

بررسی تجربی و عددی کامپوزیت تقویت شده با پارچه ی حلقوی-پودی تحت ضربه سرعت بالا

میثم سروش دکتري، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، meisam.soroush@gmail.com
کرامت ملک زاده فرد* استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، kmalekzadeh@mut.ac.ir
ساناز حسن زاده دکتري، دانشکده نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، s.hassanzadeh66@gmail.com
مرتضی شهروی دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، shahravi@mut.ac.ir

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، ساخت کامپوزیت تقویت شده با پارچه حلقوی-پودی با قابلیت جذب انرژی بالا و بارگذاری ضربه سرعت بالا و ارائه مدل اجزای محدود برای مطالعه ی آغاز و گسترش خسارت درون لایه های با تمرکز بر استخراج تجربی خواص مورد نیاز شبیه سازی است. در پروسه ساخت کامپوزیت، پارچه های بافته شده بر روی ماشین تخت باف حلقوی پودی، در یک فرآیند پرس حرارتی قرارداده شد تا جزء گرمانرم به صورت مذاب درآید و بخش ماتریس زمینه ی کامپوزیت را شکل دهد. به منظور پیش بینی نقطه ی آغاز و چگونگی گسترش خسارت ایجاد شده در لایه های کامپوزیت بر مبنای روش تخریب پیش رونده، و مبنای کاهش سفتی بر پایه انرژی چقرمگی شکست استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی در این تحقیق، از قبیل انرژی چقرمگی شکست، به صورت تجربی و با استفاده از آزمایش کشش فشرده استخراج گردید و در شبیه سازی از آن ها استفاده شد. اعتبار سنجی مدل پیشنهادی نیز با استفاده از مقایسه سرعت عامل ضربه زننده قبل و پس از برخورد در آزمایش تجربی ضربه بالترزی در حدود ۱۲۰ ژول، از طریق شبیه سازی عددی صورت گرفته و اختلاف در حدود ۱۱ درصدی با نتایج آزمایش ضربه مشاهده شد.

واژه های کلیدی: کامپوزیت حلقوی پودی الیاف کولار، شبیه سازی اجزای محدود، مدل تخریب پیش رونده، ضربه سرعت بالا.

Experimental and numerical investigation of weft-knitted reinforced composite under high velocity impact

M. Soroush Department of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
K. Malekzadeh Fard Department of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
S. Hassanzadeh Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
M. Sharavi Department of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

This paper is aimed to produce a Kevlar/PP weft knitted composite lamina with high absorbed energy under high velocity impact loading and propose a finite element model for studying the initiation and evolution of interlaminar damage with focusing on the experimental extraction of the required properties for the simulation. In the fabrication procedure, the fabrics produced on a modern flat-knitting machine were being processed via hot-pressure molding technique until the thermoplastic component formed the composite matrix phase. Based on a progressive damage model and using Hashin criterion in composite layers, damage initiation was predicted while the damage evolution was predicted by reducing the value of stiffness based on fracture toughness energy that is available in ABAQUS. Parameters required for modeling such as fracture toughness energy, were experimentally measured through some tests such as compact tension. The proposed model was validated by making comparison between the experimental and numerical results of the impactor velocity before and after the test of 120 J impact loading and 11 percent difference between the experimental and numerical impact results was observed.

Keywords: Weft Knitted Kevlar Fiber Composite, Finite Element Simulation, Progressive Damage Model, High Velocity Impact.

۱- مقدمه

داده شده، حلقه ها به صورت افقی و در راستای عرض پارچه (یک رج^۱) حداقل با یک سرنخ تشکیل می شوند: این پارچه ها، از خواص کشسانی و قابلیت شکل پذیری بالا برخوردارند و کاربردهای فراوانی را به خصوص در صنعت پوشاک به خود اختصاص می دهند. ضخامت این نوع پارچه ها، تقریباً معادل ضخامت نخ مصرفی است. پارچه های حلقوی-پودی علی رغم دارا بودن خواص مکانیکی پایین و ثبات ابعادی کم، در تقویت مواد مرکب مورد استفاده قرار می گیرند که

بافندگی حلقوی، روشی برای بافت پارچه است که نخ های تشکیل دهنده ی آن به شکل حلقه های در هم قفل شده هستند. این روش بافندگی، در دودسته ی حلقوی-تاری و حلقوی-پودی تقسیم بندی می شود که تفاوت اصلی آن ها در راستای شکل گیری حلقه ها است. در روش بافندگی پارچه حلقوی-پودی ساده که در شکل ۱ نشان

¹ Course

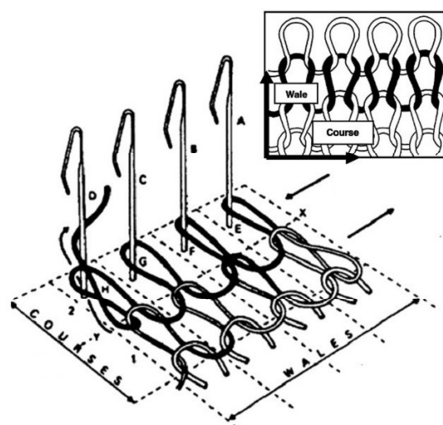
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: kmalekzadeh@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲

دلیل اصلی آن، قابلیت بالا در شکل‌پذیری و تنوع طراحی است. همچنین، قابلیت استفاده از نخ‌های ترکیبی در بافت چنین پارچه‌هایی، امکان تولید مواد ترکیبی یا هیبریدی را فراهم می‌سازد که در صنعت ساخت مواد مرکب بسیار متداول‌اند [۱،۲]. کامپوزیت‌های حاصل از پارچه‌های حلقوی-پودی به دلیل جذب انرژی و چقرمگی زیاد می‌توانند در کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی بیشتری دارد موردتوجه قرار گیرند. پارامترهای گوناگونی نظیر طول حلقه و تراکم بافت بر روی خواص مکانیکی این‌گونه کامپوزیت‌ها تأثیر دارد. همچنین خاصیت ایزوتروپیک این پارچه‌ها برای کاربردهای خاص مناسب است [۳].

کامپوزیت‌های با زمینه ماتریس گرما سخت^۱ نسبت به ترموست^۲ دارای مزیت‌هایی از قبیل سرعت‌بالا و هزینه پایین در تولید و امکان بازیافت (دوستار محیط‌زیست) می‌باشند و در بسیاری از صنایع مانند اتومبیل‌سازی و توربین باد نیز بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر ویسکوزیته بسیار بالای ماتریس‌های گرمانرم (معمولاً بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ پاسکال ثانیه) موجب دشواری فرایند ساخت این‌گونه کامپوزیت‌ها می‌شود. به همین منظور محققین برای کاهش هزینه تولید، روش‌هایی مانند الیاف ترکیبی^۳ را ارائه دادند که در آن جزء ماتریس و تقویت‌کننده با یکدیگر ترکیب‌شده و سپس کامپوزیت تولید می‌شود.



