



تحلیل عددی و تجربی نفوذ در پارچه‌های کولار و بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیک آنها

امین خدادادی^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، محمدعلی اکبری^۳، مهدی طهماسبی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* صندوق پستی ۱۴۱-۱۴۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله، عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیک پارچه‌های مورد استفاده در زره‌ها شامل خواص ماده، هندسه پرتابه، شرایط مرزی، ابعاد پارچه، تعداد لایه‌های پارچه و اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است. حد بالستیک به عنوان معیاری از عملکرد بالستیک پارچه و به منظور شناخت و مقایسه اثر عوامل مذکور بدست آمد. برای بدست آوردن حد بالستیک، آزمایش‌های بالستیک بر روی پارچه صورت گرفت. همچنین یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا ایجاد گردید که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها تطابق قابل قبولی را بین تحلیل عددی و تجربی نشان می‌دهد. به دلیل محدودیت‌های موجود در انجام آزمایش‌های تجربی، بسیاری از عوامل مؤثر بر عملکرد زره‌ها را با استفاده از این مدل می‌توان ارزیابی کرد.

کلید واژگان: تحلیل عددی، ضربه، حد بالستیک.

Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance

A. Khodadadi¹, Gh. Liaghat^{2*}, M. Akbari³, M. Tahmasebi⁴

1- MSc student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- Phd student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
4- MSc student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran. ghlia530@modares.ac.ir

Abstract- In this study, factors affecting ballistic performance of fabrics used, including material properties, projectile geometry, boundary conditions, fabric dimensions, multiple plies of fabric armors and friction, has been studied. Ballistic limit was obtained as a criterion of ballistic performance of fabric to identify and compare the effect of the mentioned factor. To obtain the ballistic limit, ballistic tests were performed on the fabric. Also, a finite element model was created using LS-DYNA software and the results of the the simulation of this model show an acceptable agreement between the experimental and numerical analysis. Due to limitation in experimental tests, many of factors affecting performance of armors can be evaluated using this model.

Keywords: Numerical Simulation, Impact, Ballistic Limit.

۱- مقدمه

توسعه در سیستم مواد سبک بافته شده برای مقابله در برابر نفوذ گلوله با سرعت‌های بالا، موضوع تحقیقات بسیاری از محققین در سال‌های اخیر بوده است. این پارچه‌های بافته شده یک عنصر کلیدی برای حفاظت جان انسان‌ها در جنگ‌ها و میادین نبرد می‌باشد. از آنجا که هدف از ساخت زره، جلوگیری از نفوذ گلوله بوده و این عمل با جذب انرژی گلوله بوسیله مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی که در لایه‌های زره اتفاق می‌افتد، انجام می‌گیرد، لذا افزایش انرژی جذب شده توسط این مکانیزم‌ها با شناخت دقیق آنها باعث افزایش کارایی بالستیکی زره می‌شود.

در زمینه ضربه روی کولار تاکنون کارهای متعددی انجام شده است. تعدادی از کارها در زمینه تحلیلی بوده است [۱-۳]. در این کارها، مدل‌های تحلیلی ارائه شده که رفتار پارچه کولار را در برابر ضربه پیش‌بینی می‌کند. همچنین کارهای زیادی در زمینه آزمایش‌های تجربی نیز انجام گرفته است [۴-۶]. هدف از کارهای تجربی، بررسی رفتار پارچه تحت ضربه و عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیکی پارچه می‌باشد. در زمینه کارهای عددی، سامانتا و داتا رفتار پارچه کولار را تحت ضربه مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ ارائه نمودند [۷]. همچنین مدل‌های المان محدود دیگری نیز با استفاده از نرم‌افزار اتوداین^۲ ارائه شده است [۸]. شبیه‌سازی‌های متعددی در این زمینه با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین^۳ انجام شده است [۹-۱۱]. راجان و همکارانش پارچه را بصورت صفحه‌ای همگن و یکنواخت در نظر گرفتند. در این مدل‌سازی تار و پود بصورت مستقل مدل نشده‌اند [۱۲]. به منظور بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد پارچه نیز تاکنون کارهای متعددی انجام شده است [۱۳، ۱۴].

در این مقاله، یک سری آزمایش‌های تجربی به منظور بدست آوردن حد بالستیک انجام شده است. همچنین یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین ایجاد گردید و عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیکی پارچه‌های مورد استفاده در زره‌ها شامل خواص ماده، هندسه پرتابه، شرایط مرزی، ابعاد پارچه، تعداد لایه‌های پارچه و اصطکاک مورد بررسی قرار

1. ABAQUS
2. AUTODYN
3. LS-DYNA

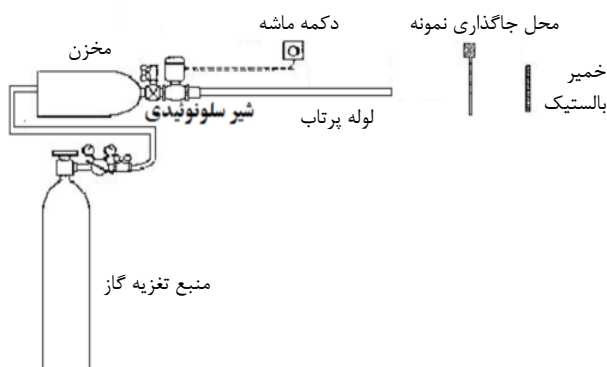
گرفته است.

۲- آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌های بالستیک از تفنگ گازی استفاده شد. تنظیم سرعت اولیه پرتابه (سرعت قبل برخورد) با استفاده از تنظیم فشار مخزن گاز می‌باشد؛ به این صورت که با شلیک در فشارهای مختلف، سرعت‌های متناظر با آن فشارها بدست می‌آید. نکته قابل توجه این است که نمایشگر مخزن دارای دقت ۱ bar است، بنابراین شلیک‌ها نیز با این فاصله فشار انجام می‌شود. بر همین اساس شلیک در فشارهای مختلف با فاصله ۱ bar انجام می‌شود تا در فشار بالاتر قطعه سوراخ شده و در فشار پایین‌تر سوراخ نشود. در این حالت، میانگین سرعت‌های متناظر با این دو فشار به عنوان حد بالستیک در نظر گرفته می‌شود. در مواردی نیز حالات خاصی دیده می‌شود، مثلاً پرتابه‌ای پس از نفوذ کامل منحرف شده و در جلو فیکسچر به زمین می‌افتد یا قطعه سوراخ شده اما از آن عبور نکرده است. این حالات نیز به عنوان حد بالستیک در نظر گرفته می‌شود.

