

مدل سازی عددی نفوذ پرسرعت در چند لایه های بافته شده با در نظر گیری اثرات نرخ کرنش در تخریب پیش رونده

محمد میر^۱، هادی صبوری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- استادیار دانشگاه خوارزمی، تهران

(تاریخ وصول: ۹۶/۳/۲، تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۳)

چکیده

در این پژوهش، تخریب پیش رونده مواد کامپوزیت بافته شده در اثر ضربه سرعت بالا به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا ضرورت تحلیل مسائل ضربه در مواد کامپوزیت با استفاده از روش تخریب پیش رونده شرح داده شده و در ادامه، مدل های ماده موجود برای این گونه تحلیل، بررسی می شود. روابط حاکم بر آستانه خرابی و موده های آن و همچنین پیشرفت تخریب، بیان می گردد. این روابط با در نظر گیری اثر نرخ کرنش بر تغییر مدول ها و استحکام های ماده کامپوزیتی، ارائه گردیده است. بر اساس روابط حاکم، یک مدل ماده تعریف شده توسط کاربرد نرم افزار ال-اس-داینما ساخته شده است. مدل ماده تهیه شده، قابلیت شبیه سازی و تحلیل موده های مختلف خرابی شامل تخریب کششی یا فشاری الیاف، تخریب عرضی و برشی داخل صفحه، تخریب خارج صفحه و لایه شدگی و همچنین له شدگی با در نظر گیری اثر نرخ کرنش را دارا است. با استفاده از این مدل ماده، ضربه بالستیک در هدف های چهار لایه و هشت لایه کامپوزیتی مورد بررسی قرار می گیرد. تغییرات سرعت لحظه ای پرتابه در سرعت هایی کمتر و بیشتر از حد بالستیک ارائه شده و سرعت حد بالستیک هر صفحه چند لایه، تعیین می گردد. دو رویکرد صرف نظر یا در نظر گیری اثرات نرخ کرنش، باعث به دست آمدن پاسخ های متفاوتی برای سرعت حد بالستیک می گردند. همچنین میزان تغییرات مدول و استحکام در جهت الیاف بر اساس نرخ کرنش و رشد پارامتر خرابی برای نقاط نزدیک و دور از محل ضربه و همچنین مناطق میانی، مورد بررسی قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: تخریب پیش رونده، نفوذ، سرعت حد بالستیک، اثرات نرخ کرنش، مدل سازی عددی.

Numerical Modeling of High Velocity Penetration in Woven Laminates Considering Strain Rate Effects in Progressive Damage

M. Mir¹, H. Sabouri^{2*}

Kharazmi University, Tehran

(Received: 5/23/2017, Accepted: 9/14/2017)

Abstract

In this research, progressive damage of woven composite materials due to high velocity impact using finite element method is investigated. Necessity of impact analysis of composite materials using progressive damage method is detailed and available material models for this type of analysis is discussed. Governing equations at onset of failure and failure modes as well as damage growth is expressed. Strain rate effects are contained in dynamic modulus and strength of composite materials. A user defined material model was supplied in LS-Dyna. Different failure modes such as axial failure in fibers due to tension or compression, in-plane lateral and shear failure, out of plane failure and delamination and crushing including strain rate effects may be simulated. Ballistic impact in four and eight layered composite targets was investigated using this UMAT. Variation of projectile velocity in terms of time was studied on velocities less than and more than ballistic limit velocity. Two different responses were achieved by considering or neglecting strain rate effects. Also, variation of elastic modulus and strength in fiber direction as function of strain rate and damage growth were investigated for near field, far field and midrange of impact zone.

Keywords: Progressive Damage, Penetration, Ballistic Limit Velocity, Strain Rate Effects, Numerical Modeling.

۱- مقدمه

بسیاری از سازه های کامپوزیتی، ممکن است در معرض بارهای دینامیکی و ضربه ای قرار گیرند. بررسی ضربات کم سرعت و پرسرعت و در نظرگیری ملاحظات بالستیک، در طراحی این سازه ها با اهمیت است. در این زمینه، مطالعه مکانیزم های حاکم بر نفوذ، انرژی جذب شده در اثر نفوذ، تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقی مانده از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران است.

سان و پتی [۱] آزمایش های شبه استاتیکی و نفوذ بالستیک را روی کامپوزیت گرافیت/ اپوکسی با ضخامت های متفاوت و قطر دهانه های تکیه گاهی مختلف انجام دادند. در این پژوهش مشخص گردید که انرژی نفوذ استاتیکی کمتر از انرژی نفوذ بالستیک است. همچنین با مطالعه بیشتر بر روی شرایط تکیه گاهی مختلف دیده شد که سرعت باقی مانده نفوذ در دهانه های تکیه گاهی کوتاه و بلند، بر اساس سرعت های اولیه ضربه یکسان، نزدیک به هم است. این بدان معنا است که فرایند نفوذ سرعت بالا، محدود به منطقه نزدیک به ضربه است و حساسیت کمتری به شرایط تکیه گاهی دارد.

مینس و همکاران [۲] به مطالعه تجربی پانچ برشی شبه استاتیکی و ضربه پرسرعت در کامپوزیت چند لایه شیشه/ پلی استر با ضخامت های مختلف پرداختند. در این تحقیق از پانچ هایی با قطر یکسان و شکل دماغه های متفاوت (تخت، مخروطی و نیم کره) استفاده شد. در کلیه شرایط، انرژی نفوذ شبه استاتیکی همواره کمتر از انرژی نفوذ بالستیک به دست آمد که بیانگر اثر نیروهای اینرسی و رفتار تابع نرخ کرنش مواد بود. در پژوهش انجام شده توسط زین و ون [۳] نیز پاسخ سازه ای و میزان جذب انرژی صفحات کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی و کربن/ اپوکسی در دو بارگذاری ضربه کم سرعت و پرسرعت نیز مورد مقایسه قرار گرفت و یکی از علت های اختلاف پاسخ ها در دو حالت بارگذاری ضربه ای، وابستگی خواص مکانیکی کامپوزیت ها به نرخ کرنش عنوان شد.

ژو و دیویس [۴] نفوذ استاتیکی و ضربات سرعت پایین در جهت ضخامت را برای کامپوزیت شیشه/ پلی استر بررسی کردند. در این پژوهش مشاهده شد که به دلیل اثرات وابستگی خواص مکانیکی به نرخ کرنش، بیشینه نیروی تماسی در بارگذاری ضربه ای نسبت به شرایط استاتیکی افزایش خواهد یافت. اما تخریب های ناشی از لایه-شدگی، اختلاف کمتری در دو حالت شبه استاتیکی و دینامیکی نشان می دهند. به علاوه، این آزمایش ها با استفاده از روش اجزاء محدود خطی با فرمول بندی المان پوسته ای در میدان تغییر فرم برشی، شبیه سازی گردید. در شرایطی که ضخامت صفحه اندک باشد، تطبیق خوبی بین نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی به دست آمد.

گلرت و همکاران [۵] اثر کالیبرهای مختلف و شکل دماغه های گوناگون پرتابه را بر رفتار بالستیک کامپوزیت های شیشه/ وینیل استر مورد بررسی قرار دادند و رابطه انرژی حد بالستیک این چندلایه ها بر حسب ضخامت آن ها را به فرم یک تابع درجه دو بیان نمودند. همچنین

مشاهده گردید که چندلایه های ضخیم، عملکرد بالستیکی بهتری نسبت به چندلایه های نازک داشتند. این پژوهش به ارائه یک رابطه نیمه تجربی برای نفوذ پرتابه های مختلف منجر شد. ویل و همکاران [۶] با انجام آزمایش هایی تأثیر زاویه قرارگیری الیاف در لوله های الیاف پیچی شده کربن/ اپوکسی بر مقاومت بالستیک و میزان جذب انرژی ضربه پرسرعت این لوله ها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، لوله ای که ظرفیت بالستیک بیشتری داشته باشد، تعیین گردید. تحقیق مشابهی نیز به وسیله میلی و نسیب [۷] در مورد اثر زاویه قرارگیری الیاف لایه ها در میزان تخریب های ایجاد شده در اثر ضربه کم سرعت انجام گرفت.

علی رغم پژوهش های تجربی متنوعی که در زمینه نفوذ در اهداف کامپوزیتی مختلف انجام گرفته است، شبیه سازی عددی این فرایند، موضوعی چالش برانگیز است. همچنین تخمین تخریب های انجام گرفته در اثر ضربات کم سرعت یا پرسرعت در کامپوزیت ها در بسیاری از سازه های ساخته شده از این مواد از اهمیت زیادی برخوردار است. پیش بینی آستانه شکست، برای تخمین مقاومت و ظرفیت باربری نهایی آن، مناسب نیست. نظریه های کلاسیک نظیر تسای-هیل، تسای-وو و هافمن، تنها آستانه وقوع تخریب را پیش بینی می کنند و در مورد مود تخریب و همچنین باربری نهایی سازه کامپوزیتی اظهار نظر چندانی ندارند. برای این منظور، می بایست تخریب به شکل مرحله به مرحله یا پیش رونده مورد بررسی قرار گیرد. در شبیه سازی مکانیزم نفوذ، تشخیص مود تخریب، و یا احیاناً تعیین مود غالب در بین مودهای رخ داده شده و همچنین تغییرات احتمالی مود غالب تخریب در حین پیشرفت آسیب، ضروری است. همچنین لازم است که اثرات سرعت های لحظه ای و نرخ کرنش های ایجاد شده در حین بارگذاری، بر روی تغییرات خواص مکانیکی مواد، در نظر گرفته شود. پژوهش های انجام گرفته در این موضوع، چگونگی رفتار ماده کامپوزیتی پس از اولین تخریب (در شرایط پیشرفت خرابی) را بیان می نمایند:

در این زمینه معیار هاشین [۸] از اهمیت زیادی برخوردار است. طبق نظر هاشین، یک تک لایه کامپوزیتی یک جهته بسته به نوع بارگذاری می تواند چهار مود شکست کششی الیاف، شکست فشاری الیاف، شکست کششی/ برشی ماتریس و شکست فشاری ماتریس را تجربه نمایند. در چند لایه ها این چهار مود به همراه مود لایه شدگی، آستانه وقوع تخریب را پیش بینی می کنند. در حوزه بررسی تخریب به صورت پیش رونده یکی از مدل های بیان شده مدل چانگ-چانگ [۹] است که در آن به تحلیل تخریب پیش رونده برای صفحات کامپوزیتی متقارن سوراخ دار تحت کشش، به صورت دو بعدی (در میدان تنش های داخل صفحه) پرداخته شده است.

