



تحلیل عددی مودهای شکست صفحه کامپوزیتی تحت تاثیر ضربه تگرگ

شکووفه دولتی¹، جلیل رضایی پزند^{2*}، محمود شریعتی²

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، jrezaeep@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1396

پذیرش: 13 آبان 1396

ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:

مواد کامپوزیت

بارگذاری ضربه

تگرگ

شبیه سازی عددی

چکیده

در این تحقیق به تحلیل عددی مودهای شکست تحت بارگذاری ضربه تگرگ پرداخته شده است. تگرگ به دلیل ماهیت جامد و حجم بالای آب در آن، در مقایسه با باران و برف، یک خطر جدی برای هواپیما است. در پژوهش حاضر ابتدا به صحت سنجی مدل سازی عددی سازه کامپوزیت با نرم افزار المان محدود ال اس داینا تحت ضربه پرتابه صلب فولادی پرداخته شده است و سپس بارگذاری ضربه تگرگ مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر در چیدمان صفحه کامپوزیت، تغییر سرعت و شکل پرتابه از پارامترهای مورد بررسی هستند. مقایسه نتایج بین پرتابه صلب و تگرگ با جرم و سرعت یکسان نشان داد فقط مود کششی ماتریس در برخورد پرتابه تگرگ رخ می دهد، در حالی که در برخورد پرتابه صلب همه مودهای شکست مشاهده می شود. از طرفی با افزایش زاویه چیدمان، آستانه سرعت آسیب در بارگذاری ضربه تگرگ افزایش می یابد. بیشترین و کمترین آسیب در چیدمان $\pm 15^\circ$ و $\pm 45^\circ$ مشاهده شد. همچنین با افزایش سرعت پرتابه تگرگ تعداد بیشتری از لایه ها دچار آسیب می شوند. ضربه تگرگ استوانه ای در مقایسه با تگرگ گروی سبب آسیب بیشتری در سازه کامپوزیت می شود.

A Numerical study of failure modes of a composite plate subjected to hail ice impact

Shokoofeh Dolati, Jalil Rezaee Pazhand*, Mahmoud Shariati

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, jrezaeep@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 August 2017

Accepted 04 November 2017

Available Online 01 December 2017

Keywords:

Composite Materials

Impact Loading

Ice Impact

Numerical Simulation

ABSTRACT

Numerical investigation of failure modes of composite plates subjected to the hail ice impact presented in this paper. Compare to rain and snow, hail is known as a serious threat to the aircraft exterior structure and engine due to its high density. First, numerical simulation of composite plate subjected to a rigid projectile impact is conducted using commercial finite element software, LS-DYNA and validated with previous investigations. After validation, a numerical study is performed for a composite plate subjected to the hail impact and the effect of stacking sequences of composite plate, velocity and shape of projectile are investigated. Results show, for identical mass and velocity, only the matrix extensional mode occurs in hail impact while for the rigid impact all failure modes are observed. Also, increased fiber angle produced higher damage threshold velocity in ice impact. Highest and lowest damage showed for $\pm 15^\circ$ and $\pm 45^\circ$ orientations. Moreover, it has been observed that more layers damaged with larger velocity ice impact. Result illustrate that the cylindrical shape hail caused more damage compared with hemispherical shape.

1- مقدمه

در دهه های اخیر کامپوزیت های تقویت شده با الیاف به دلیل خواصی همچون چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری شیمیایی ذاتی در دمای محیط و خواص مکانیکی بالا، به منظور ساخت سازه هایی با قابلیت های ویژه به کار می روند و به طور گسترده در کاربردهای مهندسی با وزن سبک، به ویژه در طراحی و ساخت هواپیما و سایر سازه های هوایی مورد توجه قرار گرفته اند [1]. کامپوزیت ها در مقایسه با فلزات خواص بسیار خوبی را نشان می دهند؛ اما یک نگرانی دائم در سازه های کامپوزیتی، خیلی بیشتر از سازه های فلزی، بارگذاری ضربه ناشی از اجسام خارجی است که سبب خسارت های داخلی نظیر میکروترک ها در سازه شده و این امر به طور مؤثر استحکام سازه را کاهش می دهد و با گسترش آن می تواند منجر به شکست سازه

کامپوزیت شود [2]. پدیده ضربه در طراحی سازه های هوایی شامل: سقوط ابزار بر روی سازه ها در هنگام ساخت (جرم بالا و سرعت اندک)، ضربه لاستیک یا تگرگ در هنگام فرود یا پرواز (جرم پایین و سرعت بالا) و برخورد پرنده در هنگام پرواز (جرم بالا و سرعت بالا) می باشد [3]. با توجه به گسترش روز افزون کامپوزیت ها، استفاده گسترده از آن ها در صنعت هوایی از قبیل سازه های پرواز، بال و بدنه، تیغه های بالگرد، ورودی موتور و غیره مشاهده می شود. در این سازه ها، بارگذاری های غیرقابل پیش بینی به وقوع می پیوندد که به طور جدی می تواند عملکرد آن ها را تحت تاثیر قرار دهد. یکی از این بارگذاری های طبیعی غیرمنتظره و تهدیدآمیز، برخورد اجسام انعطاف پذیر از قبیل پرنده و تگرگ است که ضربه زننده دچار تغییر شکل زیادی شده و روی ساختار جاری می شود. در چنین برخوردهایی

Please cite this article using:

Sh. Dolati, J. Rezaee Pazhand, M. Shariati, A Numerical study of failure modes of a composite plate subjected to hail ice impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 77-86, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sh. Dolati, J. Rezaee Pazhand, M. Shariati, A Numerical study of failure modes of a composite plate subjected to hail ice impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 77-86, 2018 (in Persian)

علاوه بر یک ضربه، تحت سه ضربه متوالی نیز قرار گرفتند. بررسی مودهای شکست نشان داد نمونه‌های با الیاف‌شیشه بافته‌شده مقاومت بالاتری نسبت به الیاف‌شیشه نمدی دارند. همچنین زاویه چینش $\pm 45^\circ$ بهترین نتایج را نشان داد.

به دلیل ماهیت فیزیکی پیچیده مودهای شکست مشاهده شده در مواد کامپوزیت و به منظور پیش‌بینی آسیب ناشی از دینامیک ضربه یا حوادث برخورد، چندین کُد المان محدود مانند: ال‌اس‌داین⁷، آباکوس⁸ و پام-کراش⁹ ارائه شده است که در بین آن‌ها ال‌اس‌داین چندین مدل را برای شبیه‌سازی مواد کامپوزیت در نظر گرفته که عبارتند از: مدل‌های ماده 22¹⁰ و 54/55¹¹ که آسیب پیش‌رونده را با یک روش تخریب و بر اساس خواص الاستیک ماده مدل می‌کنند. علاوه بر این مدل‌های ماده 58¹²، 158¹³ و 162¹⁴ از مکانیک شکست پیوسته برای توصیف رفتار گسیختگی مواد بهره می‌گیرند [12,11]. با توجه به اینکه در پژوهش‌های پیشین به شبیه‌سازی سازه‌های کامپوزیت با الیاف بافته‌شده پرداخته شده است، در این پژوهش بر آن شدیم شبیه‌سازی بارگذاری ضربه تگرگ روی سازه‌های کامپوزیتی با الیاف تک‌جهته بر اساس این مدل‌های ماده انجام شود.

2- مدل‌سازی و صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی

مدل ماده 54 به طور گسترده در صنعت هوایی برای شبیه‌سازی مواد کامپوزیت تحت آسیب پیش‌رونده¹⁴ در شرایط سقوط و همچنین برخورد اجسام خارجی استفاده می‌شود [13]. این مدل ماده همچنین برای شبیه‌سازی آسیب در سازه‌های با مقیاس بزرگ نیز به کار می‌رود؛ زیرا یک مدل ماده نسبتاً ساده است که به حداقل پارامترهای ورودی نیاز دارد و علاوه بر کاهش حجم محاسبات، تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای دستیابی به پارامترهای ورودی را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مدل ماده 54 به طور خاص برای شبیه‌سازی مواد آرتوتروپیک با خواص متفاوت در جهت طولی و عرضی، مانند چندلایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته طراحی شده است [12,11]. به منظور مدل‌سازی خرابی درون‌لایه‌ای (ترک در ماتریس و شکست الیاف) از معیار چنگ-چانگ¹⁵ استفاده می‌شود. در ناحیه الاستیک، رفتار تنش-کرنش ماده برای الیاف (محوری، جهت 1)، ماتریس (عرضی، جهت 2) و برشی (جهت 12) به کمک روابط (3-1) بیان می‌گردد [14]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1) \quad (2)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \quad (3)$$

در معادله (3)، پارامتر α ضریب وزنی برای تنش برشی غیرخطی است که از طریق آزمون و خطا در شبیه‌سازی‌ها بدست می‌آید. بعد از ناحیه الاستیک، این مدل ماده برای مشخص نمودن خرابی درون هر لایه از معیار خرابی هشین¹⁶ استفاده می‌کند که هر دو معیار هشین و چنگ-چانگ از معیار

سطوح خارجی یک سازه هوایی از جمله آشیانه موتور، سرپوش کابین، شیشه جلو، لبه جلویی بال و دم، پروانه موتورها و غیره در معرض برخورد قرار دارند [4].