به منظور اطمینان از نتایج، هر آزمایش با سرعت شلیک پرتابه خاص، سه مرتبه تکرار و میانگین سه سرعت حاصل از آزمایش‌ها به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شد. در شکل ۱ شماتیک یک تفنگ گازی ارائه شده است. همچنین شکل‌های ۲ و ۳ دستگاه تفنگ گازی و فیکسچر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

پارچه مورد استفاده در این تحقیق، دارای بافت ساده بوده و ابعاد آن ۷×۷ cm می‌باشد. مشخصات پارچه مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ شماتیک دستگاه تفنگ گازی

و یا در یک تعریف دیگر، بیشترین سرعتی است که پارچه را سوراخ نمی‌کند. در آزمایش‌های انجام شده حد بالستیک و انرژی جذب شده گلوله توسط پارچه، به عنوان معیاری از عملکرد بالستیکی پارچه بدست آمد. برای محاسبه حداقل انرژی مورد نیاز برای سوراخ کردن پارچه، باید انرژی گلوله قبل از برخورد را از مقدار انرژی ضربه بعد از برخورد کسر نمود. بنابراین خواهیم داشت:

$$V_0^2 = 1/2(m)(v_0^2)$$

سرعت شلیک گلوله $V_0 =$

$$V^2 = 1/2(m)(v^2)$$

سرعت باقیمانده $V =$

$$1/2(m)(v^2 - v_0^2) = 1/2(m)(v^2)$$

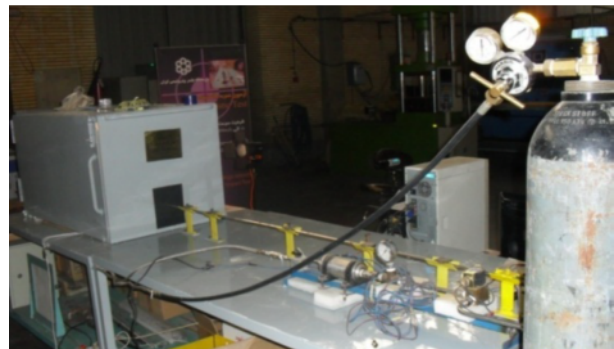
سوراخ کردن نمونه

با انجام آزمایش‌های بالستیک بر روی نمونه‌های دولایه کولار، حد بالستیک بدست آمد که این مقدار برای گلوله کروی و سرتخت به ترتیب 36 و 20 می‌باشد و همان طور که مشاهده می‌شود، حد بالستیک برای گلوله سرکروی بالاتر از گلوله سرتخت می‌باشد. حداقل انرژی برای سوراخ کردن پارچه دو لایه توسط پرتابه سرکروی J $7/645$ و برای پرتابه سرتخت J $2/36$ می‌باشد. همین طور در یک سری آزمایش دیگر، تعداد لایه‌ها و اثر افزایش آن بر حد بالستیک مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها از پرتابه سرکروی استفاده شد. مقادیر حد بالستیک بدست آمده برای پارچه دولایه برابر 36 m/s و برای پارچه چهار لایه 46 m/s می‌باشد. حداقل انرژی برای سوراخ کردن پارچه چهار لایه توسط پرتابه سرکروی J $12/48$ می‌باشد. عوامل زیادی در فرایند 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 و کرنش شکست بالای الیاف کولار نیز تأثیر زیادی در عملکرد مناسب زره‌های ساخته شده از این نوع الیاف دارد.

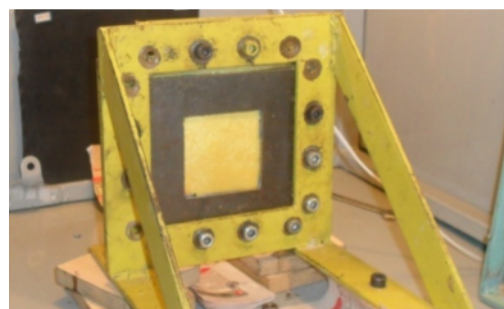
۳- تحلیل عددی

از آنجا که تعداد متغیرهای موجود در عملکرد بالستیکی پارچه زیاد است و انجام آزمایش‌های بالستیک نیاز به هزینه و زمان

برای انجام آزمایش‌های بالستیک از دو نوع پرتابه سرکروی و سرتخت استفاده شده است. از آنجا که لوله تفنگ گازی دارای شعاع داخلی $8/74$ mm می‌باشد و پرتابه در آن قرار می‌گیرد، بنابراین پرتابه نیز با همان شعاع و به شکل استوانه‌ای ساخته شده است. مشخصات پرتابه در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲ دستگاه تفنگ گازی



شکل ۳ دستگاه تفنگ گازی و فیکسچر مورد استفاده

جدول ۱ مشخصات پارچه

نوع بافت	ساده
وزن در واحد سطح	220 gr/m^2
ضخامت	$0/37 \text{ mm}$
تعداد نخ در 1 سانتی‌متر از پارچه	$6/5$

جدول ۲ مشخصات پرتابه

جنس پرتابه	فولاد آلیاژی 4330
جرم پرتابه	$11/18 \text{ gr}$
قطر سر پرتابه	$8/74 \text{ mm}$

۱-۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیک

حد بالستیک کمترین سرعتی است که پارچه را سوراخ می‌کند

المان‌های جامد^۲ برای تار و پود پارچه و همین طور برای پرتابه استفاده شده است. کولار دارای رفتار تنش- کرنش خطی می‌باشد بنابراین از مدل ماده الاستیک برای نخ و همچنین برای پرتابه از مدل ماده صلب استفاده شده است.