شکل ۱- طرح شماتیک بافت پارچه حلقوی-پودی ساده، مسیر بافت، راستای رج و ردیف [۲]

تاکنون، تحقیقات مروری خوبی در زمینه ساخت و پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل از منسوجات حلقوی-پودی انجام‌شده است [۲،۴]. راماکریشنا [۳] خواص کششی کامپوزیت‌های حلقوی-پودی را به دو روش آزمایشگاهی و تحلیلی موردبررسی قرارداد. وی ابتدا به روش آزمایشگاهی خواص کششی کامپوزیت حلقوی-پودی حاصل از الیاف شیشه را در دو راستای رج و ردیف استخراج کرد و سپس با استفاده از یک مدل تحلیلی که اعتبار آن در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تأیید شد، خواص کششی کامپوزیت‌های مذکور با کسر

حجمی‌های مختلف را پیش‌بینی کرد. لئونگ و همکارانش [۲] پتانسیل روش بافندگی حلقوی در تولید کامپوزیت‌های مهندسی و روش‌های جدید در تولید و به‌کارگیری آن‌ها را موردبررسی قراردادند. ایشان ضمن اشاره به فرآیند تولید پارچه‌های حلقوی مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌ها، ویژگی‌های مکانیکی سازه‌های حاصل را به‌واسطه‌ی برخی مدل‌های پیش‌بینی رفتاری موردبررسی قراردادند. هونگ و همکارانش [۵] به بررسی تحلیلی خواص نیرو-ازدیاد طول در پارچه‌های حلقوی-پودی مسطح تهیه‌شده از نخ‌هایی با عملکرد بالا برای تقویت کامپوزیت‌ها پرداختند. ایشان نیز از روش تحلیلی برای استخراج خواص کششی پارچه‌های حلقوی-پودی استفاده کردند. در این تحقیق برای پارچه‌های حاصل از الیاف شیشه منحنی‌های نیرو برحسب ازدیاد طول در جهت‌های رج و ردیف محاسبه شد و با نتایج تجربی مقایسه گردید که در نتیجه‌ی آن، تطابق خوبی به دست آمد. در کنار تحقیقات انجام‌شده به روش تحلیلی، برخی از محققین از روش‌های عددی از قبیل روش اجزای محدود نیز برای پیش‌بینی خواص کششی کامپوزیت‌های حلقوی-پودی استفاده کرده‌اند. عبقری و همکارانش [۶] به ارائه یک روش اجزای محدود برای پیش‌بینی تغییر شکل پارچه‌های حلقوی-پودی پرداختند. ایشان در شبیه‌سازی خود از نرم‌افزار ABAQUS و روش مدل‌سازی میکرو مکانیک^۴ استفاده کردند و با مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از هر دو روش تجربی و نظری، اعتبار مدل ارائه‌شده‌ی خود را به اثبات رساندند. لی و همکارانش [۷] نیز بر مبنای روش اجزای محدود، کشش پارچه‌های حلقوی-پودی را به‌صورت سه‌بعدی و از طریق مدل‌سازی میکرو مکانیک شبیه‌سازی کردند و تغییر شکل آن‌ها را در جهات مختلف موردبررسی قراردادند. دیگر محققان نظیر کیم و همکارانش [۸] نیز چقرمگی در برابر شکستن بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های حلقوی-پودی را موردبررسی قراردادند. ایشان به روش آزمایشگاهی و با استفاده از آزمون DCB، مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای را استخراج کردند و به بررسی نتایج پرداختند. ایشان دریافتند که چقرمگی شکست مداول کامپوزیت‌های بافته‌شده حلقوی ۱۰ تا ۲۰ برابر کامپوزیت‌های تک جهته هست و با کاهش کسر حجمی الیاف چقرمگی شکست افزایش می‌یابد.

بررسی پیشینه تحقیقاتی در رابطه با کامپوزیت‌های حلقوی-پودی، حاکی از آن است که عملکرد منسوج تقویت‌کننده در برابر بارگذاری ضربه‌ای، کمتر موردتوجه قرار گرفته است علی‌رغم این‌که دارای انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به دیگر تقویت‌کننده‌های منسوج دارند. راماکریشنا و همادا [۹] مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های حلقوی با الیاف شیشه و ماتریس پلی‌پروپیلن را موردبررسی قراردادند. ایشان کامپوزیت‌های ۴ و ۱۶ لایه از منسوج حلقوی-پودی که به روش عملیات قالب‌گیری پرس گرمایی تولید شدند را تحت آزمون‌های نفوذ و سقوط آزاد وزنه^۵ قراردادند. نتایج نشان‌دهنده‌ی این بود که حداکثر نیروی برخورد و انرژی جذب‌شده بستگی به چگالی بافت و تعداد لایه دارد. ایشان به مقایسه میزان انرژی برخورد و حداکثر نیروی برخورد در کامپوزیت حلقوی-پودی و سایر کامپوزیت‌های مرسوم پرداختند.

^۴ Micromechanics Modeling

^۵ Drop Weight

^۱ Thermoplastic

^۲ Thermosetting

^۳ Commingled Yarn

است. اخیراً آزادیان و همکارانش [۱۷] خواص ضربه پذیری سازه‌های مرکب حاصل از منسوجات سه‌بعدی حلقوی-پودی با دو سطح مقطع هندسی مثلثی و مستطیلی که به روش قالب‌گیری تزریق رزین به کمک کیسه‌ی خلا تولید شدند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استحکام نمونه با سطح مقطع مثلثی در مقایسه با نمونه با سطح مقطع مستطیلی در تمام سطوح انرژی ضربه ثقلی بیشتر بوده است. همچنین با افزایش سطح انرژی ضربه ثقلی نیروی تماس ضربه برای تمام نمونه‌ها افزایش داشته و هیچ‌گونه تورقی میان پوسته و هسته در این نوع کامپوزیت‌های ساندویچی مشاهده نشد. همچنین چاپارایان و همکارانش [۱۸] به روش تجربی و عددی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی سرعت حد بالستیک در چندلایه‌ی الیافی-فلزی پرداختند. ایشان خواص مورد نیاز برای تعریف خسارت در شبیه‌سازی را با استفاده از مراجع به دست آورده و نتیجه شبیه‌سازی را با پاسخ تجربی مقایسه کرده و تطابق خوبی مشاهده کرده‌اند. محمدباقر علیانی و سید رضا فلاحنگر [۱۹] در پژوهشی به تحلیل عددی عملکرد بالستیکی الیاف بافته‌شده چندلایه و بررسی تأثیر اصطکاک بین الیاف تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا پرداختند. ایشان در این مقاله به بررسی عددی با استفاده از ابزار ABAQUS رفتار بالستیکی پارچه‌های بافته‌شده از جنس تارون در برابر ضربه سرعت بالا پرتابه استوانه‌ای پرداخته‌اند. در این تحقیق برای مدل‌سازی الیاف آرامید از المان‌های جامد سه‌بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل ماده بر مبنای معیار آسیب تنش VUMAT استفاده شده است. همچنین با استفاده از مدل تأثیر اصطکاک بین تار و پود جذب انرژی پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار تنش‌ها در الیاف آرامید به ضربه اصطکاک بین تار و پود بسیار حساس است و با افزایش اصطکاک بین الیاف آرامید، انرژی پرتابه بین تعداد بیشتری از نخ‌ها توزیع می‌گردد و این پخش انرژی باعث افزایش زمان نفوذ پرتابه در این الیاف می‌شود. در این تحقیق به‌منظور اعتبارسنجی مدل از آزمون-های تجربی استفاده شد و تطابق خوبی در حد ۹۴ درصد بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد.