لویی و تسای [۱۰] با استفاده از معیار تسای-هیل و تسای وو با معرفی فاکتور کاهنده برای ماتریس و الیاف، تخریب پیش رونده را در مسائل دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. ماترنمیلر و همکاران [۱۱] یک مدل ماده ارزشمند برای پیشرفت تخریب به صورت دو بعدی ارائه دادند. این

پژوهش، به بررسی اثرات نرخ کرنش بر روی دو پارامتر فوق در چندلایه های نازک کامپوزیتی و پاسخ‌های حاصل از دو رویکرد در مسئله نفوذ در اهداف کامپوزیتی بافته شده خواهد پرداخت.

۲- مدل ماده مناسب برای تحلیل مسئله نفوذ

در بسته نرم افزاری اجزاء محدود دینامیکی ال اس- داین، چند مدل ماده کامپوزیتی وجود دارد. همه این مدل های ماده، روی المان جامد (آجری) قابل اعمال بوده و تنش ها را در شرایط میدانی سه بعدی محاسبه می نمایند. این مدل ها عبارتند از [۱۷]:

الف- (*MAT_OPTIONTROPIC_ELASTIC) *MAT_002

این مدل ماده، الاستیک خطی بوده و هیچ گونه تخریبی را در نظر نمی گیرد.

ب- (*MAT_COMPOSITE_DAMAGE) *MAT_022

تخریب در این مدل ماده، از معیار چانگ- چانگ [۹] بررسی می گردد. هرچند که این مدل ماده قابل اجرا روی المان جامد بوده و تنش ها در این مدل ماده در شرایط سه بعدی محاسبه می گردند، اما مدل تخریب دوبعدی (صفحه ای) آن برای کامپوزیت های تک جهت ارائه گردیده و تنها مودهای خرابی کشش طولی، کشش و فشار عرضی و برش داخل صفحه را تحلیل می نماید. بدین ترتیب این مدل ماده، توانایی بررسی خرابی ناشی از لهیدگی، لایه شدگی و فشار در جهت لیاف را ندارد.

ج- (*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) *MAT_054-055

این مدل ماده، شکل کامل تری از مدل قبلی است. هرچند که این مدل ماده روی المان های جامد قابل اعمال است، اما برای تحلیل خرابی داخل صفحه در سازه های ورق و پوسته نازک قابل استفاده بوده و ضرایب الاستیک متناظر با بعد ضخامت، نادیده گرفته می شوند. امکان محاسبه تنش های برشی خارج صفحه، بر اساس نظریه چندلایه ها وجود دارد. معادلات حاکم بر تخریب این المان، عمدتاً برای کامپوزیت- های تک جهت کاربرد دارند. معادلات تحلیل خرابی این مدل های ماده، بر اساس تخریب پیش رونده چانگ- چانگ قابل اعمال است. در صورتی که مدل ماده ۵۵ به کار گرفته شود، برای تحلیل تخریب پیش- رونده داخل صفحه در جهت عرضی (در کشش یا فشار)، به جای معیار چانگ- چانگ از معیار تخریب تسای- وو استفاده می گردد.

د- (*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC) *MAT_058

این مدل ماده برای کامپوزیت های تک جهت و بافته شده در قالب المان های پوسته ای و پوسته ای ضخیم قابل به کارگیری است. باز هم ضرایب الاستیک متناظر با بعد ضخامت، نادیده گرفته شده و تحلیل خرابی، تنها در داخل صفحه انجام می گیرد.

معیار، شروع تخریب را با استفاده از روابط چند ضابطه ای هاشین تخمین زده و همچنین میزان خرابی را از طریق بیان کاهش خواص مکانیکی قطعه به شکل تابع نمایی مشخص می کند.

مدل ماده فوق توسط تیم تحقیقاتی دانشگاه دپور برای تحلیل سه بعدی تخریب پیش رونده در لیاف تک جهت و بافت پارچه تعمیم داده شد. کارهای زیو و همکاران [۱۲] و گاما و گیلسپیه [۱۳]، نمونه ای از این فعالیت ها است. زیو و گیلسپیه، تخریب پیش رونده و لایه شدگی در کامپوزیت های بافت صفحه ای^۱ با لیاف شیشه و رزین اپوکسی تحت بارگذاری شبه استاتیکی پانچ برشی را بررسی کردند. ترتیب مودهای تخریب برای سازه مورد آزمایش عبارتند از: شروع لایه شدگی، انتشار لایه شدگی، فشردگی لیاف و شکست برشی و در نهایت کشیدگی لیاف و تخریب برشی. همچنین گاما و گیلسپیه [۱۳]، با استفاده از همین مدل ماده، نفوذ گلوله سرتخت در هدف های کامپوزیتی ضخیم را با دقت خوبی مدل نمودند.

باندرو و احمد [۱۴] ضربه بالستیک روی چندلایه های کامپوزیتی لیاف شیشه اس ۲ و رزین اپوکسی را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. تحلیل اجزاء محدود انجام شده، به روش تخریب پیش رونده انجام گرفت و برای شبیه سازی رشد لایه شدگی، از المان های چسبیده استفاده گردید. به علاوه، متغیرهای خرابی مورد استفاده در شبیه سازی، با استفاده از روش طول مشخصه بر مبنای روش انرژی شکست تعیین گردید. توناتو و همکاران [۱۵] با استفاده از کدهای تخریب پیش رونده فروریزی در بارگذاری عرضی شیلنگ های تقویت شده کامپوزیت کربنی را مورد بررسی قرار دادند. ماریچ تقویت کننده این لوله های چند جداره، فلزی یا کامپوزیتی بود و چند لایه الاستومری نیز در چیدمان شیلنگ ها شرکت داشت. نتایج عددی به دست آمده، انطباق قابل قبولی با پاسخ های تجربی داشت و مودهای مختلف تخریب، به خوبی در تحلیل عددی مشاهده می گردید. لیو و همکاران [۱۶] به مطالعه تجربی و عددی اثر شکل دماغه ضربه زنده بر پاسخ سازه های ساندویچی ساخته شده از هسته های کامپوزیت کربن/ اپوکسی کنگره دار با رویه های آلومینیومی در ضربه کم سرعت پرداختند. در تحلیل عددی، رفتار مکانیکی بخش کامپوزیتی با استفاده از کدنویسی چهار مود مختلف تخریب در یک نرم افزار تجاری اجزاء محدود بیان شده بود.

همان گونه که در مرور برخی از پژوهش های گذشته ذکر گردید، پاسخ های شبه استاتیکی (آزمایش پانچ) و دینامیکی (آزمون شلیک) دارای اختلاف هستند. اثرات اینرسی و تغییر رفتار مکانیکی ماده در شرایط دینامیکی، دو دلیل برای بروز این اختلاف می باشند. سرعت بارگذاری و عامل نرخ کرنش، ممکن است باعث تغییر مدول ها و استحکام های ماده در شرایط بارگذاری دینامیکی نسبت به استاتیکی شده و اختلافی میان پاسخ های استاتیکی و دینامیکی ایجاد نماید. این

*MAT_059 -ه

(*MAT_COMPOSITE_FAILURE_OPTION_MODEL)

مدل ماده فوق قابل اعمال روی المان های ورق و پوسته و جامد است. در صورت انتخاب فرمول بندی ورق و پوسته، مود تخریب خارج از صفحه در نظر گرفته نمی شود. پس از گذر تنش های محوری کششی داخل صفحه از مقادیر استحکام های متناظر، پیشرفت تخریب بر اساس مدل الاستیک- پلاستیک محاسبه می گردد. این استحکام ها در یک مقدار اسکالر ضرب می شود. اگر این مقدار اسکالر، برابر یک باشد، پیشرفت تخریب در داخل صفحه بر اساس مدل الاستیک کامل است. اما در صورتی که این پارامتر برابر صفر باشد، پس از رسیدن این تنش- ها به مقدار استحکام متناظر، این استحکام ها برابر صفر در نظر گرفته می شوند [۱۸ و ۱۹].

در این مدل ماده، امکان انتخاب فرمول بندی المان جامد بر اساس نظریه الاستیسیته سه بعدی وجود دارد. شرط شروع تخریب، شباهت زیادی به فرم سه بعدی نظریه تسای- وو داشته و شکل ساده ای از تفکیک مودهای تخریب با این معیار قابل بیان است. در صورت اتفاق افتادن هر یک از مودهای تخریب، مقادیر سفتی و استحکام های متناظر (و در نتیجه قابلیت باربری در آن مود) برابر صفر می گردد. هنگامی که تمامی ضرایب سفتی و استحکام المان صفر گردد، المان حذف خواهد شد [۱۸ و ۱۹].

*MAT_161-162 -و

(*MAT_COMPOSITE_MSC{OPTON})

این مدل ماده برای کامپوزیت های تک جهته و بافته شده با فرمول- بندی میدان تنش و کرنش سه بعدی قابل به کارگیری است. در این مدل های ماده، برای تشخیص آستانه تخریب و نوع مود تخریب از معیار هاشین و برای پیش روندگی تخریب از مدل ماده ماترن میلر استفاده می شود. این مدل های ماده، توانایی شبیه سازی مودهای تخریب های کششی و فشاری در راستای الیاف، تخریب های کششی و فشاری در راستای عمود بر الیاف، تخریب برشی داخل صفحه، له شدگی و لایه شدگی در اثر تمامی شرایط (بازشدگی لایه ها، کلوژر ترک^۱ بین لایه ای و لغزش لایه ها) را دارند. مدل ماده ۱۶۲، به دلیل توانایی در شبیه سازی نرم شدگی و افت تدریجی خواص مدولی و استحکامی پس از گذر از مقادیر حدی طبق رابطه کاهش نمایی، از عمومیت بیشتری نسبت به مدل ۱۶۱ برخوردار است. به علاوه، امکان در نظرگیری اثر نرخ کرنش روی مدول ها و استحکام های ماده کامپوزیتی در این مدل ماده وجود دارد. این مدل ها برای اجرا، نیازمند مجوز اختصاصی گروه علم مواد دانشگاه دِلور^۲ است.

