ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

بررسی تحلیلی و عددی صفحات کامیوزیتی تحت بارگذاری ضربه ای سرعت یایین با یر تابههای متفاوت

 2 سجاد صيغورى 1* ، مرضيه حسينى

1- استاديار، مهندسي مكانيك، دانشگاه ولي عصر(عج)، رفسنجان 2- كارشناس ارشد، مهندسی مكانیک، دانشگاه ولی عصر(عج)، رفسنجان * رفسنجان، صندوق يستى sajjad.seifoori@vru.ac.ir ،518

چکیدہ	اطلاعات مقاله
بر پژوهش حاضر اثر شکل پرتابه بر روی پاسخ صفحات کامپوزیتی ارتوتروپیک به روش تحلیلی و عددی برای دو حالت بدون لایه لایه شدگی و با لایه لایه شدگی 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 پرتابه ها به ورق با استفاده از بسته اجزا محدود انسیس و ال اس داینا شبیه سازی شده است. کامپوزیت مورد استفاده از جنس کرین <i>ا</i> پوکسی است و ضخامت صفحه در اندازههای 2, 4, 6 میلی متر بررسی شده است. جرم ضربه زننده 3 گرم و سرعت برخورد برای هر ضخامت ورق متفاوت می باشد. برای بررسی اثر شکل پرتابه سه نوع ضربه زننده کروی، مخروطی و استوانه ای سر تخت مدلسازی شده است. زمان برخورد، بیشینه و تاریخچه جابه جایی مرکز ورق و نیروی تماس برای سه ضربه زننده 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 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 بنشتر از زمانیست که آسیبی رخ نمی دهد. همچنین طبق نتایج بدست آمده در این پژوهش با یکدیگر مقایسه شده است و نتایج دارای تطابق و بیشتر از زمانیست که آسیبی رخ نمی دهد. همچنین طبق نتایج بدست آمده در این پژوهش با یکدیگر مقایسه شده است و نتایج دارای تطابق و شدگر برای برتانه تخت در مقاسته با دیگر پتانه ها کرت است و مرکز ورق در هنگامی که لایه لایه در گان لایه لایه ای شریه ایه بری برای هر دورا بی بودون لایه لایه برین	, مقاله پژوهشی کامل دریافت: 80 آبان 1396 ارائه در سایت: 03 بهمن 1396 ورق کامپوزیتی برخورد جرم کوچک شبیه سازی عددی مدلسازی تحلیلی شکل ضربهزننده
یستانی برای پردید اعظام سایسه با دیگر پردید اعشار است و با دامل بیسید میروی مامل برای مراغو اعداد و با دول دید دید سالی برای پرتابه تخت بیشتر است.	

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

1- مقدمه

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

استفاده روز افزون از مواد کامیوزیتی، 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, U No. 02, pp. 53-60, 2018 (in Persian)



شکنندگی، تعمیر 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 مخصوصا ضربه نیز واقع میگردند. به عنوان مثال، میتوان از سقوط وزنه روی تیر یا ورق یا هر عضو سازه ای، در حین کار سرویس، تعمیرات و نگهداری، تصادف قطعات با هم، برخورد سنگریزههای کف باند با بدنه 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 قابل مشاهده نمیباشد لذا حتما میبایست 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.