در این پژوهش، به‌منظور مطالعه‌ی رفتار تحت ضربه سازه‌های مرکب گرمانرم تقویت‌شده با یک منسوج حلقوی-پودی، از نخ مخلوط کولار^۲-پلی‌پروپیلن^۳ برای بافت جزء تقویت‌کننده‌ی منسوج استفاده می‌شود. پس از آماده‌سازی سازه‌ی مرکب به‌واسطه‌ی فرآیند قالب‌گیری پرس گرم، خواص ضربه‌ای نمونه‌ی حاصل به‌صورت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، برای استفاده از مدل تخریب پیش‌رونده نیاز به انجام آزمون-های تجربی برای استخراج پارامترهای مورد نیاز آن هست. تاکنون بسیاری از محققین در شبیه‌سازی اجزای محدود کامپوزیت‌های چندلایه تحت ضربه، از اطلاعات (پارامترهای موادی) موجود در مراجع خارجی استفاده کردند. این در حالی است که خواص کامپوزیت‌های ساخته‌شده در داخل کشور به علت متفاوت بودن مواد اولیه و همچنین فرایند ساخت، با خواص موجود در مقالات خارجی تفاوت قابل توجهی

پانديتا و همکارانش [۱۰] خواص ضربه کامپوزیت‌های حلقوی-پودی را بر مبنای خواص چقرمگی شکست و خواص کششی بررسی کردند. ایشان با استخراج خواص چقرمگی شکست کامپوزیت‌های حلقوی به روش آزمون DCB، مقاومت در برابر جدایش بین لایه‌ای را در نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدوامانندی در کامپوزیت-های حلقوی-پودی ناشی از نیروهای خمشی و فشاری وارد بر نمونه در نواحی ضربه است و به‌موجب همین امر، پدیده‌ی جدایش بین لایه‌ای پیش از رسیدن به بیشترین نیروی ضربه‌ای قابل تحمل در این نوع کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد. در این تحقیق رفتار ضربه ثقلی نوع جدیدی از هسته‌های سه‌بعدی بافته‌شده به روش بافندگی حلقوی-پودی بررسی شده است.

در زمینه شبیه‌سازی المان محدود خسارت در کامپوزیت‌ها تحقیقات فراوانی انجام شده است. اخیراً شکریه و همکارانش [۱۱] مدل‌سازی آسیب پیش‌رونده در چندلایه‌های کامپوزیتی را با در نظر گرفتن اثرات همزمان تخریب‌های درون و برون لایه‌ای با استفاده از معیار هاشین و مدل ناحیه چسبنده و با به‌کارگیری نرم‌افزار ABAQUS بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با به‌کارگیری مدل ناحیه چسبناک به‌منظور شبیه‌سازی تورق، می‌توان منحنی بار-جابجایی استخراج‌شده در آزمایش‌ها تجربی را با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود. همچنین طاهری و بخشان [۱۲] به روش تخریب پیش‌رونده فاصله مشخصه کششی را در چندلایه‌های کامپوزیتی بافته‌شده ناچار به روش‌های تحلیلی و عددی بررسی کرده‌اند. ایشان از زیر برنامه UMAT برای تعریف معیار واماندگی سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS استفاده کردند. کریمیان مقدم و همکارانش [۱۳]، رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی الیاف شیشه را در مود اول شکست به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از آزمون تیر یکسر گیردار دو تایی و روش اجزای محدود توسعه‌یافته XFEM مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی را استخراج کردند. همچنین شکریه و زین الدینی [۱۴] با به‌کارگیری روش چیدمان معادل در مود ترکیبی اول و دوم و همچنین با استفاده از روش اجزای محدود و بر طبق روش VCCT، چقرمگی شکست بحرانی یک نمونه تیر کامپوزیتی یکسر گیردار دو لبه نامتقارن را به دست آوردند. چوپانی و شاملی [۱۵] شکست بین لایه‌ای کامپوزیت چندلایه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری مود مرکب اول و دوم را به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از گیره (فیکسچر) بهبود یافته و شبیه‌سازی اجزای محدود با به‌کارگیری روش انتگرال گیری^۱ چقرمگی شکست بین لایه‌ای را استخراج کردند.

حسنعلی زاده و همکارانش [۱۶] از جمله محققانی بودند که یک مدل نیمه تجربی را جهت مطالعه رفتار ضربه با سرعت پایین در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی-پودی بر اساس متغیرهای ساختمانی این نوع پارچه ارائه کردند. انطباق نتایج نظری و تجربی ایشان نشان داد که مدل ارائه‌شده به‌خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی-پودی

² Kevlar

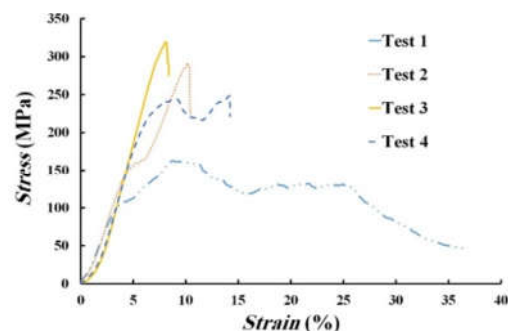
³ Polypropylene

¹ J-Integral

دارند. در این پژوهش پارامترهای موردنیاز (از قبیل خواص خطی، استحکامی و چقرمگی شکست) با استفاده از آزمایش‌ها تجربی به‌دست‌آمده است. در این تحقیق که ادامه تحقیق مؤلفین [۲۰] در رابطه با شبیه‌سازی خسارت در کامپوزیت‌های چندلایه در معرض ضربه است، پس از استخراج تجربی پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی، یک مدل معتبر اجزای محدود برای پیش‌بینی میزان خسارت و نفوذ وارد بر کامپوزیت چندلایه حلقوی-پودی از سوی عامل ضربه زنده تحت بارگذاری ضربه‌ای به دست می‌آید. در تحقیق حاضر برخلاف تحقیقات ذکرشده در پیشینه تحقیقات، پارچه بافته‌شده به روش حلقوی-پودی به‌صورت ماکرو و بدون استفاده از زیر برنامه مدل شده و نتایج شبیه‌سازی با آزمون تجربی ضربه مورد مقایسه قرارگرفته و انطباق خوبی مشاهده‌شده است. بدین ترتیب در این تحقیق یک مدل عددی معتبر و کم‌هزینه به روش ماکرو ارائه‌شده که برخلاف روش پرهزینه میکرو مانند تحقیق عبقری و همکارانش [۶] و بدون نیاز به استفاده از زیر برنامه مانند تحقیق محمدباقر علیانی و سید رضا فلاح‌تگر [۱۹]، توانایی شبیه‌سازی خسارت به روش تخریب پیش‌رونده برای شبیه‌سازی کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه‌ی حلقوی-پودی تحت ضربه سرعت‌بالا را دارا است.

۲- مواد و روش ساخت

به‌منظور تولید منسوجات حلقوی موردنیاز برای ساخت سازه‌های مرکب گرماترم، از دو نوع الیاف استفاده شد که عبارتند از: کولار ۲۹ باظرافت ۴۰۰ تکس ساخت شرکت Dupont-Tora و الیاف پلی‌پروپیلن تابیده‌شده باظرافت ۱۵۰ تکس. در فرآیند قالب‌گیری و ساخت کامپوزیت، از عملیات پرس گرمایی در این پژوهش استفاده می‌گردد. پس از پرس گرم جزء پلی‌پروپیلن (به‌عنوان ماتریس) ذوب‌شده و الیاف کولار (به‌عنوان تقویت‌کننده) باقی‌مانده و در برابر شرایط بارگذاری از خود مقاومت نشان خواهند داد. به همین دلیل، بررسی رفتار مکانیکی جزء تقویت‌کننده (کولار) بسیار حائز اهمیت است. برای این کار، از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D2256 توسط دستگاه سنجش کشش زوئیک (مدل Zwick 1440) استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش چند نخ کولار به‌صورت منحنی تنش-کرنش در شکل ۲ ارائه‌شده است. لازم به ذکر است که علت تفاوت برخی نمونه‌ها و بخصوص در نمونه آزمون ۴، لیز خوردن نخ کولار از فک دستگاه کشش است که بر اساس امکانات موجود اجتناب‌ناپذیر بوده است.



