



بررسی تجربی و عددی مقاومت در برابر ضربه‌ی سرعت بالا در یک چندلایه الیافی - فلزی

یوسف چیریان¹، عبدالرضا کبیری عطاآبادی^{2*}، حمید خواجه ارزانی¹، غلامرضا گرامی³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
 3- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
 * شاهین شهر، صندوق پستی 83145/115 a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
چندلایه‌های الیافی- فلزی نسل جدیدی از کامپوزیت‌های هیبریدی هستند که متشکل از لایه‌های فلزی نازک و پیش آغشته‌های کامپوزیتی می‌باشند. این مواد دارای خواص مکانیکی مناسب هستند و از وزن کمتری نسبت به فلزات مشابه برخوردار می‌باشند. این مقاله به بررسی سرعت حد بالستیک در چندلایه‌ی الیافی- فلزی و مقایسه‌ی آن با لایه‌های فلزی، به صورت تجربی و عددی می‌پردازد. نمونه‌های الیافی- فلزی از لایه‌های آلومینیم 2024-T3 و پیش آغشته‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/ اپوکسی به صورت بافته شده، تشکیل شده است و در پرس گرم تحت دما و فشار مشخص پخته می‌شود. نمونه‌های فلزی نیز از جنس آلومینیم با الیاژ 2024-T3 می‌باشد. برای آزمایش ضربه از دستگاه تفنگ گازی استفاده شده است و سرعت ورودی پرتابه تا 90 m/s می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های ساخته شده، نشان دهنده‌ی برتری چندلایه الیافی- فلزی می‌باشد به گونه‌ای که سرعت حد بالستیک، انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص در این چندلایه‌ها بیشتر از آلومینیم می‌باشد. در نهایت نیز در نرم افزار آباکوس، ضربه‌ی سرعت بالا با استفاده از معیارهای آسیب کششی و برشی شبیه‌سازی شده است و توافق مناسبی بین نتایج تجربی و عددی بدست آمده است.	دریافت: 96/4/25 پذیرش: 96/8/6 کلیدواژگان: سرعت حد بالستیک چندلایه الیافی فلزی دستگاه تفنگ گازی انرژی نفوذ مخصوص

Experimental and numerical investigation of high velocity impact resistance in fiber metal laminates

Yoosof Chaparian¹, Abdulreza Kabiri^{2*}, Hamid Khaje Arzani¹, Gholamreza Gerami³

1- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran
 2- Department of Marine Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran
 3- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
 ** P.O.B. 83145/115, Shahinshahr, Iran, a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

Keywords

Ballistic limit velocity, Fiber Metal Laminate
 Gas gun
 Specific perforation energy

Abstract

Fiber- metal laminates (FMLs) are new type of hybrid composites based on thin metal layers, such as aluminum or titanium alloys, and prepreg composite material, such as glass fiber reinforced epoxy resin. FML represents good mechanical property and less weight than traditional aluminum layers. This paper presents experimental and numerical investigations on high velocity impact response of fiber- metal laminates based on prepreg woven glass fiber and 2024-T3 aluminum alloy. After lay- up and curing of samples, in order to assessment of ballistic impact behavior, tests on FMLs and 2024-T3 aluminum layers, were undertaken using a light gas gun at velocities up to 90 m/s. The results of experimental works indicate that FMLs based on prepreg woven glass fiber have higher specific perforation energy than the aluminum samples. Numerical simulations were performed by the finite element software, ABAQUS, using tensile and shear failure for damage criteria. Good agreement was observed between the numerical and experimental data.

1- مقدمه

1. این چندلایه‌ها که نسل جدیدی از مواد چندلایه محسوب می‌شوند، کاربرد زیادی به خصوص در صنعت هوافضا خواهند داشت. چند لایه‌های الیافی- فلزی¹ تلفیقی از فلز و کامپوزیت هستند که خواص گزیده‌ی هر دو گروه را دارا می‌باشند [1,2].
 امروزه در شرکت‌های بزرگ هواپیماسازی مثل ایرباس و بوئینگ از چندلایه‌های الیافی- فلزی در قسمت‌های مختلف مثل بال، بدنه، موتور و ... استفاده می‌شود [3,4].

از دیرباز در صنعت کمبود موادی که علاوه بر وزن کم خواص مکانیکی خوبی نیز داشته باشند، احساس می‌شد که با ورود چندلایه‌های کامپوزیتی به صنعت تا حد زیادی تحقق یافت. کامپوزیت‌ها دارای خواصی مانند استحکام بالا، مقاومت گرمایی و مقاومت شیمیایی بسیار مناسبی هستند؛ اما معمولاً در بارگذاری‌های ضربه‌ای و انفجار، جذب رطوبت و ... عملکرد نامناسبی از خود نشان می‌دهند. برای کاهش این خواص نامطلوب و بالا بردن راندمان این مواد، از لایه‌ی فلزی در کنار لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود و نتیجه‌ی آن مواد جدیدی است که چندلایه‌های الیافی- فلزی نامیده می‌شوند (شکل

¹ Fiber Metal Laminate (FML)

Please cite this article using:

Chaparian, Y., Kabiri, A., Khaje Arzani, H. and 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.

استفاده از پرتابه‌ی سرتخت نسبت به پرتابه‌ی مخروطی، بالاتر می‌باشد. نمونه‌های سوراخ شده با پرتابه‌ی مخروطی نیز دارای پلاگ نمی‌باشند. چپریان و کبیری [10] به تحلیل عددی رفتار ضربه‌ای در چندلایه‌های الیافی- فلزی پرداختند. از تحلیل اجزا محدود برای مدل‌سازی رفتار ضربه‌ای در این مواد تا سرعت 200 m/s استفاده شده است. لایه‌های کامپوزیتی به صورت مواد ایزوتروپیک مدل شده‌اند و از معیار شکست کششی³ جهت مدل‌سازی آسیب و حذف خودکار المان‌های آسیب دیده، استفاده شده است. لایه‌های آلومینیمی نیز به صورت مواد الاستیک- پلاستیک در نظر گرفته شده و معیار شکست کششی و معیار شکست برشی⁴ جهت مدل‌سازی آسیب ضربه و حذف المان‌های آسیب‌دیده در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی و تحلیل اجزا محدود از نرم افزار حل عددی با نام تجاری آباکوس استفاده شده است. نمودار مربوط به انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص⁵ با توجه به جرم و سرعت خروجی گلوله و سرعت حد بالستیک بدست آمده و تاثیر افزایش تعداد لایه‌ها و همینطور تاثیر افزایش نسبت ضخامت لایه‌های کامپوزیتی به آلومینیمی نیز بررسی شده است. نشان داده شده است که چندلایه الیافی- فلزی با جنس آلومینیم و پلی‌پروپیلن دارای انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص بالاتری می‌باشد و مقاومت حد بالستیک آن به صورت چشم‌گیری نسبت به آلومینیم و کامپوزیت تنها، افزایش می‌یابد. تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی مقاومت به ضربه در چندلایه‌های الیافی- فلزی انجام شده است و همگی از برتری آنها نسبت به سایر مواد مورد استفاده در صنعت هوافضا، حکایت دارد. در این تحقیق سعی شده است پس از ساخت چند نمونه از چندلایه الیافی- فلزی و لایه‌های آلومینیمی، آزمایش ضربه با سرعت بالا انجام شود و نتایج تجربی بدست آمده با نتایج حاصل از حل نرم افزاری مقایسه گردد.