درک عمومی از آسیب در سازه‌های کامپوزیتی تحت ضربه تگرگ، که اغلب سبب آسیب‌های داخلی غیرقابل مشاهده می‌شود، به مهندسان در پیش‌بینی شرایط تولید یک سازه مقاوم به آسیب یا حداقل آسیب، کمک می‌کند. به همین جهت بررسی‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی کامپوزیت‌ها تحت ضربه پرتابه‌های یخ دارای اهمیت است. بدین منظور در سال 1999 کیم و همکارانش [5] انرژی آستانه شکست را که در آن لایه‌لایه‌شدگی¹ رخ می‌دهد بدست آورده و نتایج را با داده‌های مدل ایجاد شده در نرم‌افزار داینادی² مقایسه کردند. مشاهده شد که شکست در سطح انرژی کمی بیشتر از آستانه انرژی شکست رخ می‌دهد و با افزایش این سطح انرژی، مودهای دیگر شکست در سازه کامپوزیت مشاهده می‌شوند. آن‌ها در ادامه کار پیشین خود [6] از سه پرتابه کروی یخ برای آزمایش روی سازه‌ها استفاده کرده و نتیجه‌گیری کردند که: زمان نیروی اوج تابعی از سرعت پرتابه یخ نمی‌باشد و پرتابه با قطر کوچکتر، به دلیل اثر موضعی روی صفحه هدف، نیروی بزرگتری را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد شکست در صفحات کامپوزیت بلافاصله بعد از اولین برخورد رخ می‌دهد.

در سال 2009 جانتیکا و آلسون [7] به بررسی ضربه یخ کروی روی صفحات کامپوزیت الیاف‌کربن/وینیل‌استر پرداختند. بررسی‌های عددی و تجربی نشان داد که بعد از ضربه پرتابه، امواج در داخل یخ کروی حرکت کرده و ترک‌های کوچکی را ایجاد می‌کنند که یخ از حالت جامد تبدیل به خرده‌ها و ذرات کوچک می‌شود. درعین حال مشاهده شد که سرعت در گام اول تأثیری در رسیدن به سرعت آستانه لایه‌لایه‌شدگی ندارد. در سال 2010، پارک و کیم [8] بررسی لایه‌لایه‌شدگی و تنش برشی بین‌لایه‌ای³ در صفحه کامپوزیت با یک لایه چسب در وسط صفحه را انجام دادند. نتایج نشان داد گسترش آسیب اولیه به دلیل اثر تمرکز تنش در هندسه اتصالات است و بیشتر از تنش محلی می‌باشد که به علت برخورد ضربه یخ رخ می‌دهد. همچنین بیشتر آسیب در لایه‌های درون یا در دو لایه نزدیک چسب رخ داده است و نه در لایه‌های مجاور ضربه یخ. بنابراین سازه کامپوزیت دارای اتصال چسبی آسیب‌پذیرتر از سازه‌ها بدون اتصال است.

کیم و همکارانش [9] در سال 2012، مجدداً سه قطر متفاوت پرتابه یخ کروی را برای لایه‌چینی‌های مختلف الیاف‌کربن بافته‌شده⁴/اپوکسی تحت آزمایش قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که مربع سرعت آستانه شکست رابطه خطی با نسبت H/D دارد که H ضخامت صفحه هدف و D قطر پرتابه است. نتایج تجربی لایه‌لایه‌شدگی سطوح برای الیاف تک‌جهته در کارهای قبل و الیاف بافته‌شده مقایسه شدند. مشاهده شد لایه‌لایه‌شدگی در چندلایه‌های تک‌جهته در امتداد 90 درجه رخ می‌دهد، در حالیکه در چندلایه‌های بافته‌شده به شکل دایره‌ای باقی می‌ماند.

در سال 2014، دولتی و همکاران [10] به بررسی میزان سطح آسیب پرتابه یخ استوانه‌ای روی کامپوزیت الیاف‌شیشه/اپوکسی با سه نوع الیاف-شیشه بافته‌شده، تک‌جهته⁵ و نمدی⁶ پرداختند. با توجه به اینکه در طوفان تگرگ، هر سازه ممکن است در معرض ضربات متوالی قرار گیرد، نمونه‌ها

⁷ Ls-Dyna

⁸ Pam-Crash

⁹ MAT-22-Composite-Damage

¹⁰ MAT-54/55-Enhanced-Composite-Damage

¹¹ MAT-58-Laminated-Composite-Fabric

¹² MAT-158-Rate-Sensitive-Composite-Fabric

¹³ MAT-162-Composite-MSC-Damage

¹⁴ Progressive Failure

¹⁵ Chang-Chang

¹⁶ Hashin

¹ Delamination

² Dyna3D

³ Interlaminar Stress

⁴ Woven Roving

⁵ Unidirectional

⁶ Chopped Strand Mat

تجربی هیمل و همکارانش [18] صحت‌سنجی شده و سپس بارگذاری ضربه تگرگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. صفحه کامپوزیت با 24 لایه از الیاف-کربن/اپوکسی و لایه‌چینی $[-45/0/45/90]_{3s}$ با ابعاد 300 میلی‌متر در 150 میلی‌متر به ضخامت 2.7 میلی‌متر تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین پرتابه صلب گروی فولادی به جرم 1.85 کیلوگرم، قطر 25.4 میلی‌متر و سرعت 6.5 متربرثانیه قرار گرفته است (جدول‌های 1 و 2).

با توجه به آنکه طول و عرض نمونه نسبت به ضخامت آن بسیار بزرگ است، از المان‌های دوبعدی پوسته از نوع Tsai⁷ برای بررسی رفتار چندلایه کامپوزیت استفاده می‌شود. اگر هر لایه با یک المان پوسته مدل شود، به تعریف 23 تماس لایه‌لایه‌شدگی در بین لایه‌ها نیاز است که سبب بالا رفتن حجم محاسبات می‌شود. بنابراین دو لایه المان پوسته به منظور مقایسه حالت‌های مختلف شکست و لایه‌لایه‌شدگی در نظر گرفته شده است (شکل 1). درون هر المان پوسته تعدادی لایه لحاظ شده که بیانگر نوع لایه‌چینی است و هر لایه با جهت و ضخامت مربوطه توسط یک نقطه انتگرال‌گیری در ضخامت پوسته تعریف می‌شود. برای بررسی لایه‌لایه‌شدگی از نوع تماس گره-ای⁸ بین دو پوسته هر کدام با 12 لایه، استفاده شده و مقادیر 56 و 44 مگاپاسکال به تنش برشی شکست نرمال و برشی چسب اختصاص داده می‌شود [18]. زمانیکه تمام تک لایه‌های المان پوسته دچار شکست شوند، کل المان از محاسبات حذف می‌گردد.

در شکل 2 نیروی تماس و شکل 3 انرژی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی مقایسه شده است. نیروی تماس در آزمایش‌ها مستقیم

جدول 1 خواص مکانیکی صفحه کامپوزیتی الیاف‌کربن/اپوکسی [18]

Table 1 The mechanical properties of Carbon/Epoxy composite plate [18]

مقدار	خاصیت مکانیکی
1.6	چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
153	مدول الاستیسیته در راستای الیاف (گیگاپاسکال)
10.3	مدول الاستیسیته در راستای عمود بر الیاف (گیگاپاسکال)
5.2	مدول برشی (گیگاپاسکال)
0.3	ضریب پواسون
2540	مقاومت کششی در راستای الیاف (مگاپاسکال)
1500	مقاومت فشاری در راستای الیاف (مگاپاسکال)
82	مقاومت کششی در راستای عمود بر الیاف (مگاپاسکال)
236	مقاومت فشاری در راستای عمود بر الیاف (مگاپاسکال)
90	مقاومت برشی تک لایه (مگاپاسکال)

جدول 2 خواص مکانیکی پرتابه فولادی [18]

Table 2 The mechanical properties of steel projectile [18]

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	چگالی (گرم بر سانتی-مترمکعب)
0.33	200	7.85

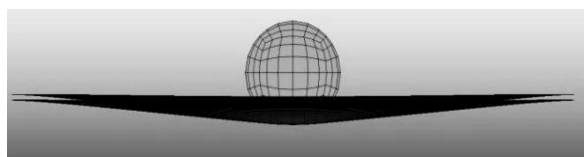


Fig. 1 Simulated rigid projectile impact on composite plate

شکل 1 بارگذاری ضربه پرتابه صلب شبیه‌سازی شده روی صفحه کامپوزیت

تسای-وو¹ مشتق شده‌اند. روابط زیر بیانگر چهار حالت شکست از این معیار خرابی هستند [15]:

- برای حالت شکست کششی الیاف که در آن $\sigma_{11} \geq 0$:

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{شکسته شده} \\ < 0 & \text{در حالت الاستیک} \end{cases} \quad (4)$$

بعد از خرابی $E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$

- برای حالت شکست فشاری الیاف که در آن $\sigma_{11} < 0$:

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{شکسته شده} \\ < 0 & \text{در حالت الاستیک} \end{cases} \quad (5)$$

بعد از خرابی $E_1 = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$

- برای حالت شکست کششی ماتریس که در آن $\sigma_{22} \geq 0$:

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{شکسته شده} \\ < 0 & \text{در حالت الاستیک} \end{cases} \quad (6)$$

بعد از خرابی $E_2 = G_{12} = \nu_{21} = 0$

- برای حالت شکست فشاری ماتریس که در آن $\sigma_{22} < 0$:

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right) - \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{شکسته شده} \\ < 0 & \text{در حالت الاستیک} \end{cases} \quad (7)$$

بعد از خرابی $E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$

ضریب وزنی تنش برشی β تاثیر برش در مود کشش الیاف و ماتریس را مشخص می‌کند. اگر $\beta = 1$ باشد، معیار خرابی هشین را خواهیم داشت و اگر $\beta = 0$ باشد تبدیل به معیار خرابی حداکثر تنش می‌شود. در معادلات فوق متغیرهای e_f و e_c نشان‌دهنده شکست در الیاف و ماتریس بوده و X_t مقاومت کششی در راستای الیاف، X_c مقاومت فشاری در راستای الیاف، Y_t مقاومت کششی در راستای عمود بر الیاف، Y_c مقاومت فشاری در راستای عمود بر الیاف و S_c مقاومت برشی تک لایه هستند. این مقادیر را می‌توان از آزمایش یک لایه از کامپوزیت بدست آورد. هنگامیکه یکی از معیارهای فوق در یک المان صدق کند، خواص الاستیک مشخص شده برای آن المان برابر صفر می‌گردد.

شکست لایه‌لایه‌شدگی یعنی جدایش بین دو لایه، نقش مهمی در مکانیزم جذب انرژی و استحکام صفحه کامپوزیت تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین ایفا می‌کند و باید در شبیه‌سازی لحاظ شود. در ال‌اس‌داینا دو روش برای شبیه‌سازی لایه‌لایه‌شدگی وجود دارد؛ یک روش استفاده از المان چسبنده² بین لایه‌هاست که باید اطلاعات کافی از آن در اختیار باشد که بتواند به خوبی روند آسیب را نشان دهد و روش دیگر استفاده از نوعی تماس³ است که رشد ترک را بر اساس مدل منطقه چسبناک⁴ برای بیان لایه‌لایه‌شدگی شبیه‌سازی می‌کند [16]. بعد از مشخص شدن تنش‌های شکست نرمال⁵ و برشی⁶ چسب، آسیب یک تابع خطی از فاصله بین دو نقطه در تماس اولیه می‌باشد [17].

در این پژوهش از این مدل ماده به منظور شبیه‌سازی بارگذاری ضربه تگرگ استفاده می‌شود. به همین جهت شبیه‌سازی صفحه کامپوزیت با نتایج

¹ Tsai-Wu

² Cohesive Elements

³ Automatic one way surface to surface tiebreak

⁴ Cohesive Zone

⁵ Normal Failure Laminar Stress (NFLS)

⁶ Shear Failure Laminar Stress (SFLS)

⁷ Blytschko-Tsay

⁸ Tied

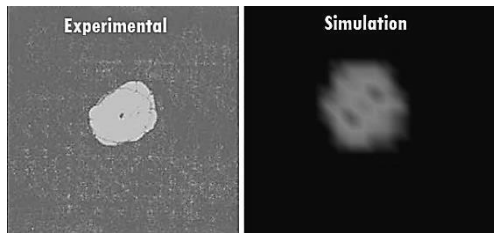


Fig. 4 Comparison of delamination of present numerical simulation and experimental results from [18]

شکل 4 مقایسه لایه‌لایه‌شدگی شبیه‌سازی عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی مرجع [18]

3- شبیه‌سازی عددی بارگذاری ضربه تگرگ

همان‌طور که گفته شد ضربه غیرمنتظره تگرگ در سازه‌های هوایی کامپوزیتی سبب آسیب‌های داخلی می‌شود، به همین جهت بررسی این نوع ضربه ضروری است. یکی از نرم‌افزارهای تجاری المان محدود که روش‌های عددی مختلفی را برای مدل کردن مسائل مکانیک پیوسته ارائه می‌دهد ال-اس‌داین‌ا است که به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود و به خوبی می‌تواند رفتار یخ و کامپوزیت را در بارگذاری ضربه توصیف کند. به منظور شبیه‌سازی عددی پرتابه تگرگ روش‌های لاگرانژین²، ترکیب لاگرانژین-اولرین³ و دینامیک ذرات هموار⁴ ارائه شده است که این سه روش معمولاً برای حل مسائل غیرخطی مانند ضربه به کار می‌روند [19].

روش لاگرانژین از متداول‌ترین مدل‌های استفاده شده در مکانیک محیط پیوسته می‌باشد. در این روش وقتی ماده اعوجاج زیادی را تحمل می‌کند، دقت کاهش یافته، زمان پردازش افزایش قابل توجهی می‌یابد و ناپایداری در حل ایجاد می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل لاگرانژین در مراحل اولیه، بارگذاری ضربه تگرگ را به خوبی توصیف می‌کند [19].

روش ترکیبی لاگرانژین-اولرین که در آن شبکه ثابت است و ماده در آن جریان می‌یابد، دارای مزایای هر دو روش لاگرانژین و اولرین می‌باشد. در این روش شبکه به طور مستقل روی ماده جریان می‌یابد. تعداد المان‌ها در این حالت باید به اندازه کافی بزرگ باشند که دقت محاسبات حفظ شده و زمان پردازش کاهش یابد. روش ترکیبی لاگرانژین-اولرین ترک خوردگی تگرگ در طول بارگذاری ضربه را مشابه یک سیال نشان می‌دهد [20].

روش دینامیک ذرات هموار در سال 1997 برای مطالعه فیزیک ستاره‌ها و پدیده‌های کیهان‌شناسی توسعه یافت و پس از آن برای مسائل دینامیک محاسباتی سیالات و سپس مکانیک محیط پیوسته گسترش یافت. این روش بدون شبکه‌بندی است و شبکه‌بندی با مجموعه‌ای از ذرات با جرم مشخص جایگزین می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد روش دینامیک ذرات هموار رفتار بارگذاری ضربه تگرگ را به خوبی توصیف می‌کند و نزدیکتر به نتایج تجربی است. همچنین زمان پردازش کمتر با دقت خوب در نتایج روش دینامیک ذرات هموار مشاهده شده است [19].

به منظور تحلیل رفتار یخ در بارگذاری ضربه از چندین مدل ماده در نرم-افزار استفاده می‌شود که عبارتند از: الف) مدل ماده⁵ 13 که این مدل ماده میکروتکرها را قبل از خرد شدن نشان می‌دهد. رفتار این مدل از ماده مانند زمانی است که به کرنش شکست پلاستیک رسیده و همه تنش‌های برشی

توسط کرنش‌سنج اندازه‌گیری شده و در نرم‌افزار به صورت فایل RCFORC ذخیره می‌شود. نمودارهای نیرو-زمان حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که پس از برخورد پرتابه، نوسانات شدیدی در صفحه اتفاق می‌افتد؛ سپس نیروی تماس بشدت افزایش یافته و بعد از آن به دلیل نوسانات و ایجاد خرابی، نیروی تماس افت می‌کند. روند نمودار انرژی-زمان نیز تطابق خوبی با داده‌های حاصل از آزمایش نشان می‌دهد. به عبارتی روند کلی نمودارها و مدت زمان ضربه تطابق خوبی دارند.

به منظور تعیین میزان خرابی بین‌لایه‌ای در نمونه‌های آزمایشگاهی از دستگاه سی‌اسکن¹ استفاده شده و در شبیه‌سازی عددی بین لایه‌های مختلف، لایه‌های چسبیده تعریف می‌شود که می‌تواند شروع و گسترش جدایش را مدل کند. در نرم‌افزار یک فایل ایجاد می‌شود که شامل اطلاعاتی مانند شکاف تماس است که برای ترسیم سطح جدایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که جدایش اتفاق می‌افتد، مقدار هر کدام از پارامترهای گره‌ای از 1 به 0 تغییر می‌کند که با نمایش این پارامتر می‌توان سطح جدایش را مشخص کرد. سطوح جدایش نمایش داده شده در شکل 4 بیان‌کننده همخوانی خوب نتایج عددی و تجربی است. ابعاد ناحیه جدایش در مدل‌سازی عددی بین 22-25 میلی‌متر و در نتایج تجربی حدود 25 میلی‌متر می‌باشد.