شيير و پن [1] ضربه با سرعت پايين را روى صفحات كامپوزيت با استفاده از پرتابههای نیم کروی بررسی کردند. آنها با بررسی سطح شکست نتيجه گرفتند که نمونهها با توجه به الگو و میزان جدایش تحت تأثیر انرژی برخورد قرارمی گیرند. ابریت ۲ [3,2] مطالعات وسیع و گسترده ای 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" [4] جرم معيار برای پاسخ برخورد موج کنترل شدهی صفحات کامپوزیت را بررسی کرد. وی نشان داد که نوع پاسخ به وسیله نسبت جرم یرتابه به صفحه کنترل شده است، و پاسخ برخورد صفحههای ارتوتروپیک از یک معیار برای برخورد جرم کوچک (موج کنترل شده) نتیجه می شود. معیار منتشر شده برای برخورد جرم بزرگ (شبه استاتیک) مطرح شده است. برخوردهای جرم کوچک روی لایه لایه های کامپوزیت بحرانی تر از برخوردهای جرم بزرگ با همان انرژی نشان داده شده است. اولسون [5] همچنین در مقالهای دیگر یک راه حل با سه مورد تغییر شکل فرورفتگی، خمش یا برش برای پیش بینی حداکثر بار و شروع لایه لایه شدگی صفحه های کامپوزیتی تحت برخورد جرم کوچک ارائه داد. وی رامحلها را برای قانون تماس هرتز، متناسب برای صفحههای یکپارچه و برای قانون تماس خطی، متناسب برای پنلهای ساندویچی ارائه داد. فرولونی^۴ [6] ناپایداری سازههای توخالی تقویتشده تحت بار هیدرواستاتیک 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 ساختهشده و مورد آزمایش قرارگرفت. برای به دستآوردن روندی برای طراحی تمام مراحل، آزمایشها به روش المان محدود شبیه سازی شد. به این ترتیب تحلیلی برای ناپایداری سازه تحت تأثیر هندسه المانها بر مقاومت کمانشی سازه ارائه شد و سه مد کمانشی مشخص که بستگی مستقیم به ارتفاع سازه داشت، تشخيص داده شد. نتايج نمونه المان محدود آنها با نتايج تجربي توافق خوبي نشان مي دهد. اولسون [7] يک مدل تحليلي براي آغاز و رشد لايه لايه شدگي و پاسخ در طول برخورد جرم كوچك روى صفحات كامپوزيت ارتوتروپیک ارائه داد. او نتایج را به وسیله یک راهحل عددی گامبه گام سریع از یک معادله انتگرالی بدست آورد و اندازه لایه لایه شدگی، نیرو و تاریخچه تغییرشکل را به وسیله توسعه یک مدل برخورد الاستیک پیشبینی کرد. پاکنژاد وهمکاران [8] اثرات بار ضربهای با جرم کوچک و سرعت پایین روی

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 چندانی در نیروی تماسی و خیز ایجاد نمی گردد، در حالی که برای ضربه زننده جرم بزرگ، اختلاف در مقدار خیز قابل ملاحظه است. زهانگ⁶ [9] یک مدل المان محدود موثر برای پیشبینی آسیب برخورد سرعت پایین در کامپوزیتهای چندلایه با استفاده از مدل بارگذاری شبهاستاتیک با تماس پیوسته ارائه داد و تاثیر تنش فشاری در سرتاسر ضخامت ورق روی میزان لایه لایه شدگی را بهوسیلهی ارائه نیروی اصطکاک تماسی در جهت نیروی برشی محاسبه کرد. او شروع و انتشار آسیب در یک ورق کامپوزیت با لایه چینی s[903/03] را شبیه سازی کرد و نتایج عددی بدست آمده در ترمهای موقعیت، شکل و اندازه آسیب تطابق 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 می شود. زوگار و همکاران⁶ [10] ورق كامپوزيت شيشه/پليمر تكجهته تحت برخورد با انرژى پايين را بررسى کردند. آنها یکسری تستهای برخورد با انرژی پایین روی صفحات کامپوزیت انجام دادند و نیروی برخورد، خمش، اتلاف انرژی و میزان آسیب وارده 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 تاثیر طراحی پارامترهای مربوط روی پاسخ مکانیکی کامپوزیت لایه لایه با این بارگذاری برخورد را مورد توجه قرار دهند. علاوه بر روش اجزای محدود صیفوری[11] برای بررسی اثر ضربه به نانو ساختارها از روش دینامیک ملکولی استفاده کرده است. صیفوری و حاج عبدالهی[12] اثر ضربه با مدل جرم و فنر برروی ورق گرافن را بررسی کردند. قاجار و رصاف[13] اثر شکل ضربه زننده جرم بالا با سرعت پایین را بر روی کامپوزیت شیشه اپوکسی بررسی کردند. اکرامی و همکاران[14] اثر ضربه سقوط آزاد پرتابه با دماغه های متفاوت را، بر روی اهداف گلر، به صورت تجربی انجام دادند. آنها نشان دادند بیشترین نیروی تماسی در برخورد با پرتابه های تخت بدست می آيد.