پس از تماس پانچ یا پرتابه به سطح هدف و پیشروی آن، هدف دچار تغییر فرم های خمشی و غشائی شده و تحت تنش های داخل صفحه قرار می گیرد. اما در نقاط زیر پانچ یا پرتابه و در همسایگی آن، سه

تنش خارج از صفحه اهمیت بسیار بالایی دارد. به تعبیر دیگر، میدان تنش در منطقه تماس و اطراف آن، کاملاً سه بعدی است. در نتیجه، برای تحلیل دقیق این گونه مسائل، استفاده از المان های جامد، مناسب ترین انتخاب به نظر می رسد.

کلیه مدل های ماده فوق، روی المان های جامد قابل اجرا است. اما هیچ یک از مدل های بیان شده در بندهای الف تا ه، برای شبیه سازی دقیق مسئله نفوذ در مواد کامپوزیت مناسب به نظر نمی رسد. برخی از آن ها بر اساس فرمول بندی سه بعدی کامل در راستای ضخامت، رفتار نمی نمایند. مدل ماده الف، فاقد معیار تخریب است. مدل های بند ب تا د، تنها تخریب پیش رونده در داخل صفحه را در نظر می گیرد (شکل کاهش خواص مکانیکی پس از شروع خرابی، در این مدل های ماده، مورد بحث در این پژوهش نیست). تنها فرم دوم مدل ماده ه، تا حدی توانایی شبیه سازی مسئله نفوذ را دارا است (البته حذف ناگهانی ضرایب مکانیکی پس از شروع خرابی، باعث کاهش دقت تحلیل بوده و این مورد نیز نیازمند بحث دقیق تری خواهد بود که منظور این پژوهش نیست). با توجه به ماهیت پدیده نفوذ که کلیه مودهای تخریب کامپوزیت را درگیر نموده و مجموعه جامعی از خرابی ها را در سازه کامپوزیتی ایجاد می نماید، مدل های ماده مطرح شده در بند و، مناسب ترین مدل ها برای شبیه سازی این پدیده به نظر می رسد. از سوی دیگر به منظور بررسی دقیق تر این پدیده، در نظرگیری رفتار مکانیکی ماده پس از شروع خرابی (پدیده کاهش خواص مکانیکی)، باعث افزایش دقت تحلیل می گردد. در نتیجه، به عقیده نویسندگان، در بسته نرم افزاری ال اس- داینا، مدل ماده ۱۶۲ مناسب ترین مدل جهت تحلیل این پدیده خواهد بود.

در این پژوهش، به علت عدم دسترسی به این مدل ماده در نسخه های نرم افزاری موجود در داخل کشور، کلیه معادلات تخریب پیش رونده در قالب مدل مادی تعریف شده به وسیله کاربر^۳ جهت پیاده سازی مدل ماده ۱۶۲ برنامه نویسی شده و فایل اجرایی مورد نظر طبق اصول ذکر شده ساخته شده است.

۳- تخریب پیش رونده در کامپوزیت ها

در این پژوهش، برای تشخیص آستانه شکست از معیار هاشین [۸] و برای بررسی پیش روندگی تخریب از معیار ماترن میلر [۱۱] استفاده شده است.

۳-۱- معیار هاشین

طبق معیار هاشین چهار مود تخریب برای کامپوزیت وجود دارد که عبارتند از [۸ و ۱۱]:

3- User- Defined Material Model (Umat)

1- Crack Closure

2- Material Science Corporation (Msc)

$$f_{2_r2} = \left(\frac{E_b \langle \varepsilon_b \rangle}{S_{BT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{bc} \varepsilon_{bc}}{S_{BFS}} \right)^2 - r_2^2 = 0 \quad (ب-۱)$$

این معیارها وقتی که مقادیر ε_a یا ε_b مثبت هستند، قابل اجرا است. پارامترهای آستانه تخریب، قبل از اولین تخریب (جوانه زنی تخریب) مقداری برابر با یک داشته و پس از انباشتگی یا انتشار خرابی، به مقادیری بیش از واحد به روزرسانی خواهند شد. همچنین فرض می شود که:

$$S_{BFS} = S_{FS} \times S_{BT}/S_{AT} \quad (۲-الف)$$

$$S_{AFS} = S_{FS} \quad (۲-ب)$$

زمانی که مقادیر ε_b یا ε_a فشاری است فرض می شود که تخریب فشاری در صفحه در جهات تار و پود با استفاده از معیار بیشینه کرنش به دست خواهد آمد که به فرم زیر است:

$$f_{3_r3} = \left(\frac{E_a \langle \varepsilon'_a \rangle}{S_{AC}} \right)^2 - r_3^2 = 0 \quad (۳-الف)$$

$$\varepsilon'_a = -\varepsilon_a - (\varepsilon_c) \frac{E_c}{E_a} \quad (۳-ب)$$

$$f_{4_r4} = \left(\frac{E_b \langle \varepsilon'_b \rangle}{S_{BC}} \right)^2 - r_4^2 = 0 \quad (۳-ج)$$

$$\varepsilon'_b = -\varepsilon_b - (\varepsilon_c) \frac{E_c}{E_b} \quad (۳-د)$$

در این روابط، اثر کرنش فشاری در جهت ضخامت بر روی تخریب فشاری در صفحه در نظر گرفته شده است.

زمانی که سازه های کامپوزیتی تحت اثر ضربه عرضی قرار می گیرند؛ معمولاً تنش های فشاری بالایی در ناحیه ضربه و تنش های برشی خارج صفحه قابل ملاحظه ای در ناحیه بین ضربه زننده و سازه کامپوزیتی اتفاق می افتد. درحالی که تخریب برشی پنج الیاف ناشی از این تنش های برشی می تواند از روابط (۱) محاسبه شود؛ تخریب له شدگی ناشی از فشار در جهت ضخامت با استفاده از رابطه زیر مدل می گردد:

$$f_{5_r5} = \left(\frac{E_c \langle \varepsilon_c \rangle}{S_{FC}} \right)^2 - r_5^2 = 0 \quad (۴)$$

یک لایه با بافت ساده ممکن است تحت اثر تنش برشی داخل صفحه تخریب گردد. در این مود تخریب، الیاف تقریباً سالم بوده و شرایط تخریب، تمایل بیشتری به ماتریس دارد. تخریب برشی درون صفحه، از رابطه زیر بیان می گردد:

$$f_{6_r6} = \left(\frac{G_{ab} \varepsilon_{ab}}{S_{AB}} \right)^2 - r_6^2 = 0 \quad (۵)$$

مود شکست دیگری که ناشی از برهم نهی کرنش های در جهت ضخامت (تنش های در جهت ضخامت) بوده و انتظار می رود یک مود شکست عمده برای سازه های کامپوزیتی لایه ای باشد، پدیده لایه-شدگی بوده و بدین ترتیب بیان می گردد:

$$f_{7_r7} = S^2 \left\{ \left(\frac{E_c \langle \varepsilon_c \rangle}{S_{CT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{bc} \varepsilon_{bc}}{S_{BC} + S_{SR}} \right)^2 + \left(\frac{G_{ca} \varepsilon_{ca}}{S_{CA} + S_{SR}} \right)^2 \right\} - r_7^2 = 0 \quad (۶)$$

سطح شکست مربوط به رابطه (۶) موازی با لایه های سازه کامپوزیتی است. انتظار می رود که تحت کرنش های فشاری در جهت ضخامت

مود اول، شکست الیاف است که عمدتاً به علت تنش کششی در جهت الیاف اتفاق می افتد. در این مود، تخریب از یکی از الیاف شروع شده و الیاف گسیخته شده، از ماتریس جدا گردیده و حفره هایی مابین دو انتهای الیاف شکسته شده، ایجاد می گردد. در یک ماده پیوسته و همگن در دو سر ناحیه تخریب شده، کرنش ها به سرعت رشد می کند؛ درحالی که کرنش ها در خارج از این دو منطقه کاهش یافته و بار برداری اتفاق می افتد. پس از پشت سر گذاشتن کرنش شکست، ذرات پیوسته در ناحیه تخریب شده متحمل یک سری آسیب و یک حالت توالی تخریب تحت رشد کرنش ها می گردد.

مود دوم، کمانش و تابیدگی الیاف است که همراه با تکه تکه شدن ماتریس است و در آزمایش فشار تک محوره در جهت الیاف مشاهده می گردد. در برخی از موارد، گسیختگی طولی به عنوان وضعیت دیگری از شکست فشاری مشاهده می گردد که دلیل آن تنش کششی عرضی ناشی از اختلاف ضریب پواسون بین الیاف و ماتریس و ضعف اتصال سطحی بین ماتریس و الیاف است. میکرو کمانش الیاف، با کمانش یکی از آن ها شروع گردیده و سبب درگیری تعداد دیگری از الیاف شده؛ به طوری که ناحیه تخریب در بخش منحرف شده انتشار می یابد.

مود سوم، ترک خوردگی ماتریس تحت بار کشش عرضی و برشی است. شکست در مود سوم یعنی هنگام وقوع ترک خوردگی ماتریس به استحکام کششی عرضی و همچنین استحکام برشی چند لایه وابستگی زیادی دارد.

مود چهارم، شکست ماتریس تحت فشار عرضی و برش است. تنش های کششی موضعی در رزین، به خاطر اختلاف ضریب پواسون میان الیاف و رزین ایجاد می گردد. به علاوه، پدیده فشردگی الیاف در همسایگی یکدیگر، در ایجاد ترک های ریز در رزین مؤثر است. با افزایش کرنش های برشی، راستای رشد ترک به سمت راستای الیاف فصل مشترک میان الیاف و رزین متمایل می گردد. خردشدگی رزین به دلیل هر دو اثر بوده و الیاف نیز دچار آسیب کمی می گردند. ماتریس سفتی کامپوزیتی که رزین آن در این مود دچار ترک خوردگی شده است، در راستای الیاف ماده، کاهش می یابد.

