

## تحلیل عددی عملکرد بالستیک الیاف بافته شده چند لایه با استحکام بالا و بررسی تاثیر اصطکاک بین الیاف تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

محمدباقر علیائی  
سید رضا فلاحتگر\*

### چکیده

اصطکاک تاثیر چشمگیری در عملکرد بالستیک الیاف بافته شده دارد. در این مقاله به بررسی رفتار بالستیک پارچه‌های بافته شده از جنس تارون در برابر ضربه سرعت بالای پرتابه استوانه‌ای پرداخته می‌شود. از روش عددی با استفاده از دینامیک صریح نرم‌افزار ABAQUS در تحلیل برخورد سرعت بالا استفاده شده است. بدین منظور برای مدل‌سازی الیاف آرامید از المان‌های جامد سه بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل ماده VUMAT بر مبنای معیار آسیب تنش حداکثر با استفاده از کدنویسی در به زبان Fortran استفاده شد. سپس با استفاده از این مدل تاثیر اصطکاک بین تار و پود بر جذب انرژی پرتابه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مقدار تنش‌ها در الیاف آرامید به ضریب اصطکاک بین تار و پود بسیار حساس است. افزایش اصطکاک بین الیاف آرامید، سبب توزیع انرژی پرتابه بین تعداد بیشتری از نخ‌ها می‌گردد و این پخش انرژی باعث افزایش زمان نفوذ پرتابه در این الیاف می‌شود. الیاف آرامید بجز در مدل تک لایه با ضریب اصطکاک بالاتر انرژی بیشتری به نسبت الیاف با ضریب اصطکاک پایین‌تر جذب می‌کنند. در این تحقیق به منظور اعتبارسنجی مدل از آزمون‌های تجربی استفاده شد. ضریب همبستگی بین سرعت باقی‌مانده شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش تجربی ۰.۹۴ می‌باشد که نشان‌دهنده ارتباط بسیار نزدیک نتایج تجربی و عددی حاضر است.

واژه‌های کلیدی: ضربه بالستیک، الیاف آرامید، تارون، شکست، سرعت بالا، تحلیل المان محدود، اصطکاک.

## Numerical Analysis of Ballistic Behavior of Multi-layer High-strength Woven Fabrics Under High-velocity Impact and Investigation of Inter-yarn Friction Effects

M. Oliae  
S. R. Falahatgar

Faculty of Mechanical engineering, University of Guilan, Rasht, Iran  
Faculty of Mechanical engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### Abstract

It is known that friction has a significant effect in determining the ballistic impact performance of woven fabrics. In this paper the ballistic behavior of Twaron Aramid fibers fabrics against high velocity impact of a cylindrical projectile is investigated. Dynamic explicit method using ABAQUS software is utilized to analyze the high-speed impact. For this matter 3D solid elements are used and a VUMAT material model based on maximum stress damage criterion is developed by FORTRAN program. Then using this model, the effects of the friction between yarns on energy absorption of the fabric is investigated. Results indicate that the amount of stress in the fabric is highly sensitive to the friction coefficient between the warp and weft fibers. Increasing the friction between fibers, causes the projectile energy to be distributed among a larger number of threads which increases the penetration time of the projectile in the fibers. In all models, except the case with one layer fabric, higher friction coefficients cause higher energy absorption in the fabric. Moreover, experimental tests were used to validate the model in this project the results have the agreement with the Correlation coefficient determination of 0.94, which verifies the accuracy of the simulation.

**Keywords:** Ballistic impact, Woven fabric, Twaron, Failure, High velocity, Finite element analysis, Friction.

نتایج تاثیر اصطکاک بر عملکرد پارچه‌های محافظ را نشان می‌دهد [۷،۶].

لیاقت و همکاران [۱] یک مدل تحلیلی برای تحلیل فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت در سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه-اپوکسی و هسته لانه زنبوری براساس مدل انتشار موج ارائه کردند. در مدل آن‌ها فرآیند نفوذ در سازه ساندویچی به چهار مرحله متوالی تقسیم می‌شود، که معادله حرکت پرتابه در هر مرحله و جرم‌های موثر هسته و رویه‌ها از مکانیک لاگرانژی استخراج شده است. معادلات غیرخطی به‌دست آمده از هر مرحله، با در نظرگیری وقوع تخریب‌های موضعی و انرژی‌های جذب شده حل شده است. همچنین با

### ۱- مقدمه

در جلیقه‌های بالستیک از الیاف بسیار قوی استفاده می‌کنند تا هنگام ضربه و وارد شدن نیرو به جلیقه، انرژی گلوله را به طور کامل جذب کند. الیاف آرامید نسبت به سایر کامپوزیت‌ها دارای عملکرد بالستیک بهتری هستند. با توجه به اهمیت کاربرد لایه‌های جذب ضربه برای حفاظت از سازه‌هایی مانند خودروهای زرهی یا سربازان پیاده‌نظام، شناخت دقیق مکانیزم‌های مختلف افزایش جذب انرژی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. خواصی از مواد مانند مقاومت کششی بالا و جذب انرژی بالا از جمله شاخصه‌های مناسب برای بافت می‌باشند. در فرآیند بافت، این الیاف با نظم مشخصی بصورت تار و پود در پارچه نهایی کنار هم قرار داده می‌شوند. در سال‌های اخیر، بررسی‌های زیادی بر روی عملکرد بالستیک جذب‌های ضربه انجام گرفته است [۱-۵].

استفاده از شبیه سازی عددی، فرایند نفوذ توسط کد اجزاء محدود ال-اس-داین<sup>۱</sup> مدل سازی شده است.

خدارحمی و همکاران [۲] رفتار بتن تحت نفوذ یک پرتابه فرسایشی را تحلیل کرده‌اند. بر این اساس و بر مبنای تشابهات کیفی نفوذ فرسایشی در اهداف فلزی و بتنی، میدان جریان ذرات حول نوک پرتابه فرسایشی در حال نفوذ در یک هدف بتنی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با حل معادلات نهایی مدل فورستال<sup>۲</sup> عمق نفوذ برای پرتابه‌های فرسایشی بر مبنای مدل فورستال را محاسبه کردند. مقایسه نتایج مربوط به مدل بهبود یافته والکر-آندرسون<sup>۳</sup> با نتایج حاصل از مدل فورستال نشان داد که علی رغم جامعیت مدل فورستال در نفوذ صلب، استفاده از این مدل حتی به عنوان یک تخمین مهندسی جهت تحلیل نفوذ فرسایشی در اهداف بتنی اشتباه است.

چیزمن و باگتی [۳] فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. محققان تاثیرگذاری عواملی همچون خواص مواد، ساختار پارچه، هندسه و سرعت پرتابه، شرایط مرزی الیاف بافته شده و لایه‌چینی الیاف را بررسی کردند.

بابایی و همکاران [۴] به مطالعه تجربی و مدل‌سازی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای پرداختند. در بخش تجربی، برای بررسی رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی و آلومینیومی نسبت به بار وارده، آزمایش‌هایی بر روی آن‌ها در سطوح انرژی متفاوت انجام می‌شود. بخش مدل‌سازی این تحقیق شامل ارائه یک تابع صریح برای داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد بر اساس پارامترهای بی‌بعد و همچنین طراحی و مدل‌سازی چند هدفی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک است. به‌طور کلی هدف از مدل‌سازی، پیش‌بینی قابل‌اطمینان و رضایت‌بخش نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت آن تحت بارگذاری ضربه‌ای است.

