



بررسی تحلیلی و عددی صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین با پرتابه‌های متفاوت

سجاد صیفوری^{1*}، مرضیه حسینی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر(عج)، رفسنجان

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر(عج)، رفسنجان

* رفسنجان، صندوق پستی 518 sajjad.seifoori@vru.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر اثر شکل پرتابه بر روی پاسخ صفحات کامپوزیتی ارتوتروپیک به روش تحلیلی و عددی برای دو حالت بدون لایه‌لایه‌شدنگی و با لایه‌لایه‌شدنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در روش تحلیلی از مدل جرم و فنر استفاده شده و روش جدیدی برای بررسی برخورد دو پرتابه تخت و مخروطی ارائه شده است. در روش عددی برخورد انواع پرتابه‌ها به ورق با استفاده از سنته اجزا محدود انسپس و ال اس داینا شبیه‌سازی شده است. کامپوزیت مورد استفاده از جنس کربن/اپوکسی است و ضخامت صفحه در اندازه‌های 2, 4, 6 میلی‌متر بررسی شده است. جرم ضربه‌زننده 3 گرم و سرعت برخورد برای هر ضخامت ورق متفاوت می‌باشد. برای بررسی اثر شکل پرتابه سه نوع ضربه‌زننده کروی، مخروطی و استوانه‌ای سرعت تخت مدلسازی شده است. زمان برخورد، بیشینه و تاریخچه جابه‌جای مرکز ورق و نیروی تماس برای سه ضربه‌زننده مختلف بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج عددی و تحلیلی بدست آمده در این پژوهش با یکدیگر مقایسه شده است و نتایج دارای تطابق و همگرایی خوبی هستند. طبق نتایج بدست آمده در همه پرتابه‌ها، بیشینه جابه‌جای در مرکز ورق در هنگامی که لایه‌لایه‌شدنگی اتفاق می‌افتد، بیشتر از زمانی است که آسیبی رخ نمی‌دهد. همچنین طبق نتایج بدست آمده بیشینه جابه‌جای در مرکز ورق برای هر دو حالت با و بدون لایه‌لایه شدنگی برای پرتابه تخت بیشتر است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آبان 1396

پذیرش: 11 دی 1396

ارائه در سایت: 03 بهمن 1396

کلید واژگان:

ورق کامپوزیتی

برخورد جرم کوچک

شبیه‌سازی عددی

مدلسازی تحلیلی

شكل ضربه‌زننده

Analytical and Numerical study of composite plates under impact loading at low velocity with different strikers

Sajjad Seifoori*, Marzieh Hosseini

Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran
* P.O.B. 518 rafsanjan, Iran, sajjad.seifoori@vru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 January 2017

Accepted 01 March 2017

Available Online 23 January 2018

Keywords:

Composite laminate
Small mass impact
Numerical simulation
Analytical modeling
Striker shape

ABSTRACT

In this research the influence of the striker shape on orthotropic composite plates for states, no damage (delamination) and damaged (delamination) are studied. In the analytical method, the spring mass system is used and new analytical model for flat and conical strikers are investigated. In the numerical method, the impact of different strikers on the composite laminate is simulated by using of finite element package (Ansys/Ls Dyna). These studies have been done on plates made of carbon and epoxy and the sheet thickness has been investigated in the size of 2, 4 and 6 mm. The striker mass is 3 g and its velocity for each thickness is different. To investigate the effects of the striker shape, three nose shapes spherical, conical and cylindrical with flat nose are modeled. The impacting time, the displacement time history and the maximum central deflection, and the contact force for all strikers are obtained and compared with each other. The results of analytical model are good agreement with numerical simulation. According to the results, when the delamination occurs, the maximum central deflection is more than once that damage dose not occurs. According to the results, the maximum central deflection of the flat striker on for both cases, with and without delamination, is less than the other strikers, conversely, the maximum contact force is more than the other strikers.

خوب، البته در مقابل مزایای ذکر شده، این مواد در مقایسه با فلزات معتبری نیز دارند یکی از مهمترین مزایای این مواد، ضعف در برابر ضربه می‌باشد که باعث آسیب داخلی در آن‌ها می‌شود و مقاومت ساختار را به طور قابل توجه کاهش می‌دهد. علاوه بر این عیب چهارمگی شکست پایین، تردی و

1- مقدمه استفاده روز افزون از مواد کامپوزیتی، نشانگر مزیت‌های بسیار زیاد این مواد می‌باشد. برخی از مزایای این مواد عبارتند از نسبت استحکام و سفتی ویژه بالا، چگالی پایین، مقاومت در مقابل خوردگی و سایش و قابلیت طراحی

Please cite this article using:

S. Seifoori, M. Hosseini, Analytical and Numerical study of composite plates under impact loading at low velocity with different strikers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 53-60, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک ورق کامپوزیت با تکیه‌گاه تمام گیردار را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرعت ضربه زننده نسبت به جرم آن در نیروی تماسی، کاهش خیز ورق و زمان اعمال ضربه موثرتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که در ضربه‌زننده جرم کوچک، با تغییر زوایای چیدمان الیاف، تغییر چdanی در نیروی تماسی و خیز ایجاد نمی‌گردد، در حالی که برای ضربه زننده جرم بزرگ، اختلاف در مقدار خیز قابل ملاحظه است. زهانگ^۵ [۹] یک مدل المان محدود موثر برای پیش‌بینی آسیب برخورد سرعت پایین در کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از مدل بارگذاری شباهستایک با تماس پیوسته ارائه داد و تاثیر تنش فشاری در سرتاسر ضخامت ورق روی میزان لایه لایه شدگی را بهوسیله ارائه نیروی اصطکاک تماسی در جهت نیروی برشی محاسبه کرد. او شروع و انتشار آسیب در یک ورق کامپوزیت با لایه‌چینی s [۹۰/۳] را شبیه‌سازی کرد و نتایج عددی بدست آمده در ترم‌های موقعیت، شکل و اندازه آسیب تطبیق خوبی با مشاهدات تجربی داشت. تحلیل تنش سرتاسر ضخامت ورق نشان داد که با انتشار بیشتر لایه لایه شدگی در بین سطوح، یک مقاومت به وسیله نیروی اصطکاک ناشی از تنش فشاری بالا، در سرتاسر ضخامت ایجاد می‌شود. زوگار و همکاران^۶ [۱۰] ورق کامپوزیت شیشه/پلیمر تک‌جهته تحت برخورد با انرژی پایین را بررسی کردند. آن‌ها یکسری تست‌های برخورد با انرژی پایین روی صفحات کامپوزیت انجام دادند و نیروی برخورد، خمس، اتلاف انرژی و میزان آسیب واردۀ را تحلیل کردند و نتایج مدل المان محدود توسعه داده شده را با مشاهدات تجربی از قبیل آسیب ایجاد شده در لایه‌های داخلی، وسعت ناحیه آسیب دیده و دیگر پاسخ‌های مکانیکی مقایسه کردند و نتایج مدل المان محدود آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. آن‌ها این مطالعه پارامتری را انجام دادند تا تأثیر طراحی پارامترهای مربوط روی پاسخ مکانیکی کامپوزیت لایه‌لایه با این بارگذاری برخورد را مورد توجه قرار دهند. علاوه بر روش اجزای محدود صیفوری [۱۱] برای بررسی اثر ضربه به نانو ساختارها از روش دینامیک مملوکی استفاده کردند. صیفوری و حاج عبدالهی [۱۲] اثر ضربه با مدل جرم و فنر برروی ورق گرافن را بررسی کردند. قاجار و رصفا [۱۳] اثر شکل ضربه زننده جرم بالا با سرعت پایین را بر روی کامپوزیت شیشه اپوکسی بررسی کردند. اکرامی و همکاران [۱۴] اثر ضربه سقوط آزاد پرتابه با دماغه‌های متفاوت را، بر روی اهداف گلر، به صورت تجربی انجام دادند. آنها نشان دادند بیشترین نیروی تماسی در برخورد با پرتابه‌های تحت بدست می‌آید.