در این تحلیل دو نوع تماس وجود دارد. یک تماس بین گلوله و الیاف و دیگری تماس بین تار و پود می‌باشد. عمومی‌ترین روش برای تعریف نوع تماس اتوماتیک^۳ می‌باشد. در کنار این نوع تماس، تماس فرسایشی^۴ نیز وجود دارد. مشکلی که تماس اتوماتیک برای المان‌های جامد دارد این است که پرتابه از هدف عبور می‌کند ولی المان‌هایی که به تنش و کرنش نهایی می‌رسند از تحلیل حذف نمی‌شوند. اما با استفاده از تماس فرسایشی این مشکل حل می‌شود. در ضربه گلوله روی یک لایه پارچه، تماس بین گلوله و مجموعه تار و پود پارچه به صورت تماس سه‌بعدی از نوع تماس فرسایشی تعریف شده است؛ که دلیل انتخاب این نوع تماس نفوذ پرتابه درون هدف و حذف المان‌های تار و پود حذف می‌باشد. تماس بین تار و پود پارچه نیز به دلیل عدم نفوذ آن‌ها در یکدیگر به صورت تماس فرسایشی تعریف شده است. به هنگام تعریف تماس بین پرتابه و تار و پود، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی نیز تعریف می‌شوند. این ضرایب به ترتیب برابر ۰/۲۲ و ۰/۲ مقدار دهی می‌شوند.

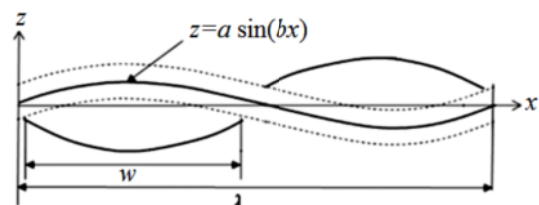
از آنجا که در کارهای تحلیلی نیاز به داشتن خصوصیات نخ وجود داشت، آزمایش کشش بر روی یک نخ پارچه انجام شد. در این آزمایش‌ها از استاندارد d2256-97 استفاده شد. طول اولیه نخ که بین فک‌های دستگاه کشش قرار می‌گیرد، برابر ۵۰ cm بوده و فک‌ها با سرعت ثابت ۲/۱۲ mm/s از همدیگر دور می‌شوند.

در جدول ۴ مشخصات مکانیکی نخ پارچه به دست آمده از آزمایش کشش، ارائه شده است. در جدول ۵ مشخصات مکانیکی چند الیاف آورده شده است.

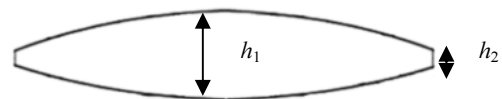
جدول ۴ مشخصات مکانیکی نخ کولار

ضریب پواسون	کرنش نهایی	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (GPa)
۰/۲۵	۰/۰۴	۷۰	۲/۳

زیادی دارد، بنابراین انجام آن‌ها دارای محدودیت‌های زیادی است. به عنوان مثال زمانی که هدف بدست آوردن حد بالستیک است انجام آزمایش‌های مکرر با سعی و خطا، اجتناب‌ناپذیر است. با پیشرفت نرم‌افزارهای تحلیل عددی، استفاده از آنها باعث کاهش هزینه و زمان گردیده و نتایج قابل قبول و مطمئنی حاصل خواهد شد. بنابراین به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد بالستیکی پارچه، یک مدل المان محدود ایجاد شد. به این منظور برای طراحی تار و پود پارچه و پرتابه از نرم‌افزار کتیا^۱ استفاده شده است. در این نرم‌افزار تار و پود پارچه بصورت مجزا در محیط طراحی نرم‌افزار مدل می‌شوند. منحنی هادی تار و پود و سطح مقطع پروفیل آنها در شکل ۴- الف و ۴- ب نشان داده شده است. ابعاد تار و پود نیز در جدول ۳ آورده شده است. تار و پود به گونه‌ای در هم تنیده می‌شوند که ساختار پارچه را به خوبی نمایش دهند. در مرحله بعد گلوله را که به شکل استوانه سر کروی و سرتخت طراحی شده، وارد محیط مونتاژ می‌شود و در فاصله معینی از پارچه قرار می‌گیرد.



(الف)



(ب)

شکل ۴ الف- منحنی هادی تار و پود ب- سطح مقطع تار و پود

جدول ۳ مقادیر مربوط به منحنی هادی و سطح مقطع تار و پود

λ	W	a	b	h_1	h_2
۵	۲	۰/۵	۱/۲۶	۰/۳۳۷	۰/۰۷۸

پس از مدل‌سازی تار و پود، گلوله و پارچه مش‌بندی شده و وارد نرم‌افزار ال‌اس‌داینما می‌شوند. در این مدل‌سازی، از

1. CATIA

2. Solid Element

3. Contact Automatic Surface to Surface

4. Contact Eroding Surface to Surface

در این قسمت نتایج ضربه پرتابه سرکروی و سرتخت بر روی پارچه یک لایه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۵، شبیه‌سازی ضربه روی پارچه تک‌لایه تحت ضربه پرتابه سرکروی و شکل ۶ نیز شبیه‌سازی ضربه روی پارچه تک‌لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت نشان داده شده است.

جدول ۵ مشخصات مکانیکی چند الیاف

الیاف	مقاومت (MPa)	مدول (GPa)	چگالی (g/cm^3)
E-glass	۲۰۰۰	۸۱/۸	۲/۶۲
S-glass	۴۵۸۵	۸۸/۹	۲/۵
kevlar	۲۳۰۰	۷۰	۱/۴۴

۳-۱- صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. شرایط مدل کاملاً منطبق بر آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در تحلیل‌های عددی برای بدست آوردن حد بالستیک، شبیه‌سازی‌های ضربه بر روی پارچه تا جایی انجام می‌شود که نفوذ کامل در پارچه اتفاق بیفتد و پارچه سوراخ شود و همچنین سرعت خروجی پرتابه نیز به صفر رسیده و پرتابه پس از برخورد متوقف شد.

