



بررسی تحلیلی رفتار بالستیک ورق‌های نازک کامپوزیتی چندلایه براساس معیارهای سای- هیل و کرنش ماکزیمم

رضامحمدی پور¹، احسان زمانی^{2*}، محمدحسین پل³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* شهرکرد، صندوق پستی 115، zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 اسفند 1395

پذیرش: 28 فروردین 1396

ارائه در سایت: 30 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

رفتار بالستیک

مواد کامپوزیت

سای- هیل

کرنش ماکزیمم

چکیده

در این مقاله یک مدل تحلیلی دوبعدی برای پیش‌بینی رفتار بالستیک ورق‌های نازک کامپوزیتی چندلایه براساس معیارهای سای- هیل و کرنش ماکزیمم معرفی شده است. در ابتدا با استفاده از تعیین تابع تغییرشکل لحظه‌ای ورق کامپوزیت همراه با انتشار موج عرضی از نقطه برخورد، کرنش‌ها و تنش‌های غیرخطی در ورق محاسبه می‌شود. سپس انرژی جذب‌شده توسط هر یک از مودهای شکست و تغییرشکل بالستیک ورق کامپوزیت از جمله انرژی تغییرشکل بالستیک، انرژی شکست کششی طولی و عرضی، انرژی جنبشی حرکت محلی، انرژی ورقه‌ورقه شدن و ترک‌خوردگی ماتریس محاسبه می‌گردد. برای بررسی شکست لایه‌های مختلف ورق کامپوزیت هنگام نفوذ پرتابه از معیارهای سای- هیل و کرنش ماکزیمم استفاده می‌شود، همچنین اثر نرخ کرنش روی خواص مکانیکی لایه‌های ورق کامپوزیتی به صورت لحظه‌ای هنگام فرایند نفوذ اعمال شده است. در نهایت نتایج مدل تحلیلی حاضر براساس معیارهای سای- هیل و کرنش ماکزیمم با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد معیار کرنش ماکزیمم تطابق بسیار خوبی نسبت به معیار سای- هیل در محاسبه سرعت حد بالستیک از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج سهم انرژی شکست در مقایسه با انرژی تغییر شکل بالستیک با افزایش ضخامت بیشتر می‌شود. به ترتیب انرژی جنبشی حرکت محلی ورق، لایه‌لایه شدن و ترک‌خوردگی ماتریس سهم کمتری نسبت به انرژی‌های شکست و انرژی تغییرشکل بالستیک در فرایند جذب انرژی دارند.

Analytical study on the ballistic behavior of thin laminated composite plates based on Tsai-Hill and maximum strain criterions

Reza Mohamadipoor¹, Ehsan Zamani^{1*}, Mohammad Hossein Pol³

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

* P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 February 2017

Accepted 17 April 2017

Available Online 20 May 2017

Keywords:

Ballistic behavior

Composite material

Tsai-Hill

maximum strain

ABSTRACT

In this paper, a 2D analytical model is introduced for predicting the ballistic behavior of the thin laminated composite plate based on Tsai-Hill and maximum strain criterions. At first, by using the determination of the moment deformation function along with the expansion of transverse wave from impact point, the nonlinear strains and stresses in the composite plate are calculated. Then, the energy absorbed due to failure modes and deflection of composite plate such as elastic deformation energy, longitudinal and lateral fracture energy, kinetic energy of local movement, delamination and matrix cracking, energy is calculated. For investigation of the various failed layers Tsai-Hill and maximum strain criterions are used. In addition to the effects of strain rate is applied momentarily on the mechanical properties of the composite layers during Penetration process. Finally, the present analytical model based on Tsai-Hill and maximum strain criterions is compared with experimental results. The results show that maximum strain criterion with respect to Tsai-Hill criterion has good agreement with experimental results in the calculation of ballistic limit velocity. According to the obtained results the share of fracture energy compared to the elastic deformation energy by increasing the thickness becomes more and more. Also, the kinetic energy of the local movement, delamination and matrix cracking energy have lower share with respect to fracture and elastic deformation energies in the process of energy absorption.

1- مقدمه

مناسب به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای مهندسی به‌ویژه سازه‌های وسایل نقلیه نظامی، دریایی و هوا فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. اغلب اوقات سازه‌های نظامی در معرض آسیب‌هایی ناشی از پرتابه با سرعت بالا و

در چند دهه گذشته مواد مرکب به دلیل مزایایی چون استحکام و سختی به وزن بالا، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و به‌ویژه خواص ضربه‌ای

Please cite this article using:

R. Mohamadipoor, E. Zamani, M. H. Pol, Analytical study on the ballistic behavior of thin laminated composite plates based on Tsai-Hill and maximum strain criterions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 41-50, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پرداختند. سانچز و همکاران [15] با فرمول‌بندی بدون بعد، یک مدل تحلیلی توسعه دادند تا به مطالعه رفتار بالستیک صفحات کامپوزیت چندلایه ساخته شده از الیاف شیشه بپردازند. آن‌ها تأثیر دو نسبت بدون بعد (نسبت هندسه و تراکم) در سرعت حد بالستیک، زمان تماس و مکانیزم جذب انرژی را مورد بررسی قرار دادند. جودیو و همکاران [16] لیستی از مراجع را برای محققان و مهندسان آینده در زمینه سازه‌های کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالا فراهم کردند.

در این مقاله سعی بر ارائه یک مدل تحلیلی دوبعدی به کمک محاسبه تغییرشکل، کرنش و تنش‌های غیرخطی در ورق‌های نازک کامپوزیتی چندلایه تحت برخورد بالستیک شده است، همچنین دو معیار شکست سای-هیل و کرنش ماکزیمم برای بررسی شکست لایه‌های مختلف هدف در حین فرایند نفوذ پرتابه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتها میزان انرژی‌های جذب‌شده و سرعت خروجی پرتابه با نتایج تجربی و تحلیلی سایر محققین مقایسه می‌شود.

2- مدل تحلیلی

نظریه‌های مختلفی برای توضیح مقاومت اهداف کامپوزیت در برابر نفوذ پرتابه ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله به طور کلی مدل‌های تحلیلی پیشنهاد شده به کمک برخی از مفروضات و تعاریف اساسی و تقریب‌ها ساده‌سازی شده‌اند.

در تحقیق حاضر در ابتدا کل مدت زمان برخورد به جزءهای زمانی کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود و سپس پیش‌فرض‌های اساسی و ساده‌کننده‌ای برای استخراج روابط مدل تحلیلی جهت بررسی تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرضیات عبارتند از:

- پرتابه صلب بوده و در طول ضربه بدون تغییر باقی می‌ماند.
- سرعت پرتابه در هر فاصله زمانی ثابت بوده و سرعت پرتابه در فاصله زمانی اول با سرعت اولیه از پرتابه برابر است.
- انرژی جذب‌شده توسط محدوده شکست پس از شکست ثابت باقی می‌ماند.
- تغییرشکل‌های درون صفحه‌ای² در مقایسه با تغییرشکل‌های عرضی یا خیز ورق کامپوزیتی قابل صرف‌نظر است.
- انرژی کرنشی ذخیره‌شده با مجموع انرژی کرنشی خمشی و غشایی برابر که تابعی از تغییرشکل‌های عرضی و کرنش‌های غیرخطی ون کارمن است.
- پرتابه و مخروط تشکیل شده در پشت هدف با سرعت یکسان و برابر سرعت انتهای بازه t -ام در حال حرکت هستند و در پایان هر بازه زمانی سرعت مرحله بعد دست می‌آید.

در این پژوهش در طی فرایند نفوذ چهار ناحیه برای ورق در نظر گرفته می‌شود شکل 1.

- محدوده شکست³ که دقیقاً در زیر پرتابه و به اندازه قطر پرتابه است و نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را ایجاد می‌کند. شکست تمامی لایه‌های ورق کامپوزیت به منزله نفوذ کامل پرتابه در هدف است.
- به جز محدوده شکست، سایر بخش‌های ورق کامپوزیت با توجه به گسترش موج عرضی به دو بخش محدوده الاستیک⁴ و محدوده تغییر شکل نیافته⁵ تقسیم‌بندی می‌شود. فاصله بین محدوده شکست تا شعاع گسترش موج عرضی محدوده الاستیک نام‌گذاری می‌شود و مقداری از انرژی پرتابه را در

سلاح‌های گرم کوچک است؛ بنابراین بخش قابل توجهی از تحقیقات تجربی و نظری بر پاسخ ضربه بالستیک ورق‌های کامپوزیتی چند لایه جهت تعیین مکانیزم‌های خرابی و جذب انرژی متمرکز شده است [1]. در این میان می‌توان به مدل‌های تحلیلی مینس [2]، موریه [3]، نایک [4] و پل [5] برای مواد مرکب بافته‌شده دو بعدی اشاره کرد.