تا کنون اکثر کارهایی که در مورد ضربات سرعت پایین انجام شده به وسیله ضربه‌زننده نیم کروی بوده است. برای شناخت کامل رفتار کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای، لازم است که پاسخ آن‌ها در مقابل اشکال دیگر ضربه‌زننده‌ها بررسی شود. در پژوهش حاضر اثر شکل ضربه زننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخورد سه شکل ضربه‌زننده کروی، مخروطی، تخت بررسی می‌شود. اثر شکل ضربه‌زننده بر زمان برخورد، بیشینه‌ی جایی مرکز ورق و بیشینه نیروی برخورد و میزان آسیب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- روابط و تئوری مسئله

مقدار جرم ضربه‌زننده نسبت به جرم هدف یکی از پارامترهای مهم در نحوه پاسخ ورق کامپوزیتی به پدیده ضربه است. تست استحکام صفحات کامپوزیت به طور مرسوم با استفاده از نمونه‌های کوچک با پرتابه‌های جرم بزرگ انجام

شکنندگی، تعییر و نگهداری و بازرسی سخت و همچنین حد تحمل خسارت پایین، از دیگر معایب این مواد به حساب می‌آیند. قطعات ماشین آلات صنعتی و سازه‌ها بیشتر اوقات علاوه بر این که تحت بارهای استاتیکی قرار دارند، تحت بارهای دینامیکی مخصوصاً ضربه نیز واقع می‌گردد. به عنوان مثال، می‌توان از سقوط وزنه روی تیر یا ورق یا هر عضو سازه‌ای، در حین کار سروپیس، تعییرات و نگهداری، تصادف قطعات با هم، برخورد سنگریزه‌های کف باند با بدن سازه هواپیماها در حین بلندشدن از باند و یا برخورد ذرات تگرگ به سازه‌های صنعتی نام برد. از طرف دیگر از آنجا که خسارت ناشی از ضربه سرعت پایین در سازه هدف قبل مشاهده نمی‌باشد لذا حتماً می‌باشد قبل از کاربری این مواد، تحلیل پاسخ این سازه‌ها تحت ضربه با سرعت پایین صورت پذیرد. رخداد ضربه شامل حرکت پرتابه، حرکت هدف و نیز تغییرشکل در محل برخورد دو جسم می‌باشد.

شیر و پن^۱ [۱] ضربه با سرعت پایین را روی صفحات کامپوزیت با استفاده از پرتابه‌های نیم کروی بررسی کردند. آن‌ها با بررسی سطح شکست نتیجه گرفتند که نمونه‌ها با توجه به الگو و میزان جدایش تحت تأثیر انرژی برخورد قرار می‌گیرند. ابریت^۲ [۳,۲] مطالعات وسیع و گسترده‌ای را روی مدل‌سازی و پاسخ موارد سازه‌های کامپوزیتی به بارهای ضربه‌ای در اثر تماس خارجی و نیز بررسی آسیب و کاهش استحکام باقیمانده و مدهای شکست انجام داد. اولسون^۳ [۴] جرم معیار برای پاسخ برخورد موج کنترل شده‌ی صفحات کامپوزیت را بررسی کرد. وی نشان داد که نوع پاسخ به وسیله نسبت جرم پرتابه به صفحه کنترل شده است، و پاسخ برخورد صفحه‌های ارتوتروپیک از یک معیار برای برخورد جرم کوچک (موج کنترل شده) نتیجه می‌شود. معیار منتشرشده برای برخورد جرم بزرگ (شباهستایک) مطرح شده است. برخوردهای جرم کوچک روی لایه‌لایه‌های کامپوزیت بحرانی‌تر از برخوردهای جرم بزرگ با همان انرژی نشان داده شده است. اولسون [۵] همچنین در مقاله‌ای دیگر یک راه حل با سه مورد تغییرشکل فرورفتگی، خمیش یا برش برای پیش‌بینی حداکثر بار و شروع لایه‌لایه‌شده‌ی صفحه‌های کامپوزیتی تحت برخورد جرم کوچک ارائه داد. وی راه حل را برای قانون تmas هر ترتیب، متناسب برای صفحه‌های یکپارچه و برای قانون تماس خطی، متناسب برای پتل‌های ساندویچی ارائه داد. فرولونی^۶ [۶] نایپایداری سازه‌های توالی تقویت شده تحت بار هیدرولاستاتیک خارجی را برای کاربردهای صنایع فضایی، به روش المان محدود و تجربی مورد مطالعه قرارداد. در این تحقیق سازه‌هایی از جنس الیاف کربن در اندازه‌ها و با آرایش‌های مختلف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای به دست آوردن روندی برای طراحی تمام مراحل، آزمایش‌ها به روش المان محدود شبیه‌سازی شد. به این ترتیب تحلیلی برای نایپایداری سازه تحت تأثیر هندسه المان‌ها بر مقاومت کمانشی سازه ارائه شد و سه مد کمانشی مشخص که بستگی مستقیم به ارتفاع سازه داشت، تشخیص داده شد. نتایج نمونه المان محدود آن‌ها با نتایج تجربی توانایی تقویت شده تحت بار هیدرولاستاتیک خارجی را برای کاربردهای صنایع فضایی، به روش المان محدود و تجربی مورد تغییرشکل فرورفتگی، لایه‌لایه‌شده‌ی ارائه داد. او نتایج را به وسیله یک راه حل عددی گام‌به‌گام سریع از ارتوتروپیک ارائه داد. او نتایج را به دست آورد و اندازه لایه‌لایه‌شده‌ی، نیرو و تاریخچه تغییرشکل را به وسیله توسعه یک مدل برخورد الاستیک پیش‌بینی کرد. پاک‌نژاد و همکاران [۸] اثرات بار ضربه‌ای با جرم کوچک و سرعت پایین روی

¹ Shier and Pan

² Abrate

³ Olsson

⁴ Frulloni

⁵ Zhang
⁶ Zouggar

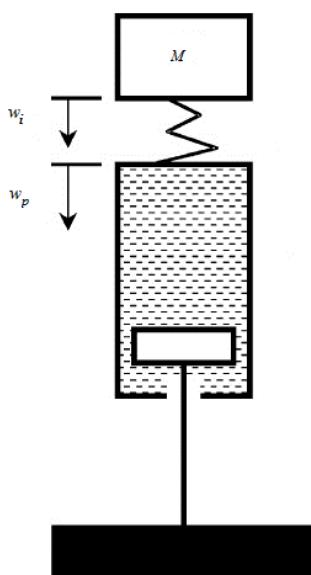


Fig. 2 spring mass model for small mass impact[5]

شکل 2 مدل جرم و فنر برخورد جرم کوچک[5]

در این رابطه R مقدار شعاع پرتاوه کروی است.