۲-۲- تعمیم معیارهای تخریب هاشین به کامپوزیت های بافته شده و آستانه تخریب

معیارهای تخریب هاشین [۸] (که برای تک لایه یک جهته ارائه گردیده) جهت بررسی تخریب در کامپوزیت های بافته شده دوبعدی بر حسب مؤلفه های کرنش تعمیم داده شده است [۱۷]. این مودهای تخریب به شرح زیر است:

تخریب مود کششی / برشی الیاف تار و پود از برهم نهی ترکیب مربعات کرنش های محوری و کرنش های برشی در جهت ضخامت به صورت زیر داده می شود:

$$f_{1_r1} = \left(\frac{E_a \langle \varepsilon_a \rangle}{S_{AT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{ca} \varepsilon_{ca}}{S_{AFS}} \right)^2 - r_1^2 = 0 \quad (۱-الف)$$

برای مدل پارچه بردارهای کوپلینگ q_{i1} و q_{i2} مربوط به موده‌های تخریب کششی- برشی الیاف در جهت تار و پود هستند. کوپلینگ q_{i1} نشان می‌دهد هنگامی که اگر مود تخریب کششی- برشی الیاف در جهت تار اتفاق بیفتد مدول های E_a ، G_{ab} و G_{ca} در اثر وجود ω_1 ، ω_4 و ω_6 تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابند. بردارهای کوپلینگ q_{i3} و q_{i4} به موده‌های شکست فشاری در جهت تار و پود مربوط هستند. q_{i3} بیانگر تأثیر گرفتن مدول های E_a ، G_{ab} و G_{ac} از پارامترهای ω_1 ، ω_4 و ω_6 است. بردار q_{i5} متناظر مود له شدگی الیاف است و در این مود تخریب، تمامی مدول ها در اثر وجود کلیه پارامترهای تخریب، کاهش خواهند یافت. بردار q_{i6} مربوط به مود تخریب برشی داخلی صفحه بوده و تنها کاهش مدول G_{ab} در اثر وجود ω_4 را بیان می‌نماید. در نهایت، بردار q_{i7} به مود تخریب لایه شدگی دلالت نموده و سبب کاهش مدول های E_c ، G_{bc} و G_{ca} در اثر پارامترهای تخریب ω_3 ، ω_5 و ω_6 خواهد شد.

۴-۳- اثرات نرخ کرنش

معمولاً افزایش سرعت بارگذاری، باعث افزایش استحکام ها و مدول های کامپوزیت ها می‌شود. اثر افزایشی نرخ کرنش برای مجموعه استحکام ها و مدول ها در یک نرخ کرنش بر حسب استحکام ها و مدول های استاتیکی، توسط تابع لگاریتمی بیان می‌گردد [۲۰]:

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left(1 + C_1 Ln \frac{\{\dot{\epsilon}\}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (16)$$

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\} \left(1 + C_2 Ln \frac{\{\dot{\epsilon}\}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (17)$$

$$\{S_{RT}\} = \begin{Bmatrix} S_{AT} \\ S_{AC} \\ S_{BT} \\ S_{BC} \\ S_{FC} \\ S_{FS} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$\{E_{RT}\} = \begin{Bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ G_{ab} \\ G_{bc} \\ G_{ca} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = \begin{Bmatrix} |\dot{\epsilon}_a| \\ |\dot{\epsilon}_a| \\ |\dot{\epsilon}_b| \\ |\dot{\epsilon}_b| \\ |\dot{\epsilon}_c| \\ (\dot{\epsilon}_{ca}^2 + \dot{\epsilon}_{bc}^2)^{1/2} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

۳-۵- حذف المان

پس از وقوع تخریب، بر اساس تحلیل تخریب به صورت پیش‌رونده، یک المان باربری خود را به طور کامل از دست نخواهد داد؛ بلکه دچار کاهش سفتی و استحکام در نتیجه کاهش ظرفیت باربری خواهد شد. برای به دست آوردن پاسخ های مناسب در یک مدل سازی بر اساس

($\epsilon_c < 0$) سطح تخریب مربوط به لایه شدگی بسته شود. همچنین فرض می‌شود که استحکام های تخریب وابسته به کرنش های نرمال فشاری مشابه با نظریه کولمب- مور هستند:

$$S_{SR} = E_c \tan(\varphi) (-\epsilon_c) \quad (7)$$

ضریب مقیاس (S)، برای هم بستگی بهتر شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی تعریف شده است که با انطباق تعدادی از داده شبیه سازی روی داده های آزمایشگاهی می‌توان آن را به دست آورد.

۳-۳- معیار ماتریس

طبق معیار ماتریس میلر [۱۱] در تخریب پیش‌رونده، مدول ها و استحکام های ماده کامپوزیتی، بلافاصله پس از وقوع شکست صفر نمی‌شود بلکه به صورت نمایی بر حسب پارامترهای آستانه تخریب (باقی مانده) و نرم شوندگی ماده، به شکل زیر کاهش می‌یابد [۱۲ و ۱۷]:

$$\varphi_j = 1 - e^{-m_i(1-r_i^{m_i})}, \text{ (no summation over } i) \quad (8)$$

$$i = 1 \dots, j = 1 \dots 7, r_i \geq 1$$

$$\omega_i = \max\{q_{ij}\varphi_j\} \quad (9)$$

$$E_i = (1-\omega_i)E_{i0} \quad (10)$$

$$G_{ij} = (1-\omega_i)G_{ij0} \quad (11)$$

$$S_i = (1-\omega_i)S_{i0} \quad (12)$$

پارامتر نرم شوندگی از آزمایش های خواص مکانیکی به دست خواهد آمد که به شدت به مکانیزم آزمون بستگی دارد و به همین دلیل می‌تواند باعث پراکندگی نتایج گردد. در این پژوهش برای پارامتر نرم-شوندگی از مقادیر مرجع [۱۲] استفاده شده است. پس از محاسبه پارامتر تخریب ماتریس نرمی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$[S] = \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -v_{ba} & -v_{ca} & 0 & 0 & 0 \\ (1-\omega_1)E_a & E_b & E_c & 0 & 0 & 0 \\ -v_{ab} & 1 & -v_{cb} & 0 & 0 & 0 \\ E_a & (1-\omega_2)E_b & E_c & 0 & 0 & 0 \\ -v_{ac} & -v_{bc} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ E_a & E_b & (1-\omega_3)E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_4)G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_5)G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_6)G_{ca}} \end{bmatrix}$$

ماتریس سفتی از معکوس ماتریس نرمی به دست خواهد آمد:

$$[C] = [S]^{-1} \quad (14)$$

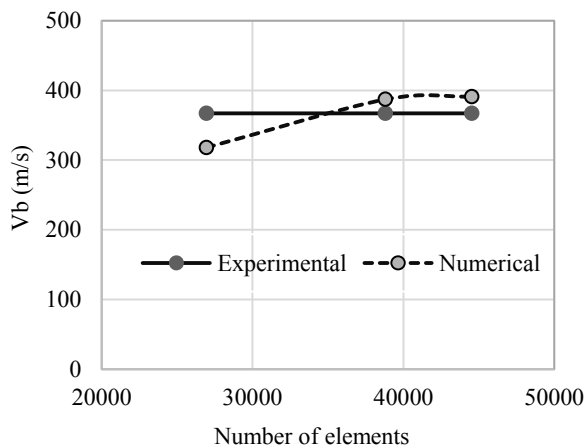
برای درک این مطلب که کدام یک از پارامترهای تخریب در هر مود تخریب بر روی ماتریس نرمی تأثیرگذار است، می‌بایست ماتریس کوپلینگ تخریب را مورد بررسی قرار داد [۲۰].

$$[q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

کاملاً مشهود و منطقی به نظر می رسد. به علاوه، فرم برش خورده هدف ها پس از انجام آزمون بالستیک در مرجع [۱۳] وجود دارد که با شکل (۲) منطبق است. این انطباق، بیانگر نتیجه مطلوبی بوده و سبب به دست آمدن اطمینان از صحت مدل ماده تهیه شده گردیده است.

۶- همگرایی مش

در قسمت اعتبارسنجی مدل ماده تهیه شده، از سه نوع مش بندی استفاده شد که در بین آن ها نوع دوم (حدود سی و نه هزار المان برای مدل کامل) انتخاب گردید. معیار انتخاب مش بندی بهینه، پیش بینی نسبتاً دقیق سرعت حد بالستیک هدف بیست و دو لایه بر اساس تعداد المان های مناسب بود. نمودار همگرایی مش در شکل (۱) ارائه گردیده است. برای تحلیل چهارلایه و هشت لایه کامپوزیتی (که نتایج آن در بخش های بعدی این مقاله آورده می شود) نیز از همین چگالی مش بندی استفاده شده است.



شکل ۱- نمودار همگرایی مش.

۷- مدل سازی

به منظور بررسی دقیق پارامترهای تخریب، مدل عددی صفحات چهارلایه و هشت لایه کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه اس ۲ و رزین اپوکسی با ابعاد 150×150 میلی متر مربع با ضخامت های $2/4$ و $4/8$ میلی متر ساخته شد و تحت ضربه پرتابه سرتخت قرار گرفت. در مش بندی مورد استفاده، از فرمول بندی المان جامد هشت گرهی استفاده شده است. در جهت ضخامت هر لایه، دو المان تعریف گردید و با استفاده از دستور تماس، لایه ها به یکدیگر مربوط گردیدند.

تماس بین لایه های مختلف، با نوع `*CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE` با مقدار استحکام های نرمال و برشی به ترتیب برابر ۹ و ۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین تماس بین پرتابه و هدف با استفاده از الگوریتم `*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE` بیان گردید. در ادامه بر اساس سرعت های اولیه پرتابه، سرعت حد

تخریب پیش رونده، در نظر گرفتن عمر المان ضروری است. یک المان شکسته شده در هر یک از سه حالت زیر حذف می شود:

الف- اگر شکست کششی الیاف در یک لایه تک جهته در المان پیش-بینی شود و مقدار کرنش کششی بزرگتر از پارامتر `E_LIMIT` باشد. برای یک لایه پارچه در هر دو جهت واقع در صفحه، ممکن است شکست اتفاق بیفتد و مقدار کرنش کششی بزرگتر از `E_LIMIT` باشد که منجر به حذف المان خواهد شد.

ب- اگر حجم نسبی فشرده شده (نسبت حجم موجود به حجم اولیه) در یک المان کوچکتر از پارامتر `ECRSH` باشد.

ج- اگر حجم نسبی انبساطی در یک المان، بزرگتر از پارامتر `EEXP` باشد. مقدار این سه پارامتر برای حذف المان از تطبیق و تنظیم آن ها با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده که در جدول (۱) فهرست گردیده است [۱۲].

