



Numerical Analysis of Inter-Yarn Friction Effects on the Single-Layer High-Strength Woven Fabrics under High-Velocity Impact

M. B. Olyaei, I. Ahmadi*

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT: It is known that friction has a significant effect on the determination of the ballistic impact performance of woven fabrics. In this paper, the ballistic behavior of fabrics woven from Twaron and Dyneema aramid fibers against the high-velocity impact of a cylindrical projectile is investigated. This paper aims to numerically figure out the effects of inter-yarn friction performance including transverse deformation of fabrics, overall energy absorption and the forms of energy absorption. The numerical results show that increasing inter-yarn friction decreases the transverse deflection abilities of the fabrics and subsequently the response modes of them will transfer from a localized response to a globalized one. With the increase of inter-yarn friction, the energy absorption rate monotonously increases, while the failure time firstly decreases and then increases but further decreases again. Increasing inter-yarn friction also affects the forms of energy absorption. Near zero friction coefficients, strain energy is the dominant failure mechanism of a fabric. With the increase of inter-yarn friction, kinetic energy becomes the dominant failure mechanism. The frictional dissipation energy absorption is maximized for finite inter-yarn friction. Experimental results were used to validate the results. The predicted values of the model show a good agreement with the experimental data. The correlation coefficient was 0.9426, which verified the accuracy of the simulation.

Review History:

Received: 25 Feb. 2019
Revised: 10 May. 2019
Accepted: 16 Jun. 2019
Available Online: 7 Jul. 2019

Keywords:

Inter-yarn friction
Ballistic impact
Transverse deflection ability
Aramid
Energy absorption

1- Introduction

One of the essential topics in impact mechanics is investigating the penetration process, which is the basis for designing armored planes, protecting against the penetration of the projectiles. In recent years, the investigation of the various mechanisms for increasing energy absorption by aramid yarns has been in the spotlight. Briscoe and Motamedi [1] have investigated the inter-yarn friction in the aramid fabrics with different textures. They found out that, during impact, the higher the velocity of the projectile the more inter-yarn friction should be considered to improve the ballistic performance of the aramid yarns. Ha-Minh et al [2], to investigate the ballistic performance of the aramid yarns, investigated the inter-yarn friction effect of aramid fabrics separately, the same goes for the inter-yarn friction effect between the projectile and fabric. Their results showed that inter-yarn friction contributes significantly to the structural continuity of the aramid fabric during impact, enhancing the ballistic performance of the yarns. Investigating the ballistic behavior of the aramid yarns made of Twaron against the high-speed impact of the cylindrical projectile, Falahatgar and Olyaei [3] found that increasing the friction between aramid yarns leads to projectile energy distribution between more yarns of the aramid fabric, increasing the yarn failure time. Khodadadi et al [4] explored the factors involved in the ballistic performance of the Kevlar fabrics. With experimental works based on flat and spherical projectiles, they found that fabric's yarns, during the flat

projectile impact, not only experience tensile stress but also undergo shear stress. The main purpose of the current article is to numerically investigate the inter-yarn friction effect in impact-absorbing ballistic fabrics with different Young modulus during the impact of the flat projectile.

2- Simulation Work

Based on the experimental work done by Wang et al [5], the finite element model with the aid of ABAQUS software is used to simulate the ballistic impact test of a cylindrical projectile. Modeling the aramid fabric yarns are done on the yarn level. The cross-section of the yarn is like a lens which is constant throughout the curvature of the yarn. Fig. 1 shows the yarn cross-section.

L is the wavelength, which is two times the warp and weft density. R is the arch radius for the yarn cross-section, a and b are the half-width and half-height of the yarn cross-section, respectively. Mass sensitivity analysis showed that for yarn

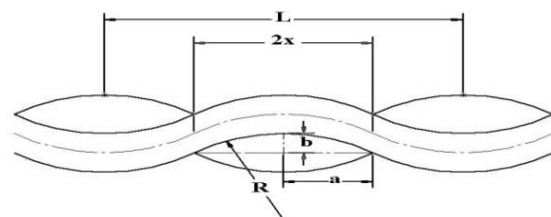


Fig. 1. The schematics of the yarn cross-section

*Corresponding author's email: nozar@ssau.ac.ir



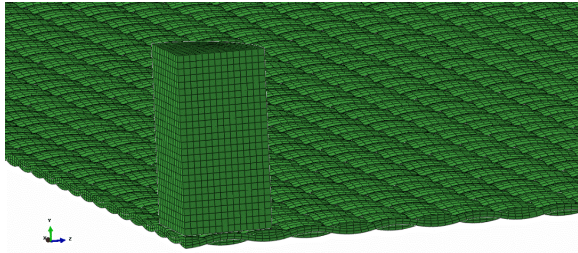


Fig. 2. The overall outlook of the numerical model of the projectile and the fabric

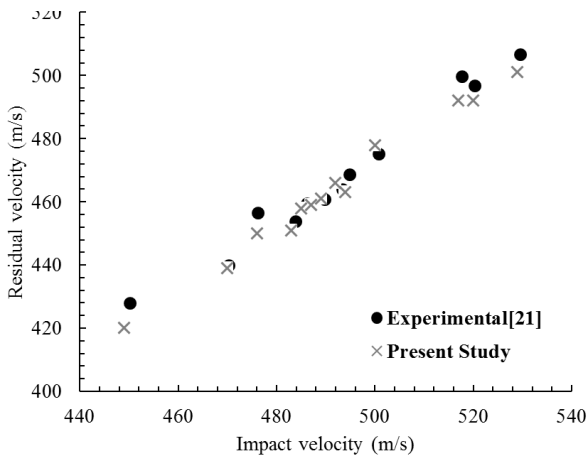


Fig. 3. Comparing the residual velocities between the experimental test and numerical model in a single-layer yarn

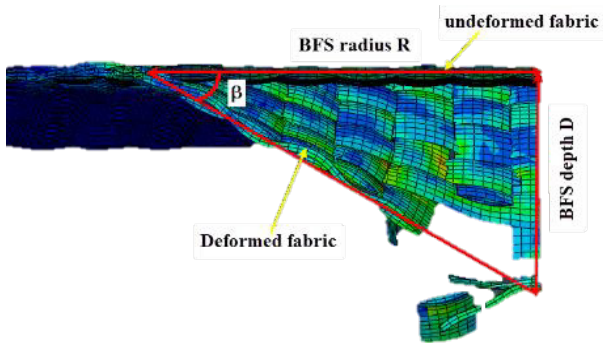


Fig. 4. The illustration of the pyramidal fabric deformation

cross-section 10 elements and for yarn wavelength 24 elements should be considered [6]. In the finite element model, the fabric is a hexahedron element with eight nodes (C3D8R). For the yarn model, the properties of the homogenous and isotropic materials are used. Fig. 2 shows the numerical model, demonstrating the projectile's position on the fabric.

In this paper, to investigate the inter-yarn friction effects, two Young models are used. According to Young's modulus of the Twaron yarn, the first modulus is 72 GPa and according

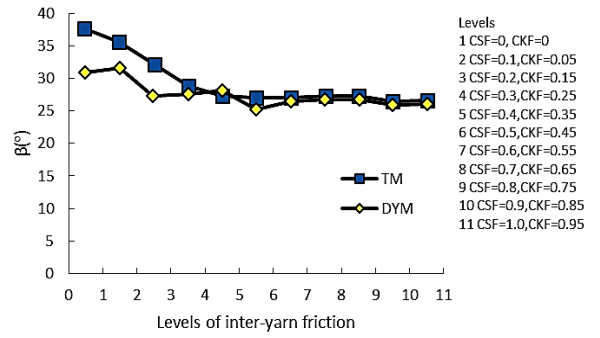


Fig. 5. The β as the function of inter-yarn friction

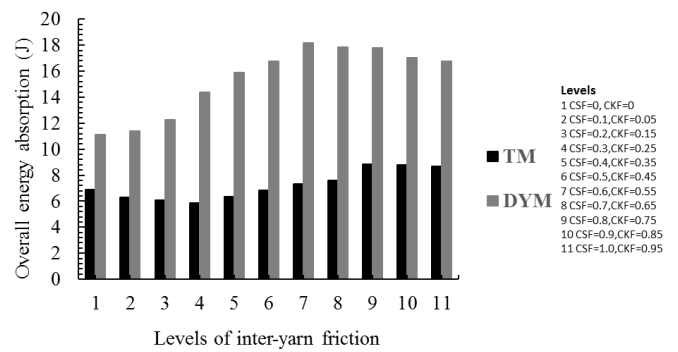


Fig. 6. The trend in the overall amount of the absorbed energy throughout the changes in inter-yarn friction

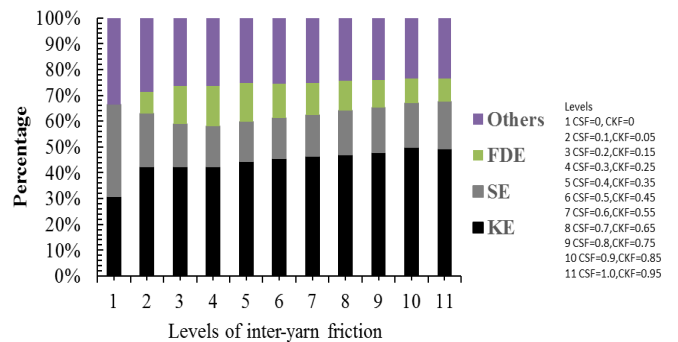


Fig. 7. The percentage of the absorbed energy in TM through energy loss by the friction (FDE), strain energy (SE), and kinetic energy (KE)

to Young's modulus of Dyneema fabric, the second one is 112 GPa. The yarn density is considered 1268 kg/m³. Poisson's ratio for aramid yarns and projectile is 0.3 [7]. The projectile is modeled as a steel cylindrical rigid body with a diameter of 5.5 mm and a mass of 1 g. In order to explore the inter-yarn friction changes in the fabric, static friction coefficients in 0 to 1 interval and kinetic friction coefficients in 0.05 to 0.95 are used. The interval for the input velocity of the test is 450 to 530 m/s. Fig. 3 shows the verification results. It also demonstrates the residual velocities from the numerical solution and the results

of the experimental test during the impact with a layer of the Twaron yarn in comparison with the input velocities during eleven tests. The results from the finite element solution are in good alignment with the experimental test. In addition, the linear equation $y=0.9058x+35.868$ is evident between the residual velocities of the projectile stemming from the numerical and experimental results.

3- Results and Discussion

Once the projectile collides with the aramid fabric in the ballistic test, due to the transverse deflection the fabric becomes like a pyramid. Fig. 4 shows the angle change after the collision. The angle is calculated by Eq. (1).

As the inter-yarn friction increases, the transverse deflection changes of the fabric are shown in Fig. 5. Once the inter-yarn friction exceeds a certain amount, the transverse deflection capability of the fabric is no longer affected by the friction, going on with a constant trend.

Fig. 6 demonstrates the energy absorption variations based on the inter-yarn friction coefficients in two fabric models of Twaron and Dyneema. The results indicate that when the inter-yarn friction exceeds a certain amount, energy absorption reduces. A certain amount happens when the inter-yarn friction changes from zero to 0.3 for static friction and 0.25 for kinetic friction. In this interval, the total energy absorption in Dyneema fabric increases as the inter-yarn friction goes up, but the opposite is true for Twaron fabric, meaning that it decreases. Therefore, the total absorbed energy in Dyneema fabric is higher than that of Twaron, the reason for which is that the higher Young's modulus the better it can spread the impact energy, involving more yarns.

Failure time is the time needed for the fabric to be torn completely, which is of utmost importance in the ballistic test. In Twaron fabric, as the static friction increases from 0.4 to 0.8 and kinetic friction from 0.35 to 0.75, the failure time increases. When the friction is higher than the static friction coefficient 0.8 and kinetic friction coefficient 0.75, the failure time decreases. In Dyneema fabric, as the inter-yarn friction increases to the static friction coefficient of 0.2 and kinetic friction coefficient of 0.15, the failure time decreases. But after that, as the inter-yarn friction increases, the failure time increases. The variations in the failure time of the yarns due to an increase in inter-yarn friction in both Twaron and Dyneema fabrics the same. However, the time difference of the fabrics in maximum and minimum states is 6 s and 2 s, respectively.

Transverse and longitudinal waves of the fabric, the deformation of the yarns and also the inter-yarn friction lead to an energy leak in the ballistic test. Therefore, the projectile energy is absorbed in these ways: strain energy, kinetic energy and the energy loss by the friction. Fig. 7 shows the absorbed energy by Twaron fabric. The results clearly show that the kinetic energy causes the yarn deformation, influencing the energy absorption significantly. In addition, when the friction coefficient approaches zero, the projectile energy absorption through strain energy is higher than that of kinetic energy since in this interval the fabric has the capability of transverse and longitudinal deflections.

The results show that as the inter-yarn friction increases, the transverse wave's velocity increases and the collision energy spreads on a wider area of the fabric. Therefore, the energy absorption rate of the projectile increases as kinetic

energy. In Twaron fabric, as the inter-yarn friction increases, at first, the energy loss stemming from the friction increases, then it decreases. When the inter-yarn friction increases too much, the yarns won't have leeway for movement hence lesser energy loss due to friction. For inter-yarn friction, there is an optimum level for each fabric, on which the highest energy loss absorption due to friction occurs, which, if recognized, it can contribute a lot to the aramid yarns performance.

4- Conclusions

The following are the fundamental results obtained from investigating the friction effect in finite element analyses of the projectile impact with aramid yarns with different Young's moduli:

In a fabric with lower Young's modulus, an increase in the inter-yarn friction causes a decrease in the transverse deflection.

When friction is zero, Twaron fabric absorbs more energy due to a higher percentage of strain energy.

An increase in the inter-yarn friction influences the type of energy absorption. When friction approaches zero, it's the strain energy that causes energy absorption in the fabric. As the inter-yarn friction increases, the kinetic energy causes energy absorption. Furthermore, it was revealed that there is a maximum level for inter-yarn friction, in which the energy absorption rate is highest due to energy loss.

References

- [1] B.J. Briscoe, F. Motamedi, The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction, *Wear*, 158(1-2) (1992) 229-247.
- [2] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crépin, A. Imad, Effect of frictions on the ballistic performance of a 3D warp interlock fabric: numerical analysis, *Applied Composite Materials*, 19 (2012) 333-347.
- [3] S. R. Falahatgar, M. Olyaei, Numerical Analysis of Ballistic Behavior of Multi-layer High-strength Woven Fabrics Under High-velocity Impact and Investigation of Inter-yarn Friction Effects, *Tabriz Mechanical Engineering*, 49(1) (2019) 199-208. (in Persian)
- [4] A. Khodadadi, G. H. Liaghat, M. Akbari, M. Tahmasebi, Numerical and experimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, *Modares Mechanical Engineering*, 13(12) (2013) 124-133. (in Persian)
- [5] Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, W. Garry, An experimental study of ply orientations on ballistic impact resistance in multiply fabric panels, *Textile Research Journal*, 86(1) (2016) 34-43.
- [6] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, S. Hosseinzadeh, On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 112 (2017) 118-124.
- [7] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and Analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 107 (2016) 257-265



تحلیل عددی اثر اصطکاک بین الیافی پارچه تک لایه با استحکام بالا تحت نیرو بالستیک به روش اجزای محدود

محمدباقر علیایی، عیسی احمدی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۴/۱۶

کلمات کلیدی:

اصطکاک بین الیافی
ضربه بالستیک
قابلیت انحراف عرضی
الیاف آرامید
انرژی جذب شده

خلاصه: اصطکاک تاثیر چشمگیری در عملکرد بالستیک الیاف آرامید دارد. در این مقاله به بررسی رفتار بالستیکی الیاف آرامید از جنس تارون و دایناما در برابر ضربه سرعت بالای پرتابه استوانه‌ای پرداخته می‌شود. از روش عددی با استفاده از دینامیک صریح نرم‌افزار آباکوس در تحلیل برخورد سرعت بالا استفاده شده است. به کمک روش عددی اثرات اصطکاک بین الیافی بر روی عملکرد بالستیک الیاف آرامید بررسی شده است. بدین منظور اثرات اصطکاک بین الیافی بر روی تغییر شکل عرضی، انرژی جذب شده و شکل‌های جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد افزایش اصطکاک بین الیافی سبب کاهش قابلیت انحراف عرضی و تغییر مد پاسخ الیاف آرامید شده است. با افزایش اصطکاک بین الیافی، نرخ انرژی جذب شده به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش اصطکاک بین الیافی، زمان شکست ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است، اما در ادامه دوباره روند کاهشی را طی می‌کند. افزایش اصطکاک بین الیافی بر شکل‌های جذب انرژی نیز تاثیر می‌گذارد. وقتی اصطکاک نزدیک صفر است، انرژی کرنش ساز و کار غالب پارچه است اما با افزایش اصطکاک بین الیافی، انرژی جنبشی به ساز و کار غالب در پارچه تبدیل می‌شود. یک مقدار مشخص برای اصطکاک بین الیافی وجود دارد که به ازای آن انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک به مقدار بیشینه می‌رسد. 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.

بر ساختار پارچه همیشه از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. بررسی‌های زیادی بر روی عملکرد بالستیک جاذب‌های ضربه انجام گرفته است. نتایج تاثیر اصطکاک بر عملکرد پارچه‌های محافظ را نشان می‌دهد [۵-۱].

بریسکو و معتمدی [۱] تاثیر اصطکاک بین الیافی در پارچه آرامید را بررسی کردند. آن‌ها از بافت‌های مختلف با ضرایب اصطکاک متفاوت استفاده کردند و دریافتند هر چه سرعت پرتابه بیشتر باشد باید اصطکاک بین الیافی نیز بیشتر در نظر گرفته شود. همچنین کاهش اصطکاک بین لایه‌ها باعث افزایش سرعت باقیمانده پرتابه پس از عبور از الیاف می‌شود. نتایج بیان می‌کند با افزایش اصطکاک بین الیافی، 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. ریویولات [۲] مطالعه بر روی اصطکاک بین تار و پود الیاف آرامید 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.

۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم مکانیک ضربه، بررسی فرآیند نفوذ است که مبنای بسیار مهمی در طراحی صفحات زرهی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه‌ها بشمار می‌آید. در سال‌های اخیر، بررسی مکانیزم‌های مختلف افزایش جذب انرژی توسط الیاف آرامید، یکی از موضوعات مورد توجه بوده است. با پیشرفت فن‌آوری و شناخت رفتار پارچه‌های آرامید در برابر ضربه بالستیک، استفاده از این مواد سبک در سال‌های اخیر برای ساخت تجهیزات محافظتی و سازه‌های مهندسی رشد چشمگیری داشته است. کاربرد گسترده این مواد در صنایع مختلف به خصوص هوافضا، ساختمان، خودروبی و نظامی اهمیت شناخت هر چه بیشتر رفتار این مواد را دو چندان می‌نماید. پارچه‌های بالستیک معمولاً از ده‌ها لایه پارچه تشکیل شده‌اند، هر لایه از این پارچه‌ها از صدها الیاف تشکیل شده است. هر الیاف نیز از هزاران فیبر تشکیل شده است. با توجه به پیچیدگی ساختار ساخت پارچه‌های محافظتی، مطالعه عوامل تاثیرگذار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: i_ahmadi@znu.ac.ir



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. تقی‌زاده و همکاران [۱۱] نفوذ شبه‌استاتیک ضربه‌زنده‌های استوانه‌ای با شکل دماغه‌های متفاوت را بر روی کامپوزیت‌های چند لایه ساخته شده از پارچه بافته شده از جنس شیشه و دایناما و صفحات آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. مکانیزم تخریب اهداف کامپوزیتی و عملکرد کامپوزیت توسط ضربه‌زنده‌ها مقایسه گردید.

شانظری و همکاران [۱۲] یک مدل بر اساس انتشار موج و معادلات تعادل انرژی برای تحلیل بالستیک پانل‌های پارچه هیبریدی ارائه نمودند. پانل‌های هیبریدی شامل پارچه‌های بافته شده در لایه جلویی تحت ضربه و پارچه تک‌جهته در لایه پشتی بود. لیاقت و همکاران [۱۳] 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 استفاده از شبیه‌سازی عددی، فرآیند نفوذ توسط کد اجزاء محدود ال‌اس‌داینما مدل‌سازی شده است. تان و همکاران [۱۴] اثر شرایط مرزی الیاف آرامید تحت ضربه بالستیک را توسط المان محدود بررسی نمودند. بدین منظور دو سری تست ضربه انجام گرفت. در سری اول پارچه در چهار لبه کاملاً ثابت شده و در سری دوم دو لبه پارچه ثابت و دو لبه آن آزاد در نظر گرفته شد. سرعت باقی‌مانده پرتابه پس از برخورد پرتابه به هدف در نمونه‌ها براساس تست‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی بدست آمد. نتایج بیانگر افزایش سرعت حد بالستیک در حالت چهار طرف ثابت پارچه به نسبت دو طرف ثابت و دو طرف آزاد بودن آن است. هدایتیان و همکاران [۱۵] رفتار سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی، تحت ضربه سرعت بالا را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در روش عددی برای مدل‌سازی پوسته و تقویت‌کننده‌ها از المان‌های جامد سه‌بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل مادری ویبومت بر مبنای معیارهای آسیب پاک و هاشین سه‌بعدی استفاده شد. نمودارهای تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گسترده‌گی سطح خرابی و

مین و همکاران [۳] اثر اصطکاک بین الیاف و همچنین بین پرتابه و الیاف را بر روی عملکرد بالستیک پارچه آرامید به‌صورت مجزا بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد، اصطکاک بین نخ‌ها به حفظ پیوستگی ساختاری الیاف در حین برخورد کمک می‌کند. زنگ و همکاران [۴] در یک بررسی عددی اصطکاک بین تار و پود الیاف آرامید بکار رفته در ساخت زره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست 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. فلاح‌تگر و اولیایی [۵] رفتار بالستیکی الیاف آرامید از جنس تارون را در برابر ضربه سرعت بالای پرتابه استوانه‌ای با استفاده روش عددی بررسی کردند. 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 تک‌لایه با ضریب اصطکاک بالاتر انرژی بیشتری به نسبت الیاف با ضریب اصطکاک پایین‌تر جذب می‌کنند.

کرکوود و همکاران [۶ و ۷] مدلی توسعه‌یافته برای پیش‌بینی نیرو و انرژی نخ به عنوان تابعی از میزان کشیدگی الیاف آرامید ارائه دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نتایج تست‌های شبه‌استاتیک کشیدگی نخ می‌تواند از نظر مقداری با جابجایی دینامیکی نخ در حین ضربه بالستیک ارتباط داده شود. نیلاکانتان و همکاران [۸] تست‌های ضربه روی پارچه‌های بافته شده از الیاف آرامید با استحکام بالا را انجام دادند. نمونه‌های پارچه تحت اثر ضربه از زیر گیره می‌لغزیدند. تاثیر فشار برای مهار پارچه زیر گیره با اعمال گشتاور به پیچ‌هایی که برای نگه داشتن دو فک گیره می‌باشد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که با لغزش کمتر پارچه زیر گیره، میزان شکست پارچه‌ها تحت ضربه افزایش می‌یابد. طالبی و همکاران [۹] اثر زاویه نوک پرتابه بر میزان نفوذ را بر روی الیاف آرامید بررسی کردند. در این تحلیل تاثیرات چندین پارامتر از جمله انرژی جذب شده، میزان فرورفتگی به وجود آمده ناشی از ضربه و توزیع تنش برای زوایای مختلف بررسی شد. خدادادی و همکاران [۱۰] 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

چکش پرتابه‌ای پرداختند. آن‌ها مدل‌های بی‌بعدی برای چگالی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به شکل توابع ریاضی ارائه دادند. هدف از تعیین این مدل، پیش‌بینی قابل اطمینان و رضایت بخشی برای خواص نهایی قطعه تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای بود. نتایج استفاده از مدل‌های ریاضی ارائه شده برای خواص نهایی قطعه تحت بارگذاری ضربه‌ای را مطلوب پیش‌بینی کرده است.

تحقیقات انجام شده 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. تاثیر اصطکاک بین‌الیافی بر ساز و کار شکست پارچه بر اساس نقش الیاف اولیه و ثانویه بسیار زیاد است. گرچه تحلیل‌های عددی برای تحلیل‌های بالستیک به طور گسترده بکار گرفته می‌شود اما بررسی مکانیک شکست مرتبط با اصطکاک بین الیافی هنوز هم برای درک کامل نیاز به آزمایشات و مطالعات بیشتری دارد. هدف اصلی این مقاله، بررسی عددی اثر اصطکاک بین الیافی در پارچه‌های بالستیک جاذب ضربه طی برخورد پرتابه سر تخت می‌باشد. اثرات اصطکاک بین‌الیافی بر عملکرد بالستیک رفتار پارچه‌های آرمید از لحاظ انرژی جذب شده و مدهای پاسخ پارچه که برای مهندسی و بهبود عملکرد بالستیک پارچه‌های محافظ ضربه بسیار حائز اهمیت است، بررسی شده است.

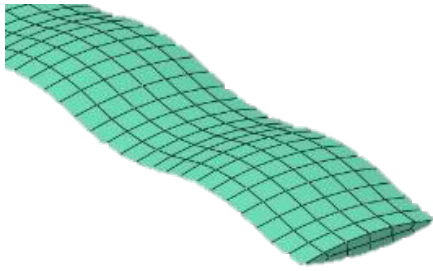
۲- شبیه‌سازی المان محدود پارچه‌های بافته شده

۲-۱- مدل هندسی پارچه

در این مقاله از مدل المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی ضربه عرضی یک پرتابه استوانه‌ای به پنل الیاف بافته شده طبق کار تجربی وانگ و همکاران [۲۱] استفاده شده است. مدل‌سازی تار و پود در سطح نخ انجام گرفته است. شکل سطح مقطع نخ عدسی فرم و در طول مسیر منحنی ثابت باقی می‌ماند. تراکم رشته تار و پود 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. پارچه به شکل یک دایره با شعاع ۷/۵ سانتی‌متر می‌باشد. نمایی از سطح مقطع پارچه در شکل ۱ نشان داده شده است.

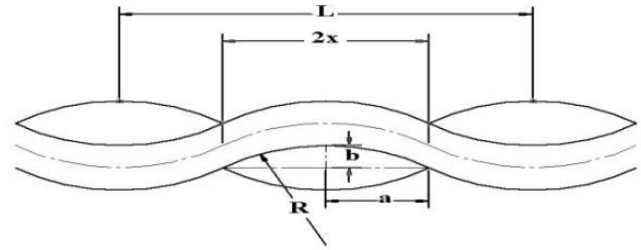
طول موج مسیر نخ دو برابر تراکم رشته‌ها می‌باشد. ارتفاع سطح مقطع نخ نیز یک‌چهارم ضخامت الیاف است. دیگر پارامترهای هندسی برای مدل‌سازی نخ طبق رابطه (۱) بدست می‌آیند:

مکانیزم‌های مختلف شکست به عنوان نتایج گزارش شدند. بابایی و همکاران [۱۶] 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 قابل اطمینان و رضایت بخش نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت آن تحت بارگذاری ضربه‌ای است. مهربانی و همکاران [۱۷] به صورت تجربی تأثیر شکل دماغه‌های تخت، مخروطی، نیم‌کروی و اجیوال (نوکتیز) و همچنین سرعت اولیه آن‌ها بر عملکرد بالستیک کامپوزیت چند لایه شیشه-پوکسی با الیاف بافته شده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین اختلاف ما بین عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود. یانگ و چن [۱۸] 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. طاولی و همکاران [۱۹] درصد تخلخل و توزیع چگالی قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم پودر را تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای مورد بررسی تجربی و تحلیلی قرار دادند. در بخش تجربی، با استفاده از پودر آلومینیوم خالص، به بررسی تأثیرپذیری چگالی از اندازه دانه و سطوح انرژی متفاوت پرداختند. آن‌ها در بخش تحلیلی، با در نظر گرفتن یک المان کوچک از قطعه در حال تراکم و استفاده از معادلات تعادل، معادله بقای جرم و معیار لوی میز، رابطه‌ای برای چگالی نهایی قطعه به دست آوردند. همچنین با به‌کارگیری دو کمیت ثابت ضریب شکل و کار سختی در روابط تحلیلی، اثرات این دو عامل بر درصد تخلخل و توزیع چگالی قطعات تولیدشده بررسی شد. بابایی و همکاران [۲۰] به بررسی تجربی و عددی خواص مکانیکی قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم پودر تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ پایین توسط سامانه



شکل ۲: تصویر الیاف مش

Fig. 2. The mesh image of the yarn



شکل ۱: نمای شماتیک سطح مقطع نخ

Fig. 1. The schematics of the yarn cross-section

توپر شش‌وجهی هشت‌گره‌ای^۱ می‌باشد. ثابت‌های مواد برای الیاف پارچه بالستیک غالباً به ویژگی‌های کششی و طولی بستگی دارند، اگرچه الیاف واقعی از توده فیبرهایی با ویژگی‌های ارتوتروپیک تشکیل شده‌اند [۲۳]. اما بررسی‌های قبلی نشان‌دهنده اختلاف بسیار کوچک، حدود ۲/۴ درصد در میزان جذب انرژی بین مواد ایزوتروپیک و ارتوتروپیک است، بنابراین خاصیت جنس ماده به منظور ساده‌سازی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است [۲۴ و ۲۵]. در این مقاله نیز خواص مواد همگن و همسانگرد برای مدل نخ استفاده شد. در شکل ۳ نمایی از مدل عددی قرارگیری پرتابه بر روی لایه پارچه آورده شده است.

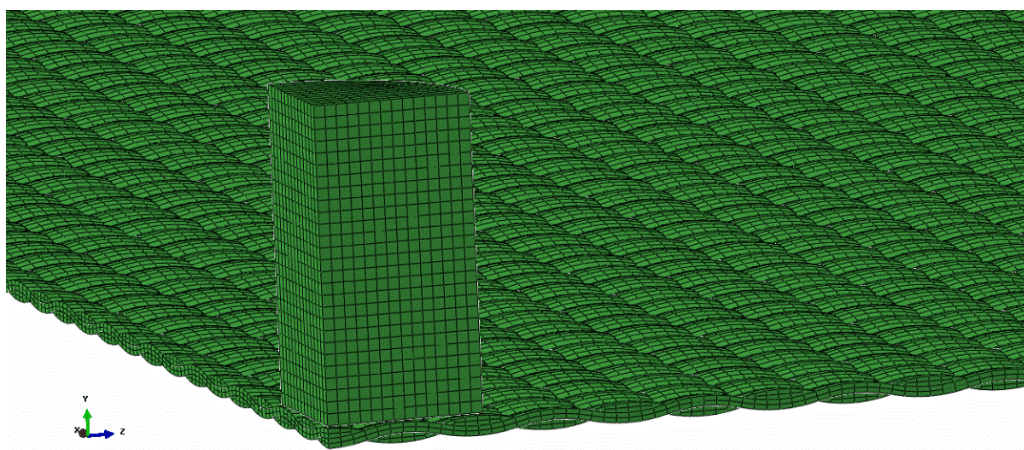
در این مقاله اثرات اصطکاک بین‌الیافی، برای دو مدل یانگ مختلف بررسی شده است. یکی از مدل‌ها ۷۲ گیگاپاسکال و دیگری ۱۱۲ گیگاپاسکال انتخاب شده است. براساس بررسی‌های قبلی [۴]، مدل یانگ

$$\begin{aligned} X &= L/4 \\ R_m &= (x^2 + b^2)/2b \\ R_i &= R_m - b \\ a &= (2bR_i - b^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادلات، L نشان‌دهنده 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.

۲-۲- مدل المان محدود

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با انجام آنالیز حساسیت مش مشخص شد که برای سطح مقطع نخ ۱۰ المان و برای طول موج نخ تعداد ۲۴ المان مناسب می‌باشد [۲۲]. مدل المان محدود پارچه دارای المان



شکل ۳: نمای کلی مدل عددی پرتابه و پارچه

Fig. 3. The overall outlook of the numerical model of the projectile and the fabric

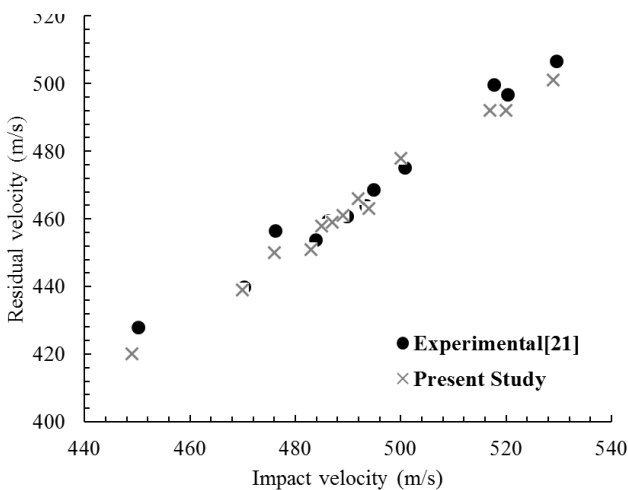
آزمایش بالستیک تجربی انجام شده می‌باشد، محدوده سرعت‌های ورودی آزمایش بین ۴۵۰ الی ۵۳۰ متر بر ثانیه است. از آنجایی که سرعت برخورد و سرعت باقیمانده پرتابه قابل اندازه‌گیری می‌باشد، تغییرات میزان افت انرژی پرتابه با در اختیار داشتن این سرعت‌ها قابل محاسبه است [۳۳ و ۳۴]. با اندازه‌گیری انرژی جذب شده توسط الیاف بافته شده در حالت نفوذ، عملکرد بالستیکی پارچه‌های محافظ مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر نیروی خارجی اعمال نشود و از انرژی تلف شده با تغییر شکل پرتابه، اصطکاک بین ملکولی نخ‌ها و مقاومت هوا چشم‌پوشی شود، آن‌گاه می‌توان فرض کرد که انرژی از دست رفته پرتابه به طور کامل توسط پارچه جذب شده است که توسط قانون پایستگی انرژی بیان می‌شود. میزان انتقال انرژی بین پرتابه و پارچه از طریق رابطه (۳) تعیین می‌گردد [۳].

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

که در آن m جرم پرتابه و V_s سرعت لحظه برخورد و V_r سرعت باقی‌مانده پرتابه است.

۲-۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی المان محدود

نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در شکل ۴



شکل ۴: مقایسه سرعت‌های باقی‌مانده در آزمایش تجربی و مدل عددی حاضر در الیاف تک‌لایه

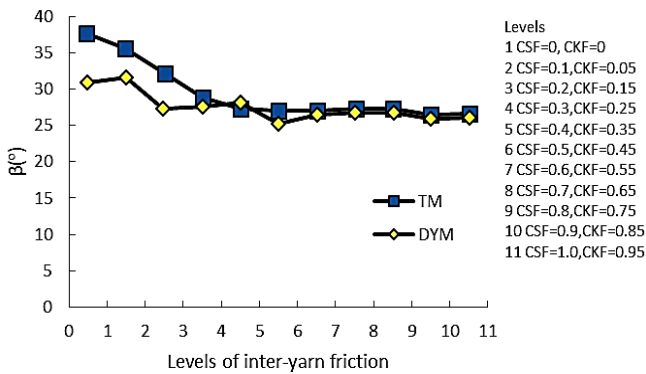
Fig. 4. Comparing the residual velocities between the experimental test and numerical model in a single-layer yarn

الیاف تارون برابر با ۷۲ گیگاپاسکال می‌باشد که مدول اول براساس آن انتخاب شد. مدول دوم نیز براساس مدول یانگ الیاف دایناما انتخاب شده است. در پژوهش کوه و همکاران [۲۶] و هوانگ و همکاران [۲۷]، مدول یانگ الیاف دایناما تقریباً برابر ۸۰ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد. این در حالی است که براساس آزمایشات راسل و همکاران [۲۸]، مدول یانگ دایناما حدود ۱۳۰ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. آن‌ها این تفاوت را به روش اندازه‌گیری و لغزش بین نمونه و گیره‌ها احتمال داده‌اند. در مراجع دیگر، مدول یانگ برای الیاف دایناما برابر با تقریباً ۱۱۵-۱۰۷ گیگاپاسکال بدست آورده‌اند [۲۹ و ۳۰]. این دو الیاف تقریباً ویژگی خطی الاستیکی دارند که تا زمان شکست آن را حفظ می‌کنند بنابراین کرنش الاستیک‌شان ۰/۰۴۲۸ و کرنش پلاستیک ۰/۰۰۱ تعیین شده است. از آنجایی که مدول دایناما برابر با ۱۱۲ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است، تنش شکست آن باید بزرگ‌تر از الیاف تارون باشد، بنابراین مقدار این تنش از رابطه (۲) برابر ۵/۱۱ گیگاپاسکال بدست می‌آید. این فرمول در مرجع راهنمای آباکوس ارائه شده است [۳۱].

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$

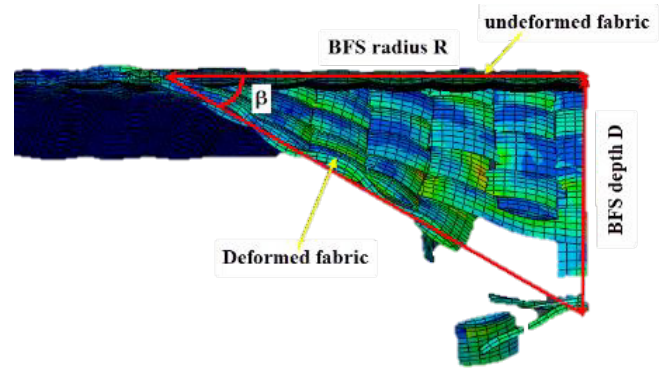
ϵ_{nom} مجموع کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک می‌باشد. σ_{nom} حاصل‌ضرب مدول یانگ الاستیک و کرنش الاستیک می‌باشد. به منظور مقایسه این دو مدل، سایر ویژگی‌های مواد در آن‌ها یکسان در نظر گرفته شده و براساس الیاف تارون تعیین می‌شوند، چون تراکم فشرده‌سازی فیبرهای تارون برابر با ۰/۸۹ است، مقدار چگالی الیاف برابر با ۱۲۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. نسبت پواسون برای الیاف تارون برابر با ۰/۳ مشخص می‌گردد [۳۲].

پرتابه به‌صورت استوانه‌ای فولادی سر تخت با قطر و ارتفاع ۵/۵ میلی‌متر با جرم ۱ گرم مدل‌سازی شده است. از آنجایی که پرتابه در کل فرآیند تغییر شکل نمی‌دهد، در تحلیل عددی به صورت یک جسم صلب تعریف می‌شود. نسبت پواسون پرتابه برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۹]. ضریب اصطکاک استاتیکی و ضریب اصطکاک جنبشی برای مشخص کردن تغییرات اصطکاک بین‌الیافی در پارچه در نظر گرفته شده‌اند. مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی از ۰ تا ۱ و ضریب اصطکاک جنبشی از ۰/۰۵ تا ۰/۹۵ متغیر می‌باشد. سرعت اولیه برخورد پرتابه در شبیه‌سازی انجام شده برابر با ۴۷۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که برابر با میانگین سرعت‌های



شکل ۶: مقدار β به صورت تابع اصطکاک بین الیافی

Fig. 6. The β as the function of inter-yarn friction



شکل ۵: منطقه تغییر شکل هرم تولید شده در پارچه‌های بافته شده

Fig. 5. The illustration of the pyramidal fabric deformation

هستند. هر چه زاویه β کوچک‌تر باشد، نتیجه بهتری حاصل می‌شود چون بیانگر این است که پارچه در هنگام تاثیر بالستیک کمتر دچار انحراف عرضی شده، پس تعداد صدمات وارد شده بر آن کمتر می‌باشد.

شکل ۶ روند تغییرات زاویه β را در هنگام افزایش اصطکاک بین الیافی نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کند وقتی اصطکاک بین الیافی از مقدار ۰ به مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۴ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۳۵ افزایش یابد، مقدار زاویه کاهش می‌یابد. نتایج بیان می‌کند که پس از این که اصطکاک بین الیافی از یک مقدار معین فراتر رود، قابلیت انحراف عرضی دیگر تحت تاثیر اصطکاک آن قرار نمی‌گیرد.

وقتی دامنه تغییرات ضرایب اصطکاک در سطح پایینی قرار دارد، افزایش اصطکاک بین الیافی تاثیر کاهنده بیشتری بر قابلیت انحراف عرضی در پارچه تارون در مقایسه با پارچه دایناما خواهد داشت. نتایج بیانگر این است که قابلیت انحراف عرضی پارچه با مدول عرضی الیافی ارتباط دارد و هر چه مدول عرضی بیشتر باشد، احتمال این که پارچه مورد نظر تحت تاثیر انحراف عرضی قرار گیرد، کمتر خواهد بود. از آنجایی که مدول عرضی رابطه مثبتی با مدول ینانگ الیافی دارد، پس مدول عرضی الیافی دایناما بزرگ‌تر از الیافی تارون است و قابلیت انحراف عرضی پارچه دایناما کمتر از پارچه تارون خواهد بود. بنابراین، قابلیت انحراف عرضی پارچه تارون در مقایسه با پارچه دایناما بیشتر تحت تاثیر افزایش اولیه اصطکاک بین الیافی قرار خواهد گرفت.

۳-۱-۲- مدهای پاسخ عرضی پارچه

در آزمایش بالستیک، احتمال پاسخ غیرموضعی پارچه پس از برخورد بیش از احتمال پاسخ موضعی است. پاسخ موضعی به معنای آن است که

سرعت‌های باقی‌مانده حاصل از حل عددی و نتایج آزمایش تجربی در برخورد پرتابه به یک لایه از الیافی بافته شده تارون، نسبت به سرعت‌های ورودی یکسان پرتابه در طی یازده آزمون نشان داده شده است. نتایج حاصل از حل المان محدود تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش تجربی دارند. همچنین رابطه خطی $Y = 868/35 + 9085X/0$ بین سرعت‌های باقی‌مانده پرتابه حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی وجود دارد. همچنین 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. از این رو می‌توان نتیجه گرفت مدل ارائه شده قابل استناد خواهد بود.

۳- شبیه‌سازی المان محدود پارچه‌های بافته شده

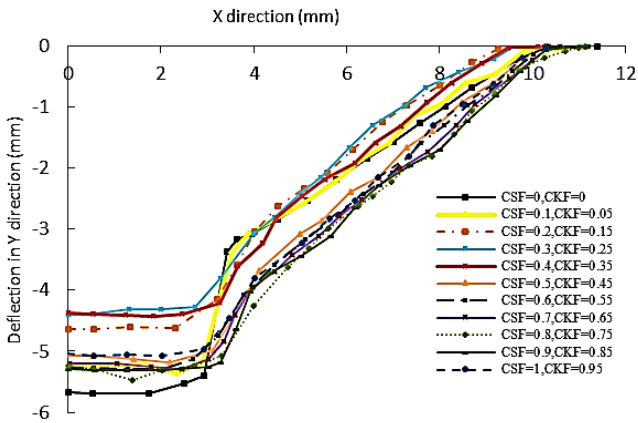
۳-۱- اثرات اصطکاک بین الیافی در تغییر شکل عرضی پارچه

۳-۱-۱- قابلیت انحراف عرضی

پس از عبور پرتابه از الیافی بافته شده در آزمون بالستیک، یک شکل هرم مانند در وجه پشتی پارچه به دلیل انحراف عرضی ایجاد می‌شود. با توجه به شکل ۵ پس از برخورد پرتابه به الیافی، زاویه‌ای بین پارچه تغییر شکل یافته و پارچه تغییر شکل نیافته ایجاد می‌شود. با توجه به رابطه (۴) این زاویه با مقدار تانژانت معکوس نسبت عمق پارچه تغییر شکل داده شده به پارچه تغییر شکل نیافته برابر است.

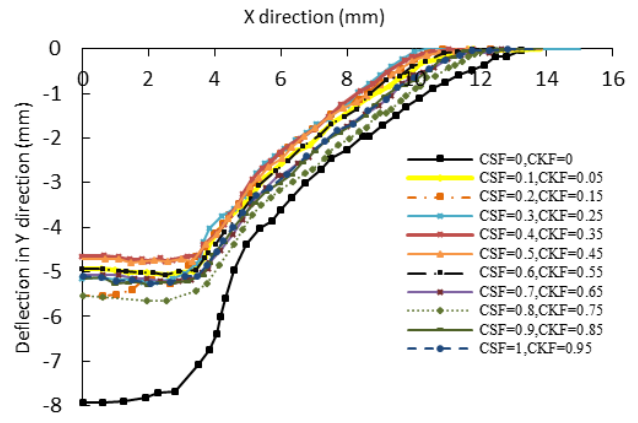
$$\beta = \tan^{-1} \frac{D}{R} \quad (4)$$

که در رابطه فوق D عمق و R شعاع قاعده پارچه تغییر شکل نیافته



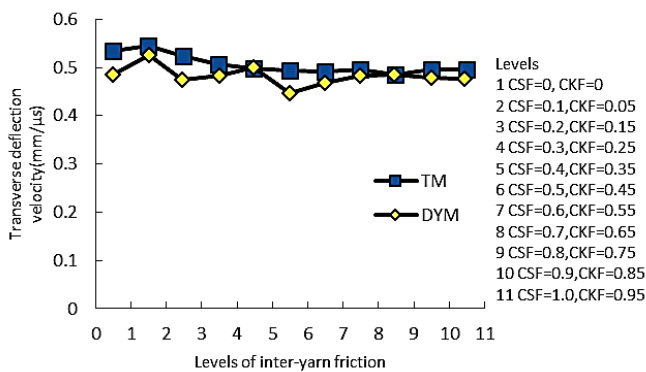
شکل ۸: پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد دایناما با سطوح متفاوت اصطکاک بین الیافی

Fig. 8. The initial yarn deformation profile based on the mid-point Dyneema impact with different inter-yarn levels



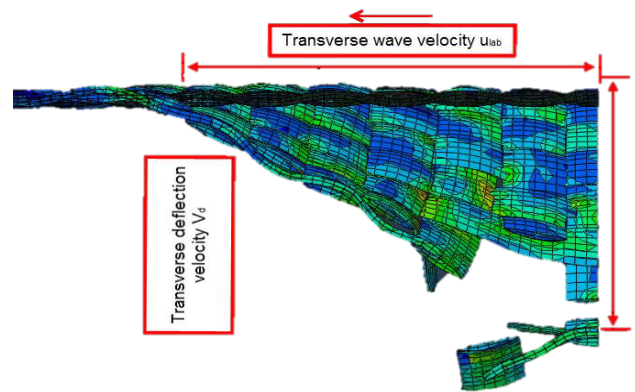
شکل ۷: پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد تارون با سطوح متفاوت اصطکاک بین الیافی

Fig. 7. The fabric response mode the back-face signatures of Twaron fabrics with different inter-yarn friction levels



شکل ۱۰: اثرات اصطکاک بین الیافی بر سرعت انحراف عرضی

Fig. 10. How inter-yarn friction affects transverse deflection velocity



شکل ۹: سرعت موج عرضی و سرعت انحراف

Fig. 9. Wave velocity in transverse and deflection states

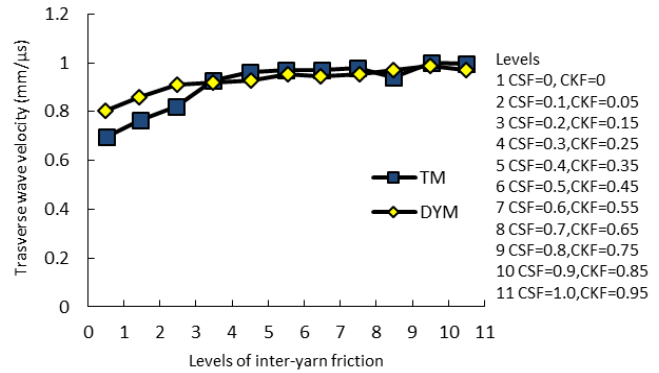
استاتیکی $0/3$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/25$ در پارچه دایناما، تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد کوچکتر از دیگر ضرایب خواهد شد. وقتی میزان تغییرات اصطکاک از این سطح افزایش می‌یابد، تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی برخورد افزایش می‌یابد. شکل ۹ بیانگر جهت‌های پیشروی سرعت انحراف عرضی و سرعت موج عرضی می‌باشد. بررسی سرعت انحراف عرضی و سرعت موج عرضی اهمیت بسیاری دارد، زیرا سرعت موج عرضی و سرعت انحراف عرضی به ترتیب نشانگر نرخ توزیع انرژی در جهت‌های افقی و عمودی می‌باشند. شکل‌های

کل انرژی پرتابه در منطقه کوچکی از پارچه توزیع خواهد شد. اما در پاسخ غیرموضعی، انرژی پرتابه در منطقه وسیع‌تری از پارچه توزیع می‌گردد. به منظور بررسی تاثیر اصطکاک بین الیافی بر روی مدهای پاسخ، ابتدا پروفیل تغییر شکل نخ اولیه برحسب فاصله از نقطه میانی تحت تاثیر اصطکاک بین الیافی پارچه‌های تارون و دایناما پس از برخورد در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مشاهدات بیان می‌کند که با افزایش اصطکاک بین الیافی مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی $0/5$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/45$ در پارچه تارون و با افزایش اصطکاک بین الیافی به مقدار ضریب اصطکاک

۳-۲- اثرات اصطکاک بین الیافی بر جذب انرژی

۳-۲-۱- جذب انرژی کل

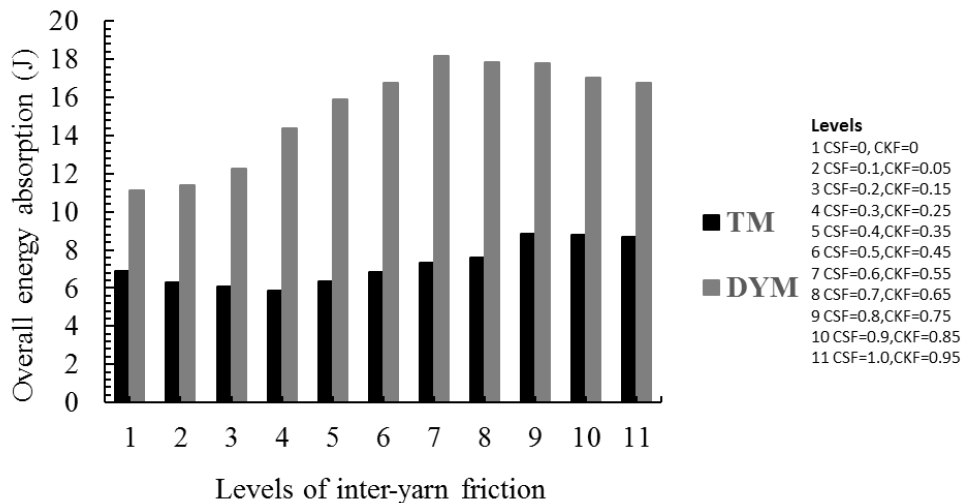
انرژی کل جذب شده پارچه برابر با کل انرژی است که پس از برخورد بالستیک توسط پارچه جذب خواهد شد و با انرژی از دست داده شده توسط پرتابه برابر است. شکل ۱۲ تغییرات انرژی جذب شده برحسب تغییر ضرایب اصطکاک بین الیافی را در دو مدل پارچه نشان می‌دهد. در مورد پارچه تارون، وقتی سطح اصطکاک بین الیافی از مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۳ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۲۵ به سطح مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۸ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۷۵ می‌رسد، انرژی جذب شده کل یک روند صعودی را طی می‌کند. در مورد پارچه دایناما، وقتی سطح اصطکاک بین الیافی از همان مقادیر به سطح مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۵ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۴۵ می‌رسد، روند افزایشی مشاهده می‌شود. وقتی اصطکاک بین الیافی خیلی افزایش یابد، جذب انرژی کمی کاهش می‌یابد. اختلاف بین این دو مورد مربوط به گستره‌ای است که اصطکاک بین الیافی در آن از مقدار ابتدایی صفر به میزان نهایی مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۳ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۲۵ می‌رسد. در این بازه، مقدار جذب انرژی کل در پارچه دایناما بتدریج با افزایش اصطکاک بین الیافی بیشتر می‌شود، اما در پارچه تارون روند معکوسی وجود دارد. همانطور که مشاهده می‌شود باید انرژی جذب شده کل در مورد دایناما بیش از تارون می‌باشد، زیرا مدول بزرگتر بهتر می‌تواند انرژی برخورد را پراکنده کرده و در نتیجه میزان



شکل ۱۱: اثرات اصطکاک بین الیافی بر سرعت موج عرضی

Fig. 11. How inter-yarn friction affects transverse wave velocity

۱۰ و ۱۱ سرعت انحراف عرضی و سرعت موج عرضی را به صورت تابعی از اصطکاک بین الیافی نشان می‌دهند. برای کاهش سرعت انحراف عرضی و افزایش سرعت موج عرضی بهتر است اصطکاک بین الیافی در مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۵ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۴۵ افزایش یابد. به عبارت دیگر، افزایش اصطکاک بین الیافی سبب خواهد شد تا پاسخ پارچه از حالت پاسخ موضعی به حالت پاسخ غیر موضعی تبدیل گردد و انرژی پرتابه در یک منطقه وسیع‌تر از پارچه توزیع شود.



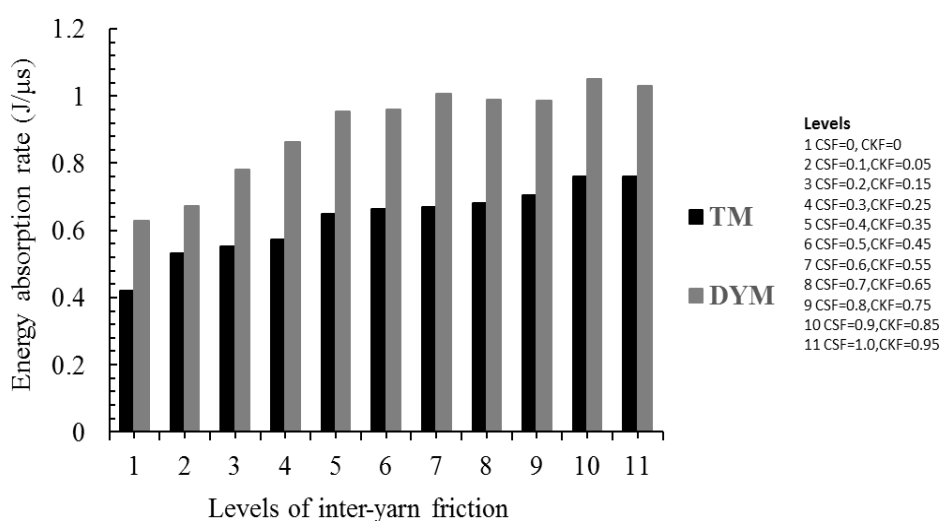
شکل ۱۲: روند تغییرات میزان انرژی جذب شده کل طی تغییرات اصطکاک بین الیافی

Fig. 12. The trend in the overall amount of the absorbed energy throughout the changes in inter-yarn friction

داده شد و روند تغییر انرژی جذب شده کل را برای زمانی که اصطکاک بین الیافی در این شرایط مدول یانگ افزایش می‌یابد، در شکل ۱۳ ترسیم شده است. وقتی مدول یانگ نسبتاً پایین باشد (مثلاً ۷۲ گیگاپاسکال و ۵۲ گیگاپاسکال)، روندهای میزان جذب انرژی کل در هنگام افزایش اصطکاک بین الیافی تقریباً مشابه با یکدیگر می‌باشند. این نشان می‌دهد که وقتی اصطکاک بین الیافی نزدیک صفر است، شاید انرژی جذب شده کل افزایش یابد. انرژی جذب شده کل با نرخ جذب انرژی و زمان شکست مرتبط است. به همین خاطر، اثرات اصطکاک بین الیافی بر روی این دو جنبه مورد بررسی قرار گرفت.

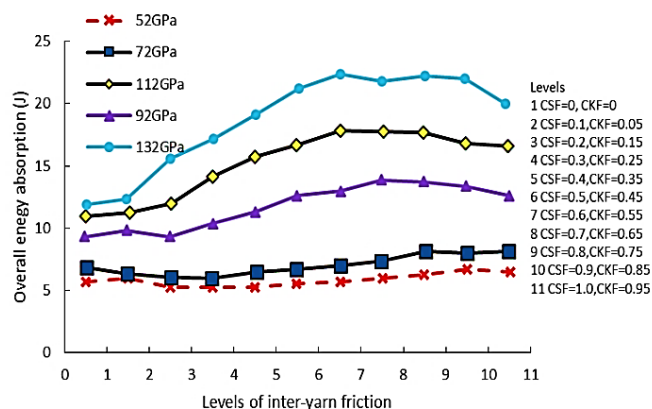
۳-۱-۱-۲-۳- نرخ جذب انرژی

اگرچه برخورد بالستیک تقریباً یک فرآیند گذرا است، اما جذب انرژی یک پارامتر وابسته به زمان است. نرخ جذب انرژی پارامتری است که با تقسیم انرژی جذب شده کل بر زمان محاسبه می‌شود. بنابراین، نرخ جذب انرژی نشان‌دهنده میانگین انرژی جذب شده در واحد زمان است. میانگین نرخ انرژی جذب شده نشان می‌دهد پارچه با چه سرعتی انرژی نیروی برخورد بالستیک را تلف می‌کند. در حقیقت، جذب انرژی در کل دامنه زمانی یک فرآیند یکنواخت نیست. این موضوع ممکن است به دلیل ماهیت غیرهمگنی ساختار پارچه و غیر همزمانی شکست هر یک از الیافها باشد. علیرغم غیریکنواختی جذب انرژی، میانگین نرخ جذب انرژی هنوز هم نشان‌دهنده میزان جذب انرژی در سطوح متفاوت اصطکاک است. نمودار شکل ۱۴



شکل ۱۴: میانگین نرخ جذب انرژی طی تغییرات اصطکاک بین الیافی

Fig. 14. The average energy absorption rate throughout the changes in the inter-yarn friction

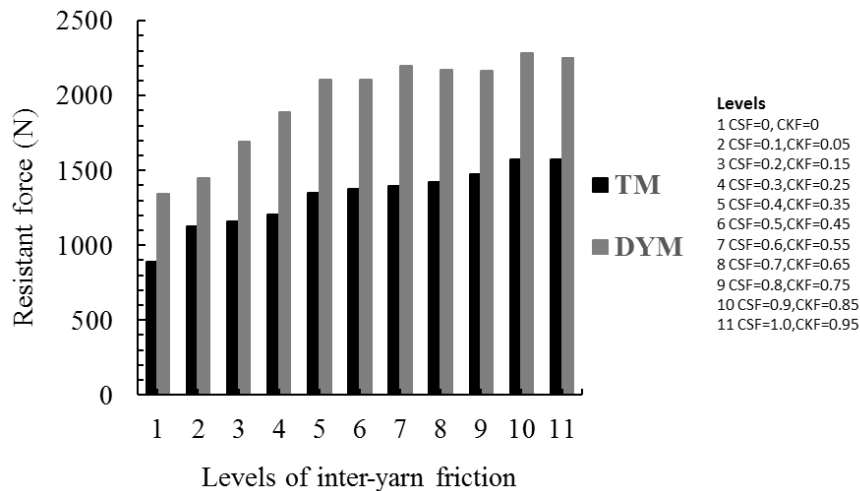


شکل ۱۳: میزان انرژی جذب شده کل برای مدول‌های یانگ متفاوت

Fig. 13. The amount of energy absorption for various Young's moduli

انرژی جذب شده بیشتر خواهد بود.

روند انرژی جذب شده کل برای زمانی که میزان اصطکاک بین الیافی افزایش می‌یابد، برای پارچه دایناما بدست آمده است. این روند با نتایج مطالعات تجربی بریسکو و معتمدی [۱]، دوان و همکاران [۲۲]، سون و همکاران [۳۵] سازگار است. با افزایش اصطکاک بین الیافی از مقدار صفر تا سطح مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۳ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۲۵، میزان انرژی جذب شده کل کاهش خواهد یافت. این روند کاهشی هرگز در مطالعات قبلی مشاهده نشده است. فرض شده است که مدول یانگ نقش مهمی را ایفا می‌کند. بنابراین، مدول یانگ به دامنه وسیع‌تری گسترش



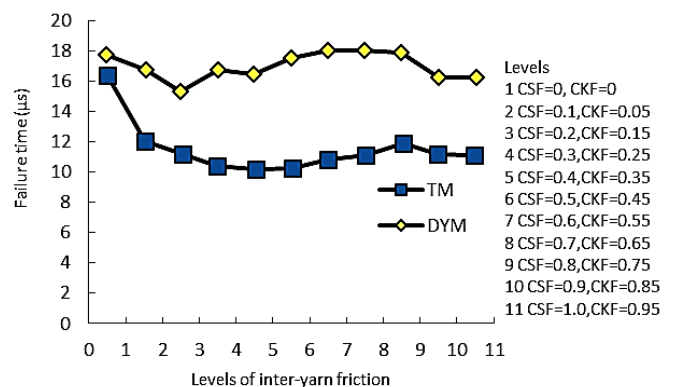
شکل ۱۵: میانگین نیروی مقاوم اعمال شده بر پرتابه از سوی پارچه

Fig. 15. The average resistant force against the projectile coming from the fabric

باشد که از سوی پارچه با اصطکاک بیشتر بر پرتابه اعمال می‌شوند. به هر میزان نیروی مقاوم پارچه بیشتر باشد، میزان افت سرعت پرتابه شدیدتر خواهد بود. این موضوع نیز سبب می‌شود تا انتقال انرژی به پارچه به شکل موثرتری صورت گیرد. این نیروی مقاوم را می‌توان بر اساس اصل ضربان که در رابطه (۵) نشان داده شده است، محاسبه نمود. شکل ۱۵ نمودار نیروهای مقاومی که بر پرتابه اعمال می‌شوند را برای سطوح اصطکاک متفاوت به ترتیب در حالت‌های تارون و دایناما نشان می‌دهد. نیروی مقاوم محاسبه شده یک نیروی میانگین است زمانی که در کل دامنه در برابر حرکت پرتابه از خود مقاومت نشان می‌دهد. هر چه از این فرآیند می‌گذرد، این نیروی مقاوم اعمال شده بر پرتابه بیشتر کاهش می‌یابد، زیرا ساختار پارچه شروع به شکست می‌کند. با این که نیروی مقاوم با گذشت زمان تضعیف می‌گردد، اما میانگین نیروی مقاوم هنوز یک شاخص خوب و مفید است. این شاخص تفاوت‌های بین نیروهای مقاوم اعمال شده بر پرتابه را نشان می‌دهد. در دو حالت بیان شده، با افزایش سطح اصطکاک بین‌الیافی، نیروی مقاوم اعمال شده بر پرتابه افزایش می‌یابد. به این دلیل که هر چه اصطکاک بین‌الیافی بزرگتر باشد، نیروی مشترک بین الیاف در منطقه تقاطع درون پارچه قوی‌تر خواهد شد. بنابراین، الیاف در کل پارچه می‌توانند موثرتر عمل کرده و سد محکم‌تری در برابر حرکت پرتابه بوجود آورند.

نرخ‌های جذب انرژی پارچه‌های تارون و دایناما را نشان می‌دهد. با افزایش اصطکاک بین‌الیافی در این دو مدل، این دو نمودار الگوی مشابهی را طی می‌کنند، به این صورت که با افزایش اصطکاک بین‌الیافی، نرخ جذب انرژی به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. در ادامه تاثیر اصطکاک بین‌الیافی بر روی میزان انرژی جذب شده کل و همچنین بر نرخ جذب انرژی مقایسه شده‌اند. به روشنی مشخص است اصطکاک بین‌الیافی سبب افزایش یکنواخت نرخ جذب انرژی می‌شود.

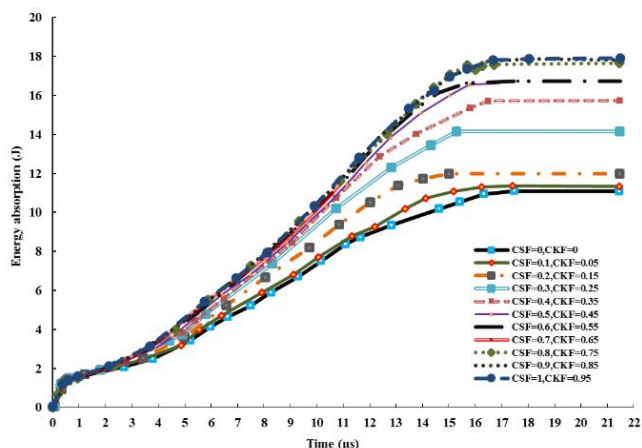
شکل ۱۴ نشان می‌دهد که اصطکاک بین‌الیافی سبب افزایش نرخ جذب انرژی در این دو حالت شده است. دلیل آن می‌تواند افزایش نیروهای مقاومی



شکل ۱۶: روند زمان شکست پارچه نسبت به تغییرات اصطکاک بین‌الیافی

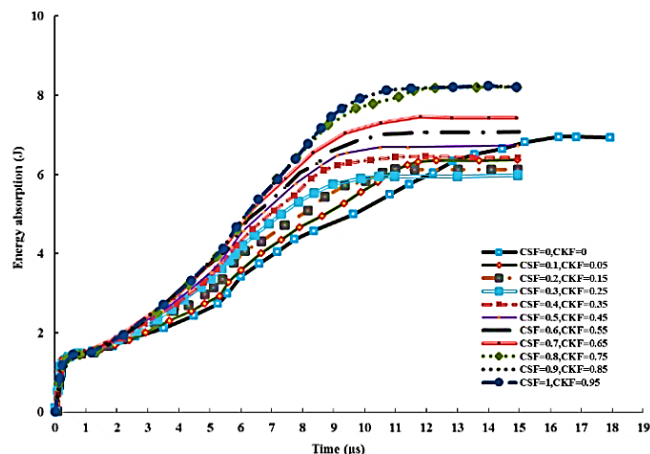
Fig. 16. The failure time trend of the fabric in accordance with the inter-yarn friction variations

$$ft = m(V_i - V_r) \quad (5)$$



شکل ۱۸: روند جذب انرژی در پارچه دایناما

Fig. 18. The energy absorption trend in Dyneema fabric



شکل ۱۷: روند جذب انرژی در پارچه تارون

Fig. 17. The energy absorption trend in Twaron fabric

شکست بیشینه و کمینه برای حالت دایناما حدود ۲ میکروثانیه می‌باشد. این تفاوت مقدار برای حالت تارون تقریباً برابر با ۶ میکروثانیه است. روند کاهشی زمان شکست در هنگام افزایش نیروی اصطکاک بین‌الیافی نشان می‌دهد که میزان قابلیت انحراف عرضی نیز کاهش می‌یابد. بنابراین، میزان کاهش زمان شکست برای پارچه دایناما کمتر از پارچه تارون می‌باشد.

۳-۲-۲- تجزیه و تحلیل ساز و کار جذب انرژی کل

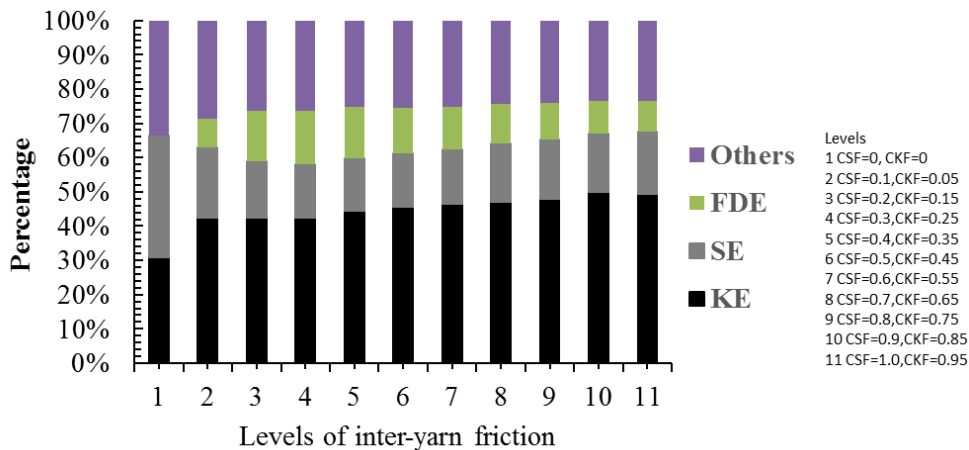
جذب انرژی کل به دو پارامتر نرخ جذب انرژی و زمان شکست بستگی دارد. انرژی جذب شده کل با جذب موثرتر انرژی و طولانی‌تر شدن مدت زمان شکست پارچه افزایش می‌یابد. بررسی‌های قبلی نشان می‌دهد تنها اثرات اصطکاک بین‌الیافی بر نرخ جذب انرژی یا زمان شکست اثر دارد [۲-۴]. افزایش اصطکاک بین‌الیافی سبب افزایش نرخ جذب انرژی می‌شود که این موضوع به خاطر افزایش نیروی مقاوم الیاف می‌باشد. از سوی دیگر، این افزایش اصطکاک تمرکز تنش ناشی از تنش کششی و برشی اعمال شده بر الیاف اولیه در ناحیه برخورد را تشدید نموده و قابلیت انحراف عرضی را کاهش می‌دهد که این اتفاق زمان شکست را کاهش می‌دهد [۳۶].

منحنی‌های مربوط به روند جذب انرژی در سطوح متفاوت اصطکاک بین‌الیافی در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده‌اند. شیب این منحنی نشان‌دهنده نرخ جذب انرژی است. زمانی که منحنی تخت می‌شود، یعنی پارچه دچار شکست شده است. همانطور که مشخص است در حالت تارون، وقتی اصطکاک بین‌الیافی در دامنه صفر تا ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۳

در رابطه (۵)، f نیروی مقاوم، t زمان شکست، m جرم پرتابه، V_i سرعت تاثیر و V_r سرعت باقیمانده پرتابه می‌باشند.

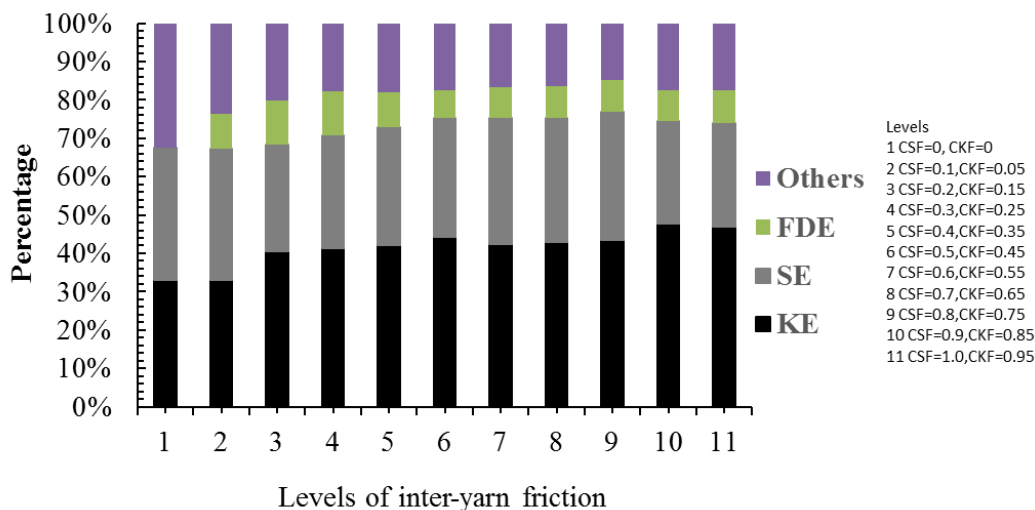
۳-۲-۱-۲- زمان شکست

زمان شکست به مجموع زمانی که از ابتدای برخورد پرتابه تا زمان پارگی پارچه طول می‌کشد، گفته می‌شود. روند زمان شکست پارچه برای وقتی که اصطکاک بین‌الیافی افزایش می‌یابد، در شکل ۱۶ آورده شده است. در زمان شکست پارچه انرژی جذب شده توسط پارچه دیگر تغییر نمی‌کند و ثابت باقی می‌ماند. در حالت تارون، با افزایش اصطکاک، این زمان به طور معنادار و قابل توجهی کاهش می‌یابد. اما وقتی ضریب اصطکاک استاتیکی از مقدار ۰/۴ به ۰/۸ و ضریب اصطکاک جنبشی از مقدار ۰/۳۵ به ۰/۷۵ افزایش می‌یابد، زمان شکست مقداری طولانی‌تر می‌شود. وقتی اصطکاک بالاتر از مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۸ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۷۵ است، زمان شکست بار دیگر در این حالت کاهش می‌یابد. در حالت دایناما، وقتی ابتدا اصطکاک بین‌الیافی تا مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۲ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۱۵ افزایش یابد، زمان شکست کاهش می‌یابد. اما بعد از آن، به تدریج با افزایش اصطکاک بین‌الیافی، این زمان روند افزایشی را طی می‌کند. وقتی این اصطکاک به سطوح بالاتر مثل ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۸ و ضریب اصطکاک جنبشی ۰/۷۵ افزایش می‌یابد، این زمان دوباره کم می‌شود. روند تغییرات زمان شکست در هنگام افزایش اصطکاک بین‌الیافی، در هر دو حالت مشابه می‌باشد. تفاوت بین زمان



شکل ۱۹: درصد انرژی جذب شده پارچه تارون به صورت انرژی کرنش، انرژی جنبشی و انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک

Fig. 19. The percentage of the absorbed energy in Twaron through energy loss by the friction (FDE), strain energy (SE), and kinetic energy (KE)

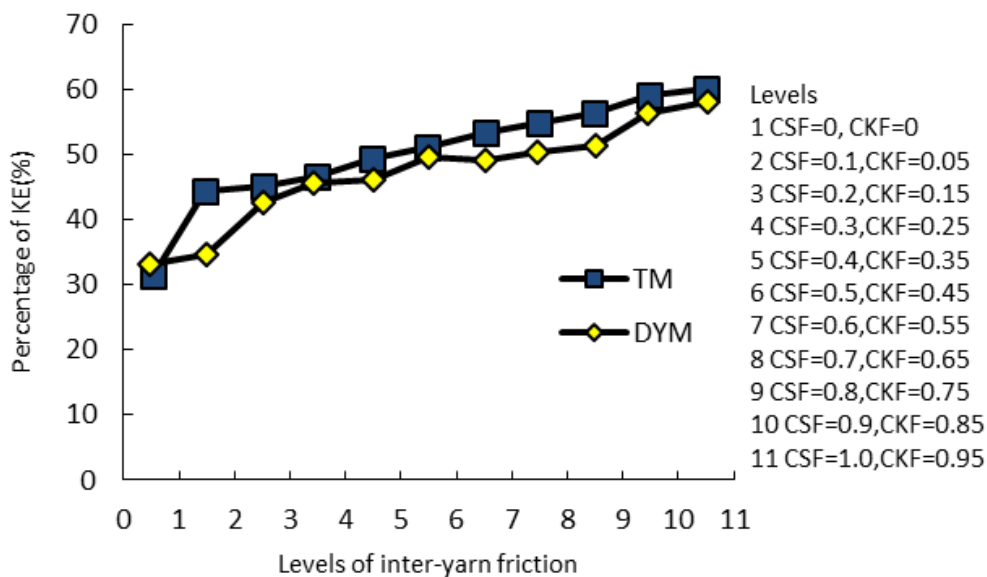


شکل ۲۰: درصد انرژی جذب شده پارچه دایناما به صورت انرژی کرنش، انرژی جنبشی و انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک

Fig. 20. The percentage of the absorbed energy in Dyneema through energy loss by the friction (FDE), strain energy (SE), and kinetic energy (KE)

را در حالت اصطکاک صفر جذب می‌کند، اما مد جذب انرژی در آن چون به صورت موضعی است مطلوب نیست. در حالت دایناما، در دامنه اصطکاک صفر تا اصطکاک ضریب اصطکاک استاتیکی $0/8$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/75$ ، جذب انرژی کل وابستگی بیشتری بر نرخ جذب انرژی دارد. برای زمانی که اصطکاک بین‌الیافی بیشتر است، جذب انرژی کل برای هر دو مدول ابتدا کاهش می‌یابد، زیرا زمان شکست دوباره کمتر می‌شود.

و ضریب اصطکاک جنبشی $0/25$ قرار دارد، با افزایش اصطکاک بین‌الیافی، جذب انرژی کل با افزایش زمان شکست بیشتر می‌شود. اما وقتی این اصطکاک در دامنه ضریب اصطکاک استاتیکی $0/3$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/25$ تا ضریب اصطکاک استاتیکی $0/8$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/75$ قرار دارد، میزان جذب انرژی کل به نرخ جذب انرژی وابسته است. با این وجود، باید به این نکته اشاره کرد که اگر چه پارچه تارون انرژی بیشتری



شکل ۲۱: اثرات اصطکاک بین الیافی بر روی انرژی جنبشی جذب شده

Fig. 21. The effects of inter-yarn friction on the absorbed kinetic energy

اصطکاک نزدیک صفر است، ساز و کار انرژی کرنش می‌تواند برجسته‌تر از ساز و کار انرژی جنبشی باشد. دلیل این موضوع آن است که انرژی کرنش با قابلیت انحراف عرضی پارچه مرتبط است و پارچه اکثراً در سطوح پایین‌تر اصطکاک بین الیافی دارای قابلیت انحراف می‌باشد. بنابراین، انرژی کرنش در این وضعیت‌ها ساز و کار غالب جذب انرژی می‌باشد. جذب مقدار بیشتر انرژی به شکل انرژی کرنش مطلوب نیست، چون افزایش انرژی کرنش به معنای افزایش انحراف عرضی پارچه است.

۳-۳-۲- انرژی جنبشی

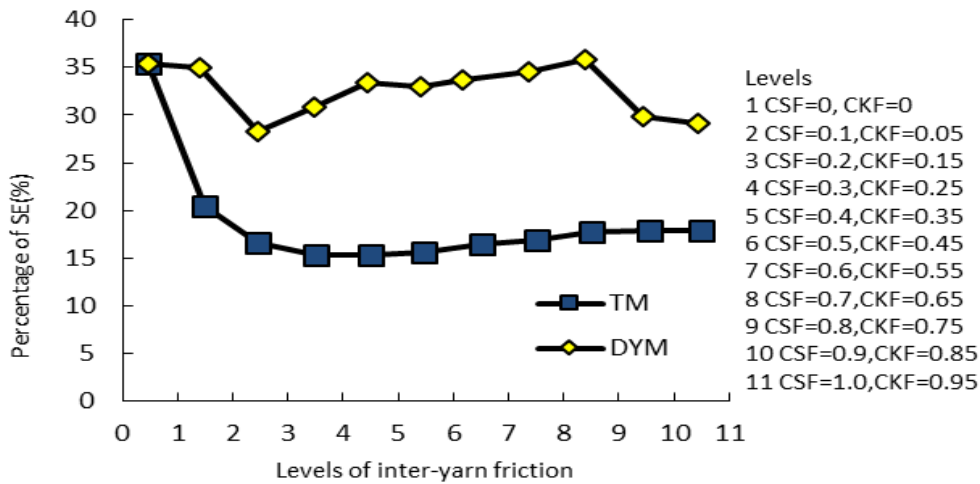
شکل ۲۱ درصد انرژی جنبشی را به صورت تابعی از اصطکاک بین الیافی برای دو مدل نشان می‌دهد. در هر دو حالت، با افزایش اصطکاک بین الیافی، درصد‌های انرژی جنبشی اندکی افزایش می‌یابند. همچنین، با افزایش اصطکاک بین الیافی، نرخ جذب انرژی جنبشی نیز افزایش می‌یابد. سرعت موج عرضی بیشتر سبب می‌شود تا انرژی برخورد به شکل موثر در یک منطقه وسیع‌تر از پارچه توزیع گردد. نرخ جذب انرژی جنبشی با قسمتی از پارچه که در هر لحظه از برخورد نقش دارد، مرتبط است. بنابراین، افزایش اصطکاک بین الیافی سبب می‌گردد تا نرخ جذب انرژی جنبشی بیشتر باشد و در نتیجه درصد انرژی جنبشی افزایش می‌یابد.

۳-۳-۳- اثرات اصطکاک بین الیافی بر شکل‌های جذب انرژی

۳-۳-۱- انتقال انرژی بین پرتابه و پارچه

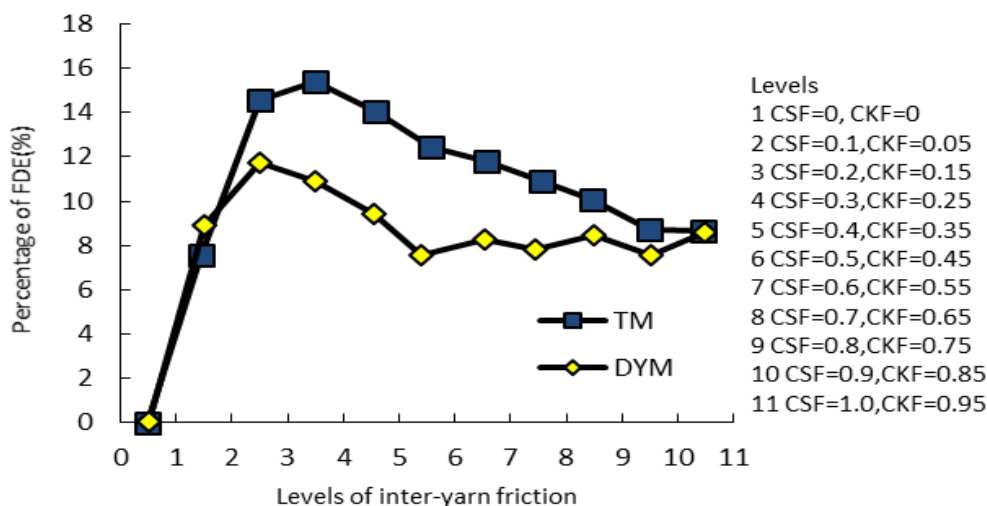
اتلاف انرژی در پارچه عمدتاً به سه شکل رخ می‌دهد [۴]: (۱) انرژی جنبشی مربوط به حرکت پارچه که توسط موج طولی یا عرضی بوجود می‌آید (۲) انرژی کرنش ناشی از تغییر شکل الیاف کشیده شده و (۳) اتلاف انرژی به دلیل اصطکاک بین الیاف. وقتی پرتابه به پارچه برخورد می‌کند، کرنشی در الیاف پارچه رخ داده و بخشی از انرژی پرتابه به صورت انرژی کرنش در پارچه تلف می‌شود. در این مدت، به دلیل نیروی کششی پرتابه پارچه در ناحیه برخورد حرکتش را طی می‌کند. در نتیجه بخشی از این انرژی به صورت انرژی جنبشی توسط پارچه جذب می‌شود. به جز این دو روش اتلاف انرژی پرتابه، اصطکاک بین الیافی نیز با ایجاد یک لغزش اصطکاک نقش مهمی را در اتلاف انرژی پرتابه ایفا می‌کند که به آن انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک گفته می‌شود.

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهد که در این دو مدل، چند درصد از انرژی جذب شده کل به صورت انرژی کرنش، انرژی جنبشی و انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک می‌باشد. اساساً، انرژی جنبشی ساز و کار غالب جذب انرژی است و شکل‌های انرژی کرنش و انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک در مرتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. با این وجود، وقتی برای هر دو مدل سطح



شکل ۲۲: اثرات اصطکاک بین الیافی روی درصد انرژی جذب شده به صورت انرژی کرنش

Fig. 22. The effects of inter-yarn friction on the percentage of absorbed energy through strain energy



شکل ۲۳: اثرات اصطکاک بین الیافی روی درصد انرژی جذب شده به صورت انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک

Fig. 23. The effects of the inter-yarn friction on the percentage of absorbed energy through energy loss by the friction

دارد. حال آن که در حالت تارون وضعیت متفاوت است. در این حالت، وقتی اصطکاک از صفر به ضریب اصطکاک استاتیکی $0/3$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/25$ افزایش یابد، درصد انرژی کرنش به اندازه چشمگیری کاهش می‌یابد. در بقیه سطوح اصطکاک، درصد انرژی کرنش تقریباً در همین سطح باقی می‌ماند. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اصطکاک بین الیافی تا سطح ضریب اصطکاک استاتیکی $0/3$ و ضریب اصطکاک جنبشی $0/25$

۳-۳-۳- انرژی کرنش

شکل ۲۲ تاثیر اصطکاک بین الیافی بر درصد انرژی جذب شده به صورت انرژی کرنش را برای دو مدل نشان می‌دهد. روند تغییرات درصد انرژی کرنش به صورت تابعی از اصطکاک بین الیافی، برای این دو حالت اندکی متفاوت است. در حالت دایناما، میزان انرژی کرنش با افزایش اصطکاک بین الیافی، افزایش می‌یابد. این نوسان در یک دامنه کوچک یعنی حدود ۵ درصد قرار

چه مدول یانگ بزرگتر باشد، سبب کاهش بیشتر قابلیت انحراف عرضی پارچه می‌شود.

جذب انرژی کل با نرخ جذب انرژی و زمان شکست مرتبط است. با افزایش اصطکاک بین الیافی، نرخ جذب انرژی نیز به طور یکنواخت افزایش می‌یابد، زمان شکست ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته اما در نهایت، دوباره کاهش می‌یابد.

پارچه مدل تارون در زمانی که اصطکاک نزدیک صفر است، انرژی بیشتری را جذب می‌کند. این روش جذب انرژی مطلوب نمی‌باشد، زیرا این حالت جذب انرژی یک مد پاسخ موضعی می‌باشد.

افزایش اصطکاک بین الیاف بر شکل‌های جذب انرژی تاثیر می‌گذارد. وقتی اصطکاک نزدیک صفر است، انرژی کرنش ساز و کار غالب در پارچه است. با افزایش اصطکاک بین الیافی، انرژی جنبشی به ساز و کار غالب در پارچه تبدیل می‌شود. همچنین، با افزایش این اصطکاک، درصد انرژی جذب شده به صورت انرژی جنبشی افزایش می‌یابد. وقتی اصطکاک بین الیافی به اندازه اندکی افزایش یابد، در مورد الیاف با مدول یانگ پایین‌تر، این اتفاق به اندازه قابل توجهی درصد انرژی جذب شده به صورت انرژی کرنش را در پارچه کاهش می‌دهد. اما این تاثیر در مورد پارچه‌های با مدول یانگ بالاتر اندک می‌باشد. یک مقدار بیشینه برای اصطکاک بین الیاف وجود دارد که در آن میزان جذب انرژی به صورت انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک بیشینه است.

نتایج عددی نشان دادند که با افزایش اصطکاک بین الیافی می‌توان عملکرد بالستیک زره‌های ضد گلوله که از پارچه‌های آرامید ساخته شده‌اند را بهبود بخشید. روش عملی برای بهبود عملکرد بالستیک در پارچه‌های آرامید مبتنی بر یک ساز و کار اصطکاک بین الیافی است.

منابع

- [1] B.J. Briscoe, F. Motamedi, The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction, *Wear*, 158(1-2) (1992) 229–247.
- [2] S. Rebouillat, Tribological properties of woven para-aramid fabrics and their constituent yarns, *Journal of Materials Science*, 33 (1998) 3293–3301.
- [3] C. Ha-Minh, F. Boussu, T Kanit, D. Crépin, A. Imad, Effect of frictions on the ballistic performance of a 3D warp interlock fabric: numerical analysis, *Applied*

درصد انرژی کرنش در مورد پارچه تارون در مقایسه با پارچه دایناما به اندازه قابل توجهی کاهش یافته است. این اتفاق ممکن است به خاطر تفاوت بین دو پارچه از لحاظ قابلیت انحراف عرضی باشد. نتایج بیان می‌کند وقتی اصطکاک بین الیافی اندکی افزایش می‌یابد، میزان کاهش قابلیت انحراف عرضی در پارچه تارون بیشتر از پارچه دایناما است.

۳-۳-۴- انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک

در شکل ۲۳ درصد انرژی جذب شده بر حسب انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک را به صورت تابعی از اصطکاک بین الیافی نشان می‌دهد. با افزایش اصطکاک بین الیافی، این درصد ابتدا تا نقطه‌ای افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. از آنجایی که میزان انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک با ضریب اصطکاک و سرعت نسبی بین الیاف مرتبط است. در نتیجه، طبیعی است که افزایش اصطکاک بین الیاف، حتی به مقدار بسیار ناچیز، موجب افزایش چشمگیری در مقدار انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک خواهد شد. که علت این امر رابطه‌ای خطی کار نیروی اصطکاک با اندازه نیروی اصطکاک می‌باشد. با این وجود، وقتی اصطکاک بین الیاف خیلی بیشتر است، این موضوع مانع از حرکت الیاف می‌گردد. بنابراین مقدار انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک خیلی پایین‌تر خواهد شد. یک سطح بهینه برای اصطکاک بین الیاف به ازای هر پارچه وجود دارد که در آن بیشترین جذب انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک وجود دارد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، اثرات اصطکاک بین الیافی بر عملکرد بالستیک با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بهره‌برداری قرار گرفت. دو مقدار برای مدول یانگ ۷۲ گیگاپاسکال و ۱۱۲ گیگاپاسکال انتخاب شد. تاثیرات اصطکاک بین الیافی بر انحراف عرضی، جذب انرژی کل و شکل‌های جذب انرژی در طول برخورد بالستیک بررسی شده‌اند. نتایج اصلی بدست آمده از تحلیل‌های المان محدود شامل موارد زیر می‌باشد:

افزایش اصطکاک بین الیافی قابلیت‌های انحراف عرضی پارچه را کاهش می‌دهد. با افزایش اصطکاک بین الیافی، پاسخ پارچه از حالت پاسخ موضعی به پاسخ غیرموضعی تغییر می‌کند. این اتفاق در پارچه‌هایی با مدول یانگ پایین‌تر، برجسته‌تر است.

قابلیت انحراف عرضی پارچه با مدول یانگ الیاف آن مرتبط است. هر

- of cylindrical indenters with different nose shapes into the hybrid composite panels, *Composite Materials*, 53(1) (2018) 107-123.
- [12] H. Shanazari, G. H. Liaghat, H. Hadavinia, A. Aboutorabi, Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(4) (2017) 545-563.
- [13] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. Pol, H. Sabouri, Analytical experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected to projectile impact, *Modares Mechanical Engineering*, 14(6) (2014) 153-64. (in Persian)
- [14] V.B.C. Tan, T.W. Ching, Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts, *International journal of impact engineering*, 32(11) (2006) 1737-1751.
- [15] M. Hedayatian, G. H. Liaghat, G. Rahimi, H. Pol, Numerical and experimental analyses of projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, 14(9) (2014) 17-26. (in Persian)
- [16] H. Babaei, A. Jamali, T. Mirzababaie Mostofi, S. H. Ashraf Talesh, Experimental Study and Mathematical Modeling of Deformation of Rectangular Plates under Impact Load, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6 (2017) 143-152.
- [17] E. Mehrabani Yeganeh, G. H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation of cylindrical projectile nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite, *Modares Mechanical Engineering*, 14(14) (2014) 309-318. (in Persian)
- [18] Y. Yang, X. Chen, Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact, *Textile Research Journal*, 87(20) (2016) 1-12.
- [19] M. Alitavoli, H. Babaei, A. Mahmoudi, A. Golbaf, T. Mirzababaie Mostofi, Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Composite Materials, 19 (2012) 333-347.
- [4] X.S. Zeng, V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 66(8) (2006) 1309-1330.
- [5] S. R. Falahatgar, M. Oliae, Numerical Analysis of Ballistic Behavior of Multi-layer High-strength Woven Fabrics Under High-velocity Impact and Investigation of Inter-yarn Friction Effects, *Tabriz Mechanical Engineering*, 49(1) (2019) 199-208. (in Persian)
- [6] K.M. Kirkwood, J.E. Kirkwood, Y.S. Lee, R.G. Egres, N.J. Wagner, E.D. Wetzel, 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*, 74(10) (2004) 920-928.
- [7] J.E. Kirkwood, K.M. Kirkwood, Y.S. Lee, R.G. Egres, N.J. Wagner, E.D. Wetzel, Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric. Part II: predicting ballistic performance, *Textile Research Journal*, 74(11) (2004) 939-948.
- [8] G. Nilakantan, E.D. Wetzel, R. Merrill, T.A. Bogetti, R. Adkinson, M. Keefe, Experimental and numerical testing of the V50 impact response of flexible fabrics: addressing the effects of fabric boundary slippage, 11th International LS-DYNA users conference, MI USA: Dearborn, June 6-8, (2010).
- [9] H. Talebi, S.V. Wong, A.M.S. Hamouda, Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric, *Composite Structures*, 87 (2009) 314-320.
- [10] A. Khodadadi, G. H. Liaghat, M. Akbari, M. Tahmasebi, Numerical and experimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, *Modares Mechanical Engineering*, 13(12) (2013) 124-133. (in Persian)
- [11] S.A. Taghizadeh, G. H. Liaghat, A. Niknejad, E. Pedram, Experimental study on quasi-static penetration process

- [28] B. Russell, K. Karthikeyan, V. Deshpande, N. Fleck, The high strain rate response of ultra high molecular-weight polyethylene: from fibre to laminate, *International Journal of Impact Engineering*, 60 (2013) 1-9.
- [29] J.G.H. Bouwmeester, R. Marissen, O.K. Bergsma, Carbon/Dyneema Intralaminar Hybrids: new strategy to increase impact resistance or decrease mass of carbon fiber composites, In ICAS2008 Conference Anchorage, (2008) 3851-3856.
- [30] A.A. Lysenko, V.A. Lysenko, O.V. Astashkina, O.I. Gladunova, Resource-conserving carbon fibre technologies, *Fibre Chemistr*, 42(5) (2011) 278-286.
- [31] ABAQUS User Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, RI, USA, (2016).
- [32] S. Gogineni, X-L. Gao, N. David, J. Zheng, Ballistic impact of Twaron CT709 plain weave fabrics, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19(6) (2012) 441-452.
- [33] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, S. Hosseinzadeh, On dimensionless numbers for predicting large ductile tranverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 112 (2017) 118-124.
- [34] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and Analytical inverstigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 107 (2016) 257-265.
- [35] D. Sun, X. Chen, M. Mrango, Investigating ballistic impact on fabric targets with gripping yarns, *Fibers and Polymers*, 14(7) (2013) 1184-1189.
- [36] Y. Chu, S. Min, X. Chen, Numerical study of inter-yarn friction on the failure of fabrics upon ballistic impacts, *Materials & Design*, 115 (2017) 299-3
- Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed, *Modares Mechanical Engineering*, 15(7) (2015) 22-30. (in Persian)
- [20] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, M. Namdari, Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, 15(5) (2015) 357-366. (in Persian)
- [21] Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, W. Garry, An experimental study of ply orientations on ballistic impact resistance in multiply fabric panels, *Textile Research Journal*, 86(1) (2016) 34-43.
- [22] Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman, Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric, *International Journal of Impact Engineering*, 31(8) (2005) 996-1012.
- [23] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, B. Powers, Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(1) (2006) 33-43.
- [24] Y. Wang, X. Chen, R. Young, A numerical and experimental analysis of the influence of crimp on ballistic impact response of woven fabrics, *Composite Structures*, 140 (2016) 44-52.
- [25] C.T. Lim, V.P.W. Shim, Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *International Journal of Impact Engineering*, 28 (2003) 13-31.
- [26] A.C.P. Koh, V.P.W. Shim, V.B.C. Tan, Dynamic behaviour of UHMWPE yarns and addressing impedance mismatch effects of specimen clamps, *International Journal of Impact Engineering*, 37(3) (2010) 324-332.
- [27] W. Huang, Y. Wang, Y. Xia, Statistical dynamic tensile strength of UHMWPE-fibers, *Polymer*, 45(11) (2004) 3729-3734.