لیاقت و همکاران [۵] پدیده نفوذ پرتابه در اهداف سرامیکی را به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند و یک مدل اصلاحی جدید ارائه دادند. محققان با اعمال اصلاحاتی همچون تغییر نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، سایش، قارچی شدن و صلیبیت پرتابه در تئوری وودوارد<sup>۴</sup> نتایج بالستیک را در مدل مذکور بهبود دادند.

بریسکو و معتمدی [۶] تاثیر اصطکاک بین تار و پود الیاف آرامید را بررسی کردند. آن‌ها از بافت‌های متفاوت با سه ضریب اصطکاک مختلف استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که، هر چه سرعت پرتابه بیشتر باشد باید اصطکاک بین الیاف نیز بیشتر در نظر گرفته شود. همچنین کاهش اصطکاک بین لایه‌ها باعث افزایش سرعت باقیمانده پرتابه پس از عبور از الیاف می‌شود. محققان دریافتند با افزایش اصطکاک بین الیاف، انرژی جذب شده توسط الیاف بیشتر خواهد بود. علاوه بر اصطکاک بین تار و پود، اصطکاک بین پرتابه و الیاف نیز بر روی انرژی جذب شده توسط پارچه تاثیرگذار است.

لی و همکارانش [۷] نشان دادند که با محدود کردن حرکات تار و پود در خارج از مسیر پرتابه، ظرفیت جذب انرژی الیاف افزایش خواهد یافت. افزایش اصطکاک بین پرتابه و الیاف، مانع تحرک نخ‌ها شده و سبب توزیع انرژی پرتابه بین تعداد بیشتری از نخ‌ها می‌شود و باعث افزایش انرژی جذب شده توسط پارچه می‌گردد. ریبویلات [۸] مطالعه بر روی اصطکاک بین تار و پود الیاف بافته شده را بررسی کرد. او نتیجه گرفت چگالی خطی نخ‌ها بیشترین تاثیر را روی اصطکاک الیاف دارد، به این صورت که الیاف ساخته شده با چگالی خطی بیشتر ضریب اصطکاک کمتری دارند.

مین و همکاران [۹] اثر اصطکاک بین الیاف و همچنین بین پرتابه و الیاف را بر روی عملکرد بالستیک پارچه محافظ بصورت مجزا بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد، اصطکاک بین نخ‌ها به حفظ پیوستگی ساختاری الیاف در حین برخورد کمک می‌کند. کرکوود و همکاران [۱۱،۱۰] مدلی توسعه یافته برای پیش‌بینی نیرو و انرژی نخ به عنوان تابعی از میزان کشیدگی الیاف بافته شده ارائه دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نتایج تست‌های شبه استاتیک کشیدگی نخ می‌تواند از نظر مقداری با جابجایی دینامیکی نخ در حین ضربه بالستیک ارتباط داده شود.

دوان و همکاران [۱۲،۱۳] با استفاده از نرم افزار المان محدود LS-Dyna برخورد بالستیک پرتابه کروی صلب به الیاف تک لایه بافته شده مربعی را مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی نقش اصطکاک بین تار و پود و همچنین اصطکاک بین پرتابه و الیاف در طی فرآیند برخورد پرداختند. در این تحلیل نشان داده شد که افزایش اصطکاک بین تار و پود باعث کاهش سرعت باقی مانده پرتابه شده و الیاف با ضریب اصطکاک بالاتر انرژی بیشتری به نسبت الیاف با ضریب اصطکاک پایین‌تر جذب می‌کنند.

زنگ و همکاران [۱۴] در یک بررسی عددی اصطکاک بین تار و پود الیاف بافته شده بکار رفته در ساخت زره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که در ضرایب اصطکاک پایین، پاسخ بالستیک الیاف بافته شده نسبت به اصطکاک بین نخ‌ها بسیار حساس است. همچنین نتایج نشان دادند که اگر ضریب اصطکاک بین الیاف بیش از حد واقعی باشد باعث پارگی زودرس نخ‌ها می‌شود و نتیجه آن کاهش قابلیت جذب انرژی الیاف می‌باشد.

خدادادی و همکاران [۱۵] عوامل موثر بر عملکرد بالستیکی پارچه‌های کولار شامل خواص پارچه و هندسه پرتابه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با آزمایش‌های تجربی توسط پرتابه‌های سرتخت و سرکروی نشان دادند که الیاف پارچه طی برخورد پرتابه سرتخت، علاوه بر تنش کششی، تحت تنش برشی نیز قرار می‌گیرد. تنش ایجاد شده در الیاف توسط پرتابه سرکروی، از نوع تنش کششی است. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که پرتابه سرتخت به دلیل اعمال تنش برشی ناشی از لبه تیز پرتابه، دارای حد بالستیک کمتری است.

مهربانی و همکاران [۱۶] به صورت تجربی تاثیر شکل دماغه‌های تخت، مخروطی، نیم‌کروی و اجیوال و همچنین سرعت اولیه آن‌ها بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت چند لایه شیشه-پوکسی با الیاف بافته شده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین اختلاف بین عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود.

1LS-Dyna  
2LS-Dyna  
3 Walker-Anderson model  
4 Woodward

نسبت تنش‌های حقیقی به تنش‌های شکست ماده مقایسه می‌شوند.

$$F = \left( \left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 \geq 0 &\rightarrow X = X_t & \sigma_1 \geq 0 &\rightarrow X = X_c \\ \sigma_2 \geq 0 &\rightarrow Y = Y_t & \sigma_2 \geq 0 &\rightarrow Y = Y_c \\ \sigma_3 \geq 0 &\rightarrow Z = Z_t & \sigma_3 \geq 0 &\rightarrow Z = Z_c \end{aligned}$$

در این رابطه  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  به ترتیب بیان‌کننده تنش‌های عمودی در جهت‌های  $x, y, z$  و مختصات ماده و همچنین  $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$  نشان‌دهنده تنش‌های برشی هستند.  $X_c$  و  $X_t$  استحکام‌های کششی و فشاری در جهت الیاف و  $S, R, Q$  استحکام‌های برشی صفحه‌های ماده می‌باشند. زمانی که هر کدام از معادلات رابطه (۱) برابر یک شوند آسیب رخ می‌دهد [۱۹].

### ۳- مدل‌سازی المان محدود پارچه‌های بافته شده

#### ۳-۱-۳ مدل هندسی پارچه

در این تحقیق از مدل المان محدود توسط نرم افزار ABAQUS<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی ضربه عرضی یک پرتابه به پل الیاف بافته شده طبق کار تجربی وانگ و همکاران [۲۰] استفاده شده است. مدل‌سازی تار و پود در سطح نخ انجام گرفته است. برای توصیف مدل‌سازی تار و پود پارچه، شکل سطح مقطع نخ که در طول نخ ثابت باقی می‌ماند بصورت عدسی فرم، شامل دو کمان یکسان که روبروی یکدیگر قرار دارند در نظر گرفته شده و مسیر نخ نیز یک منحنی، عمود بر سطح مقطع نخ می‌باشد. تراکم رشته تار و پود در پارچه، در هر سانتی‌متر ۷ است. بر این اساس طول موج چین نخ و ضخامت پارچه به ترتیب ۲٫۸ میلی‌متر و ۰٫۳۴۵ میلی‌متر می‌باشند. نمایی از سطح مقطع پارچه در شکل ۱ نشان داده شده است. تمام پارامترهای هندسی مدل‌سازی توسط روابط (۲) بدست می‌آیند:

$$L = \text{تراکم رشته} \times 2$$

$$X = L/4$$

$$B = \frac{4}{\text{ضخامت الیاف}}$$

$$(۲)$$

$$R_m = (x^2 + b^2)/2b$$

$$R_i = R_m - b$$

$$a = (2bR_i - b^2)^{1/2}$$

که در این معادلات،  $L$  نشان دهنده طول موج مسیر نخ،  $R_i$  شعاع کمان برای سطح مقطع نخ،  $R_m$  شعاع کمان برای مسیر نخ،  $a$  و  $b$  به ترتیب نصف عرض و نصف ارتفاع سطح مقطع نخ هستند. بررسی‌های انجام شده نشان‌دهنده اختلاف بسیار کوچک، حدود ۲٫۴ درصد در میزان جذب انرژی بین مواد ایزوتروپیک و ارتوتروپیک می‌باشد، بنابراین خاصیت جنس ماده به منظور ساده‌سازی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است [۲۲، ۲۱]. در این مقاله نیز خواص مواد همگن و همسانگرد برای مدل نخ استفاده شد. مشخصات مکانیکی پرتابه و نخ تارون که توسط شرکت تیجین ارائه شده است در جدول ۱ قابل مشاهده است.

چن و همکاران [۱۷] راندمان جذب انرژی هر لایه پارچه را در پانل‌های چند لایه الیاف بافته شده تحت برخورد بالستیک بررسی کردند. آن‌ها به کمک آزمایش تجربی و تحلیل عددی دریافتند راندمان جذب برای لایه اول پانل، تنها ۳۰ تا ۶۰ درصد زمانی است که این لایه به تنهایی و با شرایط مرزی آزاد مورد استفاده قرار گیرد. آن‌ها همچنین دریافتند الیاف با قرارگیری در لایه اول، وسط و یا در انتهای پانل خواص بالستیک متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که اصطکاک تاثیر مهمی در مقاومت عملکرد بالستیک الیاف بافته شده دارد و همچنین برای شناسایی نقش اصطکاک در جذب انرژی و پارگی نخ‌ها تلاش‌های بسیاری انجام شده است. گرچه تحلیل‌های عددی برای تحلیل‌های بالستیک به طور گسترده بکار گرفته می‌شود اما بررسی مکانیک شکست مرتبط با اصطکاک بین تار و پود الیاف بافته شده هنوز هم برای درک کامل نیاز به آزمایشات و مطالعات بیشتری دارد.

هدف اصلی این مقاله مطالعه عددی روشی برای بررسی تاثیر اصطکاک بر رفتار ضربه در پارچه‌های بالستیک جاذب ضربه با پرتابه سر تخت می‌باشد. در مطالعاتی که تاکنون بر روی مکانیک شکست الیاف بافته شده صورت گرفته، جهت تعیین رفتار مکانیکی نخ، از مدل الاستیک-پلاستیک استفاده شده است اما با توجه به زمان بارگذاری بسیار کوتاه در برخورد بالا، هیچ تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی رخ نمی‌دهد و شکست الیاف از نوع ترد می‌باشد. در نتیجه برای تعیین شکست باید از معیاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی الیاف استفاده نمود. در این پژوهش برای معرفی دقیق رفتار مکانیکی الیاف از مدل ساختاری الاستیک سه بعدی بر مبنای معیار تنش حداکثر با استفاده از زیر برنامه وی‌یومت<sup>۱</sup> استفاده شده است. توزیع تنش در الیاف و بررسی مود شکست که برای مهندسی و بهبود عملکرد بالستیک پارچه‌های محافظ ضربه بسیار حائز اهمیت است از نتایج تحقیق حاضر است.

#### ۲- مدل شکست

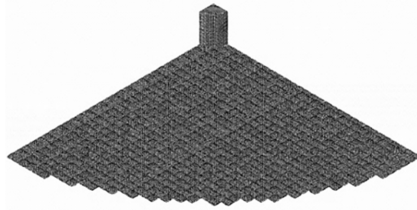
تحقیقات بسیاری در زمینه ارائه مدل برای تخمین مکانیزم شکست انجام شده است که در اکثر این مطالعات نخ به صورت یک ماده الاستیک در نظر گرفته شده است [۱۵، ۱۲]. در مدل‌سازی‌هایی که ماده بصورت پلاستیک در نظر گرفته می‌شود، نیاز به تعیین پارامترهایی برای تعریف ماده است که بصورت دقیق در دسترس نبوده و باید بصورت تخمینی تعیین شود. در نتیجه برای تعیین شکست باید از معیاری مناسب برای مواد الاستیک استفاده نمود که می‌توان به معیار شکست تنش حداکثر اشاره کرد. انتخاب بهترین مدل به بررسی عواملی چون نوع بارگذاری بر روی سازه، سرعت برخورد، مکانیزم‌های آسیب و مدل‌های شکست نیاز دارد [۱۸].

#### ۲-۱- معیار شکست تنش بیشینه

برای پیش‌بینی آسیب در الیاف از معیار تنش حداکثر، استفاده شده است. همانطور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود در این معیار

<sup>2</sup> Abaqus

<sup>1</sup> VUMAT

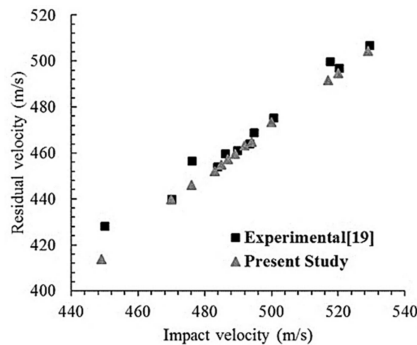


شکل ۲- نمای کلی مدل عددی پرتابه و پارچه

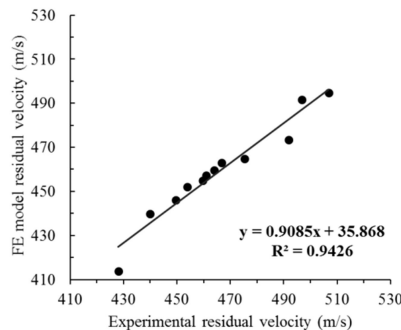
۳-۳- صحت سنجی شبیه سازی اجزا محدود

نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. در شکل ۳ سرعت‌های باقی‌مانده حاصل از حل عددی و نتایج آزمایش تجربی در برخورد پرتابه به یک لایه از الیاف بافته شده تارون، نسبت به سرعت‌های ورودی یکسان پرتابه در طی بازده آزمون نشان داده شده است. ضرایب اصطکاک در تمامی سطوح ۰.۲۲ می‌باشد. در شکل ۴، محور افقی و محور عمودی به ترتیب مربوط به سرعت‌های باقی‌مانده محدود در سرعت‌های ورودی یکسان می‌باشد.

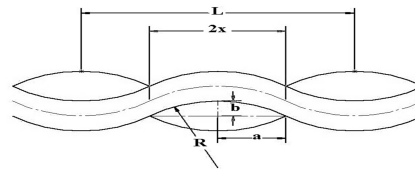
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از حل الیاف محدود تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش تجربی دارند. همچنین در شکل ۴، یک رابطه خطی بین سرعت‌های باقی‌مانده پرتابه حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی می‌تواند وجود داشته باشد. ضریب همبستگی بین سرعت باقی‌مانده شبیه‌سازی الیاف محدود و آزمایش تجربی ۰.۹۴ می‌باشد که نشان‌دهنده ارتباط بسیار نزدیک نتایج تجربی و عددی حاضر است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت مدل ارائه شده قابل استناد خواهد بود.