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 جابه جایی مرکز ورق و بیشینه نیروی برخورد و میزان آسیب مورد بررسی قرار میگیرد.

2- روابط و تئوري 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

¹ Shier and Pan ² Abrate

³ Olsson

⁴ Frulloni

⁵ Zhang ⁶ Zouggar

می شود. این قبیل برخوردها باعث یک پاسخ شبه استاتیک می شوند که نیروی تماس و مقدار خیز همانند رابطه ای که تحت یک بار استاتیک متمرکز هستند، همانند شکل a-1 دارند. در این قبیل موارد پاسخ برخورد مستقل از اندازه لایه ها و شرایط مرزی است. در پر تابه های جرم کوچک، از قبیل ذره-های کف باند فرودگاه یا دانه های تگرگ نیروی تماس و مقدار خیز همانند شکل d-1 هستند، که در اصل مستقل از شرایط مرزی است [7].

یک جرم متمرکز شده M با سرعت Vo که به یک صفحه ارتوتروپیک با ضخامت h و دانسیته م برخورد میکند، که باعث فرورفتگی و نیروی تماسی F میشود. *D و *S به ترتیب سختیهای موثر خمشی و برشی صفحه هستند.

هنگامی که از اثرات برش صرف نظر شود، مدل جرم و فنر پاسخ به w_p مورت شکل 2 میباشد، که M جرم پرتابه، w_i جابهجایی پرتابه و m جابهجایی ورق است. k_α مقدار سختی تماس و m 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: $F = k_{\alpha} \alpha^{q}$ (1)

ر (1) که مقدار α مقدار تورفتگی از رابطه زیر بدست می آید: $\alpha = w_i - w_p$ (2)

q بر طبق قانون تماسی هرتز برای یک پرتابه کروی و یک تورفتگی دایرهای شکل و برای شرایط کاملا الاستیک 1.5 است. در رابطه (1) مقدار ka سختی تماس است که مطابق کار اولسون برای پرتابههای کروی مطابق رابطه (3) است [16,5].

(3)

 $k_{\alpha s} = 4Q_H \sqrt{R}$







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

شكل 1 مقايسه پاسخ ورق به جرم پرتابه a)جرم بزرگ b)جرم كوچك[7]



Fig. 2 spring mass model for small mass impact[5] شکل 2 مدل جرم و فنر برخورد جرم کوچک[5]





Fig.3 conical striker

شکل 3 پرتابه مخروطی

(13)

(14)

(15)

داده شده است:

q = 3/2

 $+\int_{0}^{\bar{t}-\bar{t}_{o}}\bar{F}(\bar{\tau})\lambda_{n}\frac{2}{\pi}[2\beta_{n}/(\bar{t}+\bar{t}_{o}-\bar{\tau})]d\bar{\tau}$

 $\bar{\alpha}_{N+1} = (N+1)\Delta \bar{t} - \frac{1}{2}\Delta \bar{t}^2 \sum_{i=1}^{N} \bar{x}_i^q (2N-2i+1)$

 $-\frac{1}{2}\beta_{n}\ln\{\frac{\beta_{n}^{2} + (N-i+1)^{2}\Delta\bar{t}^{2}}{\beta_{n}^{2} + (N-i)^{2}\Delta\bar{t}^{2}}\}] \\ -\frac{4}{\pi}\sum_{i=0}^{N_{0}}\alpha_{i}^{q}\lambda_{n}\beta_{n}\ln\{(N-i+1)/(N-i)\}$

 $N = \frac{\iota}{\Delta \bar{t}}$, $N_0 = (\bar{t} - \bar{t}_0) / \Delta \bar{t} = N - k_{th} \bar{\alpha}_N / \Delta \bar{t}$

