



Investigation of Effect of Structural Parameters on High Velocity Impact Resistance of Fiber Metal Laminates

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khajeh Arzani H.¹ MSc,
Kabiri Ataabadi A.R.*² PhD,
Chaparian Y.¹ MSc

How to cite this article

Khajeh Arzani H, Kabiri Ataabadi A.R, Chaparian Y. Investigation of Effect of Structural Parameters on High Velocity Impact Resistance of Fiber Metal Laminates. Modares Mechanical Engineering, 2019;19 (6):1529-1538.

ABSTRACT

The preference of fiber-metal laminate over metal and composite has been proved in lots of researches. In the present study, the main goal is to investigate an idea for impact resistance improvement of fiber metal laminates under high-velocity impact by numerical analysis and experiment. Due to the existence of various types of mechanisms for dissipating kinetic energy of projectile in contact with the target, in this research, it has been concentrated on one of them and by adding a rubber layer into AL/GL/GL/AL laminate, it has been allowed more bending to the aluminum layer thereby offering higher dissipating kinetic energy and increased special perforation energy. Materials used in this study are 2024-T3 aluminum alloy, woven glass/epoxy prepreg and Nitrile butadiene rubber (NBR). All of the tests have been done by a high-speed gas gun in Tarbiat Modarres University and numerical analysis is done with Ls Dyna software. With numerical analysis, it is possible to achieve results such as contact force and different energies variations during the impact of the projectile with the target which cannot be achieved by experiment. The results show that by adding a rubber layer into the laminates, the aluminum layer bend more so more kinetic energy can be dissipated from the projectile. Hence, special perforation energy and ballistic velocity are increased effectively.

Keywords Fiber Metal Laminated; Perforation Resistances; Ballistic Velocity

¹Mechanical & Aerospace Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

²Mechanical Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran
Phone: -
Fax: -
a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

Article History

Received: May 18, 2018
Accepted: December 23, 2018
ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies [2] Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates [3] Experimental study on impact resistance properties of T300/epoxy composite laminates [4] Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates [5] Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings [6] Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates [7] Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates [8] On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile [9] Fibre metal laminates: An introduction [10] Low-velocity impact loading: On fibre reinforced aluminium laminates (ARALL and GLARE) and other aircraft sheet materials [11] Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation [12] The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates [13] Impact resistance of fiber-metal laminates: A review [14] Effect of lay-up orientation on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML beams

بررسی اثر پارامترهای ساختاری بر مقاومت به ضربه سرعت بالای چندلایه‌های الیافی-فلزی

حمید خواجه‌ارزانی MSC

گروه مکانیک و مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

عبدالرضا کبیری عطاءآبادی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

یوسف چهریان MSC

گروه مکانیک و مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده

در پژوهش‌های مختلف برتری چندلایه الیافی-فلزی نسبت به آلومینیوم و کامپوزیت تنها تحت بار ضربه‌ای با سرعت بالا به اثبات رسیده است. در پژوهش حاضر هدف اصلی بررسی ایده‌ای برای ارتقای مقاومت به ضربه چندلایه‌ای الیافی-فلزی تحت ضربه سرعت بالا با تحلیل عددی و آزمایش است. با توجه به وجود انواع مختلف مکانیزم‌های جذب انرژی جنبشی پرتابه توسط هدف، در این پژوهش بر یکی از آنها تمرکز شده و با اضافه کردن لایه لاستیک به منظور ایفا کردن نقش جاذب در چندلایه AL/GL/GL/AL به آلومینیوم اجازه خم شدن بیشتر داده می‌شود تا جذب انرژی جنبشی پرتابه بیشتر شود و انرژی نفوذ مخصوص افزایش یابد. مواد به کار برده شده در این پژوهش آلومینیوم 2024-T3، پیش‌آغشته شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده و لاستیک نیتریل بوتادین است. کلیه آزمایش‌ها با دستگاه تفنگ گازی آزمایشگاه ضربه دانشگاه تربیت مدرس تهران و حل عددی با نرم‌افزار المان محدود ال‌اس داینا انجام شده است. با استفاده از نتایج حل عددی می‌توان خروجی‌هایی مانند تغییرات نیروی تماسی و تغییرات انرژی‌های مختلف در طول برخورد پرتابه به هدف را استخراج نمود که از نتایج حاصل از آزمایش به دست نمی‌آید. نتایج نشان می‌دهد با اضافه کردن لایه لاستیک به چندلایه، آلومینیوم می‌تواند بیشتر خم شود. بنابراین انرژی جنبشی بیشتری از پرتابه جذب شده و انرژی نفوذ مخصوص و سرعت حد بالستیک به‌طور محسوس و موثری افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: چندلایه‌ای الیافی-فلزی، انرژی نفوذ مخصوص، سرعت حد بالستیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۸

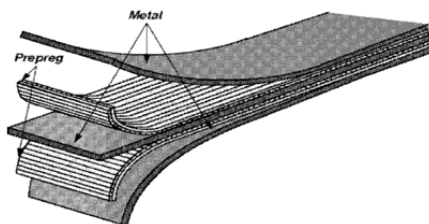
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

* نویسنده مسئول: a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

۱- مقدمه

چندلایه‌های الیافی-فلزی (FML) نوعی از کامپوزیت‌های هیبریدی هستند که شامل ورق‌های نازک فلزی و لایه‌های ازبیش‌آماده‌شده کامپوزیتی هستند و در طول سه دهه اخیر به علت کاربردهای آن در صنایع و به‌خصوص در صنعت هوافضا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بزرگ‌ترین مزیت چندلایه‌های فلزی دارا بودن خصوصیات کامپوزیت و فلز در یک ماده است. از بارزترین این خصوصیات می‌توان به مقاومت در برابر حرارت، نرخ رشد ترک پایین و مقاومت بالا به خستگی، مقاومت بالا در برابر ضربه، چگالی پایین، مقاومت به خوردگی، قابلیت عایق‌کاری و دمپر ارتعاشات اشاره کرد. این ماده در صنعت هوافضا در قسمت‌های مختلف بدنه هواپیما می‌تواند به کار رود؛ زیرا می‌تواند در ضربه ناشی از عوامل خارجی نظیر پرند، گلوله، تگرگ و غیره مقاومت خوبی از خود نشان دهد. دو نوع متداول چندلایه‌های الیافی-فلزی آرال و گلیر هستند. آرال متشکل از لایه فلزی آلومینیوم و لایه کامپوزیتی با الیاف آرامید و گلیر متشکل از لایه فلزی آلومینیوم و لایه کامپوزیتی با الیاف شیشه است. پژوهش‌های متعددی در مورد چندلایه‌های الیافی-فلزی با توجه به جنس لایه‌ها و نوع بارگذاری صورت گرفته است که تنها به چند مورد در حوزه ضربه سرعت بالا اشاره می‌شود. یعقوبی و همکاران^[1] رفتار گلیر ۵ را در ضربه سرعت بالا مطالعه کردند و نشان دادند که سرعت حد بالستیک با تغییر