شکل ۳- سرعت‌های باقی‌مانده در آزمایش تجربی و مدل عددی حاضر در الیاف تک لایه



شکل ۴- ارتباط بین سرعت‌های باقی‌مانده آزمایش تجربی و مدل عددی حاضر در الیاف تک لایه



شکل ۱- نمای طر حواره سطح مقطع نخ

جدول ۱- مشخصات مکانیکی پرتابه و الیاف آرامید [۲۰]

الیاف	پرتابه	مشخصات ماده
۳،۶۴	صلب	استحکام کششی (GPa)
۰،۴	صلب	کشیدگی (%)
۹۳،۵	۲۱۰	مدول یانگ (GPa)
۰،۳۵	۰،۳۵	ضریب پواسون
۱۴۴۰	۷۸۰۰	چگالی حجمی (kg/m <sup>3</sup> )

۳-۲- مدل المان محدود

با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد که برای سطح مقطع نخ ۱۰ المان و برای طول موج نخ تعداد ۲۴ المان مناسب می‌باشد [۱۳]. مدل المان محدود پارچه دارای المان توپر شش وجهی ۸ گره‌ای می‌باشد. پرتابه بصورت استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۵.۵ میلی‌متر و به شکل جسم صلب مدل‌سازی شده است.

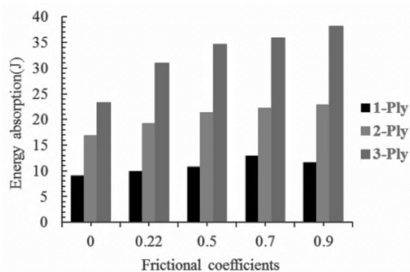
بین پرتابه و پارچه و همچنین بین الیاف، اصطکاک ساده کلمب برقرار می‌باشد. تماس بین تار و پود و تماس بین پرتابه و الیاف توسط الگوریتم تماس سخت و حالت پنالتی که با برنامه ABAQUS - EXPLICIT (صریح) ارائه شده است در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. برای تمام تماس‌ها ضرایب اصطکاک متفاوتی به منظور بررسی تاثیر آن‌ها انتخاب شده است.

از شرایط مرزی گیردار برای تمامی لبه‌ها استفاده می‌شود. به علت تقارن موجود در شکل هندسی، خواص مادی و تقارن بارگذاری، یک چهارم مساله مدل‌سازی شده است. مدل المان محدود سه بعدی از پارچه‌های بافت تخت در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد که در آن یک پرتابه صلب بصورت عرضی به مرکز پتل دایره‌ای برخورد می‌کند. پرتابه تنها در مسیر عمود بر صفحه پارچه حرکت می‌کند و سرعت ضربه پرتابه با توجه به آزمایش تجربی ۵۰۰ m/s فرض شده است. قطر پارچه با توجه به اندازه دهانه گیره استفاده شده برای نگه‌داشتن پتل پارچه در آزمایش تجربی، ۱۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد [۲۰].

با اندازه‌گیری انرژی جذب شده توسط الیاف بافته شده در حالت نفوذ، عملکرد بالستیکی پارچه‌های محافظ مورد بررسی قرار گرفت. تغییر شکل پرتابه، اصطکاک بین ملکولی نخ‌ها، مقاومت هوا و انرژی تلف شده قابل چشم‌پوشی فرض شده است. بنابراین انرژی جذب شده توسط پارچه، برابر با انرژی جنبشی از دست رفته از پرتابه می‌باشد. در شبیه‌سازی المان محدود، تغییرات سرعت پرتابه در طی نفوذ پرتابه محاسبه می‌شود. تغییرات انرژی جنبشی پرتابه توسط عبارت ۳ تعیین می‌گردد.

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (V_s^2 - V_r^2) \quad (3)$$

که در آن m جرم پرتابه و V<sub>s</sub> سرعت اولیه و V<sub>r</sub> سرعت باقی‌مانده پرتابه است.

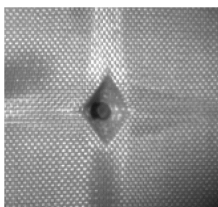


شکل ۶- انرژی جذب شده بر حسب ضرایب اصطکاک مختلف در پانل‌های چند لایه

با توجه به شکل ۶، با افزایش اصطکاک میزان انرژی جذب شده توسط پارچه در تک لایه تا زمانی که ضریب اصطکاک کمتر از ۰٫۷ باشد، از ۹٫۰۳ ژول به ۱۲٫۹۱ ژول افزایش می‌یابد و زمانی که اصطکاک بین نخ‌ها به بیش از ۰٫۷ برسد انرژی جذب شده الیاف به مقدار ۱۱٫۶۱ ژول کاهش خواهد یافت. اما در حالت چند لایه با افزایش ضریب اصطکاک، انرژی جذب شده برای پانل دو لایه از مقدار ۱۶٫۷۷ ژول به ۲۲٫۷۹ ژول و برای پانل سه لایه از مقدار ۲۳٫۲۲ ژول به ۳۸٫۰۶ ژول می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت چند لایه سرعت خروجی پرتابه همیشه کاهش پیدا می‌کند و جذب انرژی همیشه افزایش می‌یابد. اما برای بهبود ظرفیت جذب انرژی الیاف در حالت تک لایه کنترل اصطکاک بین نخ‌ها مساله مهمی است.

#### ۲-۴- انحراف عرضی تحت تاثیر ضرایب اصطکاک

تار و پود با زاویه ۹۰ درجه در صفحه همدیگر را قطع می‌کنند. با توجه به خاصیت دو محوره بودن الیاف بافته شده، وقتی که پرتابه به نخ‌ها برخورد می‌کند منجر به ایجاد یک ناحیه تغییر شکل هرم مانند با قاعده مربعی می‌شود. دو قطر مربع موجود در قاعده همیشه با جهت‌های تار و پود بر هم منطبق هستند که در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. الیافی که بطور مستقیم با پرتابه در تماس هستند به عنوان تار و پود اولیه، و همچنین الیافی که در ادامه در ارتباط قرار می‌گیرند تار و پود ثانویه نامیده می‌شوند. پس از برخورد پرتابه به نخ یک انحراف عرضی در نخ‌های اولیه ایجاد شده و موج‌های طولی با سرعت صوت در امتداد محور تار و پود ایجاد می‌شوند. شکل ۸ نمای سطح مقطع پارچه تغییر شکل یافته در اثر برخورد پرتابه را نشان می‌دهد. دو پارامتر  $d$  عمق و  $w$  عرض برای توصیف هندسه تغییر شکل پارچه بکار رفته‌اند. عمق فاصله‌ای است که پرتابه در یک زمان مشخص طی می‌کند و انحراف عرضی پارامتری متناظر با عرض در نظر گرفته شده است.  $\phi$  زاویه بین گوشه هرم و محور  $x$  است که با صفحه نخ‌ها انطباق دارد.