در جدول ۶ مقادیر حد بالستیک بدست آمده از تحلیل عددی و تجربی ارائه و با هم مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد و مدل مورد نظر قابل اطمینان خواهد بود.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی عملکرد پارچه کولار تحت ضربه، آزمایش‌های بالستیکی بر روی پارچه با استفاده از تفنگ گازی انجام شد که در این آزمایش‌ها اثر هندسه پرتابه و تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل محدودیت‌های آزمایش‌های تجربی از جمله تهیه مواد، هزینه بالای آزمایش‌های تجربی و همچنین محدودیت‌های زمانی، از یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی ضربه بر روی پارچه استفاده شده است. این مدل با نتایج آزمایش‌های تجربی مطابقت خوبی داشته و لذا می‌تواند جهت بررسی فرایند نفوذ در پارچه مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیکی یک پارچه کولار با استفاده از این مدل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- هندسه پرتابه

به منظور بررسی و فهم اثر هندسه پرتابه بر عملکرد بالستیکی

جدول ۶ حد بالستیک بدست آمده از روش تجربی و عددی

درصد خطا	حد بالستیک آزمایش‌های تجربی (m/s)	حد بالستیک شبیه‌سازی (m/s)	پارچه دو لایه تحت ضربه پرتابه سرکروی
۸	۳۶	۳۹	پارچه دو لایه تحت ضربه پرتابه سرکروی
۲۰	۲۰	۲۴	پارچه دو لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت
۱۳	۴۶	۵۲	پارچه چهارلایه تحت ضربه پرتابه سرکروی

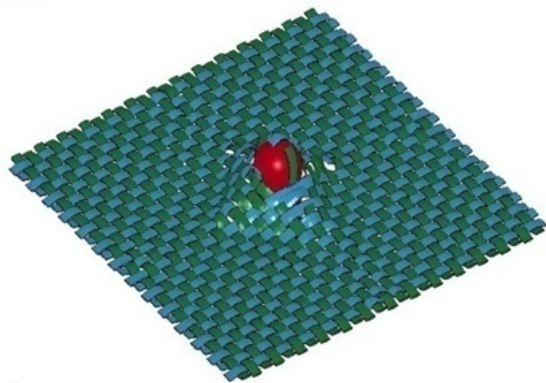


شکل ۵ شبیه‌سازی ضربه روی پارچه تک‌لایه با پرتابه سرکروی دارای سرعت اولیه ۲۲ m/s



شکل ۶ شبیه‌سازی ضربه روی پارچه تک‌لایه با پرتابه سرتخت دارای سرعت اولیه ۱۶ m/s

یکی از مهم‌ترین عواملی که در جذب انرژی گلوله سهم دارد، استحکام و تنش تسلیم بالای الیاف کولار است. زمانی که گلوله سرتخت به پارچه برخورد می‌کند، باعث کشیدگی در



شکل ۷ ضربه سرعت بالا روی پارچه دارای سرعت اولیه 400 m/s

به منظور بررسی اثرات شرایط مرزی بر عملکرد بالستیکی پارچه، شبیه‌سازی ضربه روی پارچه دو طرف درگیر و دو طرف آزاد مورد بررسی قرار خواهد گرفت و با نتایج حاصل از ضربه روی پارچه چهار طرف درگیر مقایسه خواهد شد.

حد بالستیک با استفاده از مدل المان محدود برای ضربه پرتابه سرتخت روی پارچه دوطرف درگیر 13 m/s و همان طور که در بخش قبلی بیان شد برای پارچه چهار طرف درگیر 16 m/s می‌باشد. حداقل انرژی برای سوراخ کردن پارچه دو طرف درگیر 0.98 J و برای پارچه چهار طرف درگیر 1.51 J می‌باشد. شکل ۸ شبیه‌سازی ضربه پرتابه سرتخت روی پارچه دوطرف درگیر را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نخ‌ها تحت ضربه از داخل پارچه کشیده می‌شود. یکی از مواردی که عمدتاً در تمامی موارد ضربه روی پارچه دو طرف درگیر مشاهده می‌شود این است که نخ در معرض ضربه از داخل پارچه کشیده می‌شود. امکان دارد این نخ بطور کامل از داخل پارچه کشیده شود و همراه پرتابه حرکت نماید یا پس از مقداری کشیدگی پاره شود. شکل ۹ نیز تغییرات سرعت پرتابه سرتخت با سرعت اولیه 60 m/s را پس از برخورد به پارچه دو طرف درگیر را نشان می‌دهد. سرعت پرتابه با برخورد به پارچه کاهش می‌یابد. نخ‌های درگیر مانع پیشروی پرتابه شده و باعث کاهش سرعت پرتابه می‌شوند. این کاهش سرعت تا زمان 0.3 ms ادامه پیدا می‌کند و در این زمان نخ‌هایی که در دو طرف درگیر شده‌اند پاره شده و روند کاهش سرعت تغییر می‌نماید. از این به بعد نخ‌هایی که در دو لبه آزادند و در معرض ضربه قرار گرفته‌اند با توجه به اصطکاک بین نخ‌ها از حرکت گلوله ممانعت می‌کنند. این روند تا زمان 0.53 ms ادامه داشته

نخ‌ها می‌شود. لبه‌های تیز پرتابه سرتخت، باعث می‌شود تنش برشی در نخ‌ها بوجود آید و این باعث می‌شود که نخ‌ها علاوه بر تنش کششی، تنش برشی نیز تحمل کنند که موجب زودتر پاره شدن نخ‌ها می‌شود.

زمانی که پارچه کولار تحت ضربه پرتابه کروی قرار می‌گیرد، تنش وارده به الیاف تنش کششی است و از آنجا که تنش تسلیم کولار بالاست، بنابراین انرژی زیادی از گلوله قبل از پاره شدن الیاف گرفته خواهد شد.