لازم به ذکر است برای محاسبه نیروی لازم برای لایه لایه شدگی از

در این رابطه n برابراست با تعداد لایه هایی که دچار لایه لایه شدگی می شوند. مقدار ضریب Guc در جدول (1) آورده شده است. هنگامیکه اولین

لایه لایه شدگی اتفاق می افتد n=1 خواهد شد. برای اینکه در کد نوشته

شده لحظه ای که لایه لایه شدگی اتفاق می افتد مشخص شود، در هر گام

زمانی نیروی تماسی با رابطه (15) مقایسه شده و هنگامیکه این نیرو بزرگتر و یا مساوی با رابطه (15) شود، این رابطه جانشین نیروی تماس شده و روابط بر اساس رابطه (12) به روز رسانی می شوند. لازم به ذکر است برای پرتابه

های مخروطی و تخت همانند روابط (6) و (7) سختی و بنابراین نیروی

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 2, 4, 6

رابطه (15) مطابق مرجع [7] استفاده مي شود.

تماسی، تماما بر اساس کار این مقاله بدست می آیند.

3- شبیه سازی عددی

حل چنین معادله ای به صورت مرحله به مرحله توسط تیموشینکو [17]

+ 1) $\arctan\left\{\frac{N-i+1}{\beta}\Delta \bar{t}\right\}$

 $\overline{w}_p = \int_0^{\overline{t}} \overline{F}(\overline{t}) \,\lambda_n \frac{2}{\pi} \arctan[(\overline{t} - \overline{t})/\beta_n] d\overline{t}$

 $-\frac{2}{\pi}\sum_{i=1}^{N}\bar{x}_{i}^{q}\,\lambda_{n}[\Delta\bar{t}(N-i$

 $\Delta \bar{t}(N-i) \arctan\left\{\frac{N-i}{\beta_n}\Delta \bar{t}\right\}$

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

where $\overline{F} = \overline{\alpha}^q$,

 $\alpha_0 = 0$



Fig.4 cylindrical striker

~1.

شکل 4 پرتابه استوانه ای

 $k_{\alpha F} = 2RQ_{\rm H}$ (7) در این رابطه *R* شعاع قاعده پرتابه استوانه ای سرتخت است. حال برای

هر پرتابه، سختی تماس مربوطه برای بدست آوردن معادله دیفرانسیل تورفتگی، ۵، که در [5] داده شده است، جایگزین می شود.

برای رابطه بین شتاب پرتابه و نیروی برخورد، همچنین برای مقدار سرعت ورق هدف مطابق شکل 2 خواهیم داشت:

$$\dot{v}_i = -F/M$$
 (J-8)

$$v_p = \frac{1}{8F} / \sqrt{mD^*} \tag{8-2}$$

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

$$\dot{F} = 8\ddot{w}_{\rm p}\sqrt{mD^*} = k_{\alpha}q\alpha^{q-1}\dot{\alpha}$$
(9) از جایگذاری معادله (2) و (9) در مشتق دوم معادله (1) داریم:

$$\ddot{\alpha} = \ddot{w}_{i} - \ddot{w}_{p} = -\frac{k_{\alpha}q}{8\sqrt{mD^{*}}}\alpha^{q-1}\dot{\alpha} - \frac{k_{\alpha}}{M}\alpha^{q}$$
(10)