در مدل مینس [2] سه مکانیزم اصلی جذب انرژی تحت عناوین نفوذ موضعی، ورقه‌ورقه شدن و اصطکاک بین پرتابه و هدف در نظر گرفته می‌شود و از انرژی تغییر مکان کلی هدف صرف نظر کرده است. در مدل موریه [3] ناحیه شکست به دو بخش الیاف اولیه و الیاف ثانویه تقسیم‌بندی شده و سه مکانیزم جذب انرژی تحت عناوین شکست الیاف اولیه، تغییرشکل الیاف ثانویه و انتقال انرژی جنبشی به صفحه هدف در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف ساخته شده از ورق‌های نازک، نایک و پل [5,4]، مکانیزم‌های جذب انرژی مختلفی مانند شکست کششی الیاف، تغییر شکل الیاف ثانویه، انرژی جنبشی مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف، ورقه‌ورقه شدن ماده مرکب و ترک خوردن ماتریس در طی فرایند نفوذ را در نظر گرفتند. کانتول و مورتون نشان دادند که انرژی جذب‌شده توسط شکست کششی الیاف اولیه در مواد مرکب ساخته‌شده با الیاف شیشه و کربن مقدار کمتری نسبت به انرژی جذب‌شده توسط الیاف ثانویه دارد [6]. مهربانی یگانه و همکاران [7] تأثیر هندسه نفوذکننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت لایه‌ای شیشه/ اپوکسی با الیاف بافته شده، میزان جذب انرژی، نیروی تماسی، مکانیزم‌های گسیختگی و نیروی اصطکاک را برای نفوذکننده‌های مختلف به شکل تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. چپردار و واحدی [8] نفوذ پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلز- کامپوزیت با هدف به‌دست‌آوردن یک مدل تحلیلی مناسب برای سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک را بررسی کردند. شیئر و همکاران [9] اثر امواج خمشی ناشی از ضربه سرعت بالا بر سازه‌های کامپوزیتی هواپیما را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند امواج خمشی تولید شده منجر به آسیب‌های شدید در هر لایه و بین لایه‌های مجاور در ساختار سازه می‌شود. یزدانی‌نژاد و همکاران [10] به بررسی استراتژی‌های مختلف مدل‌سازی برای شناسایی رویکرد مناسب جهت مدل‌سازی پاسخ ضربه سرعت پایین پانل‌های کامپوزیتی چند لایه پرداختند. صبوری و همکاران [11] به بررسی تجربی نفوذ پرتابه‌های سر تخت در اهداف آلومینیوم- کامپوزیت پرداختند. آن‌ها به کمک نرم‌افزار ال.اس.داین¹، ورقه‌ورقه شدن و شکست لایه‌های مختلف کامپوزیتی هدف را به خوبی مدل‌سازی کردند. نایک و همکاران [12,4] با در نظر گرفتن مؤلفه‌های جذب انرژی ارائه شده توسط محققین دیگر بر پایه تقسیم مدت زمان نفوذ به مؤلفه‌های کوچک و محاسبه انرژی جذب‌شده توسط هر یک از این مکانیزم‌ها در طول مدت هر یک از این جزءهای زمانی، مدل تئوری خود را معرفی کردند. پل و لیاقت [13,5] با اصلاح روابط این تئوری، فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در اهداف مواد مرکب و مواد مرکب‌های تقویت شده با نانو ذرات رس را با دقت بالاتری تخمین زدند. آن‌ها با تصحیح روابط نشان دادند که مقدار جذب انرژی الیاف اولیه از انرژی مخروط شکل گرفته در پشت صفحه هدف بسیار بیشتر است و همچنین تغییرات سرعت تمام نقاط مختلف سطح مقطع مخروط شکل گرفته با سرعت لحظه‌ای پرتابه یکسان نیست. بالاگانش و همکاران [14] هم با برابر قرار دادن عرض الیاف با قطر پرتابه در روابط مدل نیک و همکاران به محاسبه سرعت حد بالستیک

² In-Plane Deformation

³ Fracture region

⁴ Elastic region

⁵ Undeformed region

¹ Ls-dyna

$$C_t = \sqrt{\frac{(1 + \varepsilon_p)\sigma_p}{\rho}} - \int_0^{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)} d\varepsilon \quad (4)$$

در فاصله زمانی i -ام، فاصله طی شده توسط موج عرضی و موج طولی به ترتیب برابر رابطه (5) است [5].

$$rt_i = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{tn} \Delta t$$

$$rl_i = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{ln} \Delta t \quad (5)$$

هنگامی که کرنش در هر لایه به ماکزیمم مقدار خود یعنی کرنش شکست می‌رسد آن لایه حذف می‌شود و پرتابه با لایه بعدی برخورد می‌کند تا به لایه آخر می‌رسد. با توجه به تغییرات کرنش در لایه‌های مختلف و استفاده از روابط (5-3) سرعت و شعاع موج‌های الاستیک طولی و عرضی در هر لایه متفاوت است.

3-2- تعیین خیز، کرنش‌ها و تنش‌های غیرخطی

برای محاسبه خیز، کرنش‌ها و تنش‌های غیرخطی در محدوده الاستیک از تغییر شکل یک ورق کامپوزیتی متقارن کاملاً گیردار تحت بار متمرکز در حالت استاتیک استفاده می‌شود (شکل 3). در این مقاله از تغییر شکل‌های درون صفحه‌ای در مقایسه با تغییر شکل‌های عرضی صرف نظر می‌شود، ولی مقدار $(\partial w / \partial x)^2$ قابل صرف نظر کردن نیست، چون چرخش در نظریه تغییر فرم‌های بزرگ زیاد است. از آنجایی که تغییر شکل‌های بزرگی تحت برخورد بالستیک انتظار است؛ بنابراین تابع تغییر شکل موضعی رابطه (6) که شرایط مرزی هندسی شامل تغییر شکل و شیب صفر را در مرز گسترش موج طولی الاستیک ارضاء می‌کند، در نظر گرفته می‌شود.

$$w_i(x, y) = \begin{cases} \Delta Z_i & x \leq \frac{d}{2}, y \leq \frac{d}{2} \\ \frac{4Z_i}{(2rt_i - d)^2} (x - rt_i)^2 (y - rt_i)^2 & \begin{cases} \frac{d}{2} \leq x \leq rt_i \\ \frac{d}{2} \leq y \leq rt_i \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

که ΔZ_i تغییر مکان مرکز ورق در پایان بازه زمانی i -ام است.

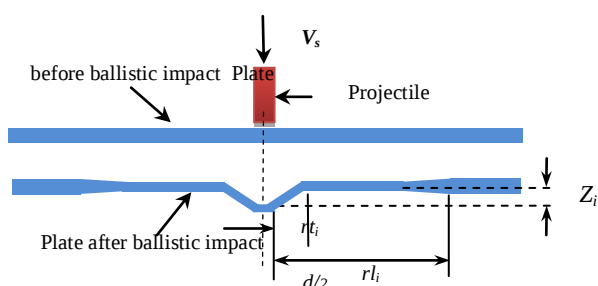


Fig. 2 Configuration of a plate before and after ballistic impact

شکل 2 پیکربندی یک ورق قبل و بعد از ضربه عرضی

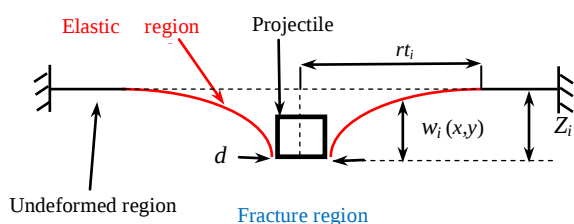


Fig.3 Schematic local deformation plate under ballistic impact

شکل 3 شماتیک تغییر شکل موضعی ورق تحت برخورد بالستیک

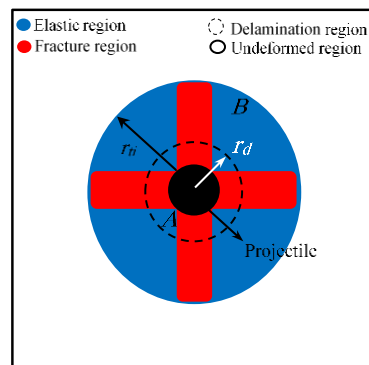


Fig. 1 The introduction of different parts of plate during the ballistic impact

شکل 1 معرفی قسمت‌های مختلف ورق در حین فرآیند برخورد بالستیک

طی تغییر شکل الاستیک جذب می‌کنند.

