



تحلیل عددی الاستیسیته غیرخطی ضربه کم‌سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی مستطیلی با رویه‌های کامپوزیتی تحت پیش‌بار دوبعدی

رحمت‌الله قاجار^{۱*}، محمد شریات^۲، سیدحسین حسینی^۳

^۱استاد مهندسی مکانیک، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،
^۲دانشیار مهندسی مکانیک، قطب علمی سازه‌ها و سامانه‌های هوشمند، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
^۳کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۷

چکیده

اکثر پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با ضربه کم‌سرعت ورق، پاسخ ورق به ضربه مرکزی را در بر می‌گیرند و عموماً برای حالت‌های بدون پیش‌بار انجام شده‌اند. در این مقاله به تحلیل عددی الاستیسیته غیرخطی ضربه کم‌سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی تحت پیش‌بار دوبعدی پرداخته می‌شود و تاثیر انرژی ضربه‌زنده، سفتی هسته، ضخامت هسته، شکل هندسی ضربه‌زننده و وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها در پاسخ ضربه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، بجای استفاده از تئوری‌های تقریبی ورق، از شبیه‌سازی سه‌بعدی ضربه در نرم افزار آباکوس برای استخراج پاسخ‌های ضربه بر پایه تئوری الاستیسیته استفاده می‌شود. نتایج عددی با نتایج تجربی ارائه شده در مراجع دیگر مقایسه و صحت مدل عددی مورد تایید قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که در حالت ضربه خارج از مرکز و در حالت پیش‌بار دوبعدی کششی به دلیل کاهش آزادی حرکت کلی ورق، نیروی تماسی افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش آسیب پدید آمده می‌باشد.

کلمات کلیدی: ورق ساندویچی مستطیلی، ضربه خارج از مرکز، پیش‌بار صفحه‌ای، تحلیل اجزاء محدود غیرخطی.

Nonlinear numerical elasticity analysis of eccentric low-velocity impact of a rectangular sandwich plate with composite face sheets subjected to biaxial preloads

R. Ghajar^{1*}, M. Shariyat², S.H. Hosseini³

1- Prof., Mech. Eng., Mechanical Properties Research Laboratory, K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Center of Excellence in Smart Structures and Systems, K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran

3- MSc., Mech. Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran

Abstract

Most of the studies done in low velocity impact of plates only involve plate's response to centric impact and usually have been done in no-preload condition. In this study, nonlinear numerical elasticity analysis of eccentric low-velocity impact of rectangular sandwich plate with composite face sheets subjected to biaxial preloads, and the effect of indenter energy, the stiffness of core, the thickness of core, geometry of indenter and the existence of epoxy layers in the connection between core and face sheets on impact response are investigated. In this regard, impact 3D simulation in ABAQUS rather than approximate plate theories is utilized for extracting impact responses based on the three-dimensional theory of elasticity. Numerical results are compared with experimental data presented in other references and the numerical model is verified. The analysis results showed that the contact force increased due to the reduction of overall plate movement in the cases of eccentric impact and biaxial tension preloads, which result in augmentation of damage.

Keywords: Rectangular sandwich plate, Eccentric impact, Inplane preload, Nonlinear finite element analysis.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱ ۸۴۰۶۳۲۴۰؛ فکس: ۰۲۱ ۸۸۶۷۷۲۷۴

آدرس پست الکترونیک: ghajar@kntu.ac.ir, shariyat@kntu.ac.ir, m_shariyat@yahoo.com,

s.h.hosseini@mail.kntu.ac.ir, hosseini_seyedhossein@yahoo.com

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از ورق‌های ساندویچی در بسیاری از سازه‌های دریایی، فضایی، شهری، خودروها و حتی در سازه‌های متداول عمومی شایع است. با به‌کارگیری این سازه‌ها، که عموماً به صورت سه‌لایه می‌باشند، می‌توان با افزایش ناچیز وزن سازه، ممان اینرسی‌های مقاطع آن را به طور قابل توجهی افزایش و تنش‌های پدید آمده را کاهش داد. در بسیاری موارد، ورق‌های ساندویچی حامل بار، در معرض ضربه پیش‌بینی نشده قرار می‌گیرند که بار اصلی سازه در تحلیل ضربه را می‌توان به عنوان پیش‌بار در نظر گرفت. با توجه به کاربرد گسترده ورق‌های ساندویچی در ساخت اجزای مکانیکی، شناخت خواص ضربه‌ای آن‌ها همچون خواص ایستایی، به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه، امری لازم و ضروری است.

با وجود آن‌که پژوهش‌های زیادی در ارتباط با ورق‌های تک لایه یا چند لایه کامپوزیتی و نیز ورق‌های تک لایه ساخته شده از مواد هدمند انجام شده است [۱ و ۲]، تحقیقات کم‌تری در ارتباط با ضربه ورق‌های ساندویچی منتشر شده است. بطور کلی، ضربه‌زننده از نظر سرعت به چهار دسته تقسیم می‌شود: ۱- کم‌سرعت (کمتر از ۳۰ متر بر ثانیه)، ۲- پرسرعت (۳۰ الی ۲۵۰ متر بر ثانیه)، ۳- بالستیک (۲۵۰ الی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) و ۴- مافوق سرعت (بیش از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) [۳]. عموماً ضربه زمانی کم‌سرعت پنداشته می‌شود که اثر امواج برگشتی از تکیه‌گاه‌ها، در زمان ضربه به محل ضربه برسد [۴]. قاجار و همکاران [۵] به تحلیل دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دو انحنایی، تحت ضربه گلوله کروی کم‌سرعت پرداخته‌اند. ابریت [۶] مروری بر روش‌های کلی تحلیل ضربه کم‌سرعت ورق‌های کامپوزیتی و ساندویچی را ارائه نموده است. بارلانی [۷]، مساله ضربه کم‌سرعت را با یافتن پاسخ‌های کلی سازه، با در نظر گرفتن توزیع فشار تماس ویژه برای شبیه‌سازی قانون تماس هرگز بررسی نمود. ژنگ و دنگ [۸]، ارتعاش غیرخطی آزاد صفحات کامپوزیتی چند لایه با خاصیت ویسکوالاستیک تحت تغییر شکل‌های ناشی از تنش برشی را مورد تحقیق قرار دادند. کیم و همکارانش [۹]، رفتار دینامیکی صفحات کامپوزیتی چند لایه را تحت شرایط بارگذاری از نوع جابجایی زیاد، با فرض مواد با خواص ویسکوالاستیک، بررسی نمودند. تحلیل به صورت اجزای محدود انجام شده و روش مقایسه، برای بررسی اثر دامنه‌های بارگذاری زیاد بر تغییرات زیاد ایجاد شده در خواص ذاتی مواد (از جمله فرکانس طبیعی صفحات لایه‌ای ویسکوالاستیک) در نظر گرفته شده است.

یک الگوریتم عددی برای تحلیل پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های پوسته کامپوزیتی با مواد ویسکوالاستیک ناهمسانگرد در حوزه‌ی زمان واقعی به وسیله یی و همکارانش [۱۰]، توسعه داده شد. روش آن‌ها بر مبنای اصول تغییرات و انتگرال زمانی مستقیم با استفاده از روش شتاب متوسط نیومارک است. تحلیل ارتعاشات و میرایی پوسته‌ی استوانه‌ای ارتوتروپیک با یک هسته‌ی ویسکوالاستیک مقید با استفاده از تئوری لایه‌های گسسته‌ی اجزای محدود توسط رامش و گانسان [۱۱] بررسی گردیده است. پالازوتو و همکاران [۱۲]، با به‌کارگیری سازگاری هندسی میان سطح ضربه‌زننده و سطح رویه بالائی در هر لحظه از زمان و فرض هسته به عنوان تکیه‌گاه الاستیک، رابطه تماس ویژه‌ای ارائه نمودند. اکاردی و فریرو [۱۳]، با به‌کارگیری یک روش به هنگام سازی انرژی، ضربه کم‌سرعت ورق ساندویچی را با به‌کارگیری تئوری زیگزگ برای ورق‌های رویه مدل‌سازی نمودند. در این زمینه، شعاع انحنای ناحیه تماس به صورت لحظه‌ای به هنگام می‌گردید. هراپ و پالازوتو [۱۴]، ضربه کم‌سرعت ورق ساندویچی را بر پایه تئوری ساده شده الاستیسیته مورد بررسی قرار داده و به گونه‌ای قانون تماس هرگز را بازسازی نمودند. لی و همکاران [۱۵]، ضربه کم‌سرعت ورق ساندویچی را با استفاده از تئوری ورق مندلین بررسی نمودند. فو و همکاران [۱۶]، از ترکیب روش موازنه انرژی و قانون بقای مومنم برای یافتن معادلات حاکم بر ضربه کم‌سرعت بهره جستند. آراجو و همکاران [۱۷]، مدل المان محدود جدیدی برای تحلیل صفحات چند لایه ساندویچی با هسته ویسکوالاستیک و رویه‌های کامپوزیتی چند لایه، که به عنوان حسگرهای پیزوالکتریک استفاده می‌گردند، ارائه نمودند. میونیر و شانوی [۱۸] رفتار دینامیکی صفحات ساندویچی تقویت شده با هسته فوم PVC را بررسی نمودند. این محققان توانستند روشی تحلیلی بر پایه تئوری تصحیح شده تغییر شکل برشی مرتبه بالا ردی [۱۴]، برای بررسی رفتار دینامیکی صفحات ساندویچی تقویت شده با فوم ارائه دهند. خلیلی و ملک‌زاده [۱۹] و [۲۰]، تئوری تصحیح شده و بهبود یافته مرتبه بالای صفحات ساندویچی (IHSAPT) [۱۵] را با اصلاح تئوری مرتبه بالای صفحات

