

## تحلیل عددی سه بعدی ضربه کم سرعت بر صفحات ساندویچی مستطیلی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف

سید حسین حسینی<sup>۱</sup>، سید محمد رضا خلیلی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، مشهد

۲- استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

(تاریخ وصول: ۹۴/۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۱۳)

### چکیده

در این مقاله به تحلیل عددی سه بعدی ضربه کم سرعت بر صفحات ساندویچی مستطیلی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف پرداخته شده و تأثیر جنس الیاف، جنس فلز در رویه‌ها، انرژی ضربه زننده، ضربه خارج از مرکز و پیش تنش دو محوری صفحه‌ای در پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، بجای استفاده از نظریه‌های تقریبی ورق، از شبیه‌سازی سه بعدی ضربه در نرم افزار آباکوس برای استخراج پاسخ های ضربه بر پایه نظریه الاستیسیته سه بعدی استفاده گردیده است. برای صحت‌سنجی، نتایج عددی با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع دیگر مقایسه گردیده و صحت مدل عددی مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در حالت ضربه خارج از مرکز و در حالت پیش تنش دو محوری کششی به دلیل کاهش آزادی حرکت کلی ورق، نیروی تماسی و میزان انرژی جذب شده توسط سازه افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش احتمال آسیب پدید آمده است. همچنین با تحلیل هم زمان ضربه خارج از مرکز تحت پیش بار دو بعدی، مشخص شد که اثر پیش‌بار دارای تابعیت مکانی است به گونه‌ای که بیشترین اثر پیش بار در مرکز رخ می‌دهد و هر چه از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌شویم از اثر پیش‌بار کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضربه کم سرعت، ورق ساندویچی، چندلایه فلز-الیاف، پیش تنش دو محوری صفحه‌ای.

## 3D Numerical Analysis of Low-Velocity Impact of Rectangular Sandwich Plates with FML Face Sheets

S. H. Hosseini<sup>1</sup>, S. M. R. Khalili<sup>2\*</sup>

1- Young Researchers and Elite Club, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad

2- K. N. Toosi University of Technology, Tehran

(Received: 7/11/2015, Accepted: 10/05/2015)

### Abstract

In the present paper, three-dimensional numerical analysis of low-velocity impact of rectangular sandwich plates with fiber metal laminate (FML) face sheets is investigated. In contrast to the available models which have used the approximate plate theories, a 3D finite element simulation is utilized for extracting the impact responses based on the elasticity theory. Finally, the effects of different parameters such as fiber type, metal type, indenter energy, eccentricity and the in-plane preloads on the impact responses of the structure are investigated. Numerical results are compared with the experimental data presented in the literature and the numerical model is verified. The simulation results showed that in the cases of the eccentric impact and presence of the tensile preloads, the contact force increases due to the less movability of the impacted point of the plate; a fact that may lead to higher damages.

**Keywords:** Low Velocity Impact, Sandwich Plate, FML, In plane Biaxial Prestress.

## ۱- مقدمه

یک وزنه روی پانل‌های شیشه پلی‌استر را به‌طور تجربی آزمایش کرد. آمبور و کرو [۲۰]، 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 به دست آمده است استفاده کردند. السول [۲۱]، با بررسی نظری و تجربی ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی، نشان داد که قانون برخورد هرتز برای پانل‌های ساندویچی درست نبوده و باید اصلاح گردد. هراپ و پالازوتو [۲۲]، ضربه کم سرعت ورق ساندویچی را بر پایه نظریه ساده شده الاستیسیته مورد بررسی قرار داده و به گونه‌ای قانون تماس هرتز را بازسازی نمودند. پالازوتو و همکاران [۲۳]، با به‌کارگیری سازگاری هندسی میان سطح ضربه‌زن و سطح روبه بالایی در هر لحظه از زمان و فرض هسته به عنوان تکیه‌گاه الاستیک، رابطه تماس ویژه‌ای ارائه نمودند. فو و همکاران [۲۴]، از ترکیب روش موازنه انرژی و قانون بقای مومنتم برای یافتن معادلات حاکم بر ضربه کم‌سرعت بهره جستند. بارلاتی [۲۵]، مسئله ضربه کم‌سرعت را با یافتن پاسخ‌های کلی سازه، با در نظر گرفتن توزیع فشار تماس ویژه برای شبیه‌سازی قانون تماس هرتز بررسی نمود. اکاردی و فربرو [۲۶]، با به‌کارگیری یک روش به هنگام سازی انرژی، ضربه کم سرعت ورق ساندویچی را با به‌کارگیری نظریه زیگزاگ برای ورق‌های روبه مدل‌سازی نمودند. لی و همکاران [۲۷]، ضربه کم سرعت ورق ساندویچی را با استفاده از نظریه ورق مندلین بررسی نمودند. خلیلی و ملک‌زاده [۲۸ و ۲۹]، نظریه تصحیح‌شده و بهبود یافته مرتبه بالای صفحات ساندویچی (IHSAPT) را با اصلاح نظریه مرتبه بالای صفحات ساندویچی پیشنهاد کردند. همچنین روش تحلیلی توسعه‌یافته برای محاسبه فاکتور استهلاک معادل ورق ساندویچی را ارائه دادند. سزیکار بروجردی، داریوشی و صدیقی [۳۰]، به صورت تجربی و تحلیلی رفتار چند لایه‌ای‌های فلز-الیاف زیر بار ضربه را بررسی کردند. آن‌ها در تحلیل چند لایه‌ها از روش انرژی استفاده کرده‌اند، بدین ترتیب که از شکل ساده شده معادلات فون-کارمن جمله‌های مختلف انرژی برای سازه زیر بار ضربه محاسبه شده است. لانگ دون و همکاران [۳۱ و ۳۲] پاسخ انواع چند لایه‌ای‌های GLARE را به بارهای انفجاری یکنواخت بررسی کردند. کاپرینو و همکاران [۳۳] رفتار چند لایه‌ای‌های آلومینیوم-الیاف شیشه را در برابر ضربه کم سرعت بررسی کردند. بررسی نتایج نشان داد، منحنی‌های نیرو- جابجایی کاملاً غیرخطی هستند که می‌توان آن‌ها را با چند جمله‌ای‌های مرتبه ۲ به خوبی تخمین زد. عبدالله و کانت ول [۳۴] پاسخ چند لایه‌ای‌های فلز-الیاف ساخته شده از الیاف بافته شده شیشه و رزین پلی پروپیلن و ورقه‌های آلومینیوم به ضربه‌های پرسرعت را بررسی کردند. راولیل و همکارانش [۳۵]، فرکانس‌های طبیعی یک ورق ساندویچی با روبه‌های آلومینیومی را به صورت تجربی و تحلیلی به دست آوردند. روش تحلیلی آن‌ها حل معادلات