- از شعاع گسترش موج عرضی تا انتهای ورق که تکیه‌گاه ورق است، محدوده تغییر شکل نیافته نام‌گذاری می‌شود.

- منطقه لایه‌لایه شدن¹ که در آن آسیب لایه‌لایه‌شدگی رخ داده است.

3- فرمولاسیون مدل تحلیلی برخورد بالستیک در ورق نازک کامپوزیت

1-3- مقدمه

در آغاز کل انرژی به شکل انرژی جنبشی پرتابه در نخستین فاصله زمانی ضربه است. پس از آن این انرژی به انرژی جذب‌شده توسط مکانیزم آسیب‌های مختلف و انرژی جنبشی ورق کامپوزیتی در حال حرکت و پرتابه تبدیل می‌شود. انرژی جنبشی پرتابه در ابتدا به صورت رابطه (1) است.

$$E_{KE} = \frac{1}{2} m_p V_s^2 \quad (1)$$

در آن m_p و V_s به ترتیب جرم پرتابه و سرعت اولیه است. برای تجزیه و تحلیل رویداد ضربه بالستیک، مدت زمان تماس را می‌توان به تعداد مساوی از فواصل زمانی از طول مدت δt_i تقسیم کرد. کل انرژی جذب‌شده توسط هدف یا انرژی از دست داده شده توسط پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام به صورت رابطه (2) است.

$$E_{Li} = E_{fi} + E_{eli} + E_{di} + E_{Mi} \quad (2)$$

در آن E_{fi} ، E_{eli} ، E_{di} و E_{Mi} به ترتیب انرژی جذب‌شده توسط محدوده شکست، انرژی جذب‌شده توسط تغییر شکل الاستیک، انرژی ورقه‌ورقه یا لایه‌لایه شدن و انرژی شکست ماتریس در پایان فاصله زمانی i -ام است.

هنگامی که یک هدف توسط یک پرتابه به صورت عرضی تحت ضربه قرار می‌گیرد، موجی از کرنش‌های طولی و عرضی در هدف منتشر می‌شود. موج‌های طولی با سرعت به صورت رابطه (3) منتشر می‌شوند [4].

$$C_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0.. \varepsilon_p}} \quad (3)$$

در این جا ε_p نشان‌دهنده کرنشی است که در آن منطقه پلاستیک شروع می‌شود. همان‌طور که موج‌های کرنش از یک نقطه بر ورق عبور می‌کنند، مواد ورق به سمت نقطه ضربه براساس شکل 2 جریان می‌یابد. قاعده مخروطی شکل گرفته با سرعت موج عرضی به سمت خارج گسترش می‌یابد. سرعت موج عرضی برابر با رابطه (4) است [17].

¹ Delamination region

اندازه قطر پرتابه در نظر گرفته شده که در هنگام نفوذ پرتابه شکسته می شود. برای ماده مرکب بافته شده، فاکتور انتقال موج تنش تابعی از هندسه ماده مرکب بافته شده، خواص مکانیکی و فیزیکی مواد تقویت کننده و ماتریس است. این پارامتر برای هر ماده جداگانه محاسبه می شود.

انرژی شکست هر لایه از ورق با ضرب حجم محدوده شکست در سطح زیر منحنی تنش-کرنش ورق تا کرنش شکست به صورت رابطه (15) به دست می آید.

$$\text{Energy Absorbed} = \int_0^x A dx \int_0^{\varepsilon_{mxl} b^{x/d}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$A = \frac{h}{N} d \quad (15)$$

h ضخامت کل ورق، N تعداد لایه های ورق کامپوزیتی و d قطر پرتابه است. از این رو کل انرژی تلف شده ناشی از شکست یک لایه برابر رابطه (16) است.

$$E_{fi} = A \int_0^{rt_i} \left(\int_0^{\varepsilon_{mxl} b^{x/d}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \quad (16)$$

از آنجا که محدوده شکست در نظر گرفته شده $1/4$ ورق است، بیان فوق ضرب در 4 و همچنین تعداد لایه های شکسته شده در هر مرحله زمانی N_f و به صورت رابطه (17) می شود.

$$E_{fi} = 4 \times N_f \times A \int_0^{rt_i} \left(\int_0^{\varepsilon_{mxl} b^{x/d}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \quad (17)$$

3-5- انرژی جذب شده ناشی از حرکت موضعی ورق

حرکت های محلی در سطح پشت هدف در طول رویداد ضربه بالستیک بخشی از انرژی جنبشی پرتابه را جذب می کند. در این تحقیق با توجه به میدان جابه جایی در نظر گرفته شده در رابطه (6)، میدان سرعت موضعی متغیر در فاصله زمانی i -ام با گسترش موج عرضی rt_i از نقطه ضربه به صورت رابطه (18) تعیین می شود.

$$v_i(x, y) = \begin{cases} V_i & x \leq \frac{d}{2}, y \leq \frac{d}{2} \\ \frac{4V_i}{(2rt_i - d)^2} (x - rt_i)^2 (y - rt_i)^2 & \left\{ \begin{aligned} \frac{d}{2} \leq x \leq rt_i \\ \frac{d}{2} \leq y \leq rt_i \end{aligned} \right\} \end{cases} \quad (18)$$

V_i سرعت مرکز ورق در پایان بازه زمانی i -ام است. از این رو انرژی جنبشی مخروط شکل گرفته را می توان با رابطه (19) در فاصله زمانی i -ام بیان کرد.

$$E_{Conei} = \int_0^{rt_i} \int_0^{rt_i} \rho h v_i^2(x, y) dx dy$$

$$= \frac{1}{2} \left[\int_0^{\frac{d}{2}} 2\pi \rho h V_i^2 r dr + 4 \int_{\frac{d}{2}}^{rt_i} \int_{\frac{d}{2}}^{rt_i} \rho h \frac{V_i}{(2rt_i - d)^2} \times (rt_i - x)^2 (rt_i - y)^2 dx dy \right] = MC_i V_i^2 \quad (19)$$

رابطه (20) نیز به صورت زیر است.

$$MC_i = \frac{\pi \rho h d^2}{8} + \frac{\rho h (2rt_i - d)^6}{800 rt_i^4} \quad (20)$$

در این قسمت فرض شده پرتابه و مخروط تشکیل شده با سرعت یکسان و برابر سرعت انتهایی بازه i -ام در حال حرکت است.

3-6- انرژی جذب شده به علت ورقه ورقه شدن لایه ها و شکست

ماتریس

معیار شروع لایه لایه شدن در اثر ماهیت تنش کششی σ_z و دیگر تنش های

به کمک مفروضات اساسی تئوری کلاسیک ورق، کرنش های غیر خطی فون کارمن متناظر با نظریه تغییر شکل های بزرگ را می توان به صورت رابطه (7) بیان کرد [18].

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2},$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (7)$$

با جایگزین رابطه (6) در معادلات (7) و قرار دادن $x=0, y=d/2$ پس از ساده کردن روابط (8) برای تغییرات کرنش در نقطه ضربه به دست آمده است.

$$\varepsilon_{mxl} = \frac{8\Delta Z_i (\Delta Z_i - z)}{(2r_{ti} - d)^2}, \varepsilon_{myl} = \frac{2\Delta Z_i (\Delta Z_i - z)}{r_{ti}^2},$$

$$\varepsilon_{mxyi} = -\frac{4\Delta Z_i (\Delta Z_i - 2z)}{r_{ti} (2r_{ti} - d)} \quad (8)$$

ارتباط تنش و کرنش برای مواد کامپوزیت ارتوتروپیک به صورت رابطه (9) بیان می شود [18].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که Q_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) ماتریس سختی نام دارد و به صورت رابطه (10) تعیین می شوند.

