاف

در تست بیرون کشیدگی الیاف نمودار نیرو جابجایی زیر برای الیاف بدست آمد [۸].

در شکل ۷، مساحت زیر نمودار که حاصل ضرب نیرو در جابجایی می باشد، مقدار انرژی لازم برای شکست و پارگی هر تار را نشان می دهد، لذا با توجه به اینکه طول هر تار ۲۰ سانتی متر و تعداد الیاف پاره شده ۱۸ تار می باشند انرژی لازم جهت پارگی الیاف محاسبه می گردد:

$$3\% \times 0,2 = 0,006m$$

با توجه به شکل ۲ میانگین تنش نرمال وارد شده به سطح جسم هدف برابر با ۱۸۹۲۳/۷۶ پاسکال می باشد و با توجه به اینکه سطح پرتابه مانند نمونه اول می باشد لذا میزان انرژی تلف شده ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف مانند مدل اول و طبق رابطه (۷) محاسبه گردید [۲].



شکل ۸- تنش نرمال وارد شده بر بدنه جسم هدف

$$E_{sy} = \rho_s \times \pi \times R \times L \times L \times \mu \quad (7)$$

$$E = 18923076 \times 3,14 \times 0,009 \times 0,01 \times 0,018 \times 0,2$$

$$= 34,65J$$

۳-۴- انرژی مورد نیاز جهت پارگی الیاف

از بخش قبل داریم میزان انرژی لازم جهت پاره شدن هر تار برابر با ۰/۴۸ ژول می باشد، و با توجه به اینکه تعداد تارهای تحت تاثیر برابر با ۱۸ تار است، لذا میزان انرژی لازم جهت پارگی الیاف جسم هدف برابر است با:

$$E = 15 \times 0,48 = 7,2$$

۴-۴- تحلیل خطا

اتلاف انرژی ناشی از سه مکانیزم فوق که بیشترین سهم را در برخورد بالستیک دارند، برابر است با ۲۰۶/۲ ژول، که کمی بیشتر از مجموع انرژی تلف شده پرتابه است. سایر مکانیزم های اتلاف انرژی، هر چند سهم قابل توجهی در اتلاف انرژی پرتابه ندارند اما چنانچه به مجموع سه مکانیزم اتلاف فوق اضافه گردند خطای محاسبه اتلاف انرژی کمی بیشتر از مقدار محاسبه شده می گردد که دلایل و تحلیل خطاهای بوجود آمده در زیر بیان شده است.

$$\text{خطا} = \frac{187,73 - 206,2}{187,73} = 9\%$$

۱- طول الیاف در نمونه آزمایشگاهی ۲۰ سانتی متر و در مدل نرم افزاری ۶ سانتی متر است، در نتیجه میزان انرژی که هر تار در نمونه آزمایشگاهی تحمل می کند بیشتر از مقدار انرژی متحمل شده هر تار در مدل نرم افزاری می باشد.

۲- خطای محاسبه حد بالستیک مدل نرم افزاری، در تحلیل اتلافات انرژی نیز اثر گذاشته و منجر به خطا در تحلیل انرژی گردید.

۲- انرژی مورد نیاز جهت پارگی الیاف، برابر با ۸/۶۴ ژول
 ۳- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف و پرتابه، برابر با ۶/۶۲ ژول می باشد و در مجموع اتلافات انرژی فوق برابر با ۳۰/۴۳ ژول می باشد. با توجه به محاسبات فوق سایر مکانیزم های اتلاف انرژی که پیشتر توضیح داده شده، همانطور که پیش بینی می شد قابل اغماض می باشد.

۴- تحلیل انرژی مدل اغشته به سیال

میزان انرژی تلف شده پرتابه با توجه به سرعت برخورد و سرعت خروجی آن و با استفاده از رابطه $\Delta K EP = \frac{1}{2} MV_{in}^2 - \frac{1}{2} MV_{out}^2$ بدست آمده و برابر با ۱۸۷/۷۳ ژول گردید که این میزان انرژی نیز مانند نمونه قبل با ۴ فرایند اتلاف انرژی مقایسه شد.