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_t} + \frac{1}{Q_p} \quad (4)$$

برای مقدار مدول موثر درجهت ضخامت خواهیم داشت:

$$Q_{ip} = E_z / (1 - v_z^2) \quad (5)$$

در این مقاله برای اولین بار، برای سختی تماس پرتاوهای محرومی و استوانه‌ای سرتخت، روابط جدیدی بر طبق قانون هرتز ارائه شده است. برای پرتاوه محرومی مطابق شکل 3 سختی تماس به صورت رابطه (6) پیشنهاد می‌گردد.

$$k_{\alpha C} = 2Q_H / (\pi(1 - v_p^2) \tan(\theta)) \quad (6)$$

در این رابطه v_p ضریب پواسون ورق کامپوزیت و θ زاویه بین صفحه و دیواره محروم است.

برای پرتاوه استوانه‌ای با سرتخت مطابق شکل 4 رابطه (7) پیشنهاد می‌شود.

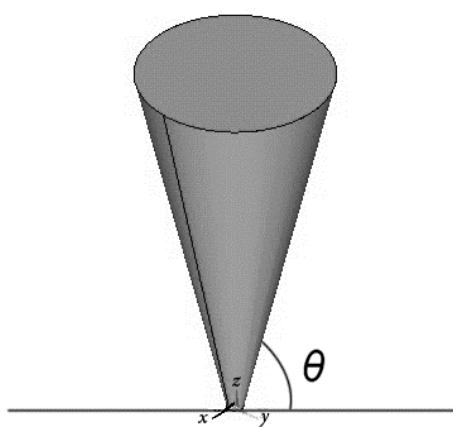


Fig.3 conical striker

شکل 3 پرتاوه محرومی

می‌شود. این قبیل برخوردها باعث یک پاسخ شبه‌استاتیک می‌شوند که نیروی تماس و مقدار خیز همانند رابطه ای که تحت یک بار استاتیک متوجه شستند، همانند شکل 1-a دارند. در این قبیل موارد پاسخ برخورد مستقل از اندازه لایه‌ها و شرایط مرزی است. در پرتاوهای جرم کوچک، از قبیل ذره‌های کف باند فرودگاه یا دانه‌های تگرگ نیروی تماس و مقدار خیز همانند شکل 1-b هستند، که در اصل مستقل از شرایط مرزی است [7].

یک جرم متوجه شده M با سرعت V_0 که به یک صفحه ارتوتروپیک با ضخامت h و دانسیته ρ برخورد می‌کند، که باعث فرورفتگی و نیروی تماسی F می‌شود. D^* و S^* به ترتیب سختی‌های موثر خمی و برشی صفحه هستند.

هنگامی که از اثرات برش صرف نظر شود، مدل جرم و فنر پاسخ به صورت شکل 2 می‌باشد، که M جرم پرتاوه، w_i جابه‌جایی پرتاوه و w_p عبارت است از مقدار جرم ورق در واحد مساحت برای هدف، و بنابراین از رابطه $m = \rho h$ بدست می‌آید.

بر طبق قانون هرتز و بر اساس کار انجام شده در [15] خواهیم داشت:

$$F = k_\alpha \alpha^q \quad (1)$$

که مقدار α مقدار تورفتگی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = w_i - w_p \quad (2)$$

بر طبق قانون تماسی هرتز برای یک پرتاوه کروی و یک تورفتگی دایره‌ای شکل و برای شرایط کاملاً الاستیک 1.5 است. در رابطه (1) مقدار k_α سختی تماس است که مطابق کار اولسون برای پرتاوهای کروی مطابق رابطه (3) است [16,5].

$$k_{\alpha S} = 4Q_H \sqrt{R} \quad (3)$$

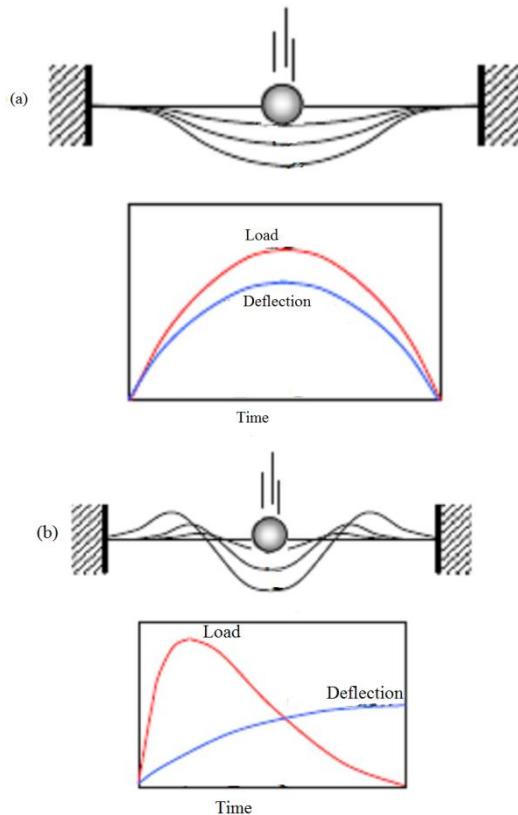


Fig. 1 comparison between (a) large mass and (b) small mass impact response [7]

شکل 1 مقایسه پاسخ ورق به جرم پرتاوه (a) جرم بزرگ (b) جرم کوچک [7]

where $\bar{F} = \bar{\alpha}^q$, $q = 3/2$

$$\bar{w}_p = \int_0^{\bar{t}} \bar{F}(\bar{t}) \lambda_n \frac{2}{\pi} \arctan[(\bar{t} - \bar{t})/\beta_n] d\bar{t} + \int_0^{\bar{t}-\bar{t}_0} \bar{F}(\bar{t}) \lambda_n \frac{2}{\pi} [2\beta_n/(\bar{t} + \bar{t}_0 - \bar{t})] d\bar{t} \quad (13)$$