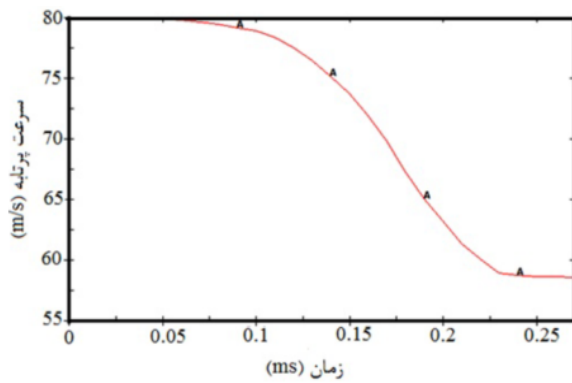
حد بالستیک با استفاده از مدل المان محدود برای پارچه تک‌لایه با پرتابه سرتخت 16 m/s و حد بالستیک برای پارچه تک‌لایه با پرتابه سرکروی 22 m/s بدست آمد. حداقل انرژی برای سوراخ کردن پارچه تک لایه توسط پرتابه سرتخت 1.51 J و برای پرتابه سرکروی 2.85 J می‌باشد.

پرتابه پس از برخورد با پارچه، دچار افت انرژی کمی می‌شود. با ادامه حرکت پرتابه، موج ضربه در تمام پارچه منتقل شده و تمام پارچه در برابر حرکت پرتابه مقاومت می‌کند و سرعت پرتابه با شدت بیشتری نسبت به قبل افت می‌کند. این مقاومت به ضربه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که نخ‌های در معرض ضربه پرتابه به تنش تسلیم خود برسند و پاره شوند.

همان طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده شد، در برخورد پرتابه با سرعت‌های پایین، موج ضربه ناشی از برخورد پرتابه ابتدا به مرزها رسیده و پس از آن نفوذ کامل رخ می‌دهد. با افزایش سرعت برخورد پرتابه (انرژی برخورد) زمان گسیختگی کامل پارچه و در نتیجه شعاع طی شده توسط موج برشی از نقطه برخورد پرتابه کاهش می‌یابد و در نتیجه اگر سرعت برخورد از حدی بیشتر شود قبل از آنکه موج به مرز برسد و شرایط مرزی در پاسخ پارچه سهیم شود گسیختگی کامل رخ داده و پرتابه خارج می‌شود. برای تحقیق این مسأله، شبیه‌سازی ضربه روی پارچه، با گلوله‌ای که سرعت اولیه آن 400 m/s انتخاب شده است، انجام می‌شود. این شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است و همان گونه که مشاهده می‌شود قبل از رسیدن موج به مرز پارچه، نفوذ کامل رخ می‌دهد.

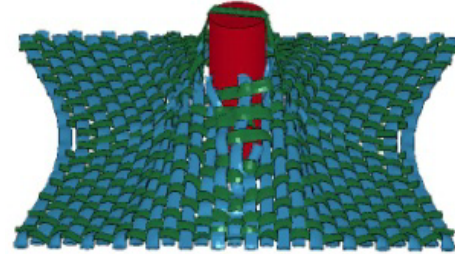
۴-۲- شرایط مرزی

در بخش قبلی، شبیه‌سازی ضربه روی پارچه‌ای انجام شد که در آن، درجات آزادی الیاف در لبه پارچه مهار و المان‌های لبه در تمامی جهات مقید شده‌اند.

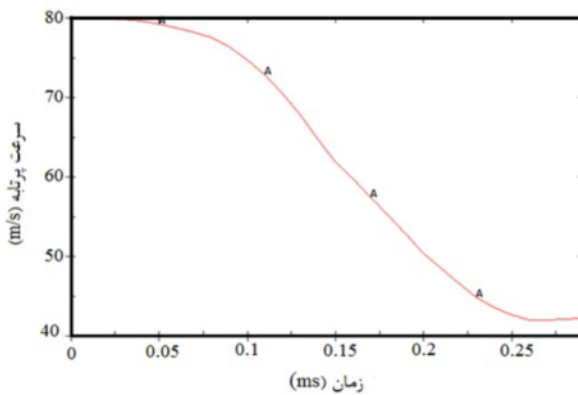


شکل ۱۰ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه دولایه

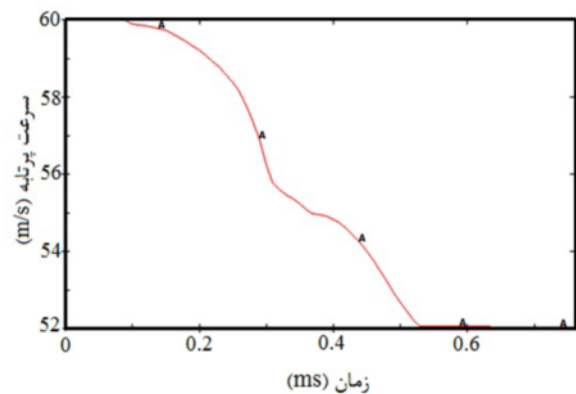
و پس از آن نخ‌هایی که از داخل پارچه کشیده شده‌اند نیز پاره شده و سرعت گلوله ثابت می‌شود.



شکل ۸ شبیه‌سازی ضربه روی پارچه دو طرف درگیر



شکل ۱۱ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه چهارلایه



شکل ۹ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه تک‌لایه دوطرف درگیر

می‌توان گفت با افزایش تعداد لایه‌ها، شیب نمودار کاهش سرعت پرتابه تندتر بوده و در مدت زمان کمتری سرعت آن کاهش می‌یابد که دلیل آن تأثیرگذاری لایه‌ها بر همدیگر می‌باشد. در واقع ضربه ناشی از گلوله توسط تمام لایه‌ها مهار می‌شود.

۴-۴- جنس نخ

یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی که نقش به‌سزایی در عملکرد پارچه‌های مورد استفاده در زره‌ها دارد، جنس نخ می‌باشد. استحکام یک نخ در متوقف کردن یک پرتابه بسیار اهمیت دارد. برای بررسی اهمیت استحکام پارچه‌ها، از دو مقدار متفاوت تنش تسلیم در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌هایی که در قسمت‌های پیش انجام شد به ازای تنش تسلیم برابر با 2300 MPa می‌باشد. در یک شبیه‌سازی دیگر، ضربه روی پارچه با تنش تسلیم 3450 MPa نشان داده شده است. در واقع تنش تسلیم $1/5$ برابر شده است.