۴-۱- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین الیاف

پاره شده

با توجه به قسمت پاره شده مدل پس از برخورد، تعداد الیافی که تحت تاثیر برخورد پرتابه پاره شدند در هر لایه ۵ تار و در مجموع برابر با ۱۵ تار بوده است، با توجه به نمودار جایجایی الیاف که در مرکز جسم هدف قرار داشتند، ملاحظه گردید که میزان جایجایی الیاف در راستای Z و تا زمان ۰/۰۰۰۰۹ ثانیه که جدایش تار و پود اتفاق افتاد برابر با ۰/۰۱۹۷ متر بوده است، لذا میزان جایجایی تار و پود بر روی یکدیگر با توجه به شکل زیر محاسبه گردید. در شکل (۵) قانده مثلث برابر با ۰/۰۰۹ متر و ارتفاع مثلث برابر با ۰/۰۱۹۷ متر می باشد در نتیجه میزان جایجایی که برابر با ضلع مثلث می باشد، برابر است با:

$$I = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{0,0197^2 + 0,0045^2} = 0,02m \quad L$$

قائده مثلث و a, b نیز دیگر اضلاع آن هستند و سینوس زاویه θ برابر است با ۰/۲۲، شتاب متوسط پرتابه و نیروی اعمال شده به الیاف پاره شده

از رابطه $\frac{V_1 - V_0}{t}$ بدست آمد و برابر $174240 (m/s^2)$ گردید، که با ضرب آن در جرم پرتابه میزان انرژی نرمال وارد شده بر جسم هدف محاسبه شد

$$E_n = m \times \sin \theta \rightarrow 011536 \times 174640 = 2010j$$

و میزان انرژی تلف شده پرتابه ناشی از اصطکاک بین الیاف پاره شده برابر است

$$E_1 = N \times \sin \theta \times \mu \times L \quad (6)$$

$$2010 \times 0,22 \times 1,25 \times 0,02 = 11j$$

با توجه به اینکه تعداد تارهای پاره شده ۱۵ تار می باشد انرژی تلف شده ناشی از آن برابر است با ۱۶۵ ژول

۴-۲ اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و

جسم هدف

۵- نتیجه گیری

در مدل نرم افزاری با تغییر ضرایب اصطکاکی، تاثیر سیال در اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک لحاظ گردید و همانطور که در نتایج مشاهده شد، با افزایش ضرایب اصطکاک بین الیاف، حد بالستیک تا میزان قابل توجهی افزایش یافت. در نتیجه اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک در برخورد بالستیک با جسم هدف عاملی مهم در کاهش میزان انرژی پرتابه است، که سهم عمده ای در کاهش نفوذ پذیری و جذب انرژی پرتابه دارد. در این مطالعه سه اتلاف انرژی عمده در برخوردهای بالستیک محاسبه گردید که بیشترین اتلاف انرژی را در برخوردهای بالستیک با الیاف کولار دارند:

- ۱- اتلاف انرژی ناشی از پاره شدن الیاف اولیه و یا الیاف در تماس با پرتابه
- ۲- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و جسم هدف
- ۳- اتلاف انرژی ناشی از انرژی مورد نیاز جهت پاره نمودن و شکست الیاف