حل چنین معادله‌ای به صورت مرحله‌به مرحله توسط ییموشینکو [17] داده شده است:

$$\alpha_0 = 0$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{N+1} &= (N+1)\Delta\bar{t} - \frac{1}{2}\Delta\bar{t}^2 \sum_{i=0}^N \bar{x}_i^q (2N-2i+1) \\ &\quad - \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^N \bar{x}_i^q \lambda_n [\Delta\bar{t}(N-i+1) \arctan\left\{\frac{N-i+1}{\beta_n} \Delta\bar{t}\right\} \\ &\quad - \frac{1}{2} \beta_n \ln\left\{\frac{\beta_n^2 + (N-i+1)^2 \Delta\bar{t}^2}{\beta_n^2 + (N-i)^2 \Delta\bar{t}^2}\right\}] \\ &\quad - \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{N_0} \bar{x}_i^q \lambda_n \beta_n \ln\{(N-i+1)/(N-i)\}] \\ N &= \frac{\bar{t}}{\Delta\bar{t}}, \quad N_0 = (\bar{t} - \bar{t}_0)/\Delta\bar{t} = N - k_{th}\bar{\alpha}_N/\Delta\bar{t} \end{aligned} \quad (14)$$

لازم به ذکر است برای محاسبه نیروی لازم برای لایه شدگی از رابطه (15) مطابق مرجع [7] استفاده می‌شود.

$$F_d = 1.213\pi\sqrt{32G_{HC}D^*/(n+2)} \quad (15)$$

در این رابطه n برابر است با تعداد لایه‌هایی که دچار لایه شدگی می‌شوند. مقدار ضریب G_{HC} در جدول (1) آورده شده است. هنگامیکه اولین لایه شدگی اتفاق می‌افتد $n=1$ خواهد شد. برای اینکه در کد نوشته شده لحظه‌ای که لایه شدگی اتفاق می‌افتد مشخص شود، در هر گام زمانی نیروی تنسی با رابطه (15) مقایسه شده و هنگامیکه این نیرو بزرگتر و یا مساوی با رابطه (15) شود، این رابطه جانشین نیروی تمسیح شده و روابط بر اساس رابطه (12) به روز رسانی می‌شوند. لازم به ذکر است برای پرتابه‌های مخروطی و تخت همانند روابط (6) و (7) سختی و بنابراین نیروی تنسی، تماماً بر اساس کار این مقاله بدست می‌آیند.

3- شبیه سازی عددی

مدل پرتابه و هدف، شامل یک ضربه‌زننده فولادی به جرم 3 گرم بر روی صفحه مستطیلی با ابعاد 152 در 102 میلی‌متر مربع با ضخامت‌های 6, 4, 2, 6 میلی‌متر ساخته شده از کامپوزیت کربن/اپوکسی با چیدمان لایه‌ای 65/65 [0°/90°/±45°] است. خواص صفحه ارتوتروپیک که در نرم افزار استفاده شده، در جدول 1 آمده است. تکیه‌گاه‌های صفحه به صورت گیردار می‌باشد. ضربه‌زننده کروی دارای شعاع 6 میلی‌متر، ضربه‌زننده تخت می‌باشد. ضربه‌زننده کروی دارای شعاع 6 میلی‌متر، ضربه‌زننده مخروطی دارای شعاع قاعده 6 میلی‌متر و ارتفاع 24 میلی‌متر، ضربه‌زننده مخروطی دارای شعاع قاعده 6 میلی‌متر و ارتفاع 24 میلی‌متر و زاویه $\theta = 77^\circ$ است و جرم ضربه‌زننده‌ها یکسان می‌باشد. برای حالت بدون آسیب یا خواص مشابه مدل‌سازی شده‌اند، با توجه به اینکه با تغییر زاویه الیاف در هر لایه خواص تغییر می‌کند اما در اینجا مطابق با شبیه‌سازی مرجع اولسون چون خواص تمام لایه‌ها یکجا از تست کشش بدست آمده است، خواص لایه‌ها را یکسان در نظر گرفته‌ایم و ضخامت هر لایه 0.25 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. صفحه با ضخامت 2 میلی‌متر با 8 لایه، ضخامت 4 میلی‌متر با 16 لایه و صفحه با ضخامت 6 میلی‌متر با 24 لایه مدل‌سازی شده

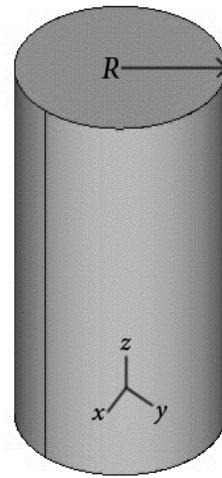


Fig.4 cylindrical striker

شکل 4 پرتابه استوانه‌ای

$$k_{\alpha F} = 2RQ_H \quad (7)$$

در این رابطه R شعاع قاعده پرتابه استوانه‌ای سرتخت است. حال برای هر پرتابه، سختی تماس مربوطه برای بدست آوردن معادله دیفرانسیل تورفتگی، α ، که در [5] داده شده است، جایگزین می‌شود. برای رابطه بین شتاب پرتابه و نیروی برخورد، همچنین برای مقدار سرعت ورق هدف مطابق شکل 2 خواهیم داشت:

$$\ddot{w}_i = -F/M \quad (8-\text{الف})$$

$$w_p = \frac{1}{8F} / \sqrt{mD^*} \quad (8-\text{ب})$$

از معادله (1) و (8- ب) یکبار مشتق گرفته و طرفین مساوی قرار داده می‌شوند:

$$\dot{F} = 8\dot{w}_p \sqrt{mD^*} = k_\alpha q \alpha^{q-1} \dot{\alpha} \quad (9)$$

از جایگذاری معادله (2) و (9) در مشتق دوم معادله (1) داریم:

$$\ddot{\alpha} = \ddot{w}_i - \ddot{w}_p = -\frac{k_\alpha q}{8\sqrt{mD^*}} \alpha^{q-1} \dot{\alpha} - \frac{k_\alpha}{M} \alpha^q \quad (10)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\ddot{\alpha} + \frac{qk_\alpha}{8\sqrt{mD^*}} \alpha^{q-1} \dot{\alpha} + \frac{k_\alpha}{M} \alpha^q = 0, \quad (11)$$

با معرفی پارامترهای بی بعد زیر میتوانیم معادله (11) را به صورت بی بعد

(معادله (12)) بنویسیم:

$$\bar{\alpha} = \alpha/(TV_0), \bar{W}_p = W_p 8\sqrt{mD^*}/(MV_0)$$

$$\lambda_n = (n+1)M/(8T\sqrt{mD^*}),$$

$$\beta_n = \sqrt{mD^*}/[(n+1)S^*T]$$

$$\bar{t} = \frac{t}{T}, \quad \bar{t}_0 = \frac{t_0}{T} = K_{th}\bar{\alpha}$$

$$T = [M/(K_{th}\sqrt{V_0})]^{2/5} \quad k_{th} = RV_0\sqrt{m/D^*}/4$$

$$\ddot{\alpha} + q\lambda\bar{\alpha}^{q-1}\dot{\alpha} + \bar{\alpha}^q = 0, \quad \bar{\alpha}(0) = 0, \quad \dot{\bar{\alpha}}(0) = 1 \quad (12)$$

