



شبیه سازی عددی پارچه پلی پروپیلن آغشته به سیال ضخیم شونده برشی و مقایسه با نتایج تجربی

حمیدرضا زارعی^{1*}، محمد رضایی²، سالم سویطی³

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* صندوق پستی 1384673411، zarei@ssau.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 آبان 1395

پذیرش: 01 بهمن 1395

ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

کلید واژگان:

پارچه بافته شده

سیال ضخیم شونده برشی

ضربه پرتابه

مطالعه عددی

چگالی پارچه

چکیده

اخیراً استفاده از سیال ضخیم شونده برشی جهت بهبود مقاومت به نفوذ پارچه ها در حال افزایش می باشد. در این پژوهش، ابتدا به بررسی های آزمایشگاهی روی عملکرد پارچه پلی پروپیلن خشک و آغشته به سیال ضخیم شونده تحت ضربه پرتابه کروی فولادی با قطر 8.7 میلی متر پرداخته می شود. سپس، عوامل مؤثر بر عملکرد پارچه، مانند چگالی، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی بین نخ ها و همچنین بین پرتابه و پارچه، شرایط مرزی و تعداد لایه های پارچه به کمک شبیه سازی در نرم افزار ال-اس-داینا بصورت عددی مطالعه می شود. در پژوهش های قبلی، بهبود عملکرد پارچه با افزایش سیال ضخیم شونده برشی، به افزایش اصطکاک بین نخ های پارچه نسبت داده شده است، با این وجود، بررسی انجام شده نشان می دهد، جرم سیال ضخیم شونده نیز در نتایج مؤثر است. جرم سیال ضخیم شونده متناسب با درصد جرمی اعمال شده، به صورت افزایش چگالی پارچه در نظر گرفته شده است. در بررسی آزمایشگاهی، مشاهده شد که با آغشتن 44 درصد جرمی سیال ضخیم شونده برشی به پارچه، استحکام و مقاومت به نفوذ در پارچه افزایش و تغییر شکل پارچه کمتر شده که نسبت به حالت پارچه خشک، نفوذ پرتابه به پارچه تا 63 درصد کاهش می یابد. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که اگر اثر سیال ضخیم شونده برشی فقط به افزایش اصطکاک نسبت داده شود، اختلاف نفوذ پرتابه در پارچه در دو حالت خشک و آغشته به سیال ضخیم شونده برشی به 43 درصد می رسد. اما با در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی علاوه بر اصطکاک، این مقدار به 58 درصد می رسد که با مقدار آزمایشگاهی 63 درصد همخوانی خوبی داشته و اهمیت در نظر گرفتن جرم سیال ضخیم شونده برشی در مدل سازی های عددی را نشان می دهد.

Numerical simulation of shear thickening fluid impregnated polypropylene fabric and compared with experimental results

Hamid Reza Zarei^{1*}, Mohammad Rezaei², Salem Suweyti³

1- Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1384673411 Tehran, Iran, zarei@ssau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 November 2016

Accepted 20 January 2017

Available Online 13 February 2017

Keywords:

Woven fabric

Shear thickening fluids

Projectile impact

Numerical study

Fabric density

ABSTRACT

Recently shear thickening fluids (STF) are applied more and more to improve the penetration resistance of fabrics. In this research, at first, the performance of the neat and STF impregnated fabric subjected to the impact of 8.7 mm diameter steel spherical projectile is investigated experimentally. Then, the numerical analysis is done to study the effective parameters such as fabric density, static and dynamic coefficients of friction between yarns and between projectile and fabric, boundary conditions and number of layers of fabric by using commercial tool LS-DYNA software. Previous studies expressed that the major factor that improves the energy absorption capacity of STF impregnated fabrics is the friction between the impact projectile, fabric, and yarns within the fabric, however, here the investigations showed that in addition to the friction, the mass of added STF is effective in the results. Increasing the mass of the fabric by adding STF is considered as the increasing density of the fabric. Empirical investigations showed that STF-impregnated fabrics exhibited a significant enhancement in penetration resistance performance as compared to neat fabric such that the projectile penetration subjected to the fabric with 44% wt STF decreased 63% compared to neat fabric. The simulation results showed that, if the STF effects were just assigned to increased friction, the projectile penetration decreased 43% compared to neat fabric. But if in addition to friction the mass of the STF is considered as the effective parameter, the penetration decreased 58% which has good agreement with experimental data. This indicates the importance of considering the mass of STF in numerical simulations.

Please cite this article using:

H. R. Zarei, M. Rezaei, S. Suweyti, Numerical simulation of shear thickening fluid impregnated polypropylene fabric and compared with experimental results, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 221-230, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. R. Zarei, M. Rezaei, S. Suweyti, Numerical simulation of shear thickening fluid impregnated polypropylene fabric and compared with experimental results, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 221-230, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

پارچه‌ها به عنوان زره نرم، در میدان نبرد برای محافظت جان سربازها نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. هدف از ساخت زره، جلوگیری از نفوذ و آسیب گلوله به بدن است و این عمل با جذب انرژی گلوله به وسیله مکانیسم‌های مختلف انرژی که در لایه‌های مختلف زره اتفاق می‌افتد صورت می‌گیرد. بنابراین با افزایش انرژی جذب شده به کمک پارچه‌ها و شناخت دقیق فیزیک حاکم می‌توان کارایی زره‌ها را افزایش و وزن آن‌ها را بهینه‌سازی کرد.

بررسی‌های زیادی در زمینه آزمایش‌های تجربی جهت بررسی رفتار پارچه تحت ضربه و عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیک پارچه انجام شده است. کاهش وزن و بهینه‌سازی زره‌های نرم، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. یکی از روش‌های کاهش تعداد لایه‌های زره‌های نرم، استفاده از لایه‌های آغشته به مایع ضخیم شونده برشی¹ در ترکیب زره می‌باشد. در دو دهه گذشته سیال ضخیم شونده برشی از لحاظ جذب انرژی، در کاربردهای بالستیک و زره‌های نرم مورد توجه زیادی واقع شده است. واگنر و همکاران از نخستین محققانی بودند که عملکرد بالستیک پارچه‌های چندلایه آغشته به سیال ضخیم شونده را بررسی کردند. ایشان کارایی قابل توجه آغشتن سیال ضخیم شوند برشی به پارچه‌ها در جلوگیری از نفوذ اشیاء تیز به پارچه‌ها را نشان دادند [1].

یکی از اولین مراحل مطالعه پارچه‌های آغشته به سیال ضخیم شونده برشی تحت ضربه پرتابه، درک الگوی مناسب از تغییر شکل پارچه در طول فرایند برخورد پرتابه و جذب انرژی است. در این راستا، مطالعاتی در مورد نقش مایعات ضخیم شونده برشی بر تغییر شکل پارچه کولار و تأثیر آن بر جذب انرژی پرتابه انجام شده است [2]. ماجومدار و همکاران، به بررسی عوامل مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد سیال ضخیم شونده برشی با رویکرد فرایند آغشته‌سازی پرداختند. ایشان نشان دادند که افزایش فشار غلطک‌ها، افزایش میزان نانو ذرات سیلیکا و کاهش نسبت حلال، باعث بهبود عملکرد کولار آغشته به سیال ضخیم شونده برشی می‌شود [3]. واگنر با بررسی ساختار مختلف الیاف و سیال ضخیم شونده برشی نشان داد که به منظور افزایش خواص بالستیک الیاف کولار می‌بایست الیاف، اشباع از سیال ضخیم شونده برشی شود. [4].

کالمن و همکاران دریافتند که سیال برپایه پلی متیل متاکریلات، ویژگی ضخامت برشی مؤثر کمتری در مقایسه با سیال بر پایه ذرات سیلیس به نمایش گذاشته است [5]. لو و همکاران، رفتار فشاری پارچه بافته شده سه‌بعدی کش‌یافت آغشته به مایع ضخیم برشی را تحت بار فشاری شبه استاتیکی و بارهای ضربه‌ای سرعت پایین، مطالعه کردند [6]. استفاده از سیال ضخیم شونده برشی منجر به افزایش مقاومت‌های بالستیک بدون کاهش میزان انعطاف‌پذیری ناشی از ازدیاد پارچه می‌شود. پارک و همکاران، ویژگی جذب انرژی در نمونه‌های پارچه ساده و آغشته به سیال ضخیم شونده برشی با توجه به سرعت گلوله را بررسی کردند [7]. تان و همکاران، اثر هندسه پرتابه بر عملکرد جذب انرژی پرتابه توسط پارچه را به صورت تجربی مطالعه کردند [8].