۴- کدنویسی و ساختن مدل ماده

چنانچه در محیط نرم افزار اجزاء محدود دینامیکی ال اس- داینا، مدل ماده مورد نظر موجود نباشد، می بایست روابط حاکم بر آن مدل ماده در محیط برنامه نویسی فرترن تحت قالب مدل ماده به شکل سابروتین تهیه شده توسط کاربر^۱ نوشته شود. پس از آن، به منظور تحلیل مسئله مورد نظر، با استفاده از ترکیب مجموعه فایل های تولید شده توسط کامپایلر فرترن به نام فایل های شئی گرا با حل گر ال اس- داینا، یک حل گر جدید ساخته شده و جایگزین حل گر پیش فرض ال اس- داینا می گردد. سپس مدل اجزاء محدود در قالب یک فایل ورودی، در محیط فرمان روی حل گر جایگزین اجرا شده و خروجی های مورد نظر کاربر، تولید می گردد. با توجه به اجرا نشدن مدل ماده ۱۶۲ در نسخه های موجود در کشور نرم افزار فوق، در این پژوهش معادلات تخریب پیش رونده به فرمی که در بخش های گذشته ارائه گردید، کدنویسی شده و فایل اجرایی حل گر مورد نظر طبق اصول ذکر شده ساخته شده است.

۵- اعتبارسنجی مدل ماده نوشته شده توسط کاربر

پس از ساختن فایل اجرایی حل گر جایگزین توسط کاربر در نرم افزار ال اس- داینا، برای اعتبارسنجی مدل ماده فوق ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۳] یک صفحه ۲۲ لایه کامپوزیتی مدل سازی شده و تحت بارگذاری ضربه پرسرعت قرار گرفت. ابعاد، مشخصات، جنس و خواص مکانیکی هدف و پرتابه، در جدول های (۱) تا (۳) ارائه گردیده است. در مرجع فوق، سرعت حد بالستیک تجربی 367 متر بر ثانیه اعلام شده و نتایج مدل ماده تهیه شده توسط کاربر در این پژوهش، مقدار 387 متر بر ثانیه را برای سرعت حد بالستیک، پیش بینی می نماید. همچنین مودهای مختلف تخریب نظیر کشیدگی و برش الیاف و لایه شدگی در شکل (۲) در بخش ۸-۲ این مقاله که مربوط به پیشرفت تخریب است

1- Mat User Defined (Umat)

جدول ۱- خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه اس ۲ و رزین اپوکسی مورد استفاده در مدل ماده تخریب پیش رونده [۱۲].

مقدار	واحد	نام پارامتر
۲۷/۵	GPa	E_a
۲۷/۵	GPa	E_b
۱۱/۸	GPa	E_c
۰/۱۱	-	ν_{ba}
۰/۱۸	-	ν_{ca}
۰/۱۸	-	ν_{cb}
۲/۹	GPa	G_{ab}
۲/۱۴	GPa	G_{bc}
۲/۱۴	GPa	G_{ca}
۶۰۴	MPa	S_{AT}
۲۹۱	MPa	S_{AC}
۶۰۴	MPa	S_{BT}
۲۹۱	MPa	S_{BC}
۵۸	MPa	S_{CT}
۸۵۰	MPa	S_{FC}
۷۵	MPa	S_{AB}
۵۷	MPa	S_{BC}
۵۷	MPa	S_{CA}
۳۰۰	MPa	S_{FS}
۱۸۵۰	kg/m ³	ρ
۱۰	deg	φ
۰/۳	-	S_{FFC}
۲	-	m_1
۲	-	m_2
۲	-	m_3
۲	-	m_4
۰/۵	-	m_5
۰/۲	-	m_6
۰/۲	-	m_7
۰/۲	-	ELIMIT
۱/۲	-	S
۰/۹۴	-	OMGMAX
۰/۰۰۱	-	Ecrash
۴	-	EEXPN
۰/۰۳	-	C_1
۰/۰۳	-	C_2
۱۰^{-3}	s^{-1}	$\dot{\epsilon}_0$

بالستیک هدف ها تعیین گردید. نتایج بخش هشتم، در بازه سرعت های ضربه ای که حدوداً ۱۵ درصد کمتر و بیشتر از سرعت حد بالستیک هدف ها هستند، ارائه گردیده است. ابعاد، مشخصات و رفتار مکانیکی صفحات کامپوزیتی و پرتابه، طبق جداول (۱) تا (۳) هستند.

۸- نتایج و بحث

۸-۱- تعریف سرعت حد بالستیک

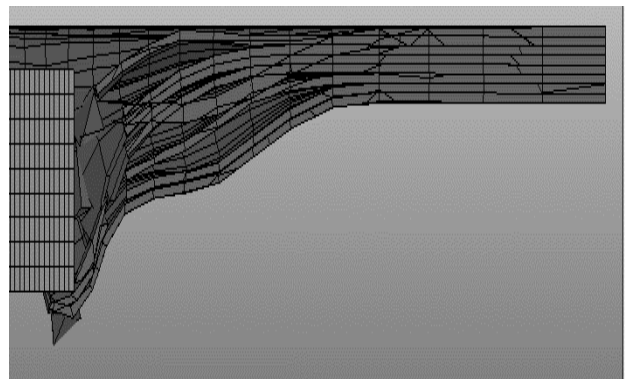
تعاریف متفاوتی برای سرعت حد بالستیک بیان شده است. یکی از این تعاریف ها، محاسبه سرعت حد بالستیک به روش میانگین است. در این روش مقدار میانگین بیش ترین سرعتی که نفوذ کامل صورت نگرفته باشد و کمترین سرعتی که نفوذ کامل رخ داده باشد سرعت حد بالستیک نامیده می شود [۲۱]. تعیین سرعت حد بالستیک با استفاده از این تعریف، هم به شکل تجربی و هم به فرم عددی و در محیط نرم-افزاری امکان پذیر است. در این پژوهش، از این تعریف برای تعیین سرعت حد بالستیک استفاده شده است.

۸-۲- الگوی تخریب

شکل (۲) تصویری از نفوذ گلوله به هدف چهارلایه را نشان می دهد. مود تخریب لایه شدگی، به خوبی در این تصاویر دیده می شود. خرابی ناشی از لایه شدگی، تا وسط دهانه نیم صفحه امتداد پیدا می کند. همچنین برش الیاف در زیر پرتابه و در همسایگی آن و تخریب ناشی از له شدگی در این منطقه، دیده می شود. نتایج تجربی مراجع مختلف هم پاسخ های مشابهی برای الگوی تخریب بیان می کنند.

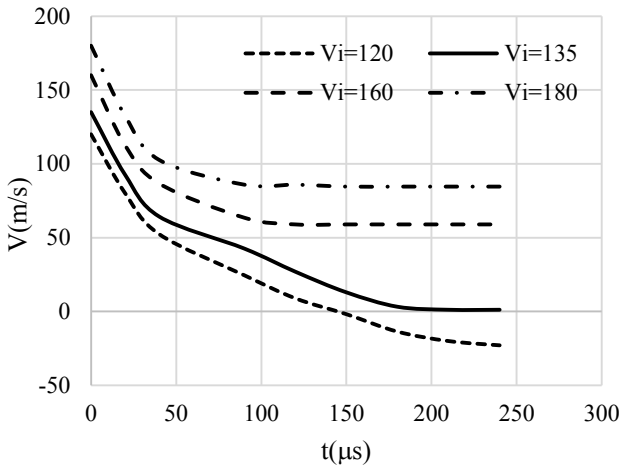
۸-۳- تأثیر نرخ کرنش بر تغییرات سرعت پرتابه

با استفاده از مفهوم سرعت حد بالستیک که در بخش ۸-۱ بیان گردید، در مدل عددی پرتابه با سرعت های متفاوتی به سوی هدف های کامپوزیتی شلیک گردیده است. شکل های (۳) و (۴) تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان شلیک را برای هدف چهارلایه نشان می دهد. روند نزولی هر یک از منحنی ها، به دلیل اثر مکانیزم های مختلف تخریب شرح داده شده در بخش معادلات حاکم (بخش ۳) است.

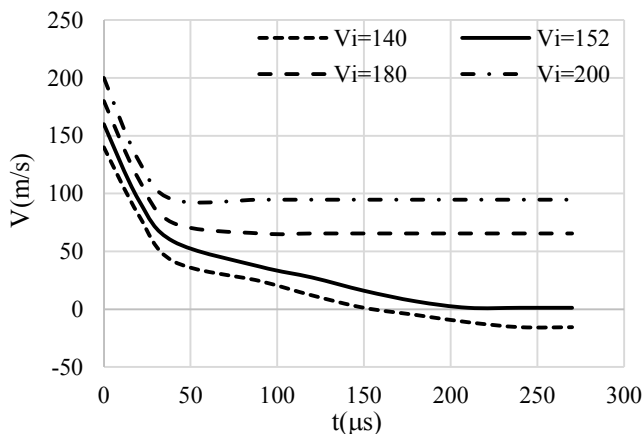


شکل ۲- نفوذ پرتابه به هدف چهارلایه.

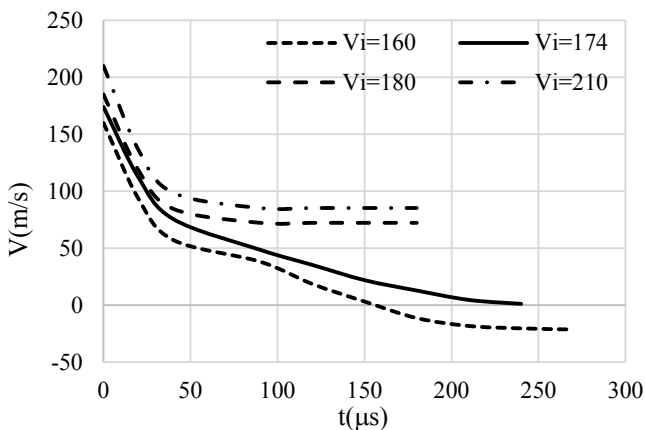
مقدار سرعت حد بالستیک برای هدف هشت لایه، ۱۷۴ متر بر ثانیه به دست خواهد آمد.



شکل ۳- تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان بر حسب سرعت اولیه آن بدون در نظرگیری اثرات نرخ کرنش در صفحه چهارلایه.



شکل ۴- تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان بر حسب سرعت اولیه آن با در نظرگیری اثرات نرخ کرنش در صفحه چهارلایه.