S^* سختی برشی صفحه برابر است با $K S^* = KG_{rz}h$ که ضریب برشی

صفحه برابر $5/4$ و G_{rz} مدول برشی و h ضخامت ورق است. معادله (12) به صورت انتگرالی زیر درمی‌آید:

$$\bar{\alpha} = \bar{t} - \int_0^{\bar{t}} \bar{F}(\bar{t})(\bar{t} - \bar{t})d\bar{t} - \bar{w}_p$$

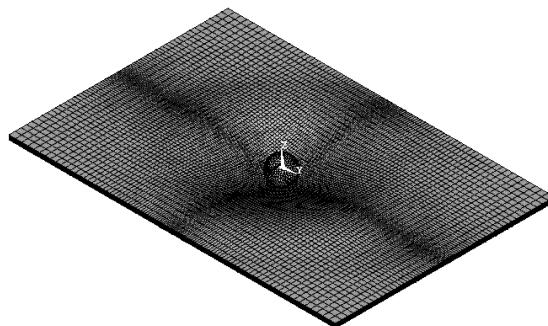


Fig. 6 Deformation shape of 2mm plate with spherical striker

شکل 6 تغییر شکل ورق با ضخامت 2 میلی‌متر و پرتابه کروی

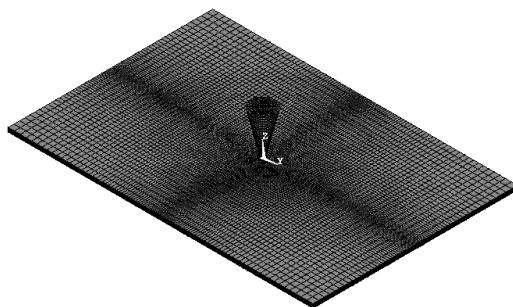


Fig. 7 Deformation shape of 2mm plate with conical striker

شکل 7 تغییر شکل ورق با ضخامت 2 میلی‌متر و پرتابه مخروطی

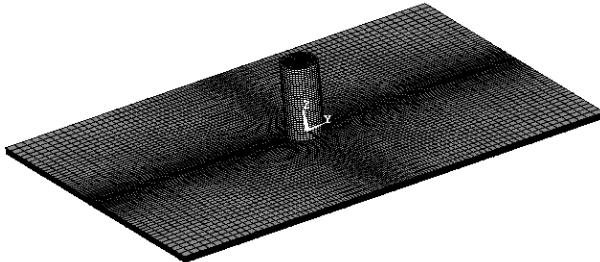


Fig. 8 Deformation shape of 2mm plate with cylindrical striker

شکل 8 تغییر شکل ورق با ضخامت 2 میلی‌متر و پرتابه استوانه‌ای

4- بررسی نتایج

در مطالعه انجام شده، ابتدا برخورد هر سه نوع ضربه‌زننده با جرم یکسان بر روی ورق کامپوزیت با ضخامت 2 میلی‌متر در سرعت برخورد 29.5 m/s برای هر دو حالت بدون لایه‌لایه‌شدن و با لایه‌لایه‌شدن به روش تحلیلی بررسی شده است. میزان جایه جایی مرکز ورق و تاریخچه نیروی تماس مطابق شکل‌های 9 تا 11 پیش‌بینی شده است.

مطابق نمودار شکل‌های 9 تا 11 در هر سه پرتابه در حالتیکه خسارت (لایه لایه شدگی) اتفاق می‌افتد، نیروی تماسی افت کرده و جایه جایی بیشتر شده است. علت این پیدیده خسارت ورق و در نتیجه کاهش سختی خمی ورق است. مقدار نیروی تماسی در حالتیکه پرتابه سر تخت است بیشتر بوده و جایه جایی مرکز هدف در این حالت کمتر است. این مورد پهاطر سطح تماس بیشتر در پرتابه سر تخت اتفاق افتاده است. لایه لایه شدگی، برای یک پرتابه مخروطی در شکل 12 نشان داده شده است.

برای مقایسه نتایج دو روش حل تحلیلی و عددی، نمودارهای تحلیلی و

است. در مدل‌های ساخته شده در این پژوهش هر یک از لایه‌های صفحه کامپوزیتی و همچنین پرتابه به شکل سه بعدی ساخته می‌شوند. با توجه به این که در هر ضخامت، نیروی لازم برای شروع جدایش لایه‌ها مهم است، با افزایش ضخامت هدف، سرعت پرتابه تا آنجا افزایش پیدا کرده تا اولین جدایش مشاهده گردد. بنابراین سرعت برخورد ضربه‌زننده به مرکز صفحه با ضخامت 2 میلی‌متر 29.5 m/s ، برای ضخامت 4 میلی‌متر 36.5 m/s و برای 6 میلی‌متر 51 m/s در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن این سرعتها همانند توضیحات ارائه شده در رابطه (15) سرعت شروع لایه لایه شدگی بدست آمده است.

لازم به ذکر است در این تحقیق تحلیل رفتار صفحه کامپوزیتی در برابر ضربه سرعت پایین به روش عددی با استفاده از بسته نرم‌افزاری اجزاء محدود انسپیس ال اس داینا انجام شده است. برای پرتابه فرض می‌شود، هیچ گونه تغییرشکلی نداده و صلب می‌باشد و مدل ماده صلب برای آن انتخاب شده است. پارامترهای مورد استفاده در این مدل ماده، چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. از آنجا که کامپوزیت کربن/اپوکسی تا نقطه شکست رفتار خطی دارد، مدل مکانیکی اوتوتربوپیک الاستیک برای آن انتخاب شده است. برای حالتی که آسیب و لایه‌لایه‌شدن ایجاد می‌شود هدف به صورت چندلایه مدل سازی شده است، بنابراین لایه‌های مختلف هدف با یکدیگر اتصال یافته‌اند. اگر تنش بین لایه‌ای (نرم‌مال یا برشی) میان دو لایه مجاور از استحکام‌های نرم‌مال یا برشی اتصال بیشتر شود، اتصال بین لایه‌ای تخریب می‌گردد. برای بیان مفهوم اتصال و تماس میان دو لایه مجاور، از الگوریتم سطح به سطح با قابلیت شکست لایه استفاده می‌شود. هنگام تعریف این نوع تماس، مقادیر استحکام کششی و برشی بین لایه‌ای اتصال نیز می‌باشد در نظر گرفته شود. که این مقادیر بر اساس خواص مکانیکی بین لایه ای در نظر $\sigma_n = 30 \text{ MPa}$ و $\tau_{ll} = 60 \text{ e-6 s}$ زمان کل برخورد $t = 100 \text{ MPa}$ است. در شکل 5 ثانیه در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی از مدل یک چهارم به علت تقارن موجود، برای استخراج نتایج استفاده شده است. این امر سبب کاهش زمان حل، به حدود یک چهارم زمان متناظر با مدل کامل می‌شود. در شکل 5 توزیع المان‌ها در مدل یک چهارم برای ورق با ضخامت 4 میلی‌متر برای پرتابه کروی نشان داده شده است. برای افزایش دقت جواب‌ها در اطراف ناحیه تماس، از المان‌هایی با ابعاد کوچک‌تر استفاده شده است. قابل ذکر است که شرط مرزی تقارن هم در لبه‌های مورد نیاز اعمال شده است.