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}},$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{33} = G_{12} \quad (10)$$

3-3- انرژی جذب شده توسط محدوده الاستیک

انرژی کرنش کل ورق مستطیل شکل را می توان به صورت رابطه (11) نوشت [18]

$$U_T = \frac{1}{2} \int_{\Omega_0} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy} + \sigma_{xy}\varepsilon_{xy}) dV \quad (11)$$

با قرار دادن روابط (10-8) در انتگرال رابطه (11)، انرژی کرنشی ذخیره شده توسط ناحیه الاستیک یک ورق نازک کامپوزیتی تحت برخورد بالستیک در محدوده گسترش موج عرضی rt_i به صورت ساده شده رابطه (12) بیان می شود.

$$U_T = E_{eli} = \frac{2}{45} \frac{(2r_{ti} - d)^2 \Delta Z_i^2}{r_{ti}^4} \{ 9(D_{11} + D_{22}) + 10(D_{12} + 8D_{66}) \}$$

$$+ \frac{1}{17640} \frac{(2r_{ti} - d)^6 Z_i^4}{r_{ti}^8} \{ 49(A_{11} + A_{22}) + 90(A_{12} + 2A_{66}) \} \quad (12)$$

D_{ij}, A_{ij} به ترتیب سختی کششی و خمشی است که از روابط (13) به دست می آید.

$$A_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} dz$$

$$D_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} z dz \quad (13)$$

3-4- انرژی جذب شده در محدوده شکست

در هر لایه حداکثر کرنش در نقطه برخورد است و در طول ورق کاهش می یابد و این را می توان به کمک رابطه نمایی (14) در نظر گرفت [4].

$$\varepsilon_{x,y} = \varepsilon_{mxl,myl} b^{x,y/d} \quad (14)$$

$\varepsilon_{x,y}$ کرنش در هدف در جهت x, y حداکثر کرنش یعنی کرنش در نقطه ضربه در جهت x, y فاصله از نقطه ضربه، b عامل انتقال موج تنش و d قطر پرتابه هستند. کل محدوده شکست در هر لایه به صورت یکپارچه و به

$$E_{KE0} = E_{KEI} + E_{LI} + E_{ConeI} \quad (23)$$

پس از قرار دادن روابط (1، 12، 18، 20 و 29) در رابطه (30) و ساده‌سازی، رابطه (24) برای سرعت انتهایی فاصله زمانی $t-i$ به دست می‌آید.

$$V_i^2 = \frac{m_p V_s^2 - 2E_{LI}}{(2MC_i + m_p)} \quad (24)$$

شتاب پس از به دست آمدن سرعت پرتابه کاهش یافته، پرتابه در بازه زمانی i -ام به صورت رابطه (25) تعیین می‌شود:

$$d_{Ci} = \frac{V_{i-1} - V_i}{\Delta t} \quad (25)$$

فاصله طی شده توسط پرتابه و جابه‌جایی موضعی هدف در بازه زمانی i -ام برابر رابطه (26) خواهد بود.

$$\delta_{0i} = V_{i-1} \times \Delta t - \frac{1}{2} d_{Ci} \Delta t^2 \quad (26)$$

فاصله طی شده توسط پرتابه، Z_i ، تا فاصله زمانی $t-i$ و جابه‌جایی موضعی در پشت صفحه هدف به صورت رابطه (27) است.

$$Z_i = \sum_{n=1}^{n=i-1} \delta_{0n-1} \quad (27)$$

نیروی تماس یا مقاوم در برابر حرکت پرتابه می‌تواند توسط رابطه (28) محاسبه شود.

$$F_i = m_p d_{Ci} \quad (28)$$

4- معیار شکست

تنش‌های ایجاد شده در هر لایه به عنوان اساس محاسبات کنترل شکست در ورق‌های کامپوزیت لایه‌ای محسوب می‌شود. استحکام هر لایه کامپوزیت به طور مجزا از طریق محاسبه تنش وارد بر آن در راستای محورهای مختصات و با در نظر گرفتن خواص مواد تشکیل دهنده آن به دست می‌آید. آغاز فرآیند شکست هر لایه کامپوزیت از طریق حداکثر حد تعریف شده توسط معیارهای شکست مختلف تعریف می‌شود. تشخیص میزان باری که سبب آغاز فرآیند شکست می‌شود، نقش اساسی در تعیین فرآیند کلی شکست سازه و نیز قابلیت اطمینان آن در طول بهره‌برداری دارد. در این مقاله دو معیار شکست کرنش ماکزیمم¹ و سای-هیل² جهت بررسی رفتار بالستیک هدف کامپوزیت چندلایه مورد استفاده قرار می‌گیرد [19].

با استفاده از مدل دویعدی معیار سای-هیل تابع I را به کمک رابطه (29) در زمان‌های مختلف برای هر لایه جداگانه محاسبه کرده و چنانچه مقادیر از یک بیشتر شود آن لایه کاملاً شکسته شده است [22, 19].

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xT}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yy}}{S_{yT}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xyT}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{(S_{xT})^2}\right) = I_j(t) \quad (29)$$

که $j=3, 2, 1, 11, 22, 33$ به ترتیب نشان‌دهنده شماره لایه‌های مختلف است به عبارتی 3 اولین لایه هدف که تحت ضربه بالستیک قرار می‌گیرد و پس از آن 2 لایه دوم، 1 لایه سوم، 11 لایه چهارم، 22 لایه پنجم و 33 لایه آخر هدف کامپوزیتی چند لایه هستند. S_{xT} ، S_{yT} و S_{xyT} به ترتیب استحکام طولی، عرضی و برشی هدف کامپوزیتی هستند.

علاوه بر معیار سای-هیل، با مقایسه مقادیر کرنش‌های محاسبه شده در رابطه (8) با معیار کرنش ماکزیمم در اطراف نقطه ضربه در هر لایه با گذشت زمان، به بررسی شکست لایه‌های مختلف هدف کامپوزیتی چند لایه تحت

برشی بین لایه‌ای است [19]. با توجه به فرض $\sigma_z = 0$ در تئوری کلاسیک ورق‌های نازک نمی‌توان از معیارهای لایه‌لایه شدن استفاده کرد. پیش از شکسته شدن لایه‌های هدف کامپوزیتی در طول رویداد ضربه، آسیب ورقه‌ورقه شدن و ترک خوردگی ماتریس در اطراف نقطه ضربه که در آن کرنش القاء شده بیش از از کرنش آستانه خسارت برای ماده است، مورد نظر قرار می‌گیرد. مقدار آستانه شروع آسیب در کرنشی کمتر از کرنش نهایی هدف کامپوزیتی است. محققان دیگر به طور تجربی دریافتند که انتشار لایه‌لایه شدن در همه جهات بر مواد مرکب برابر نیست [20, 4]. در وجه جلوی ورق یک منطقه کوچک از لایه‌لایه شدن تقریباً دایره در نواحی اطراف منطقه شکست دیده می‌شود. شکل منطقه لایه‌لایه شدن در وجه عقب هدف مانند گلبک است. این منطقه از لایه‌لایه شدن در لایه‌های پایین به طور کامل دایره‌ای نیست. شعاع لایه‌لایه شدن در لایه‌های پایین بزرگ‌تر از لایه‌های بالاست، به دلیل این که شعاع لایه‌لایه شدن در هر یک از لایه‌های شکست شده ثابت می‌ماند و مقاومت برشی بین لایه‌های دیگر لایه‌های باقی‌مانده کاهش می‌یابد [21, 20, 4]. از این رو ضریب تصحیح (C.C) منطقه لایه‌لایه شدن نسبت به سطح شکست دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین انرژی لایه‌لایه شدن و ترک خوردگی ماتریس تا فاصله زمانی $t-i$ ام برابر رابطه (21) است.

$$\delta E_{di} = C.C \pi (r_{di}^2 - r_{di-1}^2) G_{II} \quad (21)$$

$$\delta E_{MCI} = C.C \pi (r_{di}^2 - r_{di-1}^2) h_1 V_f E_m$$

در آن r_{di} شعاع تا منطقه‌ای که آسیب در لایه‌ها در فاصله زمانی $t-i$ ام منتشر شده، G_{II} نرخ آزادسازی انرژی کرنش در مود دوم است، $C.C$ ضریب اصلاح منطقه ورقه‌ورقه شدن نسبت به منطقه دایره‌ای، h_1 ضخامت هر لایه، V_f کسر حجمی ماتریس و E_m انرژی ترک خوردگی ماتریس است؛ بنابراین کل انرژی جذب شده توسط ورقه‌ورقه شدن و ترک خوردگی ماتریس تا فاصله زمانی $t-i$ ام، با جمع δE_{di} و δE_{MCI} در تمامی فواصل زمانی رابطه (22) به دست می‌آید.

$$E_{di} = \sum_{n=0}^i \delta E_{dn}$$

$$E_{MCI} = \sum_{n=0}^i \delta E_{Mcn} \quad (22)$$

3-7- تعادل انرژی پرتابه

با دانستن انرژی جنبشی اولیه پرتابه و انرژی جذب شده در طی بازه زمانی می‌توان سرعت پرتابه برای بازه زمانی بعدی به دست آورد. پارامترهای متفاوتی مانند جابه‌جایی پرتابه، کرنش، نیروی تماسی و انرژی جذب شده با داشتن سرعت برای بازه‌های داده شده به وسیله مکانیزم‌های مختلف به دست می‌آیند. تعادل انرژی در پایان بازه زمانی $t-i$ ام به صورت رابطه (23) در نظر گرفته می‌شود.