شکل ۵- تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان بر حسب سرعت اولیه آن بدون در نظرگیری اثرات نرخ کرنش در صفحه هشت لایه.

جدول ۲- مشخصات هدف مورد بررسی جهت اعتبارسنجی مدل ماده تهیه شده توسط کاربر [۱۳].

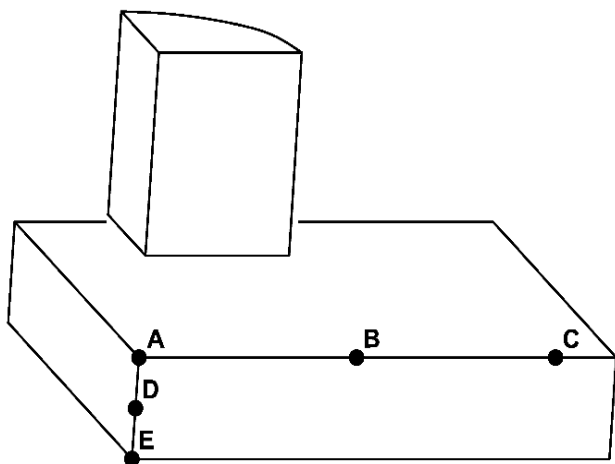
پارامتر	واحد	مقدار
طول	mm	۱۷۸
عرض	mm	۱۷۸
ضخامت هر لایه	mm	۰/۶
تعداد لایه ها	-	۲۲
مدل ماده	-	تخریب پیش رونده

جدول ۳- مشخصات پرتابه مورد بررسی جهت اعتبارسنجی مدل ماده تهیه شده توسط کاربر [۱۳].

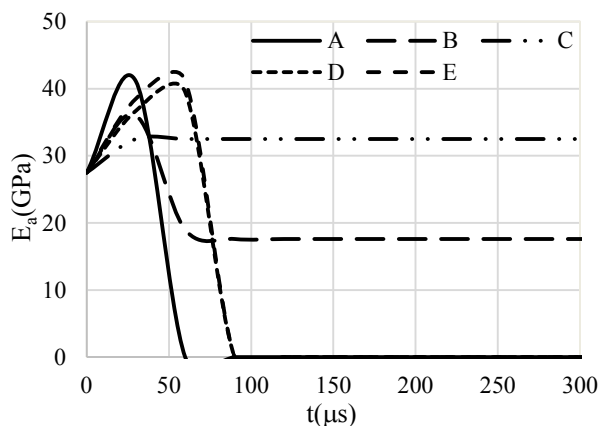
پارامتر	واحد	مقدار
قطر	mm	۱۲/۷
طول	mm	۱۴/۰۲
جرم	gr	۱۳/۸
شکل پیشانی	-	سرتخت
مدل ماده	-	صلب

در شکل (۳) منحنی های متناظر با سرعت های ۱۸۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه، باعث ایجاد سرعت های باقی مانده ای به مقدار ۸۵ و ۵۹ متر بر ثانیه برای پرتابه می گردند. سرعت اولیه ۱۲۰ متر بر ثانیه، باعث ایجاد سرعت نهایی منفی برای پرتابه شده که بیانگر بازگشت پرتابه، یا عدم نفوذ کامل در هدف می شود. اما سرعت اولیه ۱۳۵ متر بر ثانیه، مقدار نهایی تقریباً صفر را برای سرعت پرتابه ایجاد می نماید. این مقدار نهایی، باعث عبور پرتابه با سرعت تقریباً صفر از هدف، یا نفوذ کامل آن به هدف می گردد که هر دو مورد، بیانگر قرارگیری در وضعیت حد بالستیک است. سرعت حد بالستیک این هدف چهارلایه بدون در نظرگیری اثرات نرخ کرنش، ۱۳۵ متر بر ثانیه خواهد بود. با در نظرگیری اثرات نرخ کرنش، مقادیر مؤلفه های مدول و استحکام در ماده کامپوزیت طبق روابط ۱۶ و ۱۷ افزایش خواهد یافت. منحنی های به دست آمده در شکل (۴) مقادیر بیشتری را برای سرعت های ضربه نشان می دهند. سرعت حد بالستیک هدف چهارلایه با در نظرگیری اثرات نرخ کرنش در مدول ها و استحکام های ماده کامپوزیتی، ۱۵۲ متر بر ثانیه به دست می آید. تغییرات سرعت پرتابه هنگام نفوذ در هدف کامپوزیتی هشت لایه بر اساس صرف نظر نمودن یا در نظرگیری اثر نرخ کرنش، در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده است. در شکل (۶) سرعت های برخورد ۲۵۰ و ۲۲۰ متر بر ثانیه، باعث سرعت های خروجی یا باقی مانده ای به میزان ۱۰۸ و ۵۸ متر بر ثانیه شده و بیش از سرعت حد بالستیک هستند. سرعت شلیک ۱۹۰ متر بر ثانیه، موجب بازگشت پرتابه شده و کمتر از سرعت حد بالستیک این هدف است. سرعت حد بالستیک این هدف با در نظرگیری اثرات نرخ کرنش بر افزایش مدول ها و استحکام های ماده کامپوزیتی، در حدود ۲۰۵ متر بر ثانیه است. این در حالی است که بدون در نظرگیری اثر نرخ کرنش،

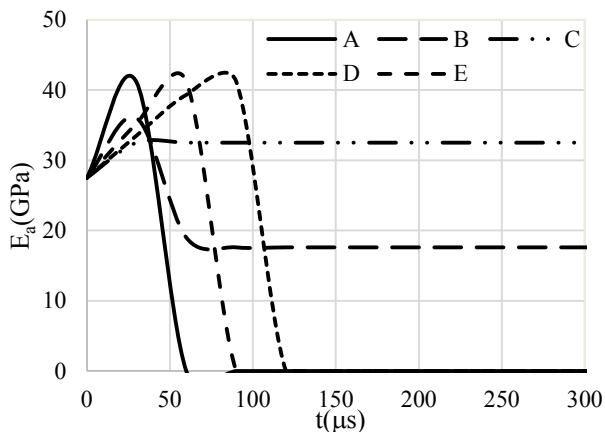
۲۷/۵ گیگاپاسکال، به ۴۲ گیگاپاسکال افزایش یافته است. این روند در نقاط D و E نیز مشاهده می شود.



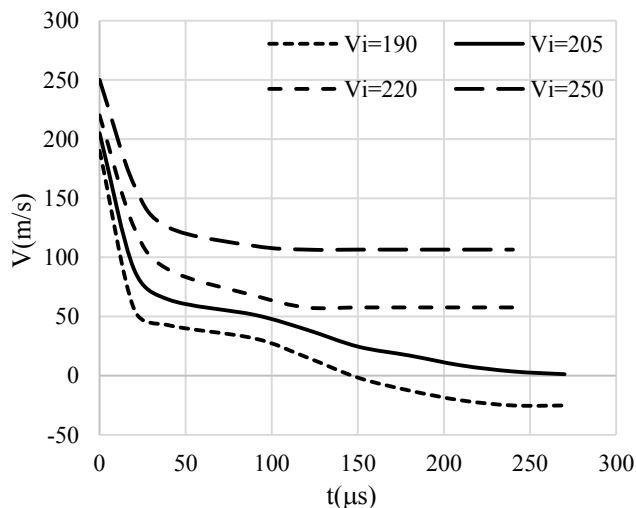
شکل ۷- مکان هندسی المان‌های بررسی شده.



شکل ۸- تغییرات مدول الاستیک نسبت به زمان در نقاط مختلف صفحه چهارلایه.



شکل ۹- تغییرات مدول الاستیک نسبت به زمان در نقاط مختلف صفحه هشت‌لایه.



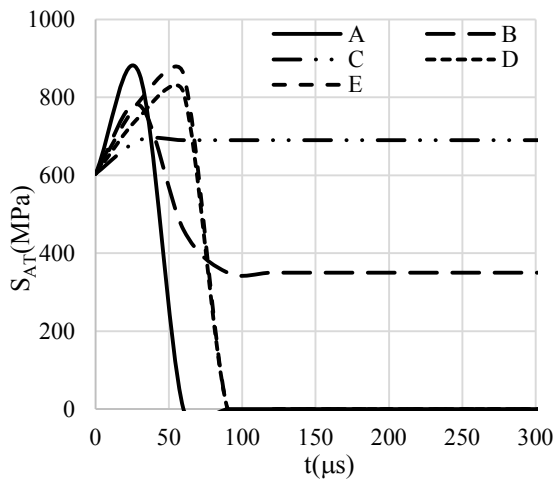
شکل ۶- تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان بر حسب سرعت اولیه آن با در نظرگیری اثرات نرخ کرنش در صفحه هشت‌لایه.

۴-۸- بررسی تغییرات مدول و استحکام در نقاط مختلف هدف‌های کامپوزیتی

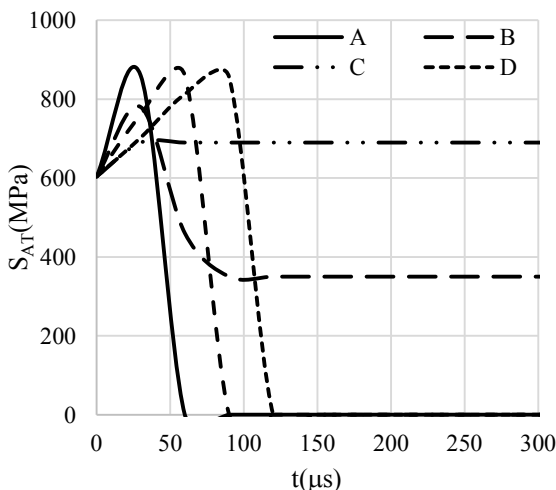
بخش‌های گوناگون هدف‌های چهار و هشت‌لایه مورد بررسی در اثر ضربه، تحت تخریب‌هایی با مقدار و مودهای مختلفی قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، با توجه به موقعیت محلی این نقاط، موج‌های تنش مختلفی از آن‌ها عبور نموده که باعث ایجاد نرخ کرنش‌های متفاوتی در آن‌ها می‌شود. بدین ترتیب، موقعیت مکانی نقاط مورد بررسی، عامل مهمی در مطالعه تغییرات پارامترهای مدولی و استحکامی خواهد بود. در هدف‌های کامپوزیتی مورد نظر، پنج نقطه A تا E انتخاب می‌گردند. شکل (۷) مکان هندسی نقاط بررسی شده را نشان می‌دهد. نقاط A, D و E در مرکز هدف و منطبق به محور پرتابه بوده و به ترتیب روی سطوح بالایی، میانی و پایینی هدف هستند. نقطه B پس از محل نشست گلوله و تقریباً در وسط دهانه و نقطه C نزدیک به لبه هدف قرار گرفته است. فلسفه انتخاب نقاط مرکز و گوشه، بررسی اثرات نزدیک به میدان^۱ و دور از میدان^۲ از محل ضربه است.