شکل ۲- نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش الیاف کولار

در فرایند بافت پارچه بر روی ماشین تخت بافت حلقوی-پودی، یک‌لا از نخ کولار و یک‌لا از نخ پلی‌پروپیلن به‌طور همزمان به ناحیه‌ی بافت تغذیه شدند. به‌واسطه‌ی این فرآیند، الیاف پلی‌پروپیلن به‌طور یکنواخت در ساختار پارچه قرار می‌گیرند که نمونه‌ای از پارچه بافته‌شده در تحقیق حاضر در شکل ۳ نشان داده‌شده است.



شکل ۳- پارچه بافته‌شده به روش حلقوی-پودی و قبل از پخت

در ادامه، پارچه حلقوی-پودی به‌صورت دولایه و در زوایای مختلف صفر و ۹۰ درجه، بر روی یکدیگر لایه چینی شدند و درنهایت تحت فشار ۲۰۰ بار و دمای ۲۰۰ درجه‌ی سیلیسیوس به مدت ۲۰ دقیقه در معرض فرآیند پرس حرارتی قرار گرفتند تا الیاف پلی‌پروپیلن ذوب شوند و به‌عنوان ماتریس در کامپوزیت نقش‌آفرینی کنند. شکل ۴ نمایی از دستگاه پرس گرمایی مورد استفاده جهت پخت کامپوزیت را نشان می‌دهد. یک نمونه سازه‌ی مرکب تولیدشده در این مرحله نیز در شکل ۵ نشان داده‌شده است.



شکل ۴- فرآیند پخت به روش پرس گرم پارچه و تهیه کامپوزیت



شکل ۵- نمونه کامپوزیت حلقوی-پودی پس از پخت

۳- روش شبیه‌سازی خسارت در کامپوزیت

امروزه به‌کارگیری روش شبیه‌سازی خسارت در کامپوزیت‌های چندلایه در مقیاس ماکرو به‌عنوان رویکردی پرکاربرد از روش اجزای محدود، که در آن به بررسی چگونگی پاسخ کلی سازه به بارگذاری اعمال‌شده پرداخته می‌شود، عمومیت‌یافته است. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی خسارت در کامپوزیت از روش تخریب پیش‌رونده^۱ (PDM) استفاده شده است. مدل PDM شامل سه مرحله تحلیل تنش الاستیک خطی، آغاز خسارت و تعریف متغیرهای حالت برای کاهش خواص مواد است.

در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند ABAQUS، مدل تخریب پیش‌رونده برای کامپوزیت‌ها به‌صورت الاستیک خطی تعریف می‌شود، شروع خسارت^۲ در آن با استفاده از معیارهای آغاز آسیب بیان می‌گردد و گسترش خسارت^۳ نیز به آهنگ آزادسازی انرژی^۴ در طول فرایند خسارت و نرم شدگی خطی ماده بستگی دارد [۲۱]. متفاوت بودن رفتار کامپوزیت‌ها در جهات مختلف، نیاز به بررسی خواص الاستیک، استحکام و ضریب پواسون آن‌ها را در جهات مختلف ایجاد می‌کند. از طرف دیگر کامپوزیت‌ها موادی هستند که رفتار متفاوتی را در برابر تنش‌های کششی و فشاری از خود نشان می‌دهند و این امر به‌نوبه‌ی خود باعث پیچیده شدن شبیه‌سازی رفتار خسارت در کامپوزیت‌ها می‌شود. ازجمله معیارهای رایج در شبیه‌سازی خسارت کامپوزیت‌ها، معیار هاشین [۲۲] است که در نرم‌افزار ABAQUS نیز از آن استفاده می‌شود. این معیار جهت افزایش دقت، آغاز خسارت در سازه را به‌صورت چهار مد دسته‌بندی می‌کند که تنش‌های برشی نیز در آن مؤثر هستند که در جدول ۱ آورده شده است. در این معیار، σ_{22} و σ_{11} به ترتیب نشان‌دهنده تنش مؤثر در راستای الیاف و ماتریس و σ_{12} نشان‌دهنده تنش برشی مؤثر بین ماتریس و الیاف است. X ، Y و S نیز معادل حداکثر مقاومت قابل‌تحمل در جهات الیاف، ماتریس و مقاومت برشی هستند که اندیس C نشان‌دهنده اعمال فشار و اندیس T نشان‌دهنده اعمال کشش است. تابع F_m نماینده معیارهای آغاز خسارت در حالت کششی و فشاری برای ماتریس است. همچنین تابع F_f نماینده معیارهای آغاز خسارت در حالت کششی و فشاری برای الیاف است. چنانچه بر اساس تنش ایجادشده و استحکام مربوطه تابع تعریف‌شده به مقدار یک برسد آن معیار ارضا می‌شود.

جدول ۱- انواع مدهای خسارت در معیار هاشین و روابط آن [۲۲]

رابطه معیار	نوع معیار
$\sigma_{22} \geq 0 \rightarrow F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^t}\right)^2$	کشش ماتریس
$\sigma_{22} < 0 \rightarrow F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^t}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^t}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^t}\right)^2$	فشار ماتریس
$\sigma_{11} \geq 0 \rightarrow F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^t}\right)^2$	کشش الیاف
$\sigma_{11} < 0 \rightarrow F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c}\right)^2$	فشار الیاف

¹ Progressive Damage Modeling

² Damage Initiation

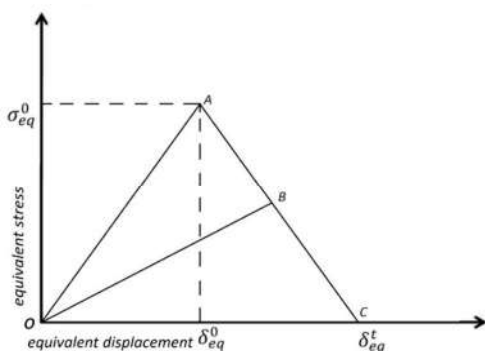
³ Damage Evolution

⁴ Energy Release rate (G)

در مدل تخریب پیش‌رونده ABAQUS، بعد از ارضا شدن معیارهای خسارت مطابق روابط جدول ۱ (مساوی یک شدن F)، تأثیر خسارت به‌وسیله کاهش سفتی دیده می‌شود. بدین ترتیب چنانچه پارامتر خسارت در یک المان برابر یک شود، سفتی در المان به صفر رسیده و آن المان هیچ تنش تحمل نمی‌کند. در مدل گسترش خسارت به روش خطی که در شکل ۶ نشان داده شده، پاسخ مواد بر اساس رابطه (۱) [۲۱] محاسبه می‌شود که در آن کرنش و C_d ماتریس الاستیسیته خسارت است.

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (1)$$

همان‌طور در شکل ۶ قابل‌مشاهده است، جابجایی معادل اولیه (δ_{eq}^0) در نقطه A با تنش معادل اولیه (σ_{eq}^0) تقاطع دارد و این نقطه زمانی است که هرکدام از مدهای خسارت ارضا شده است. با گسترش خسارت، سفتی و تنش کاهش می‌یابد و هنگامی که میزان جابجایی به δ_{eq}^t برسد، خسارت ماده در آن مد خسارت کامل می‌شود. در این میان برای رسیدن رفتار ماده از نقطه A به نقطه C برای هر مد خسارت به یک‌میزان انرژی (G^c) نیاز است که برابر با مساحت مثلث OAC، است. جزئیات بیشتری در این رابطه در تحقیق اخیر مؤلفین [۲۰] به‌تفصیل آورده شده است.