در شکل‌های 7، 6 و 8 تغییر شکل ورق کامپوزیتی با ضخامت 2 میلی‌متر، به ترتیب برای پرتابه کروی، مخروطی و استوانه‌ای نشان داده شده است.

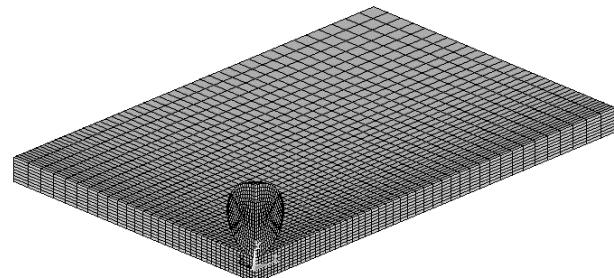


Fig. 5 Elements for plate with thickness of 4mm

شکل 5 المان‌ها برای ورق با ضخامت 4 میلی‌متر

شکل های 13 تا 15 به ترتیب برای پرتاوه‌های کروی، مخروطی و سرتخت استوانه‌ای آورده شده است.

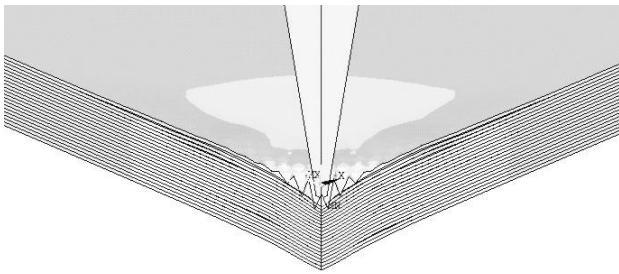


Fig.12 Delamination in composite plate with thickness 6mm and conical striker

شکل 12 لایه لایه شدگی برای صفحه کامپوزیتی با ضخامت 6mm و پرتاوه مخروطی

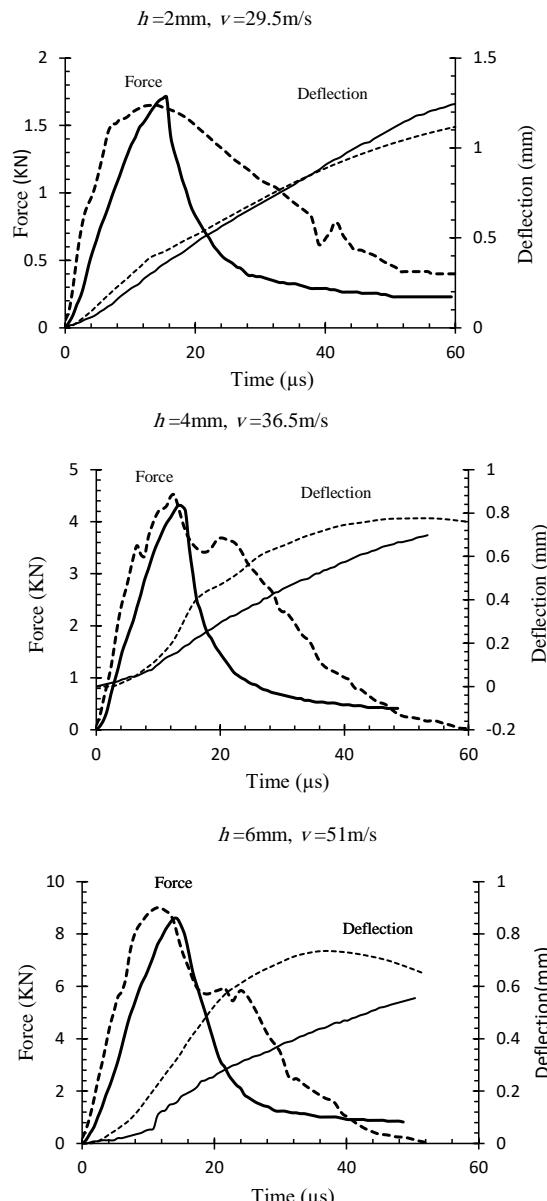


Fig.13 Time history of contact force and deflection with spherical striker with delamination in different velocity analytical (solid) and numerical (dotted) method

شکل 13 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابه‌جایی مرکز ورق در برخورد با پرتاوه کروی با لایه لایه شدگی در سرعتهای مختلف (خط، روش تحلیلی و خطچین روش عددی)

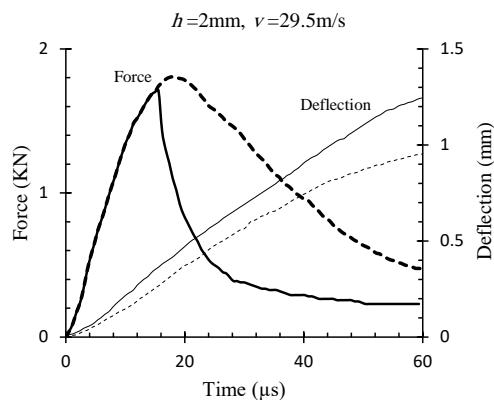


Fig.9 Time history of contact force and deflection with spherical striker from analytical result (with(solid) and without (dotted) delamination)

شکل 9 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابه‌جایی مرکز ورق با ضخامت 2 میلی‌متر در برخورد با پرتاوه کروی، حل تحلیلی (خط)، حالت با لایه لایه شدگی و خطچین، حالت بدون لایه لایه شدگی

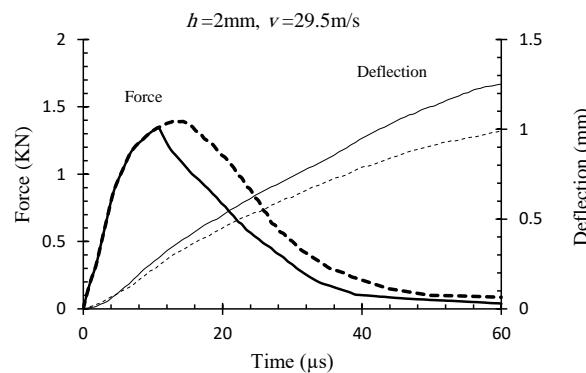


Fig.10 Time history of contact force and deflection with conical striker from analytical result (with(solid) and without (dotted) delamination)

شکل 10 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابه‌جایی در برخورد با پرتاوه مخروطی، حل تحلیلی (خط)، حالت با لایه لایه شدگی و خطچین، حالت بدون لایه لایه شدگی