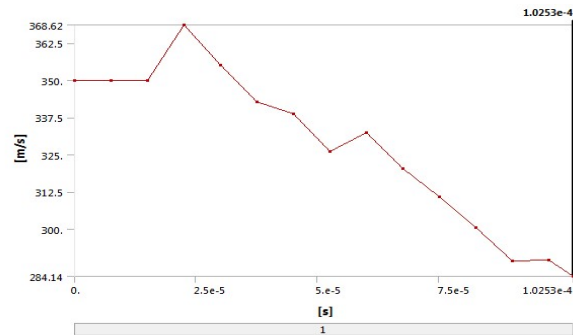
در نتیجه می توان با تعیین ضریب اصطکاک ایده آل برای هر ماده بیشترین اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش نفوذپذیری را موجب شد. با بررسی حد بالستیک برای ضریب اصطکاک ۳ (که برابر با ۲۰۴/۳۶ متر بر ثانیه) و ضریب اصطکاک ۵ (برابر با ۲۱۵/۵ متر بر ثانیه) گردید ملاحظه شد افزایش ضرایب اصطکاک تا حد مشخصی در کاهش نفوذ پذیری تاثیر دارد.

۶- مراجع

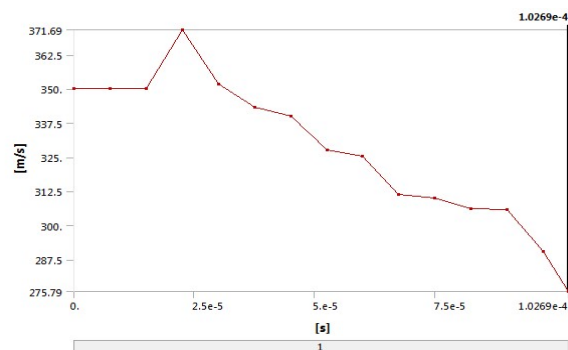
- [1] Naik N. K., and Shirao P., Composite structures under ballistic impact, Composite Structures, Vol. 55, PP 579-590, 2006.
- [2] Naik N. K., Shirao P. and Redd B., Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites Parametric Studies, Materials Science and Engineering, vol.78, PP 104-116, 2005.
- [3] Egres R. G., Kirkwood K. M., Kirkwood J. E. and Wagner N. J., Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids, In 23rd Army Science Conference, Orlando, United States of America, 3 December 2002.
- [4] Van Der Werff H., Modeling of ballistic impact on fiber composite, S.L. MSH Science, Vol.2, PP 1045-1055, 2011.
- [5] Duana Y., KeeFeb M., Bogetic T. A. and Cheeseman B.A., Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric, Impact Engineering, Vol. 42, PP 996-1012, 2005.
- [6] Tarig A., Vijay H., Rangari K. and Jeelani S., Synthesis processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites, Materials Science and Engineering Vol. 41, PP 76-84, 2010.
- [7] Kordani N. and Vanini A. S., Different method to make laminates by shear thickening fluid, Science Engineering Composite Material, Vol. 45, PP 97-106, 2013.
- [8] Kordani N. and Vanini A. S., Optimizing the ethanol content of shear thickening fluid fabric composites under Impact loading, Impact Engineering, Vol.78, PP 45-55, 2013.
- [9] Lau A. and Hui D., The revolutionary creation of new advanced materials carbon nanotube composites, Composites Engineering, Volume 33, PP 263-277, 2002.
- [10] Brown J. R. and Ennis B. C., Thermal Analysis of Nomex and Kevlar Fibers, Textile Research, vol. 47, PP 62-66, 1977.
- [11] Johnson M. V. and Segalman J., A model for viscoelastic fluid behavior which allows non-affine deformation, Non-Newtonian Fluid Mechanics, Volume 3, PP 255-270, 1977.
- [12] Horsfall I., Bishop W. and Cowan D., The Effect of Ceramic Type on The Performance Of Ceramic-Faced Metallic Armor, Battlefield Technology, Vol. 6, PP 234-246, 2003.

۴-۵- افزایش ضرایب اصطکاک

جهت بررسی اینکه، افزایش ضرایب اصطکاک تا چه حد در کاهش نفوذ پذیری تاثیر دارد، یک بار کلیه ضرایب اصطکاک را برابر عدد ۳ و بار دیگر برابر ۵ تعیین گردید و حد بالستیک را برای هر کدام محاسبه شد که در شکل های زیر نمودار کاهش سرعت پرتابه برای هر یک از مدل ها مشخص گردید.