5 Yi & et al

6 Ramesh & Ganesan

7 A.N. Palazotto & et al

8 U. Icardi & L. Ferrero

9 E. Herup & A.N. Palazotto

10 L.J. Lee & et al

11 C.C. Foo & et al

12 Araujo & et al

13 Meunier & Shanoy

14 Reddy

15 Improved Higher-order Sandwich Plate Theory

1 S. Abrate

2 R. Sbrulati

3 Zheng & Deng

4 Kim & et al

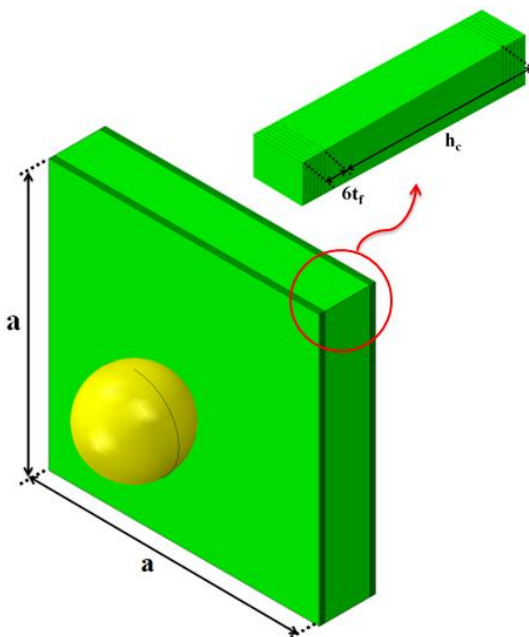
۱۲/۷ میلی‌متر تشکیل شده که خواص آن در جدول ۲ آمده است. این مجموعه با آرایش $[0_2/90_2/0_2/core/0_2/90_2/0_2]$ تشکیل شده است. ضخامت نهایی ورق ساندویچی ۱۵/۸۶۸ میلی‌متر می‌باشد. ورق ساندویچی بصورت سه‌بعدی مدل می‌شود. لذا نتایج بر اساس تئوری الاستیسیته سه‌بعدی (نه تئوری ورق) به دست می‌آیند. شرایط تکیه‌گاهی ورق ساندویچی از نوع ساده می‌باشند. به‌گونه‌ای که لایه میانی لبه‌های ورق ساندویچی، دارای شرایط تکیه‌گاهی زیر می‌باشند:

$$\text{at } x = -\frac{a}{2}, x = \frac{a}{2} : v = w = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\text{at } y = -\frac{a}{2}, y = \frac{a}{2} : u = w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

که در آن u ، v و w به ترتیب جابجایی در امتداد محورهای x ، y و z می‌باشند. المان‌های ورق ساندویچی از نوع المان‌های حجمی مکعب مستطیلی خطی ۸ گره‌ای^۶ انتخاب می‌شوند که هر گره دارای سه درجه آزادی از نوع جابجایی می‌باشد.

ضربه‌زننده جسمی صلب و کروی با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر و با جرم ۱/۸ کیلوگرم می‌باشد که با سرعت ۳/۷ متر بر ثانیه (انرژی ۱۲/۳۲ ژول) به صفحه ساندویچی برخورد می‌کند. المان‌های ضربه‌زننده از نوع المان‌های صلب چهار نقطه گره‌ای^۷ انتخاب می‌شوند.



شکل ۱- مدل هندسی ورق ساندویچی

ساندویچی پیشنهاد کردند. آمبور و کروز^۱ [۲۱]، به کمک روش حل نیمه تحلیلی پدیده ضربه روی یک صفحه چند لایه کامپوزیتی ساندویچی را به صورت دینامیکی مدل کردند و از رابطه برخورد هرتز که با فرض شبه استاتیک بودن بدست آمده است استفاده کردند. السول^۲ [۲۲]، با بررسی تئوری و تجربی ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی، نشان داد که قانون برخورد هرتز برای پانل‌های ساندویچی درست نبوده و باید اصلاح گردد. لی و هانگ و فان^۳ [۲۳]، رفتار ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی الیافی را تحت بار ضربه‌ای بررسی کردند. در این بررسی تجربی، ورق روی سطح صلب قرار گرفته است. کارپینو^۴ [۲۴]، افتادن یک وزنه روی پانل‌های شیشه پلی استر را به طور تجربی آزمایش کرد. وی یک مدل جرم و فنر با یک درجه آزادی را برای محاسبه تحلیلی نیروی برخورد به کار برد.

مرور مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با ضربه کم‌سرعت ورق، پاسخ ورق به ضربه مرکزی را در بر می‌گیرند و عموماً برای حالت‌های بدون پیش‌بار انجام شده‌اند. در پژوهش حاضر، به تحلیل عددی الاستیسیته ضربه کم‌سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی تحت پیش‌بار دوبعدی پرداخته می‌شود و تاثیر انرژی ضربه‌زننده، سفتی هسته، ضخامت هسته، شکل هندسی ضربه‌زننده و وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها در پاسخ ضربه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استخراج نتایجی با خطای کم نسبت به داده‌های تجربی، از شبیه‌سازی سه‌بعدی ضربه در نرم افزار آباکوس^۵ برای استخراج پاسخ‌های ضربه بر پایه تئوری الاستیسیته سه‌بعدی که نتیجه ضمنی آن اصلاح قانون تماس می‌باشد استفاده می‌شود.

۲- مدل‌سازی عددی

جهت صحت‌گذاری نتایج، نتایج تحلیل حاضر با نتایج آزمایش تجربی ضربه مرکزی کم‌سرعت یک ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی در حالت بدون پیش‌بار [۲۵]، مقایسه می‌گردد. ورق ساندویچی مورد نظر، صفحه‌ای به ابعاد $76/2 \times 76/2$ میلی‌متر می‌باشد، که در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه مختصات در مرکز این ورق مربعی به ضلع a و در وسط ضخامت ورق قرار دارد. هر رویه کامپوزیتی از شش لایه به ضخامت $0/264$ میلی‌متر تشکیل شده است. خواص رویه‌های کامپوزیتی در جدول ۱ درج شده است [۲۵]. هسته نیز از یک لایه فوم با ضخامت

¹ Ambur & Cruz

² Olsson

³ Lee & Huang & Fann

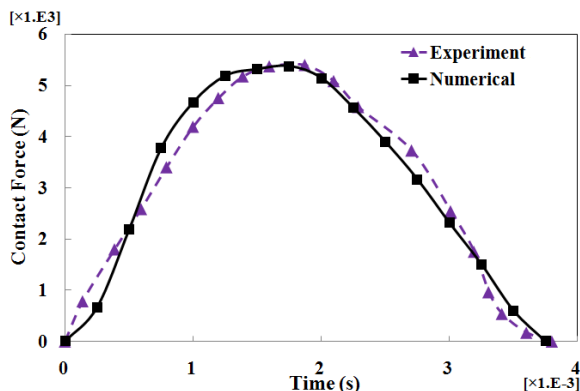
⁴ Carpino

⁵ ABAQUS

⁶ SC8R : An 8-node three-dimensional elements, reduced integration with hourglass control

⁷ R3D4 : A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

دارند و خطای بیشینه در میزان نیروی تماسی در تمامی مدت زمان برخورد نیز ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۳- صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج تجربی [۲۵]

همان‌گونه که در تعریف ضربه کم‌سرعت، در بخش مقدمه ذکر گردید، نیمه اول پاسخ زمانی (ناحیه بارگذاری) از شکل ۳، متاثر از پدیده تماس و فروروی ضربه‌زنده در ورق و بخش دوم (ناحیه باربرداری)، ناشی از فرایند بازگشت امواج ضربه از تکیه‌گاه و پرت نمودن ضربه‌زنده از سطح ورق است. با توجه به اینکه پاسخ این دو ناحیه ناشی از دو پدیده متفاوت می‌باشند، منحنی‌های پاسخ شکل ۳ متقارن نمی‌باشند. عموماً در تئوری‌های تماس، پاسخ نیروی تماس در ناحیه بارگذاری با رابطه توان سه دوم و در ناحیه باربرداری، با توان پنج دوم میزان فروروی نمایانده می‌شود [۶].

برای تحلیل عددی الاستیسیته ضربه کم‌سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی تحت پیش‌بار دوبعدی، ابتدا اثر هر یک از موارد ضربه خارج از مرکز و پیش‌بار دوبعدی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در نهایت به تحلیل هم‌زمان دو مورد فوق پرداخته خواهد شد.