ضخامت فلز به‌صورت یک روند پارابولیک تغییر می‌کند. هوفت و همکاران^[2] ضربه بالستیک روی چندلایه الیافی-فلزی گلیر را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک حل تحلیل براساس نتایج تست به‌منظور پیش‌بینی سرعت حد بالستیک و جذب انرژی گلیر تحت ضربه پرتابه تیتانیومی استوانه‌ای سرتخت ارائه دادند. ژائو و همکاران^[3] به‌صورت تجربی مقاومت به ضربه چندلایه T300/اپوکسی را بررسی کردند که با یک سرعت اولیه ثابت پرتابه و جهت‌گیری الیاف و لایه چینی ثابت هدف، در چندلایه‌های ضخیم‌تر انرژی بیشتری جذب می‌شود. همچنین با ثابت قراردادن ضخامت و سرعت، تأثیر لایه‌چینی را در میزان سرعت حد بالستیک مطالعه کردند. لیاو و همکاران^[4] آسیب ضربه سرعت پایین را روی آرال ۳ و انواع گلیر ۱، ۲ و ۳ بررسی کردند. آنها دریافتند که گلیر ۱ با لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تیرانس ضربه بیشتری در مقایسه با آرال ۳ با لایه کامپوزیتی آرامید/اپوکسی فراهم می‌کند. آنها همچنین دریافتند که گلیر ۳ با (۰/۹۰) از نوع عمود بر هم با لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی نسبت به گلیر ۲ با لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با الیاف تک‌جهته (O₂) مقاومت به ضربه بالاتری دارد. دانگ‌وولی و همکاران^[5] رفتار دو چندلایه‌ای الیافی-فلزی متشکل از لایه فلزی فولاد و لایه کامپوزیتی متفاوت که در یک نمونه الیاف کربن و در دیگری الیاف شیشه به کار رفته بود را تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق نشان دادند که چندلایه‌های الیافی-فلزی ساخته و طراحی شده توسط خودشان عملکرد بهتری در مقایسه با نوع معمول و رایج آن در مقابل ضربه دارد. همچنین رابطه جذب انرژی و طول ترک را مورد بررسی قرار دادند و علاوه بر این اثبات کردند که جهت‌گیری الیاف بر جهت ایجاد و رشد ترک به‌طور مستقیم تأثیرگذار است. انکوش شارما و همکاران^[6] توزیع لایه فلزی آلومینیومی در راستای ضخامت چندلایه الیافی-فلزی با لایه الیافی شیشه را تحت ضربه سرعت بالا مطالعه کردند. آنها مقاومت به ضربه این نمونه و تغییر شکل آن در حین و پس از برخورد و همچنین آسیب‌های داخلی را مشاهده و بررسی کردند. اکسین‌لی و همکاران^[7] دو نوع چندلایه الیافی-فلزی با لایه فلزی تیتانیوم و لایه‌های الیافی کربن و پلی‌اتیلن را تحت ضربه سرعت بالا مقایسه کردند. نتایج حاکی از آن بود که چندلایه با لایه الیافی پلی‌اتیلن مقاومت به ضربه بالاتری از خود نشان داد. مستوفی و همکاران^[8] از روابط امپیریکال برای بررسی پاسخ ضربه پرتابه صلب کروی روی هدف مونولیتیک و چندلایه در سرعت‌های مختلف استفاده کردند. آنها نشان دادند که نتایج حاصل از این روابط در تطابق خوبی با داده‌های حاصل از آزمایش است و می‌توان از روابط امپیریکال برای بررسی ضربه هم روی هدف تک‌لایه و هم چندلایه بهره برد (شکل ۱).



شکل ۱) شماتیک لایه‌چینی معمولی در چندلایه‌های الیافی-فلزی^[9]

۲- سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ مخصوص

این سرعت یکی از پارامترهای مهم در بررسی مقاومت به ضربه با سرعت بالا بوده و شامل سرعتی است که در آن، وقتی پرتابه به

به رطوبت و خوردگی مقاومت مناسبی دارد. با توجه به خواص انواع مختلف الیاف شیشه و همچنین الیاف شیشه استفاده شده در تحقیقات و مقالات دیگران، الیاف شیشه از نوع S2، بهترین خواص را از نظر ضربه‌پذیری و ساخت قطعات خواهند داشت [13]. به دلیل محدودیت در بازار، از نوع E به صورت بافته شده در ساخت قطعات این تحقیق استفاده شد. لاستیک NBR یا همان نیتربیل بوتادین، معمولاً در محصولات مانند شیلنگ‌های گازوییل، دیافراگم پمپ‌های سوخت، قطعات هیدرولیک، واش‌های روغن، در زمینه پوشش‌کاری، آب‌بندها و درزگیرها (نظیر او-رینگ‌ها) مصرف می‌شود. برای ساخت نمونه‌ها از این نوع لایه‌های لاستیک نیز استفاده شد. رزین‌های اپوکسی رایج‌ترین رزین‌های مورد استفاده هستند و بیشتر از دو سوم کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده شده در صنعت هوافضا بر پایه اپوکسی هستند. مقاومت شیمیایی عالی، خاصیت چسبندگی بسیار خوب به بسترهای مختلف، مقاومت کششی، فشاری و خمشی بالا، عایق عالی الکتریسیته، مقاومت حرارتی بالا و مقاومت بالا به خستگی از خواص رزین‌های اپوکسی است. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا سطح لایه‌های آلومینیومی به طور کامل تمیز می‌شود تا هر گونه آلودگی از روی سطح برطرف شود. پس از آن لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی مطابق با چیدمان و ترتیب از پیش طراحی شده در کنار هم قرار داده می‌شوند. در مرحله بعد نمونه در پرس گرم به حالت نهایی خود می‌رسد. لازم به ذکر است پرس گرم شامل فک بالایی متحرک، فک پایینی ثابت که نقش تکیه‌گاه را ایفا می‌کند، جک هیدرولیک و المنت حرارتی است. شکل ۲ نمونه‌ها را پیش از انجام تست نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمای کلی از نمونه‌ها قبل از انجام تست

۳-۱- دسته‌بندی نمونه‌ها برای انجام آزمایش

برای نظم بیشتر و امکان مقایسه، نمونه‌ها در دو سری مختلف قرار داده شده و هر کدام شامل چند نمونه یکسان می‌باشد. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به هر سری ذکر شده است. در ستون سوم از این جدول، لایه‌چینی نمونه‌های هر سری به نحوی نشان داده شده است که پرتابه از سمت راست برخورد می‌کند. ضخامت و چگالی سطح نشان‌داده شده با میانگین‌گیری از مقدار ضخامت و چگالی سطح همه نمونه‌ها به دست آمده است. سطح کلیه نمونه‌ها ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر است. چندلایه‌های الیافی- فلزی به سبب دارا بودن لایه‌های فلزی و کامپوزیتی می‌توانند در حالات متعددی قرار گیرند، زیرا با تغییر در نوع فلز، الیاف، رزین، نوع جهت‌گیری الیاف، تغییر در ضخامت هر لایه و غیره چندلایه‌های الیافی- فلزی جدیدی حاصل می‌شود. مکانیزم‌های جذب انرژی جنبشی پرتابه توسط چندلایه‌های الیافی- فلزی شامل تغییر فرم عمومی پتل شامل حرکت دینامیکی هدف و تغییر فرم‌های خمشی و غشائی

صورت قائم به هدفی برخورد می‌کند، تا ۵۰٪ احتمال نفوذ کامل آن در هدف 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. برای تعیین سرعت حد بالستیک در این پژوهش دو روش در نظر گرفته شده است که در بخش‌های زیر به آن پرداخته می‌شود.