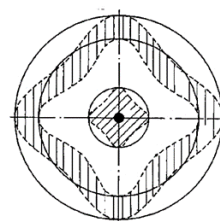


Fig.4 Schematic observed of delaminated region [4]

شکل 4 شماتیک مشاهده شده در ناحیه لایه‌لایه شدن [4]

¹ Maximum Strain Criterion

² Tsai-Hill Criterion

برخورد بالستیک (30) پرداخته می شود [19].

$$\varepsilon_{mxi,myi} - \varepsilon_f \begin{cases} < 0 \\ \geq 0 \end{cases} \quad (30)$$

که ε_f کرنش شکست در جهت X و Y است.

جدول 1 پارامترهای هندسی و مشخصات مواد مورد نیاز برای پیش بینی رفتار ضربه بالستیک [19,4]

Table 1 Required input parameters and material properties for the predictions of ballistic impact behavior

$m_p = 2.8 \text{ gr}$	جرم پرتابه	مشخصات
$d = 5 \text{ mm}$	قطر پرتابه	پرتابه
استوانه ای سرتخت	شکل پرتابه	
2D Woven-E-glass/epoxy	مواد	
$V_f = 50\%$	درصد حجمی الیاف	
$h = 2 \text{ mm}$	ضخامت	
$N = 6$	تعداد لایه ها	
$\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$	چگالی	
$E_{xx} = E_{yy} = 40 \text{ GPa}$	مدول الاستیک طولی	مشخصات
$G_{xy} = 16.67 \text{ GPa}$	مدول برشی	
$\nu_{xy} = 0.2$	ضریب پواسن	هدف
$S_{xt} = S_{yt} = 850 \text{ MPa}$	استحکام کششی طولی	
$S_{xy} = 100 \text{ MPa}$	استحکام برشی	
$\Delta t = 1 \mu s$	بازه زمانی	
$b = 0.7$	ضریب انتقال موج تنش	
$J/m^3 \ G_{II} = 1000$	نرخ آزادسازی انرژی کرنش مود دوم	
$E_m = 0.9 \text{ MJ/m}^3$	انرژی ترک خوردگی ماتریس	

بالستیک ورق هدف مورد استفاده توسط گلرت و همکاران در مقاله حاضر همانند نایک و پل، از خواص مکانیکی ارائه شده توسط نایک استفاده شده است.

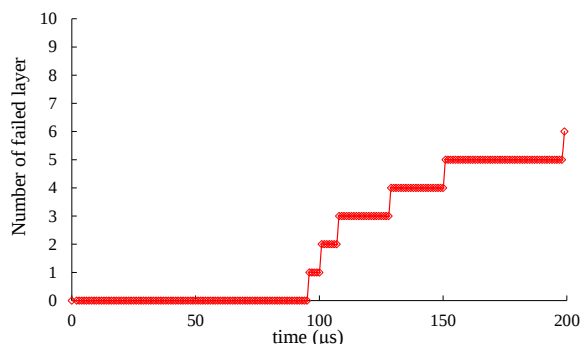


Fig. 5 Number of failed layers over time

شکل 5 تعداد لایه های شکسته شده بر حسب زمان

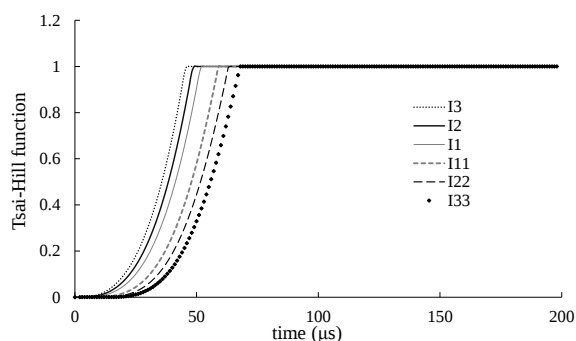


Fig. 6 the value of tsai-hill function criteria of various layers over time

شکل 6 مقادیر تابع معیار سای-هیل لایه های مختلف بر حسب زمان

5- فرمولاسیون وابستگی خواص مکانیکی به نرخ کرنش

در اغلب مواد خواص مکانیکی تابع سرعت بارگذاری است. پژوهش های گسترده ای در زمینه وابستگی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی چندلایه به نرخ کرنش انجام شده است. نتایج محققین نشان می دهد که مواد کامپوزیت در نرخ کرنش های بالا، استحکام و مدول های طولی، عرضی و در جهت ضخامت بیشتری نسبت به بارگذاری استاتیکی دارند [24,23]؛ بنابراین در حالت بارگذاری بالستیک، مواد کامپوزیت سفتی بالاتری به دلیل حساسیت نرخ کرنش تجربه می کنند. در این مقاله اثر نرخ کرنش بر استحکام و مدول ورق چندلایه کامپوزیتی به صورت رابطه (31) بیان می شود [25,1].

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left(1 + C_1 \ln \left(\frac{\{\dot{\varepsilon}\}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (31)$$

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\} \left(1 + C_2 \ln \left(\frac{\{\dot{\varepsilon}\}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right)$$

نمونه ها در نرخ کرنش $\dot{\varepsilon}_0$ آزمایش می شوند و ماتریس استحکام $\{S_0\}$ و ماتریس مدول های الاستیسیته $\{E_0\}$ به دست می آیند، سپس در هر نرخ کرنشی $\{\dot{\varepsilon}\}$ که مورد نظر است ماتریس استحکام $\{S_{RT}\}$ و مدول های الاستیسیته $\{E_{RT}\}$ به دست می آیند؛ بنابراین نرخ کرنش $\{\dot{\varepsilon}\}$ در هر فاصله زمانی در روابط (30)، از رابطه (32) به دست می آید.

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\Delta \varepsilon_{xi}}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{xi-1}}{\Delta t} \quad (32)$$

6- نتایج و بحث

با استفاده از مدل تحلیلی و به کارگیری نرم افزار ریاضیاتی میپل، در ابتدا به بررسی شکست و نفوذ پرتابه در لایه های مختلف ورق نازک کامپوزیتی چندلایه پرداخته می شود، سپس به محاسبه پارامترهای سرعت حد بالستیک، جابه جایی پرتابه، کرنش، تنش و انرژی جذب شده به وسیله مکانیزم های مختلف برای بازه های مختلف پرداخته می شود. برای اعتبارسنجی، مقایسه و همچنین مشخصات پرتابه و هدف از نتایج تجربی نایک و گلرت و همچنین حل تحلیلی نایک و پل در شکل های 6,5 و جداول 1 و 2 استفاده می شود. جدول 1 مشخصات هندسی و خواص مکانیکی مورد نیاز برای پیش بینی رفتار بالستیک به کمک مدل تحلیلی حاضر را نشان می دهد. شکل های 6,5 شکست لایه های مختلف هدف کامپوزیتی نایک بر حسب زمان را نشان می دهند. با توجه به شکل های 6,5 شکست لایه ها براساس معیار سای-هیل خیلی زودتر از معیار کرنش بیشینه رخ می دهد. سرعت حد بالستیک براساس معیار کرنش بیشینه 146.5 متر بر ثانیه است و با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارد. در حالی که سرعت حد بالستیک براساس معیار سای-هیل در حدود 120 متر بر ثانیه است که با نتایج تجربی اختلاف دارد. در ادامه از معیار کرنش ماکزیمم برای تعیین سایر مشخصات رفتار بالستیک استفاده می شود.