شکل ۹- تغییرات سرعت برای ضریب اصطکاک ۳



شکل ۱۰- تغییرات سرعت براس ضریب اصطکاک ۵

همانطور که در جدول زیر مشاهده می گردد افزایش ضرایب اصطکاک موجب افزایش حد بالستیک نیز می گردد، اما این افزایش حد بالستیک برای ضرایب اصطکاک ۳ و ۵ قابل توجه نمی باشد، که نشان از کاهش تاثیر ضرایب اصطکاک بالا می باشد، بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که افزایش ضریب اصطکاک تا حد مشخصی موجب افزایش حد بالستیک می گردد ولی افزایش بیش از این حد تاثیر چندانی در افزایش حد بالستیک نخواهد داشت.

جدول ۳- حد بالستیک برای مدل با ضرایب اصطکاک مختلف

مشخصات مدل	مدل بدون سیال	مدل آغشته به سیال	ضرایب اصطکاک ۳	ضرایب اصطکاک ۵
حد بالستیک (m/s)	۷۴/۹۵	۱۶۹/۱۲	۲۰۴/۳۶	۲۱۵/۵

- [13] Cox R. G., The deformation of a drop in a general time-dependent fluid flow, *Fluid Mechanics*, Volume 37, pp 601- 623, 2006.
- [14] Galindo-Rosales, Francisco J., Hernández R, Francisco J., Velázquez N. and José F., Shear-thickening behavior of Aerosol R816 nanoparticles suspensions in polar organic liquids Rheological, *Journal of Impact Engineering*, Vol.89, PP 699_708, 2009.
- [15] Nairn A. J., Matrix Micro cracking in Composites, *Polymer Matrix Composites*, Vol. 13, PP 189_201, 2000.
- [16] Galindo F. J., Rosales F. J., Hernandez R. and Sevilla R., An apparent viscosity function for shear thickening fluid, *Non-Newtonian Fluid Mechanic*, Vol.53, PP 321_325, 2011.
- [17] Youngs L., Wetzel D. L. and Wagner N. J., The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid, *Materials Science*, Vol.88, PP 38_49, 2003.
- [18] Rao M.P., Duan Y., Keefe M., Powers B. and Bogett T., Modeling the effects of yarn material properties and frictional the ballistic impact of a plain-weave fabric Composite Structures, *Impact Engineering*, Vol.76, PP 701_715, 2001.
- [19] Masta M. R. O., Deshpande V. S., and Wadley H. N. G., Mechanisms of Projectile Penetration in Dynamo Encapsulated Aluminum Structures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, PP 16_35, 2014.
- [20] Rao M., Nilakantan G. and Keefe B. M., and Bogetti T. A., Global/Local Modeling of Ballistic Impact onto Woven Fabrics, *Composite Materials*, Vol. 96, PP 430_445, 2009.
- [21] Mouritz A. P., Ballistic Impact and Explosive Blast Resistance of Stitched Composites, *Composites Engineering*, Vol. 32, PP 431_439, 2001.
- [22] Eric D., Wetzel Y. S., Egres R. G., Kirkwood K. M. and Wagner N. J., the Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Kevlar Composites, *Uniforms*, Vol. 66, PP13-27, 2004.
- [23] Jonathan J., Stickel A. and Powell R., Fluid Mechanics and Rheology of Dense Suspensions, *biomechanics*, Vol. 37, PP 129_149, 2005.
- [24] Weinbaum S., Cowin S. C. and Zeng Y., A Model for the Excitation of Osteocytes by Mechanical Loading-Induced Bone Fluid Shear Stresses, *Biomechanics*, Vol.25, PP 21_35, 1998.
- [25] Lee Y., Wetzel Y. S. and Wagner N. J., The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar® Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid, *Materials Science*, Vol. 38, PP 2825_2833, 2003.
- [26] Cross M., Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudo plastic systems, *Colloid Science*, Vol. 20, PP 417-437, 2001.