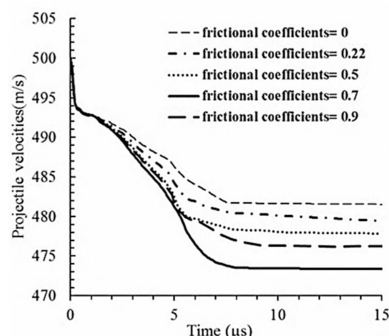


شکل ۷- منطقه تغییر شکل هرم تولید شده در پارچه‌های بافته شده تک لایه [۲۰]

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- تاثیر اصطکاک بر انرژی جذب شده

در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده، پرتابه با همان سرعت اولیه آزمایش تجربی برابر  $500 \text{ m/s}$ ، به پارچه برخورد کرده و به ازای ضرایب اصطکاک متفاوت، سرعت خروجی بدست می‌آید که مبنایی برای بررسی عملکرد بالستیکی پارچه خواهد بود. شکل ۵ نشان‌دهنده سرعت باقی‌مانده پرتابه در ضرایب اصطکاک مختلف نسبت به زمان، طی برخورد پرتابه به یک لایه از الیاف بافته شده است. نتایج بدست آمده بیان می‌کند با افزایش ضریب اصطکاک بین نخ‌ها کاهش بیشتری در سرعت باقی‌مانده پرتابه رخ خواهد داد. از این رو ضریب اصطکاک بالاتر بین نخ‌ها، باعث افزایش میزان مواد درگیر در تغییر شکل ضربه شده و در نتیجه موجب افزایش زمان شکست نخ می‌شود. بنابراین ظرفیت جذب انرژی نخ‌ها با افزایش اصطکاک بین تار و پود می‌تواند افزایش یابد [۹]. نتایج بیان می‌کند در پانل پارچه تک لایه بطور کامل در تمامی اصطکاک‌ها تا زمان ۶ میکروثانیه نفوذ انجام می‌شود.



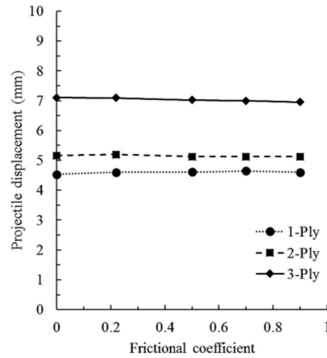
شکل ۵- تغییرات سرعت پرتابه در طول زمان برخورد برای تک لایه با ضرایب اصطکاک مختلف

در جدول ۲ مقادیر سرعت‌های باقی‌مانده پرتابه در ضرایب اصطکاک مختلف و با تعداد لایه‌های متفاوت طی برخورد بالستیک ارائه شده است. انرژی جذب شده الیاف با توجه به معادله (۳) محاسبه شده که نتایج حاصل از محاسبه در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که افزایش ضرایب اصطکاک در هر مدل با تعداد لایه مشخص تاثیر متفاوتی دارد.

جدول ۲- سرعت باقی مانده پرتابه بر حسب ضرایب اصطکاک مختلف در پانل دو و سه لایه

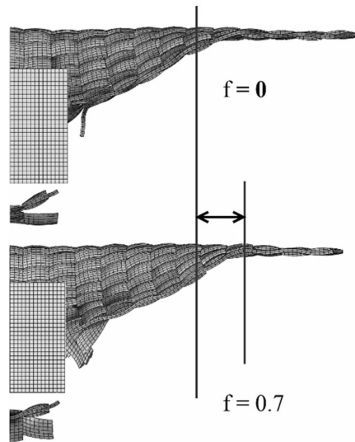
ضرایب اصطکاک	۰	۰٫۲۲	۰٫۵	۰٫۷	۰٫۹
سرعت باقی‌مانده پرتابه در پانل دو لایه (m/s)	۴۶۵	۴۶۰	۴۵۵	۴۵۳	۴۵۲
سرعت باقی‌مانده پرتابه در پانل سه لایه (m/s)	۴۵۱	۴۳۳	۴۲۵	۴۲۲	۴۱۷

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که در هر تعداد لایه، جابجایی پرتابه تقریباً برای همه ضرایب اصطکاک برابر است اما عرض پارچه بطور چشمگیری با افزایش ضریب اصطکاک افزایش پیدا می‌کند. این پدیده به صورت تجربی نیز توسط بریسکوو معتمدی [۶] مشاهده شده بود.

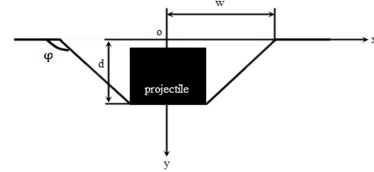


شکل ۱۲- نمودار جابجایی پرتابه برحسب ضرایب اصطکاک مختلف پس از برخورد در پانل‌های مختلف

نتایج نشان می‌دهند که ناحیه تغییر شکل با افزایش ضریب اصطکاک افزایش یافته و مواد بیشتری درگیر فرآیند تغییر حالت ناشی از ضربه می‌شوند. بنابراین ظرفیت جذب انرژی الیاف افزایش می‌یابد. به عنوان مثال شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تصاویر سطح مقطع پارچه تغییر شکل یافته در شبیه‌سازی المان محدود تک لایه و سه لایه را نشان می‌دهند که دلایل ارائه شده را تایید می‌کنند.

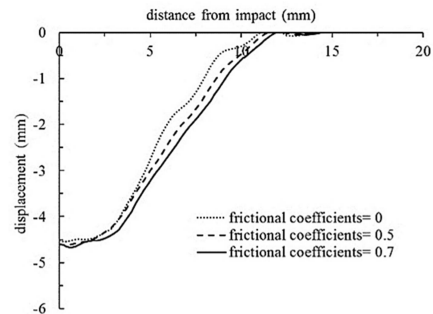


شکل ۱۳- تصویری از مدل‌سازی المان محدود که نمایانگر افزایش موج عرضی الیاف تک لایه با افزایش ضریب اصطکاک در ۸μs

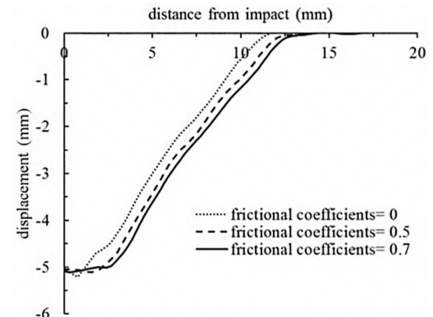


شکل ۸- نمای سطح مقطع پارچه تغییر شکل یافته در اثر برخورد پرتابه و پارامترهای توصیف هندسه منطقه تغییر شکل

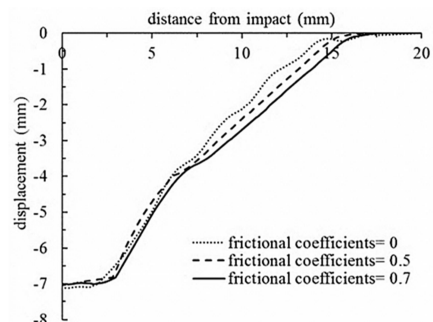
در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نتایج بدست آمده از تاثیر ضرایب اصطکاک بر انحراف عرضی پارچه به ترتیب در ۱ و ۲ و ۳ لایه نشان داده شده است. پروفیل‌های تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد با ضرایب اصطکاک مختلف در مدل‌های متفاوت پس از برخورد رسم شده‌اند.