شکل ۶- تنش مؤثر در مقابل جابجایی مؤثر در فرضیه‌ی گسترش خسارت به‌صورت خطی [۲۰]

۴- استخراج تجربی پارامترهای موردنیاز

برای استخراج جذب انرژی (چقرمگی شکست^۵) درون لایه‌ای کامپوزیت استاندارد مشخصی موجود نیست و اکثر محققین مانند پینهو و همکارانش [۲۳]، از روش نرمی استفاده کرده‌اند. نمونه‌های آزمون موردنیاز برای استخراج خواص الاستیک و استحکامی شامل مدول الاستیسیته نرمال و برشی، استحکام نرمال و برشی به ترتیب بر مبنای استاندارد ASTM D3039 [۲۴] و ASTM D3518 [۲۵]، تهیه شده است.

پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی خسارت در کامپوزیت‌های چندلایه بر اساس استانداردهای ذکرشده و در دمای محیط با استفاده از دستگاه‌های سنتام^۶ مدل ۵۰ (ظرفیت ۵ تن) و هانس فیلد^۷ مدل

⁵ Fracture Toughness

⁶ Santam

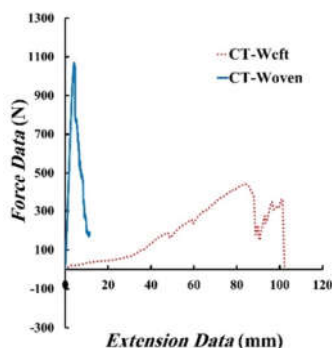
⁷ Hounsfield H25KS



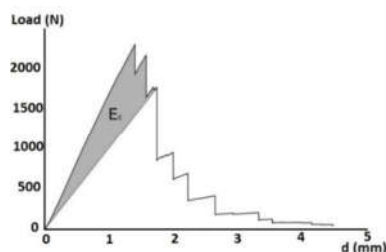
شکل ۷-آزمون کشش در جهت نرمال (سمت راست) و نمونه‌های نرمال و برشی پس از آزمون (سمت چپ)



شکل ۸-آزمون CT جهت استخراج چقرمگی شکست



شکل ۹- نتیجه آزمون CT کامپوزیت حلقوی-پودی و کامپوزیت دوچپته



شکل ۱۰- استفاده از روش مساحت در محاسبه چقرمگی شکست

H25KS (ظرفیت ۲,۵ تن) انجام گرفت. آزمون‌های کششی نرمال و برشی مطابق استاندارد با سرعت 2 mm/min انجام شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه‌ی آزمون برشی، نیز بر اساس استاندارد به صورت لایه چینی با زاویه‌ی 45° درجه آماده شده است. جهت استخراج چقرمگی شکست درون لایه‌ای کامپوزیت طبق روش پینهو و همکارانش [۲۳] و استاندارد ASTM E399 [۲۶] آزمون^۱ CT با سرعت 1 mm/min انجام شد که تصویر آن در شکل ۸ نشان داده شده است. در آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست، میزان جابجایی و بار در جهت عمودی به طور پیوسته توسط دستگاه ثبت شده و در همین حین میزان رشد ترک به صورت چشمی رصد شده است. نرخ انرژی آزاد شده (G) طبق رابطه (۲) [۲۳] قابل محاسبه است که در آن حداکثر نیرو (P)، ضخامت نمونه (h) و f یک تابع برحسب طول ترک است که جدول ضرایب آن در مرجع [۲۳] آورده شده است. لازم به ذکر است که ضرایب معرفی شده تابع f در مرجع [۲۳] مربوط به رشد ترک در یک کامپوزیت دو جهته الیاف کربن است. این در حالی است که کرنش کامپوزیت حلقوی-پودی حاضر، بسیار بیشتر از کامپوزیت دوچپته است. مقایسه نتیجه آزمون CT کامپوزیت حلقوی-پودی با کامپوزیت دوچپته در شکل ۹ نشان داده شده است. بدین ترتیب استفاده روش مرجع [۲۳] پاسخ درستی برای استخراج چقرمگی شکست کامپوزیت حاضر ارائه نمی‌دهد.

در نتیجه در این تحقیق، چقرمگی شکست بحرانی به روش مساحت که توسط لافان و همکارانش ارائه شده و با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه شده است [۲۷]. در این روابط E_c مساحت زیر منحنی نیرو جابجایی به دست آمده از آزمون CT از آغاز تا گسترش ترک است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. A_c نیز مساحت ترک است که از ضرب طول ترکی که گسترش یافته در ضخامت نمونه حاصل می‌شود. پارامترهای به دست آمده از آزمون‌ها شامل خواص الاستیک، استحکام و مقدار جذب انرژی، جهت شبیه‌سازی خسارت درون لایه-های کامپوزیت به روش PDM در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است به علت محدودیت مالی برخی از خواص با استفاده از روابط تئوری و مشخصات فنی مواد به دست آمده است.

$$G_{\text{laminate}} = \left(\frac{P}{h}\right)^2 f(a) \quad (2)$$

$$G_{IC} = \frac{E_c}{A_c} \quad (3)$$

$$A_c = \Delta a \times t \quad (4)$$

¹ Compact Tension

شده و برخورد یک مخروط توپر از جنس فولاد با جرم ۹/۲۵ گرم و سرعت ۱۵۹/۳ متر بر ثانیه (معادل ۱۷/۳۶ ژول)، به صورت عمود به مرکز صفحه شبیه سازی شده است.

۶-۱- نحوه شبیه سازی

در تحقیق حاضر برای شبیه سازی برخورد، از تحلیل غیرخطی و حلگر صریح^۱ که در این گونه مسائل نسبت به حلگر ضمنی^۲ مناسب تر است استفاده شده است. مدل سازی پوسته با استفاده از المان صفحه ای پیوسته^۳ صورت گرفت و جسم مخروطی ضربه زننده نیز به صورت یک ماده ای شکل پذیر^۴ مدل سازی شد به طوری که این جسم با سرعت اولیه مشخص به سطح صفحه برخورد می کند. برای مش بندی صفحه نیز المان SC8R که یکی از المان های خانواده المان صفحه ای پیوسته است، مورد استفاده قرار گرفت. این المان ها در مقایسه با المان های صفحه ای مرسوم^۵ به علت در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل برشی، نتایج دقیق تری می دهند. اما روابط دینامیکی و سینماتیکی آن ها از نظریه ورق ها پیروی می کند [۲۱]. تماس بین پرتابه و هدف با استفاده از تابع پنالتی و به صورت Hard Contact موجود در نرم افزار تعریف شده که بر طبق آن نیروی هرترز بر اساس سفتی سطوح و میزان فرورفتگی محاسبه می شود.

شبیه سازی حاضر، به روش ماکرو و با استفاده از مدل PDM انجام شده است. در روش ماکرو الیاف و ماتریس مدل نشده و کل کامپوزیت به صورت یک جسم یکپارچه در نظر گرفته شده است. خواص این کامپوزیت به صورت خسارت درون لایه ای و بر اساس داده های جدول ۲ در شبیه سازی تعریف شده اند. تعداد المان های بکار رفته در شبیه سازی شامل ۱۶۲۸ المان SC8R برای صفحه و ۱۱۱۰ المان C3D8R برای ضربه زننده است که تعداد و اندازه مناسب المان ها با استفاده از روش آزمون و خطا به دست آمد. بدین منظور با ریزتر کردن المان ها و مقایسه نتایج با اندازه مش اولیه و تکرار این فرایند و در نهایت مطالعه همگرایی نتایج، اندازه مناسب المان ها قابل محاسبه است.