2- تعریف مسئله

هدف از انجام این تحقیق، تحلیل و بررسی مقاومت به ضربه‌ی سرعت بالا در یک نمونه از چندلایه الیافی- فلزی و مقایسه‌ی آن با لایه‌ی فلزی تشکیل دهنده‌ی آن به صورت تنها، می‌باشد. نمونه‌های الیافی- فلزی با ابعاد مشخص در فشار و دمای مورد نظر در پرس گرم آماده می‌شوند و سپس به وسیله‌ی دستگاه تفنگ گازی تحت آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا قرار می‌گیرند. سرعت حد بالستیک از آزمایش مشخص شده و سپس انرژی نفوذ با استفاده از سرعت بالستیک و جرم پرتابه تعیین شده است. انرژی نفوذ مخصوص (انرژی نفوذ بر واحد چگالی سطح) نیز برای لایه‌های آلومینیمی و الیافی- فلزی ارائه می‌گردد. در ادامه نیز به کمک نرم‌افزار آباکوس، ضربه‌ی سرعت بالا با استفاده از دو معیار آسیب کششی و برشی شبیه‌سازی می‌شود و سعی خواهد شد تا قدرت نرم‌افزار در شبیه‌سازی ضربه‌ی بالستیک بررسی شود. سرعت حد بالستیک، یکی از پارامترهای مهم در بررسی مقاومت به ضربه با سرعت بالا می‌باشد و عبارتست از سرعتی که در آن، وقتی پرتابه به صورت قائم به هدفی برخورد می‌کند تا 50% احتمال نفوذ کامل آن در هدف خاص وجود دارد. در تعریف دیگر سرعت حد بالستیک را حداکثر سرعتی در نظر می‌گیرند که پرتابه هدف را سوراخ کرده ولی به طور کامل نتواند از آن عبور کند. گاهی نیز میانگین این دو سرعت را به عنوان سرعت حد بالستیک ماده در نظر می‌گیرند [11].

متداول‌ترین فلز مورد استفاده در چندلایه الیافی- فلزی آلومینیم است و متداول‌ترین الیاف کولار یا شیشه می‌باشد. اگر از الیاف شیشه استفاده شود به آن GLARE¹ و اگر الیاف از نوع کولار باشد به آن ARALL² می‌گویند که هر دوی آنها در صنایع هوافضا پرکاربرد می‌باشند [5]. استفاده از چندلایه‌های الیافی- فلزی در صنعت ما نیز باعث رشد و پیشرفت هر چه سریعتر در صنعت هوافضا خواهد شد. برای استفاده‌ی بهتر ملزم به دارا بودن دانش دقیق در خصوص خواص و پیچیدگی‌های این نوع مواد هستیم. لذا بررسی و تحلیل مقاومت به ضربه و یا تحلیل سایر خصوصیات این نوع مواد باعث بهبود و افزایش کیفیت آنها خواهد شد. در کاری که ولت [6] در سال 1993 انجام داد، نشان داده شد که حداقل انرژی برای شروع اولین شکست در GLARE بسیار بیشتر از سایر مواد قابل استفاده در صنعت هوافضا است که نشان دهنده‌ی مقاومت خوب این ماده در مقابل ضربه به خصوص ضربه‌ی سرعت بالا می‌باشد. کنتول و عبدالله [7]، در مقاله‌ای به بررسی پاسخ ضربه با سرعت بالا در طیفی از چندلایه‌ها که شامل الیاف بافته شده‌ی شیشه با زمینه‌ی پلی- پروپیلن و الیاف پلی‌پروپیلن با زمینه‌ی پلی‌پروپیلن و آلیاژ آلومینیم می‌باشد، پرداخته‌اند. آنها آزمایش ضربه را بر روی چندلایه الیافی- فلزی با دو آلیاژ متفاوت آلومینیم شامل 2024-O و 2024-T3 انجام داده‌اند و از اسلحه‌ی گاز نیتروژن برای ایجاد ضربه تا سرعت 150 m/s استفاده شده است. نمونه‌ها پس از آزمایش در راستای محل اصابت گلوله برش زده شده و مشاهدات میزان آسیب در برابر ضربه ارائه شده است. مقاومت بالستیک چندلایه با آلیاژ 2024-T3 به شکل چشم‌گیری بیشتر از انواع متناظر ساخته شده از نوع 2024-O می‌باشد.

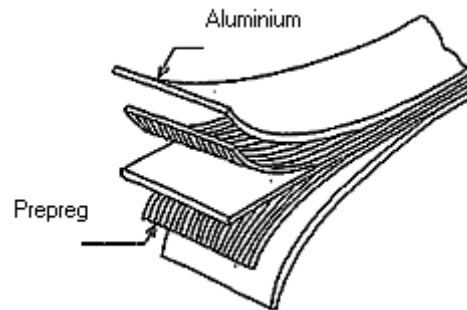


Fig. 1 Schematic of Fiber Metal Laminate

شکل 1 طرح‌واره‌ی کلی از چندلایه الیافی- فلزی [3]

صدیقی و همکاران [8] به بررسی ضربه‌ی سرعت بالا در ساندویچ پنل‌هایی با پوسته‌ی الیافی- فلزی و هسته‌ی پلی‌اورتان پرداختند. پوسته‌ی نمونه‌ها از لایه آلومینیم با آلیاژ 1050 و لایه کامپوزیتی شیشه (از نوع E) ساخته شده است. نتایج نشان داده است که صفحه‌ی جلویی نمونه‌ها که پرتابه به آن اصابت می‌کند، بیشترین جذب انرژی را دارد. همچنین افزایش تراکم پلی‌اورتان، تغییر محسوسی در جذب انرژی نسبت به سایر پارامترها ندارد.