۳- اثر ضربه خارج از مرکز

برای بررسی اثر ضربه خارج از مرکز دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) ضربه خارج از مرکز در نقطه $(x=a/4, y=0)$

ب) ضربه خارج از مرکز در نقطه $(x=y=a/4)$

نتایج تحلیل در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه محل برخورد ضربه‌زنده از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌گردد از آنجایی که تاثیر تکیه‌گاه‌ها بر المان‌های محل برخورد بیشتر می‌شود، میزان خیز محل برخورد کاهش و مقدار نیروی تماسی و میزان جذب انرژی توسط سازه افزایش می‌یابد، در حالی که مدت زمان برخورد ثابت باقی می‌ماند.

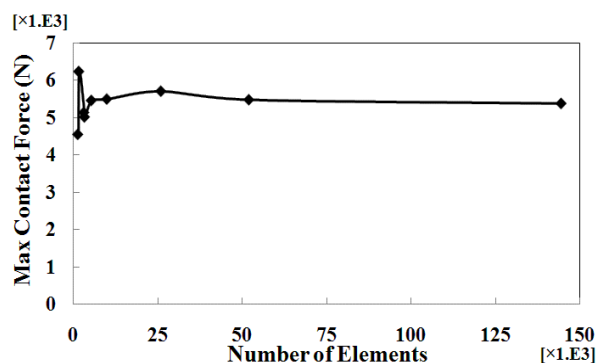
جدول ۱- خواص رویه‌های ورق ساندویچی [۲۵]

ماده	LTM45EL-CF0111 Carbon fiber
$E_{11} (GPa)$	۵۴
$E_{22} (GPa)$	۵۴
$E_{33} (GPa)$	۴/۸۴
$G_{12} (GPa)$	۳/۱۶
$G_{13} (GPa)$	۱/۸۷
$G_{23} (GPa)$	۱/۸۷
ν_{12}	۰/۰۶
ν_{13}	۰/۳۱۳
ν_{23}	۰/۳۱۳
$\rho (kg/m^3)$	۱۵۱۱
$t_f (mm)$	۰/۲۶۴
$a (mm)$	۷۶/۲

جدول ۲- خواص هسته ورق ساندویچی [۲۵]

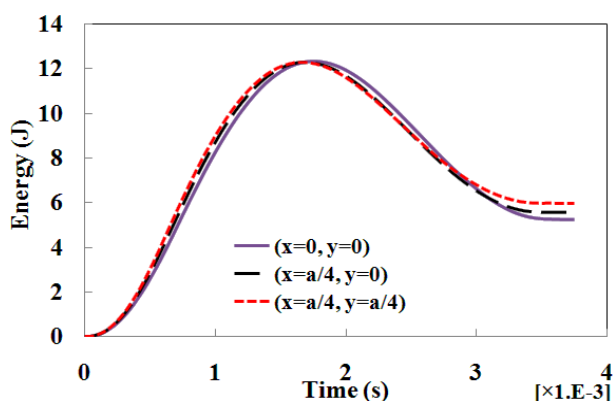
ماده	فوم
$E (GPa)$	۰/۱۸
ν	۰/۲۸۶
$\rho (kg/m^3)$	۱۱۰
$h_c (mm)$	۱۲/۷
$a (mm)$	۷۶/۲

برای رسیدن به یک مدل مطلوب و همگرا شدن جواب‌ها، اندازه المان‌ها در چندین مرحله حل، ریزتر می‌شوند تا جواب‌های به دست آمده همگرا شوند. همان‌طور که از شکل ۲ نمایان است، با اینکه همگرایی نتایج در ۵۰ هزار المان روی داده است اما جهت دستیابی به نتایجی دقیق با کم‌ترین خطای ممکن از حدود ۱۵۰ هزار المان در تحلیل‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۲- نمودار بررسی همگرایی نتایج

مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی [۲۵] در شکل ۳، صحت مدل عددی را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تحلیل حاضر در دو پارامتر کلیدی یعنی نیروی تماس بیشینه و مدت زمان تماس، خطای بسیار ناچیزی نسبت به نتایج تجربی



شکل ۶- تاثیر ضربه خارج از مرکز بر انرژی جذب شده توسط سازه

۴- اثر پیش‌بار دوبعدی

اثر پیش‌بار درون صفحه‌ای دوبعدی در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد:

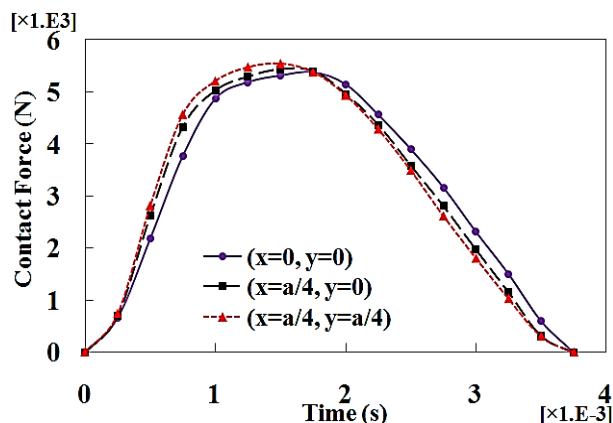
الف) تنش درون صفحه‌ای به میزان ۸ مگاپاسکال در سه وضعیت متفاوت دو طرف فشاری، یک طرف فشاری- یک طرف کششی و دو طرف کششی به لبه‌های ورق ساندویچی اعمال می‌گردد. در حالی که کاربرد ورق‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی تحت کشش دوبعدی یا کشیدگی برخی لبه‌ها و فشردگی لبه‌های سمت دیگر شایع است، کاربرد ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی، تحت فشار دوبعدی را عمدتاً می‌توان در سازه هواپیما، سازه‌های دریایی، زیردریایی و کشتی‌ها که از تمام جهات محیط پیرامون تحت فشار می‌باشند، یافت [۲۶]. ورق‌های یاد شده می‌توانند ورق‌های خارجی یا ورق‌های مسطح بکار رفته درون سازه باشند. کاربرد این نوع ورق‌های ساندویچی، در سازه‌های بتونی، با دو رویه کامپوزیتی (بتون، به عنوان هسته)، نیز گزارش شده است [۲۷].

پیش از ارائه نتایج این بخش، جهت صحت‌گذاری نتایج تحلیل یک مساله که قبلاً توسط ملک‌زاده و همکاران [۲۸] با استفاده از مدل گسسته-جرم فشر، تئوری Frostig [۲۹] و بکارگیری تئوری ورق برشی مرتبه اول برای رویه‌ها ارائه شده، به روش این مقاله حل می‌شود. ویژگی‌های هندسی و مواد رویه‌های کربن-اپوکسی ورق، عبارتند از:

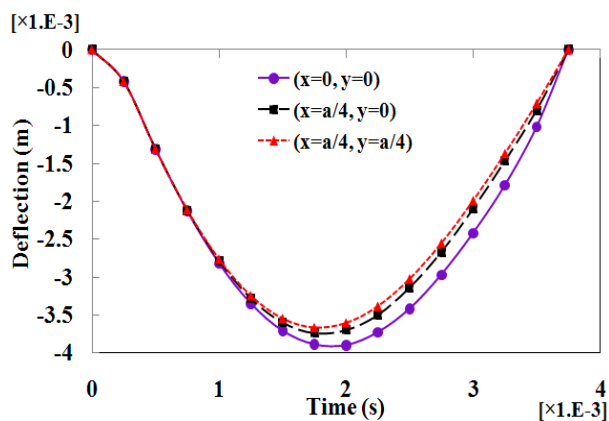
$$\begin{aligned}
 E_{11} &= 123 \text{ GPa}, & E_{22} &= E_{33} = 9.5 \text{ GPa}, \\
 G_{12} &= 47.3 \text{ GPa}, & G_{13} &= G_{23} = 4.7 \text{ GPa}, \\
 \nu_{12} &= \nu_{13} = 0.3, & \nu_{23} &= 0.48, & \rho &= 1515 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \\
 3h &= 8 \text{ mm}, & a &= b = 0.5 \text{ m} \\
 & & & & & \text{و مشخصات ضربه‌زننده فولادی عبارتند از:} \\
 E &= 211 \text{ GPa}, & G &= 82.46 \text{ GPa}, & \rho &= 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \\
 R &= 25.4 \text{ mm}, & M &= 0.2199 \text{ kg}, & V &= 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

در ارتباط با بررسی مکان ضربه، هدف بررسی کمی میزان تاثیر خروج از مرکز است. در تحلیل‌های موجود، تنها ضربه مرکزی بررسی شده است. تحلیل‌های کنونی نشان داده‌اند که طراحی بر پایه ضربه مرکزی در جهت صحیح طراحی نمی‌باشد. زیرا نیروی ضربه و در نتیجه، تنش‌های سطحی پدید آمده، در ضربه خارج از مرکز بزرگ‌ترند. از آنجا که مکان ضربه معمولاً اتفاقی است، برای بررسی تنش‌های بزرگ‌تر، باید نواحی نزدیک به گوشه‌های ورق در نظر گرفته شوند.