کامپوزیت‌های پیشرفته در مقیاس وسیع و در سازه‌های مختلف به صورت روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختارهای ساندویچی و چند لایه‌های فلز-الیاف به نام FML ها<sup>۱</sup> نمونه‌ای از کامپوزیت‌های پیشرفته می‌باشند. ساختارهای ساندویچی عموماً به فرم سه‌لایه استفاده می‌شوند و با افزایش ناچیز وزن سازه، ممان اینرسی‌های مقاطع آن به‌طور قابل توجهی افزایش و تنش‌های پدید آمده کاهش می‌یابد. این ساختارها در بسیاری از سازه‌های دریایی، شهری، خودروها و به خصوص در سامانه‌های هوافضایی کاربرد دارند [۱]. چند لایه‌های فلز-الیاف تقریباً تمام فواید ماده فلزی و کامپوزیتی را دارند. آن‌ها خواص خوب فلز از جمله نرمی، تحمل آسیب و ضربه را با مزایای کامپوزیت‌های الیافی مانند استحکام ویژه و سفتی ویژه بالا، خواص مقاومت به خوردگی و خستگی خوب تلفیق می‌نمایند [۶-۲]. از پرکاربردترین کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف که تا به امروز ساخته شده‌اند، می‌توان ARALL، GLARE و CARE را نام برد [۹-۷]. ساختارهای پیشرفته ساندویچی FML/Core/FML عبارت‌اند از دو روبه<sup>۲</sup> چند لایه فلز-الیاف که در بالا و پایین هسته<sup>۳</sup> واقع شده‌اند. استفاده از چند لایه فلز-الیاف در روبه‌ها، سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت به ضربه ساختار ساندویچی می‌شود [۱۰]. با توجه به کاربرد گسترده ورق‌های ساندویچی با روبه‌های چند لایه فلز-الیاف در ساخت اجزای مکانیکی بکار رفته در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، شناخت خواص ضربه‌ای این ساختارها همچون خواص ایستایی آن‌ها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری امری لازم و ضروری است.

ابریت [۱۱] مروری را بر روش‌های کلی تحلیل ضربه کم‌سرعت ورق‌های کامپوزیتی و ساندویچی ارائه نموده است. به‌طور 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 ۱۵۰۰۰ متر بر ثانیه) و ۴- مافوق سرعت (بیش از ۱۵۰۰۰ متر بر ثانیه) [۱۲]. عموماً ضربه زمانی کم سرعت پنداشته می‌شود که اثر امواج برگشتی از تکیه‌گاه‌ها، در زمان ضربه به محل ضربه برسد [۱۳]. آمبور و کمرلی [۱۴ و ۱۵]، به صورت تجربی نتایج اثر ضربه با جرم‌های مختلف ضربه‌زننده را، روی پاسخ یک ورق چند لایه کامپوزیتی و نیز روی ورق چند لایه کامپوزیتی ساندویچی بررسی کردند. کاپرینو و تتی [۱۶]، رفتار ورق ساندویچی کامپوزیتی با هسته میانی فوم را تحت بار ضربه‌ای و نیز بعد از بار ضربه‌ای مطالعه کردند و استحکام باقیمانده را با آزمایش به دست آوردند. اندرسن و همکارانش [۱۷ و ۱۸]، با توجه به نتایج تجربی حاصل از آزمایش ضربه روی ورق کامپوزیتی ساندویچی، مشخصه‌های آسیب ایجادشده بر اثر بار ضربه‌ای را به دست آورده و انرژی آستانه برای شروع آسیب را اندازه گرفتند. کاپرینو [۱۹]، افتادن

ضخامت ورق ساندویچی، بجای استفاده از المان‌های S4R که یک المان صفحه‌ای با ۴ گره و ۶ درجه آزادی در هر گره است و بر مبنای نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول بنا نهاده شده است، از المان‌های SC8R که یک المان ۶ وجهی با ۸ گره و سه درجه آزادی در هر گره است و بر مبنای نظریه لایه‌ای<sup>۱</sup> بنا نهاده شده است [۴۰]، جهت مدل‌سازی هدف استفاده شده است. استفاده از المان‌های SC8R باعث افزایش هزینه محاسبات و مدت زمان حل می‌گردد اما در عوض نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند [۴۱]. شرایط تکیه‌گاهی لایه میانی لبه‌های ورق ساندویچی از نوع ساده انتخاب شده‌اند. شیوه‌های متعددی برای بیان ریاضی این شرایط تکیه‌گاهی پیشنهاد شده است که در این مقاله از روش ارائه شده توسط ردی [۴۲] استفاده شده است:

$$\begin{aligned} x = \pm \frac{a}{2} : v = w = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \\ y = \pm \frac{a}{2} : u = w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب جابجایی در امتداد محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند.

ضربه زننده جسمی کروی با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر و با جرم ۱/۸ کیلوگرم است که با سرعت ۳/۷ متر بر ثانیه (انرژی ۱۲/۳ ژول) به ورق ساندویچی برخورد می‌کند. مدل‌سازی ضربه زننده به سه روش امکان پذیر است. در روش اول ضربه زننده به صورت صلب فرض می‌شود و هیچ‌گونه خواص مکانیکی به ضربه زننده تعریف نمی‌شود. در روش دوم ضربه زننده به صورت صلب فرض می‌شود ولی خواص مکانیکی مورد نظر نیز برای ضربه زننده تعریف می‌شود. در روش سوم ضربه زننده به صورت جسمی شکل پذیر و با خواص فیزیکی معین تعریف می‌شود [۴۱]. اکثر محققان ضربه زننده را یک جسم صلب (روش اول) فرض کرده‌اند [۴۳ و ۴۴]. این فرض به دلیل تغییر شکل قابل اغماض ضربه زننده در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی ضربه زننده به صورت صلب باعث کاهش مدت زمان حل می‌گردد. لذا در این مقاله نیز ضربه زننده به صورت یک پوسته صلب با المان‌های صلب چهار گره‌ای<sup>۲</sup> مدل شده است. برای تعریف شرایط مرزی ضربه زننده تمام درجات آزادی ضربه زننده به جز درجه آزادی انتقالی آن در راستای بردار نرمال هدف مقید شده‌اند. سرعت ضربه زننده به عنوان شرایط اولیه به نقطه مرجع آن نسبت داده شده است. همچنین با توجه به اینکه هیچ‌گونه خواصی برای جسم صلب تعریف نمی‌گردد، بایستی جرم ضربه زننده نیز به نقطه مرجع آن نسبت داده شود. برای حل غیرخطی سیستم‌های دینامیک برخورد و ضربه، از هریک از روش‌های حل ضمنی<sup>۳</sup> یا صریح<sup>۴</sup> موجود در برنامه، می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش از روش صریح که از روش تفاضل مرکزی برای انتگرال‌گیری از معادلات حرکت در طول زمان استفاده می‌کند [۴۰]،