زارعی و صدیقی [9] در پژوهش خود به بررسی ضربه‌ی سرعت بالا در چندلایه‌های GLARE با استفاده از دو پرتابه‌ی سرتخت و مخروطی شکل پرداختند. نتایج نشان داده است که سرعت حد بالستیک در نمونه‌ها با

³ Tensile Failure

⁴ Shear Failure

⁵ Specific perforation energy

¹ Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy

² Aramid fiber Reinforced Aluminum Laminate

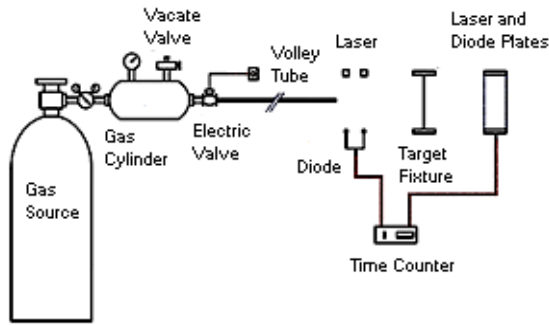


Fig. 2 Schematic of gas gun

شکل 2 طرح‌واره‌ی دستگاه تفنگ گازی [13]

در انجام آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا، تنها می‌توان سرعت قبل از برخورد و سرعت پس از برخورد را اندازه گرفت. به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه در جلوی لوله‌ی تفنگ گازی، از یک جفت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری که متصل به یک شمارنده‌ی زمان هستند، استفاده می‌شود. با رد شدن پرتابه از روی سنسورهای موجود در قبل از هدف، زمان حرکت پرتابه (t) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به ثابت بودن فاصله‌ی بین دو سنسور (X)، با استفاده از فرمول (1)، سرعت (v) اندازه گرفته شده و نشان داده می‌شود.

$$x = vt \quad (1)$$

به دلیل اینکه پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود، امکان اندازه‌گیری سرعت باقی مانده‌ی پرتابه به روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد. از این رو، از محفظه‌ای مجهز به لیزرهای مکان یاب ذرات استفاده می‌شود. به گونه‌ای که دو پرده‌ی دو بعدی موازی، که هر یک شامل 80 عدد منبع نور لیزر و دیود حساس به نور در دو راستای افقی و عمودی می‌باشند، برای تعیین موقعیت محل عبور پرتابه استفاده می‌شود. این دیودهای حساس به نور هر یک به طور جداگانه به شمارنده‌ی زمان متصل می‌باشند. سرانجام پس از پردازش اطلاعات در کامپیوتر، اطلاعات مربوط به پرتابه مشخص و سرعت خروجی آن تعیین می‌گردد.

پرتابه‌ی مورد استفاده برای ضربه‌ی سرعت بالا، یک استوانه‌ی فولادی سر تخت می‌باشد که در سر پرتابه یک راکورد بسیار کوچک داده شده تا گوشه‌های نوک تیز آن در برش صفحات هدف نقشی نداشته باشد. قطر پرتابه مطابق شعاع داخلی لوله‌ی تفنگ گازی برابر 10 mm، طول 15 mm و وزن آن 8.9 gr می‌باشد.

در شکل 3 نمونه‌ای از قطعات ساخته شده جهت آزمایش ضربه نشان داده شده است.

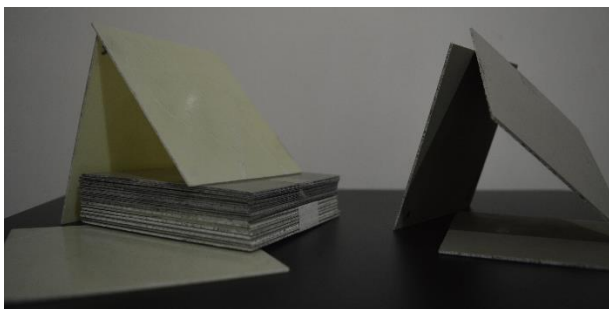


Fig. 3 Samples of FML before testing

شکل 3 نمونه‌های الیافی- فلزی ساخته شده قبل از انجام آزمایش

در این پژوهش نمونه‌ها در دو گروه ساخته شده‌اند. برای آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا، نیاز به داشتن چند نمونه‌ی کاملاً یکسان است زیرا که سرعت حد بالستیک هر نمونه به صورت سعی و خطا بدست می‌آید. در هر بار شلیک، نمونه تخریب شده و دیگر نمی‌توان از آن استفاده نمود و با توجه به این که شرایط نمونه در شلیک‌های متفاوت بایستی یکسان باشد، همانند بودن نمونه‌ها بسیار مهم خواهد شد. گروه اول شامل 4 قطعه‌ی آلومینیومی یکسان و گروه دوم شامل 8 نمونه‌ی الیافی- فلزی یکسان می‌باشد که برای اندازه‌گیری ضخامت و وزن هر دسته، بین قطعات میانگین‌گیری می‌شود. ضخامت میانگین هر سری از قطعات، چگالی سطح و لایه‌چینی نمونه‌ها در جدول 1 و خواص مکانیکی مواد استفاده شده در ساخت نمونه‌ها جهت استفاده در حل عددی در جدول 2 و 3 آمده است.

جدول 1 لایه چینی و چگالی سطح نمونه‌ها

Table 1 Lay up and Areal density of samples

شماره آزمایش	نوع ماده	لایه‌چینی	ضخامت (mm)	چگالی سطح (kg/m ²)
سری 1	آلومینیوم 2024-T3	AL	1	2.775
سری 2	چندلایه الیافی- فلزی با الیاف بافته‌شده‌ی شیشه	AL/ GE/ GE/ AL	1.01	2.41

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024-T3 [12]

Table 2 Mechanical properties of Al 2024-T3

چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیک (Gpa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (Mpa)	نرخ کرنش پلاستیک (1/s)	کرنش نهایی
2770	73.1	0.34	345	483	36	0.18

جدول 3 خواص مکانیکی لایه‌ی پیش آغشته‌ی شیشه اپوکسی

Table 3 Mechanical properties of prepreg woven glass/ epoxy

چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیک (Gpa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (Mpa)	کرنش نهایی
2040	28	0.2	520	520	0

3- آزمایش نمونه‌ها

برای انجام تست ضربه‌ی سرعت بالا از دستگاه تفنگ گازی موجود در آزمایشگاه ضربه، دانشگاه تربیت مدرس، استفاده می‌شود. این دستگاه شامل یک مخزن گاز به همراه یک شیر برقی می‌باشد. بر روی مخزن نیز یک فشارسنج دیجیتالی وجود دارد تا فشار داخل مخزن را نشان دهد. در جلوی مخزن و بعد از شیر برقی، یک لوله بسیار بلند قرار دارد که پرتابه درون آن جای می‌گیرد. گاز درون مخزن با فشردن کلید مربوط به شلیک پرتابه، به یک باره پشت پرتابه تخلیه شده و باعث سرعت گرفتن آن می‌شود. سرعت نهایی پرتابه که از انتهای لوله خارج می‌گردد، تابعی از طول لوله، فشار گاز مخزن، ضریب انبساط گاز مورد استفاده و جرم پرتابه می‌باشد. گاز استفاده شده در این دستگاه، گاز هلیوم می‌باشد. از آنجا که گاز هلیوم خنثی می‌باشد و ضریب انبساط بالایی نیز دارد، از این گاز استفاده شده است.

طرح‌واره‌ی دستگاه تفنگ گازی در شکل 2 آمده است.

4- مدل‌سازی اجزا محدود

در این تحقیق برای شبیه‌سازی ضربه‌ی سرعت بالا، از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. با اعمال شرایط صحیح مسئله مانند انتخاب مدل صحیح ماده، اعمال شرایط فیزیکی مسئله مانند شرایط مرزی و تماس بین سطوح، انتخاب المان‌های مناسب و تعریف صحیح خواص مواد، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح به کمک این نرم‌افزار فراهم می‌شود. در این بخش صحت سنجی نتایج عددی به کمک نتایج آزمایش انجام شده است. پس از صحت سنجی کار عددی، با بررسی مسئله در محیط نرم‌افزار، در منابع مالی صرفه جویی شده و نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر برطرف شده است.