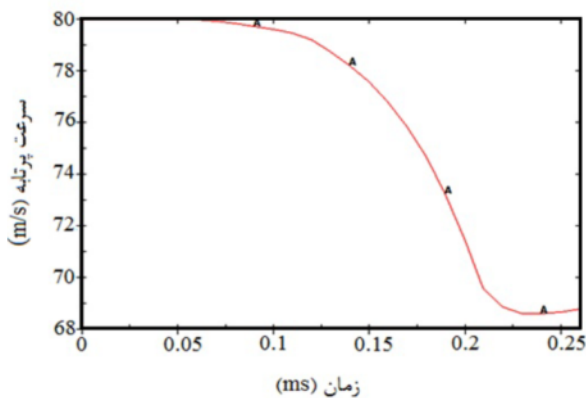
۳-۴- تعداد لایه‌ها

به منظور بررسی و شناخت اثر تعداد لایه‌ها بر عملکرد بالستیکی پارچه، در این قسمت شبیه‌سازی بر روی پارچه ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه انجام شد. پرتابه مورد استفاده در این شبیه‌سازی، پرتابه سرکروی بوده و پارچه در چهار طرف درگیر می‌باشد.

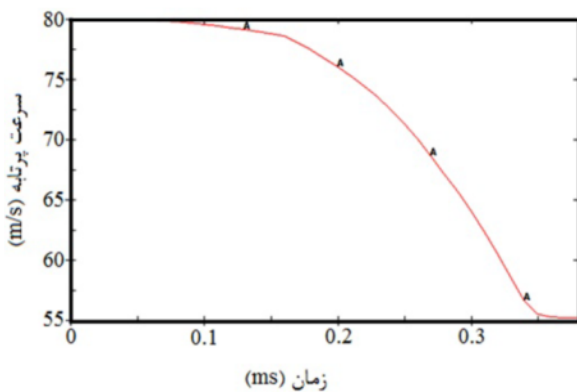
حد بالستیک با استفاده از مدل، برای پارچه ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه به ترتیب ۲۲، ۳۹، ۴۸ و 52 m/s می‌باشد. همچنین حداقل انرژی مورد نیاز برای پاره کردن پارچه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه به ترتیب $2/185$ ، $8/97$ ، $13/6$ و $15/95 \text{ J}$ می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به ازای سرعت اولیه پرتابه برابر 80 m/s برای پارچه دو و چهارلایه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ضربه پرتابه به پارچه دولایه، مدت زمان نفوذ کامل پرتابه در پارچه، $0/23 \text{ ms}$ و مدت زمان نفوذ پرتابه در پارچه چهارلایه $0/26 \text{ ms}$ خواهد بود.

در شکل ۱۳، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضربه پرتابه سرکروی بر روی پارچه با ابعاد ۷ cm و شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی روی پارچه با ابعاد ۱۴ cm نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، کاهش سرعت پرتابه در شکل ۱۳ که مربوط به پارچه با ابعاد ۷ cm می‌باشد، دارای شیب تندتری نسبت به پارچه با ابعاد ۱۴ cm می‌باشد. با برخورد پرتابه به پارچه با ابعاد کمتر، موج ضربه زودتر به لبه پارچه رسیده و در نتیجه خیز عرضی حداکثر پارچه در مدت زمان کمتر اتفاق افتاده و پارچه زودتر سوراخ می‌شود. این در حالی است که با افزایش ابعاد پارچه تعداد نخ‌های درگیر و مقاومت کننده در برابر ضربه بیشتر شده و همچنین پارچه توانایی جابجایی و خیز بیشتری با ضربه پرتابه داراست که این موارد باعث افزایش حد بالستیک در پارچه با ابعاد بالاتر می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه با ابعاد ۷ cm



شکل ۱۴ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه با ابعاد ۱۴ cm

۴-۶- اصطکاک

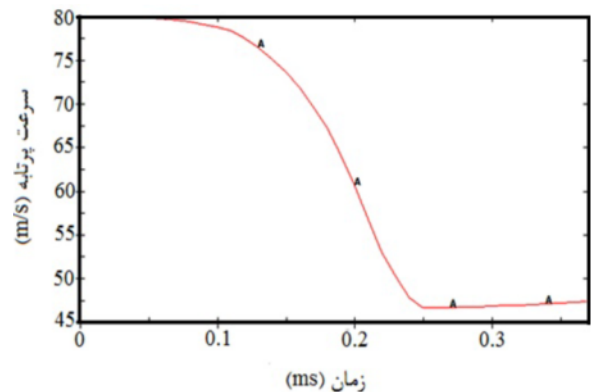
اصطکاک از جمله عواملی است که باعث بهبود عملکرد پارچه و

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد، افزایش تنش تسلیم نخ‌ها باعث می‌شود که پارگی نخ‌ها به تأخیر بیفتد. در شکل ۱۲، نمودار تغییر سرعت پرتابه سرکروی در برخورد با پارچه دولایه آورده شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۲ مشاهده می‌شود که پرتابه در برخورد با پارچه با پارچه با تنش تسلیم بالاتر، دارای سرعت باقی‌مانده کمتری خواهد بود. زمانی که پرتابه با سرعت ۸۰ m/s به پارچه با تنش تسلیم ۲۳۰۰ MPa برخورد می‌نماید، پارچه به این مقدار تنش حداکثری رسیده و پاره می‌شود. اما پارچه با تنش تسلیم ۳۴۵۰ MPa، در برابر ضربه مقاومت کرده و نخ‌ها پاره نمی‌شوند. از آنجا که نخ‌ها کاملاً کشیده شده و پارچه دیگر قادر به حرکت نیست و صرفاً تنش تسلیم بالای نخ‌ها باعث مقاومت در برابر ضربه است، بنابراین کاهش سرعت پرتابه شدت بیشتری می‌یابد. این مقاومت تا جایی ادامه دارد تا نخ‌ها به تنش تسلیم رسیده و پارچه سوراخ شود.