همچنین برای کاهش زمان حل، از مدل یک چهارم برای استخراج نتایج استفاده شده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، برای افزایش دقت نتایج، از المان هایی با ابعاد کوچک تر در اطراف ناحیه برخورد (مش ریزتر) استفاده شده است. از طرف دیگر برای رسیدن به تعداد المان بهینه و عدم وابستگی قابل توجه نتایج به تعداد المان ها، نیاز به مطالعه همگرایی المان ها است که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بدین ترتیب در طی مطالعه همگرایی اندازه المان ها، با مقایسه تغییرات نیروی برخورد نسبت به ریز کردن المان، مشاهده شد که در حالت ۱۵ المان، کمترین تغییرات نیروی برخورد به دست می آید و این تعداد برای لیه دایره تعداد بهینه المان است.

جدول ۲- خواص استخراج شده از ماده برای تعریف خسارت در مدل

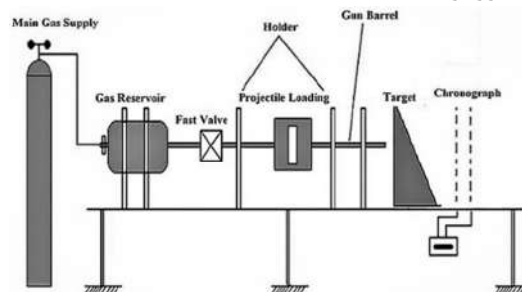
PDM					انواع خواص
E_{11} ۲۶۰	E_{22} ۲۶۰	G_{12} ۱۵۷	G_{13} ۱۰۴	G_{23} ۱۰۴	الاستیک (Mpa)
X^T ۱۵	X^C ۵	Y^T ۱۵	Y^C ۵	S^L ۸	آغاز خسارت (Mpa)
F^T ۸۵۰	F^C ۴۲۷	M^T ۵/۲ ^(*)	M^C ۰/۵ ^(**)		گسترش خسارت (N/mm)

(*) با استفاده از روابط تئوری و معادل سازی تعیین شده

(**) از مشخصات فنی مواد تعیین شده

۵- آزمون تجربی ضربه

برای انجام آزمون تجربی ضربه از کامپوزیت تهیه شده ۲ لایه، نمونه آزمون ضربه مربع شکلی با ابعاد ۱۴۰×۱۴۰ و ضخامت کل ۳/۳ میلی متر و چگالی ۵۴۶ kg/m³ استفاده شد. آزمون ضربه با استفاده از دستگاه ضربه سرعت بالا انجام شده که شکل شماتیک آن، پرتابه و نحوه گیردار کردن کامپوزیت تحت ضربه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ورق کامپوزیتی ۲ لایه کولار-پلی پروپیلن بافته شده به روش حلقوی پودی، توسط یک ضربه زننده مخروطی شکل از جنس VCN200 با قطر ۸/۷، طول ۳۰ میلی متر و زاویه مخروط ۳۰ درجه با جرم ۹/۲۵ گرم، تحت ضربه به تعداد ۳ مرتبه و در محدوده سرعت ۱۶۰ متر بر ثانیه قرار گرفت.



شکل ۱۱- طرحواره دستگاه آزمون ضربه بالستیک، شکل پرتابه و شرایط تکیه گاهی سازه هدف

۶- شبیه سازی المان محدود ضربه

در این تحقیق شبیه سازی اجزای محدود به کمک نرم افزار ABAQUS نسخه ۲۰۱۷ انجام شده است. مدل دینامیکی، شامل یک مخروط فولادی به عنوان ضربه زننده بر روی صفحه مربعی ۱۴۰×۱۴۰ میلی متر از کامپوزیت حلقوی-پودی کولار-پلی پروپیلن به ضخامت کل ۳/۳ میلی متر است. تکیه گاه های صفحه به صورت گیردار مدل سازی

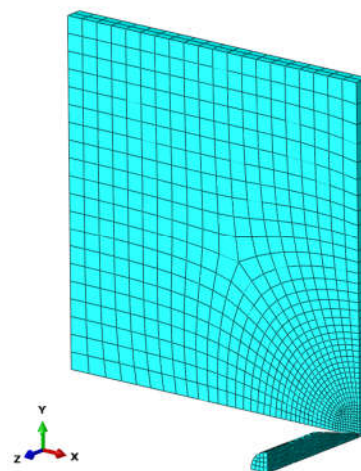
¹ Explicit

² Implicit

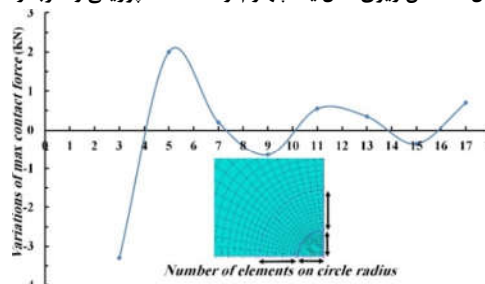
³ Continuum Shell

⁴ Deformable

⁵ Conventional shell



شکل ۱۲- مش ریزی مدل یک چهارم از صفحه کامپوزیتی و ضربه زننده



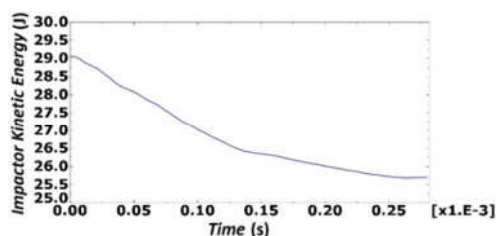
شکل ۱۳- همگرایی تعداد المان‌ها، حداکثر نیروی برخورد نسبت به تعداد المان در طول لبه ناحیه دایره‌ای شکل

۲-۶- اعتبار سنجی شبیه‌سازی

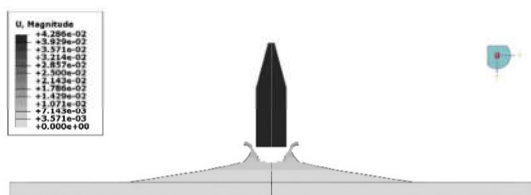
برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی، مقادیر به‌دست‌آمده برای سرعت جسم ضربه زننده پس از برخورد به نمونه در آزمون تجربی با مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مقایسه شد. تطابق خوب میان نتایج تجربی و تئوری، بیانگر اعتبار مدل بود. در شکل ۱۴، تاریخچه تغییرات انرژی جنبشی جسم ضربه زننده نشان داده شده است که از شبیه‌سازی آزمون ضربه (مدل یک چهارم) در ABAQUS قابل استخراج است. نتایج بیانگر این هستند که جسم ضربه زننده پس از نفوذ کامل در نمونه‌ی مورد آزمایش، به میزان ۳٫۳۶ ژول انرژی خود را از دست می‌دهد. در مقابل سرعت ضربه زننده در آزمون تجربی پس از نفوذ به ۱۴۸٫۸ متر بر ثانیه کاهش یافته که برابر با ۱۵٫۲۳ ژول کاهش انرژی جنبشی است و با توجه به یک چهارم بودن مدل عددی اختلاف نتایج اجزای محدود و آزمون ضربه در حدود ۱۱ درصد به‌دست‌آمده است. در این تحقیق، مکانیسم شکست کامپوزیت در نتیجه‌ی اعمال نیروی ضربه با سرعت بالا، از نوع پتالینگ^۱ یا گلبرگ شدگی است. پتالینگ به علت بروز تنش‌های کششی شدید شعاعی رخ می‌دهد و منحصر به محل برخورد است که میزان آن به ضخامت سازه هدف بستگی دارد. میزان ارتفاع ناحیه پتالینگ به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در حدود ۱۴ میلی‌متر است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نیز، توزیع کانتورهای خسارت درون لایه‌ای در صفحه کامپوزیتی پس از

نفوذ ضربه زننده، طبق معیار هاشین و بر اساس معیارهای کشش و فشار در الیاف و ماتریس نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که الیاف در حالت کشش، بیشترین مقاومت در برابر خسارت را از خود نشان دادند.