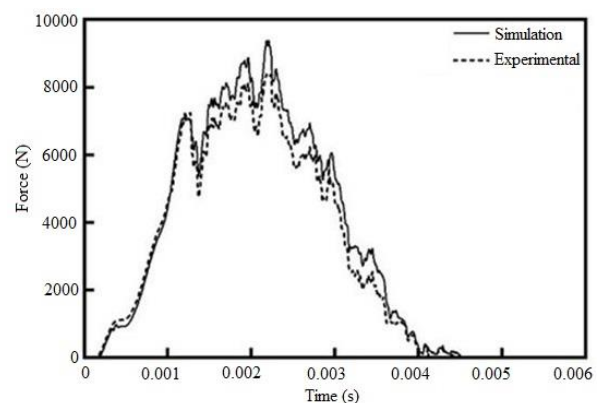


Fig. 2 Comparison of contact force of present numerical simulation and experiment results from [18]

شکل 2 مقایسه نیروی تماس شبیه‌سازی عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی مرجع [18]

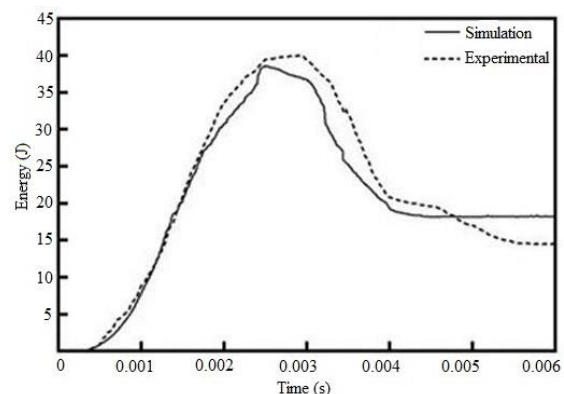


Fig. 3 Comparison of energy of present numerical simulation and experiment results from [18]

شکل 3 مقایسه انرژی شبیه‌سازی عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی مرجع [18]

² Lagrangian Finite Element (FE)

³ Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

⁴ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

⁵ Mat-Isotropic-Elastic-Failure (MAT-13)

¹ C-Scan

یکی از نکات مهم دیگر در شبیه‌سازی، انتخاب نوع و سطوح تماس است. از الگوریتم تماس گره‌ای⁵ بین دو لایه کامپوزیت به منظور بررسی لایه‌لایه-شدگی استفاده گردید. همچنین تماس اتوماتیک ذرات به سطح⁶ نیز برای تماس بین پرتابه یخ و صفحه کامپوزیت در نظر گرفته شد. در شکل 5 بارگذاری ضربه یخ گروی روی صفحه کامپوزیت و تغییر شکل آن نشان داده شده است.

به منظور بررسی انواع خرابی در صفحه کامپوزیت در نرم‌افزار، خرابی الیاف و ماتریس در صفحه کامپوزیت را می‌توان با رسم متغیرهای تاریخچه-ای⁷ مشخص کرد. زمانیکه خرابی اتفاق افتاد، مقدار این متغیرهای از 1 به 0 تغییر می‌کند. HV1 بیانگر مود کششی الیاف، HV2 مود فشاری الیاف، HV3 مود کششی ماتریس و HV4 مود فشاری ماتریس می‌باشد.

4- نتایج و بحث

4-1- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی بارگذاری با پرتابه صلب و تگرگ

تغییرات نیرو و انرژی برای بارگذاری ضربه با پرتابه صلب و یخ روی صفحه کامپوزیت در شکل 6 مقایسه شده است. مشاهده می‌شود پرتابه یخ به دلیل خرد شدن و کاهش جرم در هنگام برخورد نیروی کمتری داشته و به همین جهت در این حالت به مراتب انرژی کمتری نسبت به پرتابه صلب، وارد می‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عمده خرابی درون‌لایه‌ای ایجاد شده، خرابی در مود کششی ماتریس است که به دلیل مقاومت کششی پایین در ماتریس می‌باشد. در بارگذاری با پرتابه صلب خرابی ماتریس از پایین‌ترین لایه شروع می‌شود که به علت خمش صفحه، تحت کشش قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که در بارگذاری با پرتابه یخ که خرد شده و مانند سیال روی صفحه

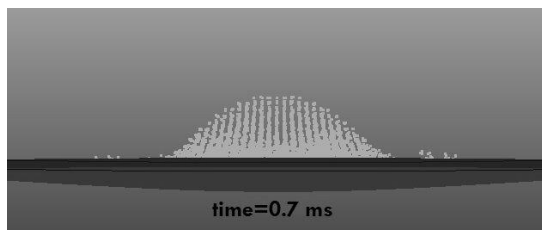
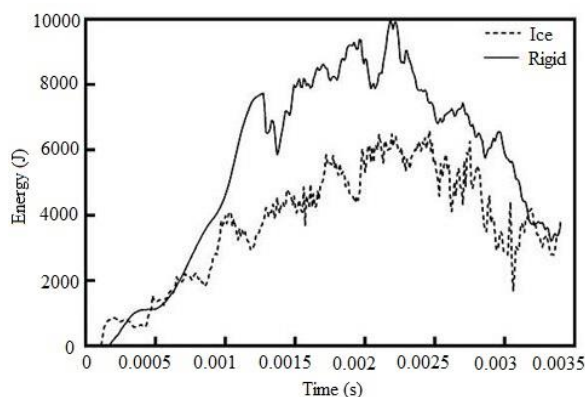


Fig. 5 Simulation of hail ice impact on composite plate

شکل 5 شبیه‌سازی پرتابه تگرگ روی صفحه کامپوزیت



صفر می‌شوند. بنابراین وقتی به فشار کششی رسید، ماده فقط تنش فشاری هیدرواستاتیک دارد و رفتاری مانند سیال [21]؛ (ب) مدل ماده 10¹ که رفتار یخ را زمانیکه سفتی بالایی دارد و بعد از ترک خوردن مانند سیال روی صفحه جاری می‌شود، به خوبی توصیف می‌کند. این مدل ماده با معیار شکست وابسته به تنش کششی مرتبط است و زمانیکه به تنش شکست کششی برسد، تنش‌های انحرافی صفر شده و ماده دارای تنش فشاری است. در این مدل ماده معیار کرنش شکست پلاستیک توصیف نشده است؛ زیرا به کار بردن این معیار برای توصیف مکانیزم‌های شکست یخ نامناسب است [19]. در این حالت اثرات نرخ کرنش بر روی تنش تسلیم در نظر گرفته شده و همچنین نیاز به معادله حالت دارد که معادله حالت آب به کار برده می‌شود [22]؛ (ج) مدل ماده 155² که حساسیت به نرخ کرنش در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. به عبارتی استفاده از منحنی حساسیت به نرخ کرنش، عبور از حالت انعطاف‌پذیر به ترد را به خوبی بیان می‌کند [23].

در این پژوهش از روش دینامیک ذرات هموار، به دلیل ویژگی‌های گفته شده در بالا و مدل ماده 10 به منظور شبیه‌سازی استفاده می‌شود. خواص مکانیکی یخ و پارامترهای مؤثر در معادله حالت آب در جدول 3 آورده شده است.

پرتابه تگرگ با 19467 ذره از روش دینامیک ذرات هموار و مدل ماده 10 شبیه‌سازی شده و سرعت اولیه 6.5 متر بر ثانیه به آن اعمال شد. صفحه کامپوزیت 24 لایه با دو آلمان پوسته³ و شبکه‌بندی 3 میلی‌متر و شرط مرزی آزاد از دو طرف و شرط مرزی گیردار از دو جهت دیگر شبیه‌سازی گردید. جرم پرتابه تگرگ 1.85 کیلوگرم در نظر گرفته شد که بتوان نتایج شبیه‌سازی با پرتابه صلب و یخ را مقایسه نمود. اما با توجه به اینکه پدیده ضربه تگرگ با جرم کم در محدوده سرعت یخ در حال سقوط به زمین (تقریباً 25 متر بر ثانیه) و سرعت‌های پروازی هواپیما (طیف گسترده‌ای در بزرگی 100 متر بر ثانیه) رخ می‌دهد، شبیه‌سازی پرتابه تگرگ با جرم 30 گرم بر روی صفحه کامپوزیت 24 لایه با مشخصات قبل انجام می‌شود. از آنجاکه تغییر در زاویه چیدمان الیاف یکی از پارامترهای مؤثر در بررسی رفتار کامپوزیت‌هاست، چیدمان $[\pm\theta]_{12s}$ که در آن $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. برای هر زاویه چینش، آستانه سرعت پرتابه تگرگ که سبب آسیب در صفحه کامپوزیت می‌شود را بدست آورده، سپس صفحات را تحت بارگذاری پرتابه تگرگ با سرعت 50 متر بر ثانیه قرار داده و به بررسی اثر تغییر چیدمان روی میزان و نوع آسیب ایجاد شده می‌پردازیم. همچنین تغییر در سرعت و هندسه پرتابه تگرگ از دیگر پارامترهای مورد بررسی هستند.