دیفرانسیل ورق به کمک نظریه برشی مرتبه اول و استفاده از سری‌های فوریه است. همان‌طور که مرور کوتاه مقالات منتشره آشکار می‌سازد با وجود آن‌که پژوهش‌های زیادی در ارتباط با ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی و چندلایه‌های فلز-الیاف انجام پذیرفته است، تحقیقات اندکی در ارتباط با ضربه کم‌سرعت ورق‌های ساندویچی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف منتشر شده است، از طرفی اکثر پژوهش‌های انجام شده پاسخ ورق به ضربه مرکزی را در برمی‌گیرند و عموماً برای حالت‌های بدون پیش بار انجام شده‌اند. در پژوهش حاضر، به تحلیل عددی سه بعدی ضربه کم‌سرعت بر صفحات ساندویچی مستطیلی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف پرداخته شده و تأثیر جنس الیاف، جنس فلز در رویه‌ها، انرژی ضربه زننده، ضربه خارج از مرکز و پیش‌تنش دومحوری صفحه‌ای بر پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای اولین بار تابعیت مکانی پیش بار مورد مطالعه قرار گرفته است. برای استخراج نتایجی دقیق با کم‌ترین خطای ممکن، از شبیه‌سازی سه‌بعدی ضربه در نرم‌افزار آباکوس برای استخراج پاسخ‌های ضربه بر پایه نظریه الاستیسیته سه بعدی استفاده گردیده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

در تحلیل دینامیکی غیرخطی ضربه، به منظور استخراج پاسخ‌های ضربه بر پایه نظریه الاستیسیته از شبیه‌سازی سه بعدی ضربه در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردیده است. برای صحت‌سنجی مدل سه بعدی ضربه کم‌سرعت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، ابتدا نتایج تجربی ضربه کم‌سرعت یک ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی، با نتایج مدل سه بعدی شبیه‌سازی شده مقایسه گردیده و پس از تأیید شبیه‌سازی صورت گرفته، به بررسی اثر به‌کارگیری چندلایه‌های فلز-الیاف به عنوان رویه‌های ورق ساندویچی بر پاسخ ضربه سازه پرداخته شده است.

ورق ساندویچی مورد نظر، صفحه‌ای به ابعاد ۷۶/۲×۷۶/۲ میلی‌متر مربع است، که در شکل (۱) نشان داده شده است. هر رویه کامپوزیتی از شش لایه به ضخامت ۰/۲۶۴ میلی‌متر تشکیل شده است. خواص رویه‌های کامپوزیتی در جدول (۱) درج شده است. هسته نیز از یک لایه فوم با ضخامت 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. در محل اتصال رویه‌ها به هسته از یک لایه چسب به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با مدول یانگ ۳/۴ GPa و نسبت پواسون ۰/۳۵ استفاده شده است [۳۶]. انتخاب نوع المان برای هدف بستگی به نسبت عرض به ضخامت هدف و همچنین سرعت ضربه زننده دارد. افزایش ضخامت هدف و سرعت ضربه زننده منجر به افزایش تغییر شکل برشی می‌شود.

از این‌رو در چنین مواردی لازم است جهت جلوگیری از خطا و دستیابی به یک مدل دقیق از هدف، یک المان مناسب انتخاب گردد [۳۹-۳۷]. در این مقاله با توجه به زیاد بودن نسبت عرض به

1- Layer Wise  
2- R3D4 : A 4-Node 3-D Bilinear Rigid Quadrilateral  
3- Implicit  
4- Explicit

جدول ۲- خواص هسته ورق ساندویچی [۴۵].

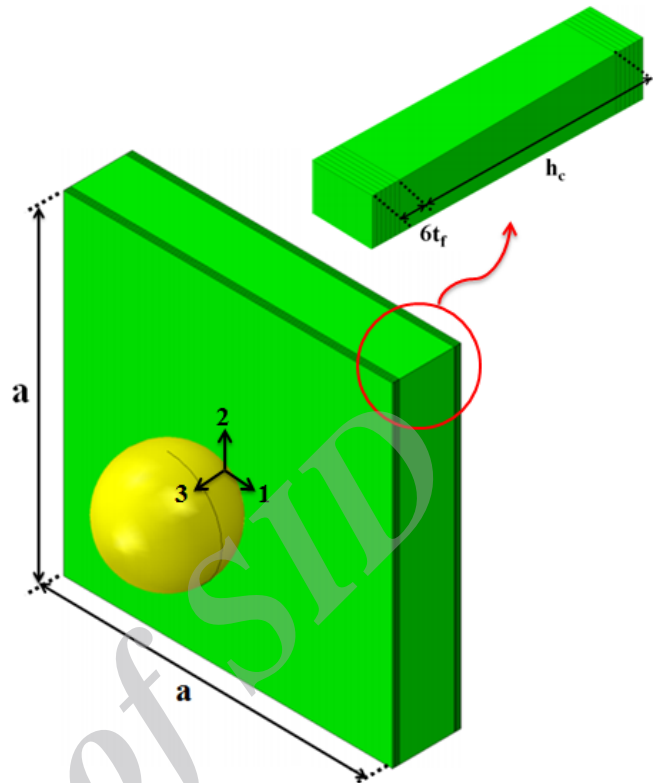
Foam core (high density)	
Material	110 WF Polymethacryimide foam
E (GPa)	۰/۱۸۰
$\nu$	۰/۲۸۶
$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۱۱۰
$h_c$ (mm)	۱۲/۷۰۰
a (mm)	۷۶/۲۰۰

برای رسیدن به یک مدل مطلوب و همگرا شدن جواب‌ها، اندازه المان‌های ورق ساندویچی در چندین مرحله حل، ریزتر شده‌اند تا اینکه جواب‌های به دست آمده همگرا شده‌اند. 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 شده است. در مدل‌سازی ضربه‌زننده نیز از حدود ۳ هزار المان استفاده گردیده است.