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\ddot{\alpha} + \frac{q\kappa_{\alpha}}{8\sqrt{mD^*}} \alpha^{q-1} \dot{\alpha} + \frac{\kappa_{\alpha}}{M} \alpha^q = 0,$$

$$\alpha(0) = 0 \quad , \dot{\alpha}(0) = V_0 \tag{11}$$

(معادله(12)) بنويسي

$$\begin{split} \bar{\alpha} &= \alpha/(TV_0), W_{\rm P} = W_{\rm P} 8 \sqrt{mD^*} / (MV_0) \\ \lambda_n &= (n+1)M/(8T\sqrt{mD^*}), \\ \beta_n &= \sqrt{mD^*} / [(n+1)S^*T \\ \bar{t} &= \frac{t}{T}, \ \bar{t}_0 &= \frac{t_0}{T} = K_{\rm tH} \bar{\alpha} \\ T &= [M/(K_\alpha \sqrt{V_0}]^{2/5} \quad k_{\rm tH} = RV_0 \sqrt{m/D^*}/4 \\ \bar{\alpha} + q\lambda \bar{\alpha}^{q-1} \bar{\alpha} + \bar{\alpha}^q = 0, \ \bar{\alpha}(0) = 0, \ \bar{\alpha}(0) = 1 \\ \bar{\alpha} &= \chi(12) \\ S^* = KG_{\rm rz}h \ \chi(12) \ \chi(12) \\ S^* = KG_{\rm rz}h \ \chi(12) \ \chi(12)$$

صفحه برابر 5/4 و Grz مدول برشی و h ضخامت ورق است. معادله(12) به صورت انتگرالی زیر درمیآید:

$$\bar{\alpha} = \bar{t} - \int_0^{\bar{t}} \bar{F}(\bar{\tau})(\bar{t} - \bar{\tau})d\bar{\tau} - \bar{w}_{\rm p}$$

میلیمتر ساخته شده از کامپوزیت کربن/ اپوکسی با چیدمان لایهای ₆₅[°45±/°90/°0] است. خواص صفحه ارتوتروپیک که در نرم افزار استفاده شده، در جدول 1 آمده است. تکیهگاههای صفحه به صورت گیردار

استفاده شده، در جدول 1 آمده است. تکیه گاههای صفحه به صورت گیردار می باشد. ضربه زننده کروی دارای شعاع 6 میلی متر، ضربه زننده تخت (استوانه ای) دارای شعاع قاعده 6 میلی متر و ارتفاع 24 میلی متر، و ضربه زننده مخروطی داری شعاع قاعده 6 میلی متر و ارتفاع 24 میلی متر و زاویه مخروطی داری شعاع قاعده 6 میلی متر و ارتفاع 24 میلی متر و زاویه (استوانه ای) دارای شعاع قاعده 6 میلی متر و ارتفاع 24 میلی متر و زاویه مخروطی داری شعاع قاعده 6 میلی متر و ارتفاع 24 میلی متر و زاویه روق کامپوزیت به صورت یک لایه مدل سازی شده است، اما برای شبیه سازی بر خورد با ایجاد آسیب و لایه لایه شده است، اما برای شبیه سازی با خواص مشابه مدل سازی شده اند، با توجه به اینکه با تغییر زاویه الیاف در هر لایه خواص تغییر می کند اما در اینجا مطابق با شبیه سازی مرجع اولسون چون خواص تمام لایه ها یکجا از تست کشش بدست آمده است، خواص لایه ها را یکسان در نظر گرفته ایم و ضخامت هر لایه 20.5 میلی متر در نظر گرفته شده است. صفحه با ضخامت 2 میلی متر با 38 لایه، ضخامت 4 میلی متر با 16 لایه و صفحه با ضخامت 6 میلی متر با 24 لایه مدل سازی شده