۲-۱- روش انرژی جنبشی ثابت

پرتابه قبل از برخورد به هدف دارای سرعت ثابت و در نتیجه دارای انرژی جنبشی معینی است و سرعت آن قبل از برخورد تغییری نمی‌کند. پس از برخورد با فرض اینکه در هدف نفوذ می‌کند، با سرعت دیگری که کمتر از سرعت اولیه است از هدف دور می‌شود. بنابراین اگر اتلاف انرژی جنبشی در نظر گرفته نشود، می‌توان نوشت [10]:

(۱)

$$E_1 = E_2 + E_{\text{perforation}}$$

$$\frac{1}{2}mv_{BL}^2 = E_{\text{perforation}} = E_1 - E_2$$

$$v_{BL} = \sqrt{v_1^2 - v_2^2}$$

۲-۲- معادله لمبرت-جونز

داده‌های آزمایشگاهی می‌توانند با رگرسیون حداقل مربعات مطابق با معادله کلاسیک لمبرت-جونز منطبق شود [11]. برای مقدار سرعت باقیمانده بزرگ‌تر از صفر می‌توان نوشت:

(۲)

$$v_R^p = A(v_I^p - v_{50}^p) = Av_I^p - B$$

A و B دو ضریب رگرسیون و P توان است. v_I و v_R به ترتیب سرعت قبل از برخورد و سرعت باقیمانده هستند. v_{50} نیز سرعت حد بالستیک نام دارد. معادله بالا از اصل کار و انرژی برای ضربه بالستیک یک نفوذکننده صلب به دست آمده است.

با داشتن سرعت حد بالستیک و جرم پرتابه و جای‌گذاری آن در رابطه انرژی جنبشی می‌توان انرژی نفوذ را محاسبه نمود. این پارامتر حداقل مقدار انرژی لازم برای نفوذ در هدف است. برای مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌های مختلف با توجه به عدم یکسان بودن جنس و ضخامت، نمی‌توان از حداقل انرژی نفوذ استفاده کرد. بایستی مقدار چگالی سطح را برای هر نمونه محاسبه و مقدار حداقل انرژی نفوذ را بر آن تقسیم نمود. پارامتر حاصله انرژی نفوذ مخصوص نام دارد که به منظور مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌های با جنس و ضخامت مختلف به کار می‌رود. مقدار چگالی سطح از تقسیم جرم نمونه هدف بر سطح برخورد به دست می‌آید.

۳- تحلیل تجربی

لایه فلزی نمونه‌های مورد آزمایش از جنس آلومینیوم 2024-T3 است. این آلومینیوم آلیاژی بوده و مقداری مس همراه خود دارد. T3 مربوط به عملیات حرارتی برای افزایش استحکام و تنش نهایی و تسلیم است. با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه چندلایه‌های الیافی- فلزی، آلومینیوم 2024-T3 در میان انواع آلومینیوم بهترین عملکرد را در برابر ضربه داشته است [12]؛ بنابراین در این پژوهش نیز از همین آلیاژ استفاده شده است. یکی از متداول‌ترین الیاف در ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری الیاف شیشه است. خواص آن شامل استحکام بالا، قیمت پایین، مقاومت شیمیایی بالا و خواص خوب عایق‌کاری است و همچنین



شکل ۴) فشارسنج دیجیتال سیلندر و شیر سلنویید

با توجه به بالا بودن ضریب انبساط گاز هلیوم، معمولاً در دستگاه‌های تفنگ‌گازی از این گاز استفاده می‌شود. عواملی که در سرعت پرتابه قبل از برخورد به هدف دخیل‌اند شامل (۱) جرم پرتابه، (۲) فشار گاز مخزن، (۳) طول لوله و (۴) ضریب انبساط گاز داخل مخزن هستند.

نمونه‌ها در فیکسچر که شامل دو صفحه فولادی تو خالی است به‌طور مقید از هر چهار طرف قرار می‌گیرند. اندازه نمونه‌ها ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و فضای خالی در میان فیکسچرها نیز ۸۰×۸۰ میلی‌متر است. شکل ۵ قرارگیری نمونه در میان دو صفحه فیکسچر را نشان می‌دهد. سرعت‌سنج استفاده‌شده در آزمایش از نوع دیود لیزر است. سرعت ورودی پرتابه بعد از خروج از لوله تفنگ و قبل از برخورد به هدف توسط یک جفت لیزر و یک جفت دیود اندازه‌گیری می‌شود. دو لیزر در فاصله مشخص و ثابتی از هم قرار دارند و به یک شمارنده زمانی متصل هستند. با داشتن فاصله دو لیزر و زمان عبور پرتابه از لیزر اول به دوم می‌توان سرعت قبل از برخورد را به دست آورد. با توجه به این که پرتابه پس از برخورد ممکن است در همان مسیر مستقیم قبلی حرکت نکند یا اجزا کوچکی از هدف هم پرتاب شود، برای اندازه‌گیری سرعت خروجی از دو پرده دو بعدی موازی، که هر یک شامل ۸۰ عدد منبع نور لیزر و دیود حساس به نور در دو راستای افقی و عمودی هستند، برای تعیین موقعیت عبور پرتابه استفاده می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ دیود و لیزرهای به‌کاررفته برای اندازه‌گیری سرعت قبل و بعد از برخورد را نشان می‌دهد.



شکل ۵) محل قرارگیری هدف در فیکسچر



شکل ۶) سنسورهای اندازه‌گیری سرعت اولیه

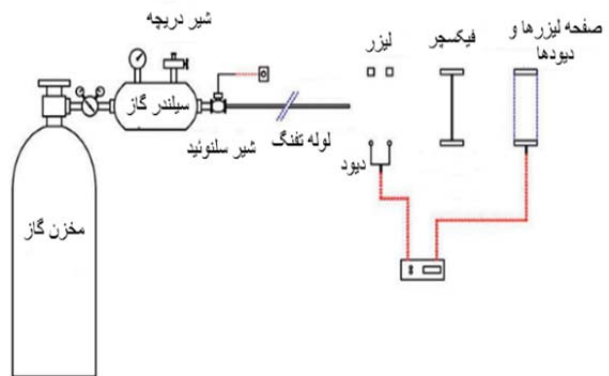
(کشیدگی) و کوپلینگ در آن، لایه‌شدگی در قسمت کامپوزیتی، جدایش میان قسمت کامپوزیتی و فلزی، شکست کششی در هر یک از قسمت‌ها، ایجاد پلاگ آلومینیم در قسمت جلویی پتل، شکل‌گیری پتال آلومینیم در قسمت پشتی پتل و غیره هستند. علت انتخاب این نوع لایه‌چینی در پژوهش حاضر این است که از میان مکانیزم‌های جذب انرژی جنبشی پرتابه توسط چندلایه ایفای-فلزی، فلزی، خمش لایه آلومینیومی سهم زیادی دارد^[۱]. از این رو فرض می‌شود اگر به آلومینیوم فضای بیشتری برای خم شدن داده شود می‌تواند انرژی بیشتری جذب کند. در راستای بررسی این فرضیه پس از مطالعات لازم، لایه لاستیک به‌عنوان یک ماده سبک و ارتجاع‌پذیر برای ایفای این نقش انتخاب شد. با توجه به اینکه مکان قرارگیری هر لایه در میزان جذب انرژی آن از انرژی جنبشی پرتابه تأثیرگذار است، در سری دوم لایه لاستیک در یک لایه مانده به آخر قرار داده شد. پرتابه استفاده‌شده در این پژوهش از نظر هندسی استوانه‌ای‌شکل، سر تخت و با قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر است. برای اینکه تیزبودن لبه‌ها اثری در برش هدف هنگام برخورد با هدف نداشته باشد، روی لبه‌ها راکورد کوچکی زده شده است.