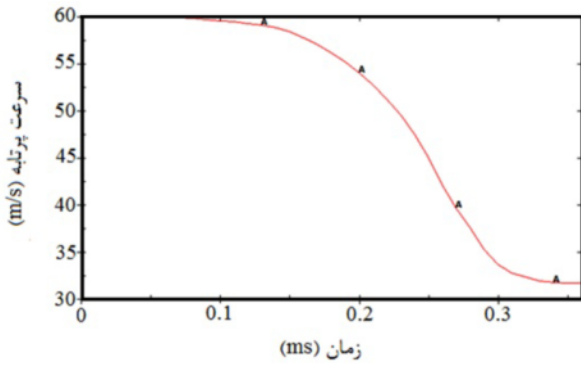
۴-۵- ابعاد پارچه

به منظور بررسی تأثیر ابعاد پارچه بر عملکرد بالستیکی آن، شبیه‌سازی بر روی پارچه یک لایه با ابعاد ۱۴×۱۴ cm انجام شد و نتایج حاصل از آن با نتایج ضربه روی پارچه یک لایه با ابعاد ۷×۷ cm مقایسه گردید.

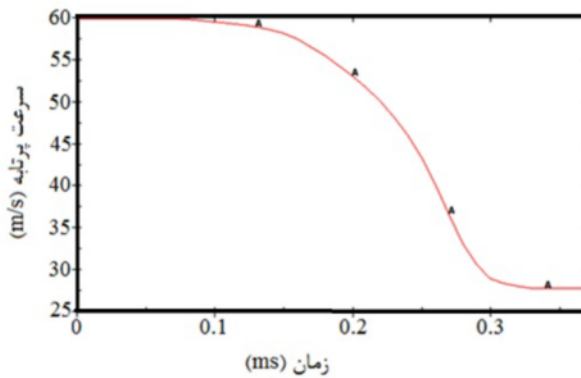
حد بالستیک برای پارچه دولایه با ابعاد ۱۴ cm، ۴۱ m/s می‌باشد که نسبت به پارچه دولایه با ابعاد ۷ cm که دارای حد بالستیک ۲۲ m/s می‌باشد، ۸۶ درصد افزایش در حد بالستیک را داراست. حداقل انرژی برای سوراخ کردن پارچه دو لایه توسط پرتابه سرکروی ۹/۹۲ J می‌باشد.



شکل ۱۲ نمودار سرعت پرتابه در برخورد با پارچه با تنش تسلیم ۳۴۵۰ MPa



شکل ۱۷ نمودار تغییرات سرعت پرتابه در برخورد با پارچه دولایه با ضریب اصطکاک $\mu=0.2$



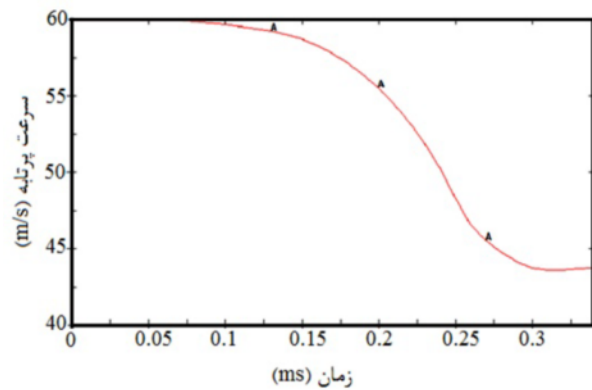
شکل ۱۸ نمودار تغییرات سرعت پرتابه در برخورد با پارچه دولایه با ضریب اصطکاک $\mu=1$

مقدار سرعت اولیه پرتابه در تمام شبیه‌سازی‌ها برابر 60 m/s می‌باشد. شکل ۱۵، نشان‌دهنده ضربه روی پارچه با ضریب اصطکاک $\mu=0$ بین تار و پود و همین‌طور بین پرتابه و پارچه می‌باشد. این ضریب در طول شبیه‌سازی ثابت می‌ماند. پس از گذشت 0.29 ms پارچه به‌طور کامل سوراخ شده و پرتابه با سرعت برابر $43/6 \text{ m/s}$ از پارچه خارج می‌شود. شکل ۱۶، نتایج حاصل از ضربه روی پارچه با ضرایب اصطکاک $\mu=0.075$ را نشان می‌دهد. سرعت خروجی پرتابه از پارچه برابر $35/2 \text{ m/s}$ می‌باشد. پرتابه پس از گذشت 0.33 ms بطور کامل پاره می‌شود. با افزایش اصطکاک بین لایه‌ها زمان پارگی پارچه افزایش می‌یابد. همین‌طور برای پارچه‌ها با ضرایب اصطکاک $\mu=0.2$ و $\mu=1$ سرعت خروجی پرتابه به ترتیب برابر $31/7 \text{ m/s}$ و $27/7 \text{ m/s}$ می‌باشد.

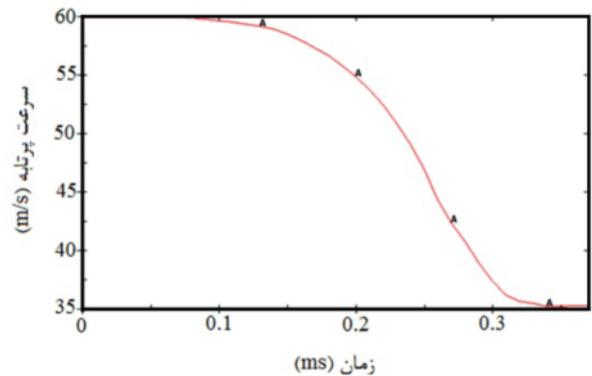
همان‌گونه که بیان شد با افزایش ضریب اصطکاک، سرعت خروجی گلوله کاهش پیدا می‌کند.