در جدول 2 و 3 نتایج مدل تحلیلی تحقیق حاضر و نتایج تست های تجربی برخورد بالستیک نایک، گلرت [26] و همچنین مدل های تحلیلی نایک، پل برای سه نوع جرم و پرتابه با دو نوع ضخامت متفاوت ارائه شده است. خواص مکانیکی ورق هدف استفاده شده توسط گلرت و همکاران [26] برای مطالعات تجربی در دسترس نیست. از این رو برای تجزیه و تحلیل رفتار

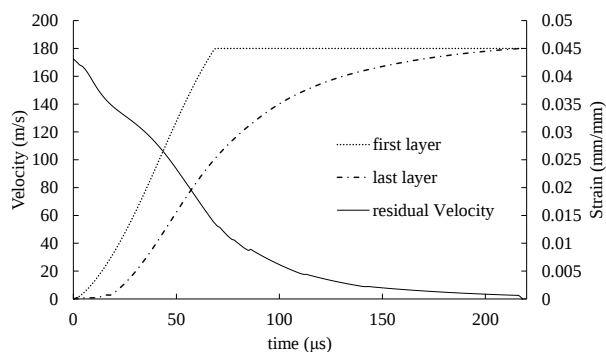


Fig. 8 Velocity variation along with strain variation of first and last layers over time at 172 m/s

شکل 8 تغییرات سرعت همراه با تغییرات کرنش لایه اول و لایه آخر برحسب زمان در 172 متربرثانیه

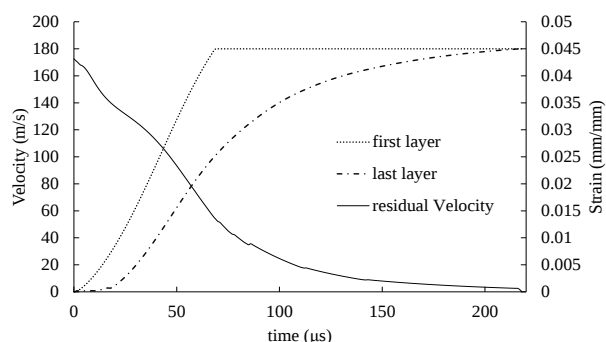


Fig. 9 Velocity variation along with strain variation of first and last layers over time at 204.5 m/s

شکل 9 تغییرات سرعت همراه با تغییرات کرنش لایه اول و لایه آخر برحسب زمان در 204.5 متربرثانیه

این رو پس از مدتی همان طور که پرتابه و موج عرضی پیشرفت می کند ناگهان لایه اول به دلیل رسیدن کرنش لایه اول به کرنش شکست شکسته می شود. این روند ادامه خواهد داشت تا تمام لایه های هدف کامپوزیتی به کرنش شکست رسیده و هدف کامپوزیت چند لایه سوراخ شود. مشاهده می شود در هر سه شکل سرعت نهایی پرتابه با توجه به سرعت اولیه داده شده به پرتابه همراه با شکسته شدن لایه آخر به صفر می رسد. سرعت اولیه داده شده نشان دهنده حد بالستیک هدف کامپوزیتی است. در جدول 4 سهم هر یک از انرژی های جذب شده توسط مدل تحلیلی نایک، پل و مدل تحلیلی حاضر برای سرعت حد بالستیک 146.5 متر بر ثانیه در پایان ضربه بالستیک آورده شده است.

جدول 4 مقایسه سهم هر یک از انرژی های جذب شده در پایان ضربه بالستیک مدل تحلیلی حاضر و سایر محققین

Table 4 Compare the share of each energy absorption of present analysis and other researchers at the end of ballistic impact

انرژی جذب شده	مدل تحلیلی حاضر	مدل تحلیلی نایک [4]	مدل تحلیلی پل [5]
انرژی جنبشی حرکت موضعی ورق	0.1 %	0.56 %	0.37 %
انرژی جذب شده در محدوده الاستیک	49.23 %	87.04 %	69.68 %
انرژی جذب شده در محدوده شکست	43.13 %	8.16 %	22 %
انرژی لایه لایه شدن	6.87 %	3.6 %	7.9 %
انرژی شکست ماتریس	0.66 %	0.64 %	0.01 %

جدول 2 مقایسه نتایج سرعت حد بالستیک حاصل از مدل تحلیلی، نتایج تجربی و تحلیلی سایر محققین

Table 2 comparison the ballistic Limit Velocity of analytical model, experimental and analysis of other researchers' results

مشخصات پرتابه	mm	سرعت حد بالستیک m/s	نتایج [26,4]	نتایج [4]	نتایج [5]
جرم پرتابه	2.8 gr	152.5	159	150	146.5
قطر پرتابه	5 mm	171	191	175	172
جرم پرتابه	3.3 gr	202.5	188	210	204.5
قطر پرتابه	4.76 mm				
جرم پرتابه	3.84 gr				
قطر پرتابه	6.35 mm				

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 2 سرعت حد بالستیک با افزایش ضخامت هدف کامپوزیت افزایش می یابد. مدل تحلیلی دوبعدی حاضر تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد و به طور کلی نتایج مدل حاضر نسبت به مدل نایک و پل به ویژه در ضخامت های بالاتر دقت بالاتری دارد. دلیل آن هم در نظر گرفتن کرنش ها و تنش های دوبعدی در مدل کنونی است. از مدل حاضر برای بررسی اهداف ضخیم با دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر می توان استفاده کرد. شکل های 7-9 نتایج سرعت حد بالستیک به همراه تغییرات کرنش در نقطه ضربه برای لایه اول و آخر هدف برحسب زمان ارائه شده است.

براساس بخش های پیشین تغییرات کرنش ها در هر لایه وابسته به خیز مرکزی ورق و گسترش موج عرضی است. همان طور که زمان پیشرفت می کند، مقدار کرنش در لایه اول افزایش و سرعت پرتابه کاهش می یابد. از

جدول 3 اختلاف سرعت حد بالستیک مدل حاضر و سایر محققین با نتایج تجربی

Table 3 comparison the ballistic Limit Velocity of present and other researchers' analytical model with experimental results

مشخصات پرتابه	تحلیل حاضر %	نتایج نایک %	نتایج پل %
حالت اول	2.3	6	1.6
حالت دوم	1.7	9.1	2.3
حالت سوم	2.6	10.5	3.6

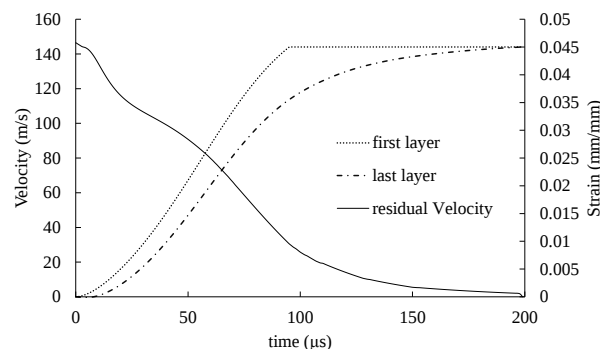


Fig. 7 Velocity variation along with strain variation of first and last layers over time at 146.5 m/s

شکل 7 تغییرات سرعت همراه با تغییرات کرنش لایه اول و لایه آخر برحسب زمان در 146.5 متربرثانیه

در مطالعه کنونی تغییرات انرژی جذب‌شده الاستیک محدوده الاستیک با وجود افزایش شعاع موج الاستیک عرضی همراه با گذر زمان وابستگی کمتری به گسترش شعاع موج الاستیک عرضی داشته است و بیشتر به تغییر شکل مرکز ورق که به مرور زمان با کاهش انرژی جنبشی پرتابه کاهش می‌یابد، دارد. انرژی جذب‌شده محدوده الاستیک در ابتدای برخورد بالستیک که انرژی جنبشی پرتابه و تغییر شکل ورق زیاد هستند، تغییرات بسیاری دارد. در ادامه فرآیند نفوذ عمده انرژی جنبشی پرتابه به ورق منتقل شده و تغییر شکل الاستیک ورق کمتر می‌شود؛ بنابراین تغییرات انرژی جذب‌شده محدوده الاستیک هم تقریباً ثابت می‌شود.