جدول ۱) مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده

شماره	نوع ماده	لایه‌چینی	ضخامت (میلی‌متر)	چگالی سطح (کیلوگرم بر متر مربع)
سری ۱	گلیبر	AL/GL/GL/AL	۱/۰۱	۲/۴۱
سری ۲	گلیبر تقویت‌شده با لایه لاستیکی	AL/RUB/GL/GL/AL	۱/۳۷	۲/۷۸۷

۳-۲- روش انجام آزمایش

در این تحقیق از دستگاه تفنگ‌گازی برای شلیک پرتابه استفاده شد. اجزا اصلی این دستگاه شامل (۱) منبع گاز (۲) سیلندر گاز (۳) شیر دریچه، (۴) فشارسنج، (۵) شیر سلنویید، (۶) لوله تفنگ، (۷) سرعت‌سنج از نوع دیود و لیزر و (۸) فیکسچر هستند. شکل ۳ شماتیکی از دستگاه تفنگ‌گازی و سرعت‌سنج را نشان می‌دهد. پرتابه در ابتدای لوله تفنگ قرار گرفته و شیلنگ متصل به شیر سلنویید به لوله تفنگ متصل می‌شود. درون لوله تفنگ بدون خان است. گاز درون مخزن با فشردن دکمه مربوط به شلیک پرتابه، به یک‌باره پشت پرتابه تخلیه شده و باعث سرعت‌گرفتن آن می‌شود. شکل ۴ نمایی از فشارسنج، سیلندر و شیر سلنویید را نشان می‌دهد.



شکل ۳) شماتیک دستگاه تفنگ‌گازی پژوهش حاضر

است و با بیشتر شدن کرنش از این مقدار المان گسیخته و حذف می‌شود.

برای کامپوزیت شیشه E/اپوکسی تا نقطه شکست، رفتار خطی در نظر گرفته شده و پارامترهای مورد استفاده برای بیان خواص مکانیکی در این الگوی رفتاری ماده شامل چگالی، مدول‌های الاستیسیته، ضرایب پواسون و مدول‌های برشی هر لایه است (جدول ۳). برای این مدل معیار تخریب کرنش قابل تعریف بوده و هنگامی که کرنش ماده کامپوزیتی به مقدار مورد نظر برسد، المان مورد نظر حذف می‌شود.

لاستیک در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع NBR است. مدل ماده برای تعریف خصوصیات لاستیک مدل مونی-ریولین در نظر گرفته شده است (جدول ۴). این مدل ماده با الاستومر تراکم‌ناپذیر تا کرنش ۲۰۰٪ را می‌پذیرد.



شکل ۷) سنسورهای اندازه‌گیری سرعت باقیمانده

۴- تحلیل عددی

در این بخش نحوه شبیه‌سازی ضربه بالستیک روی نمونه‌های آزمایش شده به روش المان محدود در نرم‌افزار ال‌اس داینا آرایه می‌شود. نرم‌افزار ال‌اس داینا یکی از تخصصی‌ترین نرم‌افزارها برای مسایل کرنش بالا نظیر ضربه، انفجار است و در تحقیقات انجام شده در حوزه مرتبط با این پژوهش نیز از این نرم‌افزار بسیار استفاده شده است. مدل‌سازی هندسی و مش‌بندی با نرم‌افزار انسیس ورکبنچ صورت گرفته و دیگر خصوصیات نظیر تماس، خصوصیات ماده، سرعت پرتابه، شرایط مرزی و غیره در ال‌اس پری‌پست (زیرمجموعه ال‌اس داینا) تعریف شده است و در نهایت نیز از ال‌اس داینا به‌عنوان حلگر استفاده شده است. با توجه به فرم حجمی مدل، لازم است که مدل ایجاد شده به وسیله المان‌های حجمی مش‌بندی شود. بدین‌منظور المان حجمی هشت‌گانه مرتبه اول مورد استفاده قرار گرفت. برای هدف‌های تک‌لایه نیز نشان داده شده است که اگر از المان جامد استفاده شود، جواب دارای دقت بیشتری است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، مش‌ریزی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که المان‌های دورتر از محل اصابت پرتابه به هدف، درشت‌تر در نظر گرفته می‌شوند تا زمان انجام حل عددی کاهش یابد. همچنین برای یکسان بودن اثر ضربه بر لایه‌ها، مش تمام لایه‌ها یکسان زده شده است.

جدول ۲) پارامترهای مدل ماده برای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ρ	۲۷۷۰
ضریب پواسون	ν	۰/۳۴
مدول یانگ (Gpa)	E	۶۰/۷
حد تسلیم استاتیکی (Gpa)	A	۲۹۰
مدول سختی کرنش (Gpa)	B	۵۰۷/۶۰۰۰۱
توان سختی کرنش	n	۰/۴۷
نرخ کرنش	C	۰/۰۰۸۳
کرنش نهایی	ϵ_f	۰/۱۸

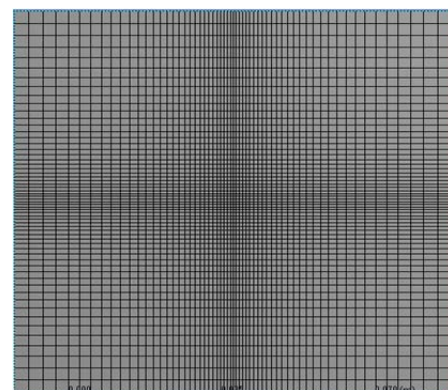
جدول ۳) پارامترهای مدل ماده بر کامپوزیت شیشه/اپوکسی (الیاف بافته شده)

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ρ	۲۰۴۰
ضریب پواسون	ν_{21}	۰/۰۹
ضریب پواسون	ν_{31}	۰/۳
ضریب پواسون	ν_{32}	۰/۳
مدول یانگ (Gpa)	E_1	۲۸
مدول یانگ (Gpa)	E_2	۲۸
مدول یانگ (Gpa)	E_3	۸
مدول برشی (Gpa)	G_{12}	۵/۳۲
مدول برشی (Gpa)	G_{23}	۴/۰۷
مدول برشی (Gpa)	G_{31}	۴/۰۷

جدول ۴) پارامترهای مدل ماده برای لاستیک NBR

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ρ	۱۳۲۰
ضریب پواسون	ν	۰/۴۹۹
ضریب ماده در معادله	A	۰/۸۴
ضریب ماده در معادله	B	۰/۳۸

از آنجایی که پیشانی گلوله پس از تماس با لایه‌های مختلف هدف اقدام به برش و یا حذف آنها خواهد نمود، تماس گلوله و هریک از لایه‌های هدف تعریف می‌شود. اگر تنش بین لایه‌ای (نرمال یا برشی) میان دو لایه مجاور از استحکام‌های نرمال یا برشی اتصال بیشتر شود، اتصال بین لایه‌ای تخریب می‌شود. لایه‌لایه‌شدگی بین لایه‌های کامپوزیت-کامپوزیت و آلومینیوم-کامپوزیت تحت معیار زیر صورت می‌گیرد. در رابطه زیر NFLS و SFLS به‌ترتیب استحکام نرمال و برشی است:



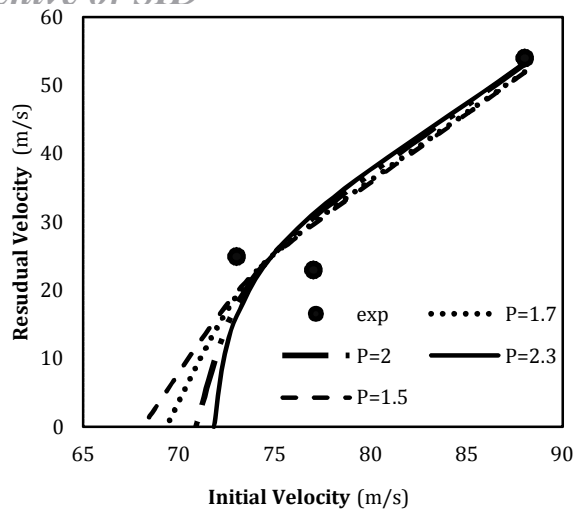
شکل ۸) مش‌ریزی سطح یک تک‌لایه

پرتابه هیچ‌گونه تغییر فرمی نداشته و صلب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به بالابودن نرخ کرنش در آلومینیوم از مدل ماده جانسون-کوک نیز برای مدل‌سازی این ماده استفاده می‌شود:

(۳)

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \epsilon^*)$$

خواص مکانیکی داده شده به این مدل شامل چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تنش تسلیم و حد تسلیم استاتیکی، مدول سختی کرنش، توان سختی کرنش، نرخ کرنش و کرنش نهایی است (جدول ۲). شرط تخریب در این مدل معیار کرنش



نمودار (۱) سرعت باقیمانده تجربی بر حسب سرعت اولیه نزدیک شده به معادله لمبرت-جونز با استفاده از مقادیر مختلف P برای سری اول نمونه‌ها

جدول (۷) پارامترهای معادله لمبرت-جونز

P	A	B	$v_{BL}(ms^{-1})$
۱/۵	۱/۴۱۴۲	۷۹۴/۶۴	۶۸/۰۹۳۶
۱/۶	۱/۳۱۴۷	۱۱۴۴	۶۸/۷۴۶۳
۱/۷	۱/۲۲۲۸	۱۶۴۷/۳	۶۹/۳۱۶۰
۱/۸	۱/۱۳۷۷	۲۳۷۲/۶	۶۹/۸۲۳۰
۱/۹	۱/۰۵۹۰	۳۴۱۸	۷۰/۲۲۱۱
۲	۱/۰۳۳۹	۵۱۹۱/۷	۷۰/۸۶۲۳
۲/۱	۰/۹۶۴۵	۷۴۹۲/۵	۷۱/۲۰۹۱
۲/۲	۰/۹۰۰۱	۱۰۸۱۶	۷۱/۵۲۲۷
۲/۳	۰/۸۴۰۴	۱۵۶۱۶	۷۱/۷۲۹۸
۲/۴	۰/۷۸۴۹	۲۲۵۵۴	۷۲/۰۵۶۱
۲/۵	۰/۷۳۳۴	۳۲۵۸۱	۷۲/۲۸۵۲

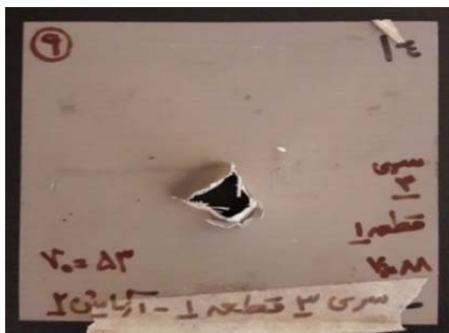
با میانگین‌گیری مقدار سرعت حد بالستیک به روش معادله لمبرت-جونز سرعت حد بالستیک میانگین عبارت است از:

$$v_{BL} = 70.5441ms^{-1}$$

در جدول ۸ انرژی نفوذ مخصوص سری اول محاسبه شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمای پشت و جلویی یکی از نمونه‌های سری اول را نشان می‌دهند.

جدول (۸) انرژی نفوذ مخصوص سری اول

سرعت حد بالستیک (متر بر ثانیه)	جرم پرتابه (گرم)	انرژی نفوذ (J)	چگالی سطح (کیلوگرم بر متر مربع)	انرژی نفوذ مخصوص $jm^2(kg)^{-1}$
۷۰/۵۴	۸/۹	۲۲/۱۴	۲/۴۱	۹/۱۹



شکل (۱۰) نمای پشت یکی از نمونه‌های سری اول پس از برخورد

$$\left[\frac{\sigma_n}{NFLS} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_s}{SFLS} \right]^2 \geq 1$$

برای جلوگیری از درهم فرورفتن لایه‌های مجاور و غیرمجاور و برای بیان مفهوم تماس میان سطح داخلی فیکسچر و سطح خارجی ورق‌های پوششی نیز الگوریتم تماس مورد استفاده قرار گرفته است.

۵- نتایج

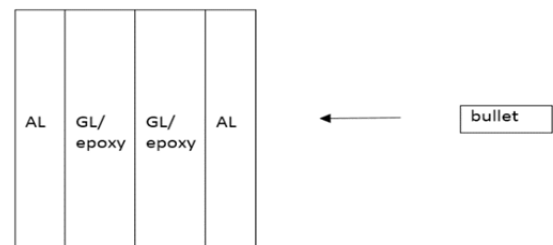
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی به تفکیک برای هر سری از نمونه‌ها ارائه می‌شود.

۱-۵ سری اول

شکل ۹ شماتیکی از برخورد پرتابه به نمونه‌های سری اول و جدول ۵ سرعت‌های قبل و بعد از برخورد پرتابه به هدف حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۶ سرعت حد بالستیک محاسبه شده از روش انرژی جنبشی ثابت را نشان می‌دهد. با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده، سرعت حد بالستیک برای این سری به دست می‌آید. ذکر این نکته لازم است که در تست شماره ۴ و ۵، پرتابه به ترتیب با سرعت‌های ورودی ۶۲ و ۶۷ به هدف برخورد کرده و هدف سوراخ نشده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که سرعت حد بالستیک قطعاً از ۶۷ بیشتر است. به همین دلیل از مقدار به دست آمده برای نمونه شماره ۳، در میانگین‌گیری صرف نظر می‌شود.

نمودار ۱ حاصل از منحنی‌های لمبرت-جونز را برای نمونه‌های تست شده نشان می‌دهد که برای واضح بودن چهار منحنی از میان یازده منحنی نمایش داده شده است. همچنین جدول ۷ مقدار سرعت‌های حد بالستیک به دست آمده از روش لمبرت-جونز را نشان می‌دهد.



شکل (۹) شماتیک برخورد پرتابه به نمونه‌های سری اول

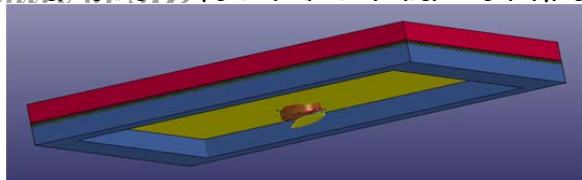
جدول (۵) نتایج آزمایشگاهی تست ضربه روی نمونه‌های سری اول

شماره	$v_i(ms^{-1})$	$v_o(ms^{-1})$
۱	۸۸	۵۳
۲	۷۷	۲۳
۳	۷۲	۳۱
۴	۶۲	-
۵	۶۷	-
۶	۷۳	۲۵

جدول (۶) سرعت حد بالستیک محاسبه شده هر نمونه به روش انرژی جنبشی ثابت

شماره	$v_{BL}(ms^{-1})$
۱	۷۰
۲	۷۴
۳	۶۵
۴	سوراخ نشد
۵	سوراخ نشد
۶	۶۹

$$v_{BL} = 71ms^{-1}$$



شکل ۱۲) نمای سه‌بعدی از شبیه‌سازی مدل المان محدود



شکل ۱۱) نمای جانبی یکی از نمونه‌های سری اول پس از برخورد

۲-۵- سری دوم

شکل ۱۳ شماتیک از برخورد پرتابه به نمونه‌های سری دوم و جدول ۹ سرعت‌های قبل و بعد از برخورد پرتابه به هدف حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ سرعت‌های حد بالستیک که از روش انرژی جنبشی ثابت به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. با میانگین‌گیری از مقادیر به‌دست‌آمده سرعت حد بالستیک برای این سری به‌دست می‌آید.