جدول 3 خواص مکانیکی یخ استفاده شده در نرم‌افزار [19]

Table 3 Mechanical properties of ice used for Ls-Dyna [19]

مقادیر معادله حالت آب (گرونیسن ⁴)		خواص مکانیکی یخ	
1480	C	846	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
2.5599	S ₁	3.46	مدول برشی (گیگاپاسکال)
-1.985	S ₂	10.3	تنش (مگاپاسکال)
0.228	S ₃	-4	فشار شکست (مگاپاسکال)
0.493	γ	6.89	مدول سخت‌شوندگی (گیگاپاسکال)
1.397	A		

¹ Mat-Elastic-Plastic-Hydro (MAT-10)

² Mat-Plasticity-Compression-Tension-EOS (MAT-155)

³ Shell Element

⁴ Gruneisen

⁵ Automatic-One-Way-Surface-to-Surface-Tiebreak

⁶ Automatic-Nodes-to-Surface

⁷ History Variables (HV)

در ضربه با پرتابه صلب سطح خرابی کششی ماتریس در امتداد افقی توسعه می‌یابد؛ اگرچه بتدریج در لایه‌های زیرین از میزان آن کاسته شده است، اما تا لایه آخر این نوع خرابی مشاهده می‌شود. خرابی در مودهای دیگر الیاف و ماتریس در بارگذاری با پرتابه صلب رخ می‌دهد که در شکل 8 سطح خرابی‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد بیشترین سطح خرابی در مود کششی ماتریس و بعد از آن در مود کششی الیاف رخ می‌دهد.

میزان لایه‌لایه‌شدگی ایجاد شده توسط دو پرتابه در شکل 9 نشان می‌دهد در ضربه با پرتابه صلب سطح بیشتری دچار جدایش شده و به صورت متمرکز، به اندازه تقریبی قطر پرتابه، در مرکز صفحه رخ می‌دهد؛ اما در ضربه تگرگ به دلیل خرد شدن پرتابه از میزان جدایش بین دو لایه کاسته شده و در فضایی کمی دورتر از شعاع پرتابه گسترده می‌شود.

2-4- اثر تغییر چیدمان صفحه کامپوزیت در بارگذاری تگرگ با سرعت بالا

بررسی نتایج شبیه‌سازی پرتابه یخ گروهی به جرم 30 گرم روی صفحات کامپوزیت 24 لایه با چیدمان‌های $[\pm 15]_{12s}$ ، $[\pm 30]_{12s}$ ، $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ نشان می‌دهد که آسیب اولیه به ترتیب در سرعت‌های 27، 35، 39 و 40 متر بر ثانیه ایجاد می‌شود. به عبارتی قبل از این سرعت‌ها، پرتابه یخ سبب خمش در صفحات کامپوزیت می‌شود؛ اما آسیب درون‌لایه‌ای و بین‌لایه‌ای ایجاد نمی‌کند و شروع خرابی در مود کششی ماتریس در این سرعت‌ها شروع می‌شود. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه چیدمان الیاف، سرعت آستانه شروع

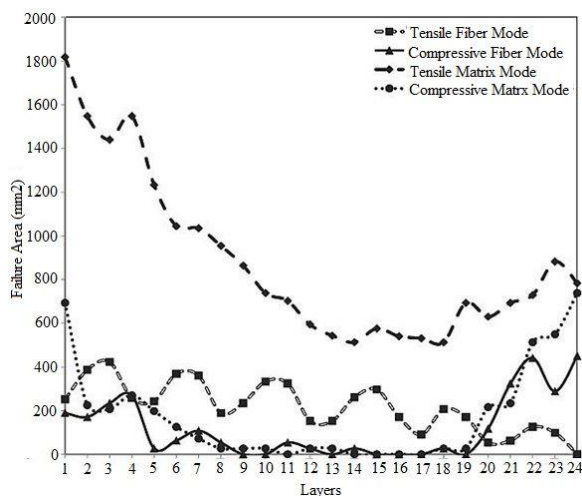


Fig. 8 Failure area of fiber and matrix in different layers of composite plate subjected to rigid projectile

شکل 8 سطح خرابی الیاف و ماتریس در لایه‌های مختلف کامپوزیت تحت ضربه پرتابه صلب

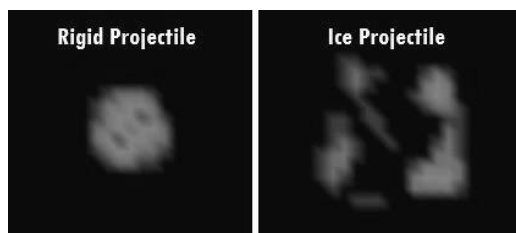


Fig. 9 Comparison of delamination produced by rigid and ice projectile

شکل 9 مقایسه لایه‌لایه‌شدگی ایجاد شده بین پرتابه صلب و یخ

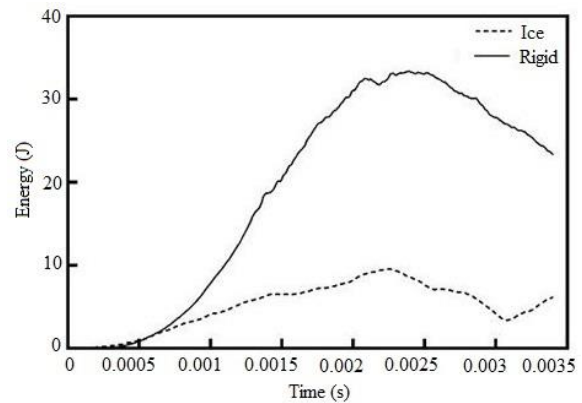


Fig. 6 Comparison of force and energy curves for hail ice and rigid projectile with identical mass

شکل 6 مقایسه منحنی‌های نیرو و انرژی بین پرتابه یخ و صلب با جرم یکسان

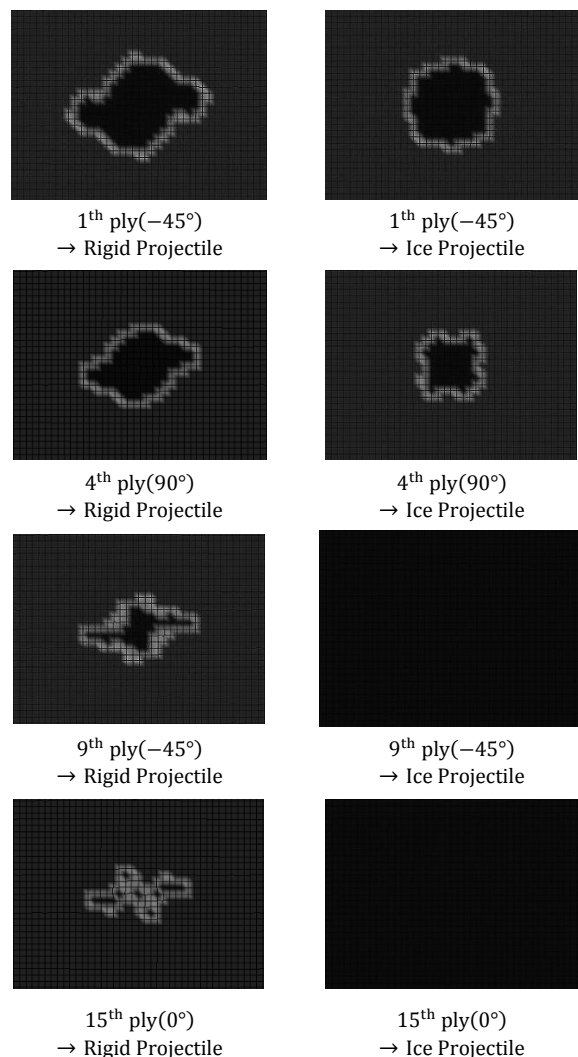


Fig. 7 Matrix tensile failure in some layers of the plate subjected to rigid and ice projectile

شکل 7 خرابی کششی ماتریس در برخی لایه‌ها در بارگذاری پرتابه صلب و یخ

بر اساس نتایج، در ضربه پرتابه یخ گروهی تنها خرابی مربوط به خرابی کششی ماتریس است که سطح خرابی به صورت دایره‌ای بوده و به تدریج از میزان آن کاسته شده و در لایه نهم به بعد هیچ‌گونه خرابی مشاهده نمی‌شود؛ درحالی‌که

بنابراین مقدار بیشتری کاهش در انرژی خواهیم داشت؛ به طوریکه در چیدمان $[\pm 15]_{12s}$ به میزان 14.3 ژول و در چیدمان $[\pm 60]_{12s}$ به میزان 16.4 ژول کاهش در انرژی جنبشی پرتابه تگرگ کروی خواهیم داشت. این انرژی جنبشی کاهش یافته در پرتابه تگرگ به انرژی درونی صفحه منتقل می‌شود؛ به طوریکه با افزایش زاویه چیدمان، انرژی درونی در صفحه کامپوزیت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه بیشینه نیروی برخورد روی صفحه کامپوزیت در چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ دیرتر از سایر چیدمان‌ها رخ می‌دهد، بنابراین آسیب کمتری به لایه‌ها وارد می‌شود.