شکل ۹- پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد برحسب ضرایب اصطکاک مختلف در زمان ۴μs در تک لایه

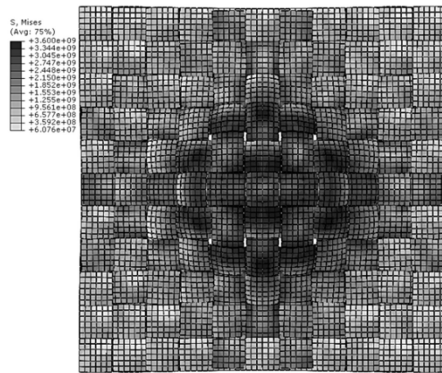


شکل ۱۰- پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد برحسب ضرایب اصطکاک مختلف در زمان ۸μs در پانل دو لایه

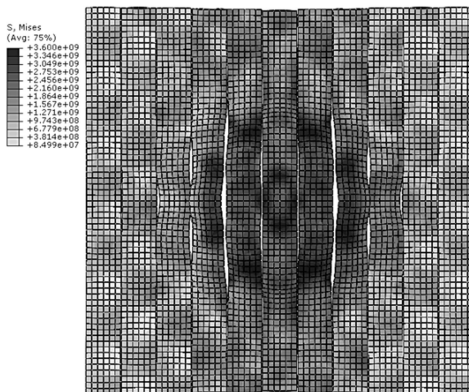


شکل ۱۱- پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد برحسب ضرایب اصطکاک مختلف در زمان ۱۴μs در پانل سه لایه

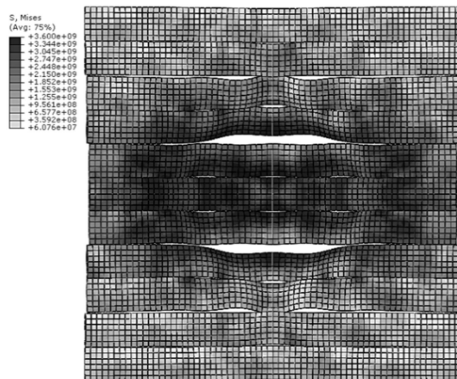




شکل ۱۵- بزرگنمایی منطقه مرکزی برخورد در شکل ۱۵

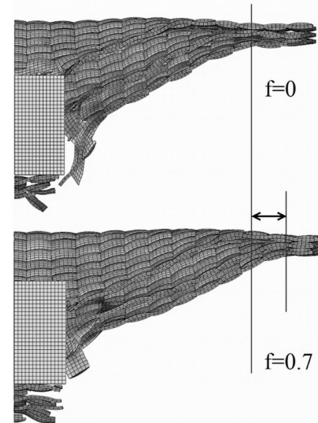


شکل ۱۶- توزیع تنش نخ تار در شکل ۱۶



شکل ۱۸- توزیع تنش فون میسز در نخ بود در شکل ۱۶

شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ توزیع تنش روی نخ تار را در لحظات مختلف طی برخورد بالستیک برای الیاف تک لایه نشان می‌دهند. واضح است زمان طی شده برای پاره شدن هر کدام از نخها متفاوت است و همچنین آخرین نخ که پاره می‌شود نخ مرکزی خواهد بود.



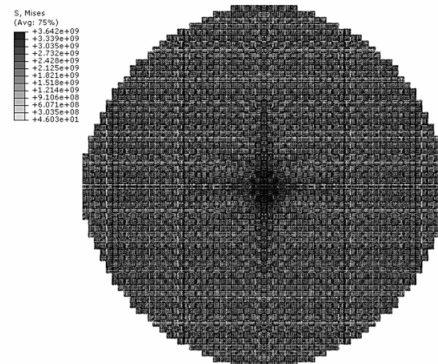
شکل ۱۴- تصاویری از مدلسازی المان محدود که نمایانگر افزایش موج عرضی الیاف سه لایه با افزایش ضریب اصطکاک در ۱۸μs

### ۳-۴- توزیع تنش تحت تاثیر ضرایب اصطکاک

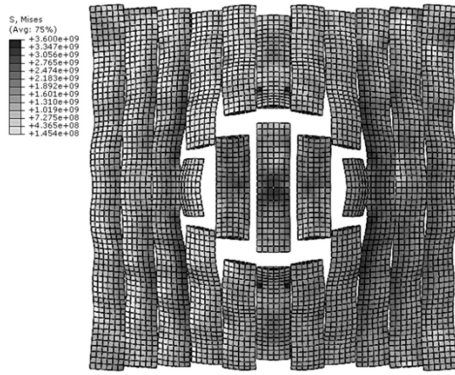
#### ۱-۳-۴- کانتور تنش

پس از برخورد پرتابه به الیاف بافته شده، یک انحراف عرضی در نخ‌های اولیه ایجاد شده و موج‌های تنشی طولی با سرعت صوت در امتداد محور نخ‌ها منتشر می‌شوند. انحراف عرضی تا جایی که تنش در نقطه برخورد به تنش شکست برسد پیش رفته و یک مخروط تغییر شکل هرم مانند با قاعده مربعی ایجاد می‌کند. در بحث‌های پیش رو به بررسی مقدار تنش در طول نخ‌ها و تاثیر ضریب اصطکاک بر آن‌ها پرداخته می‌شود.

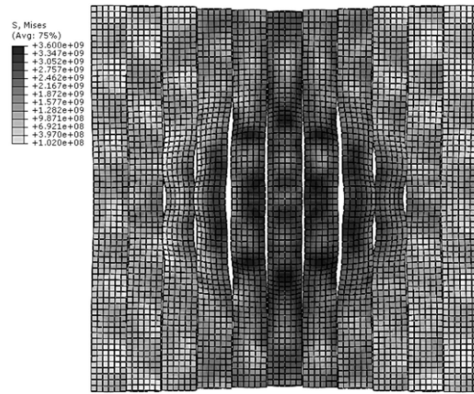
شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ کانتورهای توزیع تنش فون میسز در نخ‌های تحت برخورد بالستیک تک لایه را پس از ۲ میکروثانیه نشان می‌دهند. ضریب اصطکاک برابر با ۰/۵ فرض شده است. شکل ۱۵ نمای کلی از کانتورهای تنش در پارچه تک لایه است، ناحیه مرکزی به منظور مشاهده جزئیات بیشتر در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تنش در گوشه‌های ناحیه تماس با پرتابه اتفاق می‌افتد. توزیع تنش‌ها در تار و پود به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. با پیشروی پرتابه در الیاف بافته شده تنش در گوشه‌های ناحیه تماس با الیاف افزایش پیدا کرده تا در نهایت به شکست برسد.



شکل ۱۵- نمای کلی توزیع تنش فون میسز پارچه تحت تاثیر برخورد بالستیک در ۲μs در ضریب اصطکاک ۰/۵