برای صحت‌سنجی، نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی مرجع [۴۵] در شکل (۳) مقایسه گردیده‌اند. همان‌گونه که در تعریف ضربه کم‌سرعت، در بخش مقدمه ذکر گردید، نیمه اول پاسخ زمانی (ناحیه بارگذاری) از شکل (۳)، متأثر از پدیده تماس و فروروی ضربه‌زننده در ورق و بخش دوم (ناحیه باربرداری)، ناشی از فرایند بازگشت امواج ضربه از تکیه‌گاه و پرت نمودن ضربه‌زننده 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 نظریه‌های تماس، پاسخ نیروی تماس در ناحیه بارگذاری با رابطه توان سه دوم و در ناحیه باربرداری، با توان پنج‌دوم میزان فروروی نمایانده می‌شود [۱۱]. شکل (۳) بیانگر صحت مدل عددی اجزاء محدود به کار گرفته شده است. 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 دارند و خطای بیشینه در میزان نیروی تماسی در تمامی مدت زمان برخورد نیز ۱۰ درصد است.

پس از صحت‌سنجی مدل سه بعدی به کار گرفته شده، برای تحلیل ضربه کم‌سرعت ورق ساندویچی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف، رویه‌های کامپوزیتی مدل فوق به رویه‌هایی از نوع Glare3 تغییر یافت به‌گونه‌ای که هر رویه با هفت لایه شامل سه لایه فلز آلومینیوم و چهار لایه کامپوزیت شیشه/اپوکسی بوده که با آرایش [AL/0/90/AL/90/0/AL] مطابق شکل (۴) روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. ضخامت هر لایه فلز ۰/۲۶۴ میلی‌متر و ضخامت هر لایه کامپوزیت ۰/۱۹۸ میلی‌متر است. در محل اتصال لایه‌های فلزی به لایه‌های کامپوزیتی و هسته، از یک لایه چسب به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با مدول یانگ ۳/۴ و نسبت پواسون ۰/۳۵ استفاده شده است [۳۶].

برای حل استفاده شده است، چرا که این الگوریتم منجر به نتایج دقیق‌تری می‌گردد [۴۱].



شکل ۱- مدل هندسی ورق ساندویچی.

جدول ۱- خواص رویه‌های ورق ساندویچی [۴۵].

Face sheet	
Material	LTM45EL-CF0111 Carbon fiber
$E_{11}$ (GPa)	۵۴
$E_{22}$ (GPa)	۵۴
$E_{33}$ (GPa)	۴/۸۴۰
$G_{12}$ (GPa)	۳/۱۶۰
$G_{13}$ (GPa)	۱/۸۷۰
$G_{23}$ (GPa)	۱/۸۷۰
$\nu_{12}$	۰/۰۶۰
$\nu_{13}$	۰/۳۱۳
$\nu_{23}$	۰/۳۱۳
$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۱۵۱۱
$t_f$ (mm)	۰/۲۶۴
a (mm)	۷۶/۲۰۰

حال تأثیر جنس الیاف و جنس فلز در پوسته‌ها و همچنین اثر انرژی ضربه‌زنده، اثر ضربه خارج از مرکز و تأثیر پیش‌تنش دومحوری صفحه‌ای در پاسخ سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که در هر مرحله تنها پارامتر مورد بررسی نسبت به حالت اولیه (الیاف از جنس شیشه، فلز از جنس آلومینیوم، ضربه‌زنده با سرعت ۳/۷ متر بر ثانیه، جرم ۱/۸ کیلوگرم و با انرژی ۱۲/۳ J، موقعیت ضربه‌زنده در مرکز ورق ساندویچی به مختصات  $(x=0, y=0)$ ، عدم وجود پیش‌تنش) تغییر داده می‌شود و پس از انجام تحلیل مجدد، نتایج به دست آمده با نتایج حالت اولیه مقایسه می‌گردد.

جدول ۳- خواص لایه‌های مختلف فلزی [۴۶].

Material	AL 7075	Ti	Mn
E (GPa)	۷۱/۷۰۰	۱۱۶	۱۵۹
$\nu$	۰/۳۳۰	۰/۳۴۰	۰/۳۵۰
$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۲۸۱۰	۴۵۰۰	۷۴۴۰
t (mm)	۰/۱۹۸	۰/۱۹۸	۰/۱۹۸
a (mm)	۷۶/۲۰۰	۷۶/۲۰۰	۷۶/۲۰۰

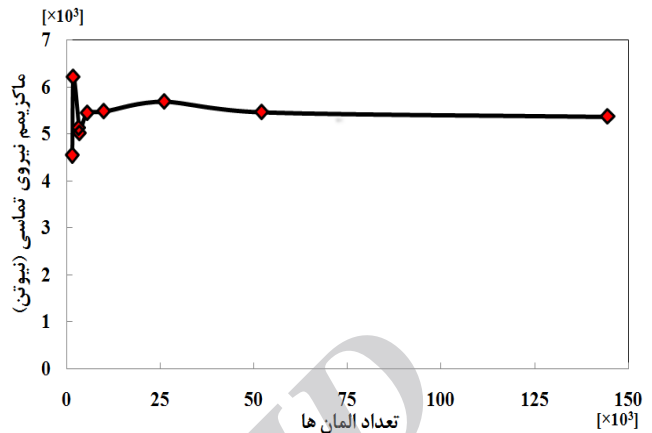
جدول ۴- خواص لایه‌های مختلف کامپوزیتی [۴۶].

Material	UD-S2-Glass/Epoxy Prepreg	Carbon/Epoxy	Boron/Epoxy
E <sub>۱۱</sub> (GPa)	۵۴	۱۴۵	۲۰۸
E <sub>۲۲</sub> (GPa)	۹/۴۰۰	۱۰	۲۵/۴۰۰
E <sub>۳۳</sub> (GPa)	۹/۴۰۰	۱۰	۲۵/۴۰۰
G <sub>۱۲</sub> (GPa)	۵/۶۰۰	۷	۷/۲۰۰
G <sub>۱۳</sub> (GPa)	۵/۶۰۰	۷	۷/۲۰۰
G <sub>۲۳</sub> (GPa)	۵/۶۰۰	۳/۷۰۰	۴/۹۰۰
$\nu_{۱۲}$	۰/۳۶۰	۰/۲۵۰	۰/۱۶۷
$\nu_{۱۳}$	۰/۳۶۰	۰/۲۵۰	۰/۱۶۷
$\nu_{۲۳}$	۰/۳۳۰	۰/۵۰۰	۰/۳۶
$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۲۰۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰
t (mm)	۰/۲۶۴	۰/۲۶۴	۰/۲۶۴
a (mm)	۷۶/۲۰۰	۷۶/۲۰۰	۷۶/۲۰۰