با توجه به روابط ۸ تا ۱۲، مقادیر سفتی و استحکام ماده کامپوزیتی با افزایش پارامترهای تخریب، دست‌خوش کاهش می‌شود. از سوی دیگر، طبق روابط ۱۶ تا ۱۹، افزایش سرعت بارگذاری و نرخ کرنش، سبب بالا رفتن مقادیر مدول و استحکام‌های ماده کامپوزیتی می‌گردد. شکل-های (۸) و (۹) تغییرات مدول الاستیک نقاط مختلف هدف‌ها را بر حسب زمان برخورد، نشان می‌دهد. بیشینه منحنی مربوط به نقطه A در دو شکل، مقدار ۴۲ گیگاپاسکال را مشخص می‌نماید. این بدین معنا است که در اثر سرعت بارگذاری، مدول ماده از مقدار استاتیکی

صفحه دارد. بدین ترتیب استحکام دینامیکی در این نقطه، در زمان برابر در دو حالت به اوج خواهد رسید. اما در مورد دو نقطه دیگر، وضعیت متفاوتی وجود دارد. تغییر فرم های هر دو صفحه، ناشی از دو عامل غشائی و خمشی است. به دلیل ضخامت کم هدف چهارلایه، اثر تغییر فرم خمشی در نقطه E چندان زیاد نبوده و با توجه به تساوی عامل غشائی در دو نقطه D و E، زمان به بیشینه رسیدن استحکام در این دو نقطه تقریباً یکسان است. اما در هدف هشت لایه، تقدم زمانی ایجاد شده در استحکام بیشینه نقطه E، به علت افزایش تعداد لایه ها و ضخامت بیشتر این هدف نسبت به هدف چهارلایه است. با افزایش ضخامت هدف، تغییر فرم های خمشی آن افزایش بیشتری داشته و تنش های مربوط به خمش در نقطه، کششی بوده که با تنش های غشائی جمع شده و سرعت بیشتری در رسیدن به حد بیشینه در این نقطه ایجاد می نماید. این در حالی است که نقطه D تنها تنش غشائی داشته و دیرتر به مقدار استحکام بیشینه خود خواهد رسید.



شکل ۱۰- تغییرات استحکام در جهت الیاف نسبت به زمان در نقاط مختلف صفحه چهارلایه.



شکل ۱۱- تغییرات استحکام در جهت الیاف نسبت به زمان در نقاط مختلف صفحه هشت لایه.

بیشینه مدول در نقاط B و C، در حدود ۳۵ و ۳۳ گیگاپاسکال است که باز هم به دلیل اثر نرخ کرنش، مدول افزایش خواهد یافت. نقاط A، D و E نرخ کرنش های تقریباً یکسانی را تجربه نموده و مدول دینامیکی در آن ها، برابر است. اما با توجه به دوری دو نقطه B و C از محل ضربه، نرخ کرنش در این نقاط، کمتر از نقاط مرکزی و نزدیک به میدان بوده و افزایش مدول در این نقاط، کمتر از سه نقطه دیگر است. دورتر بودن نقطه C نسبت به B، باعث کمتر بودن نرخ کرنش در این نقطه شده و این عامل، دلیل کمتر بودن مدول نقطه C نسبت به B است. تنزل منحنی های نقاط مختلف (به غیر از نقطه C) دلیل بر شروع تخریب در این نقاط است. افزایش پارامتر تخریب، باعث کاهش مدول و رشد نرمی شده و سرعت عبور موج تنش از بخش های مختلف هدف ها، کاهش می یابد. افت سرعت موج تنش، سبب کاهش نرخ کرنش شده و این عامل نیز موجب کاهش مدول دینامیکی می گردد. پس از مدتی، مقادیر مدول در سه نقطه A، D و E برابر صفر می گردد که این حالت، بیانگر تخریب کامل در این نقاط است. اما مقدار نهایی مدول برای نقطه B در حدود ۱۸ گیگاپاسکال است. این وضعیت، نشانگر تخریب ناقص در این نقطه خواهد بود. از آنجا که در نقطه C در فاصله دوری از ضربه قرار دارد، دچار تخریب نشده و سالم باقی خواهد ماند (همواره پارامتر تخریب در آن صفر است). منحنی مربوط به نقطه C، مقدار نهایی ۳۳ گیگاپاسکال را نمایش می دهد که بیش از مقدار نهایی در نقطه B است. دلیل این رخداد، تخریب ناقص نقطه B و کاهش مدول در این نقطه است؛ اما نقطه C دچار خرابی نشده و کاملاً سالم باقی خواهد ماند.

شکل های (۱۰) و (۱۱) تغییرات استحکام در جهت الیاف برای نقاط مختلف هدف های چهار و هشت لایه را بر حسب زمان برخورد نشان می دهد. فرم منحنی های تغییرات استحکام، شبیه به منحنی های تغییرات مدول است؛ زیرا این دو پارامتر، مشابه یکدیگر با افزایش نرخ کرنش، رشد کرده و در اثر پیشرفت تخریب و افزایش پارامتر خرابی، کاهش خواهد یافت. شروع نمودارها از ۶۰۰ مگاپاسکال بوده و نشانگر انطباق استحکام دینامیکی با استاتیکی در ابتدای ضربه است. علت این پدیده، وجود فاصله هوایی میان پرتابه و هدف در شروع فرایند حل است. پس از آن، به دلیل بالا رفتن نرخ کرنش، استحکام ماده افزایش یافته و به مقدار ۸۶۰ مگاپاسکال برای نقاط A، D و E خواهد رسید که افزایش ۴۳ درصدی در استحکام این نقاط را به همراه خواهد داشت. در دو شکل (۱۰) و (۱۱) زمان رسیدن به استحکام دینامیکی بیشینه در نقطه A، مشابه است (حدود ۳۰ میکروثانیه)؛ اما در شکل (۱۱) استحکام دینامیکی مربوط به نقاط D و E دیرتر به بیشینه خود می رسند (۶۰ میکروثانیه برای نقطه E و ۹۰ میکروثانیه برای نقطه D). این در حالی است که طبق شکل (۱۰) نقاط D و E تقریباً در ۶۰ میکروثانیه به استحکام بیشینه خود رسیده اند. در هر دو هدف چهارلایه و هشت لایه، نقطه A در معرض تماس مستقیم با پرتابه و اولین محل اصابت آن با هدف است که تقریباً شرایط یکسانی در دو

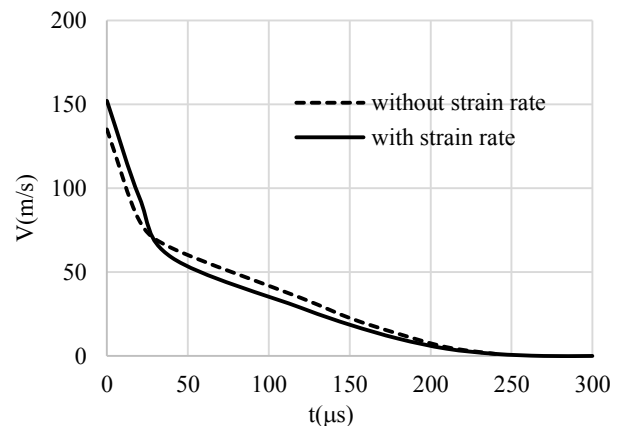
۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌های ماده موجود در بسته نرم افزاری ال اس-داینما جهت تحلیل مسئله نفوذ در اهداف کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. رفتار ماده سه بعدی روی المان جامد بر اساس مدل تخریب هاشین و پیشرفت خرابی ماتزنمیلر، به عنوان مدل مناسب تحلیل این مسئله انتخاب گردید. در این مدل، مقادیر مدول‌ها و استحکام‌های ماده کامپوزیتی، با افزایش نرخ کرنش، افزوده شده و با رشد پارامترهای خرابی، کاهش می‌یابند. با کد نویسی این مدل ماده در کامپایلر فرترن و الحاق آن به ال اس-داینما، پس از صحت سنجی کد تهیه شده، نفوذ سرعت بالای پرتابه صلب در صفحات چهارلایه و هشت‌لایه کامپوزیتی بافته شده شیشه/اپوکسی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش عددی مبتنی بر این مدل ماده، در هر لحظه توانایی پیش بینی آستانه خرابی، مود تخریب، مقدار خرابی متناظر با هر مود، نرخ کرنش و خواص مدولی و استحکامی ماده کامپوزیتی در حالت دینامیکی را دارا است. الگوی تخریب حاصل از اجرای مدل ماده، به خوبی مودهای خرابی لایه شدگی، شکست در راستای الیاف، تخریب کششی-برشی در داخل صفحه، له شدگی و همچنین تخریب خارج صفحه ماتریس یا لایه شدگی را شبیه سازی کرده و نشان می‌دهد. با در نظر گیری نرخ کرنش، مقادیر مدول‌ها و استحکام‌های ماده کامپوزیتی، بیش از مقدار استاتیکی آن در محاسبات در نظر گرفته خواهند شد. در مسائل مورد بررسی، مدول و استحکام دینامیکی ماده کامپوزیتی به ترتیب تا ۵۰ و ۴۰ درصد نسبت به مقادیر متناظر استاتیکی افزایش یافته است. نقاطی از هدف که زیر پیشانی پرتابه قرار گرفته اند، نرخ کرنش بیشتری را در اثر ضربه دریافت نموده و بیشینه مدول و استحکام دینامیکی ماده کامپوزیتی در آن‌ها دیده می‌شود. این در حالی است که به نقاط دورتر، نرخ کرنش کمتری در اثر ضربه وارد آمده و مدول‌ها و استحکام‌های لحظه‌ای آن‌ها، افزایش کمتری نسبت به نقاط نزدیک به محل ضربه خواهد داشت. پارامترهای خرابی در نقاطی از هدف که زیر پیشانی پرتابه قرار دارند، برابر یک شده و خواص مدولی و استحکامی هدف کامپوزیتی در این نقاط برابر صفر می‌گردد. در نقاط دور دست، این پارامتر رشد محسوسی نکرده و مدول‌ها و استحکام‌های ماده در آن‌ها، دست نخورده باقی خواهد ماند. در نقاط میانی هدف‌ها، تخریب ناقص روی داده و با توجه به سطح خرابی، ماده کامپوزیتی دچار آسیب دیدگی جزئی می‌گردد. در سرعت‌های شلیک بالاتر از سرعت حد بالستیک، اثر دهی نرخ کرنش، باعث کاهش سرعت خروجی پرتابه شده و در سرعت‌های پایین تر از حد بالستیک، باعث کاهش سرعت بازگشت پرتابه خواهد شد. در نظر گیری نرخ کرنش، باعث افزایش دقت در شبیه سازی و نتایج آن شده و مقادیر بیشتری برای سرعت حد بالستیک اهداف کامپوزیتی ارائه می‌دهد. در این شرایط، به نظر می‌رسد که نتایج تحلیل عددی، به پاسخ تجربی نزدیک‌تر گردد.