$$v_{BL} = 80.21(\text{ms}^{-1})$$

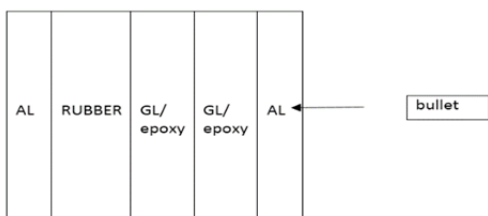
نمودار ۵ حاصل از منحنی‌های لمبرت- جونز را برای نمونه‌های تست‌شده نشان می‌دهد که برای واضح‌بودن چهار منحنی از میان یازده منحنی نمایش داده شده است. همچنین جدول ۱۱ مقدار سرعت‌های حد بالستیک به‌دست‌آمده از روش لمبرت- جونز را نشان می‌دهد.

با میانگین‌گیری سرعت حد بالستیک به روش لمبرت- جونز می‌شود:

$$v_{BL} = 80.4542(\text{ms}^{-1})$$

مقدار انرژی نفوذ مخصوص برای نمونه‌های سری دوم در جدول ۱۲ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به‌ترتیب نمای پشت و جانبی یکی از نمونه‌های سری دوم را نمایش می‌دهند.

در شکل ۱۶ نیز شکل تخریب‌شده نمونه در تحلیل عددی نشان داده شده است. نمودار سرعت-زمان پرتابه حاصل از حل عددی در نمودار ۶ نشان داده شده است. نمودارهای ۷ و ۸ به‌ترتیب تغییرات نیروی تماسی و انرژی را بر حسب تغییر زمان نشان می‌دهند.



شکل ۱۳) شماتیک برخورد پرتابه به نمونه‌های سری دوم؛ $v_{BL} = 80.21(\text{ms}^{-1})$

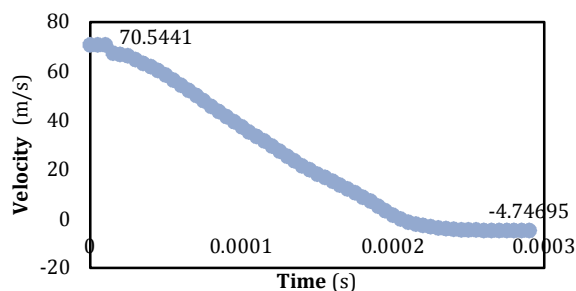
جدول ۹) نتایج آزمایشگاهی تست ضربه روی نمونه‌های سری دوم

شماره	$v_i (\text{ms}^{-1})$	$v_o (\text{ms}^{-1})$
۱	۱۱۰	۷۷
۲	۹۸	۵۰
۳	۹۱	۴۳
۴	-	-
۵	۹۳	۵۱

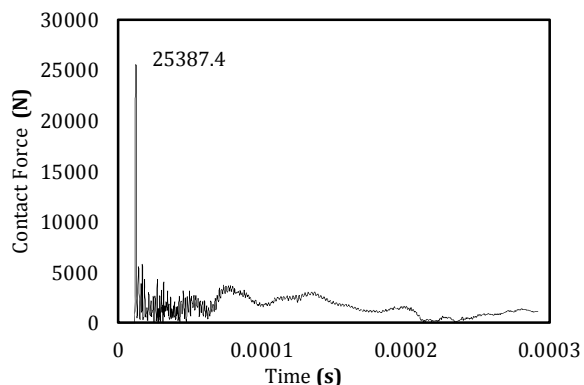
جدول ۱۰) سرعت حد بالستیک محاسبه‌شده به روش انرژی جنبشی ثابت

شماره	$v_{BL} (\text{ms}^{-1})$
۱	۷۸/۵۶
۲	۸۴/۲۹
۳	۸۰/۲۰
۴	-
۵	۷۷/۷۷

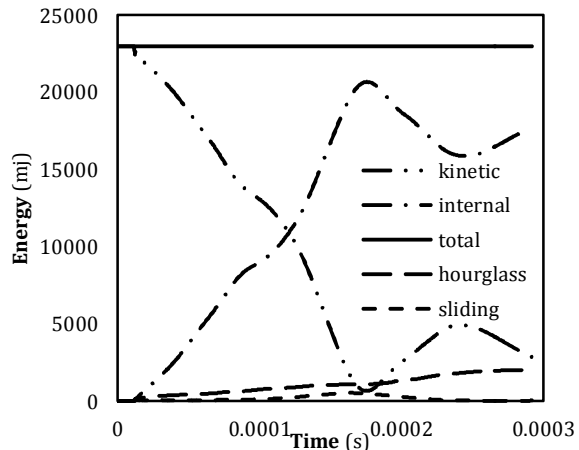
نمودار سرعت- زمان پرتابه حاصل از تحلیل عددی برخورد پرتابه با سرعت اولیه ۷۰/۵۴۴۱ متر بر ثانیه نیز در نمودار ۲ نشان داده شده است که در آن پرتابه پس از نفوذ در هدف به خاطر نیروی وارده بر آن از طرف هدف با سرعت ۴/۷ متر بر ثانیه باز می‌گردد. در نمودارهای ۳ و ۴ به‌ترتیب تغییرات نیروی تماسی و تغییرات انرژی‌های مختلف بر حسب زمان و در شکل ۱۲ شکل تخریب‌شده نمونه در تحلیل عددی نشان داده شده است.



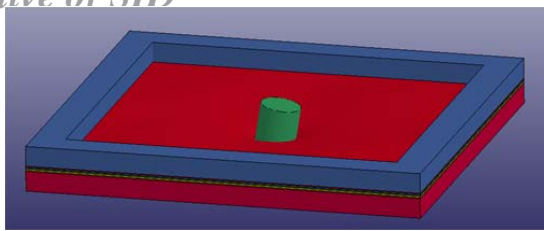
نمودار ۲) پیش‌بینی المان محدود تغییرات سرعت بر حسب زمان برای سری اول



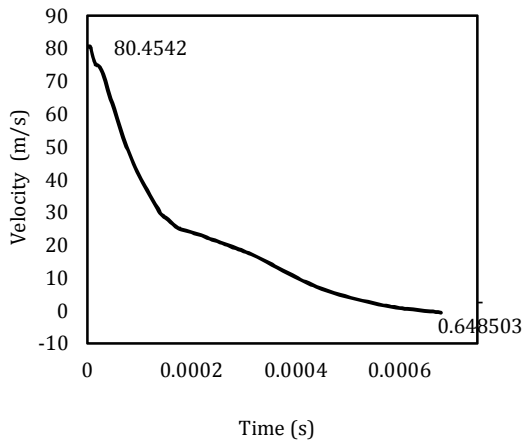
نمودار ۳) پیش‌بینی المان محدود تغییرات نیروی تماسی بر حسب زمان برای نمونه‌های سری اول