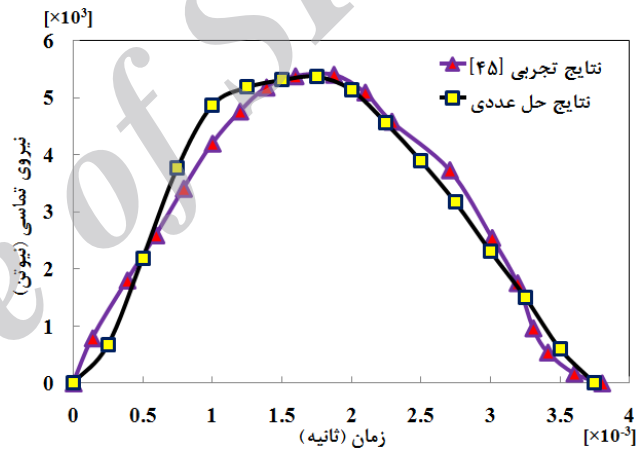
### ۲-۱- اثر جنس الیاف

از رایج‌ترین انواع چندلایه‌های فلز-الیاف، نوع Glare است که در بسیاری از مصارف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین به نظر می‌رسد، در آینده‌ای نزدیک<sup>۱</sup> Caral که بر پایه الیاف کربن ساخته می‌شود کاربرد گسترده‌ای بیابد [۴۰ و ۴۱]. برای بررسی تأثیر جنس الیاف در پاسخ ضربه، جنس الیاف از شیشه، به دو جنس مختلف کربن و بور تغییر داده شد و تحلیل دوباره صورت پذیرفت. خواص لایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی و بور/اپوکسی در جدول (۴) بیان شده است. نتایج در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده‌اند.

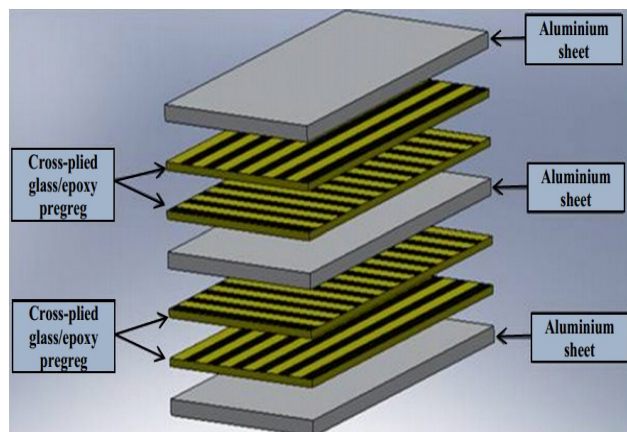
خواص آلومینیوم در جدول (۳) و خواص کامپوزیت شیشه/اپوکسی در جدول (۴) بیان شده است. هسته نسبت به قبل تغییری نکرده است. در نهایت این ورق ساندویچی با آرایش [FML/core/FML] روی یکدیگر قرار گرفته است.



شکل ۲- نمودار بررسی همگرایی نتایج.



شکل ۳- صحت‌سنجی نتایج مدل عددی حاضر با نتایج تجربی مرجع [۴۵].



شکل ۴- نحوه چیدمان لایه‌های آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی در رویه Glare3.

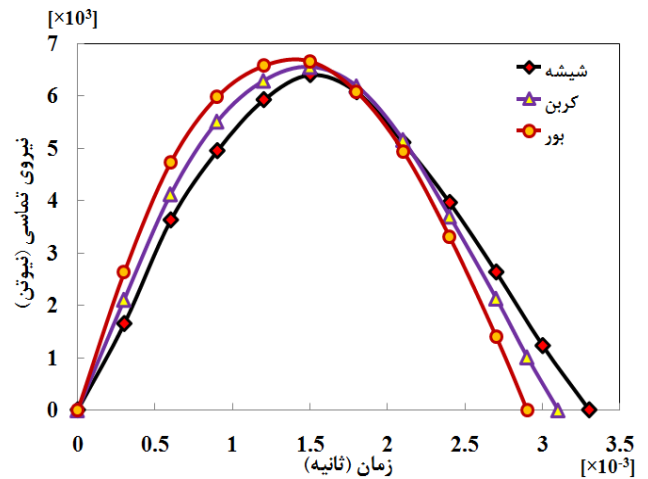
منحنی نیرو- زمان ناحیه بارگذاری بزرگتر است، پس از جدایش ضربه‌زنده، انرژی ورق به صفر نمی‌رسد. با توجه به اینکه میرایی در ورق پیش‌بینی نشده است، انرژی بجای مانده در ورق، پس از جدایش ضربه‌زنده، پایا مانده و ارتعاش در زمان‌های بعدی با دامنه ثابت ادامه می‌یابد.

مقادیر ماکزیمم نیروی برخورد، خیز محل برخورد، میزان انرژی جذب شده توسط سازه و مدت زمان برخورد از شکل‌های (۵) تا (۷) به ازای الیاف با جنس‌های متفاوت استخراج گردیده و در جدول (۵) درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت اولیه (الیاف با جنس شیشه) بیان گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر جنس الیاف از شیشه به کربن و بور به دلیل افزایش سفتی ناحیه تماس، میزان نیروی برخورد و میزان انرژی جذب شده توسط سازه افزایش اما خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش یافته است. همان‌طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود با توجه به اینکه بور نسبت به کربن دارای سفتی بیشتری است، لذا در حالت تغییر جنس الیاف از شیشه به بور نسبت به حالت تغییر جنس الیاف از شیشه به کربن شاهد افزایش بیشتر سفتی ناحیه تماس خواهیم بود که این امر باعث می‌گردد تا درصد تغییر پارامترهای مختلف در حالت تغییر جنس الیاف از شیشه به بور نسبت به کربن بیشتر باشد.

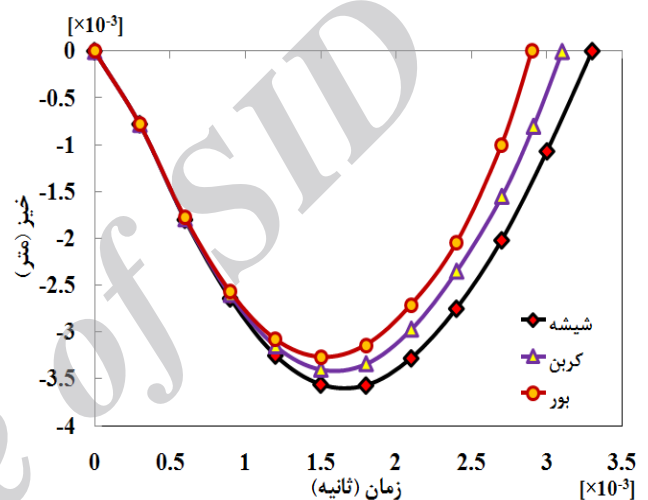
## ۲-۲- اثر فلزات مختلف

از لایه چینی انواع آلیاژها و کامپوزیت‌ها می‌توان تعداد نامحدودی چندلایه فلز- الیاف ایجاد کرد، اما فقط تعدادی از آن‌ها مشهور و رایج‌اند و تا به امروز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که آلیاژهای آلومینیوم بیش از بقیه در صنعت هوافضا مورد مصرف هستند، در تهیه چندلایه‌های فلز- الیاف سعی شده از همین آلیاژ برای لایه چینی مصرف شود تا هم زمان از ویژگی‌های منحصر به فردشان همراه با خصوصیات کامپوزیت‌های مشهور در هواپیما بهره برداری شود. استفاده از آلیاژهای تیتانیوم به عنوان لایه فلز در چندلایه‌های فلز- الیاف در حال آزمایش و بررسی است.