مدل‌سازی هندسی شامل دو قسمت پرتابه و هدف می‌باشد. پرتابه به شکل یک استوانه‌ی سرتخت و هدف نیز به شکل یک مکعب مستطیل با سطح $100 \times 100 \text{ mm}^2$ است. در مدل‌سازی چندلایه الیافی- فلزی سطح پایین هر لایه و سطح بالای لایه‌ی زیرین با اعمال قید گره¹ به یکدیگر متصل می‌شوند.

مش‌ریزی به گونه‌ای انجام می‌شود که المان‌های دورتر از محل اصابت پرتابه به هدف، درشت‌تر در نظر گرفته می‌شوند تا زمان انجام حل عددی کاهش یابد (شکل 4). همچنین برای یکسان بودن اثر ضربه بر لایه‌ها، مش تمام لایه‌ها یکسان زده شده است.

برای تعیین نوع المان دو گزینه‌ی المان نوع جامد و پوسته‌ای پیش روست. پرتابه به صورت جسم صلب و با المان صلب چهار گره‌ای (R3D4) در نظر گرفته شده است.

به دلیل چندلایه بودن هدف و اهمیت محاسبه‌ی تنش در راستای ضخامت، از المان جامد با 8 گره برای تمام لایه‌ها استفاده شده است. اگرچه برای هدف‌های تک‌لایه نیز نشان داده شده است که اگر از المان جامد استفاده شود، جواب دارای دقت بیشتری است [14].

عمومی‌ترین و راحت‌ترین روش برای تعریف نوع تماس، تماس عمومی² می‌باشد که تماس بین پرتابه و همه‌ی لایه‌ها را در نظر می‌گیرد. در ادامه‌ی روند مدل‌سازی از تماس عمومی برای تعریف تماس بین پرتابه و لایه‌ها استفاده می‌شود.

سرعت اولیه‌ی پرتابه فقط در راستای عمود بر هدف تعریف می‌شود و پرتابه در سایر جهات مقید است. شتاب نیز در تمام جهات صفر است و از شتاب گرانشی زمین صرف‌نظر می‌شود.

4-1- تعیین مشخصات مواد

انتخاب نوع ماده در شبیه‌سازی ضربه‌ی سرعت بالا بسیار مهم می‌باشد به گونه‌ای که بیشترین تاثیر را بر نتیجه‌ی نهایی خواهد داشت. در تست‌های ضربه‌ی انجام شده، از پرتابه‌ای استفاده شده است که سختی و صلیبیت بالایی دارد و در حین ضربه و پس از برخورد به هدف، تغییر شکل محسوس نمی‌دهد. لذا در تحلیل عددی، پرتابه به صورت یک پوسته صلب مدل شده است و در حین تحلیل عددی تغییر شکل نمی‌دهد. هدف، از چندلایه‌ی بهم چسبیده تشکیل شده است که جنس لایه‌ها، آلومینیم و کامپوزیت بافته شده می‌باشد. لایه‌های آلومینیم به صورت مواد الاستو- پلاستیک مدل شده‌اند و از هر دو معیار آسیب کششی و برشی هم‌زمان برای آن استفاده شده است. معیار آسیب برشی جهت حذف المان‌های آسیب دیده و آسیب کششی جهت

مدل‌سازی خرد شدن دینامیکی³ به کار برده می‌شود. لایه‌های کامپوزیتی نیز به صورت بافته‌شده و جنس شیشه اپوکسی در نظر گرفته شده است. این لایه‌ها به صورت مواد ایزوتروپیک مدل‌سازی شده و از معیار آسیب کششی استفاده شده است. از معیار آسیب کششی جهت حذف المان‌های آسیب دیده استفاده می‌شود.

4-2- معیار شکست برشی

نرم‌افزار آباکوس/ حل صریح [15]، دو معیار آسیب معرفی کرده است که فقط برای پدیده‌های دینامیکی با نرخ کرنش بالا مناسب می‌باشند.

معیار شکست برشی با استفاده از تسلیم پلاستیک معرفی شده است، به گونه‌ای که از کرنش پلاستیک معادل به عنوان معیار سنجش گسیختگی استفاده می‌کند. در معیار شکست برشی بر مبنای کرنش پلاستیک معادل، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که پارامتر آسیب (رابطه‌ی (2)) به مقدار 1 برسد.

$$w = \frac{\bar{\epsilon}_0^{pl} + \sum \Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (2)، $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ مقدار کرنش پلاستیک معادل اولیه، $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ مقدار پیشروی کرنش پلاستیک معادل و $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ کرنش نهایی قطعه می‌باشد. همچنین فرض شده است که رفتار ماده به نرخ کرنش وابسته است و مقادیر مربوط به وابستگی نرخ کرنش به نرم‌افزار داده شده است (روابط (3) و (4)).

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_{pl}, \dot{\bar{\epsilon}}_{pl}) = \sigma_y(\bar{\epsilon}_{pl}) R(\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}) \quad (3)$$

$$R = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y} \quad (4)$$

در روابط (3) و (4)، $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل و R نسبت تنش می‌باشد. همچنین معیار شکست برشی، زمانی که مقدار آسیب به 1 برسد المان آسیب دیده را حذف می‌کند.

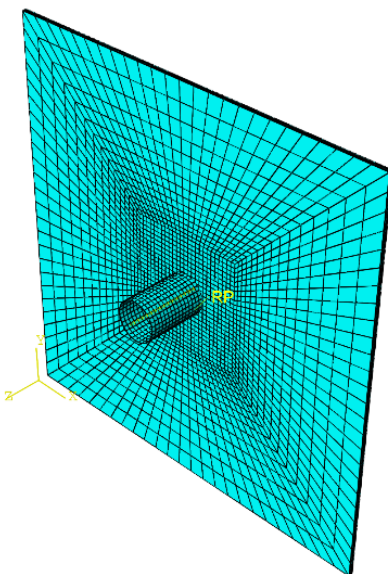


Fig. 4 Mesh generation for fiber metal laminate

شکل 4 مش‌ریزی مدل چندلایه الیافی- فلزی (نمای سه بعدی)

³ Dynamic spall model

¹ Tie

² General Contact

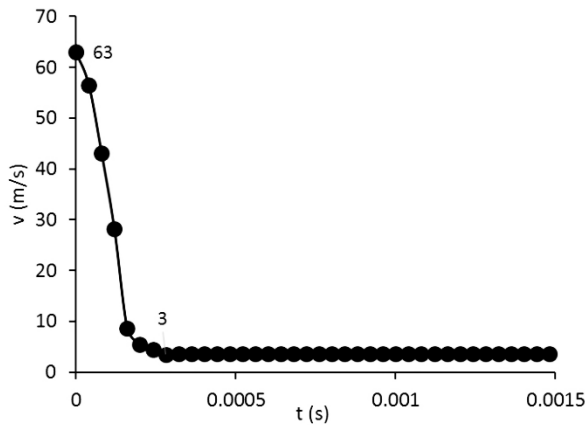


Fig. 5 The velocity versus time for Al 2024-T3

شکل 5 نمودار سرعت- زمان نمونه‌ی آلومینیومی

با توجه به نتایج بدست آمده‌ی سرعت حد بالستیک از آزمایش قطعات و حل عددی در نمونه‌های آلومینیومی، مشاهده می‌شود که درصد خطای حل عددی پایین بوده (جدول 5) و نتیجه‌ی آن قابل اعتماد می‌باشد.