شکل ۶ تغییرات زمانی انرژی ورق را نشان می‌دهد. در فاز بارگذاری ورق، انرژی ضربه‌زننده به تدریج به ورق منتقل می‌شود تا زمانی که ضربه‌زننده متوقف گردد. در این لحظه، انرژی انتقال یافته به ورق بیشینه است. پس از آن، ورق انرژی لازم برای پرتاب ضربه‌زننده را به تدریج در اختیار قرار می‌دهد. از آنجا که سطح زیر منحنی نیرو-زمان ناحیه بارگذاری بزرگ‌تر است، پس از جدایش ضربه‌زننده، انرژی ورق به صفر نمی‌رسد. با توجه به اینکه میرایی سازه‌ای در ورق پیش‌بینی نشده است، انرژی بجای مانده در ورق، پس از جدایش ضربه‌زننده، پایا مانده و ارتعاش در زمان‌های بعدی با دامنه ثابت ادامه می‌یابد.

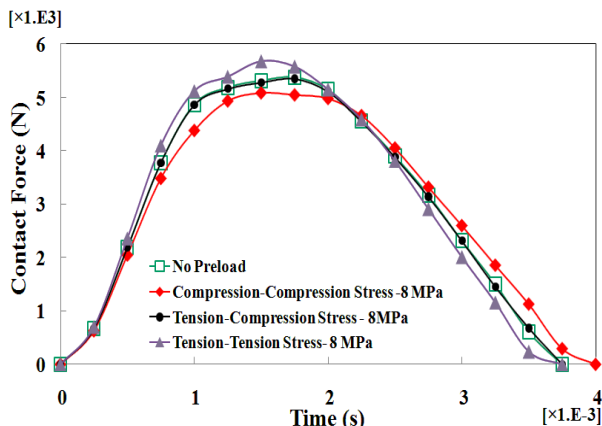


شکل ۴- تاثیر ضربه خارج از مرکز بر نیروی برخورد

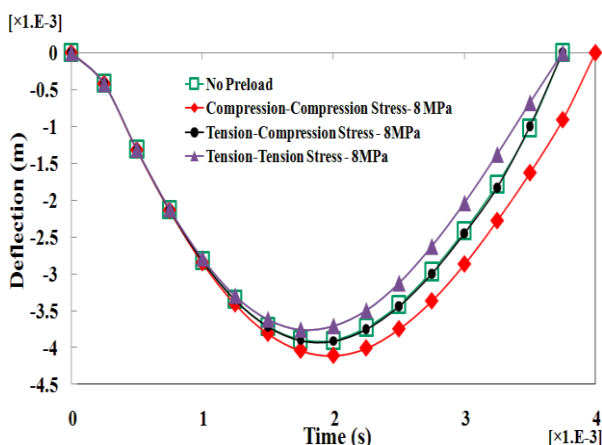


شکل ۵- تاثیر ضربه خارج از مرکز بر خیز محل برخورد

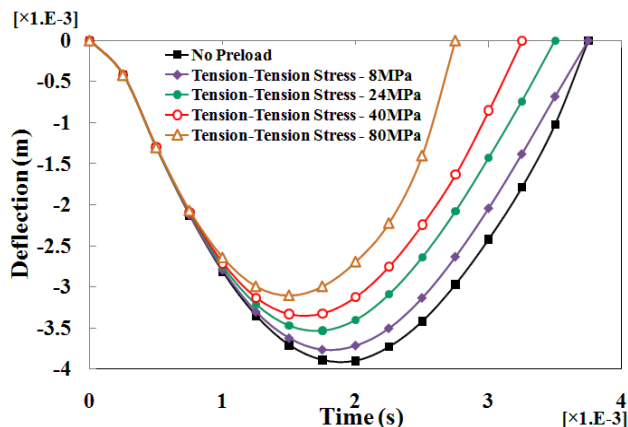
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان پیش‌بار دو طرف کششی، میزان نیروی برخورد افزایش اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تاثیر پیش‌بارهای دوطرفی کششی و فشاری بر نیروی برخورد

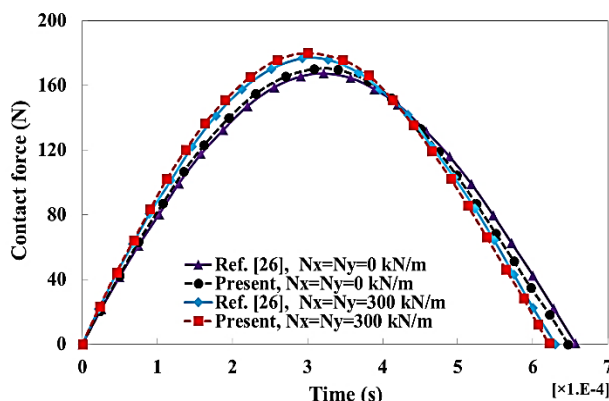


شکل ۹- تاثیر پیش‌بارهای دوطرفی کششی و فشاری بر خیز محل برخورد



شکل ۱۰- تاثیر مقادیر مختلف پیش‌بار دو طرف کششی بر نیروی برخورد

الیاف رویه‌ها در جهت X و لبه‌های عمود بر محورهای X و Y، به ترتیب، تحت نیروهای کششی بر واحد طول N_x و N_y قرار دارند. تاریخچه تغییرات نیروی تماس پیش‌بینی شده توسط تحلیل سه‌بعدی کنونی، با تاریخچه پیش‌بینی شده توسط مرجع [۲۸] در شکل ۷، برای ورق‌های با و بدون پیش‌بار مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج، بیانگر تطابق خوب میان نتایج کنونی و نتایج مرجع [۲۸] می‌باشند.

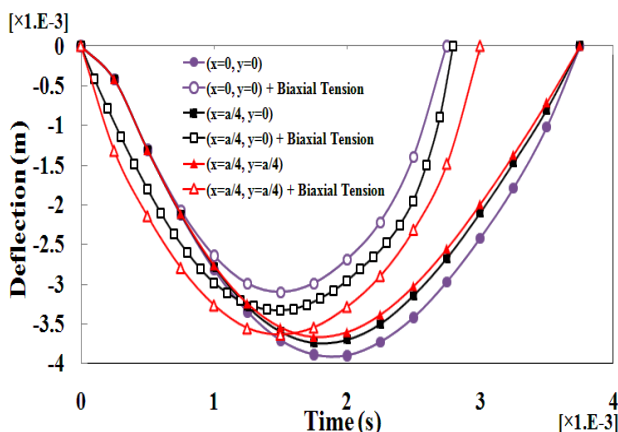


شکل ۷- مقایسه‌ای میان نتایج تحلیل سه‌بعدی کنونی و نتایج مرجع [۲۸]، برای ورق با و بدون پیش‌بار کششی

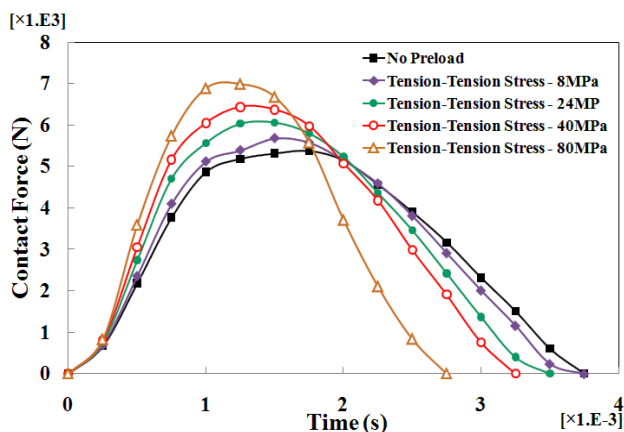
برای بررسی مناسب‌تر اثر پیش‌بار، از طریق وارد نمودن نیروهای پیش‌بار بزرگ‌تر، ابتدا تحلیل کمانش ورق انجام شده و بار بحرانی کمانش ورق ساندویچی ۱۰ مگاپاسکال بدست آمد. لذا جهت اعمال پیش‌بار دوطرفی، مقدار ۸ مگاپاسکال انتخاب گردید تا در حالت پیش‌بار دوطرفی فشاری، سازه دچار کمانش نگردد.

همان‌طور که از شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است در حالت تنش درون صفحه‌ای دو طرف فشاری میزان نیروی برخورد، به دلیل تمایل بار فشاری به ایجاد خیزهای بزرگتر (و در حالت حدی، کمانش) و دور نمودن ورق از ضربه‌زننده کاهش یافته اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد. در حالت تنش درون صفحه‌ای یک طرف فشاری- یک طرف کششی نتایج نسبت به حالت بدون پیش‌بار تغییری نکرده است. در حالت تنش درون صفحه‌ای دو طرف کششی میزان نیروی برخورد به دلیل کاهش آزادی حرکت کلی ورق، افزایش اما میزان خیز محل برخورد کاهش، در حالی که مدت زمان برخورد ثابت می‌ماند.