است. در مدلهای ساخته شده در این پژوهش هر یک از لایههای صفحه کامپوزیتی و همچنین پرتابه به شکل سه بعدی ساخته می شوند. 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 خدایش مشاهده گردد. بنابراین سرعت برخورد ضربهزننده به مرکز صفحه با ضخامت 2 میلی متر 29.5m/s، برای ضخامت 4 میلی متر 86.5m/s و برای 6 میلی متر 85m/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 دراین تحقیق تحلیل رفتار صفحه کامپوزیتی در برابر ضربه سرعت یایین به روش عددی با استفاده از بسته نرمافزاری اجزاءمحدود انسیس ال اس داینا انجام شده است. برای پرتابه فرض می شود، هیچ گونه تغییر شکلی نداده و صلب می باشد 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 اورتوتروپیک الاستیک برای آن انتخاب شده است. برای حالتی که آسیب و لایه لایه شدگی ایجاد می شود هدف به صورت چندلایه مدلسازی شده است، بنابراین لایههای مختلف هدف با یکدیگر اتصال یافتهاند. اگر تنش بین لایهای (نرمال یا برشی) میان دو لایه مجاور از استحکامهای نرمال یا برشی اتصال بیشتر شود، اتصال بین لایهای تخریب مى گردد. براى بيان مفهوم اتصال و تماس ميان دو لايه مجاور، از الگوريتم سطح به سطح با قابلیت شکست لایه استفاده می شود. هنگام تعریف این نوع تماس، مقادیر استحکام کششی و برشی بین لایه ای اتصال نیز میبایست در نظر گرفته شود. که این مقادیر بر اساس خواص مکانیکی بین لایه ای در نظر گرفته برای هدف کامپوزیت برابر است ب $\sigma_{
m n}=30{
m MPa}$ و و زمان کل برخورد t=60e-6s و زمان کل برخورد au_u = 100MPa است. در شبیه سازی 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 می شود. در شکل 5 توزیع المان ها 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 کوچک تر استفاده شده است. قابل ذکر است که شرط مرزی تقارن هم در لبههای مورد نیاز اعمال شدهاست.

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



Fig. 5 Elements for plate with thickness of 4mm شكل 5 المانها براى ورق با ضخامت 4 ميلىمتر



Fig. 6 Deformation shape of 2mm plate with spherical striker شکل 6 تغییر شکل ورق با ضخامت 2 میلی متر 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 میلی متر و پرتابه استوانه ای

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 29.5m/s برای هر دو حالت بدون لایهلایهشدن و با لایهلایهشدن به روش تحلیلی بررسی شده است. میزان جابه جایی مرکز ورق و تاریخچه نیروی تماس مطابق شکل های 9 تا 11 پیش بینی شده است.

مطابق نمودار شکل های 9 تا 11 در هر سه پرتابه در حالتیکه خسارت (لایه لایه شدگی) اتفاق می افتد، نیروی تماسی افت کرده و جابه جایی بیشتر شده است. علت این پدیده خسارت ورق و در نتیجه کاهش سختی خمشی ورق است. مقدار نیروی تماسی در حاتیکه پرتابه سر تخت است بیشتر بوده و جابه جایی مرکز هدف در این حالت کمتر است. این مورد بخاطر 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



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

شکل 12 لایه لایه شدگی برای صفحه کامپوزیتی با ضخامت 6mm و پرتابه 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 پرتابه 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 پرتابه 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) شكل 10 نمودار تاريخچه نيرو تماس و جابهجايى در برخورد با پرتابه مخروطى، حل تحليلى(خط، حالت با لايه لايه شدگى و خطچين، حالت بدون لايه لايه شدگى)

h=2mm, v=29.5m/s



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 پرتابه استوانه ای، حل تحلیلی(خط، حالت با لایه لایه شدگی و خطچین، حالت بدون لایه لایهشدگی)

عددی تاریخچه جابه جایی مرکز ورق و نیروی تماس برای هر کدام از پرتابهها برای حالتی که لایهلایهشدگی رخ میدهد و برای ضخامتهای مختلف ورق و سرعتها برخورد مربوط به هر ضخامت به صورت جداگانه در

جدول 1 خواص ماده ورق كامپوزيتي

Table 1 Material	proper	ties of	the com	posite	plat

$E_r = E_x = E_y$	E_z	$G_r = G_{xy}$	$v_r = v_{xy}$	$v_{rz} = v_{xz} = v_{yz}$	$ au_{\mathrm{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 نمودارههای شکل 14 و 15 در ضخامت 6 میلیمتر برای پرتابه های مخروطی و سرتخت نیز مشاهده می شود. علت این پدیده می تواند در نحوه تعریف الگوریتم تماس در شبیه سازی عددی باشد. در این الگوریتم پس از آنکه تنش بین لایه ای به مقدار لازم برای شکست لایه رسید، دیگر تماس بین آن لایه با لایه های مجاور حذف شده و در ضخامت 6