3-4- اثر تغییر سرعت و شکل پرتابه تگرگ

با توجه به اینکه صفحه کامپوزیت با چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ بهترین نتایج را در ضربه پرتابه یخ کروی با سرعت 50 متر بر ثانیه داشته است، بنابراین به بررسی

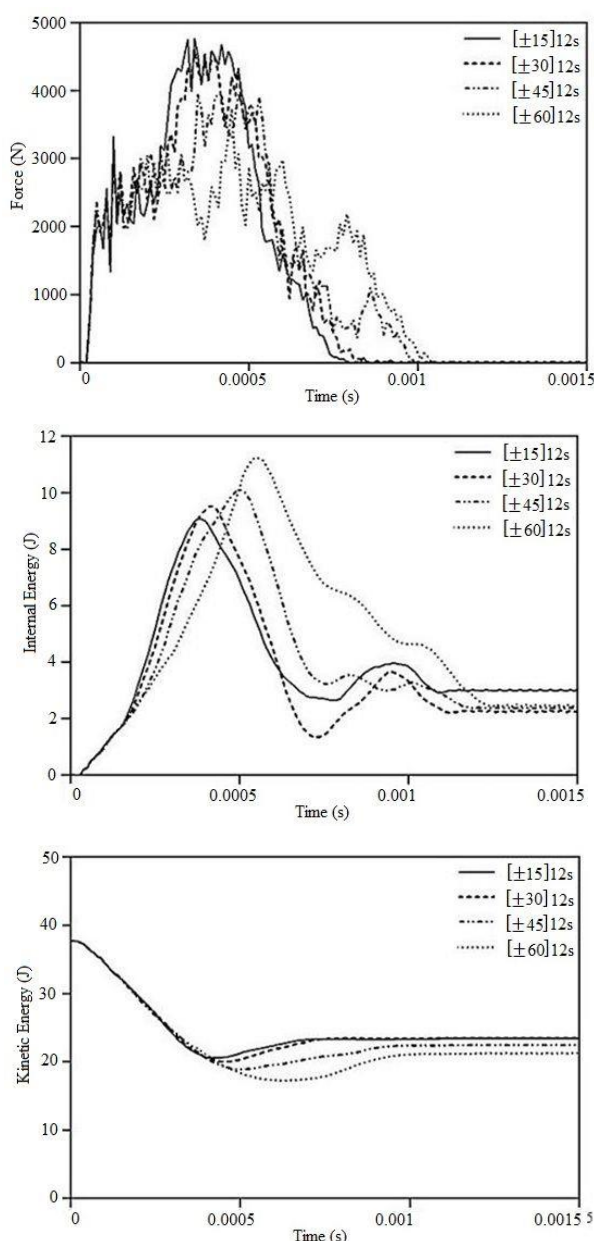


Fig. 11 Force, internal energy and kinetic energy curves for four stacking sequence

شکل 11 منحنی‌های نیرو، انرژی درونی و انرژی جنبشی در چهار چینش

آسیب افزایش می‌یابد که اختلاف بین سرعت‌های آستانه روند کاهشی دارد. همچنین سطح آسیب ایجاد شده در لایه اول به ترتیب 126، 144، 180 و 128 میلی‌متر مربع برای چیدمان‌های $[\pm 15]_{12s}$ ، $[\pm 30]_{12s}$ ، $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ می‌باشد؛ که بیشترین آسیب در لایه اول برای چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ و کمترین برای چیدمان $[\pm 15]_{12s}$ مشاهده شد.

به منظور مقایسه آسیب ایجاد شده در صفحات کامپوزیت با چیدمان‌های $[\pm 15]_{12s}$ ، $[\pm 30]_{12s}$ ، $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ ، بارگذاری ضربه پرتابه یخ کروی به جرم 30 گرم با سرعت 50 متر بر ثانیه شبیه‌سازی گردید. بررسی نتایج شبیه‌سازی در این سرعت از پرتابه تگرگ نشان می‌دهد به ترتیب تا لایه یازدهم، لایه هفتم، لایه ششم و لایه هشتم در صفحات کامپوزیت با چیدمان‌های فوق، آسیب رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود در چیدمان $[\pm 15]_{12s}$ بیشترین آسیب و در چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ کمترین آسیب را در لایه‌ها خواهیم داشت. به عبارتی در چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ اگرچه آسیب اولیه در سرعت آستانه نسبت به سایر چیدمان‌ها بیشتر است، اما با افزایش سرعت نسبت به سایر چیدمان‌ها از میزان آسیب در لایه‌های دیگر آن کاسته می‌شود. میزان آسیب ایجاد شده در لایه اول برای این چهار چیدمان در شکل 10 آورده شده است. همچنین در تصاویر مشاهده می‌شود که در چیدمان $[\pm 15]_{12s}$ و $[\pm 30]_{12s}$ سطح آسیب در مود کششی ماتریس در جهت عمودی توسعه یافته و با تغییر چیدمان به زاویه‌های $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ در جهت افقی توسعه می‌یابد.

نمودارهای نیروی برخورد، انرژی درونی صفحه کامپوزیت و انرژی جنبشی پرتابه تگرگ در شکل 11 آورده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه چیدمان از میزان نیروی ضربه به صفحه کامپوزیت کاسته می‌شود؛ همچنین بیشینه نیروی ضربه در دو چیدمان $[\pm 15]_{12s}$ و $[\pm 30]_{12s}$ سریع‌تر از دو چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ اتفاق می‌افتد، به همین دلیل کاهش انرژی کمتری را در این دو چیدمان خواهیم داشت. در دو چیدمان $[\pm 45]_{12s}$ و $[\pm 60]_{12s}$ زمان بیشتری برای رسیدن به بیشینه نیروی ضربه لازم است

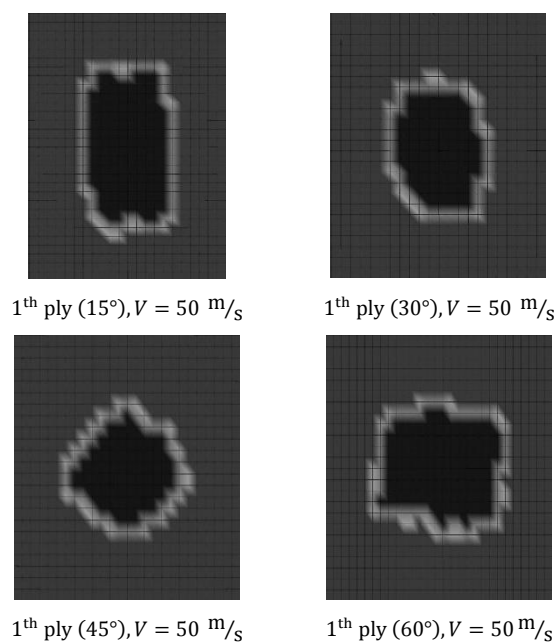


Fig. 10 Damage area in the first ply of four different laminate subjected to 50 m/s hemispherical projectile

شکل 10 آسیب ایجاد شده در لایه اول از چهار لمینیت مختلف در سرعت 50 متر بر ثانیه تحت پرتابه یخ کروی

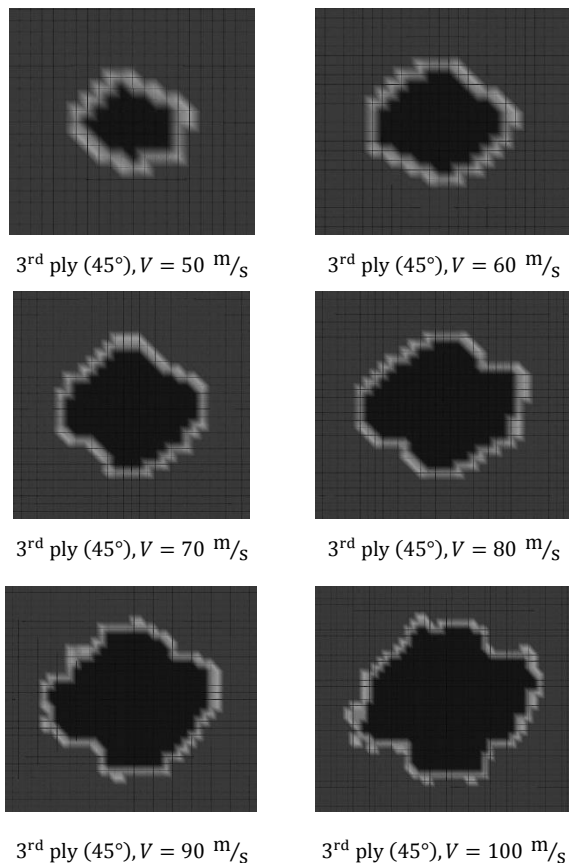


Fig. 13 The amount of failure in the third ply at different speeds

شکل 13 میزان خرابی در لایه سوم در سرعت‌های مختلف

با توجه به تنوع هندسه پرتابه تگرگ، صفحه کامپوزیت با چیدمان $[±45]_{12s}$ را تحت ضربه پرتابه یخ استوانه‌ای به جرم 30 گرم و سرعت 50 متربرثانیه قرار داده و با نتایج بدست آمده از پرتابه یخ کروی مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه جرم پرتابه یخ استوانه‌ای در جهت طولی پخش شده و در پرتابه یخ کروی در جهت شعاعی، بنابراین در سرعت 23 متربرثانیه اولین خرابی را در لایه اول بر اثر برخورد یخ استوانه‌ای در صفحه کامپوزیت (به دلیل جاری شدن جرم بیشتر در هنگام برخورد) خواهیم داشت؛ درحالیکه همان‌طور که گفته شد در پرتابه یخ کروی اولین خرابی در سرعت 39 متربرثانیه رخ می‌دهد.