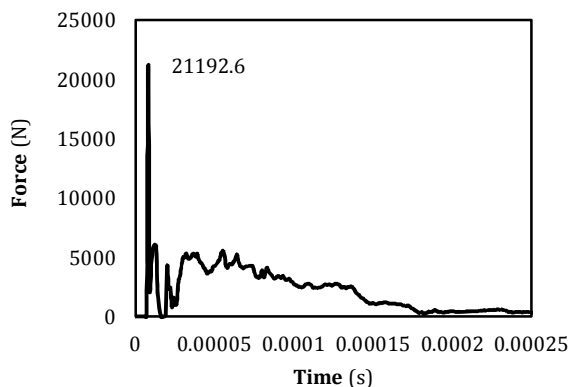
نمودار ۴) پیش‌بینی المان محدود تغییرات انرژی بر حسب زمان برای نمونه‌های سری اول در سرعت حد بالستیک



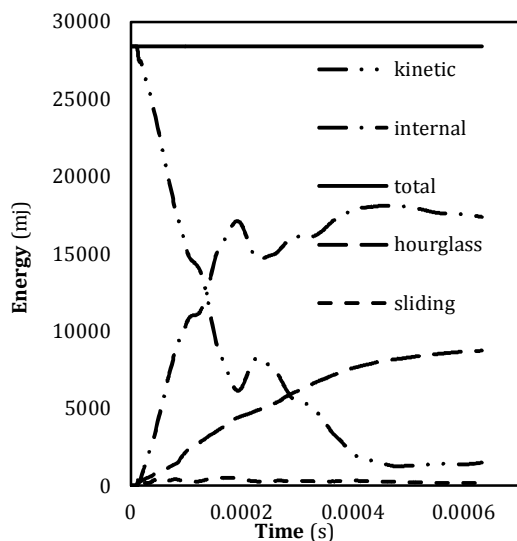
شکل ۱۶) نمای سه بعدی از شبیه‌سازی مدل المان محدود



نمودار ۶) پیش‌بینی المان محدود تغییرات سرعت بر حسب زمان برای سری دوم

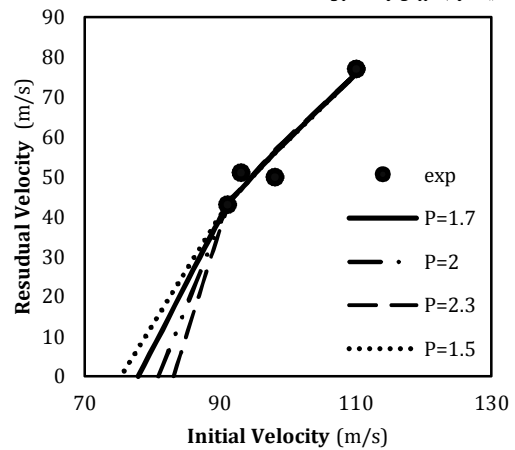


نمودار ۷) پیش‌بینی المان محدود تغییرات نیروی تماسی بر حسب زمان برای سری دوم



نمودار ۸) پیش‌بینی المان محدود تغییرات انرژی بر حسب زمان برای سری دوم

دوره ۱۹، شماره ۶، خرداد ۱۳۹۸



نمودار ۵) سرعت باقیمانده تجربی بر حسب سرعت اولیه نزدیک شده به معادله لمبرت - چونز با استفاده از مقادیر مختلف P برای سری دوم نمونه‌ها

جدول ۱) پارامترهای معادله لمبرت-چونز

P	A	B	$v_{BL} (ms^{-1})$
۱/۵	۱/۳۱۶۵	۸۶۱/۰۳	۷۵/۳۴۶۸
۱/۶	۱/۲۵۳۴	۱۲۹۹/۵	۷۶/۷۰۱۵
۱/۷	۱/۱۹۳۷	۱۹۶۱/۴	۷۷/۹۰۶۰
۱/۸	۱/۱۳۷۰	۲۹۶۱	۷۸/۹۹۴۹
۱/۹	۱/۰۸۳۲	۴۴۷۰/۴	۷۹/۹۷۷۴
۲	۱/۰۳۲۲	۶۷۵۰	۸۰/۸۶۶۷
۲/۱	۰/۹۸۳۸	۱۰۱۹۳	۸۱/۶۷۵۷
۲/۲	۰/۹۳۷۹	۱۵۳۹۵	۸۲/۴۱۵۸
۲/۳	۰/۸۹۴۲	۲۳۲۵۳	۸۳/۰۹۶۸
۲/۴	۰/۸۵۲۸	۳۵۱۲۷	۸۳/۷۲۰۳
۲/۵	۰/۸۱۳۵	۵۳۰۷۰	۸۴/۲۹۴۰

جدول ۱۲) انرژی نفوذ مخصوص سری سوم

سرعت حد بالستیک (ms^{-1})	جرم پرتابه (گرم)	انرژی نفوذ (j)	چگالی سطح (کیلوگرم بر مترمربع)	انرژی نفوذ مخصوص ($jm^2 (kg)^{-1}$)
۸۰/۴۵۴۲	۸/۹	۲۸/۸۰	۲/۷۸۷	۱۰/۳۴



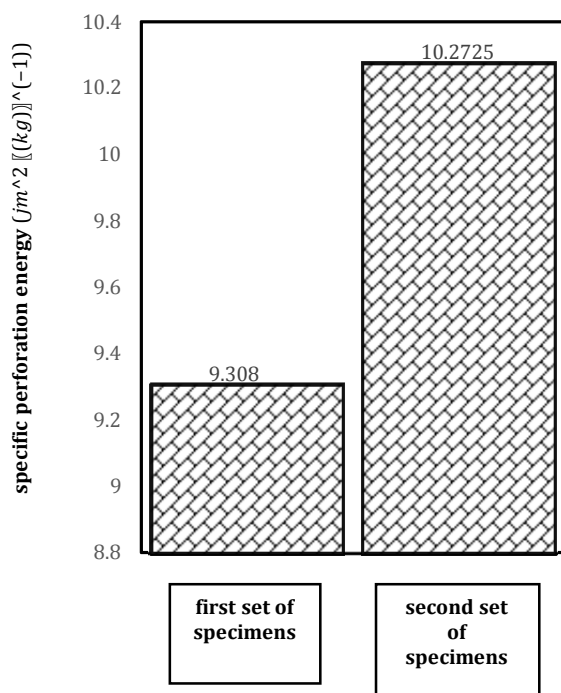
شکل ۱۴) نمای پشت یکی از نمونه‌های سری دوم پس از برخورد



شکل ۱۵) نمای جانبی یکی از نمونه‌های سری دوم پس از برخورد

عقب هل داده می‌شود این پدیده باعث به وجود آمدن پلاگ می‌شود. شعاع پلاگ نیز به سرعت ورودی وابسته است. شیب اولیه در نمودار نیروی تماسی بر حسب زمان به عنوان استحکام تماسی شناخته می‌شود. نکته دیگری که مهم به شمار می‌آید این است که مقدار نیروی تماسی پس از رسیدن به صفر دوباره به مقادیر بالاتر رفته و دوباره صفر شده است. علت آن وجود نیروی مقاوم اصطکاکی بین پرتابه و نمونه است.

در نمونه‌های سری دوم علاوه بر وجود لایه آلومینیوم و کامپوزیتی، لایه لاستیکی نیز وجود دارد. وجود لایه لاستیکی به مکانیزم‌های جذب انرژی موجود اجازه می‌دهد تا انرژی بیشتری از انرژی جنبشی پرتابه جذب شده و مقاومت به ضربه کل چندلایه بسیار بالا رود. یکی از مکانیزم‌های جذب انرژی خمش آلومینیوم است که نقش بیش‌تری نسبت به سایر مکانیزم‌ها دارد. در چندلایه‌ای‌های الیافی- فلزی رایج پس از لایه آلومینیوم بلافاصله از یک یا چندلایه کامپوزیتی استفاده می‌شود. از این جهت به نظر می‌رسد که اگر لایه لاستیک در چندلایه قرار گیرد که نقش یک دمپر را داشته باشد و به آلومینیوم اجازه خم شدن بیشتر بدهد، انرژی جنبشی بیشتری از پرتابه گرفته می‌شود، بنابراین مقاومت به ضربه کل چندلایه افزایش می‌یابد. با آزمایش‌های انجام شده این فرضیه اثبات شد و انرژی نفوذ مخصوص و سرعت حد بالستیک به‌طور محسوس و موثری افزایش یافت (نمودار ۹).