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

شکل 15 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابهجایی مرکز ورق در برخورد با پرتابه استوانه سر تخت با لایه لایه شدگی (خط، روش تحلیلی و خطچین روش عددی) همانگونه که در شکل 13 مشاهده می شود، برای پرتابه کروی نیروی برخورد(تماسی) برای هر سه ضخامت 2,4,6 در شبیه سازی تطابق خوبی با روش تحلیلی دارد. اما با افزایش ضخامت جابه جایی پیش بینی شده به روش عددی گرچه در نقطه پایانی تطابق مناسبی با روش تحلیلی دارد، اما بیشترین جابه جایی در روش عددی بیشتر است.





h = 6mm, v = 51m/s



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

شکل 14 نمودار تاریخچه نیرو تماس و جابهجایی مرکز ورق در برخورد با پرتابه مخروطی با لایه لایه شدگی (خط، روش تحلیلی و خطچین روش عددی)

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

5- نتیجه گیری

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

در همه پرتابه ها بیشینه جابه جایی در مرکز ورق با ضخامت یکسان در هنگامی که لایهلایهشدگی اتفاق میافتد، بیشتر از زمانی است که آسیبی رخ نمیدهد. هنگامی که لایهلایه شدگی رخ میدهد در نمودار تاریخچه نیروی تماس یک افت ناگهانی اتفاق می افتد. همچنین طبق نتایج بدست آمده بیشینه جابه جایی در مرکز ورق با ضخامت یکسان برای هر دوحالت با لایهلایه شدگی و بدون لایه لایه شدگی برای پرتابه تخت در مقایسه با دیگر پرتابهها کمتر است و بلعکس بیشینه نیروی تماس برای هر دو حالت با لایهلایه شدگی و بدون لایه لایه شدگی برای پرتابه های تخت در مقایسه با دیگر یرتابهها بیشتر است. که این نشان دهنده تاثیرشکل پرتابهها و سطح تماس کمتر این پرتابه ها میباشد. در این میان ضخامت ورق نیز اهمیت زیادی دارد بیشینه جابهجایی مرکز ورق در هر سه ضربهزننده و برای هر دو حالت با لايهلايه شدگي و بدون لايه لايه شدگي با افزايش ضخامت ورق كاهش مييابد. چنان که در بخش نتایج مشاهده شد، هر چه ضخامت ورق کمتر باشد میزان خیز در اثر برخورد بیشتر است. اختلاف بیشینه تغییرشکل مرکز ورق در بین ورقها با ضخامت 2 میلیمتر در پرتابه های متفاوت نسبت به سایر ضخامتها، بیشتر می باشد و این اختلاف با افزایش ضخامت کاهش می یابد. ضخامت 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 لایهلایه شدگی و بدون لايه لايه شدكي با افزايش سرعت برخورد افزايش مي يابد.

6- فهرست علايم

D* سختی خمشی ورق

- مدول الاستيسته ورق E_z
 - مدول برشی ورق *G_{rz}*
 - م ضخامت ورق h
 - سختی تماس ورق Ka
 - عامل موثر سختی Q_H
- عامل موثرسختى پرتابه Q_i
- عامل موثرسختی ورق Q_p
 - S* سختی برشی ورق

علايم يونانى

α	تورفتگی ورق
β_n	نسبت پویایی در برش
λ_n	نسبت پویایی در خمش
ν_z	ضريب پواسون
زيرنويس	ها
i	پرتابه
p	ورق

p ورق n تعداد لايەلايەشدگى

لغداد ديه ديه سد تي

7- مراجع

- 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 فارسی)
- [9] J. Zhang, X. Zhang, Simulating low-velocity impact iduced 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, Numberical 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 فارسى)
- [14] M. Ekramil, H. Ahmadi, M. Bayatl, 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 نفار سي)
- [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.