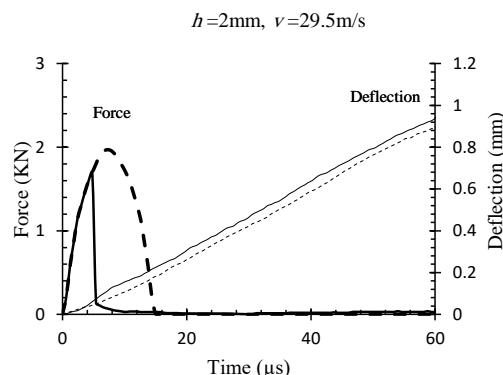


Fig.11 Time history of contact force and deflection with cylindrical striker from analytical result (with(solid) and without (dotted) delamination)

شکل 11 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابه‌جایی در برخورد با پرتاوه استوانه‌ای، حل تحلیلی (خط)، حالت با لایه لایه شدگی و خطچین، حالت بدون لایه لایه شدگی

عددی تاریخچه جابه‌جایی مرکز ورق و نیروی تماس برای هر کدام از پرتاوه‌ها برای حالتی که لایه لایه شدگی رخ می‌دهد و برای ضخامت‌های مختلف ورق و سرعت‌ها برخورد مربوط به هر ضخامت به صورت جداگانه در

جدول ۱ خواص ماده ورق کامپوزیتی

Table 1 Material properties of the composite plat

$E_r = E_x = E_y$	E_z	$G_r = G_{xy}$	$v_r = v_{xy}$	$v_{rz} = v_{xz} = v_{yz}$	τ_u	G_{IIC}	ρ چگالی
56 GPa	10 GPa	4.5 GPa	0.25	0.25	100 MPa	600 J/m ²	1600 kg/m ³

این وضعیت مطابق نمودارهای شکل 14 و 15 در ضخامت 6 میلیمتر برای پرتاوه‌های مخروطی و سرتخت نیز مشاهده می‌شود. علت این پدیده می‌تواند در نحوه تعریف الگوریتم تماس در شبیه سازی عددی باشد. در این الگوریتم پس از آنکه تنش بین لایه‌ای به مقدار لازم برای شکست لایه رسید، دیگر تماس بین آن لایه با لایه‌های مجاور حذف شده و در ضخامت 6

همانگونه که در شکل 13 مشاهده می‌شود، برای پرتاوه کروی نیروی برخورد (تماسی) برای هر سه ضخامت 2,4,6 در شبیه سازی تطابق خوبی با روش تحلیلی دارد. اما با افزایش ضخامت جایه جایی پیش‌بینی شده به روش عددی گرچه در نقطه پایانی تطابق مناسبی با روش تحلیلی دارد، اما بیشترین جایه جایی در روش عددی بیشتر است.

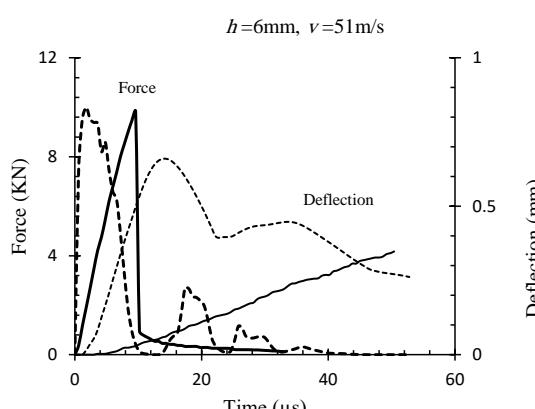
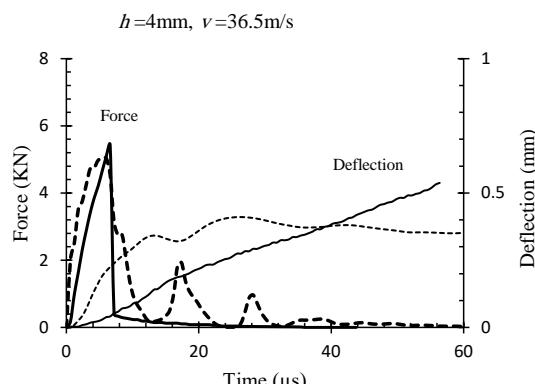
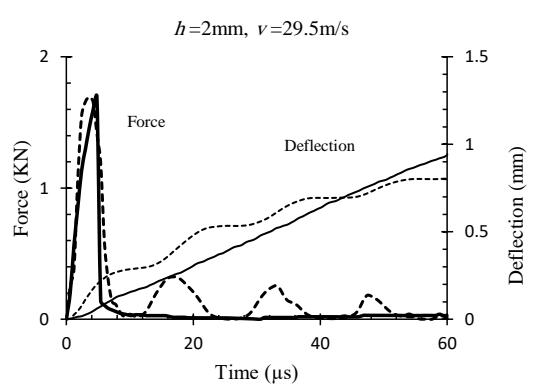


Fig.15 Time history of contact force and deflection with cylindrical striker with delamination in different velocity analytical (solid) and numerical (dotted) method

شکل ۱۵ نمودار تاریخچه نیرو تماس و جایه‌جایی مرکز ورق در برخورد با پرتاوه استوانه سرتخت با لایه لایه شدگی (خط، روش تحلیلی و خط‌چین روش عددی) مخروطی

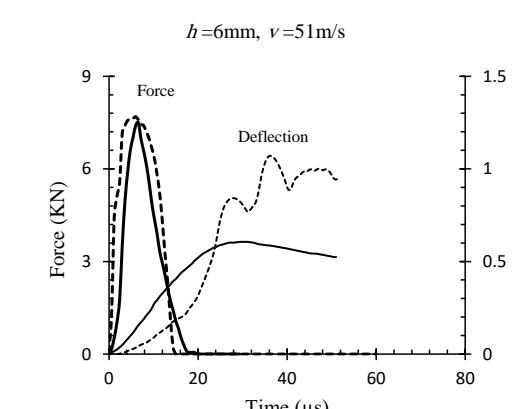
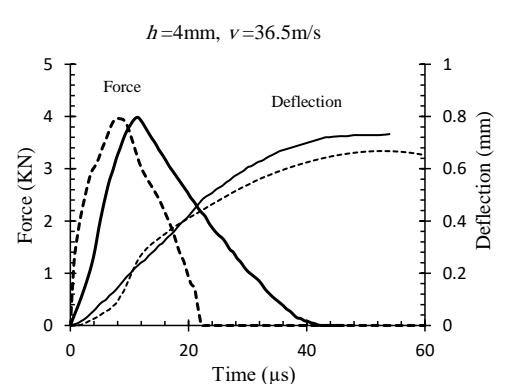
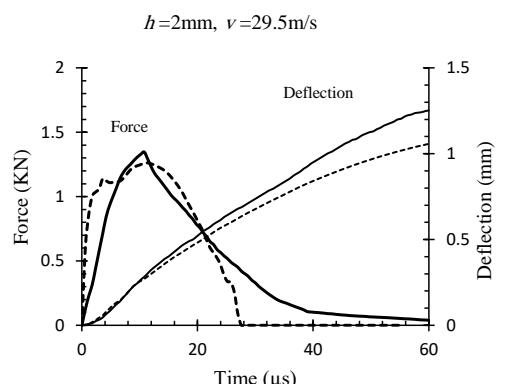