در مطالعه انجام شده توسط دکر و همکاران، اثر آغشته‌سازی سیال ضخیم شونده برشی بر مقاومت در برابر سوراخ شدن پارچه‌های کولار و نایلون بر اساس مطالعه منطقه آسیب در پارچه‌ها مورد آزمایش با چاقو و سنبه، مورد بررسی قرار گرفت [9]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیال ضخیم

شونده برشی در درجه اول تحرک رشته و نخ را در منطقه ضربه کاهش می‌دهد. نتیجه مشابهی توسط تان و همکاران حاصل شده است [10].

مطالعات زیادی در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل عددی رفتار پارچه تحت ضربه پرتابه انجام شده است. طالبی و همکاران بر مبنای مدل‌سازی پارچه به کمک روش المان محدود، اثر زاویه دماغه گلوله مخروطی شکل بر اندازه مقدار انرژی جذب شده توسط پارچه را بررسی کردند [11]. چیسمن و همکاران، به بررسی عوامل مؤثر در عملکرد بالستیک پارچه مانند هندسه و سرعت پرتابه، ساختار پارچه، شرایط مرزی پارچه، تعداد لایه‌ها و اصطکاک بین نخ‌ها را بررسی کردند [12].

محققان اثر افزایش مایع غلیظ شونده برشی به پارچه‌ها که بهبود عملکرد بالستیک پارچه‌ها را در پی دارد، به افزایش اصطکاک بین گلوله و پارچه نسبت می‌دهند. زمانی که پرتابه با سرعت بالا به داخل پارچه آغشته به مایع غلیظ شونده برشی نفوذ می‌کند، ویسکوزیته سیال در نرخ کرنش بالا افزایش می‌یابد و باعث می‌شود اصطکاک بین نخ‌ها زیاد شود، با افزایش اصطکاک، نخ‌ها بطور مؤثرتر درگیر می‌شوند و این باعث جذب انرژی بیشتر در برهم کنش‌های نخ‌های درون پارچه و پرتابه با پارچه می‌شود. علاوه بر این، با برخورد گلوله به پارچه، سیال داخل آن به دلیل ماهیت فیزیکی و رفتار غیرنیوتونی آن، به حالت جامد نزدیک شده و در برابر عبور گلوله از هدف مقاومت می‌کند [13].

خدادادی و همکاران [14]، نشان دادند که آغشتن پارچه به سیال ضخیم شونده برشی باعث شد که نمونه در آزمایش‌های بالستیک، دارای سرعت حد بالستیک بالاتری نسبت به پارچه خشک باشد و انرژی جذب‌شده توسط آن بالاتر شده و در نتیجه باعث بهبود خواص بالستیک پارچه شود. علاوه بر این یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال اس دینا² شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که بهبود عملکرد بالستیک پارچه آغشته به سیال ضخیم برشی تا حدودی مربوط به افزایش اصطکاک بین پرتابه و پارچه می‌باشد.

وانگ و همکاران، اثر زوایای لایه‌های پارچه نسب به هم روی عملکرد بالستیک را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند [15]. نیلاکنتان و همکاران، اثرات استحکام کششی نخ پارچه، اصطکاک بین تارها، مشخصات هندسی پرتابه و شرایط مرزی پارچه در برخورد پرتابه به پارچه کولار را بررسی کردند. این مطالعات نشان می‌دهد که عوامل زیادی در جذب انرژی و توقف پرتابه دخیل هستند و به‌طور شدید و پیچیده باهم کوپل هستند [16,17].

حسن‌زاده و همکاران رفتار پارچه آغشته به مایع غلیظ شونده برشی در برابر سوراخ شدن با سنبه را مطالعه کردند. ایشان جهت درک بهتر اثر مایع غلیظ شونده برشی بر عملکرد پارچه، رفتار بیرون کشیدگی نخ از پارچه آغشته به مایع غلیظ شونده برشی را نیز بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مایع غلیظ شونده برشی باعث افزایش مقاومت پارچه به نفوذ سنبه و افزایش اصطکاک بین نخ‌های پارچه می‌شود [18]. در پژوهش پارک و همکاران [19]، شبیه‌سازی عددی جذب انرژی پرتابه با سرعت بالا در اثر برخورد با پارچه آغشته با ماده سخت شونده برشی به کمک استفاده از اثر اصطکاک و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انجام گرفته است. اثر اصطکاک به عنوان عامل مهم و مؤثر در مکانیزم جذب انرژی، به صورت اصطکاک ایستایی و دینامیکی لحاظ شده و با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد، با این

² LS-DYNA¹ Shear Thickening Fluid (STF)

مساحت کافی ریخته شده و پارچه‌ها را در آن غوطه‌ور ساخته تا کاملاً آغشته شود. در مرحله بعد باید اتانول موجود در پارچه‌ها تبخیر شود. به منظور تبخیر اتانول از کوره‌ای با دمای 95 درجه استفاده شده است و پس از آنکه لایه‌ها به مدت 25 دقیقه در دمای 95 درجه قرار داده شد، برای تهیه نمونه‌ها استفاده شده است.

برای انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های پارچه‌های مورد نظر، شرایط استاندارد NIJ0101-04 در نظر گرفته شده است. طبق این استاندارد پارچه زرهی توسط نوار الاستیک بر روی یک خمیر ثابت می‌شود و پرتابه به سمت پارچه شلیک می‌شود. اندازه‌گیری میزان فرورفتگی پرتابه در خمیر پس از انجام آزمایش، معیار ارزیابی مقاومت به نفوذ پارچه می‌باشد. خمیر مورد استفاده باید به‌گونه‌ای باشد که در برابر رها سازی کرای فولادی به وزن یک کیلوگرم و قطر 63.5 میلی‌متر از ارتفاع 2 متری، میزان عقب‌نشینی آن از 17 میلی‌متر تا 23 میلی‌متر باشد.

پس از تهیه خمیر با شرایط استاندارد نمونه پارچه‌ها به‌وسیله دو عدد نوار کشی الاستیک بر روی خمیر مهار می‌شود که در شکل 1 نشان داده شده است. برای شروع آزمایش در جلوی دهانه تفنگ به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه گلوله، کرنوگراف و در پشت نمونه‌ی تهیه شده، برای اندازه‌گیری عقب‌نشینی، خمیر الاستیک طبق شرایط مورد نیاز استاندارد قرار داده شده است.

بعد از اعمال شرایط بالا گلوله شلیک می‌شود و سرعت اولیه به‌وسیله کرنوگراف و میزان عقب‌نشینی در خمیر به‌وسیله کولیس اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین استاندارد اگر گلوله پس از برخورد با نمونه وارد خمیر شود (نمونه پاره شود و گلوله از آن رد شود) و یا میزان عقب‌نشینی (فرورفتگی) خمیر بیشتر از 44 میلی‌متر باشد نمونه آزمایش شده مورد تایید این استاندارد نیست. به بیان دیگر گلوله نباید از نمونه گذر کند و حداکثر میزان مجاز عقب‌نشینی خمیر 44 میلی‌متر است. آزمایش‌های بالستیک با استفاده از تفنگ گازی انجام شد. این دستگاه شامل یک مخزن گاز به همراه یک شیر برقی سلونوئیدی است. با باز کردن شیر مخزن، فشار دلخواه تنظیم می‌شود. در جلوی مخزن یک لوله بلند قرار دارد که پرتابه در داخل آن جای می‌گیرد. هرچه طول این لوله بیشتر باشد و گلوله در فاصله بیشتری از سر لوله (نزدیک‌تر به شیر سلونوئیدی) قرار گیرد، سرعت شلیک بیشتر خواهد شد. هنگامی که شیر سلونوئیدی فعال می‌شود گاز با فشار تنظیم شده به یک‌باره پشت پرتابه تخلیه شده و باعث سرعت گرفتن گلوله می‌شود. سرعت نهایی



Fig. 1 The conditions of the sample in experimental study

شکل 1 مهار نمونه‌ها بر روی خمیر با استفاده از نوار الاستیک

وجود نشان دادند که در نظر گرفتن فقط اثر اصطکاک جهت مدل‌سازی جذب انرژی پرتابه در برخورد با پارچه آغشته با مایع ضخیم شونده برشی در سرعت‌های بالا کافی نمی‌باشد.

فحول و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی خود، به‌صورت پارامتری، به بررسی اثر اصطکاک بین نخ‌های پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده برشی روی مکانیزم جذب انرژی پرداختند. همچنین، بررسی اثر سیال ضخیم شونده برشی روی خواص کششی و عملکرد جذب انرژی پرتابه‌های با سرعت بالا از موضوعات دیگر این مطالعات آزمایشگاهی بود [20].

سوکالیگام و همکاران، به مرور تحقیقات اخیر انجام شده در زمینه تحلیل عددی و تجربی عملکرد بالستیک پارچه و با تکیه بر مکانیسم‌های مهم تغییر شکل پارچه پرداختند [21].

با توجه به مطالعات گذشته می‌توان نتیجه گرفت که بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عملکرد بالستیک پارچه به‌صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است. در مطالعات عددی، پارچه به‌صورت متشکل از جز پایه نخ مدل‌سازی شده و رفتار مادی آن، الاستیک غیرهمسانگرد در نظر گرفته شده است. همچنین، در اکثر مطالعات مشاهده می‌شود، مکانیسم‌های تغییر شکل و شکست پارچه بافته شده تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند رفتار غیرهمسانگرد، هندسه پرتابه متعامل با پارچه، سرعت پرتابه و شرایط مرزی پارچه می‌باشد.

با توجه به بررسی مطالعات پارامتری انجام شده، پارامترهای مؤثر در عملکرد بالستیک پارچه وابستگی زیادی به هم دارند. با این وجود، تابه‌حال مطالعه‌ای انجام نشده که تمام پارامترها را معرفی کند و در مطالعات اخیر نیز به مجهول بودن بعضی عوامل دیگر در عملکرد پارچه در مقابل ضربه پرتابه اشاره شده است [17,16].

نکته دیگری که در پژوهش‌های قبلی مشهود است، این است که اثر بهبود عملکرد پارچه در اثر آغشتن سیال ضخیم شونده برشی به فقط افزایش اصطکاک بین نخ‌ها و اصطکاک بین پارچه و پرتابه نسبت داده شده است. در این پژوهش اثر جرم سیال ضخیم شونده نیز لحاظ شده است. اثر دادن جرم سیال ضخیم شونده برشی به‌صورت افزایش چگالی نخ پارچه پیشنهاد شده است به‌عبارت دیگر، فرض شده که تمام جرم سیال ضخیم شونده برشی بین رشته‌های هر نخ نفوذ کرده و سیال جزئی از نخ در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش ضمن استفاده از فرضیات و روش‌های مدل‌سازی ارائه شده در منابع، پارامتر مؤثر جدیدی معرفی شده است. امروزه الیاف پلی‌پروپیلن با مدول بالا به علت وزن سطحی بسیار پایینی که دارند به عنوان فاز تقویت کننده زره‌های ضدگلوله مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا در این مقاله ضمن بررسی اثر ضربه با سرعت بالا بر روی پارچه‌های پلی‌پروپیلن با مدول بالا و نام تجاری اینگرا، میزان افزایش مقاومت به ضربه آن‌ها در اثر آغشته سازی به مایع غلیظ شونده برشی به‌صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. در بررسی عددی، یک مدل شبیه‌سازی شده برای حل عددی به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا ایجاد گردید و عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیک پارچه‌های مورد استفاده در زره‌ها شامل خواص مکانیکی پارچه، شرایط مرزی پارچه، تعداد لایه‌های پارچه و اصطکاک بین نخ‌های پارچه مورد بررسی قرار گرفته است.

2- آزمایش تجربی

برای آماده سازی نمونه‌ها، در این تحقیق پارچه‌ها به روش غوطه‌ورسازی کاملاً آغشته شدند. در این روش، ابتدا سیال مورد نظر در یک ظرف با

گلوله دچار تغییر شکل قابل توجهی نمی‌شود، به همین دلیل در چنین مدل‌سازی‌هایی، پرتابه صلب در نظر گرفته می‌شود [23]. همچنین از المان سالید² سه‌بعدی برای پرتابه استفاده شده است.

2-3- پارچه

نخی که پارچه بافته شده را تشکیل می‌دهد دارای خواص مادی ناهمسانگرد است. نخ پارچه به جز در جهت تارها، دارای سفتی ناچیزی است. یک نخ در حالت عادی، تا زمانی که کشیده نشود، مقاومت ناچیزی دارد. به عبارت دیگر، در حالت فشردگی (در راستای تارها) مقاومت و سفتی خیلی کمی دارد. خواص مکانیکی پارچه به ساختار نخ‌ها بستگی دارد و خواص نخ به صدها تار موازی و مجاور هم وابسته است [24].

با توجه به تست کشش انجام گرفته روی نخ‌های پارچه، که نمودار نیرو-کشیدگی آن در شکل 3 نشان داده شده است، رفتار تنش-کرنش خطی دارد و به دلیل رفتار غیر همسانگرد نخ‌ها، از مدل رفتاری الاستیک و اورتوتروپیک استفاده شده است. همچنین برای پرتابه از مدل ماده صلب استفاده شده است. در تست کشش، مدول یانگ هر نخ پارچه، کرنش شکست و تنش استحکام پارچه محاسبه شده است. ضرایب پواسون ν_{23} ، ν_{32} و ν_{12} با توجه به نتایج ارائه شده در [26,25] صفر در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به رفتار مکانیکی ارائه شده در شکل 3، کرنش شکست 9.8 درصد و تنش استحکام 490 MPa محاسبه شده است که این مقادیر برای پیش بینی شکست و خرابی نخ‌های پارچه به نرم‌افزار داده شده است. در حالتی که مدول الاستیک عرضی E_{22} و E_{33} در مقایسه با مدول الاستیک طولی E_{11} ناچیز باشند و همچنین مدول برشی G_{12} ، G_{13} و G_{23} و ضرایب پواسون ν_{23} ، ν_{32} و ν_{12} خیلی کوچک باشند، برای نخ پارچه‌ها می‌توان خواص محیط پیوسته و الاستیک ناهمسانگرد در نظر گرفت [27]. جدول (1) نه پارامتر لازم دیگر برای توصیف ماده اورتوتروپیک و با رفتار الاستیک را نشان می‌دهد.

پارچه با بافت ساده بوده و راستای نخ‌های تار و پود بر هم عمود می‌باشد. هندسه نخ‌های مدل‌سازی مطابق هندسه پارچه مطالعه شده در بررسی‌های آزمایشگاهی است. شکل 4 وضعیت پارچه و پرتابه را نشان می‌دهد، همچنین شکل 5 وضعیت قرارگیری تار و پودهای پارچه را نشان می‌دهد که با دو

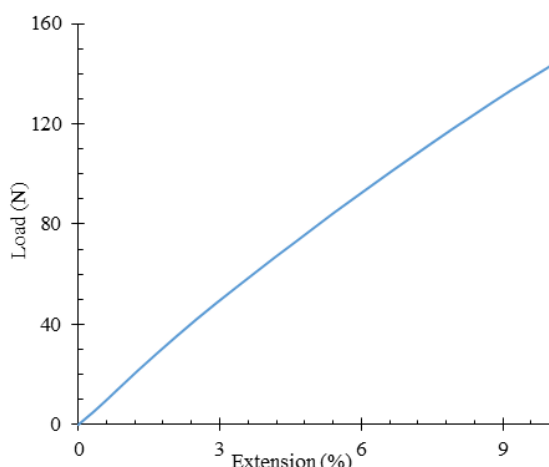


Fig. 3 Load-Extension test for single yarn

شکل 3 رفتار مکانیکی نخ بر حسب نمودار نیرو-کشیدگی

پرتابه که از انتهای لوله خارج می‌شود، تابعی از طول لوله، فشار گاز مخزن، ضریب انبساط گاز مورد استفاده و جرم پرتابه می‌باشد. گاز مورد استفاده در این دستگاه ازت است. در شکل 2، شماتیک دستگاه تفنگ گازی نشان داده شده است.

از آنجا که در مطالعات پیشین سایر افراد از پرتابه کروی استفاده شده، در این تحقیق نیز گلوله‌ای کروی مورد آزمون قرار گرفت. آزمایش ضربه بالستیک با استفاده از گلوله‌ای کروی به قطر 8.7 میلی‌متر و وزن 2 گرم و با سرعت 170 m/s بر روی پارچه‌های پلی‌پروپیلن ساده و آغشته به 44 درصد جرمی سیال ضخیم شونده برشی انجام شد. نمونه‌های مورد آزمایش متشکل از چهار لایه پلی‌پروپیلن می‌باشند. به منظور اطمینان از صحت نتایج آزمایش، در هر ساختار دو مرتبه آزمایش انجام شده است. در هر حالت میزان فرورفتگی پرتابه در پارچه به عنوان معیار مقاومت پارچه اندازه گیری شده است.

برای محاسبه انرژی جذب‌شده پرتابه توسط هر نمونه، رابطه (1) استفاده شده است. در این رابطه فرض شده که انرژی جذب‌شده توسط پارچه برابر با اختلاف انرژی جنبشی پرتابه در قبل و بعد از برخورد با پارچه است و از اثرات مقاومت هوا صرف‌نظر شده است.

$$E_{ab} = \frac{1}{2} M_p (V_i^2 - V_r^2) \quad (1)$$

که در رابطه (1)، E_{ab} انرژی جذب‌شده پرتابه، M_p جرم پرتابه، V_i سرعت اولیه پرتابه و V_r سرعت باقی‌مانده پرتابه است [22].

3- مدل‌سازی المان محدود

با پیشرفت نرم‌افزارهای تحلیل عددی، استفاده از آن‌ها باعث رسیدن به نتایج قابل قبول و مطمئنی شده و همچنین کاهش هزینه و زمان را به دنبال دارد. علاوه بر این، برای مطالعه عوامل مؤثر و پارامتری بر یک پدیده فیزیکی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی بسیار مناسب هستند و زمان بررسی‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند. در اینجا هدف از نشان دادن نتایج تجربی، تایید صحت مدل‌سازی و استخراج پارامترهای لازم جهت ادامه بررسی‌ها به کمک شبیه‌سازی عددی است. به منظور بررسی عملکرد و مکانیزم جذب ضربه پرتابه به پارچه یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار تجاری ال اس داین¹ ایجاد شده است.

1-3- پرتابه

پرتابه کروی به قطر 8.7 mm و جرم 2 gr مطابق با گلوله انتخاب شده در بررسی تجربی در نظر گرفته شده است. گلوله فولادی با مدول یانگ 200GPa و ضریب پواسون 0.3 می‌باشد و در مدل‌سازی با رفتار الاستیک در نظر گرفته شده است. نشان داده شده که در برخورد گلوله به لایه‌های پارچه،

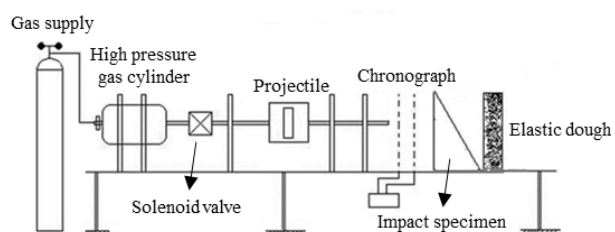


Fig. 2 Schematic diagram of the gas gun [7]

شکل 2 شماتیک دستگاه تفنگ گازی [7]

² Solid Element

¹ LS-DYNA

جدول 1 خواص مکانیکی نخ پارچه با رفتار الاستیک

Table 1 Mechanical properties of the fabric with elastic behavior

E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
2.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0	0
(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)			

سطح تماس در نظر گرفته شده برای برهم کنش بین سطوح نخ‌ها با هم، پرتابه با نخ از نوع تماس خودکار و نرم⁴ است.

لازم به ذکر است که اصطکاک بین تارهای نخ بر خواص مکانیکی نخ پارچه مؤثر است که در اینجا از این اثر صرف‌نظر شده است [24].

4- نتایج و بحث

عوامل مؤثر مطالعه شده در عملکرد بالستیک پارچه، در بخش‌های ذیل آورده شده‌اند. در ابتدا اثر شرایط مرزی روی عملکرد بالستیک پارچه تک لایه مطالعه شده است. سپس اثر اصطکاک بین نخ‌های پارچه و بین پرتابه و پارچه بررسی شده است. دو مورد اشاره شده در مطالعات قبلی بیشتر مورد توجه بوده‌اند، در اینجا اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی آغشته شده به پارچه نیز مطالعه شده است که برای اولین بار نتایج آن ارائه می‌شود. در نهایت مدل‌سازی پارچه چهار لایه و متناظر با شرایط آزمایشگاهی بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

4-1- شرایط مرزی

دو شرط مرزی پارچه با چهار لبه گیردار و چهار لبه با شرایط مرزی ساده (جابجایی فقط در راستای عمود بر صفحه شامل پارچه مقید است) برای بررسی عملکرد پارچه تک لایه مطالعه شده است. در وضعیت شرایط مرزی دوم، پارچه فقط در جهت عمود بر سطح مقید شده است و حرکت صفحه‌ای و عمود بر سطح آن آزاد است. لازم به ذکر است که در اینجا از شرایط مرزی متقارن می‌توان استفاده کرد که به دلیل اینکه از لحاظ هندسی تشابه به واقعیت خدشه‌دار نشود، از این شرایط مرزی استفاده نشده است.

مقدار انرژی جذب‌شده پرتابه در اثر برخورد با پارچه تک لایه در دو شرایط مرزی مزبور در شکل 6 ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در حالت مرزی چهار لبه گیردار، جذب انرژی پارچه کمتر از حالت متناظر آن است.

لازم به ذکر است مطابق نتایج ارائه شده در پژوهش‌های انجام گرفته، انرژی جذب‌شده در شرایط مرزی ساده بیشتر از شرایط مرزی گیردار است. که دلیل آن، انعطاف بیشتر نخ‌ها در حالت شرایط مرزی ساده است که بعد از

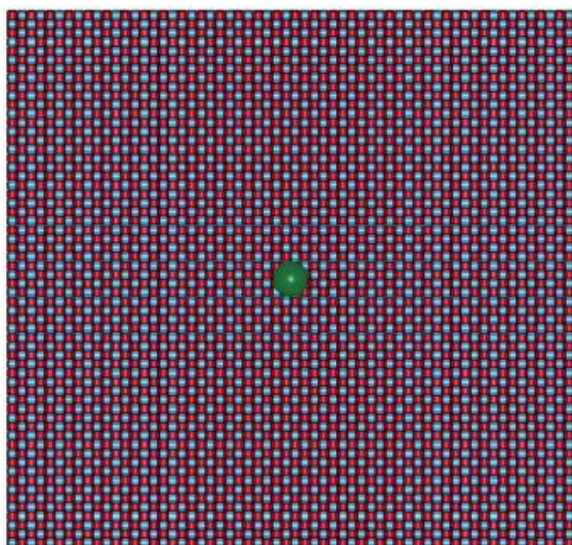


Fig. 4 View of the single layer fabric and spherical ball on top of it
شکل 4 نمای پارچه تک لایه و گلوله کروی در بالای آن

⁴ Contact Automatic Surface to Surface Smooth

رنگ مختلف از هم متمایز شده‌اند. نخ‌ها با مقطع مستطیلی و معادله مسیر نخ در بافت تاروپود ساده به‌صورت تابع مثلثاتی ارائه شده در رابطه (2) در نظر گرفته شده و از المان شل¹ برای مدل‌سازی نخ‌ها استفاده شده است [19]. لازم به ذکر است که در این‌گونه المان‌ها، انرژی پدیده ساعت شنی² وجود دارد که مقدار بالای آن نتایج اشتباه حاصل می‌دهد، به‌طوری‌که اگر مقدار آن از 10% انرژی درونی بیشتر باشد نتایج دور از واقعیت حاصل می‌شود. در اینجا این انرژی در نرم‌افزار ال-اس-داینما کنترل شده و مقدار آن در بازه 2 تا 5 درصد انرژی درونی محدود شده است.

$$y = \frac{\text{thickness}}{2} \cos\left(\frac{\pi x}{\text{span}}\right) \quad (2)$$

به کمک رابطه (2)، در محیط ای‌پی‌دی‌ال نرم‌افزار انسیس معادلات هر نخ پارچه جهت مدل‌سازی کد نویسی شده و بعد از فراخوانی و به کمک ابزار نرم‌افزار، شکل کامل پارچه تشکیل شده از نخ‌های تاروپود ایجاد شده است. در ابتدا نخ‌ها بصورت نوارهای بدون ضخامت مدل‌سازی شده‌اند. همچنین، ضخامت نخ‌های پارچه 0.512 میلی‌متر می‌باشد، بنابراین با اختصاص دادن ضخامت مورد نظر به نخ‌ها، هندسه نخ‌های مدل‌سازی شده، مشابه هندسه نخ‌های واقعی می‌شود. که پارچه مورد نظر و متناظر با نمونه‌های آزمایشگاهی پارچه به طول 14 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که در شکل 4 نشان داده شده است.

شکل 5 تاروپود پارچه تک لایه و اندازه المان‌های شل و همچنین مسیر نخ‌های پارچه به‌صورت فرمول مثلثاتی ارائه شده در رابطه (2) را نشان می‌دهد. پارچه تک لایه برای مطالعه چند عامل مؤثر بر مکانیزم جذب انرژی پرتابه توسط پارچه در نظر گرفته شده است.

محققان اثر مایع غلیظ شونده برشی بر بهبود عملکرد پارچه را عمدتاً به افزایش اصطکاک بین نخ‌های پارچه و پرتابه با پارچه نسبت می‌دهند [21,15,14]. حضور مایع غلیظ شونده برشی در درون پارچه باعث می‌شود که در اثر نفوذ پرتابه در پارچه، با افزایش اصطکاک بین سطوح مختلف تحرک نخ‌ها نسبت به هم کمتر شده و در اثر درگیری مؤثر نخ‌ها، پارچه مانند جسم جامد همگن عمل می‌کند. همچنین، با برخورد پرتابه به پارچه، سیال داخل پارچه به دلیل ماهیت رفتاری به حالت جامد نزدیک شده و در برابر عبور پرتابه از هدف بیشتر مقابله و مقاومت می‌کند. در این پژوهش یکی از عوامل مؤثر در عملکرد پارچه، اصطکاک در نظر گرفته شده که به عنوان معیاری از اثر مایع غلیظ شونده برشی در پارچه در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی پارچه تحت پرتابه، برای حالت آغشته شده به مایع غلیظ شونده برشی نسبت به پارچه خشک، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی افزایش داده شده است.

در نرم‌افزار ال‌اس‌داسنا، برای اعمال رفتار اصطکاک بین سطوح از مدل اصطکاک کلمب³ استفاده شده که در رابطه (3) نشان داده شده است [19].

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|V_{rel}|} \quad (3)$$

که μ ضریب اصطکاک دینامیکی، μ_s ضریب اصطکاک ایستایی، c ضریب نمایی مدل اصطکاک و V_{rel} سرعت نسبی سطوح در تماس می‌باشد.

¹ Shell Element

² Hourglass Energy

³ Coulomb friction

پارچه در نظر گرفته شده است. برای تحلیل رفتار جذب ضربه توسط پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده برشی، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی متناسب با درصد افزایش سیال آغشته شده به پارچه در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر برای پارچه‌های آغشته شده با سیال با درصد جرمی بالا، ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی بزرگ در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌طور که اشاره شد، در بسیاری از مطالعات اثر افزودن سیال ضخیم شونده برشی به صورت افزایش اصطکاک بین نخ‌های پارچه در نظر گرفته شده است [17,14]. در اینجا نیز برای برقراری ارتباط و تناظر بین درصد جرمی سیال آغشته شده و اصطکاک بین نخ‌ها، اندازه اصطکاک بین نخ‌ها به صورت پارامتری مطالعه شده است. در این بررسی پارامتری، سطح‌های اصطکاک با مقادیر مختلف ضرایب اصطکاک ایستایی (f_s) و دینامیکی (f_d) در جدول 2 نشان داده شده است.

حالت اول به عنوان حداقل اصطکاک و حالت پنجم برای توصیف اصطکاک پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده و با درصد جرمی بالا در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که نتایج حالت‌های اصطکاک با ضرایب بزرگ‌تر نسبت به حالت پنجم، تفاوت قابل توجهی نداشتند و نتایج آن‌ها ارائه نشده است. مقادیر انرژی جذب‌شده توسط پارچه به ازای حالت‌های مختلف اصطکاک در جدول 3 ارائه شده است. همچنین، تغییرات انرژی جنبشی پرتابه بر حسب زمان و در حالت‌های مختلف اصطکاک در شکل 7 نشان داده شده است.

عوامل زیادی در فرایند جذب انرژی ضربه پرتابه به پارچه دخالت دارند. از مهم‌ترین عوامل می‌توان به انرژی جذب‌شده به واسطه تغییر شکل پارچه، شکست الیاف و نخ‌ها، اصطکاک الیاف‌ها با هم، اصطکاک بین الیاف و گلوله اشاره کرد. استحکام بالای نخ‌های پارچه و کرنش شکست بالای آن باعث می‌شود که پارچه پس از برخورد اولیه گلوله پاره نشده و خیز عرضی در زمان کوتاهی به انتهای لبه پارچه برسد. بنابراین نخ‌های زیادی در فرایند جذب انرژی پرتابه توسط پارچه سهم دارند. همچنین اصطکاک بین الیاف نیز باعث می‌شود که الیاف‌ها بیشتر با هم درگیر شوند و فرایند جذب انرژی فقط به

جدول 2 حالت‌های سطح اصطکاک برای شبیه‌سازی عددی به ازای ضرایب مختلف ایستایی و دینامیکی

Table 2 various case of friction levels with different static and dynamic coefficients for numerical simulation					
شماره حالت	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
ضریب اصطکاک ایستایی (f_s)	0.4	0.6	0.8	1	1.5
ضریب اصطکاک دینامیکی (f_d)	0.2	0.4	0.6	0.8	1
ضریب اصطکاک ایستایی (f_s)	0.6	0.8	1	1.5	2.5
ضریب اصطکاک دینامیکی (f_d)	0.4	0.6	0.8	1	1.2

جدول 3 مقدار انرژی جذب‌شده با واحد J به ازای دو شرط مرزی و در سطح‌های مختلف اصطکاک در مدل‌سازی عددی

Table 3 The amount of absorbed energy (J) for two different boundary conditions and the various friction levels based on numerical simulation					
شرایط مرزی	حالت (1)	حالت (2)	حالت (3)	حالت (4)	حالت (5)
شرایط مرزی گیردار	6.5	9.4	11.5	12.6	14
شرایط مرزی ساده	6.7	9.7	12	13.2	15

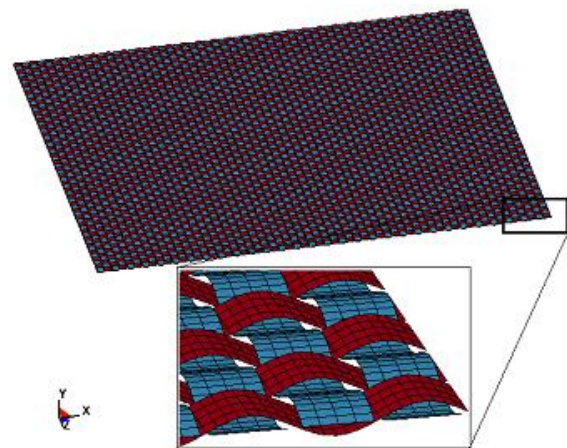


Fig. 5 The simulated woven fabric by shell elements

شکل 5 تاروپود پارچه مدل‌سازی شده به صورت المان‌های شل

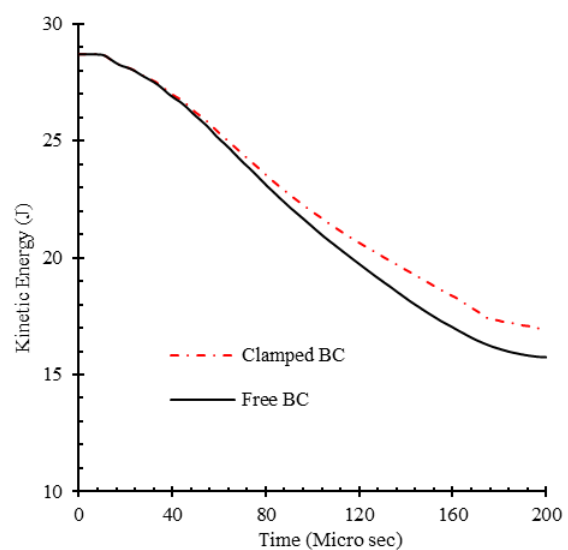


Fig. 6 The comparison of the kinetic energy evolutions in two case of boundary condition for the fabric based on numerical modeling

شکل 6 مقایسه تغییرات انرژی جنبشی پرتابه در دو حالت شرایط مرزی ساده و گیردار در مدل‌سازی عددی

رسیدن موج ضربه، لبه‌های مرزی آزادانه حرکت کرده و بدون مقاومت زیاد در برابر تغییر شکل پارچه، زمان تماس پرتابه با گلوله بیشتر می‌شود و در نتیجه زمان اتلاف انرژی پرتابه زیاد شده و انرژی بیشتری نسبت به حالت شرایط مرزی گیردار از گلوله گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در شرایط مرزی گیردار، به دلیل ثابت بودن و نداشتن آزادی عمل لبه‌های مرزی، نخ‌ها نسبت به شرایط مرزی ساده زودتر گسیخته می‌شوند. لازم به ذکر است که در این مدل‌سازی، با توجه به اینکه ابعاد پارچه نسبت به قطر پرتابه خیلی بزرگ‌تر است (16 برابر)، شرایط مرزی تأثیر قابل توجهی روی جذب انرژی پرتابه ندارد. به عبارت دیگر، به دلیل بزرگ بودن ابعاد پارچه، در زمان برهم‌کنش بین پرتابه و پارچه، نقاط دورتر از مرکز پارچه و در نتیجه لبه‌های مرزی نسبت به نواحی مرکزی به دلیل دیر رسیدن موج عرضی ناشی از برخورد پرتابه به پارچه، کمتر تحریک شده و در نتیجه سهم کمتری در تأثیر بر جذب انرژی پرتابه دارند.

2-4- اثر اصطکاک بین نخ‌های پارچه

در این مدل‌سازی، اصطکاک به عنوان معیاری از اثر سیال ضخیم شونده در

سیال ضخیم شونده اضافه‌شده به‌صورت افزایش چگالی نخ‌ها لحاظ شده است. پارچه بدون سیال ضخیم شونده دارای چگالی 800 kg/m^3 می‌باشد و با اضافه کردن سیال ضخیم شونده و رسیدن به درصد جرمی مورد نظر، جرم پارچه دو برابر می‌شود، جرم سیال ضخیم شونده به‌صورت افزایش چگالی نخ‌ها در نظر گرفته شده است و نتایج تغییرات انرژی پرتابه به کمک رابطه (1) و حداکثر خیز پارچه در دو حالت اصطکاک پایین (حالت 1) و اصطکاک بالا (حالت 5) در جدول 4 ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 4، برای پارچه تک لایه اندازه چگالی فقط بر اندازه جذب انرژی مؤثر است و تأثیر قابل توجهی بر اندازه عقب‌نشینی پارچه ندارد. با افزایش چگالی، عقب‌نشینی پارچه به‌طور جزئی کاهش می‌یابد. در حالت اصطکاک بالا نسبت به حالت اصطکاک پایین، اثر چگالی محسوس‌تر است. شایان ذکر است که در حالت بررسی پارچه چهار لایه، اثر چگالی بیشتر روی میزان عقب‌نشینی پارچه اثر گذار بوده که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

4-4- پارچه چهار لایه و مقایسه با نتایج تجربی

جهت تایید صحت و اعتبار نتایج شبیه‌سازی، مدل‌سازی منطبق با شرایط آزمایشگاهی انجام گرفته و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. داده‌های آزمایشگاهی از تست دو پارچه اینگرا تمیز (بدون سیال ضخیم شونده) و آغشته به سیال ضخیم شونده برشی با چهار لایه استخراج شده‌اند. در مدل‌سازی انجام گرفته، برای پارچه تمیز ضرایب اصطکاک ایستایی و دینامیکی کم در نظر گرفته شده‌اند، همچنین حالت پنجم از سطح‌های اصطکاک، متناظر با پارچه آغشته شده در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در جدول‌های 5 و 6 نشان داده شده است، پارچه آغشته به مایع غلیظ شونده برشی خیز خیلی کمتری نسبت به پارچه تمیز دارد که یکی از دلایل آن افزایش وزن پارچه به دلیل افزودن سیال است و طبیعتاً در برهم کنش بین پرتابه و پارچه، پارچه کمتر جابجا می‌شود. در شبیه‌سازی انجام گرفته و متناظر با پارچه آغشته شده به مایع غلیظ شونده برشی، اصطکاک بالا در نظر گرفته شده است و تا حدودی اثر سیال ضخیم شونده را بازی می‌کند ولی به دلیل اینکه وزن پارچه در شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است، بدیهی است که خیز حاصل بیشتر از نتیجه آزمایشگاهی نتیجه می‌شود.

شکل 9، پارچه چهار لایه در حالت قبل از برخورد از گلوله کروی را نشان می‌دهد. همچنین، شکل 10، تغییر شکل پارچه چهار لایه در حالت اصطکاک پایین (حالت 1) نشان می‌دهد. اندازه عقب‌نشینی (حداکثر خیز) پارچه به عنوان معیار مقایسه نتایج عددی و تجربی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در دو حالت اصطکاک (1) و (2) در جدول 5 ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

جدول 4 اثر چگالی نخ پارچه بر عملکرد بالستیک پارچه یک لایه در مدل‌سازی عددی

Table 4 The effect of fiber density on the ballistic performance of one layer fabric based on numerical modeling

چگالی نخ (kg/m^3)	سطح اصطکاک	مقدار انرژی جذب‌شده از پرتابه (J)	حداکثر خیز پارچه (mm)
800	حالت (1)	6.5	16
1600	حالت (1)	9	15.8
800	حالت (5)	14	16
1600	حالت (5)	17.8	15

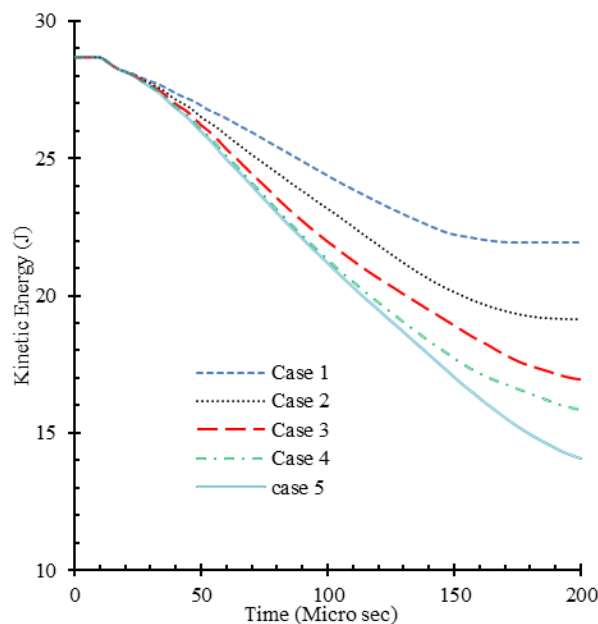


Fig. 7 Variations of the kinetic energy of the projectile according to time and in different states of friction based on numerical modeling

شکل 7 تغییرات انرژی جنبشی پرتابه بر حسب زمان و در حالت‌های مختلف اصطکاک در مدل‌سازی عددی

ناحیه‌ای که محل تماس پرتابه با پارچه است محدود نشود و در نتیجه انرژی بیشتری جذب شود. در انتهای هر بخش، شکل‌های مختلف برهم کنش بین پرتابه و پارچه نشان داده شده است.

شکل 8 برهم کنش بین پرتابه و گلوله را در دو حالت اصطکاک (1) و (5) بالا نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل می‌توان دریافت که در حالت اصطکاک پایین، ناحیه کمتری از پارچه درگیر متوقف کردن پرتابه می‌شود، علاوه بر این، نخ‌های در تماس با گلوله از هم فاصله گرفته و عبور گلوله از پارچه راحت‌تر است. برخلاف حالت اصطکاک (1)، در حالت (5) که متناظر با پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده برشی در نظر گرفته شده است، نخ‌های بیشتری از پارچه درگیر متوقف کردن پرتابه می‌باشند. نخ‌ها متحد عمل می‌کنند و مانند یک جسم پیوسته در برابر نفوذ گلوله مقاومت می‌کنند و در نتیجه انرژی بیشتری از گلوله گرفته می‌شود.

4-3- اثر چگالی نخ پارچه

در این پژوهش برخلاف مطالعات قبلی انجام شده، چگالی پارچه به عنوان عامل مؤثر در جذب انرژی پرتابه در نظر گرفته شده و بررسی شده است. جرم

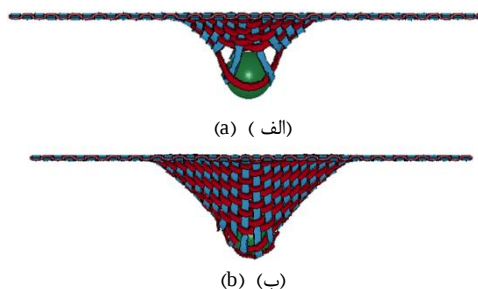


Fig. 8 fabric deformation, (a) for friction state (1), (b) for friction state (5)

شکل 8 تغییر شکل پارچه، (الف) در حالت اصطکاک (1)، (ب) در حالت اصطکاک (5)

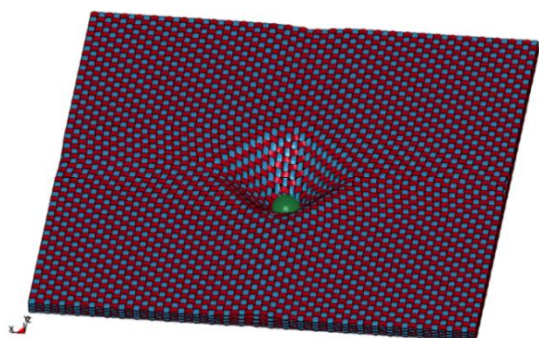


Fig. 11 The deformation of simulated fabric in case (5) of friction and considering the mass of STF effect in fabric density

شکل 11 تغییر شکل پارچه چهار لایه شبیه‌سازی شده بعد از برخورد پرتابه کروی در حالت اصطکاک حالت (5) و با اندازه چگالی پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده برشی



Fig. 12 Deformation of impregnated fabric with STF

شکل 12 تغییر شکل پارچه آغشته شده پس از برخورد پرتابه کروی

اینکه شکل ارائه شده تجربی دقیقاً پس از لحظه توقف گلوله نیست (عکس گرفتن از لحظه توقف گلوله به دلیل خیلی کم بودن زمان برهم‌کنش بین پارچه و گلوله مشکل است) و طبیعی است که پارچه پس از لحظه توقف پارچه به دلیل خاصیت ارتجاعی، به حالت اولیه برمی‌گردد.

با توجه به جدول‌های 5 و 6، در بررسی آزمایشگاهی، مشاهده شد که با آغشتن 44 درصد جرمی سیال ضخیم شونده برشی به پارچه، نفوذ پرتابه از 29 mm به 11 mm کاهش می‌یابد که افزایش استحکام و مقاومت به نفوذ پرتابه در پارچه را نشان می‌دهد. با مقایسه این مقادیر، نفوذ پرتابه در پارچه تا 63 درصد کاهش می‌یابد.

با انجام شبیه‌سازی‌ها، در حالت (2) از اصطکاک‌ها که متناظر با پارچه خشک است، عقب‌نشینی پارچه 33 mm نتیجه می‌شود که به مقدار 29 mm بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. همچنین اگر اصطکاک حالت

جدول 6 مقایسه اندازه عقب‌نشینی (mm) پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده

حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی

Table 6 Comparison of the amount movement (mm) of the simulated impregnated fabric with experimental data

نتایج تجربی	شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن جرم مایع غلیظ شونده	شبیه‌سازی با در نظر گرفتن جرم مایع غلیظ شونده برشی
11	19	14

جدول 5 مقایسه اندازه عقب‌نشینی (mm) پارچه خشک حاصل از شبیه‌سازی با

داده‌های آزمایشگاهی

Table 5 Comparison of the amount movement (mm) of the simulated clean fabric with experimental data

پارچه در حالت تجربی	شبیه‌سازی در حالت اصطکاک (1)	شبیه‌سازی در حالت اصطکاک (2)
29	گلوله رد شد	34

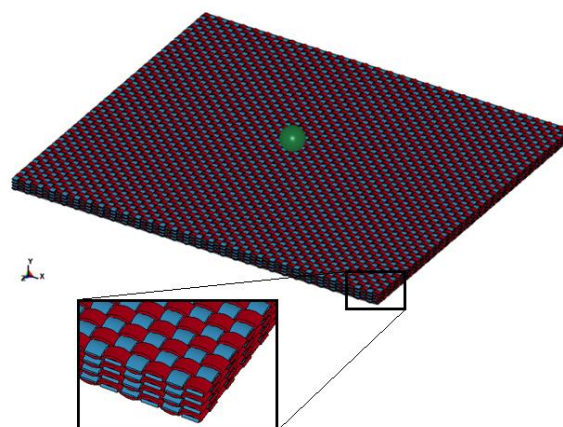


Fig. 9 Four layer fabric the impact of spherical projectile

شکل 9 پارچه چهار لایه در حالت قبل از برخورد از گلوله کروی

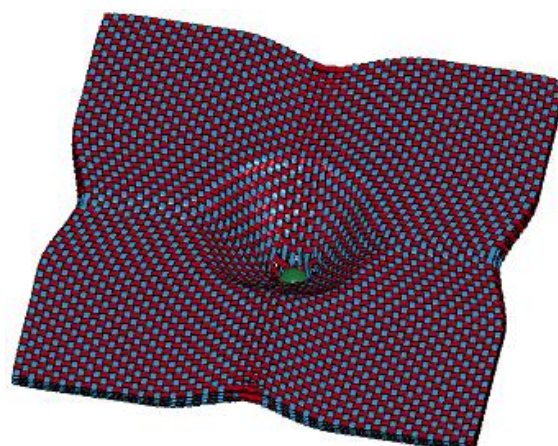


Fig. 10 The four-layer fabric deformation after the projectile impact in case (1) of friction

شکل 10 تغییر شکل پارچه چهار لایه بعد از برخورد پرتابه کروی در حالت اصطکاک حالت (1)

در حالت (1) از سطح اصطکاک، گلوله از پارچه بعد از مقاومت زیاد و عقب‌نشینی 37 میلی‌متری از پارچه رد شد. در شبیه‌سازی با حالت (2) از اصطکاک، مانند پارچه در حالت تجربی، گلوله از پارچه رد نشد و کل انرژی پرتابه جذب پارچه شد. با توجه به نتایج به دست آمده، حالت دوم اصطکاک را می‌توان متناظر با پارچه خشک در نظر گرفت.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، اصطکاک بالا متناظر با وضعیت پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده برشی در نظر گرفته شده است که نحوه تغییر شکل پارچه در شکل 11 نشان داده شده و با تغییر شکل تجربی مقایسه شده است (شکل 12). همچنین، نتایج مربوط به آن در جدول 6 مقایسه شده است.

دقت شود مقایسه دو شکل مدل‌سازی و تجربی کیفی بوده است به دلیل

در مطالعات آزمایشگاهی مشاهده شد، اثر 44 درصد جرمی مایع غلیظ شونده برشی تا 63 درصد نسبت به پارچه خشک، باعث کاهش عقب‌نشینی پارچه می‌شود که علاوه بر اینکه باعث افزایش مقاومت زره می‌شود، در زره‌های نرم می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از وارد شدن آسیب به بدن انسان داشته باشد.

در بررسی‌های عددی عوامل مؤثر مطالعه و مشاهده شد که شرایط مرزی ساده نسبت به شرایط مرزی گیردار به دلیل آزادی عمل نخ‌ها در لبه‌های پارچه، عملکرد پارچه در جذب انرژی پرتابه بهتر می‌باشد، به‌طوری‌که شرایط مرزی ساده نسبت به گیردار، 7 درصد جذب انرژی بیشتری دارد. همچنین، با بررسی اثر چگالی پارچه مشاهده شد که با افزایش اصطکاک و افزایش تعداد لایه‌های پارچه، اثر چگالی تأثیر قابل‌توجهی در نتایج دارد، به‌طوری‌که در پارچه چهار لایه تا 58 درصد باعث کاهش عقب‌نشینی پارچه می‌شود.

اصطکاک به عنوان عامل مهم در جذب انرژی پرتابه مطالعه شده که با بررسی اثر اصطکاک بین نخ‌های پارچه و پارچه با پرتابه مشاهده شد که عملکرد جذب انرژی پرتابه به اصطکاک وابستگی دارد و با افزایش اصطکاک جذب انرژی تا 2 برابر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های پارچه به چهار لایه، نقش اصطکاک در نفوذ پرتابه به پارچه بیشتر شده و اصطکاک حالت (5)، 44 درصد کمتر نسبت به حالت مدل‌سازی با اصطکاک حالت (2) نتیجه می‌دهد، این در حالی است که نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که پارچه آغشته به 44 درصد مایع غلیظ شونده برشی، تا 58 درصد باعث کاهش عقب‌نشینی پارچه نسبت به پارچه خشک می‌شود. با اعمال اثر جرم مایع غلیظ شونده برشی، نتایج شبیه‌سازی به آزمایشگاهی نزدیک شده و اختلاف عقب‌نشینی 58 درصد نتیجه شده است.

یکی از راه‌های اعمال اثر سیال ضخیم شونده برشی را می‌توان با افزایش اصطکاک بین نخ‌های پارچه و پارچه با پرتابه پیاده کرد، با این وجود مشاهده شد که افزایش اصطکاک به تنهایی نمی‌تواند به‌طور عمده رفتار پارچه در مقابل پرتابه را شبیه‌سازی کند که در این پژوهش اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی معرفی شد که با لحاظ کردن جرم مایع غلیظ شونده برشی بصورت افزایش چگالی پارچه، نتایج عددی با آزمایشگاهی همخوانی بهتری پیدا می‌کند.

6- مراجع

- [1] R. Egres Jr, M. Decker, C. Halbach, Y. Lee, J. Kirkwood, K. Kirwood, N. Wagner, E. Wetzel, *Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-Kevlar composites for body armor applications*, DTIC Document, pp. 2004.
- [2] A. Majumdar, B. S. Butola, A. Srivastava, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials, *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 148-153, 2013.
- [3] A. Majumdar, B. S. Butola, A. Srivastava, Optimal designing of soft body armour materials using shear thickening fluid, *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 191-198, 2013.
- [4] N. Wagner, E. Wetzel, *Advanced body armor utilizing shear thickening fluids*, 23rd Army Science Conference, Orlando, FL, 3 December, 2002.
- [5] D. P. Kalman, R. L. Merrill, N. J. Wagner, E. D. Wetzel, Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle- fluid suspensions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 1, No. 11, pp. 2602-2612, 2009.
- [6] Z. Lu, X. Jing, B. Sun, B. Gu, Compressive behaviors of warp-knitted spacer fabrics impregnated with shear thickening fluid, *Composites Science and Technology*, Vol. 88, pp. 184-189, 2013.
- [7] Y. Park, Y. Kim, A. H. Baluch, C.-G. Kim, Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 72, pp. 67-74, 2014.
- [8] V. Tan, C. Lim, C. Cheong, Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 207-222, 2003.

(5) در نظر گرفته شود و مطابق تحقیقات گذشته فقط اثر اصطکاک متناظر با اثر سیال ضخیم شونده برشی لحاظ شود، نفوذ پرتابه 19 mm می‌شود. با در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی این مقدار به 14 mm کاهش می‌یابد که با مقدار آزمایشگاهی 11 mm تطابق خوبی دارد و مؤثر بودن در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی نیز، در حالت بدون در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده برشی، باعث کاهش 43 درصدی نفوذ پرتابه در پارچه آغشته به سیال نسبت به پارچه خشک می‌شود و با در نظر گرفتن اثر جرم سیال این مقدار به 58 درصد می‌رسد.

در پژوهش‌های قبلی، فقط به پیچیده بودن بر هم کنش بین نخ‌های پارچه و پرتابه با پارچه اشاره شده است و ذکر شده که عوامل بیشتری غیر از اصطکاک در مکانیزم جذب انرژی پرتابه در اثر برخورد با پارچه آغشته به سیال ضخیم شونده دخیل و کوپل هستند. در اینجا سعی شده یکی از عوامل مجهول و مؤثر معرفی شود که پس از بررسی اثر چگالی پارچه، این نتیجه حاصل شد که با در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده و به تبع آن در نظر گرفتن جرم آن در محاسبه چگالی پارچه و افزودن آن به چگالی نخ مدل‌سازی شده، نتایج عددی همخوانی خیلی بهتری دارند و همچنین نحوه تغییر شکل پارچه نیز به حالت تجربی بسیار نزدیک است. با مقایسه انجام گرفته، اهمیت اثر پارامتری به نام چگالی پارچه ظاهر می‌شود و در نتیجه لحاظ کردن اندازه چگالی در این گونه مطالعات ضروری است.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تلاش‌های جاری و انجام تحقیقات در زمینه زره نرم، بیشتر در جهت بهبود عملکرد این زره‌ها در مقابل نفوذ ضربه است تا کمترین آسیب به بدن انسان مورد هدف برسد. عوامل زیادی در فرایند جذب انرژی توسط الیاف پارچه نقش دارند. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به انرژی جذب‌شده به واسطه تغییر شکل پارچه، شکست الیاف و نخ‌ها، تغییر شکل پرتابه و اصطکاک نخ‌ها باهم و اصطکاک بین پارچه و گلوله اشاره کرد. به منظور شناخت این عوامل، شبیه‌سازی‌ها انجام گرفت که در این بررسی‌ها، نفوذ پرتابه به پارچه (متناظر با عقب‌نشینی پارچه در خمیر) در اثر ضربه پرتابه کروی به عنوان معیاری از عملکرد پارچه مورد بررسی قرار گرفته است.

هرچه اصطکاک بین تاروپود پارچه بالاتر باشد به واسطه مشارکت ناحیه وسیعی از پارچه در جذب انرژی پرتابه، عملکرد پارچه در مقابل ضربه پرتابه بهتر خواهد بود. در تست‌های ضربه روی پارچه خشک، همواره تاروپود در ناحیه ضربه از داخل پارچه کشیده می‌شوند و سطح زیادی از پارچه دچار کشیدگی می‌شود و این در حالی است که در پارچه‌های آغشته به سیال ضخیم شونده برشی، نخ‌های پارچه بطور مؤثر با هم درگیر شده و این برهم‌کنش به جذب انرژی بیشتر کمک می‌کند و به واسطه افزایش انسجام نخ‌ها، پارچه مانند یک جسم جامد در مقابل ضربه عمل می‌کند.

مشابه مطالعات گذشته، عامل اصطکاک را می‌توان متناظر با درصد جرمی سیال ضخیم شونده در نظر گرفت و در شبیه‌سازی‌ها، متناظر با درصد جرمی سیال ضخیم شونده اضافه‌شده، ضرایب اصطکاک را اختیار کرد و مدل‌سازی را انجام داد. علاوه بر این، چگالی به عنوان عوامل مؤثر در شبیه‌سازی و رفتار واقعی پارچه معرفی شد و مشاهده شد با در نظر گرفتن اثر جرم سیال ضخیم شونده و افزودن این مقدار جرم متناظر با افزایش چگالی نخ پارچه، می‌توان به نتایج دقیقی دست یافت.

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 88, pp. 263-271, 2016.
- [19] Y. Park, Y. Kim, A. H. Baluch, C.-G. Kim, Numerical simulation and empirical comparison of the high velocity impact of STF impregnated Kevlar fabric using friction effects, *Composite Structures*, Vol. 125, pp. 520-529, 2015.
- [20] M. Fahool, A. R. Sabet, Parametric study of energy absorption mechanism in Twaron fabric impregnated with a shear thickening fluid, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 90, pp. 61-71, 2016.
- [21] S. Sockalingam, S. C. Chowdhury, J. W. Gillespie, M. Keefe, Recent advances in modeling and experiments of Kevlar ballistic fibrils, fibers, yarns and flexible woven textile fabrics—a review, *Textile Research Journal*, pp. 1-27, 2016.
- [22] J. Moon, G. Son, Y. Park, C. Kim, The effect of number of fabric on CFRP-fabric hybrid composite impact shield performance, *Proceedings of The 18th International conference of composite materials*, Jeju, Korea, August 21-26, 2011.
- [23] C. Lim, V. Shim, Y. Ng, Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 13-31, 2003.
- [24] B. Briscoe, F. Motamedi, The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction, *Wear*, Vol. 158, No. 1-2, pp. 229-247, 1992.
- [25] Y. S. Lee, E. D. Wetzel, N. J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *Journal of materials science*, Vol. 38, No. 13, pp. 2825-2833, 2003.
- [26] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, B. Cheeseman, 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.
- [27] A. Gasser, P. Boisse, S. Hanklar, Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests, *Computational materials science*, Vol. 17, No. 1, pp. 7-20, 2000.
- [9] M. Decker, C. Halbach, C. Nam, N. Wagner, E. Wetzel, Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 3, pp. 565-578, 2007.
- [10] V. Tan, T. Tay, W. Teo, Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions, *International Journal of Solids And Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 1561-1576, 2005.
- [11] H. Talebi, S. Wong, A. Hamouda, Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric, *Composite Structures*, Vol. 87, No. 4, pp. 314-320, 2009.
- [12] B. A. Cheeseman, T. A. Bogetti, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 161-173, 2003.
- [13] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, The role of shear-thickening fluids (STFs) in ballistic and stab-resistance improvement of flexible armor, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 4, pp. 1182-1196, 2014.
- [14] a. khodadadi, g. liaghat, m. a. akbari, m. tahmasebi abdar, 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. 124-133, 2013. (in Persian فارسی)
- [15] Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, G. Wells, A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 68, pp. 259-265, 2015.
- [16] G. Nilakantan, M. Keefe, E. D. Wetzel, T. A. Bogetti, J. W. Gillespie, Computational modeling of the probabilistic impact response of flexible fabrics, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 12, pp. 3163-3174, 2011.
- [17] G. Nilakantan, J. W. Gillespie, Ballistic impact modeling of woven fabrics considering yarn strength, friction, projectile impact location, and fabric boundary condition effects, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 12, pp. 3624-3634, 2012.
- [18] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, H. Babaei, M. Rezaei, The influence of carbon nanotubes on quasi-static puncture resistance and yarn pull-out behavior of shear-thickening fluids (STFs) impregnated woven fabrics,