نمودار ۹) مقایسه انرژی نفوذ مخصوص دو سری نمونه‌های تست شده

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: حمید خواجه‌ارزانی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳/۴٪)؛ عبدالرضا کبیری عطاآبادی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)؛ یوسف چپریمان (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)

در چندلایه‌های الیافی- فلزی هم لایه‌های کامپوزیتی و هم لایه‌های فلزی وجود دارند، بنابراین آسیب‌های معمول در کامپوزیت که شامل ترک ماتریس، شکست الیاف، تغییر راستای الیاف، بیرون آمدن الیاف و لایه‌لایه‌شدگی هستند در چندلایه‌های الیافی- فلزی نیز به خاطر وجود لایه‌های کامپوزیتی دیده می‌شوند. آسیب‌های موجود در آلومینیوم نیز شامل بالگینگ، پتالینگ و پلاگینگ (که با برش ایجاد می‌شود) است. یکی از جنبه‌هایی که این چندلایه‌ها را منحصر به فرد کرده وجود هر دو نوع لایه‌های فلزی و کامپوزیتی است. از این رو علاوه بر آسیب‌های ذکر شده برای کامپوزیت و آلومینیوم، مکانیزم خرابی دیگری را نیز می‌توان بیان نمود که شامل آسیب سطحی بین آلومینیوم و پیش‌آغشته شیشه/اپوکسی است. تغییر شکل پلاستیک تنها در لایه‌های آلومینیومی ایجاد می‌شود و نازک شدن لایه‌های آلومینیومی نتیجه کشش و عبور از حد تسلیم است [12]. کشش ایجاد شده در لایه‌های آلومینیومی یکی از مکانیزم‌های جذب انرژی است و همین‌طور خرابی بین لایه‌های آلومینیومی و پیش‌آغشته‌های شیشه اپوکسی که از دو جنس متفاوت هستند، به عنوان لایه‌شدگی بین فلز و کامپوزیت دیگر مکانیزم جذب انرژی است. در کل میان مکانیزم‌های جذب انرژی موجود دو لایه‌شدگی وجود دارد. (۱) لایه‌شدگی میان لایه‌های کامپوزیت، (۲) لایه‌شدگی بین لایه‌های فلز و کامپوزیت. در تحقیقات انجام شده، بیان شده که لایه‌شدگی بین آلومینیوم و کامپوزیت و خم شدن لایه آلومینیومی یا تغییر شکل غشایی آن بیشترین سهم را در جذب انرژی جنبشی پرتابه دارند [14] هر چه لایه‌ها نازک‌تر باشند، تغییر شکل غشایی بهتری صورت می‌گیرد و هر چه تعداد لایه‌ها بیشتر باشد، سهم جذب انرژی لایه‌شدگی بیشتر است. باقی‌مانده جذب انرژی توسط شکست الیاف و ماتریس و غیره انجام می‌گیرد. نکته دیگر اینکه در تمامی شکست‌ها در لایه آلومینیومی جلویی، ضربه به صورت پلاگ بوده و تغییر شکل پلاستیک بسیار کمی به صورت موضعی در محدوده ضربه دیده می‌شود که ناشی از تغییر شکل غشایی لایه است. علت این امر را می‌توان در سرعت بالا و سرتخت بودن پرتابه جست‌وجو کرد. همچنین به دلیل مقاومت برشی پایین ورق‌های آلومینیوم، قبل از این که فشار ناشی از ضربه پرتابه و موج تنش ایجاد شده در لایه جلویی پخش شود، در لبه پرتابه و روی لایه آلومینیوم جلویی، شکست برشی رخ می‌دهد.

تغییرات نیروی تماسی بین پرتابه و هدف با انجام آزمایش ضربه و برخورد پرتابه به صفحه هدف به دست نمی‌آید در صورتی که در مدل المان محدود می‌توان روند تغییرات نیروی تماسی ایجاد شده بین پرتابه و هدف از لحظه برخورد و آغاز نفوذ تا خروج از پشت پنل را مشاهده کرد. در ادامه نمودار نیروی تماسی ذکر شده است. از آنجایی که سرعت حد بالستیک برای یک نمونه ثابت بوده، انرژی مقاومت در برابر نفوذ نیز ثابت است. هنگامی که پرتابه به هدف نفوذ می‌کند، ماده را به سمت عقب هل می‌دهد. عقب‌راندن هدف باعث کاسته شدن سرعت پرتابه می‌شود. در واقع زمان کافی برای ایجاد و رشد آسیب در هدف وجود دارد و نیروی مقاومت به نفوذ تا زمانی که پرتابه در هدف نفوذ کند افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالا (بالاتر از سرعت حد بالستیک) از آنجایی که زمان کافی برای رشد آسیب در هدف وجود ندارد آسیب ایجاد شده در هدف به صورت محلی می‌ماند یعنی از حول نقطه برخورد فاصله نمی‌گیرد. علاوه بر این در سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک به علت تنش‌های بزرگ‌تر در نقطه ضربه، مواد در اطراف محیط پرتابه بریده شده و به

منابع

- 8- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Structures*. 2017;112:118-124.
- 9- Vlot A, Gunnink JW, editors. *Fibre metal laminates: An introduction*. Berlin: Springer Science & Business Media; 2011.
- 10- Vlot A. Low-velocity impact loading: On fibre reinforced aluminium laminates (ARALL and GLARE) and other aircraft sheet materials [Internet]. Delft: Delft University of Technology; 1993 [cited 15 Jan 2018]. Available from: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:9200a03f-00ab-4c90-8e38-20748dd5fde0>
- 11- Lambert JP, Jonas GH. Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation [Internet]. Aberdeen: Ballistic Research Laboratory; 1976 [cited 10 Jan 2018].
- 12- Abdullah MR, Cantwell WJ. The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates. *Composites Science and Technology*. 2006;66(11-12):1682-1693.
- 13- Sadighi M, Alderliesten RC, Benedictus R. Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*. 2012;49:77-90.
- 14- Seyed Yaghoubi A, Liaw B. Effect of lay-up orientation on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML beams. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;54:138-148.
- 1- Seyed Yaghoubi A, Liaw B. Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies. *Composite Structures*. 2012;94(8):2585-2598.
- 2- Hoo Fatt MS, Lin C, Revilock Jr DM, Hopkins DA. Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates. *Composite Structures*. 2003;61(1-2):73-88.
- 3- Zhao G, Cho Ch, Lu Sh, Wang Z. Experimental study on impact resistance properties of T300/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials*. 2010;44(7):857-870.
- 4- Liu Y, Liaw B. Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates. *Applied Composite Materials*. 2010;17(1):43-62.
- 5- Lee DW, Park BJ, Park SY, Choi CH, Song JI. Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings. *Composite Structures*. 2018;189:61-69.
- 6- Sharma AP, Khan SH. Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates. *Polymer Testing*. 2018;70:320-347.
- 7- Li X, Zhang X, Guo Y, Shim VP, Yang J, Chai GB. Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;114:32-42.