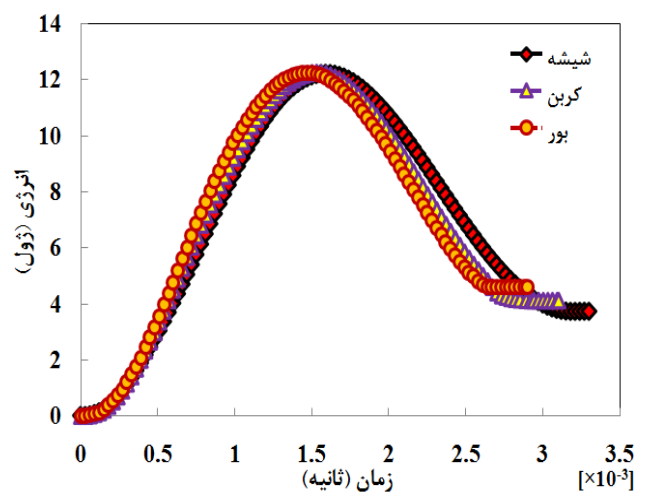
برای بررسی تأثیر جنس فلز در پاسخ ضربه، جنس فلز از آلومینیوم، به دو جنس مختلف تیتانیوم و منیزیم تغییر داده شد و تحلیل دوباره صورت پذیرفت. خواص تیتانیوم و منیزیم در جدول (۳) بیان شده است. مقادیر ماکزیمم نیروی برخورد، خیز محل برخورد، میزان انرژی جذب شده توسط سازه و مدت زمان برخورد از شکل‌های (۸) تا (۱۰) به ازای فلزات با جنس‌های متفاوت استخراج گردیده و در جدول (۶) درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت اولیه (فلز با جنس آلومینیوم) بیان گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر جنس فلز از آلومینیوم به تیتانیوم و منیزیم به دلیل افزایش سفتی ناحیه تماس، میزان نیروی برخورد و میزان انرژی جذب شده توسط سازه افزایش اما خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش یافته است.



شکل ۵- تأثیر جنس الیاف بر نیروی برخورد.



شکل ۶- تأثیر جنس الیاف بر خیز محل برخورد.



شکل ۷- تأثیر جنس الیاف بر جذب انرژی سازه.

شکل (۷) تغییرات زمانی انرژی ورق را نشان می‌دهد. در فاز بارگذاری ورق، انرژی ضربه‌زنده به تدریج به ورق منتقل می‌شود تا زمانی که ضربه‌زنده متوقف گردد. در این لحظه، انرژی انتقال یافته به ورق بیشینه است. پس‌از آن، ورق انرژی لازم برای پرتاب ضربه‌زنده را به تدریج در اختیار قرار می‌دهد. از آنجا که سطح زیر

جدول ۵- درصد تغییرات پارامترهای مختلف در اثر تغییر جنس الیاف در مقایسه با حالت اولیه (الیاف با جنس شیشه).

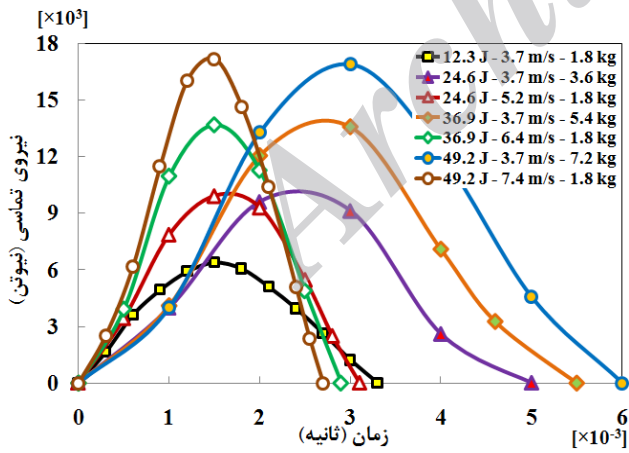
جنس الیاف	درصد افزایش نیروی برخورد	درصد کاهش خیز محل برخورد	درصد افزایش انرژی جذب شده	درصد کاهش زمان برخورد
کربن	۲/۲۹	۴/۷۶	۱۰/۷۵	۶/۰۶
بور	۳/۹۵	۸/۴۰	۲۳/۳۹	۱۲/۱۲

جدول ۶- درصد تغییرات پارامترهای مختلف در اثر تغییر جنس فلز در مقایسه با حالت اولیه (فلز با جنس آلومینیوم).

جنس فلز	درصد افزایش نیروی برخورد	درصد کاهش خیز محل برخورد	درصد افزایش انرژی جذب شده	درصد کاهش زمان برخورد
تیتانیوم	۷/۸۰	۶/۴۴	۱۷/۴۷	۹/۰۹
منیزیم	۱۸/۶۷	۱۲/۶۱	۵۲/۱۵	۱۵/۱۵