در ابتدا انرژی جنبشی مخروط در حال حرکت صفر است. با گذشت زمان جرم بخش متحرک موضعی افزایش می‌یابد و سرعت پرتابه کاهش دارد، ولی انرژی جنبشی بخش متحرک محلی افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن به انتهای فرآیند نفوذ کامل به دلیل این که سرعت پرتابه به طور قابل توجهی کاهش یافته، انرژی جنبشی بخش متحرک محلی به شدت کاهش می‌یابد. مقدار انرژی جنبشی حرکت موضعی ورق کمتر از مدل‌های تحلیلی نایک و پل است. براساس شکل 3 و فرضیات بیان شده حرکت موضعی ورق و پرتابه با سرعت یکسان و برابر سرعت انتهای بازه i -ام است. با کاهش شدید سرعت پرتابه موجب کاهش انرژی جنبشی حرکت موضعی ورق می‌شود. وابستگی کمتر این انرژی با گسترش شعاع موج الاستیک عرضی را نشان می‌دهد، همچنین مقدار جرم معادل مخروط تشکیل شده در مقایسه با مدل‌های نایک و پل کمتر است. با توجه به در نظر گرفتن میدان تغییرات سرعت ورق و محاسبه انرژی جنبشی و مقدار جرم معادل بخش متحرک ورق نسبت به

مدل‌های تحلیلی نایک و پل دقیق‌تر به نظر می‌رسد [5,4].

با توجه به شکل‌های 11 و 12 نسبت به شکل 10 مقدار انرژی محدود شکست به دلیل افزایش ضخامت و افزایش مقاومت ورق در برابر شکست بیشتر از انرژی محدوده الاستیک پیش‌بینی شده است.

مقدار انرژی جذب‌شده به دلیل ورقه‌ورقه شدن لایه‌ها در مدل تحلیلی حاضر مانند نتایج تحلیلی نایک و پل در مقایسه با سایر ترم‌های انرژی بسیار کمتر است. هر چند مقدار انرژی جذب‌شده توسط این مکانیزم کم بوده و قابل صرف‌نظر کردن است، ولی در انتقال تنش و مقدار انرژی جذب‌شده در لایه‌های مختلف مؤثر است. شکل 13 گسترش شعاع لایه‌لایه شدن برحسب زمان را نشان می‌دهد. در ابتدا شعاع لایه‌لایه شدن صفر است، سپس با افزایش کرنش لایه‌ها تا پیش از شکسته شدن و رسیدن سطح کرنش‌ها به کرنش آستانه تخریب، لایه‌لایه شدن در لایه‌های مختلف هدف آغاز می‌شود و تا افزایش کرنش لایه‌ها به سطح کرنش ماکزیمم گام به گام افزایش می‌یابند. در نهایت شعاع لایه‌لایه شدن و انرژی لایه‌لایه شدن به دلیل شکسته شدن لایه‌ها ثابت می‌شود. با توجه به شکل 13 شعاع نهایی لایه‌لایه شدن 9.65 میلی‌متر است و با نتایج تجربی و تحلیلی نایک [4] که به ترتیب 10 و 9.6 میلی‌متر به دست آمده اختلاف بسیار کمی دارد.

براساس شکل‌های 10-12 مقدار انرژی جذب‌شده توسط شکست ماتریس در مقایسه با سایر ترم‌های انرژی جذب‌شده حتی انرژی لایه‌لایه شدن بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

7- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک مدل تئوری دو بعدی برای پیش‌بینی میزان جذب انرژی‌های مختلف یک ورق نازک کامپوزیتی کاملاً گیردار تحت برخورد بالستیک معرفی می‌شود که با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد. نتایج زیر به

با توجه به شکل‌های 10-12 و جدول 4 مقدار انرژی جذب‌شده توسط محدوده الاستیک در مقایسه با مدل تحلیلی نایک و پل با در نظر گرفتن انرژی خمشی و غشایی و همچنین اثرات کرنش غیرخطی فن کارمن مقدار کمتری را تخمین می‌زند. در مدل‌های نایک و پل از یک تابع تقریبی خطی بین کرنش شکست الیاف و کرنش صفر در مرز گسترش موج عرضی استفاده کرده‌اند و فقط انرژی غشایی ذخیره شده در الیاف محاسبه می‌شود، ولی در تحقیق حاضر با توجه به تابع تغییر مکان موضعی مناسب به محاسبه انرژی کرنشی ذخیره شده خمشی و غشایی در هر بازه زمانی پرداخته شده است.

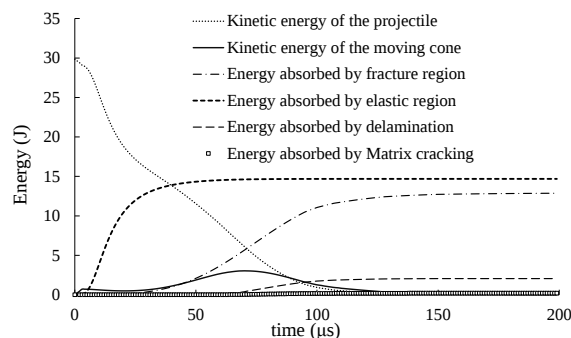


Fig. 10 Energy absorbed by different mechanisms at the speed of 146.5 m/s

شکل 10 انرژی جذب‌شده توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت 146.5 متر بر ثانیه

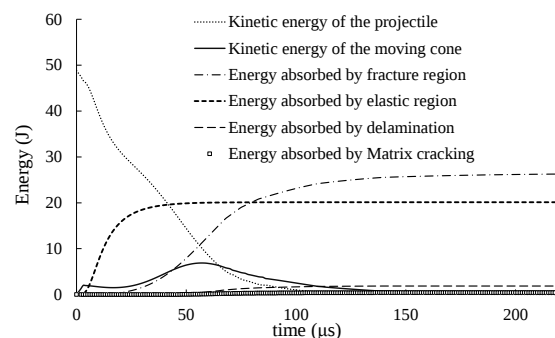


Fig. 11 Energy absorbed by different mechanisms at the speed of 172.5 m/s

شکل 11 انرژی جذب‌شده توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت 172.5 متر بر ثانیه

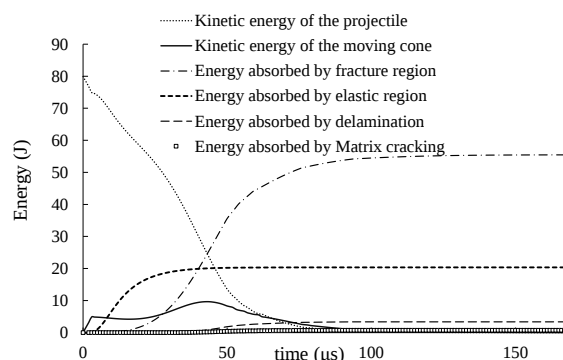


Fig. 12 Energy absorbed by different mechanisms at the speed of 204.5 m/s

شکل 12 انرژی جذب‌شده توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت 204.5 متر بر ثانیه

انرژی جنبشی پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{KEi}
انرژی تلف‌شده در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{Li}
انرژی جذب‌شده توسط محدوده شکست در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{fi}
انرژی جذب‌شده توسط محدوده الاستیک در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{eli}
انرژی جذب‌شده توسط شکست ماتریس در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{MCI}
نیروی مقاوم در برابر پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام (N)	F_i
نرخ آزادسازی انرژی کرنش در مود دوم (J/m^2)	G_{II}
ضخامت هدف (m)	h
ضخامت هر لایه هدف (m)	h_1
ابعاد صفحه هدف (m)	L
جرم معادل مخروط تشکیل‌شده در پایان بازه زمانی i -ام (kg)	MC_i
تعداد لایه‌های شکسته‌شده	N_f
ماتریس سختی	Q_{ij}
مختصات شعاعی (m)	r
شعاع منطقه ورقه‌ورقه شدن (m)	r_d
شعاع موج عرضی در پایان بازه زمانی i -ام (m)	rt_i
شعاع موج طولی در پایان بازه زمانی i -ام (m)	rl_i
استحکام کششی طولی (Pa)	S_{xT}
استحکام کششی عرضی (Pa)	S_{yT}
استحکام برشی (Pa)	S_{xyT}
کل انرژی کرنشی ذخیره‌شده در یک ورق (J)	U_T
میدان سرعت در پایان بازه زمانی i -ام (m/s)	v_i
سرعت لحظه‌ای پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام (m/s)	V_i
سرعت اولیه پرتابه (m/s)	V_s
کار انجام‌شده خارجی	W
تابع تغییر مکان موضعی عرضی در فاصله زمانی i -ام (m)	W_i
مختصات عرضی	x
مختصات طولی	y
فاصله طی‌شده توسط پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام (m)	ΔZ_i