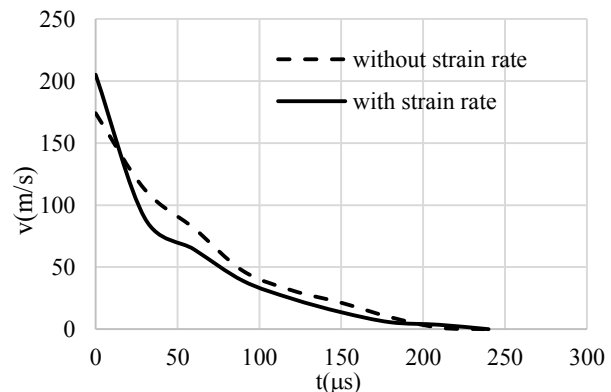
باز هم نقاط A، D و E تخریب کامل شده و استحکام آن‌ها به صفر می‌رسد؛ اما نقطه B که در حاشیه محل ضربه قرار گرفته است، دچار تخریب ناقص می‌گردد. همچنین نقطه C که در فاصله دور از محل ضربه قرار دارد، کاملاً سالم خواهد ماند. استحکام دینامیکی بیشینه در دو نقطه B و C به ترتیب به ۷۸۰ و ۶۹۰ مگاپاسکال می‌رسد که افزایش ۳۰ و ۱۵ درصدی نسبت به مقادیر استاتیکی نشان خواهد داد. این بدان معنا است که این دو نقطه نسبت به سه نقطه دیگر، نرخ کرنش کمتری در اثر ضربه را تجربه خواهند نمود.

۸-۵- بررسی رفتار پرتابه در شرایط متناظر با حد بالستیک

به منظور مقایسه بهتر دو رویکرد صرف نظر یا در نظر گیری اثرات نرخ کرنش در تغییرات مدول‌ها و استحکام‌های اهداف مورد بررسی، نمودار تغییرات سرعت پرتابه در شرایط مربوط به حد بالستیک بر مبنای دو رویکرد در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. این نمودارها، از شکل‌های (۳) تا (۶) به دست آمده‌اند. با در نظر گیری اثرات نرخ کرنش، سرعت حد بالستیک حاصل از شبیه سازی، بیشتر شده و به نظر می‌رسد که نتایج تحلیل عددی، به مقادیر تجربی نزدیک‌تر گردد.



شکل ۱۲- تغییرات سرعت پرتابه در شرایط متناظر حد بالستیک بر مبنای دو رویکرد عدم تأثیر یا تأثیر نرخ کرنش در شبیه سازی‌ها برای هدف چهارلایه.



شکل ۱۳- تغییرات سرعت پرتابه در شرایط متناظر حد بالستیک بر مبنای دو رویکرد عدم تأثیر یا تأثیر نرخ کرنش در شبیه سازی‌ها برای هدف هشت لایه.

۱۰- فهرست علائم

- | | |
|--|---|
| [3] Xin, S. H.; Wen, H. M. "A Progressive Damage Model for Fiber Reinforced Plastic Composites Subjected to Impact Loading"; Int. J. Impact Eng. 2015, 75, 40-52. | C_1 ثابت نرخ کرنش برای استحکام |
| [4] Zhou, G.; Davies, G. A. O. "Impact Response of Thick Glass Fiber Reinforced Polyester Laminates"; Int. J. Impact Eng. 1995, 16, 357-374. | C_2 ثابت نرخ کرنش برای مدول |
| [5] Gellert, E. P.; Cimpoeru, S. J.; Woodward, R. L. "A Study of the Effect of Target Thickness on the Ballistic Perforation of Glass-Fibre-Reinforced Plastic Composites"; Int. J. Impact Eng. 2000, 24, 445-456. | E_0 مجموعه مدول ها در نرخ کرنش مرجع |
| [6] Will, M. A.; Franz, T.; Nurick, G. N. "The Effect of Laminate Stacking Sequence of CFRP Filament Wound Tubes Subjected to Projectile Impact"; Compos. Struct. 2002, 58, 259-270. | E_i مدول الاستیسیته در راستای i |
| [7] Mili, F.; Necib, B. "The Effect of Stacking Sequence on the Impact-Induced Damage in Cross-Ply E-Glass/Epoxy Composite Plates"; Arch. Appl. Mech. 2009, 79, 1019-1031. | E_{i0} مقدار اولیه برای مدول الاستیسیته در راستای i |
| [8] Hashin, Z. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites"; J. Appl. Mech. 1980, 47, 329-334. | E_{RT} مجموعه مدول ها در نرخ کرنش |
| [9] Chang, F. K.; Chang, K. Y. "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations"; J. Compos. Mater. 1987, 21, 834-855. | G_0 مقدار اولیه مدول برشی |
| [10] Liu, K. S.; Tsai, S. W. "A Progressive Quadratic Failure Criterion for a Laminate"; Compos. Sci. Technol. 1998, 58, 1023-1032. | G_{ij} مدول برشی در صفحه ij |
| [11] Matzenmiller, A.; Lubliner, J.; Taylor, R. "A Constitutive Model for Anisotropic Damage in Fiber-Composites"; Mech. Mater. 1995, 20, 125-152. | G_{ij0} مقدار اولیه برای مدول برشی در صفحه ij |
| [12] Xiao, R. J.; Gama, B. A.; Gillespie, J. W. "Progressive Damage and Delamination in Plain Weave S-2 Glass/SC-15 Composites under Quasi-Static Punch-Shear Loading"; Compos. Struct. 2007, 78, 182-196. | m_i پارامتر نرم شوندگی ماده در مود تخریب i |
| [13] Gama, B. A.; Gillespie, J. W. "Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-Section Composites"; Compos. Struct. 2008, 86, 356-369. | q_{ij} ماتریس کوپلینگ تخریب |
| [14] Bandaru, A.; Ahmad, S. "Modeling of Progressive Damage for Composites under Ballistic Impact"; Compos. Part B-Eng. 2016, 93, 75-87. | r_i پارامتر آستانه تخریب مود i |
| [15] Tonatto, M. L. P.; Forte, M. M. C.; Tita, V.; Amico, S. C. "Progressive Damage Modeling of Spiral and Ring Composite Structures for Offloading Hoses"; Mater. Design 2016, 108, 374-382. | S ضریب مقیاس لایه شدگی |
| [16] Liu, J.; He, W.; Xie, D.; Tao, B. "The Effect of Impactor Shape on the Low-Velocity Impact Behavior of Hybrid Corrugated Core Sandwich Structures"; Compos. Part B-Eng. 2017, 111, 315-331. | S_0 مجموعه استحکام ها در نرخ کرنش مرجع |
| [17] LS-Dyna Keyword User's Manual, Ver. 971, May 2007. | S_i مقدار کاهش یافته استحکام در اثر پیشرفت خرابی |
| [18] Schweizerhof, K.; Weimar, K.; Munz, Th.; Rottmwr, Th. "Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Models in LS-DYNA, Merits and Limits"; Proc. of LS-DYNA World Conference, 1998. | S_{i0} مقدار اولیه استحکام |
| [19] Menna, C.; Asprone, D.; Caprino, G.; Lopresto, V.; Prota, A. "Numerical Simulation of Impact Tests on GFRP Composite Laminates"; Int. J. Impact Eng. 2011, 38, 677-685. | S_{FC} استحکام لهیدگی |
| [20] Xiao, J. "User's Manual for Ls-Dyna MAT162, Unidirectional and Plain Weave Composite Progressive Failure Models"; Center for Composite Materials, University of Delaware, Materials Sciences Corporation, 2005. | S_{FS} استحکام برشی الیاف |
| [21] Backman, M. E.; Goldsmith, W. "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets"; Int. J. Eng. Sci. 1978, 16, 1-99. | S_{TC} استحکام فشاری در راستای i |
| | S_{iFS} استحکام برشی الیاف در راستای i |
| | S_{ij} استحکام برشی در صفحه ij |
| | S_{iT} استحکام کششی در راستای i |
| | S_{RT} مجموعه استحکام ها در نرخ کرنش |
| | ϵ_{crush} کرنش حجمی نهایی لهیدگی المان |
| | ϵ_{expn} کرنش حجمی انبساطی المان |
| | ϵ_i کرنش محوری در راستای i |
| | ϵ_{ij} کرنش برشی در صفحه ij |
| | ϵ_{limit} کرنش حدی محوری المان |
| | ϵ نرخ کرنش |
| | $\dot{\epsilon}$ اثر نرخ کرنش برای استحکام و مدول |
| | $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش استاتیکی |
| | v_{ij} ضریب پواسون راستای ij |
| | ϕ زاویه اصطکاک مور |
| | ω_i پارامتر تخریب |
| | ω_{max} مقدار نهایی پارامتر تخریب |
- مرجع‌ها**
- [1] Sun, C. T.; Potti, S. V. "A Simple Model to Predict Residual Velocities of Thick Composite Laminates Subjected to High Velocity Impact"; Int. J. Impact Eng. 1996, 18, 339-353.
- [2] Mines, R. A. W.; Roach, A. M.; Jones, N. "High Velocity Perforation Behaviour of Polymer Composite Laminates"; Int. J. Impact Eng. 1999, 22, 561-588.