افزایش جذب انرژی توسط آن می‌شود. افزایش اصطکاک، باعث می‌شود که نخ‌ها بطور مؤثرتری درگیر شده و انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن نخ افزایش می‌یابد. در واقع پارگی پارچه به دلیل درگیری کامل‌تر تار و پود پارچه به تأخیر افتاده و سهم بیشتری در جذب انرژی گلوله خواهد داشت [۱۶، ۱۵].

به منظور بررسی اثر اصطکاک بر عملکرد پارچه، از مدل المان محدود استفاده شد. بدین منظور شبیه‌سازی ضربه بر روی پارچه با استفاده از ضرایب اصطکاک متغیر انجام شد. در شبیه‌سازی انجام شده، پرتابه با سرعت اولیه برابر 60 m/s به پارچه برخورد کرده و به‌ازای ضرایب اصطکاک متفاوت، سرعت خروجی بدست می‌آید که مبنایی برای بررسی عملکرد پارچه خواهد بود. شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نشان‌دهنده شبیه‌سازی ضربه روی پارچه با ضرایب اصطکاک متفاوت می‌باشد. این شکل‌ها نتایج حاصل از ضربه پرتابه بر روی پارچه با ضرایب اصطکاک متغیر می‌باشد.



شکل ۱۵ نمودار تغییرات سرعت پرتابه در برخورد با پارچه دولایه با ضریب اصطکاک $\mu=0$



شکل ۱۶ نمودار تغییرات سرعت پرتابه در برخورد با پارچه دولایه با ضریب اصطکاک $\mu=0.075$

۵- نتیجه‌گیری

در بحث عملکرد بالستیکی پارچه‌های کولار، عواملی چون هندسه پرتابه، شرایط مرزی، تعداد لایه‌ها، جنس نخ و ابعاد پارچه، نقش مهمی دارند. به منظور شناخت این عوامل شبیه‌سازی انجام شد که مقایسه نتایج آن و آزمایش‌های بالستیک، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها، حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده پرتابه، به عنوان معیاری از عملکرد پارچه مورد بررسی قرار گرفت.

عواملی چون هندسه پرتابه بر عملکرد پارچه تأثیرگذارند و پرتابه سرتخت به دلیل اعمال تنش برشی ناشی از لبه پرتابه سرتخت روی پارچه دارای حد بالستیک کمتری است. با افزایش تعداد لایه‌ها نیز حد بالستیک افزایش می‌یابد که این افزایش خطی نیست و دلیل آن نیز تأثیرگذاری لایه‌ها در جذب انرژی گلوله می‌باشد. جنس نخ و استفاده از پارچه با استحکام بالاتر باعث افزایش حد بالستیک، به واسطه افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌شود. پارچه با ابعاد بزرگتر دارای عملکرد مناسب‌تر و حد بالستیک بالاتر می‌باشد، زیرا با افزایش ابعاد پارچه تعداد نخ‌های درگیر و مقاومت کننده در برابر ضربه بیشتر شده و همچنین پارچه توانایی جابجایی و خیز بیشتری با ضربه پرتابه را داراست. همچنین هرچه اصطکاک بین تار و پود پارچه بالاتر باشد عملکرد بالستیکی پارچه بالاتر خواهد بود. افزایش اصطکاک، باعث می‌شود که نخ‌ها بطور مؤثرتری درگیر شده و انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن نخ افزایش یابد.

۶- مراجع

- [5] Pereira J.M., Revilock D.M., "Ballistic impact Response of Kevlar 49 and Zylon under Conditions Representing Jet Engine Fan Containment", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 22, No. 3, 2009, pp. 240-248.
- [6] Tan V.B.C., Lim. C.T., Cheong C. H., "Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, 2003, pp. 207-222.
- [7] Samanta S., Datta D., "Experimental and Numerical Simulation Based Kevlar Composite Specimens under Ballistic Impact", *Electronic Journal of Non Destructive Testing*, ISSN 1435-4934, Nov 2010.
- [8] Tham C.Y., Tan V.B.C., Lee H.P., "Ballistic impact of a Kevlar helmet: Experiment and simulations", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 304-318.
- [9] Barauskas R., Abraitiene A., "Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in Ls-Dyna", *International Journal of Impact Engineering*, Vol 34, 2007, pp. 1286-1305.
- [10] Nilakantan N., Keefe M., Bogetti. T.A., Adkinson R., Gillespie W., "On the finite element analysis of woven fabric impact using multiscale modeling techniques", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, 2010, pp. 2300-2315.
- [11] 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, 2005, pp. 996-1012.
- [12] Rajan S.D., Mobasher B., Vaidya A., "LS-DYNA Implemented Multi-Layer Fabric Material Model Development for Engine Fragment Mitigation", *11th International Ls-Dyna Users Conference*, 2010.
- [13] Zeng X.S., Shim V.P.W., Tan V.B.C., "Influence of boundary conditions on the ballistic performance of high-strength fabric targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, 2005, pp. 631-642.
- [14] Talebi H., Wong S.V., Hamouda A.M.S., "Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric", *Composite Structures*, Vol. 87, 2009, pp. 314-320.
- [15] Lee B.W., Gon C., "Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts", *Advanced Composite Materials*, Vol. 21, No. 2, April 2012, pp. 177-192.
- [16] Rao M.P., Duan Y., Keefe M., "Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric" *Composite Structures*, Vol. 89, 2009, pp. 556-566.
- [1] Resa H., Liaghat GH., *analysis of perforation of projectile into Kevlar and presenting a modified model*, MSc Thesis, Tarbiat Modares university, Tehran, 2002. (In Persian)
- [2] [2] Mamivand M., Liaghat GH., *modeling of perforation process onto fabric and comparison to experimental results*, MSc Thesis, Tarbiat Modares university, Tehran, 2006. (In Persian)
- [3] Mamivand M., Liaghat G.H. "A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 806-812, 2010.
- [4] Khodadadi A., Liaghat GH., *Experimental and numerical investigation of penetration into targets made of kevlar laminate with STF fluids*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian).