



Ballistic Performance Analysis of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zarei H.¹,
Shahnazar P.¹,
Meskini M.¹,
Sarkhosh R.¹

How to cite this article

Zarei H, Shahnazar P, Meskini M, Sarkhosh R. Ballistic Performance Analysis of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):347-356.

¹ Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.
R.sarkhosh@ssau.ac.ir

Article History

Received: August 26, 2021
Accepted: December 11, 2021
ePublished: March 24, 2022

ABSTRACT

Ultra-High molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers are among the strongest and lightest fibers available and are widely used in high-performance ballistic applications. Despite the great advancement of computational analysis in recent years, precise calculations have not been performed to identify the failure of these fibers due to the complexity of the material behavior to impact. In this research, using the most advanced finite element modeling method of composites (Abaqus-Explicit) has been used to study the composite behavior of these fibers subjected to high-velocity projectile impact. Fiber and matrix are designed using solid elements and 3D Hashin failure criterion was used to determine the behavior of the material. Since this criterion is not available in Abaqus, the VUMAT subroutine has been used to implement this criterion. Velocity diagrams and damage evaluation have been reported. To evaluate and validate this method, six samples of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite panels, consisting of 20 and 45 layers, respectively, were experimentally studied by high-velocity projectiles at different velocities. The simulation results are in good agreement with the experimental results.

Keywords High velocity impact, Composite, VUMAT, Finite element, Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)

CITATION LINKS

[1] Experimental and numerical simulation based assessment of kevlar composite ... [2] Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities ... [3] Simulation of low-velocity impact damage on composite laminates [4] Investigation and optimization of protective properties of metal multi-layered shields... [5] New results on ballistic performance of multi-layered metal shields [6] The impact resistance of composite materials—a review. Composites [7] A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors [8] A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors [9] On improving ballistic limit of bi-layer ceramic-metal armor [10] Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact [11] Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE ... [12] Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor [13] The out-of-plane compressive response of Dyneema® composites [14] The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite [15] The ballistic performance of thick ultra high molecular weight polyethylene composite [16] High performance fabrics in body protective systems [17] A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminate [18] Investigations on the spall and delamination behavior of UHMWPE composites [19] Structure induced effectiveness of shear thickening fluid for modulating impact resistance of UHMWPE fabrics [20] Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMwPE ... [21] Effect of moisture on high strain rate performance of UHMWPE ... [22] Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene ... [23] Low velocity impact behavior and simulation of parametric effect analysis ... [24] Numerical investigation of energy absorption mechanisms ... [25] A general theory of strength for anisotropic materials [26] Examination of Hashin's failure criteria ...

بررسی تجربی و عددی عملکرد کامپوزیت پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا در مقابل برخورد پرتابه با سرعت بالا

حمیدرضا زارعی

دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

پیام شاه نظر

دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

محمد مسکینی

دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

رضا سرخوش*

دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

الیاف پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا از قوی‌ترین و سبک‌ترین الیاف موجود هستند که به طور گسترده در کاربردهای بالستیک با عملکرد بالا استفاده می‌شود. با وجود پیشرفت زیاد توان محاسباتی در سال‌های اخیر، به دلیل پیچیدگی رفتار شکست الیاف این کامپوزیت در اثر ضربه، محاسبات دقیقی برای شناسایی آسیب این الیاف انجام نشده است. در این پژوهش با استفاده از پیشرفته‌ترین روش مدل‌سازی اجزا محدود کامپوزیت‌ها (آباکوس- صریح) برای مطالعه رفتار الیاف این کامپوزیت در اثر برخورد پرتابه با سرعت بالا استفاده شده است. برای پوسته و تقویت‌کننده‌ها از اجزا جامد و برای تعیین رفتار ماده از معیار آسیب هاشین سه بعدی استفاده شده است. به دلیل عدم وجود این معیار در نرم‌افزار آباکوس و اهمیت استفاده از آن، این معیار توسط زیربرنامه وی‌یومت و کدنویسی در محیط فرترن به قابلیت آباکوس اضافه شده است. نمودارهای تغییر سرعت و وقوع و گسترش خرابی گزارش شده‌اند. برای ارزیابی و اعتبارسنجی این روش، ۶ نمونه پنل کامپوزیتی پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا به ترتیب با تعداد ۲۰ و ۴۵ لایه ساخته شد و این پنل‌های کامپوزیتی مورد برخورد پرتابه سرعت بالا با سرعت‌های مختلف قرار گرفتند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی توافقی بسیار خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: برخورد سرعت بالا، کامپوزیت، اجزا محدود، وی‌یومت، پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰

*نویسنده مسئول: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

۱- مقدمه

مطالعه اثر متقابل اصابت دو جسم با یکدیگر، که تحت عنوان دینامیک ضربه شناخته می‌شود، کاربردهای بسیار مهمی دارد. برخورد گلوله به زره^[1]، ایمنی سرنشین و عابر پیاده در هنگام تصادفات اتومبیل^[2]، افتادن ابزار روی بال هواپیما^[3]، چند نمونه از مواردی است که دینامیک ضربه در آنها نقش مهمی دارد. درک عمیق از رفتار تغییر شکل مواد تحت بارگذاری، نه تنها در طراحی محصولات بهتر بلکه مهمتر از همه باعث نجات جان انسان می‌شود. دانش در مورد واکنش مواد تحت بارگذاری ضربه در

سنجش، بهبود و افزایش عمر و عملکرد هر سازه‌ای کمک خواهد کرد. دینامیک ضربه به طور کلی به دو متغیر اصلی، یعنی هندسه و مواد اجسام برخورد کننده بستگی دارد. بیشتر اوقات غیر از الزامات ضربه، شاخصه‌های طراحی تعیین کننده هندسه اجسام تحت بارگذاری ضربه هستند. به عنوان مثال: بال هواپیما باید از پیکربندی ایرفویل باشد، زره باید به شکل بدن انسان با ضخامت محدود باشد تا آزادی حرکت را در منطقه عملیاتی امکان‌پذیر کند، و یک گلوله برای نفوذ موثر باید به شکل مخروطی باشد. در نهایت، این اصل به واکنش مواد بستگی دارد، که عملکرد سازه تحت بارگذاری ضربه را تعیین می‌کند. نظریه‌های مختلفی برای مدل‌سازی رفتار فلزات^[4,5]، کامپوزیت‌ها^[6] و سرامیک‌ها^[7] تحت بارگذاری ضربه ارائه شده است. چند دهه پیش، صنعت عمدتاً تحت تأثیر مواد فلزی قرار داشت. با این حال، مواد کامپوزیتی به دلیل پیشرفت‌هایی مانند: کاهش وزن، دوام و آزادی طراحی پیشرفت زیادی داشته‌اند^[8]. زره‌های کامپوزیتی مزایای دو یا چند ویژگی مواد را ترکیب می‌کنند و به طور گسترده‌ای در محافظت از بدن انسان و وسایل نقلیه خاص استفاده می‌شود. به طور کلی، چگالی کم، مدول بالا، تنش تسلیم بالا و تنش کششی دینامیکی بالا از مشخصات زره کامپوزیتی است. یک زره کامپوزیتی متشکل از صفحه جلویی نسبتاً سخت و صفحه پشتی نسبتاً محکم بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد^[9-12]. از ترکیب الیاف تقویت شده با ماتریس خصوصیات نهایی مورد نیاز ما فراهم می‌شود. مواد کامپوزیتی ناهمگن، ناهمسان‌گرد و دارای حالت‌های مختلف خرابی هستند. الیاف پلی اتیلن با وزن ملکولی بالا به دلیل ترکیب قدرت بالا و تراکم کم، قوی‌ترین و سبک‌ترین الیاف موجود هستند^[13]. این خواص استثنایی ناشی از وزن مولکولی این پلیمر است که از ۱ تا ۱۰ میلیون گرم در مول متغیر است، که باعث می‌شود زنجیره‌های پلیمری تقریباً ده برابر طولانی‌تر از پلی اتیلن معمولی با چگالی بالا باشد. کارایی بالستیک کامپوزیت پلی اتیلن با وزن ملکولی بالا قبلاً برای طیف گسترده‌ای از پنل‌ها با ضخامت‌های مختلف در برابر پرتابه‌های آزمایشی (FSP) مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که عملکرد وزنی بهتری نسبت به زره‌های سنتی آرامید و فلزی برای این دسته از پرتابه‌ها دارد^[14]. اساس توسعه این الیاف با مقاومت بالا در دهه ۱۹۶۰ با کشف در آزمایشگاه تحقیقاتی دی اس ام شکل جدیدی از کریستال الیاف برای پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا ایجاد شد. کشف فرآیند ژل ریزی تولید مقیاس تجاری این الیاف با مقاومت بالا و مدول بالا را امکان‌پذیر کرد. برخلاف مواد ایزوتروپیک، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف رفتار پیچیده‌تری در برابر خرابی از خود نشان می‌دهند^[15]. کامپوزیت‌های UHMWPE عموماً از طریق لایه‌چینی و با اضافه کردن رزین تحت فشار زیاد ساخته می‌شوند^[16]. ژانگ و همکاران^[17] عملکرد برخورد پرتابه با سرعت کم را روی ورقه‌های UHMWPE که از پارچه‌های دو بعدی و سه بعدی تشکیل شده بود،

معیار خرابی سه بعدی صورت گرفته است. زیرا این یک پدیده دینامیکی- صریح است، که برای دستیابی به نتایج دقیق حل عددی باید در نرم افزار اجزا محدود با استفاده از اجزای جامد و معیار خرابی سه بعدی انجام شود. این فرآیند به صورت پیش فرض در نرم افزار آباکوس امکان پذیر نیست، زیرا طراحی کامپوزیت در این نرم افزار تنها به صورت اجزای شل و استفاده از معیار خرابی هاشین دو بعدی امکان پذیر است. برای غلبه بر این کمبود، می توان از توسعه زیربرنامه وی یومت (VUMAT Subroutine) استفاده کرد. این زیربرنامه امکان تعریف و اضافه کردن خصوصیات مواد جدید به کتاب خانه مواد آباکوس را در قالب کدنویسی به زبان فرترن با استفاده از نرم افزار استودیو بصری (Visual Studio) به ما می دهد، که پیاده سازی این روش نیازمند درک بالایی از نحوه رفتار مواد کامپوزیتی و همگام سازی آن با پروسه حل عددی در محیط نرم افزار آباکوس است. بنابراین، با هدف کمک به ایجاد یک ابزار طراحی کارآمدتر در این زمینه، این پژوهش بر تجزیه و تحلیل و پیش بینی شروع آسیب بر روی پنل کامپوزیتی پلی اتیلن با جرم مولکولی بالا توسط نرم افزار آباکوس متمرکز است برای ارزیابی و اعتبارسنجی این روش، ۲ نمونه پنل کامپوزیتی که به ترتیب از ۲۰ و ۴۵ لایه تشکیل شده اند، به صورت تجربی مورد برخورد پرتابه سرعت بالا با سرعت های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. با محاسبه سرعت برخورد و سرعت پسماند پرتابه می توان مقدار انرژی جذب شده توسط هر نمونه پنل را اندازه گیری کرد. مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی به دست آمده، دقت بالای استفاده از زیربرنامه وی یومت در محاسبه انرژی جذب شده و پیش بینی وقوع و گسترش آسیب را نشان می دهد.

۲- مدل تجربی

الیاف مورد استفاده در این پژوهش پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا و رزین و سخت کننده مورد استفاده برای ساخت نمونه ها، به ترتیب رزین اپوکسی ML506 و هاردنر HA-11 است. برای ساخت نمونه های چندلایه ای کامپوزیتی از روش لایه چینی دستی از قاب های فلزی فولادی استفاده شده است که درون این قاب ها، لایه های مختلف کامپوزیتی با رزین اپوکسی به هم متصل می شوند و لایه چینی کامل می شود. سپس کل پنل به همراه قاب فولادی در زیر دستگاه پرس گرم تحت فشار و دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت تا عملیات ساخت یک چندلایه ای، به خوبی و به سرعت انجام شود. شکل ۱ لایه چینی دستی لایه های کامپوزیت آغشته به رزین اپوکسی درون قاب فولادی را نشان می دهد.

در نهایت نمونه های ساخته شده جهت بررسی میزان مقاومت نفوذ و جذب انرژی، در دستگاه تفنگ گازی تحت برخورد بالستیک پرتابه های مخروطی با وزن ۸ گرم نشان داده شده در شکل ۲ قرار می گیرند. شکل ۳ مجموعه سیستم اندازه گیری سرعت برخورد و

مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این مطالعه، ساختارهای سه بعدی عملکرد جذب انرژی را در مقایسه با ساختارهای دو بعدی افزایش می دهند. لاسیگ و همکاران^[18] رفتار جدایش لایه های کامپوزیت UHMWPE را در شرایط ضربه بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که جدایش لایه ها به خواص کششی در طول ضخامت سازه ها مربوط می شود. آرورا و همکاران^[19] از یک مایع غیر نیوتنی در ماتریس UHMWPE برای افزایش مقاومت ضربه ای سازه استفاده کردند. آنها دریافتند که مایع استفاده شده منجر به افزایش تعامل اصطکاکی بین الیاف UHMWPE و در نتیجه افزایش جذب انرژی در ساختار می شود. زولکیفلی و همکاران^[20] لایه چینی بهینه الیاف فیبر کربن را در یک کامپوزیت مبتنی بر UHMWPE از نظر عملکرد ضربه مورد مطالعه قرار دادند. آنها پیشنهاد دادند که قرار دادن لایه های سفت تر فیبر کربن بالای ورقه های UHMWPE سبب افزایش استحکام خمشی ساختار کامپوزیت برای عملکرد ضربه می شود. چوهان و همکاران^[21] اثر رطوبت بر رفتار بالستیک کامپوزیت UHMWPE را بررسی کردند. در این تحقیق مشاهده شد که، رطوبت منجر به تأثیر مخرب بر خواص محافظتی کامپوزیت می شود، به طوری که عملکرد در شرایط مرطوب می تواند به نصف عملکرد کامپوزیت در شرایط خشک برسد. یانگ و همکاران^[22] به مدل سازی کامپوزیت های ترکیبی آرامید و UHMWPE را که تحت تأثیر برخورد پرتابه بودند، پرداختند. در این پژوهش، پیکربندی های مختلف برای یافتن بهینه ترین طرح کامپوزیت در برابر شرایط ضربه مورد مطالعه قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسیدند که لایه های UHMWPE در پشت لایه های آرامید قرار گیرند تا مقاومت در برابر ضربه افزایش یابد زیرا لایه های UHMWPE بیشتر در معرض تخریب حرارتی در قسمت جلویی قرار می گیرند، که عملکرد ضربه ای سیستم را کاهش می دهد. لیو و همکاران^[23] کامپوزیت های UHMWPE را تحت برخورد پرتابه با سرعت کم قرار دادند تا رفتار ضربه ای این کامپوزیت ها را بررسی کنند. آنها نتایج تجربی با نتایج حل عددی که در نرم افزار LS-DYNA انجام شده بود را مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان می دهد که انرژی ضربه عمدتاً توسط تغییر شکل پلاستیک و آسیب جدایش لایه ها جذب می شود.

برای جبران خواسته های صنعت، درک دقیق تری از مکانیک شکست کامپوزیت های UHMWPE تحت بارگذاری ضربه مورد نیاز است. با این حال، مطالعه خرابی در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف به دلیل وجود معیارهای خرابی متعدد، به هماهنگی نظریه ها نیاز دارد. این پیچیدگی از طریق سیستم های محاسباتی قدرتمند، که اجازه می دهد رویکردهای شکست را با استفاده از نرم افزار روش اجزای محدود پیاده سازی و مدل سازی کند، برطرف می شود. هدف از این روش ها به دست آوردن نتایج قابل مقایسه با نتایج تجربی است. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه ارزیابی حل عددی برخورد پرتابه با سرعت بالا به صفحات کامپوزیتی با

به ثابت بودن فاصله‌ی بین دو سنسور، سرعت پرتابه محاسبه می‌شود.

در این آزمایش از ۶ پنل کامپوزیتی ساخته شده از الیاف پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا استفاده شده است، که شامل سه نمونه ۲۰ لایه و سه نمونه ۴۵ لایه است. مشخصات نمونه‌های ساخته شده و نتایج تجربی به دست آمده در جدول ۱ آورده شده است. در نمونه های ۳ و ۶ پرتابه پس از نفوذ به پنل هدف، منحرف شده و سیستم لیزری قادر به اندازه‌گیری سرعت پسماند نبوده است.

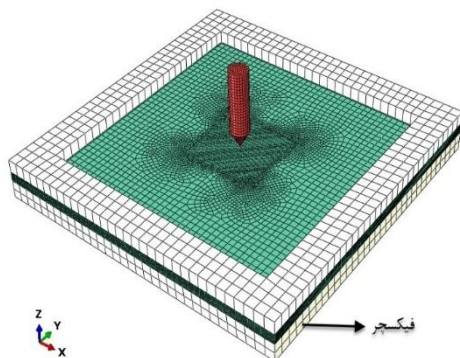
جدول ۱) مشخصات نمونه های آزمایش شده

نمونه	تعداد لایه	ضخامت پنل (mm)	سرعت برخورد (m/s)	سرعت پسماند (m/s)
۱	۲۰	۳	۲۶۶/۳۱	۲۴۹/۴۹
۲	۲۰	۳	۲۵۹/۶۱	۲۳۸/۸۷
۳	۲۰	۳	۲۶۸/۷۵	-
۴	۴۵	۶/۷۵	۲۵۱/۱۹	۱۹۲/۰۹
۵	۴۵	۶/۷۵	۲۵۴/۰۷	۲۱۴/۴۱
۶	۴۵	۶/۷۵	۲۵۳/۲۳	-

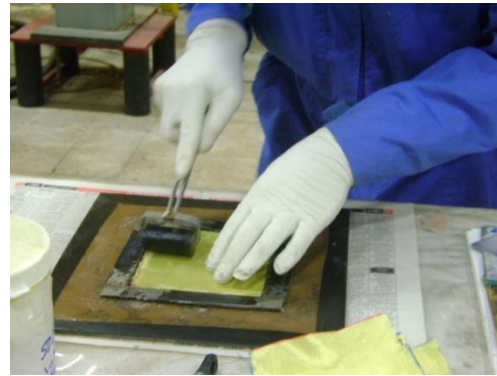
۳- مدل سازی عددی

برای شبیه سازی مدل ضربه در نرم افزار آباکوس از حل دینامیکی و صریح استفاده شده است. از آنجا که پرتابه پس از نفوذ دچار خسارت نشده است؛ جنس پرتابه از نوع صلب و تغییر شکل ناپذیر و صفحات کامپوزیتی از اجزا جامد تشکیل شده است.

شبیه سازی شامل برخورد پرتابه به صفحات کامپوزیتی ۲۰ و ۴۵ لایه با سرعت برابر با سرعت برخورد در نمونه های تجربی است. اندازه صفحات ۱۰cm × ۱۰cm در نظر گرفته شده است. پرتابه به مرکز هدف کامپوزیتی برخورد می‌کند (شکل ۴). لبه بالایی و پایینی فیکسچر دارای شرایط مرزی مقید در تمام جهات (ENCASTRE) است و یک نیروی یکسان ۳۰۰۰ نیوتونی روی لبه بالایی فیکسچر جهت شبیه سازی نیروی پیچ در نظر گرفته شده است. پنل کامپوزیتی بدون شرایط مرزی است و بین دو لبه فیکسچر قرار دارد. پرتابه نیز تنها در جهت z می‌تواند حرکت کند و در جهات دیگر مقید شده است. برای تعریف تماس بین فیکسچر و پنل از اتصال Surface to Surface و برای برخورد بین پرتابه و پنل هدف از General Contact استفاده شده است.



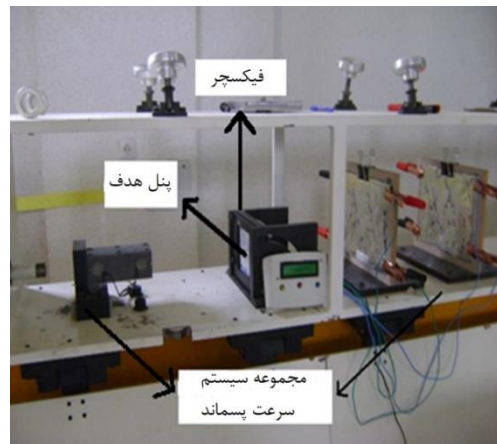
شکل ۴) نمونه شبیه سازی شده برخورد ضربه



شکل ۱) لایه چینی دستی پنل های کامپوزیتی



شکل ۲) پرتابه استفاده شده در آزمایش تجربی



شکل ۳) سیستم اندازه گیری سرعت برخورد و پسماند پرتابه

پسماند پرتابه را نشان می‌دهد. نمونه‌های هدف در قسمتی از دستگاه به نام فیکسچر قرار می‌گیرند و از اطراف کاملاً مهار می‌شوند. با بستن پیچ‌ها چهار لبه فیکسچر محکم شده و اجازه حرکت به پنل هدف نمی‌دهد. بنابراین از نظر شرایط مرزی می‌توان مطمئن شد که قطعه در تمامی جهات مقید شده است. به علاوه یک سیستم لیزری اندازه‌گیری سرعت، قبل از محل برخورد به هدف تعبیه شده است که پس از شلیک پرتابه، سرعت برخورد را اندازه می‌گیرد. این سیستم اندازه‌گیری سرعت شامل دو سنسور لیزری است که در عقب و جلوی فیکسچر نصب شده است که با عبور پرتابه از آن‌ها، زمان حرکت پرتابه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه

$$\frac{1}{\sigma_T} \left[\left(\frac{\sigma_T}{2\tau_T} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4\tau_T^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{\tau_A^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1$$

مقادیر عوامل استفاده شده برای الیاف پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا در جدول ۲ آورده شده است. یکی از مزیت‌های روش استفاده شده این است که نرم افزار آباکوس (صریح) با استفاده از این معیار قادر به محاسبه شروع آسیب در لایه‌های کامپوزیتی می‌باشد. برای شبیه سازی دقیق آزمایش ضربه از اجزا جامد استفاده شده است که این امر نیاز به استفاده از مدل مادی وی‌یومت برای تعریف خواص کامپوزیت و اعمال معیار خرابی هاشین ۳ بعدی می‌باشد. در ابتدای شروع شبیه سازی آزمایش ضربه $t = 0$ کامپوزیت به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود و رفتار تغییر شکل آن توسط معادله های (۵) و (۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma = C\varepsilon \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} C11 & C12 & C13 & 0 & 0 & 0 \\ C12 & C22 & C23 & 0 & 0 & 0 \\ C13 & C23 & C33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G13 \end{bmatrix} \quad (6)$$

که c بیانگر ماتریس سفتی است.

طبق روابط ماترنمیلر در تخریب پیشرونده، خواص مکانیکی قطعه پس از وقوع اولین مود تخریب، صفر نمی‌شود؛ بلکه به صورت نمایی برحسب شاخصه‌های آستانه تخریب (باقیمانده) و نرم-شوندگی ماده، به شکل زیر کاهش می‌یابد:

$$\Phi_j = 1 - e^{-\frac{1}{m_i} (1-r_i)^{m_i}} \quad (7)$$

(no summation over i)
 $i=1...6, j=1...7, r_i \geq 1$

Φ زاویه اصطکاک مود و r_i پارامتر آستانه تخریب مود i است و m_i عامل نرم‌شوندگی ماده در مود تخریب i است.

$$\omega_i = \max\{q_{ij}\Phi_j\} \quad (8)$$

ω_i شاخص تخریب است و q_{ij} ماتریس کوپلینگ تخریب است.

$$E_i = (1 - \omega_i)E_{i0} \quad (9)$$

که E_i مقدار اولیه مدول الاستیسیته در راستای i است و E_{i0} مقدار اولیه مدول الاستیسیته است.

$$G_i = (1 - \omega_i)G_{i0} \quad (10)$$

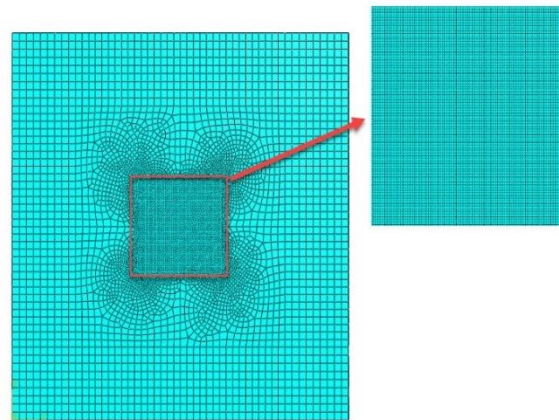
G_{i0} مقدار اولیه مدول برشی است.

شاخصه‌های نرم‌شوندگی کرنشی از آزمون‌های خواص مکانیکی به‌دست می‌آید. در این پژوهش برای شاخص نرم‌شوندگی از مقادیر مندرج در جدول ۲ استفاده شده است. پس از محاسبه شاخص تخریب ماتریس نرمی کاهش یافته به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-\omega_1)E_a} & \frac{-\nu_{ba}}{E_b} & \frac{-\nu_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{ab}}{E_a} & \frac{1}{(1-\omega_2)E_b} & \frac{-\nu_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{ac}}{E_a} & \frac{-\nu_{bc}}{E_b} & \frac{1}{(1-\omega_3)E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_4)G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_5)G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_6)G_{ca}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

و ماتریس سفتی از معکوس ماتریس نرمی بدست خواهد آمد:

در مش‌بندی پنل‌های هدف از اجزا C3D8R با نقاط انتگرالی کاهش یافته، که در مطالعات ضربه بیشتر استفاده می‌شود [24] و قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی (Hourglass control) استفاده شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، مش بندی محل برخورد پرتابه از المان‌های کوچک‌تر تشکیل شده است (شکل ۵). به منظور تعیین بهترین اندازه المان در مرکز پنل هدف، نمونه‌های مشابه با اندازه المان‌های مختلف مش‌بندی شده و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند و مشخص شد که اندازه المان ۰/۳ میلی متر در مرکز پنل هدف از لحاظ دقت و زمان حل، بهینه‌ترین حالت می‌باشد.



شکل ۵) مش بندی صفحات کامپوزیتی

۳-۱- مدل ماده

همان‌طور که ذکر شد مواد کامپوزیتی از لایه‌های الیاف و ماتریس تشکیل می‌شوند. الیاف عضو تحمل‌کننده تنش عمل می‌کند در حالی که ماتریس الیاف را در کنار هم نگه می‌دارد. بنابراین خرابی ساختارهای کامپوزیت توسط رفتار شکست الیاف و ماتریس بیان می‌شود. نظریه‌های مختلفی برای پیش‌بینی دقیق خرابی ساختارهای کامپوزیتی ارائه شده است [25].

در میان معیارهای خرابی ارائه شده، معیار خرابی هاشین ۳ بعدی خرابی مواد کامپوزیتی تک‌جهته و ایزوتروپیک عرضی را با دقت بسیار بالایی پیش‌بینی می‌کند. در این معیار هر کدام از حالات خرابی به‌صورت جداگانه بررسی و تحلیل می‌شود. خرابی حالت‌های کششی و فشاری الیاف و ماتریس به صورت زیر بیان می‌شود [26]:

معادله خرابی کششی الیاف $\sigma_{11} > 0$:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_A^+}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\tau_A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\tau_A}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

معادله خرابی فشاری الیاف $\sigma_{11} < 0$:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_A^-}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

معادله خرابی کششی ماتریس $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$:

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{(\sigma_T^+)^2} + \frac{(\sigma_{23})^2 - \sigma_{22} * \sigma_{33}}{(\tau_T)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{\tau_A^2} = 1 \quad (3)$$

معادله خرابی فشاری ماتریس $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$:

$$[C] = [S]^{-1} \quad (۱۲)$$

در این پژوهش از اثر نرخ کرنش صرف نظر شده است. طبق مطالعات انجام شده، اثر نرخ کرنش در سرعت های بالا در محاسبه مدول ها و استحکام های الیاف پلی اتیلن با جرم مولکولی بالا، ناچیز می باشد. فلوجارت روش اجرای زیربرنامه وییومت در شکل ۶ آورده شده است.

زمان شبیه سازی در همه ی نمونه ها ثابت و برابر ۰/۵ میلی ثانیه

جدول ۲) مقادیر پارامترهای پلی اتیلن با جرم مولکولی بالا^[۱۵]

مشخصه	مقدار	واحد
E_{11}	$۳/۶۲ \times ۱۰^۶$	kPa
E_{22}	$۵/۱۱ \times ۱۰^۷$	kPa
E_{33}	$۵/۱۱ \times ۱۰^۷$	kPa
ν_{12}	۰/۱۳	-
ν_{23}	۰	-
ν_{31}	۰/۵	-
G_{12}	$۲/۰ \times ۱۰^۴$	kPa
G_{23}	$۱/۹۲ \times ۱۰^۴$	kPa
G_{31}	$۲/۰ \times ۱۰^۴$	kPa
S_{11}	$۱/۰۱ \times ۱۰^{۲۰}$	kPa
S_{22}	$۱/۱۵ \times ۱۰^۶$	kPa
S_{33}	$۱/۱۵ \times ۱۰^۶$	kPa
S_{12}	$۵/۷۵ \times ۱۰^۵$	kPa
S_{23}	$۱/۲۰ \times ۱۰^۵$	kPa
S_{31}	$۵/۷۵ \times ۱۰^۵$	kPa
ρ	۰/۹۸	g/cm^3
β	$۱۰^{-۹}$	-

می باشد. از آنجا که پرتابه صلب است، انرژی درونی وارد شده به پرتابه که در فرم انرژی جنبشی (سرعت اولیه پرتابه) است باعث تغییر شکل و شکست صفحه کامپوزیتی می شود. مطالعه مقدار کاهش انرژی جنبشی در نمونه ها با ضخامت و سرعت پرتابه مختلف می تواند باعث درک بهتر رفتار شکست کامپوزیت ها شود.

۳-۲- بررسی نتایج عددی

برای اعتبار سنجی زیر برنامه وییومت نوشته شده، نمونه های تجربی را در نرم افزار آباکوس شبیه سازی کرده و سرعت برخورد پرتابه برابر با نمونه های تجربی در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج سرعت پسماند حل عددی را با نتایج سرعت پسماند نمونه های تجربی مقایسه کرده و درصد اختلاف آن ها محاسبه شده است که در جدول ۳ مشاهده می شود.

جدول ۳) مقایسه نتایج تجربی و عددی

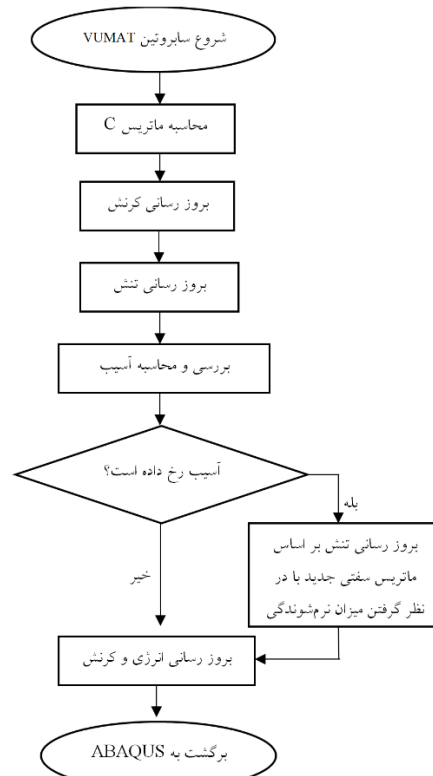
نمونه	سرعت برخورد تجربی (m/s)	سرعت پسماند عددی (m/s)	سرعت پسماند درصد اختلاف (%)
۱	۲۶۶/۳۱	۲۴۹/۴۹	۲/۸
۲	۲۵۹/۶۱	۲۳۸/۸۷	۴/۳
۳	۲۶۸/۷۵	-	-
۴	۲۵۱/۱۹	۱۹۲/۰۹	۱۲
۵	۲۵۴/۰۷	۲۱۴/۴۱	۴/۱
۶	۲۵۳/۲۳	-	-

با مقایسه نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی مشاهده می شود که بیشترین و کمترین اختلاف در سرعت پسماند به ترتیب برابر ۱۲ % و ۲/۸ % است. بنابراین می توان به این نتیجه رسید که استفاده از زیر برنامه وییومت دقت بالایی در شبیه سازی سازوکار خرابی صفحات کامپوزیتی در اثر برخورد پرتابه با سرعت بالا دارد. پس از اعتبارسنجی مدل استفاده شده، جهت بررسی عملکرد بالستیک این دو نمونه ۲۰ و ۴۵ لایه با ضخامت های ۳ و ۶/۷۵ میلی متر تحت برخورد پرتابه با سرعت های مختلف قرار گرفتند.

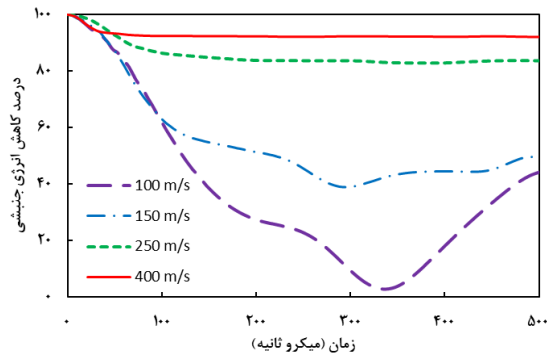
نتایج برخورد پرتابه با سرعت های مختلف به پنل ۲۰ لایه در جدول ۴ آورده شده است. مشاهده می شود که این نمونه ۹۴ درصد از انرژی جنبشی پرتابه با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه را جذب می کند. پس می توان سرعت حد بالستیک را نزدیک به این سرعت در نظر گرفت. همچنین این پنل ۳ میلی متری بیش از نیمی از انرژی جنبشی پرتابه با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه را که نزدیک به دوبرابر سرعت حد بالستیک آن است، جذب می کند. نمودار درصد کاهش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت های مختلف در شکل ۷ آورده شده است.

جدول ۴) نتایج سرعت و انرژی جنبشی پرتابه در نمونه ۲۰ لایه

سرعت برخورد (m/s)	سرعت پسماند (m/s)	انرژی جنبشی (I) از نفوذ (I)	انرژی جنبشی پس درصد جذب انرژی
۵۰	۷/۱۰	۱۰	۹۴%
۱۰۰	۶۰/۵۵	۴۰	۵۸%
۲۵۰	۲۳۸/۲۴	۲۵۰	۸%/۴
۴۰۰	۳۹۰/۸۰	۶۴۰	۰%/۲۵



شکل ۶) فلوجارت نحوه کار زیربرنامه وییومت

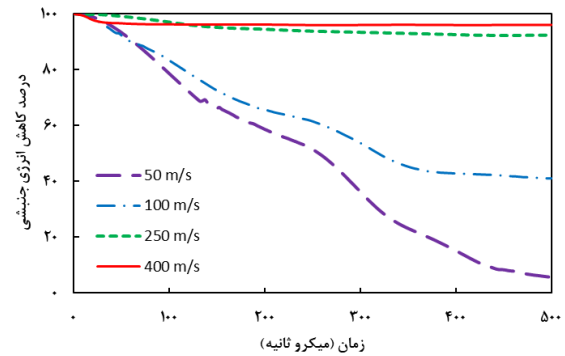


شکل ۸) نمودار کاهش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت های مختلف در نمونه لایه ۴۵

شبهه سازی شده صورت گرفته است. در نمونه ۲۰ لایه با ضخامت ۳ میلی‌متر، در سرعت‌های برخورد ۱۰۰ و ۲۵۰ متر بر ثانیه پرتابه باعث پارگی الیاف در محل برخورد کامپوزیت در اثر تنش کششی می‌شود. بیشترین طول این پارگی عرضی در آزمون پرتابه با سرعت‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۵/۵۳ و ۳/۹۹ میلی‌متر است همان‌طور که در شکل ۱۰ الف نشان داده شده است. در سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه اثری از پارگی دیده نمی‌شود. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک، با افزایش سرعت برخورد میزان خسارت پند هدف پس از نفوذ پرتابه کاهش می‌یابد. در نمونه های ۴۵ لایه با ضخامت ۶/۷۵ میلی‌متر اثری از این پارگی دیده نمی‌شود و پرتابه خسارت کمتری در محل برخورد به جای گذاشته است (شکل ۱۰ ب).

برای مشاهدات بیشتر به بررسی مقدار برآمدگی قسمت پشتی این دو نمونه در سرعت‌های مختلف پرداخته می‌شود. این برآمدگی ابتدا به حداکثر مقدار خود می‌رسد، سپس با عبور پرتابه از هدف به دلیل تغییر شکل الاستیک کاهش می‌یابد. در نهایت در مقدار ثابتی که ناشی از تغییر شکل پلاستیک است تثبیت می‌شود. با توجه به شکل ۱۱- (الف) بیشترین میزان برآمدگی صفحه پشتی پند ۲۰ لایه در اثر برخورد پرتابه با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد که این مقدار برابر ۱۳/۵ میلی‌متر است. در برخورد با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه پرتابه به هدف کامپوزیتی نفوذ می‌کند و دچار پارگی همه لایه ها می‌شود ولی نمی‌تواند از آن خارج شود. با افزایش سرعت برخورد پرتابه مشاهده می‌شود که مقدار برآمدگی صفحه پشتی پند کامپوزیتی کاهش می‌یابد به صورتی که کمترین برآمدگی در برخورد پرتابه با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه برابر ۷/۶ میلی‌متر است.

با توجه به برآمدگی‌های صفحه پشتی نمونه لایه ۴۵ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار برآمدگی برابر ۱۱/۱ میلی‌متر مربوط به برخورد پرتابه با کمترین سرعت و نزدیک به سرعت حد بالستیک یعنی ۱۰۰ متر بر ثانیه است. همان‌طور که در نمونه ۲۰ لایه نیز بررسی شد، با افزایش سرعت پرتابه مقدار برآمدگی پشتی در نمونه ۴۵ لایه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار این برآمدگی

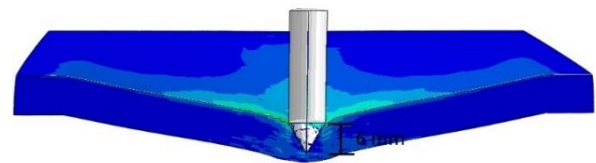


شکل ۶) نمودار کاهش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت‌های مختلف در نمونه لایه ۲۰

در ادامه به بررسی نتایج برخورد پرتابه با سرعت‌های متفاوت به پند ۴۵ لایه با ضخامت ۶/۷۵ میلی‌متر که در جدول ۵ آورده شده است پرداخته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پرتابه با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه قادر به عبور از پند هدف نمی‌باشد و پس از ۶ میلی‌متر نفوذ به پند کامپوزیتی متوقف می‌شود (شکل ۸). از سوی دیگر پرتابه با سرعت ۱۵۰ متر بر ثانیه در حالی از این نمونه عبور می‌کند که ۴۹٪ انرژی جنبشی آن باقی مانده است. پس می‌توان سرعت حد بالستیک نمونه لایه ۴۵ از کامپوزیت پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا محدوده ۱۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفت.

جدول ۵) نتایج سرعت و انرژی جنبشی پرتابه در نمونه لایه ۴۵

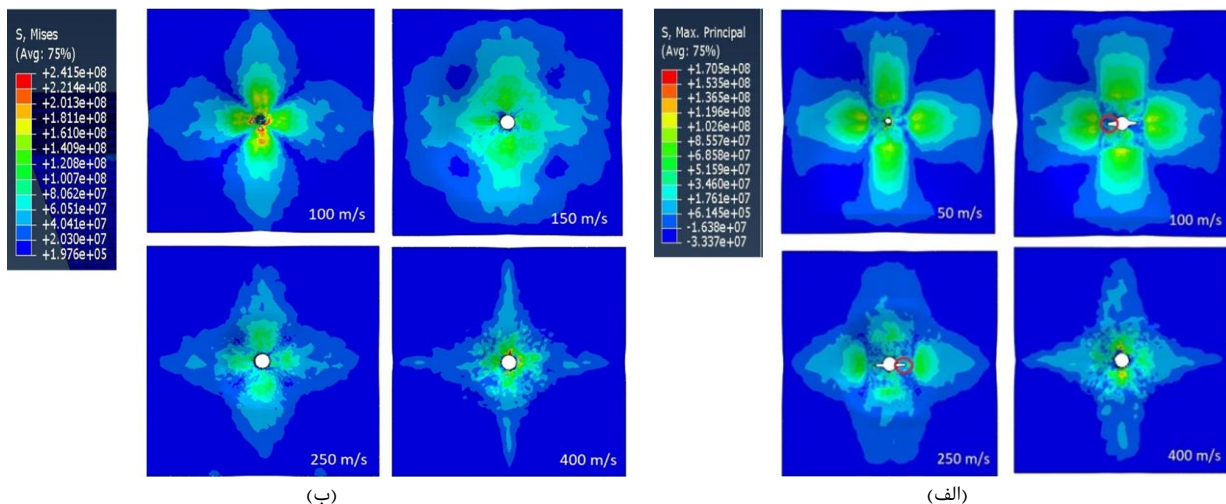
سرعت برخورد (m/s)	سرعت پسماند (m/s)	انرژی جنبشی (I) از نفوذ (J)	انرژی جنبشی پس درصد جزی انرژی
۱۰۰	-	۴۰	۱۰۰٪
۱۵۰	۸۹/۲۳	۹۰	۶۱٪
۲۵۰	۲۲۴/۸۰	۲۵۰	۱۴٪
۴۰۰	۳۸۱/۱۲	۶۴۰	۱۱٪



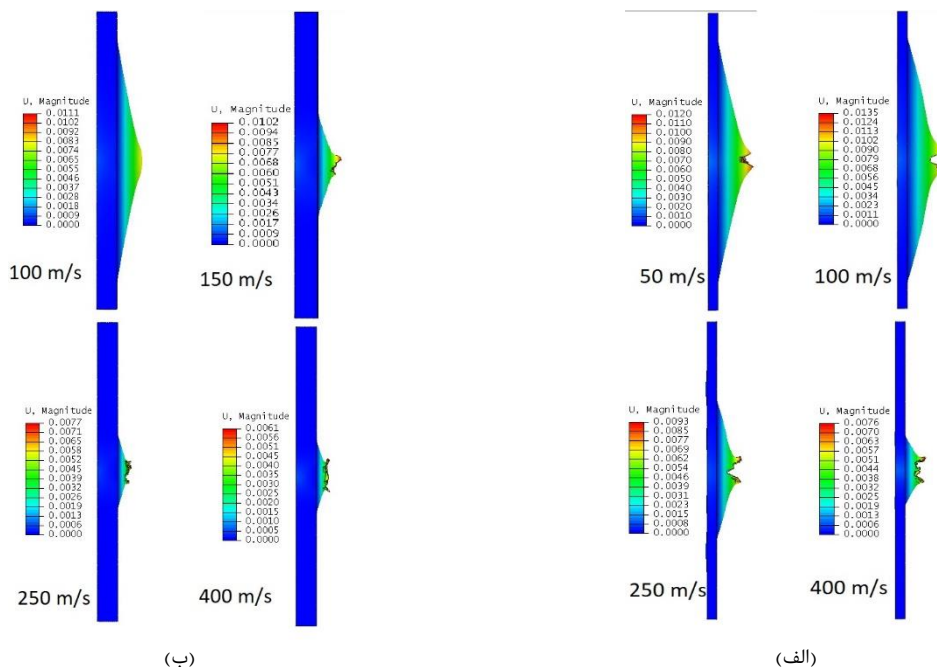
شکل ۷) برخورد پرتابه با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه به نمونه لایه ۴۵

در نمودار شکل ۹ درصد کاهش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت‌های مختلف در برخورد به پند ۴۵ لایه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آزمون پرتابه با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه انرژی جنبشی پرتابه پس از صفر شدن افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر این است که، پس از آنکه پرتابه در زمان ۰/۳۴ میلی‌ثانیه متوقف می‌شود، پند کامپوزیتی در جهت عکس به پرتابه نیرو وارد می‌کند و پرتابه شروع به حرکت می‌کند.

برای درک بهتر از تاثیر ضخامت در نحوه عملکرد کامپوزیت‌های پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا، مشاهدات بیشتری روی نمونه‌های



شکل ۹ الف) پنل هدف ۲۰ لایه در برخورد پرتابه با سرعت های مختلف ب) پنل هدف ۴۵ لایه در برخورد پرتابه با سرعت های مختلف



شکل ۱۱ الف) میزان برآمدگی صفحه پشتی کامپوزیت در نمونه ۲۰ لایه ب) میزان برآمدگی صفحه پشتی کامپوزیت در نمونه ۴۵ لایه

هاشیم سه بعدی در قالب زیر برنامه وی یومت کدنویسی شده است. در ادامه جهت ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهدات حاکی از این است که روش اجزا محدود استفاده شده دقت بالایی در پیش بینی شکست پنل کامپوزیتی و محاسبه سرعت پسماند پرتابه دارد. سپس جهت بررسی عملکرد کامپوزیت ساخته شده از الیاف پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا و درک بهتر رفتار خرابی آن، نمونه های ساخته شده از ۲۰ و ۴۵ لایه با ضخامت های ۳ و ۶/۷۵ میلی متر تحت برخورد پرتابه با سرعت های مختلف قرار گرفت تا مقدار انرژی جنبشی جذب شده توسط پنل کامپوزیتی و رفتار خرابی آن ها مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می دهد که سرعت بحرانی پرتابه

برابر ۶/۱ میلی متر مربوط به برخورد پرتابه با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه است همان طور که در شکل ۱۱-ب) مشاهده می کنید. از طرفی با مقایسه نمونه های ۲۰ لایه و ۴۵ لایه در برخورد با سرعت های برابر، می توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت نمونه ها، میزان برآمدگی صفحه پشتی پنل کاهش می یابد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به پیچیدگی رفتار شکست کامپوزیت های UHMWPE، شناسایی و استفاده از یک روش دقیق اجزا محدود برای پیش بینی و گسترش خرابی کامپوزیت ها برای درک بهتر رفتار شکست آن ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور معیار خرابی

- layered shields: A Review. *International Journal of Protective Structures*. 2012;3(3):275-91.
- 5- Ben-Dor G, Dubinsky A, Elperin T. New results on ballistic performance of multi-layered metal shields. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2017; 88:1-8.
- 6- Cantwell WJ, Morton J. The impact resistance of composite materials—a review. *composites*. 1991; 22(5):347-62.
- 7- Fernández-Fdz D, Zaera R, Fernández-Sáez J. A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors. *Computers & structures*. 2011 Dec 1;89(23-24):2316-24.
- 8- Fernández-Fdz D, Zaera R, Fernández-Sáez J. A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors. *Computers & structures*. 2011; 89(23-24):2316-24.
- 9- Serjouei A, Gour G, Zhang X, Idapalapati S, Tan GE. On improving ballistic limit of bi-layer ceramic-metal armor. *International journal of impact engineering*. 2017; 105:54-67.
- 10- Krishnan K, Sockalingam S, Bansal S, Rajan SD. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(8):583-93.
- 11- Hu D, Zhang Y, Shen Z, Cai Q. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*. 2017; 43(13):10368-76.
- 12- Liu W, Chen Z, Cheng X, Wang Y, Amankwa AR, Xu J. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 84:33-40.
- 13- Attwood JP, Khaderi SN, Karthikeyan K, Fleck NA, Wadley HN, Deshpande VS. The out-of-plane compressive response of Dyneema® composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2014; 70:200-26.
- 14- Nguyen LH, Ryan S, Cimpoeu SJ, Mouritz AP, Orifici AC. The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite. *International Journal of Impact Engineering*. 2015; 75:174-83.
- 15- Nguyen L. The ballistic performance of thick ultra high molecular weight polyethylene composite (Doctoral dissertation, RMIT University).
- 16- Gürgen S, Kuşhan MC. High performance fabrics in body protective systems. In *Materials Science Forum* 2017 (Vol. 880, pp. 132-135). Trans Tech Publications Ltd.
- 17- Zhang D, Sun Y, Chen L, Pan N. A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates. *Materials & Design*. 2013; 50:750-6.
- 18- Lässig T, Bagusat F, Pfändler S, Gulde M, Heunoske D, Osterholz J, Stein W, Nahme H, May M. Investigations on the spall and delamination behavior of UHMWPE composites. *Composite Structures*. 2017; 182:590-7.
- 19- Arora S, Majumdar A, Butola BS. Structure induced effectiveness of shear thickening fluid for modulating impact resistance of UHMWPE fabrics. *Composite Structures*. 2019; 210:41-8.
- 20- Zulkifli F, Stolk J, Heisserer U, Yong AT, Li Z, Hu XM. Strategic positioning of carbon fiber layers in an

برای عبور از پنل کامپوزیتی با ضخامت ۳ میلی‌متر حدود ۵۰ متر بر ثانیه و برای پنل کامپوزیتی با ضخامت ۶/۷۵ میلی‌متر حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه است. در ادامه مشاهده شد که در سرعت‌های بیشتر از سرعت حد بالستیک هر نمونه، با افزایش سرعت برخورد میزان خسارت وارد شده به پنل کامپوزیتی کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که با افزایش ضخامت، برآمدگی پشتی پنل‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد.

واژه نامه

Subroutine	زیر برنامه
UHMWPE	پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا
DOP (depth of penetration)	عمق نفوذ
Hourglass control	کنترل پدیده ساعت شنی

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: ما نویسندگان مقاله « بررسی تجربی و عددی عملکرد کامپوزیت پلی اتیلن با جرم ملکولی بالا در مقابل برخورد پرتابه با سرعت بالا » با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به «نشریه مهندسی مکانیک مدرس» تعهد مینماییم که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد و آقای رضا سرخوش را (از نویسندگان) به عنوان نویسنده رابط معرفی نموده و وکالت تمام ایشان در کلیه امور مرتبط با این مقاله (به ویژه انجام اصلاحات احتمالی) نزد نشریه «نشریه مهندسی مکانیک مدرس» را می‌پذیریم.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: هزینه‌های پژوهش از منابع مالی نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- Samanta S, Datta D. Experimental and numerical simulation based assessment of kevlar composite specimens under ballistic impact. *NDT&E International*. 2009.
- 2- Esnaola A, Tena I, Aurrekoetxea J, Gallego I, Ulacia I. Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of E-glass/polyester automotive crash structures. *Composites Part B: Engineering*. 2016 Feb 1;85:1-7.
- 3- Lopes C, Gurdal Z, Camanho P, Maimi P, Gonzalez E. Simulation of low-velocity impact damage on composite laminates. In *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 17th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 11th AIAA No 2009* (p. 2445).
- 4- Ben-Dor G, Dubinsky A, Elperin T. Investigation and optimization of protective properties of metal multi-

- UHMwPE ballistic hybrid composite panel. *International Journal of Impact Engineering*. 2019; 129:119-27.
- 21- Chouhan H, Asija N, Ahmed A, Bhatnagar N. Effect of moisture on high strain rate performance of UHMWPE fiber based composite. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 14:830-8.
- 22- Yang Y, Chen X. Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design. *Composite Structures*. 2017; 174:233-43.
- 23- Liu L, Hu D, Wan D, Hu X, Han X. Low velocity impact behavior and simulation of parametric effect analysis for UHMWPE/LLDPE thermoplastic composite laminates. *Composite Structures*. 2021; 258:113180.
- 24- Segala DB, Cavallaro PV. Numerical investigation of energy absorption mechanisms in unidirectional composites subjected to dynamic loading events. *Computational Materials Science*. 2014 ;81:303-12.
- 25- Tsai SW, Wu EM. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of composite materials*. 1971;5(1):58-80.
- 26- Kress G. Examination of Hashin's failure criteria for Part B of the second world-wide failure exercise: Comparison with test data. *Journal of composite materials*. 2013;47(6-7):867-91.