علائم یونانی

بازه زمانی (s)	Δt
تغییر مکان مرکز ورق در پایان بازه زمانی i -ام (m)	δ_{0i}
کرنش	$\varepsilon_{x,y}$
کرنش پلاستیک	ε_p
کرنش در نقطه ضربه در جهت x,y	$\varepsilon_{mxi,myi}$
چگالی (kg/m^3)	ρ
تنش (Pa)	σ

9- مراجع

- [1] L. J. Deka, S. D. Bartus, U. K. Vaidya, Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact, *Material Science*, Vol. 43, pp. 4399-4410, 2008.
- [2] R. A. W. Mines, A. M. Roach, N. Jones, High velocity perforation behavior of polymer composite laminates, *Impact Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 561-588, 1999.
- [3] S. S. Morye, P. J. Hine, R. A. Duckett, D. J. Carr, I. M. Ward,

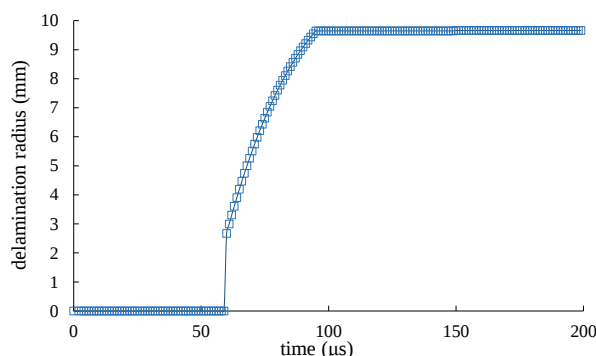


Fig. 13 Expansion of delamination radius over time

شکل 13 گسترش شعاع لایه‌لایه شدن بر حسب زمان

صورت خلاصه از تحقیق حاضر به دست آمده است:

- تغییرات کرنش و تنش دوبعدی به کمک این مدل تحلیلی به خوبی تخمین زده شدند.
- نتایج رفتار بالستیک مواد کامپوزیت براساس معیار کرنش ماکزیم نسبت به معیار سای-هیل با نتایج تجربی توافق بهتری دارد.
- مقدار انرژی جذب‌شده توسط محدوده الاستیک در مقایسه با مدل تحلیلی نایک و پل مقدار کمتری دارد.
- مقدار انرژی جنبشی بخش متحرک موضعی کمتر از مدل‌های تحلیلی نایک و پل است، همچنین مقدار جرم معادل مخروط تشکیل شده در مقایسه با مدل‌های نایک و پل بسیار کمتر است.
- مقدار انرژی جذب‌شده توسط محدوده شکست در ضخامت 2 میلی‌متر کمتر از انرژی محدوده الاستیک است، اما با افزایش ضخامت انرژی شکست افزایش پیدا می‌کند.
- مقدار انرژی جذب‌شده به دلیل ورقه‌ورقه شدن لایه‌ها در مدل تحلیلی حاضر مانند نتایج تحلیلی نایک و پل در مقایسه با سایر ترم‌های انرژی بسیار کمتر است.
- مقدار انرژی جذب‌شده توسط شکست ماتریس در مقایسه با سایر ترم‌های انرژی جذب‌شده حتی انرژی لایه‌لایه شدن بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف نظر کرد.

8- فهرست علائم

سطح مقطع شکست (m^2)	A
ماتریس سختی غشایی	A_{ij}
ضریب انتقال موج تنش	b
ضریب اصلاح منطقه ورقه‌ورقه شدن	$C.C$
سرعت موج طولی (m/s)	C_l
سرعت موج عرضی (m/s)	C_t
قطر پرتابه (m)	d
شتاب پرتابه در پایان بازه زمانی i -ام (m/s^2)	d_{ci}
ماتریس سختی خمشی	D_{ij}
مدل الاستیسیته (Pa)	E
انرژی جنبشی مخروط شکل‌گرفته در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{Conei}
انرژی ورقه‌ورقه شدن در پایان بازه زمانی i -ام (J)	E_{di}
انرژی جنبشی اولیه پرتابه (J)	E_{KE0}

- [14] G. Balaganesan, R. Velmurugan, M. Srinivasan, N. K. Gupta, K. Kanny, Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading, *Impact Engineering*, Vol. 74, pp. 57-66, 2014.
- [15] S. K. García-Castillo, S. Sánchez-Sáez, E. Barbero, Nondimensional analysis of ballistic impact on thin woven laminate plates, *Impact Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 8-15, 2012.
- [16] E. A. Duodu, J. Gu, W. Ding, S. Tang, Performance of composite structures subjected to high velocity impact-review, *Researches in Engineering (A)*, Vol. 16, No. 4, 2016.
- [17] J. C. Smith, F. L. McCrackin, H. F. Scniefer, Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading, Part V, Wave propagation in long textile yarns impacted transversely, *the National Bureau of Standards*, Vol. 60, No. 5, pp. 517-534, 1958.
- [18] J. N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates and shells Theory and Analysis*, pp. 567-574, London: CRC, 1945.
- [19] S. Abrate, *Impact Engineering of Composite Structures*, pp. 37-41 Springer Wien: NewYork, 2011.
- [20] N. K. Naik, P. Shrirao, Composite structures under ballistic impact, *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 579-590, 2004.
- [21] M. H. Pol, Gh. H. Liaght, E. Zamani, A. Ordys, Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites, *Composite Material*, Vol. 49, No. 12, pp. 1449-1460, 2015.
- [22] N. K. Naik, Y. C. Sekher, S. Meduri, Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 5, pp. 731-744, 2000.
- [23] M. M. Shokrieh, M. J. Omid, Investigating the transverse behavior of Glass-Epoxy composites under intermediate strain rates, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 2, pp. 690-696, 2011.
- [24] N. Naik, P. Yernamma, N. Thoram, R. Gadipatri, V. Kavala, High strain rate tensile behavior of woven fabric E-glass/epoxy composite, *Polymer Testing*, Vol. 29, No. 1, pp. 14-22, 2010.
- [25] F. Y. Chian, A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites, *Impact Engineering*, Vol. 46, pp. 11-22, 2012.
- [26] E. P. Gellert, S. J. Cimpoeru, R. L. Woodward, A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites, *Impact Engineering*, Vol 24, No. 5, pp. 445-456, 2000.
- Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 14, pp. 2631-2642, 2000.
- [4] N. K. Naik, P. Shrirao, B. C. K. Reddy, Ballistic impact behavior of woven fabric composites: Formulation, *Impact Engineering*, Vol. 32, No. 9, pp. 1521-1552, 2006.
- [5] M. H. Pol, Gh. H. Liaght, Analytical modeling of perforation of projectiles into glass/epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, , pp. 11-19, 2012. (in Persian فارسی)
- [6] W. J. Cantwel, J. Morton, Impact perforation of carbon fibre reinforced, *Composites Science and Technology*, Vol. 38, No. 2, pp. 119-141, 1990.
- [7] E. Mehrabani Yeganeh, Gh. H. Liaght, M. H. Pol, Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015. (in Persian فارسی)
- [8] M. B. Chaparda, Kh. Vahedi, Analytical and numerical investigation penetration of conical projectile into Fml targets, *Tabriz Mechanical Engineering*, Vol. 45, No. 4, pp. 23-31, 2016. (in Persian فارسی)
- [9] D. Schueler, N. Toso-Pentecôte, H. Voggenreiter, Simulation of high velocity impact on composite structures-model implementation and validation, *Applied Composite Materials*, Vol. 23, No. 4, pp. 857-878, 2016.
- [10] H. Y. Nezhad, F. Merwick, R. M. Frizzell, C. T. McCarthy, Numerical analysis of low-velocity rigid-body impact response of composite panels, *Crashworthiness*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-43, 2015.
- [11] H. Sabouri, H. Ahmadi, G. H. Liaght, Ballistic impact perforation into glare targets: experiment, numerical modelling and investigation of aluminium stacking sequence, *Vehicle Structures & Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 178-183, 2011.
- [12] N. K. Naik, P. Shrirao, B. C. K. Reddy, Ballistic impact behavior of woven fabric composites: Parametric studies, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 412, No. 1-2 pp. 104-116, 2005.
- [13] M. H. Pol, G. H. Liaght, E. Zamani, Effect of nanoclay particles on ballistic behavior of composites- Theoretical and experimental investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 30-42, 2013. (in Persian فارسی)