جدول 5 درصد خطای حل عددی مربوط به نمونه‌های آلومینیومی

Table 5 Percentage error of numerical modeling for Al 2024-T3

درصد خطای حل عددی	سرعت حد بالستیک بدست آمده از حل عددی (m/s)	سرعت حد بالستیک بدست آمده از آزمایش نمونه‌ها (m/s)
4.54%	63	66

در جدول 6 نتایج میانگین مربوط به آزمایش 6 نمونه‌ی الیافی- فلزی ارائه شده است.

جدول 6 نتایج مربوط به آزمایش نمونه‌های الیافی- فلزی

Table 6 Experimental result of FML samples

سرعت حد بالستیک میانگین V_{BL} (m/s)	انرژی نفوذ (j)	چگالی سطح (kg/m ²)	انرژی نفوذ مخصوص (jm ² /kg)
71	22.4	2.4	9.4

پس از مدل‌سازی اجزا محدود، نمودار سرعت بر حسب زمان برای نمونه‌ی الیافی- فلزی، به صورت شکل 6 می‌باشد.

درصد خطای حل عددی برای نمونه‌های الیافی- فلزی در جدول 7 آمده است.

جدول 7 درصد خطای حل عددی مربوط به نمونه‌های الیافی- فلزی

Table 7 Percentage error of numerical modeling for FML

درصد خطای حل عددی	سرعت حد بالستیک بدست آمده از حل عددی (m/s)	سرعت حد بالستیک بدست آمده از آزمایش نمونه‌ها (m/s)
2.7%	73	71

در تحقیقات قبلی [16]، بیان شده است که 84٪ تا 92٪ از کل انرژی جذب شده به خمش و کشش غشایی لایه‌ها مربوط می‌شود. همچنین 2٪ تا 9٪ از کل انرژی جذب شده نیز، از طریق جدا شدن لایه‌ها از یکدیگر می‌باشد.

3-4- معیار شکست کششی

در معیار شکست کششی فرض شده است، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که تنش هیدرواستاتیک (P) از مقدار مشخص شده برای σ_{cutoff}^1 بیشتر شود (رابطه‌ی (5)).

$$P = \frac{1}{3} \sigma_{ii} > \sigma_{cutoff} \quad (5)$$

در این معیار، تنش هیدرواستاتیک به عنوان معیار سنجش گسیختگی و یا مدل خرد شدن دینامیکی، استفاده می‌شود. همچنین مکانیزم حذف المان این معیار مشابه معیار شکست برشی است به گونه‌ای که با برقرار شدن شرط شکست (رابطه‌ی (5))، المان آسیب دیده حذف خواهد شد. لازم به ذکر است که σ_{cutoff} مقدار قراردادی و مشخصی ندارد.

5- بررسی نتایج

در این بخش سرعت حد بالستیک بدست آمده از آزمایش و مدل شبیه‌سازی شده، مورد بررسی قرار گرفته است و انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص مربوط به هر گروه، با یکدیگر مقایسه می‌شود. از آزمایش نفوذ قطعات، سرعت ورودی و خروجی پرتابه به دست آمده است که با توجه به آن سرعت حد بالستیک مشخص می‌گردد.

انرژی نفوذ، به کمک سرعت حد بالستیک (V_{BL}) و با استفاده از رابطه‌ی (6) که در آن m جرم پرتابه می‌باشد، بدست آمده است. همچنین با تقسیم انرژی نفوذ بر چگالی سطح، انرژی نفوذ مخصوص حاصل می‌شود. در واقع دلیل یکی نبودن وزن و ضخامت قطعات از انرژی نفوذ مخصوص استفاده خواهد شد. با این کار انرژی نفوذ طبیعی می‌شود² و از این طریق می‌توان مقایسه‌ای بین قطعات داشت که کدام یک نسبت به وزن خود انرژی بیشتری را در ضربه جذب می‌کند.

$$K = \frac{1}{2} m v_{BL}^2 \quad (6)$$

سرعت حد بالستیک با استفاده از سرعت ورودی و خروجی (رابطه‌ی (7)) بدست آمده است. لازم به ذکر است که با فرض ثابت بودن میزان جذب انرژی جنبشی با سرعت‌های اولیه‌ی متفاوت، از رابطه‌ی (7) استفاده می‌شود.

$$V_{BL} = \sqrt{V_i^2 - V_o^2} \quad (7)$$

نتایج میانگین مربوط به آزمایش 4 نمونه آلومینیومی در جدول 4 آمده است.

جدول 4 نتایج مربوط به آزمایش نمونه‌های آلومینیومی

Table 4 Experimental result of AL samples

سرعت حد بالستیک میانگین V_{BL} (m/s)	انرژی نفوذ (j)	چگالی سطح (kg/m ²)	انرژی نفوذ مخصوص (jm ² /kg)
66	19	2.8	6.9

پس از مدل‌سازی اجزا محدود، نمودار سرعت بر حسب زمان برای نمونه‌ی آلومینیومی به صورت شکل 5 می‌باشد.

¹ Hydrostatic cutoff stress

² Normalize

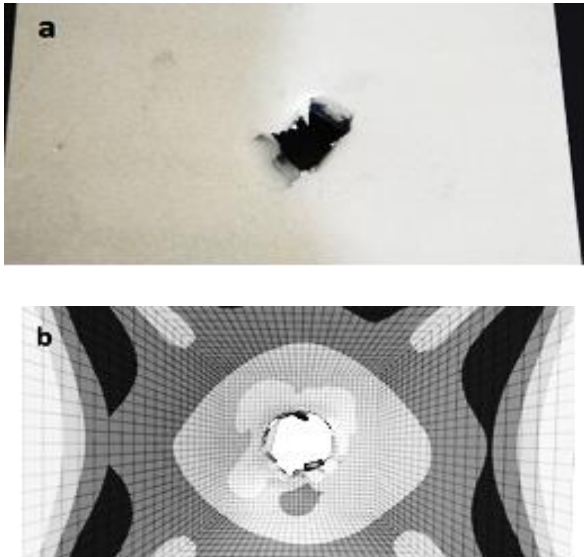


Fig.7 Deformation obtained in front AL layer of FML: (a) Experimental (b) Numerical

شکل 7 تغییر شکل بدست آمده در لایه‌ی آلومینیم جلویی در چندلایه الیافی- فلزی (a) آزمایش تجربی (b) حل نرم افزاری