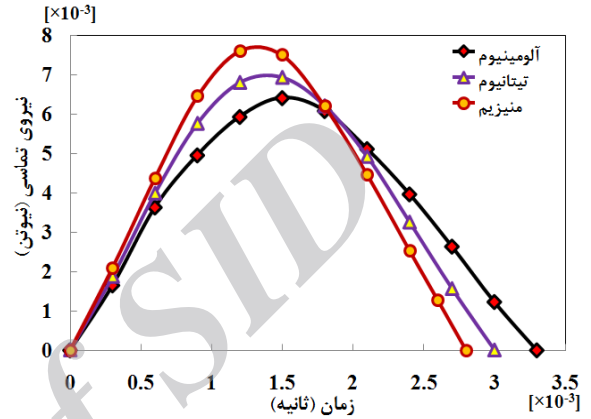
### ۳-۲- اثر انرژی ضربه‌زننده

برای بررسی اثر انرژی ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه‌زننده، میزان انرژی ضربه‌زننده را از ۱۲/۳ ژول به مقادیر ۲، ۳ و ۴ برابر افزایش می‌دهیم. برای این منظور یک بار با ثابت نگاه‌داشتن جرم ضربه‌زننده به میزان ۱/۸ کیلوگرم، میزان سرعت ضربه‌زننده را از ۳/۷ متر بر ثانیه به مقادیر  $\sqrt{2}$ ،  $\sqrt{3}$  و ۲ برابر افزایش می‌دهیم و بار دیگر با ثابت نگاه‌داشتن سرعت ضربه‌زننده به میزان ۳/۷ متر بر ثانیه، جرم ضربه‌زننده را از ۱/۸ کیلوگرم به مقادیر ۲، ۳ و ۴ برابر افزایش می‌دهیم، تا علاوه بر بررسی اثر انرژی ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه‌زننده، به مقایسه تفاوت این دو روش مختلف در افزایش انرژی ضربه‌زننده نیز پرداخته شود. نتایج تحلیل در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده‌اند. مقادیر ماکزیمم نیروی برخورد، خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد از شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ازای مقادیر مختلف انرژی ضربه‌زننده استخراج و در جدول (۷) درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت اولیه (ضربه‌زننده با سرعت ۳/۷ متر بر ثانیه و جرم ۱/۸ کیلوگرم معادل با انرژی ۱۲/۳ ژول) ارائه گردیده است.

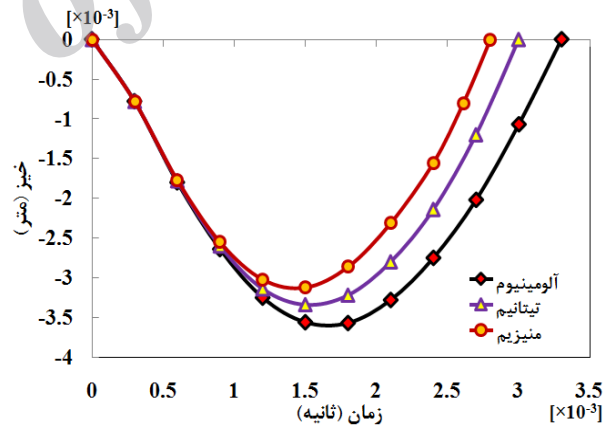


شکل ۱۱- تأثیر انرژی ضربه‌زننده بر نیروی برخورد

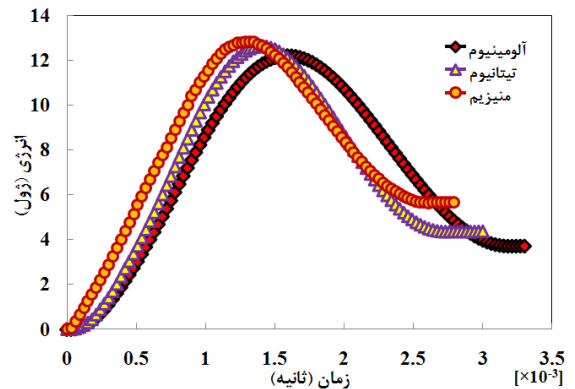
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی ضربه‌زننده میزان نیروی برخورد، خیز محل برخورد و درصد انرژی جذب شده توسط سازه افزایش می‌یابد. مدت زمان برخورد در هنگام افزایش انرژی برخورد توسط افزایش جرم ضربه‌زننده، افزایش اما در حالت افزایش انرژی برخورد توسط افزایش سرعت ضربه‌زننده، کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تأثیر فلزات مختلف بر نیروی برخورد



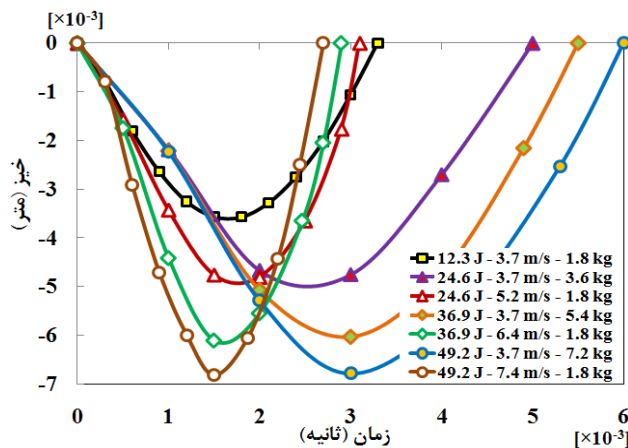
شکل ۹- تأثیر فلزات مختلف بر خیز محل برخورد



شکل ۱۰- تأثیر فلزات مختلف بر جذب انرژی سازه.

استخراج گردیده و در جدول (۸) درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت اولیه ضربه مرکزی، ارائه گردیده است. همان طور که مشاهده می‌شود، هرچه محل برخورد ضربه زنده از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌گردد از آنجایی که تأثیر تکیه‌گاه‌ها بر المان‌های محل برخورد بیشتر می‌شود، میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش اما مقدار نیروی تماسی و میزان جذب انرژی توسط سازه افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سفتی ورق در نقاط مجاور تکیه‌گاه بیشتر است، در برخورد خارج از مرکز، زمان پاسخ ضربه، سریع‌تر آشکار شده و زمان متناظر با نیروی تماس بیشینه کاهش یافته است.

در ارتباط با بررسی مکان ضربه، هدف بررسی کمی میزان تأثیر 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 نیست. 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.



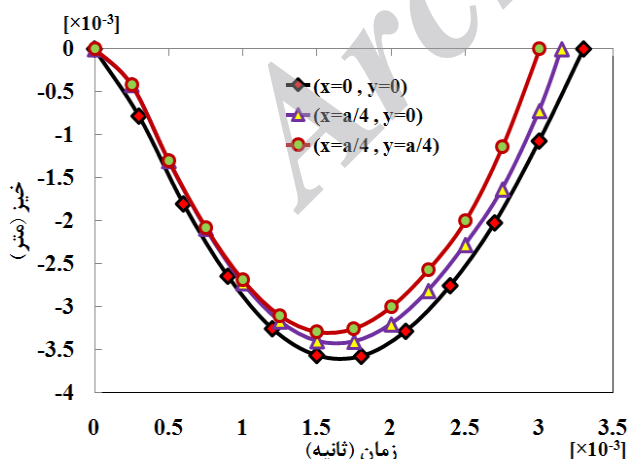
شکل ۱۲- تأثیر انرژی ضربه‌زنده بر خیز محل برخورد.