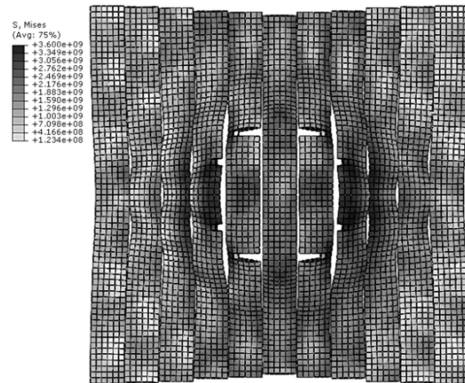


شکل ۲۲- توزیع تنش نخ تار در ۶  $\mu$ s پس از برخورد

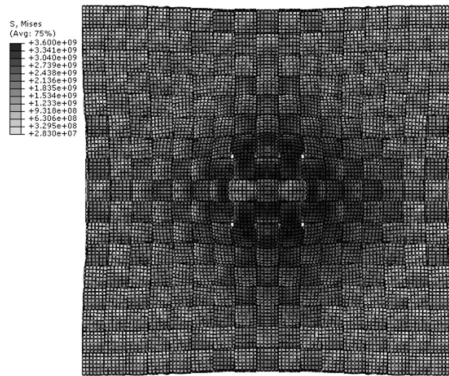


شکل ۱۹- توزیع تنش نخ تار را در ۳  $\mu$ s پس از برخورد

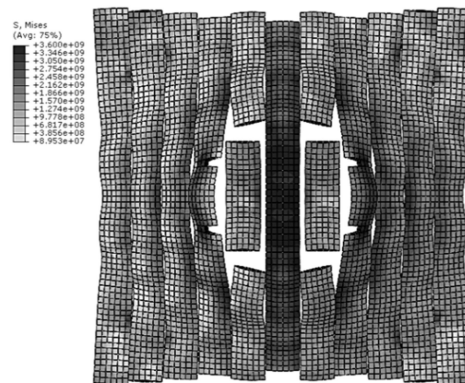
توزیع تنش بر روی تار و پود طی برخورد بالستیک برای الیاف دو لایه در اصطکاک ۰،۲۲، نیز در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ آورده شده است. با پیشروی پرتابه در لایه‌ها تنش در گوشه‌های ناحیه تماس با الیاف افزایش می‌کند. زمان طول کشیده شده برای پاره شدن هر کدام از لایه‌ها در اصطکاک‌های مختلف متفاوت است و همچنین آخرین نخ که در هر دو لایه پاره می‌شود نخ مرکزی می‌باشد.



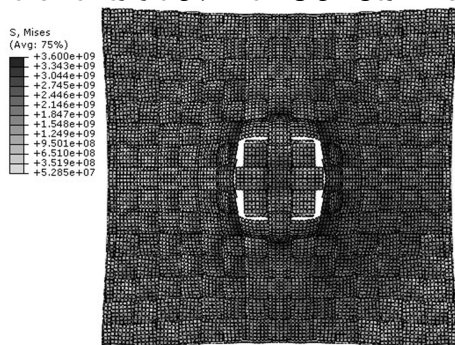
شکل ۲۰- توزیع تنش نخ تار را در ۴  $\mu$ s پس از برخورد



شکل ۲۳- توزیع تنش نخ‌ها در ۵  $\mu$ s پس از برخورد در مدل دو لایه



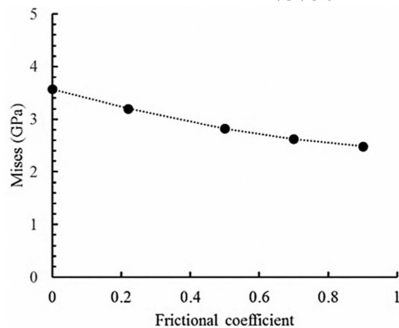
شکل ۲۱- توزیع تنش نخ تار در ۵  $\mu$ s پس از برخورد



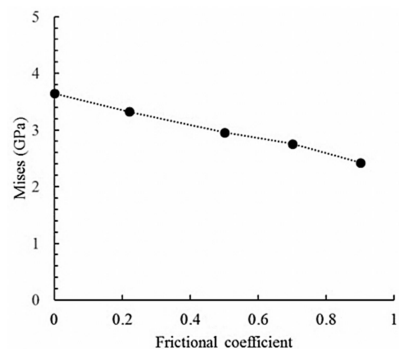
شکل ۲۴- توزیع تنش نخ‌ها در ۷  $\mu$ s پس از برخورد در پاتل دو لایه



برخلاف آنچه در حالت یک لایه مشاهده می‌شود در مدل‌های چند لایه با افزایش ضریب اصطکاک، تنش در نخ‌های اولیه کاهش می‌یابد؛ در نتیجه زمان رسیدن تنش، به تنش شکست افزایش یافته و افزایش جذب انرژی به همراه افزایش زمان شکست اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل‌های ۲۷ و ۲۸، نتایج بیان می‌کند پارچه‌های دو لایه با ضرایب اصطکاک ۰ و ۰٫۲۲ در ضربه بالستیک به دلیل داشتن تنش بیشتر به نسبت دیگر ضرایب اصطکاک، زودتر به شکست می‌رسند، بدین صورت که در این حالت الیاف در زمان ۸۵μs به شکست می‌رسند و در ضرایب اصطکاک بالای ۰٫۲۲ زمان شکست ۱۱۵μs است. زمان شکست در مدل سه لایه نیز برای ضرایب اصطکاک ۰ و ۰٫۲۲، ۱۴۵μs و برای دیگر ضرایب ۱۶۵μs می‌باشد. با توجه به اینکه تنش ایجاد شده درون پارچه در مجاورت نقطه برخورد نسبت به نقاط دورتر دارای مقدار بیشتری است، نخ‌های مجاور به محل برخورد به نسبت نخ‌های دورتر زودتر به شکست می‌رسند. هر چه اصطکاک بین نخ‌ها بیشتر باشد لایه‌های زیرین فرصت بیشتری برای پخش تنش و افزایش ناحیه انحراف عرضی دارند که موجب افزایش جذب انرژی در آن‌ها می‌شود. به همین علت است که در مدل المان محدود برای لایه‌های نزدیک به محل ضربه و در مجاورت لبه پرتابه، نسبت به لایه‌های زیرین تمایل به شکست بیشتری مشاهده می‌شود. دلیل این امر تمرکز تنش با سرعت بیشتر بر روی لایه‌های جلوتر پارچه است.

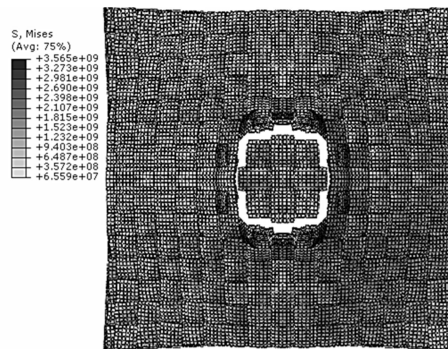


شکل ۲۷- تنش اولیه پایینی‌ترین لایه زیر پرتابه در زمان ۸ μs پس از برخورد در پانل دو لایه



شکل ۲۸- تنش اولیه پایینی‌ترین لایه زیر پرتابه در زمان ۱۴ μs پس از برخورد در پانل سه لایه

با توجه به اینکه پرتابه در تماس مستقیم با لایه‌های پایینی قرار ندارد و تنش از طریق پارچه منتقل می‌شود این امر موجب افزایش زمان شکست لایه‌های زیرین به نسبت لایه‌های بالایی خواهد شد.

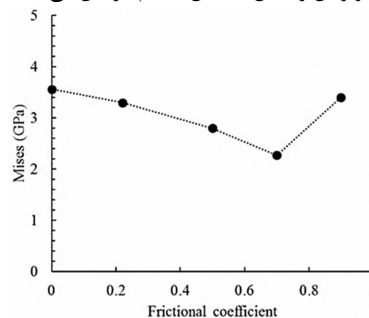


شکل ۲۵- توزیع تنش نخ‌ها در ۱۰ μs پس از برخورد در پانل دو لایه

### ۴-۳-۲- توزیع تنش‌ها در طول نخ

میزان تنش در طول نخ‌ها با تغییر موقعیت عوض می‌شود. تنش در نخ‌های اولیه که زیر پرتابه قرار گرفته‌اند پس از برخورد افزایش می‌یابد. با دور شدن از ناحیه مرکز محل برخورد، تنش‌ها افزایش چشمگیری خواهند داشت. همچنین بیشترین مقدار تنش در گوشه‌ی دایره برخورد درون ناحیه انحراف عرضی که همان سطح مقطع پرتابه می‌باشد (حدود ۲٫۸ میلی‌متر) اتفاق می‌افتد.