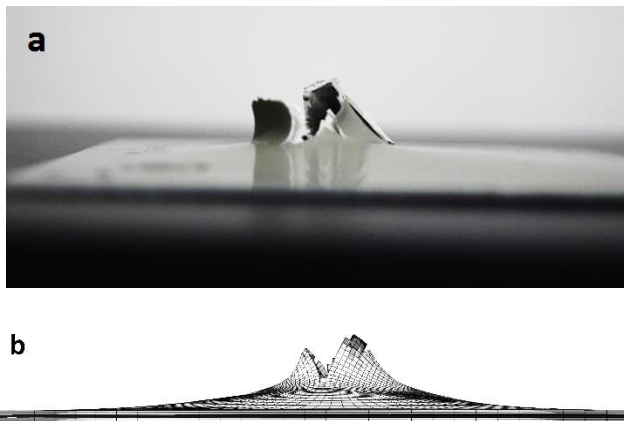


Fig. 8 Petalling Failure in back AL layer of FML: (a) Experimental (b) Numerical

شکل 8 شکست پتالینگ در لایه‌ی آلومینیم پشتی FML (a) آزمایش تجربی (b) حل نرم افزاری



Fig. 9 Sample of FML after impact test

شکل 9 نمونه‌های الیافی- فلزی پس از آزمایش ضربه

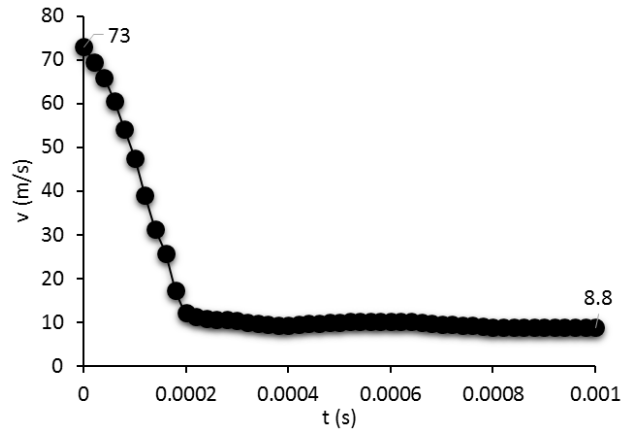


Fig. 6 The velocity versus time for FML

شکل 6 نمودار سرعت- زمان نمونه‌ی الیافی- فلزی

هر چه لایه‌های چندلایه نازک‌تر باشد، تغییر شکل غشایی بهتری از خود نشان می‌دهد و سهم بیشتری از جذب انرژی مربوط به خمش و کشش غشایی لایه‌ها را شامل می‌شود. باقی مانده‌ی انرژی جذب شده به شکست الیاف و شکست برشی لایه‌های آلومینیمی و شیشه- اپوکسی مربوط می‌شود. جذب انرژی و ضربه پذیری مناسب آلومینیم و رفتار نرم این ماده و همچنین استحکام و کرنش نهایی بالای الیاف شیشه و وجود پدیده‌ی پل زنی الیاف¹ در لایه‌های کامپوزیتی، نقش موثری در جذب انرژی و رفتار ضربه سرعت بالا، خواهند داشت.

در نمونه‌های الیافی- فلزی، وجود هر دو لایه‌ی آلومینیمی و کامپوزیتی باعث شده تا خصوصیات مثبت جذب انرژی هر دو لایه در کنار یک دیگر، منجر به عملکرد مناسب چندلایه‌ی در برابر ضربه‌ی سرعت بالا شود. در تمامی نمونه‌ها، شکست در لایه‌ی آلومینیمی جلوی ضربه به صورت پلاگ² بوده و تغییر شکل پلاستیک بسیار کمی به صورت موضعی در محدوده‌ی ضربه دیده می‌شود (شکل 7) که ناشی از تغییر شکل غشایی لایه می‌باشد. علت این امر را می‌توان در سرعت بالا و سرتخت بودن پرتابه جست‌وجو کرد. همچنین به دلیل مقاومت برشی پایین ورق‌های آلومینیم، قبل از این که فشار ناشی از ضربه‌ی پرتابه و موج تنش ایجاد شده در لایه‌ی جلویی پخش شود، در لبه‌ی پرتابه و روی لایه‌ی آلومینیم جلویی، شکست برشی رخ می‌دهد.

در لایه‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه، پدیده‌ی پل زنی الیاف نرخ رشد ترک را کاهش می‌دهد و همچنین حساسیت بالای الیاف شیشه به نرخ کرنش و کرنش نهایی بالای این الیاف، باعث جذب انرژی پرتابه خواهد شد. لایه‌ی آلومینیم پشتی با جذب انرژی از طریق تغییر شکل پلاستیک و تغییر شکل به واسطه‌ی کشش غشایی باعث جذب انرژی خواهد شد (شکل 8).

نمونه‌هایی از چندلایه‌های الیافی- فلزی پس از آزمایش ضربه در شکل 9 آمده است.

در شکل 10 کانتور تنش فون مایز³ در زمان 560 میکرو ثانیه نشان داده شده است.

¹ Fiber Bridging

² Plugging

³ Von Mises stress

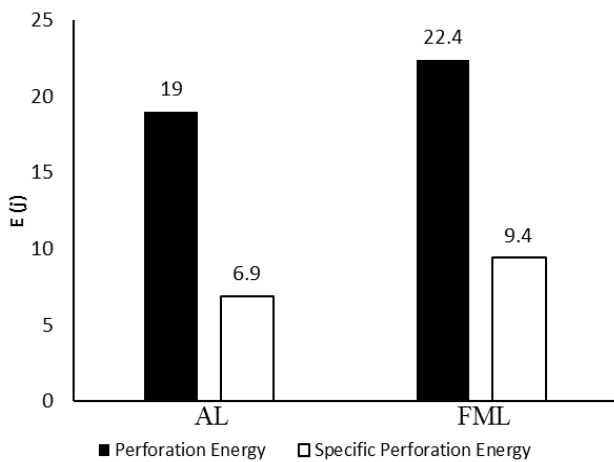


Fig. 12 Comparison of experimentally result of testing samples

شکل 12 مقایسه‌ی نتایج آزمایش نمونه‌های آلومینیومی و چندلایه الیافی- فلزی

در مقالات و نوشته‌های قبلی [17]، سه روش برای مدل‌سازی چندلایه‌های الیافی- فلزی تحت بار ضربه‌ای در نرم‌افزار آباکوس پیشنهاد شده است. این سه روش با توجه به نوع المان انتخاب شده، رفتار مواد و معیارهای شکست از یکدیگر متمایز شده‌اند.

در روش اول [12] المان‌های جامد¹ برای آلومینیوم و کامپوزیت انتخاب شده است. لایه‌های آلومینیوم به صورت مواد الاستو- پلاستیک با رفتار وابسته به نرخ کرنش مدل‌سازی شده و لایه‌های کامپوزیتی به عنوان ماده‌ی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. معیارهای شکست برشی و کششی برای مدل‌سازی فرآیند آسیب در آلومینیوم و برای لایه‌های کامپوزیت از معیار شکست کششی بهره برده می‌شود.