ب) رفتار ورق در ازای افزایش پیش‌بار بررسی می‌شود. در این راستا، در وضعیت تنش درون صفحه‌ای دو طرف کششی میزان تنش اعمالی به لبه‌های ورق ساندویچی از مقدار ۸ مگاپاسکال به مقادیر ۳، ۵ و نهایتاً ۱۰ برابر افزایش می‌یابد و منجر به نتایجی می‌گردند که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۳- تاثیر محل ضربه بر خیز محل برخورد در حالت پیش‌بار دوطبقی کششی ۸۰MPa



شکل ۱۱- تاثیر مقادیر مختلف پیش‌بار دو طرف کششی بر خیز محل برخورد

مقادیر بیشینه نیروی برخورد، خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد در جدول ۳ ارائه شده و در جدول ۴ درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت‌های اولیه بدون پیش‌بار خودشان بیان گردیده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مختلف ضربه مرکزی و خارج از مرکز بدون پیش‌بار و با پیش‌بار دوطبقی کششی ۸۰MPa

موقعیت ضربه‌زننده	وجود و یا عدم وجود پیش‌بار دوطبقی	بیشینه نیروی برخورد (kN)	خیز محل برخورد (mm)	مدت زمان برخورد (ms)
(x=y=0)	بدون پیش‌بار	۵/۳۷۶	۳/۹۰	۳/۷۵
	با پیش‌بار	۶/۹۹۴	۳/۱۰	۲/۷۵
(x=0, y=a/4)	بدون پیش‌بار	۵/۴۲۲	۳/۷۴	۳/۷۵
	با پیش‌بار	۶/۳۲۴	۳/۳۳	۲/۸۰
(x=y=a/4)	بدون پیش‌بار	۵/۵۴۶	۳/۶۶	۳/۷۵
	با پیش‌بار	۵/۸۷۲	۳/۶۳	۳

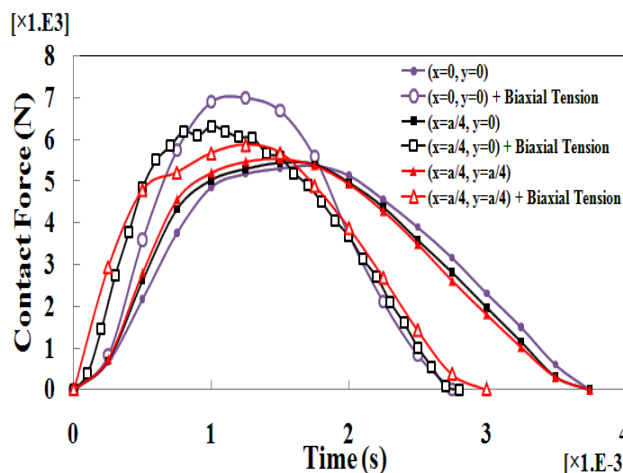
جدول ۴- تاثیر پیش‌بار دوطبقی کششی بر درصد تغییرات پارامترهای مختلف در مقایسه با حالت‌های اولیه بدون پیش‌بار

موقعیت ضربه‌زننده	درصد افزایش نیروی برخورد	درصد کاهش خیز محل برخورد	درصد کاهش مدت زمان برخورد
(x=y=0)	۳۰/۰۹	۲۰/۵۱	۲۶/۶۶
(x=0, y=a/4)	۱۶/۴۲	۱۰/۹۶	۲۵/۳۳
(x=y=a/4)	۵/۸۸	۰/۸۲	۲۰

همان‌طور که از جدول ۴ نمایان است اثر پیش‌بار دارای تابعیت مکانی می‌باشد بگونه‌ای که بیشترین اثر پیش‌بار در مرکز دیده می‌شود و هر چه از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌شویم از تاثیر پیش‌بار کاسته می‌شود.

هدف از بررسی اثر پیش‌بار، بررسی میزان مضر بودن ضربه در حالت‌های پیش‌بار مختلف است. پیش‌بار، بار اولیه سازه بوده و قابل تغییر نمی‌باشد. نتایج تحلیل، برای مثال آشکار ساخته‌اند که اگر بار اولیه سازه کششی باشد، میزان آسیب وارده، به دلیل پدید آمدن نیروی ضربه بزرگ‌تر، بیشتر بوده و باید اقداماتی جهت تقویت سازه برای تحمل بار ضربه، مانند افزایش سختی سطحی، در نظر گرفته شوند.

پس از اینکه اثر هر یک از موارد ضربه خارج از مرکز و پیش‌بار دوطبقی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت، حال به تحلیل هم زمان این دو پارامتر پرداخته می‌شود. برای این منظور هر یک از حالت‌های ضربه مرکزی، ضربه خارج از مرکز در نقطه (x=0, y=a/4) و ضربه خارج از مرکز در نقطه (x=y=a/4) تحت پیش‌بار دوطبقی کششی ۸۰ مگاپاسکالی قرار گرفته‌اند. نتایج تحلیل در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



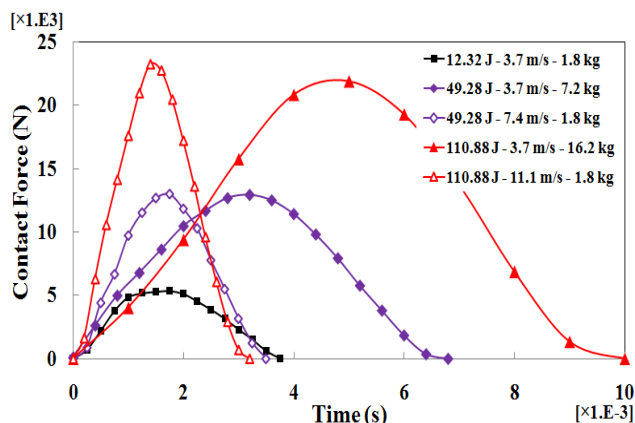
شکل ۱۲- تاثیر محل ضربه بر نیروی برخورد در حالت پیش‌بار دوطبقی کششی ۸۰MPa

جدول ۵- تاثیر هم‌زمان پیش‌بار دوبعدی کششی و ضربه خارج از

مرکز		
حالت ضربه	بیشینه	درصد افزایش نیروی
پیش‌بار کششی	نیروی	برخورد نسبت به ضربه
ضربه مرکزی بدون	برخورد (N)	مرکزی بدون پیش‌بار
پیش‌بار کششی	۵/۳۷۶	-
ضربه مرکزی تحت	۶/۹۹۴	۳۰/۹۰
پیش‌بار دوبعدی		
کششی ۸۰MPa		
ضربه خارج از مرکز در	۵/۵۴۶	۳/۱۶
نقطه $(x=y=a/4)$ بدون		
پیش‌بار کششی		
ضربه خارج از مرکز در	۵/۸۷۲	۹/۲۳
نقطه $(x=y=a/4)$ تحت		
پیش‌بار دوبعدی		
کششی ۸۰MPa		

۵- اثر انرژی ضربه‌زننده

برای بررسی اثر انرژی ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه سازه، میزان انرژی ضربه‌زننده از ۱۲/۳۲ ژول به مقادیر ۴ و ۹ برابر افزایش می‌یابد. برای این منظور یک‌بار با ثابت ماندن جرم ضربه‌زننده به میزان ۱/۸ کیلوگرم، میزان سرعت ضربه‌زننده از ۳/۷ متر بر ثانیه به مقادیر ۲ و ۳ برابر افزایش می‌یابد و بار دیگر با ثابت ماندن سرعت ضربه‌زننده به میزان ۳/۷ متر بر ثانیه، جرم ضربه‌زننده از ۱/۸ کیلوگرم به مقادیر ۴ و ۹ برابر افزایش می‌یابد، تا علاوه بر بررسی اثر انرژی ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه سازه، به مقایسه تفاوت این دو روش مختلف در افزایش انرژی ضربه‌زننده نیز پرداخته شود. نتایج تحلیل در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴- تاثیر انرژی ضربه‌زننده بر نیروی برخورد

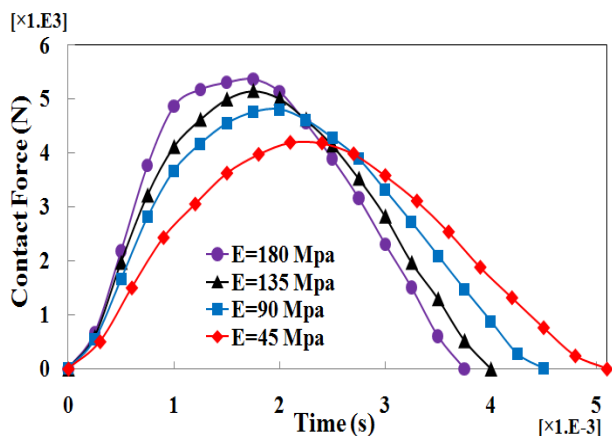
در جمع‌بندی تحلیل ضربه خارج از مرکز تحت پیش‌بار دوبعدی می‌توان به دو نکته زیر اشاره داشت :

الف) در بین چهار حالت ممکن ضربه شامل حالت‌های :

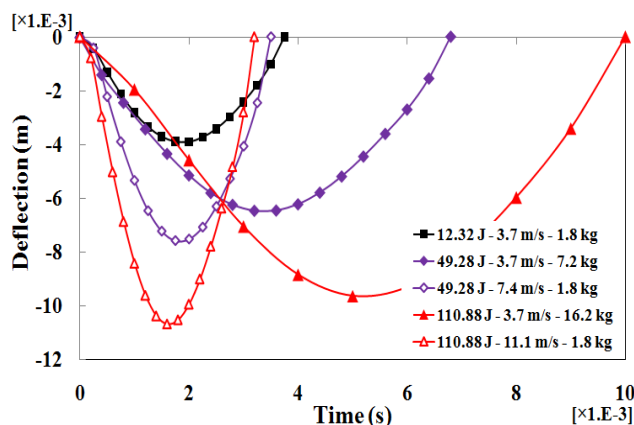
- ۱- ضربه مرکزی
 - ۲- ضربه مرکزی تحت پیش‌بار دوبعدی فشاری
 - ۳- ضربه خارج از مرکز
 - ۴- ضربه خارج از مرکز تحت پیش‌بار دوبعدی فشاری
- با توجه به اینکه اثر پیش‌بار دوبعدی فشاری و خارج از مرکز عکس یکدیگر می‌باشد (پیش‌بار فشاری موجب کاهش نیروی برخورد می‌گردد در حالی که خارج از مرکز بودن ضربه موجب افزایش نیروی برخورد می‌گردد) در نتیجه بحرانی‌ترین حالت که در آن بیش‌ترین نیروی برخورد و به تبع آن بیش‌ترین آسیب ایجاد خواهد شد مربوط به حالت ۳ یعنی ضربه خارج از مرکز بدون پیش‌بار دوبعدی فشاری خواهد بود.