نکته قابل‌توجه در اینجا این است که خواص ماده برای تعریف خسارت در مدل PDM که در جدول ۲ نشان داده شده با استفاده از آزمون‌های استاتیکی استخراج شده است. این در حالی است که ماده تحت ضربه با سرعت بالا قرار گرفته و اثرات نرخ کرنش در نتایج شبیه‌سازی تأثیر می‌گذارد. رودریگز و همکارانش [۲۸] در تحقیقی دریافتند که کامپوزیت بافته شده کولار-پلی‌پروپیلن دارای خواص مکانیکی متفاوتی در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ ۱/s است. ایشان دریافتند که مقاومت کششی کامپوزیت بافته شده کولار-پلی‌پروپیلن در حالت دینامیکی در حدود ۵ درصد بیشتر و مدول یانگ بیش از ۱۰ برابر حالت استاتیکی به‌دست‌آمده است. بدین ترتیب در این شبیه‌سازی نیز مقاومت کششی الیاف و مدول یانگ در جهت الیاف بر طبق مقادیر فوق اصلاح شده‌اند. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش سان و هان [۲۹] است مبنی بر این که چقرمگی شکست در سرعت پایین تر از ۱۲۰۰ متر بر ثانیه ثابت و برابر با مقدار استاتیکی آن است، استخراج انرژی چقرمگی شکست به‌صورت استاتیکی برای شبیه‌سازی ضربه با سرعت حدود ۱۵۰ متر بر ثانیه معتبر است و نیاز به استخراج چقرمگی شکست به‌صورت دینامیکی در این محدوده سرعت نیست.



شکل ۱۴- تاریخچه تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده



شکل ۱۵- مکانیزم شکست پتالینگ کامپوزیت و میزان ارتفاع ناحیه آسیب‌دیده در شبیه‌سازی برخورد

¹ Petalling

حلقوی-پودی تحت ضربه سرعت بالا ارائه می‌کند. با توجه به تفاوت خواص واقعی کامپوزیت‌های ساخت داخل با خواص معرفی شده در مراجع محققین خارجی که ناشی از تفاوت ماده اولیه و فرایند ساخت است، در این پژوهش اکثر خواص مورد نیاز شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از آزمون‌های تجربی استخراج شده است.

خسارت تعریف شده در لایه‌های کامپوزیت به روش تخریب پیش‌رونده (PDM) انجام شده است. آغاز خسارت در لایه‌های کامپوزیت با استفاده از معیار هاشین پیش‌بینی شده و گسترش خسارت نیز به وسیله مدل تخریب پیش‌رونده و کاهش سفتی بر پایه انرژی چقرمگی شکست موجود در نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت.

پارامترهای مورد نیاز مدل‌های بکار رفته برای شبیه‌سازی خسارت، از قبیل خواص خطی (مانند مدول یانگ)، استحکام (مانند تنش واماندگی) و چقرمگی شکست (مانند آهنگ آزاد شدن انرژی) با استفاده از آزمایش‌ها تجربی و بر اساس استاندارد ASTM و مراجع معتبر استخراج گردیده است.

برای تعیین اعتبار مدل پیشنهادی اجزای محدود، مقایسه‌ای میان سرعت جسم ضربه زننده پس از برخورد در آزمون تجربی و سرعت به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده است. بدین منظور تعدادی نمونه کامپوزیت مربع شکلی حلقوی-پودی ۲ لایه، ساخته شده و آزمون ضربه با استفاده از تفنگ گازی ضربه سرعت بالا انجام انجام شده است. ورق کامپوزیتی ۲ لایه کولار-پلی‌پروپیلن، توسط یک ضربه زننده مخروطی شکل با جرم ۹،۲۵ گرم، تحت در محدوده سرعت ۱۶۰ متر بر ثانیه قرار گرفت.

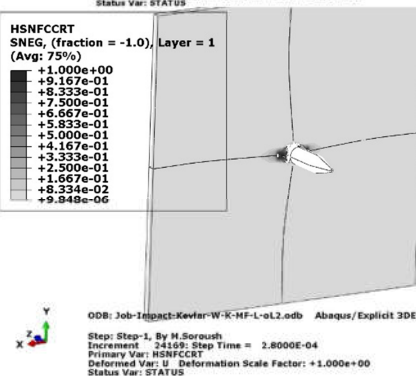
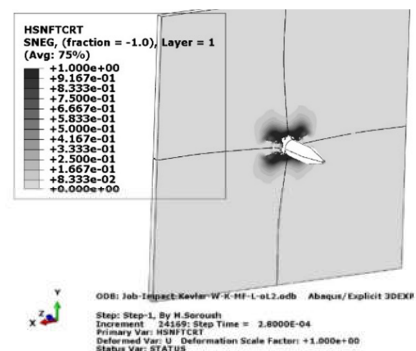
بر مبنای نتایج شبیه‌سازی، ضربه زننده پس از نفوذ کامل، حدود ۱۵،۲۳ ژول انرژی خود را از دست داد که این مقدار در حدود ۱۱ درصد کمتر از نتیجه آزمون تجربی به‌دست‌آمده است. بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، روش تخریب پیش‌رونده می‌تواند به‌خوبی رفتار خسارت درون لایه‌های صفحه کامپوزیتی حلقوی-پودی تحت ضربه سرعت بالا را شبیه‌سازی کند. در این میان مزیت و ابتکار مدل المان محدود حاضر کم‌هزینه بودن و سادگی آن در کنار استخراج خواص مورد نیاز آن به‌صورت تجربی است. به‌عبارت دیگر مدل‌سازی کامپوزیت حلقوی-پودی به روش ماکرو و همچنین استفاده کردن از خسارت پیش‌رونده موجود در برنامه ABAQUS (بدون نیاز به سابروتین) ازجمله مزیت‌های مدل عددی حاضر است. بدین ترتیب تحقیق حاضر می‌تواند راهگشای تحقیقات آتی در زمینه طراحی و تحلیل این نوع کامپوزیت‌ها در معرض ضربات سرعت بالا با رویکرد استخراج خواص مکانیکی آن به‌صورت تجربی قرار گیرد.