Fig.14 Time history of contact force and deflection with conical striker with delamination in different velocity analytical (solid) and numerical (dotted) method

شکل ۱۴ نمودار تاریخچه نیرو تماس و جایه‌جایی مرکز ورق در برخورد با پرتاوه با لایه لایه شدگی (خط، روش تحلیلی و خط‌چین روش عددی)

علایم یونانی

توفنگی ورق	α
نسبت پویایی در برش	β_n
نسبت پویایی در خمش	λ_n
ضریب پواسون	ν_z
زیرنویس‌ها	
پرتاوه	i
ورق	p
تعداد لایه‌لايهشدنگی	n

7- مراجع

- [1] T. W. Shyr, Y. H. Pan, Impact resistance and damage characteristics of composite laminates, *Composite Structure*, Vol. 62, No. 2, pp. 193–203, 2003.
- [2] S. Abrate, Modeling of impacts on composite structures, *Composite Structures*, Vol. 51, No. 2, pp. 129-138, 2001.
- [3] S. Abrate, Impact on laminated composites: Recent advance, *Applied Mechanics Review*, Vol. 47, No. 11, pp. 517-544, 1994.
- [4] R. Olsson, Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates, *Composites Part A*, Vol. 31, No. 8, pp. 879–887, 2000.
- [5] R. Olsson, Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact, *Composite Structures*, Vol. 59, No. 3, pp. 341–349, 2003.
- [6] E. Frulloni, J. M. Kenny, P. Conti, L. Torre, Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications, *Composite Structure*, Vol. 78, No. 4, pp. 519–528, 2007.
- [7] R. Olsson, Analytical model for delamination growth during small mass impact on plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, No. 21, pp. 2884–2892, 2010.
- [8] R. Paknejada, F. Ashenai Ghasemi, K. Malekzadeh Fard, Response of fullyclamped composite laminated plate subjected to low velocity impact using Galerkin method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 45-50, 2014. (In Persian)
- [9] J. Zhang, X. Zhang, Simulating low-velocity impact induced delamination in composites by a quasi-static load model with surface-based cohesive contact, *Composite Structures*, Vol. 125, No. 1, pp. 51-57, 2015.
- [10] K. Zouggar, F. B. Boukhoulda, B. Haddag, M. Nouan, Numerical and experimental investigations of S-Glass/Polyester composite laminate plate under low energy impact, *Composites, Parte B: Engineering*, Vol. 89, No. 7, pp. 169-186, 2016.
- [11] S. Seifoori, Molecular dynamics analysis on impact behavior of carbon nanotubes, *Applied Surface Science*, Vol. 326, No. 1, pp. 12–18, 2015.
- [12] S. Seifoori, H. Hajabdolahi, Impact behavior of single-layered graphene sheets based on analytical model and molecular dynamics simulation, *Applied Surface Science*, Vol. 351 , No. 7, pp. 565–572, 2015.
- [13] R .Ghajar, A .Rassaf, Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp.1-8, 2014. (In Persian)
- [14] M. Ekrami1, H. Ahmadi, M. Bayat1, H. Sabouri, Experimental study of projectiles with flat, conical and hemispherical nose shapes on low velocity impact on GLARE 3, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 109-118, 2017. (In Persian)
- [15] H. Suemasu, O. Majima, Multiple delaminations and their severity in circular axisymmetric plates subjected to transverse loading, *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 4, pp. 441–453, 1996.
- [16] R. Olsson, M. V. Donadon, B. G. Falzon, Delamination threshold load for dynamic impact on plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 10, pp. 3124–3141, 2006.
- [17] S. P. Timoshenko, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 62 , No. 1, pp. 198–209, 1913.

میلیمتر با 24 لایه این وضعیت نمود بیشتری پیدا می کند. بنابراین جابه جایی پیش‌بینی شده با حل تحلیلی متفاوت می شود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نخستین بار به بررسی اثر شکل ضربه‌زنده با جرم یکسان بر ورق کامپوزیتی در خصامت‌های مختلف و در سرعت‌های برشور متفاوت پرداخته شده است. طبق مطالعات انجام شده از حل تحلیلی و عددی در این پژوهش نتایج زیر بدست می‌آید:

در همه پرتاوه‌ها بیشینه جابه جایی در مرکز ورق با خصامت یکسان در هنگامی که لایه‌لايهشدنگی اتفاق می‌افتد، بیشتر از زمانی است که آسیبی رخ نمی‌دهد. هنگامی که لایه‌لايهشدنگی رخ می‌دهد در نمودار تاریخچه نیروی تماس یک افت ناگهانی اتفاق می‌افتد. همچنین طبق نتایج بدست آمده در همه پرتاوه‌ها بیشینه جابه جایی در مرکز ورق با خصامت یکسان در لایه‌لايهشدنگی و بدون لایه‌لايهشدنگی برای پرتاوه تخت در مقایسه با دیگر پرتاوه‌ها کمتر است و بلعکس بیشینه نیروی تماس برای هر دو حالت با لایه‌لايهشدنگی و بدون لایه‌لايهشدنگی برای پرتاوه‌های تخت در مقایسه با دیگر پرتاوه‌ها بیشتر است. که این نشان دهنده تاثیرشکل پرتاوه‌ها و سطح تماس کمتر این پرتاوه‌ها می‌باشد. در این میان خصامت ورق نیز اهمیت زیادی دارد بیشینه جابه جایی مرکز ورق در هر سه ضربه‌زننده و برای هر دو حالت با لایه‌لايهشدنگی و بدون لایه‌لايهشدنگی با افزایش خصامت ورق کاهش می‌یابد. چنان که در بخش نتایج مشاهده شد، هر چه خصامت ورق کمتر باشد میزان خیز در اثر برشور بیشتر است. اختلاف بیشینه تغییرشکل مرکز ورق در بین ورق‌ها با خصامت 2 میلی‌متر در پرتاوه‌های متفاوت نسبت به سایر خصامت‌ها، بیشتر می‌باشد و این اختلاف با افزایش خصامت کاهش می‌یابد. خصامت ورق تاثیر بیشتری نسبت به افزایش سرعت ضربه‌زننده در میزان خیز دارد. بیشینه نیروی تماس در هر سه ضربه‌زننده و برای هر دو حالت با لایه‌لايهشدنگی و بدون لایه‌لايهشدنگی با افزایش سرعت برشور افزایش می‌یابد.

6- فهرست علایم

سختی خمی ورق	D^*
مدول الاستیسته ورق	E_z
مدول برشی ورق	G_{rz}
خصامت ورق	h
سختی تماس ورق	K_α
عامل موثر سختی	Q_H
عامل موثر سختی پرتاوه	Q_i
عامل موثر سختی ورق	Q_p
سختی برشی ورق	S^*