ب) در بین چهار حالت ممکن ضربه شامل حالت‌های :

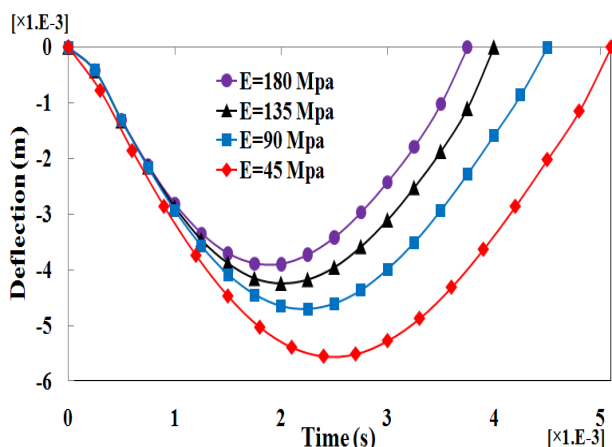
- ۱- ضربه مرکزی
 - ۲- ضربه مرکزی تحت پیش‌بار دوبعدی کششی
 - ۳- ضربه خارج از مرکز
 - ۴- ضربه خارج از مرکز تحت پیش‌بار دوبعدی کششی
- با توجه به اینکه اثر پیش‌بار دوبعدی کششی و خارج از مرکز شبیه یکدیگر می‌باشد (هر دو عامل موجب افزایش نیروی برخورد می‌گردند) به نظر می‌رسد که بحرانی‌ترین حالت که در آن بیش‌ترین نیروی برخورد و به تبع آن بیش‌ترین آسیب ایجاد خواهد شد مربوط به حالت ۴ یعنی ضربه خارج از مرکز تحت پیش‌بار دوبعدی کششی باشد. اما نتایج تحلیل نشان می‌دهند، علی‌رغم اینکه هر دو عامل پیش‌بار دوبعدی کششی و خارج از مرکز بودن ضربه در راستای افزایش نیروی برخورد عمل می‌کنند، اما از آنجایی که بیشینه اثر این دو عامل از نظر مکانی در خلاف جهت هم روی می‌دهد (بیش‌ترین اثر خارج از مرکز در دورترین نقطه از مرکز روی می‌دهد در حالیکه بیش‌ترین اثر پیش‌بار دوبعدی کششی در مرکز نمایان می‌گردد) تنها می‌توان گفت که بحرانی‌ترین حالت یکی از حالت‌های ۲، ۳ و ۴ خواهد بود اما این‌که کدامیک از این سه حالت بحرانی‌تر است بستگی دارد که در مساله مورد بررسی اثر کدامیک از دو عامل پیش‌بار دوبعدی کششی و یا خارج از مرکز بودن ضربه بر دیگری غلبه کند. برای نمونه در مساله خاص مورد بررسی در این مقاله با توجه به نتایج بیان شده در جدول ۵ از بین سه مورد بحث شده، حالت ضربه مرکزی تحت پیش‌بار دوبعدی کششی ۸۰ مگاپاسکال بحرانی‌ترین حالت می‌باشد.



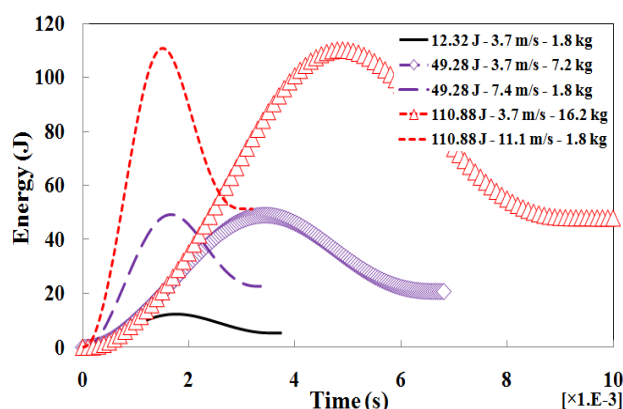
شکل ۱۷- تاثیر سفتی هسته بر نیروی برخورد



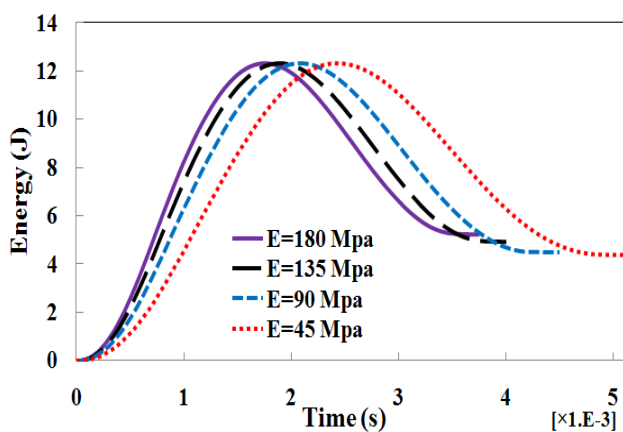
شکل ۱۵- تاثیر انرژی ضربه‌زننده بر خیز محل برخورد



شکل ۱۸- تاثیر سفتی هسته بر خیز محل برخورد



شکل ۱۶- تاثیر انرژی ضربه‌زننده بر جذب انرژی سازه



شکل ۱۹- تاثیر سفتی هسته بر انرژی جذب شده توسط سازه

۷- اثر ضخامت هسته

جهت بررسی اثر ضخامت هسته ورق ساندویچی بر پاسخ ضربه، یکبار ضخامت هسته نصف گردید و بار دیگر هسته به‌طور کامل حذف گردید و دو پوسته کامپوزیتی به‌صورت یک‌پارچه به یکدیگر متصل گشتند. نتایج تحلیل در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی ضربه‌زننده (افزایش جرم ضربه‌زننده یا افزایش سرعت ضربه‌زننده)، میزان نیروی برخورد، خیز محل برخورد و درصد انرژی جذب شده توسط سازه افزایش می‌یابد. با افزایش جرم ضربه‌زننده شاهد افزایش مدت زمان برخورد می‌باشیم در حالی‌که افزایش سرعت ضربه‌زننده باعث کاهش مدت زمان برخورد می‌گردد.

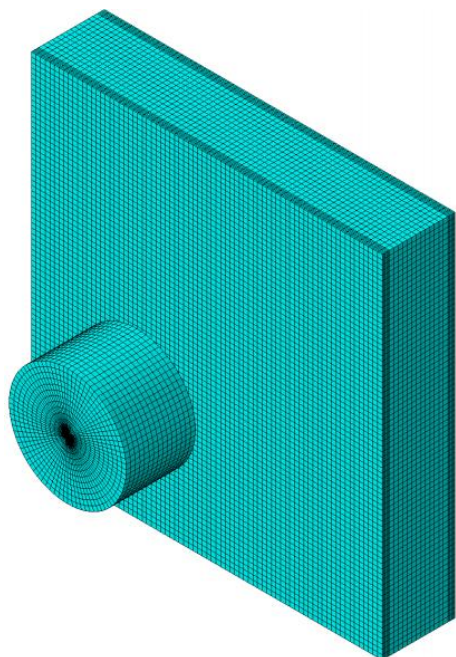
۶- اثر سفتی هسته

برای بررسی اثر سفتی هسته، میزان سفتی هسته از ۱۸۰ مگاپاسکال به مقادیر ۱۳۵، ۹۰ و ۴۵ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. در نتیجه، حالت‌های گوناگون ورق ساندویچی با هسته نسبتاً سفت و هسته نرم مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که با کاهش سفتی هسته، ضریب پواسان ثابت باقی می‌ماند.

نتایج بدست آمده در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ ارائه گردیده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش سفتی هسته میزان نیروی برخورد و انرژی جذب شده توسط سازه کاهش اما خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد.