شکل ۲۶، بیشترین مقدار تنش نخ‌های اولیه زیر پرتابه در مدل تک لایه را بر حسب ضرایب اصطکاک در ۴μs بعد از برخورد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در مدل تک‌لایه وقتی که ضرایب اصطکاک از ۰ تا ۰٫۷ تغییر می‌کند تنش گوشه‌های ناحیه تماس کاهش می‌یابد و با فرض ضریب اصطکاک بالاتر از ۰٫۷، تنش گوشه‌های ناحیه تماس افزایش پیدا می‌کنند. در نتیجه جذب انرژی توسط الیاف وقتی که ضریب اصطکاک به سمت ۰٫۷ می‌رود افزایش پیدا کرده و وقتی که ضریب اصطکاک بالاتر از ۰٫۷ باشد کاهش می‌یابد. نتایج بیانگر این است که در پارچه تک لایه با ضرایب اصطکاک ۰ و ۰٫۹ به دلیل داشتن تنش بیشتر به نسبت دیگر ضرایب، زودتر از دیگر ضرایب به شکست می‌رسند (در زمان ۴۵μs) و بعد از ۲۵μs دیگر الیاف با ضرایب اصطکاک درگیری پرتابه و الیاف بیشتر باشد انرژی بیشتری توسط الیاف جذب خواهد شد و زمان رسیدن به تنش تسلیم افزایش می‌یابد.



شکل ۲۶- تنش در لبه سطح تماس در زمان ۴ μs پس از برخورد در مدل تک لایه

شکل‌های ۲۷ و ۲۸، بیشترین مقدار تنش نخ‌های اولیه پایینی‌ترین لایه زیر پرتابه، به ترتیب در مدل دو و سه لایه را بر حسب ضرایب اصطکاک در زمان‌های ۸μs و ۱۴μs بعد از برخورد نشان می‌دهند.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با تاکید بر مطالعه عددی عملکرد بالستیک الیاف بافته شده چند لایه با استحکام بالا، تاثیر اصطکاک بین الیاف تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا بررسی شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که اصطکاک بین الیاف به طور چشمگیری بر روی عملکرد ضربه بالستیک تاثیرگذار است. تغییر اصطکاک بین الیاف تاثیر قابل توجهی بر روی توزیع تنش دارد. وقتی که مقدار اصطکاک بین نخ‌ها زیاد باشد تنش در گوشه ناحیه تماس با پرتابه کاهش یافته و الیاف برای رسیدن به شکست به زمان طولانی‌تری احتیاج دارند.

اصطکاک بین الیاف اثر قابل توجهی بر روی سرعت موج عرضی دارد. اصطکاک بالای بین الیاف، روی افزایش سرعت امواج عرضی تاثیرگذار است که متکی به تغییر پارامترهایی مانند عمق و عرض مکان ضربه در الیاف است. در بررسی‌ها مشخص شد اصطکاک بین الیاف هیچگونه تاثیری بر عمق ایجاد شده توسط پرتابه در اصطکاک‌های متفاوت پارچه با تعداد لایه مختلف ندارد. این در حالی است که وقتی اصطکاک بین الیاف زیاد باشد انحراف عرضی در محل ضربه بطور چشمگیری زیاد شده و این افزایش باعث جذب انرژی بیشتر در الیاف و در نتیجه بهبود عملکرد بالستیک آن خواهد شد. با افزایش ضربه اصطکاک بین الیاف سرعت موج طولی کاهش یافته است که موجب کاهش نواحی قابل دسترس آن خواهد شد که یک تاثیر منفی بر روی عملکرد بالستیک آن می‌گذارد.

## ۶- مراجع

- [10] Kirkwood K. M., Kirkwood J. E., Lee Y. S., Egres Jr R. G., Wagner N. J., Wetzel E. D., Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric. Part I: quasi-static characterization of yarn pull-out, *Textile Research Journal*, Vol. 74, No. 10, pp. 920-8, 2004.
- [11] Kirkwood J. E., Kirkwood K. M., Lee Y. S., Egres Jr R. G., Wagner N. J., Wetzel E. D., Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric. Part II: predicting ballistic performance. *Textile Research Journal*, Vol. 74, No. 11, pp. 939-48, 2004.
- [12] Duan Y., Keefe M., Bogetti T. A., Cheeseman B. A., Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric. *Composite Structures*, Vol. 68, No. 3, pp. 331-7, 2005.
- [13] Duan Y., Keefe M., Bogetti T. A., Cheeseman B. A., Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 996-1012, 2005.
- [14] Zeng X. S., Tan V. B. C., Shim V. P. W., Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 66, No. 8, pp. 1309-30, 2006.
- [15] Khodadadi A., Liaghat G. H., Akbari M., Tahmasebi M., Numerical and experimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 124-33, 2013.
- [16] Mehrabani Yeganeh E., Liaghat Gh., Pol M. H., Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 309-18, 2014.
- [17] Yang Y., Chen X., Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact, *Textile Research Journal*, Vol. 87, No. 20, pp. 1-12, 2017.
- [18] Hedayatian M., Liaghat Gh., Rahimi Gh., Pol M. H., Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014.
- [19] Hashin Z., Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, No. 2, pp. 329-334, 1980.
- [20] Wang Y., Chen X., Young R., Kinloch I., Garry W., An experimental study of ply orientations on ballistic impact resistance in multiply fabric panels, *Textile Research Journal*, Vol. 86, No. 1, pp. 34-43, 2016.
- [21] Wang Y., Chen X., Young R., A numerical and experimental analysis of the influence of crimp on ballistic impact response of woven fabrics, *Composite Structures*, Vol. 140, pp. 44-52, 2016.
- [22] Lim C. T., Shim V. P. W., Ng Y. H., Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp. 13-31, 2003.
- [23] ABAQUS User Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, RI, USA, 2016.
- [1] Pirmohammadi N., Liaghat Gh., Pol M. H., Sabouri H., Analytical experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 153-64, 2014.
- [2] Alavi Nia A., Zolfaghari M., Khodarahmi H., Nili M., Ghobankhani A. H., High velocity penetration analysis of eroding projectile into semi-infinite concrete target, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 70-82, 2014.
- [3] Cheeseman B. A., Bogetti T. A., Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 61, pp. 161-73, 2003.
- [4] Babaei H., Jamali A., Mirzababaei Mostofi T., Ashraf Talehs S. H., Experimental Study and Mathematical Modeling of Deformation of Rectangular Plates under Impact Load, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 6, pp. 143-52, 2017.
- [5] Tahmasebiabdar M., Liaghat Gh., Shanazari H., Khodadadi A., Hadavinia H., Aboutorabi A., Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 353-59, 2015.
- [6] Briscoe B. J., Motamedi F., The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction. *Wear*, Vol. 158, No. 1-2, pp. 229-47, 1992.
- [7] Lee B. L., Walsh T. F., Won S. T., Patts H. M., Penetration failure mechanisms of armour-grade fibre composites under impact. *Journal of Composite Materials*, Vol. 35, pp. 1605-32, 2001.
- [8] Rebouillat S., Tribological properties of woven para-aramid fabrics and their constituent yarns, *Journal of Materials Science*, Vol. 33, pp. 3293-301, 1998.
- [9] Ha-Minh C., Boussu F., Kanit T., Crépin D., Imad A., Effect of frictions on the ballistic performance of a 3D warp interlock fabric: numerical analysis, *Applied Composite Materials*, Vol. 19, pp. 333-47, 2012.