مقایسه میزان خرابی بین دو پرتابه یخ کروی و استوانه‌ای در سرعت 50 متربرثانیه در شکل 14 آورده شده است. در برخورد یخ استوانه‌ای 3.3% افزایش در سطح آسیب نسبت به یخ کروی در لایه اول مشاهده می‌شود. همچنین در برخورد یخ استوانه‌ای تا لایه هشتم و در برخورد یخ کروی تا لایه ششم خرابی در مود کششی ماتریس مشاهده گردید.

روند شکست پرتابه یخ کروی و استوانه‌ای در شکل 15 نشان می‌دهد با گذشت زمان، قسمت بیشتری از یخ کروی، به دلیل گسترده شدن در جهت شعاعی، خرد شده و به اطراف پرتاب می‌شود. از طرفی مقایسه منحنی‌های نیروی برخورد و انرژی درونی صفحه کامپوزیت (شکل 16) بین دو پرتابه، مقدار بیشتری را در برخورد یخ استوانه‌ای نشان می‌دهد. در زمان برخورد یخ استوانه‌ای، قسمت عمده وزن آن بر روی سازه، نیرو اعمال می‌کند و خرد می‌شود؛ زیرا وزن آن در جهت طولی گسترده شده است؛ اما در یخ کروی خرد شدن به مرور و در جهت شعاعی انجام می‌شود؛ به همین جهت بین دو پرتابه یخ کروی و استوانه‌ای با جرم مشابه و سرعت برخورد 50 متربرثانیه (دو

اثر سرعت و شکل پرتابه تگرگ روی این چیدمان از صفحه کامپوزیت می‌پردازیم. شبیه‌سازی پرتابه یخ کروی به جرم 30 گرم با سرعت‌های 50-100 متربرثانیه به صفحه کامپوزیت انجام گردید. با افزایش سرعت، نیروی وارد شده از 3932 نیوتن در سرعت 50 متربرثانیه به 13286 نیوتن در سرعت 100 متربرثانیه می‌رسد و درعین حال مقدار بیشینه نیرو، به دلیل خرد شدن زودتر در سرعت بالا، سریعتر اتفاق می‌افتد. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پرتابه تگرگ، انرژی وارد شده به صفحه کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان انرژی خورده‌های یخ که به اطراف پرتاب می‌شوند سطح انرژی مشابهی دارند، بنابراین در سرعت‌های بالاتر کاهش انرژی بیشتر خواهد شد (شکل 12).

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مود خرابی کششی ماتریس در لایه‌های مختلف کامپوزیت قابل بررسی است که به عنوان نمونه لایه سوم در نظر گرفته شده است (شکل 13). افزایش سرعت سبب افزایش سطح آسیب دیده در مود کششی ماتریس می‌شود. همچنین در تصاویر مشاهده می‌شود قسمتی از سطح به طور کامل آسیب دیده و قسمت‌هایی در آستانه آسیب قرار گرفته‌اند که با افزایش سرعت، سهم قسمت آسیب دیده افزایش یافته و از سهم قسمت در آستانه آسیب کاسته می‌شود. واضح است که با افزایش سرعت تعداد بیشتری از لایه‌ها دچار آسیب می‌شوند؛ به طوریکه خرابی در سرعت 50 متربرثانیه تا لایه ششم، در سرعت 60 متربرثانیه تا لایه هشتم، در سرعت 70 متربرثانیه تا لایه نهم، در سرعت 80 متربرثانیه تا لایه دهم، در سرعت 90 متربرثانیه تا لایه یازدهم و در سرعت 100 متربرثانیه تا لایه دوازدهم مشاهده گردید.

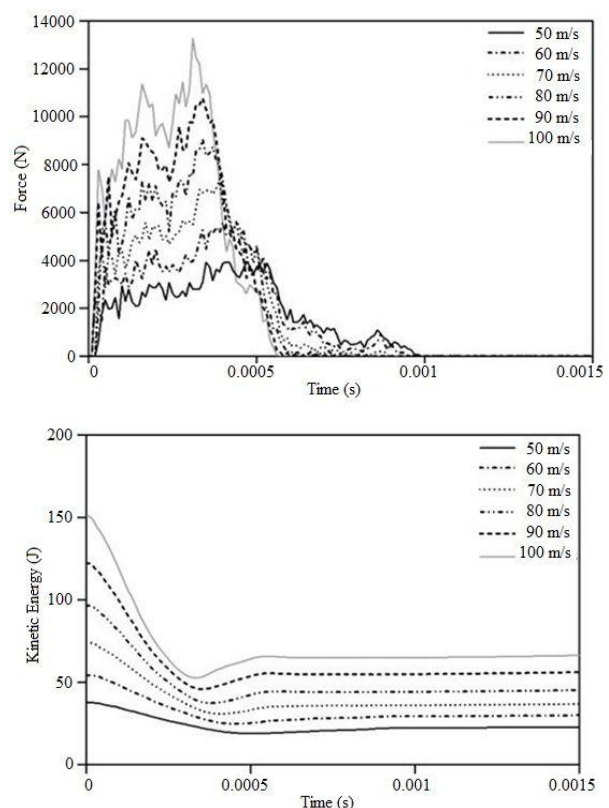


Fig. 12 Comparison of force and energy curves for six different speed of ice projectile

شکل 12 مقایسه منحنی‌های نیرو و انرژی در شش سرعت متفاوت پرتابه یخ

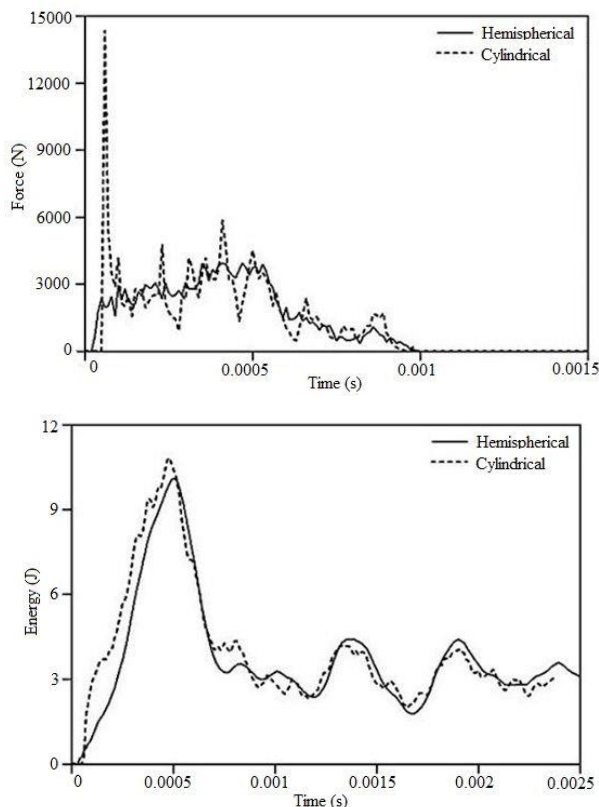


Fig. 16 The force and energy curves for hemispherical and cylindrical ice projectile

شکل 16 منحنی‌های نیرو و انرژی برای پرتابه یخ کروی و استوانه‌ای

به دلیل خرد شدن آن، علی‌رغم جرم بالا، جدایش بین لایه‌ای کمتری نسبت به ضربه با پرتابه فولادی رخ می‌دهد؛ اما در این حالت گستردگی بیشتری دارد؛ درحالی‌که در ضربه با پرتابه فولادی لایه‌لایه‌شدگی در ناحیه‌ای به میزان تقریبی قطر پرتابه متمرکز می‌شود.