در روش دوم [18] از المان جامد با 8 گره برای لایه‌های آلومینیومی و المان پوسته‌ای² با 8 گره برای کامپوزیت استفاده شده است. در مدل ارائه شده، برای آلومینیوم معیار آسیب در نظر گرفته نشده است و معیار آسیب هشین³ برای لایه‌های کامپوزیتی ارائه شده است. لازم به ذکر است که المان پوسته‌ای برای مدل‌سازی ضربه مناسب نمی‌باشد چون که نیاز به محاسبه‌ی تنش در راستای ضخامت لایه‌ها است. از طرفی معیار هشین ارائه شده برای کامپوزیت در نرم‌افزار آباکوس، فقط برای المان‌های پوسته‌ای قابل استفاده است.

در روش سوم [19] با استفاده از برنامه‌نویسی⁴، آسیب پیش‌رونده و گسیختگی در آلومینیوم و کامپوزیت بر مبنای استفاده از المان‌های سه‌بعدی مدل‌سازی شده است.

روش دوم به دلیل استفاده از المان پوسته‌ای روش قابل قبولی جهت شبیه‌سازی ضربه‌ی پرسرعت نمی‌باشد. همچنین در این پژوهش، به دلیل وجود پیچیدگی در برنامه‌نویسی هدف کدنویسی نبوده است و به همین منظور از روش اول جهت مدل‌سازی ضربه استفاده شده است.

در این روش به دلیل اینکه لایه‌های کامپوزیتی به صورت بافته شده هستند می‌توان با ساده‌سازی آنها را ایزوتروپیک در نظر گرفت. در صورتی که

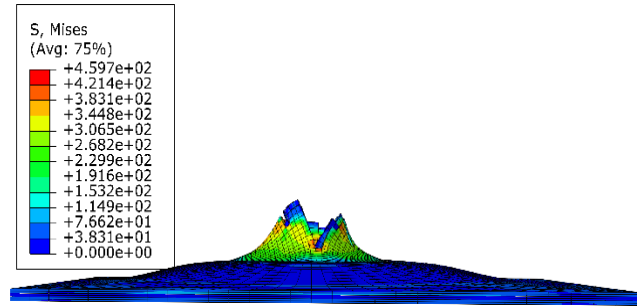


Fig. 10 Von mises stress contour in 560 microsecond

شکل 10 کانتور تنش فون مایز در زمان 560 میکرو ثانیه

در شکل 11 نیز مراحل برخورد پرتابه‌ی سرتخت به هدف چندلایه‌ی الیافی- فلزی در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی انجام شده، نمایش داده شده است. انرژی جنبشی ورودی پرتابه 400 می‌باشد.

در شکل 12، انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص در دو گروه نمونه‌ی آلومینیومی و الیافی- فلزی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص در نمونه‌های الیافی- فلزی بیشتر است و چندلایه در عین سبک‌تر بودن، انرژی بیشتری در ضربه‌ی سرعت بالا جذب خواهد کرد.

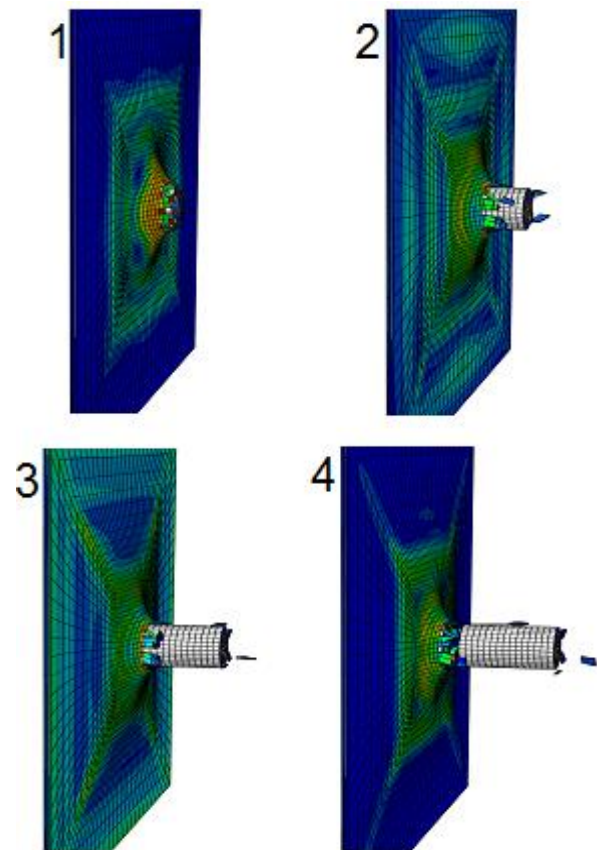


Fig. 11 FML subjected to projectile impact with velocity of 300 m/s at various time

شکل 11 برخورد پرتابه با سرعت 300 m/s به هدف الیافی- فلزی در زمان‌های مختلف

¹ Solid Elements
¹ Shell Elements
² Hashin Damage Criteria
³ Subroutine VUMAT

حل عددی، مقدار آن مشخص می‌شود. این تنش تاثیر زیادی در نفوذ پرتابه و سرعت حد بالستیک خواهد داشت.

با توجه به این موضوع که تنها معیار ارائه شده برای آسیب کامپوزیت‌ها در نرم افزار آباکوس، معیار هشین می‌باشد و این معیار تنها برای المان‌های پوسته‌ای قابل قبول است، نیاز به نوشتن زیر برنامه برای مدل کردن آسیب کامپوزیت با المان‌های سه بعدی، می‌باشد. در حل عددی ضربه‌ی بالستیک در نرم افزار آباکوس، استفاده از معیار شکست برشی و کششی، به دلیل ساده سازی‌های انجام شده نمی‌تواند برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی و الیافی- فلزی، کاربردی باشد. از این رو در برخی از آزمایش‌های ضربه‌ی سرعت بالا به خصوص در مواردی که جنس نمونه‌ها کامپوزیت با الیاف بافته شده است، این روش می‌تواند تخمین مناسبی از سرعت حد بالستیک قطعه در اختیار قرار دهد و کاربر را از برنامه نویسی بی‌نیاز سازد. در حالت کلی نوشتن برنامه‌ی آسیب پیش رونده در کامپوزیت‌ها برای المان‌های سه بعدی راه حل دقیق- تری خواهد بود.