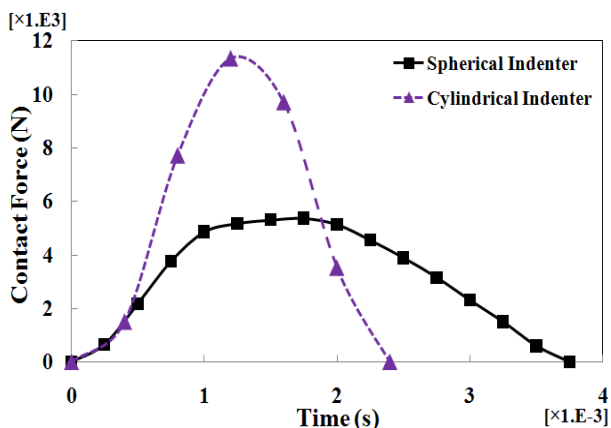
۸- اثر شکل هندسی ضربه‌زننده

برای بررسی اثر شکل هندسی ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه، ضربه‌زننده صلب از کره به استوانه‌ای با قطر، جرم و سرعت یکسان نسبت به کره تغییر داده می‌شود. (شکل ۲۳)



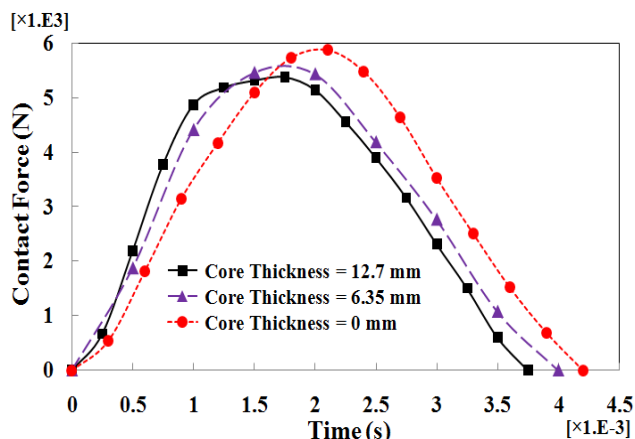
شکل ۲۳- تغییر ضربه‌زننده صلب از کره به استوانه‌ای با قطر، جرم و سرعت یکسان

با توجه به نتایج بدست آمده در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌شود که با تبدیل ضربه‌زننده کروی به ضربه‌زننده استوانه‌ای، به دلیل افزایش چشمگیر سفتی ناحیه تماس، نیروی برخورد افزایش چشم‌گیری داشته در حالی که خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد دچار کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌شوند.

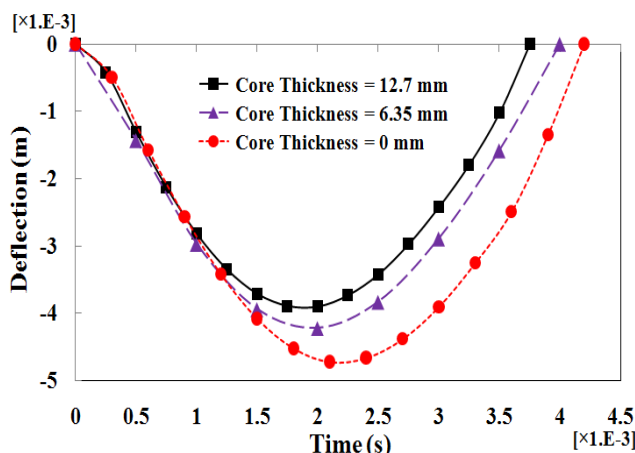


شکل ۲۴- تاثیر شکل هندسی ضربه‌زننده بر نیروی برخورد

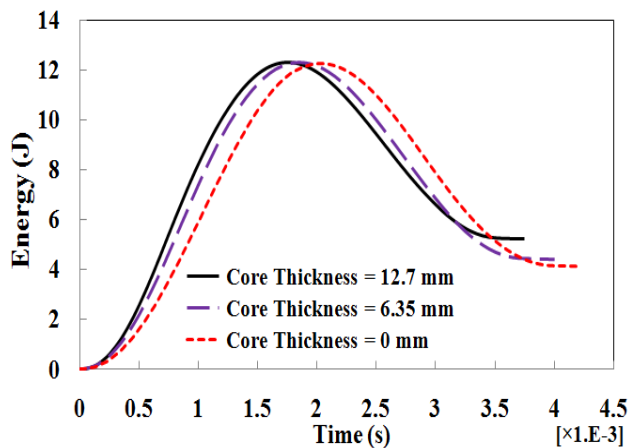
همان‌طور که از نتایج مشخص است با کاهش ضخامت هسته به دلیل کاهش ممان اینرسی مقطع، نیروی برخورد، خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد در حالی که انرژی جذب شده توسط سازه کاهش می‌یابد.



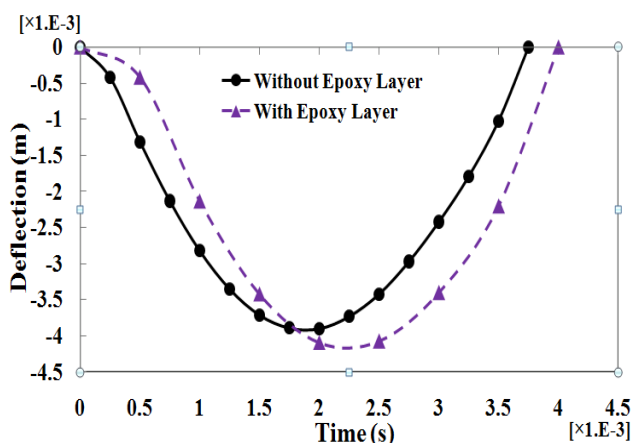
شکل ۲۰- تاثیر ضخامت هسته بر نیروی برخورد



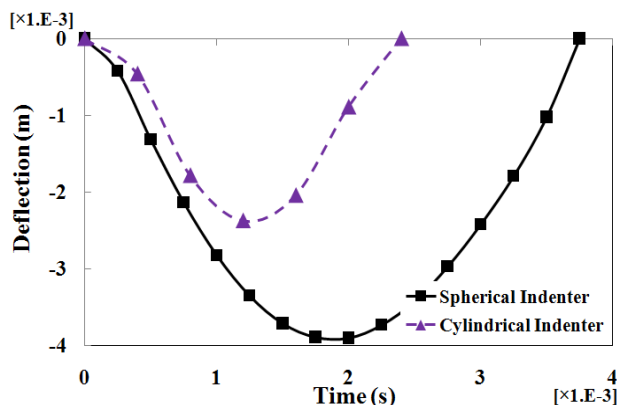
شکل ۲۱- تاثیر ضخامت هسته بر خیز محل برخورد



شکل ۲۲- تاثیر ضخامت هسته بر انرژی جذب شده توسط سازه



شکل ۲۷- تاثیر وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها بر خیز محل برخورد

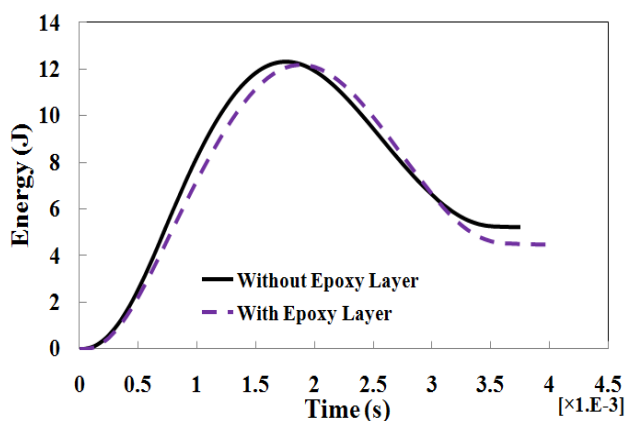


شکل ۲۵- تاثیر شکل هندسی ضربه‌زننده بر خیز محل برخورد

۹- اثر وجود و یا عدم وجود لایه‌های چسب در

محل اتصال هسته به رویه‌ها

در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پاسخ ضربه ورق‌های ساندویچی، اثر لایه‌های چسب در اتصال هسته به رویه‌ها و تاثیر آن در پاسخ ضربه، در نظر گرفته نشده است. لذا در این مقاله به بررسی تاثیر وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها و تاثیر آن در پاسخ ضربه سازه پرداخته می‌شود. برای این منظور لایه‌هایی از هسته با ضخامت یک میلی‌متر در محل اتصال هسته به رویه بالایی و رویه پایینی، به لایه‌هایی از چسب با جنس اپوکسی با مدول یانگ $3/4 \text{ GPa}$ و نسبت پواسون $0/3$ اختصاص داده می‌شود تا با کاهش ۲ میلی‌متری ضخامت هسته و ایجاد دو لایه ۱ میلی‌متری چسب در محل اتصال هسته به رویه پایینی و رویه بالایی، ضخامت ورق ساندویچی ثابت باقی بماند. نتایج تحلیل در شکل‌های ۲۶ تا ۲۸ نشان داده شده‌اند.