با توجه به اینکه ضربه پرتابه یخ جرم کم و سرعت بالایی دارد و به منظور تطابق با ضربه تگرگ روی سازه‌های هوایی، شبیه‌سازی ضربه تگرگ با جرم کمتر و شش سرعت مختلف در ادامه انجام شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد تنها مود خرابی در برخورد تگرگ از نوع مود کششی ماتریس است که با افزایش سرعت پرتابه هم سطح آسیب افزایش می‌یابد و هم تعداد لایه‌های بیشتری دچار آسیب می‌شوند. از طرفی با توجه به اهمیت تغییر چیدمان در کامپوزیت‌ها، چهار چیدمان مختلف تحت ضربه پرتابه یخ کروی قرار گرفتند. مقاومت در برابر برخورد یخ صفحه کامپوزیت با چیدمان $12_s [\pm 45^\circ]$ بالاتر از سایر چیدمان‌ها بود. همچنین مقایسه نتایج بین پرتابه یخ کروی و استوانه‌ای در لحظه برخورد بر روی صفحه کامپوزیت با چیدمان $12_s [\pm 45^\circ]$ ، افزایش تقریبی 7.2 برابری نیروی وارد شده به صفحه را در برخورد یخ استوانه‌ای نشان می‌دهد.

6- فهرست علائم

- ε_1 کرنش در جهت 1
- ε_2 کرنش در جهت 2
- ε_{12} کرنش برشی
- σ_1 تنش در جهت 1
- σ_2 تنش در جهت 2

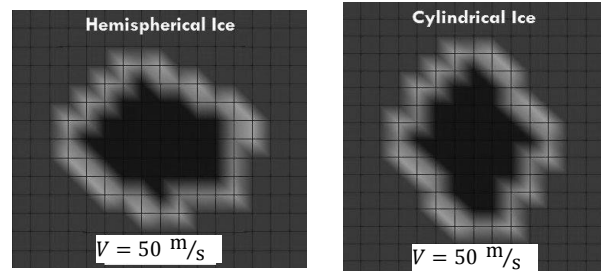


Fig. 14 Comparison of failure in the 1st ply of the plate for cylindrical and hemispherical ice projectile

شکل 14 مقایسه آسیب در لایه اول برای پرتابه یخ استوانه‌ای و کروی

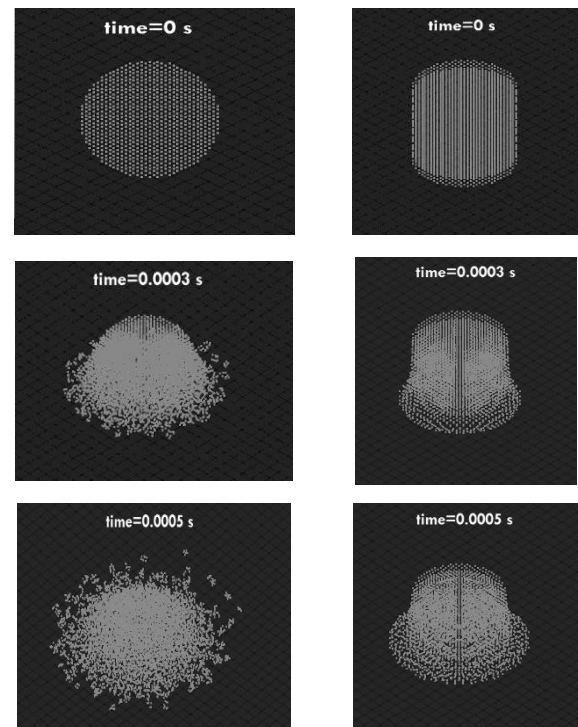


Fig. 15 Damage propagation in cylindrical and hemispherical ice projectile

شکل 15 روند آسیب برای پرتابه یخ استوانه‌ای و کروی

پرتابه با انرژی اولیه یکسان و هندسه متفاوت)، پرتابه استوانه‌ای نیروی به مراتب بیشتر وارد می‌کند. مقدار انرژی وارد شده اختلاف چندانی نداشته و بیشتر انرژی اولیه صرف از هم پاشیدگی یخ می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده برای صفحه کامپوزیت الباف‌کربن/اپوکسی در نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داینما تحت بارگذاری ضربه با پرتابه فولادی با نتایج تجربی انجام شد. نتایج تحلیل عددی در این مقاله و نتایج تجربی تطابق خوبی داشتند.

در ادامه، شبیه‌سازی همان صفحه کامپوزیت تحت بارگذاری ضربه با پرتابه یخ کروی (مشابه مشخصات هندسی پرتابه فولادی) انجام شده و نتایج بدست آمده از انواع مودهای خرابی درون‌لایه‌ای و برون‌لایه‌ای در این دو حالت مورد مقایسه قرار گرفتند. مشاهده شد نیروی وارد شده به صفحه کامپوزیت تحت ضربه پرتابه یخ کروی به دلیل خرد شدن و جاری شدن روی صفحه پس از برخورد، به میزان تقریبی 4 کیلو نیوتن کمتر از پرتابه فولادی است. میزان انرژی نیز 15 زول کاهش داشته است. در ضربه با پرتابه یخ

isotropic carbon/epoxy composite tape laminates impacted by high velocity ice, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 23, No. 6, pp. 477-486, 2014.

- [11] P. Feraboli, F. Deleo, B. Wade, M. Rassaiian, M. Higgins, A. Byar, M. Reggiani, A. Bonfatti, L. DeOto, A. Masini, Predictive modeling of an energy-absorbing sandwich structural concept using the building block approach, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 6, pp. 774-786, 2010.
- [12] M. Nejad Ensan, D. Zimcik, M. Lahoubi, D. Andrieu, Soft body impact simulation on composite structures, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 283-296, 2008.
- [13] M. Hörmann, M. Wacker, Simulation of the crash performance of crash boxes based on advanced thermoplastic composite, *Proceedings of The 5th European LS-DYNA Users Conference*, Birmingham, UK, May 25-26, 2005.
- [14] F. K. Chang, K. Y. Chang, A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration, *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 283-296, 1987.
- [15] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, No. 4, pp. 329-334, 1980.
- [16] R. Borg, *Simulation of Delamination Initiation and Growth in Fiber Composite Laminates*, PhD Thesis, Division of Solid Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Hållfasthetslära, Institutionen för konstruktions-och produktionsteknik, 2002.
- [17] S. Heimbs, S. Heller, P. Middendorf, Simulation of low velocity impact on composite plates with compressive preload, *Proceedings of The 7th German LS-DYNA Forum*, Bamberg, Germany, September 30, 2008.
- [18] S. Heimbs, S. Heller, P. Middendorf, F. Hähnel, J. Weiße, Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 10, pp. 1182-1193, 2009.
- [19] M. Anghileri, Luigi- M. L. Castelletti, F. Invernizzi, M. Mascheroni, A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 929-944, 2005.
- [20] J. Pernas-Sánchez, D. A. Pedroche, D. Varas, J. López-Puente, R. Zaera, Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 14, pp. 1919-1927, 2012.
- [21] H. Kim, K. T. Kedward, Modeling hail ice impacts and predicting impact damage initiation in composite structures, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, pp. 1278-1288, 2000.
- [22] M. Anghileri, Luigi- M. L. Castelletti, A. Milanese, A. Semboloni, Modeling Hailstone Impact onto Composite Material Panel Under a Multi-axial State of Stress, *Proceedings of The 6th European LSDYNA Users' Conference*, Gothenburg, Sweden, May 29-30, 2007.
- [23] K. S. Carney, D. J. Benson, P. DuBois, R. Lee, A phenomenological high strain rate model with failure for ice, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 25, pp. 7820-7839, 2006.

مدول برشی G_{12}

تنش برشی τ_{12}

مدول الاستیسیته E

علایم یونانی

ضریب پواسون ν_{12}

چگالی ρ

7- مراجع

- [1] E. Mehrbani Yeganeh, G. H. Liaghat, 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, 2014. (in Persian فارسی)
- [2] E. Mehrbani Yeganeh, G. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 1-10, 2014. (in Persian فارسی)
- [3] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*, First Edition, pp. 5-40, New York: Cambridge University Press, 2005.
- [4] L. Marie-Anne, E. Manouchehr Nejad, G. Augustin, Development of an efficient numerical model for hail impact simulation based on experimental data obtained from pressure sensitive film, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, No. 1, pp. 72-76, 2011.
- [5] H. Kim, K. T. Kedward, Experimental measurement and numerical prediction of hail ice impact damage on composite panels, *Proceeding of The 12th International Committee on Composite Materials*, Paris, France, July 5-9, 1999.
- [6] H. Kim, D. A. Welch, K. T. Kedward, Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 1, pp. 25-41, 2003.
- [7] R. Juntikka, R. Olsson, Experimental and modelling study of hail impact on composite plates, *Proceedings of The 17th International Conference of Composite Materials*, Mölndal, Sweden, July 27-31, 2009.
- [8] H. Park, H. Kim, Damage resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 177-184, 2010.
- [9] J. Rhymer, H. Kim, D. Roach, The damage resistance of quasi-isotropic carbon/epoxy composite tape laminates impacted by high velocity ice, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 7, pp. 1134-1144, 2012.
- [10] S. Dolati, A. Fereidoon, A. R. Sabet, The damage resistance of quasi-