7- پیوست‌ها

E	انرژی (j)
V	سرعت (ms^{-1})
t	زمان (s)
V_{Bl}	سرعت حد بالستیک (ms^{-1})
P	تنش هیدرواستاتیک (Nm^{-2})

8- مراجع

- Ahmadi, H., "Experimental and Numerical Investigation Ballistic Velocity on GLARE Target," MSc Thesis, In Persian, Tarbiat Modares University, Iran, 2009.
- Voglesang, L. B., and Vlot, A., "Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, No. 1, pp. 1-5, 2000
- Vlot, A., Gunnink, J. W., "Fibre metal laminates: an introduction" Springer Science & Business Media, 2011
- Laliberte, J., Poon, C., Straznicki, P., Fahr, A., "Applications of fiber-metal laminates", Polymer composites, Vol. 21, No. 4, pp. 558-567, 2000.
- Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods", Materials & Design, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- Vlot, A., "Impact properties of fibre metal laminates", Composites Engineering, Vol. 3, No. 10, pp. 911-927, 1993.
- Abdullah, M., Cantwell, W., "The impact resistance of fiber-metal laminates based on glass fiber reinforced polypropylene", Polymer composites, Vol. 27, No. 6, pp. 700-708, 2006.
- Ghalami-Chooabar, Mehran, and Mojtaba Sadighi. "Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core." *Aerospace Science and Technology* 32.1 (2014): 142-152.
- Zarei, Hamed, Mojtaba Sadighi, and Giangiacomo Minak. "Ballistic analysis of fiber metal laminates impacted by flat and conical impactors." *Composite Structures* 161 (2017): 65-72.
- Chaparian, Y., Kabiri, A. R., "Numerical analysis of high velocity impact resistance in fiber metal laminate", In Persian, the 15th International Conference of Iranian Aerospace Society, Civil Aviation Technology College, Iran.
- Ahmadi, H., Liaghat, G., Sabouri, H., Bidkhour, E., "Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates", Journal of Composite Materials, pp. 0021998312449883, 2012.

به نظر می‌رسد برای لایه‌های کامپوزیتی با الیاف تک جهته نمی‌توان از این روش استفاده کرد. همچنین در صورتی که در لایه‌های کامپوزیتی الیاف بافته شده و زمینه از یک جنس باشند (مانند کامپوزیت ترموپلاست پلی پروپیلن با الیاف و زمینه‌ی پلی پروپیلن) فرض ایزوتروپیک در نظر گرفتن، فرض صحیح تری می‌باشد.

در این روش ساده سازی‌های دیگری نیز وجود دارد. اعمال قید گره در بین لایه‌های چندلایه که پدیده‌ی لایه‌شدگی¹ را در حین اعمال ضربه در نظر نمی‌گیرد.

σ_{cutoff} مقدار قراردادی و مشخصی ندارد و باید با توجه به جنس هدف برای نرم افزار تعریف شود. معمولاً در این روش از شبیه سازی ضربه، ابتدا با یک لایه چینی مشخص، آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا بر روی یک نمونه انجام می‌شود و سرعت حد بالستیک آن بدست می‌آید. سپس با توجه به سرعت حد بالستیک بدست آمده نمونه‌ی مورد نظر در نرم افزار مدل می‌شود و مقدار σ_{cutoff} برای جنس مشخص برای نرم افزار تعریف می‌شود. حال می‌توان برای تغییر لایه چینی، تغییر شکل پرتابه، افزایش تعداد لایه‌ها، کاهش یا افزایش ضخامت لایه‌ها و تاثیر این تغییرات بر سرعت حد بالستیک، از نرم افزار استفاده کرد و زمان و هزینه‌های مربوط به آزمایش را کاهش داد.

6- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش نمونه‌ها و همچنین شبیه‌سازی انجام شده به کمک نرم افزار آباکوس، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد.

در تحقیق حاضر نمونه‌های الیافی- فلزی با لایه‌های آلومینیم و پیش آغشته‌های شیشه اپوکسی بافته شده و نمونه‌های آلومینیمی تحت آزمایش ضربه‌ی بالستیک قرار می‌گیرند و ضربه پذیری این مواد بررسی می‌شود. نتایج نشان دهنده‌ی برتری چندلایه الیافی فلزی (GLARE) می‌باشد. جذب انرژی در حالت غشایی و خمشی توسط لایه‌های آلومینیم و همچنین مقاومت لایه- های کامپوزیتی در برابر رشد ترک که به دلیل پدیده‌ی پل زنی الیاف می- باشد، باعث افزایش مقاومت در برابر ضربه در چندلایه GLARE نسبت به نمونه‌های آلومینیمی شده است. همچنین به کمک نرم افزار آباکوس/ حل صریح، پدیده‌ی ضربه‌ی سرعت بالا شبیه‌سازی شده است. از معیارهای شکست برشی و کششی جهت مدل سازی آسیب نمونه‌ها استفاده شده است و تطابق قابل قبولی بین نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاهی حاصل شده است، به گونه‌ای که با توجه به جدول 7، درصد خطای حل عددی مربوط به نمونه‌های الیافی- فلزی به مقدار 2.7٪ بدست آمده است.

هدف اصلی ساخت چندلایه GLARE، جهت جایگزینی صفحات آلومینیمی می‌باشد. به گونه‌ای که انرژی نفوذ مخصوص آن نسبت به آلومینیم افزایش یافته است، یعنی نسبت به وزن خود انرژی بیشتری را در ضربه جذب می‌کند. مقدار انرژی نفوذ مخصوص بدست آمده از آزمایش ضربه در نمونه‌های الیافی- فلزی، 9.4 می‌باشد که با توجه به عدد 6.9 بدست آمده برای نمونه‌های آلومینیمی، افزایش 27٪ داشته است.

بهترین قسمت جذب انرژی در لایه‌ی آلومینیمی به واسطه‌ی خمش و تغییر شکل غشایی صورت می‌گیرد و هرچه لایه نازک‌تر باشد سهم جذب انرژی در حالت غشایی بیشتر است. در حل عددی، پارامتر تنش هیدرواستاتیک (σ_{cutoff}) مقدار تعریف شده و معینی ندارد و با توجه به شرایط

¹ Delamination

- [12] Guan, Z., Cantwell, W., Abdullah, R., "Numerical modeling of the impact response of fiber-metal laminates", *Polymer Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 603-611, 2009.
- [13] Pol, M. H., Liaghat, G., Hajiarazi, F., "Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation", *Journal of Composite Materials*, pp. 0021998312449768, 2012.
- [14] Raguraman, M., Deb, A., "Accurate prediction of projectile residual velocity for impact on single and multi-layered steel and aluminum plates", *9th international LS-DYNA Users Conference*, penetration and explosive modeling, pp: 2.37-2.48.
- [15] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.11, Dassault Systemes (2011).
- [16] Fatt, M. S. H., Lin, C., Revilock, D. M., Hopkins, D. A., "Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates", *Composite structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 73-88, 2003.
- [17] Sadighi, M., Pärnänen, T., Alderliesten, R., Sayeafabi, M., Benedictus, R., "Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates", *Applied Composite Materials*, Vol. 19, No. 3-4, pp. 545-559, 2012.
- [18] Song, S., Byun, Y., Ku, T., Song, W., Kim, J., Kang, B., "Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 327-332, 2010.
- [19] Seo, H., Hundley, J., Hahn, H., Yang, J.-M., "Numerical simulation of glass-fiber-reinforced aluminum laminates with diverse impact damage", *AIAA journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 676-687, 2010.