۸- سپاسگزاری

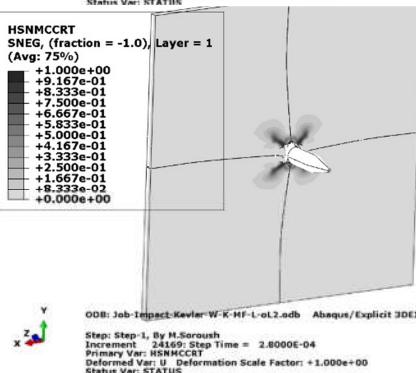
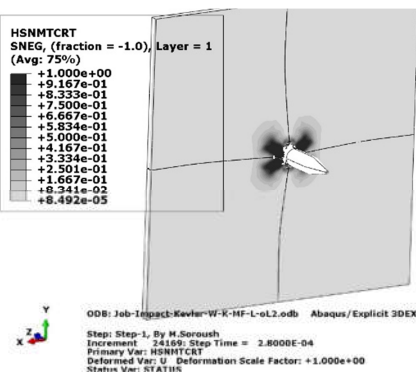
از آقایان دکتر خلیلی و مهندس شرفی از آزمایشگاه مواد مرکب و هوشمند دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی و آقایان مهندس تقویان و میرزایی از کارگاه مواد مرکب دانشگاه صنعتی مالک اشتر (تهران)، بابت همکاری و راهنمایی‌های فراوان در انجام آزمون‌های تجربی مورد نیاز و ساخت کامپوزیت تشکر فراوان می‌شود.

۹- نمادها

E مدول یانگ (Pa)



شکل ۱۶- کانتورهای خسارت در صفحه کامپوزیتی پس از نفوذ، بر اساس معیارهای کشش در الیاف (بالا) و فشار در الیاف (پایین)



شکل ۱۷- کانتورهای خسارت در صفحه کامپوزیتی پس از نفوذ، بر اساس معیارهای کشش در ماتریس (بالا) و فشار در ماتریس (پایین)

۷- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر یک مدل معتبر، دقیق و کم‌هزینه اجزای محدود با در نظر گرفتن خسارت و نفوذ ضربه زننده در یک نمونه کامپوزیت

Up, In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 214-225, 2014.

[15] Choupani N., Shameli M., Experimental and Numerical Investigation of in-Plane Interlaminar Fracture of Woven Glass-Epoxy Composite Under Mixed-Mode Loading Conditions, In Persian, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 1, No. 51, pp. 39-54, 2017.

[16] Hasanalizadeh F., Dabiryan H., Sadighi M., A Semi-Empirical Model to Predict The Low-Velocity Impact Behavior of Weft-Knitted Spacer Fabrics Reinforced Composites, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 117-126, 2018.

[17] Azadian M., Hasani H., Shokrieh M. M., The Novel Three Dimensional Weft Knitted Sandwich Composites Under Drop-Weight Impacts in Different Energy Levels, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 05, No. 02, pp. 271-278, 2018.

[18] Chaparian Y., Kabiri A., Khaje Arzani H., Gerami G., Experimental and Numerical Investigation of High Velocity Impact Resistance in Fiber Metal Laminates, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 99-108, 2018.

[19] Oliaee M., Falahatgar S. R., 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*, Vol. 49, No. 1, pp. 199-288, 2019.

[20] Soroush M., Malekzade Fard K., Shahravi M., Finite Element Simulation of Interlaminar and Intralaminar Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Impact, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 15, No. 6, 2018.

[21] Dssault System's Simulia Corp, ABAQUS 2017 User's Manual. Providence, RI, USA, 2017.

[22] Hashin Z., A. Rotem, A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 448-464, 1973.

[23] Pinho S.T., Robinson P., Iannucci L., Fracture Toughness of The Tensile and Compressive Fibre Failure Modes in Laminated Composites, *Composite Science Technology journal*, Vol. 66, No. 13, pp. 2069-2079, 2006.

[24] Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by test of a laminate, ASTM D 3518/3518M-94. West Conshohocken (PA), USA: American Society for Testing and Materials, 2002.

[25] Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM D 3039/D 3039M-00, West Conshohocken (PA), USA: American Society for Testing and Materials, 2002.

[26] Standard Test Method for Linear-Elastic Plane Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03, No. Reapproved 2007, E399-05, 2014.

[27] Laffan M. J., Pinho S. T., Robinson P., Iannucci L., Measurement of The in Situ Ply Fracture Toughness Associated with Mode I Fibre Tensile Failure In FRP. Part I: Data reduction, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 606-613, 2010.

[28] Rodriguez J., Chocron I. S., Martinez M. A., Sanchez-Galvez V., High Strain Rate Properties of Aramid and Polyethylene Woven Fabric Composites, *Composites: Part B*, Vol. 95, pp. 147-154, 1996.

[29] Sun C. T., Han C., a Method for Testing Interlaminar Dynamic Fracture Toughness of Polymeric Composites, *Composites: Part B*, Vol. 35, pp. 647-655, 2000.

G	مدول برشی (Pa)
G^c	انرژی چقرمگی شکست بحرانی (N/mm)
P	نیرو (N)
S	مقاومت برشی بین الیاف و ماتریس (Pa)
X	مقاومت در جهت الیاف (Pa)
Y	مقاومت در جهت ماتریس (Pa)

۱۰- مراجع

[1] Horrocks A. R., Anand S. C., *Handbook of Technical Textiles*, Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, pp. 5.95-5.128, 2000.

[2] Leong K. H., Ramakrishna S., Huang Z. M., Bibo G. A., the Potential of Knitting for Engineering Composites-A Review, *Composites: Part A Journal*, Vol. 31, pp. 197-220, 2000.

[3] Ramakrishna S., Characterization And Modeling of The Tensile Properties of Plain Weft-Knit Fabric-Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 1-22, 1997.

[4] Tan P., Tong L., Steven G. P., Modelling for Predicting The Mechanical Properties of Textile Composites -A Review, *Composites: Part A Journal*, Vol. 28, pp. 903-922, 1997.

[5] Hong H., Araujo M. D. D., Fanguero R., Ciobanu O., Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement, *Textile Research Journal*, Vol. 72, pp. 991-996, 2002.

[6] Abghary M. J., Hasani H., Jafari R., Prediction of Deformation Behavior of Interlock Knitted Fabrics in Different Directions Using FEM Method, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 109, pp. 1-7, 2018.

[7] Li Y., Yang L., Chen S., Xu L., Three Dimensional Simulation of Weft Knitted Fabric Based on Surface Model, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 18, pp. 52-57, 2014.

[8] Kim K. Y., Curiskis J. I., Ye L., Fu, S. Y., Mode-I Interlaminar Fracture Behaviour of Weft-Knitted Fabric Reinforced Composites, *Composites: Part A Journal*, Vol. 36, pp. 954-964, 2005.

[9] Ramakrishna S., Hamada H., Impact Damage Resistance of Knitted Glass Fiber Fabric Reinforced Polypropylene Composites, *Reinforced Polypropylene Composites*, Vol. 4, pp. 61-72, 1995.

[10] Pandita S., Falconet D. D., Verpoest I., Impact Properties of Weft Knitted Fabric Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1113-1123, 2002.

[11] Shokrieh M. M., Ghajar M., Salamattalab M., Madoliat R., Progressive Damage Modeling Of Laminated Composites by Considering Simultaneous Effects of Interlaminar and Intralaminar Damage Mechanisms, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015.

[12] Taheri-Behrooz F., Bakhshan H., Tensile Characteristic Length Determination of Nothced Woven Composite Laminates by Means of Progressive Damage Analysis, In Persian, *Modares Mechanical Of Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 360-370, 2015.

[13] Kariman Moghadam A., Rahnema A. S., Maleki S., Experimental and Numerical Investigation of Crack Growth in Adhesive Bonding of Two Composite Plates Under Mode I, In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 271-280, 2016.

[14] Shokrieh, M. M., Zeinedini A., Prediction of Strain Energy Release Rate of Asymmetric Double Cantilever Composite Beam in Mixed-Mode I/II Delamination Using Equivalent Lay-