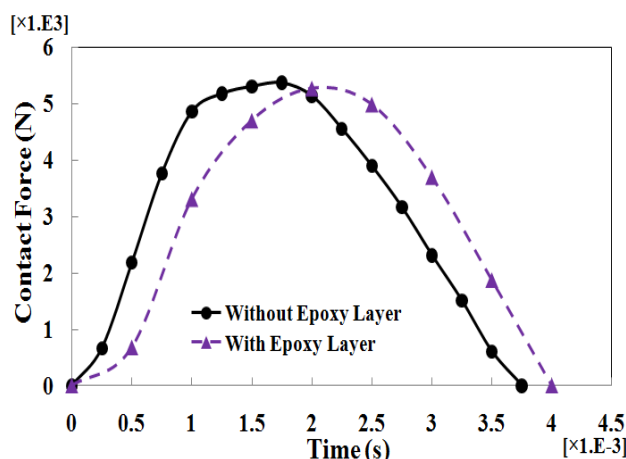


شکل ۲۸- تاثیر وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها بر انرژی جذب شده توسط سازه

همان‌طور که مشاهده می‌شود بررسی اثر وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها که عمدتاً در مقالات موجود، از آن چشم‌پوشی شده است، اثر محسوسی در نتایج دارد، به گونه‌ای که اثر آن با اثر برخی از پارامترهای دیگر موثر بر پاسخ ضربه، قابل مقایسه می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، این اثر نیز در تحلیل‌های مشابه با تحلیل پژوهش کنونی، در نظر گرفته شود.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل عددی الاستیسیته ضربه کم‌سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی تحت پیش‌بار دوبعدی پرداخته شد و تاثیر انرژی ضربه‌زننده، سفتی هسته، ضخامت هسته، شکل هندسی ضربه‌زننده و وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها در پاسخ ضربه مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارتند از:



شکل ۲۶- تاثیر وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها بر نیروی برخورد

- composites. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- [4] Birman V, Chandrashekhara K, Sain S (1996) An approach to optimization of shape memory alloy hybrid composite plates subjected to low-velocity impact. *Composites Part B* 27: 439-446.
- [۵] قاجار رحمت‌الله، ملک‌زاده کرامت، غلامی محسن (۱۳۹۰) تحلیل پاسخ دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دو انحنایی تحت ضربه کم‌سرعت. یازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران.
- [6] Abrate S (2005) *Impact on composite structures*. published by Cambridge University Press.
- [7] Sburlati R (2002) The Effect of a slow impact on sandwich plates. *Journal of Composite Materials* 36: 1079-1092.
- [8] Zheng YF, Deng LQ (2010) Nonlinear free vibration for viscoelastic moderately thick laminated composite plates with damage evolution. *Mathematical Problems in Eng.* Article ID 562539, 15 pages.
- [9] Kim TW, Kim JH (2002) Nonlinear vibration of viscoelastic laminated composite plates. *International Journal of Solids and Structures* 39: 2857-2870.
- [10] Yi S, Pollock GD, Ahmad MF, Hilton HH (1992) Time-dependent analysis of anisotropic viscoelastic composite shell structures. *Computing System in Engineering* 3(1): 457-467.
- [11] Ramesh TC, Ganesan N (1993) Orthotropic cylindrical shells with a viscoelastic core: a vibration and damping analysis. *International Journal of Sound and Vibration* 175(4): 535-555.
- [12] Palazotto AN, Herup EJ, Gummadi LNB (2000) Finite element analysis of low-velocity impact on composite sandwich plates. *Composite Structures* 49: 209-227.
- [13] Icardi U, Ferrero L (2009) Impact analysis of sandwich composites based on a refined plate element with strain energy updating. *Composite Structures* 89: 35-51.
- [14] Herup E, Palazotto AN (1997) Elasticity solutions for hertzian loaded composite sandwich plates. *Journal of Aerosp. Eng.* 10(1): 27-37.
- [15] Lee LJ, Huang KY, Fann YJ (1993) Dynamic responses of composite sandwich plate impacted by a rigid ball. *Journal of Composite Materials* 27: 1238-1256.
- [16] Foo CC, Seah LK, Chai GB (2011) A Modified energy-balance model to predict low-velocity impact response for sandwich composites. *Composite Structures* 93: 1385-1393.
- [17] Araujo AL, Mota Soares CM, Mota Soares CA (2010) Finite element model for hybrid active-passive damping analysis of anisotropic laminated sandwich structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 12(4): 397-419.
- [18] Meunier M, Shanoi RA (2001) Dynamic analysis of composite sandwich plates with damping modeled using high-order shear deformation theory. *Composite Structures* 54: 243-254.
- [19] Kalili MR, Malekzadeh K (2007) Effect and physical and geometrical parameters on transverse low-velocity impact response of sandwich panels with a transversely flexible core. *Journal of Composite Structures* 77: 430-443.
- هرچه محل برخورد ضربه‌زننده از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر شود از آنجایی که تاثیر تکیه‌گاه‌ها بر المان‌های محل برخورد بیشتر می‌گردد، میزان خیز محل برخورد کاهش و مقدار نیروی تماسی و میزان جذب انرژی توسط سازه افزایش می‌یابد. مقدار افزایش انرژی جذب شده توسط سازه در تحلیل‌های کنونی، به ۱۵ درصد رسیده است.
- در حالت پیش‌بار دوبعدی کششی میزان نیروی برخورد به دلیل کاهش آزادی حرکت کلی ورق، افزایش اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش می‌یابد. بنابراین، احتمال روی دادن آسیب در ورق دارای پیش‌بار دوبعدی کششی بیشتر است. مقدار نیروی ضربه مشاهده شده در مثال‌های کنونی، افزایشی تا میزان ۳۰ درصد را نشان می‌دهد.
- با تحلیل هم زمان ضربه خارج از مرکز، تحت پیش‌بار دوبعدی مشخص شد که اثر پیش‌بار دارای تابعیت مکانی می‌باشد بگونه‌ای که بیشترین اثر پیش‌بار در مرکز رخ می‌دهد و هر چه از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌شویم از اثر پیش‌بار کاسته می‌شود.
- با کاهش سفتی هسته میزان نیروی برخورد و انرژی جذب شده توسط سازه کاهش اما خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد.
- با کاهش ضخامت هسته، ممان اینرسی مقطع کاهش یافته، که نتیجه آن افزایش نیروی برخورد، خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد بوده در حالی که انرژی جذب شده توسط سازه کاهش می‌یابد.
- با تبدیل ضربه‌زننده کروی به ضربه‌زننده استوانه‌ای، به دلیل افزایش چشم‌گیر سفتی ناحیه تماس، نیروی برخورد افزایش چشم‌گیری داشته در حالی که خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد دچار کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌شوند.
- وجود لایه‌های چسب در محل اتصال هسته به رویه‌ها در پاسخ ضربه سازه تاثیرگذار می‌باشد، لذا جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، توصیه می‌شود که وجود لایه‌های چسب در تحلیل‌های آینده لحاظ گردد.

۱۱- مراجع

- [1] Shariyat M, Jafari R (2013) Nonlinear low-velocity impact response analysis of a radially preloaded two-directional-functionally graded circular plate: a refined contact stiffness approach. *Composites Part B* 35: 981-994.
- [2] Shariyat M, Farzan F (2013) Nonlinear eccentric low-velocity impact analysis of a highly pre-stressed FGM rectangular plate, using a refined contact law. *Archive of Applied Mechanics* 83: 623-641.
- [3] Ellis RL (1996) Ballistic impact resistance of graphite epoxy composites with shape memory alloys and extended chain polyethylene spectra™ hybrid

- [26] Birman V, Bert CW (2004) Wrinkling of composite-facing sandwich panels under biaxial loading. *Journal of Sandwich Structures* 6: 217-237.
- [27] Liang QQ, Uy B, Wright HD, Bradford MA (2004) Local buckling of steel plates in double skin composite panels under biaxial compression and shear. *Journal of Structural Engineering* 130: 443-451.
- [28] Malekzadeh K, Khalili MR, Mittal RK (2000) Response of in-plane linearly prestressed composite sandwich panels with transversely flexible core to low-velocity Impact. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 8: 157-181.
- [29] Frostig Y (1998) Buckling of sandwich plates with a flexible core: high-order theory. *International Journal of Solids and Structures* 35: 183-204.
- [20] Malekzadeh K, Kalili MR (2007) Response of composite sandwich panels with transversely flexible core to low-velocity transverse impact: a new dynamic model. *International Journal of Impact Engineering* 34: 522-543.
- [21] Ambur DR, Cruz JR (1995) Low-speed impact response characteristics of composite sandwich panels. 36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 95:1460-CP.
- [22] Olsson R (1996) Improved theory for contact indentation of sandwich panels. *AIAA J.* 34(6): 1238-1244.
- [23] Lee Lj, Huang Ky, Fann Yj (1993) Dynamic response of composite sandwich plate impact by rigid all. *Journal of Composite Materials* 27(13): 1238-1256.
- [24] Carpino G, crivelli Visconti I, Di Ilio A (1984) Elastic behavior of composite structures under low velocity impact. *Composites* 15: 231-234.
- [25] Anderson Todd A (2005) An Investigation of SDOF models for large mass impact on sandwich composites. *Composites Part B*: 42-135.