#### ۲-۴- اثر ضربه خارج از مرکز

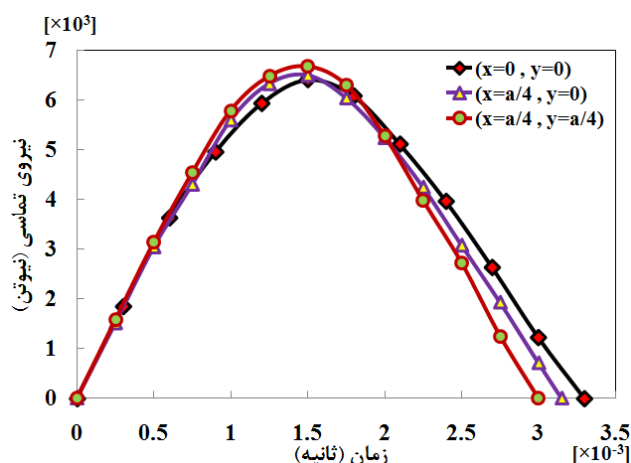
برای بررسی اثر ضربه خارج از مرکز دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد، ضربه خارج از مرکز در نقطه  $(x=a/4, y=0)$  و ضربه خارج از مرکز در نقطه  $(x=y=a/4)$ . با توجه به شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) مقادیر ماکزیمم نیروی برخورد، خیز محل برخورد، انرژی جذب شده توسط سازه و مدت زمان برخورد در حالت‌های مختلف ضربه خارج از مرکز

جدول ۷- درصد تغییرات پارامترهای مختلف در اثر افزایش انرژی ضربه زنده در مقایسه با حالت اولیه ضربه زنده با انرژی ۱۲/۳۲ ژول.

انرژی برخورد (J)	سرعت ضربه زنده (m/s)	جرم ضربه زنده (kg)	درصد افزایش نیروی برخورد (%)	درصد افزایش خیز محل برخورد (%)	درصد تغییر زمان برخورد (%)
۲۴/۶	۵/۲	۱/۸	۵۴/۹۱	۳۴/۴۵	-۶/۰۶
	۳/۷	۳/۶	۵۰	۳۳/۰۳	+۵۱/۵۲
۳۶/۹	۶/۴	۱/۸	۱۱۳/۳۷	۷۰/۸۷	-۱۲/۱۲
	۳/۷	۵/۴	۱۱۲/۰۹	۶۸/۹۱	+۶۶/۶۷
۴۹/۲	۷/۴	۱/۸	۱۶۸/۰۸	۹۱/۰۴	-۱۸/۱۸
	۳/۷	۷/۲	۱۶۳/۷۶	۸۹/۹۲	+۸۱/۸۲



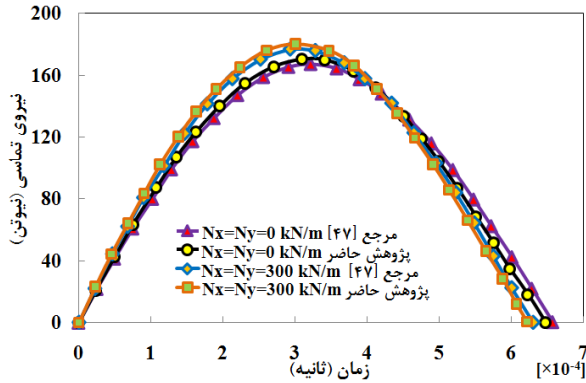
شکل ۱۴- تأثیر ضربه خارج از مرکز بر خیز محل برخورد.



شکل ۱۳- تأثیر ضربه خارج از مرکز بر نیروی برخورد.



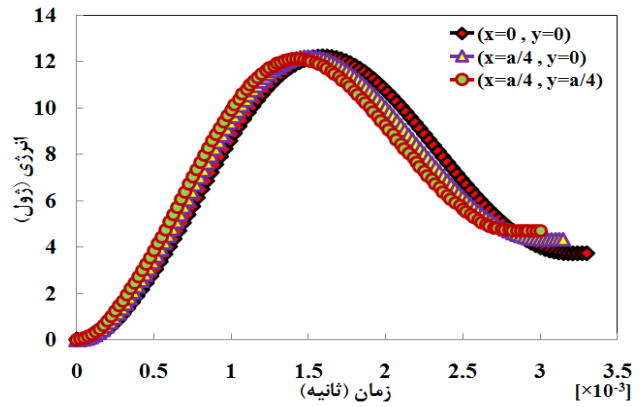
فشاری- یک طرف کششی و دو طرف کششی به لبه‌های ورق ساندویچی اعمال می‌گردد. شایان ذکر است که در ابتدا تحلیل کمانش ورق انجام شده و بار بحرانی کمانش ورق ساندویچی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف ۱۱ مگا پاسکال به دست آمد. لذا جهت اعمال پیش تنش دو بعدی، مقدار ۸ مگا پاسکال انتخاب گردید تا در حالت پیش تنش دو بعدی فشاری، سازه دچار کمانش نگردد.



شکل ۱۶- مقایسه‌ای میان نتایج تحلیل سه‌بعدی کنونی و نتایج مرجع [۴۷]، برای ورق با و بدون پیش بار کششی.

همان‌طور که از شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشهود است در حالت تنش دومحوری صفحه‌ای فشاری میزان نیروی برخورد به دلیل تمایل بار فشاری به ایجاد خیزهای بزرگ‌تر (و در حالت حدی، کمانش) و دور نمودن ورق از ضربه زنده کاهش یافته اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد. در حالت تنش دومحوری صفحه‌ای یک طرف فشاری- یک طرف کششی با توجه به اینکه هندسه و شرایط مرزی مسئله کاملاً متقارن بوده و مقادیر پیش‌بار کششی و فشاری نیز یکسان می‌باشند، لذا اثر یکدیگر را خنثی نموده و نتایج نسبت به حالت بدون پیش بار تغییری نمی‌کند. در حالت تنش دو محوری صفحه‌ای کششی میزان نیروی برخورد به دلیل کاهش آزادی حرکت کلی ورق، افزایش اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش می‌یابد. لذا هنگامی که بار اولیه سازه کششی است، 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. جدول (۹) درصد تغییرات این پارامترها را در مقایسه با حالت اولیه بدون پیش تنش، ارائه می‌دهد.

پس از اینکه اثر هر یک از موارد ضربه خارج از مرکز و پیش بار دو بعدی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت، حال به تحلیل هم‌زمان 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 دو بعدی کششی ۱۰۰ مگا پاسکالی قرار گرفته‌اند. نتایج تحلیل در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. مقادیر بیشینه نیروی برخورد، خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد در جدول (۱۰) ارائه شده و



شکل ۱۵- تأثیر ضربه خارج از مرکز بر انرژی جذب شده توسط سازه.

جدول ۸- درصد تغییرات پارامترهای مختلف ضربه خارج از مرکز نسبت به ضربه مرکزی.

درصد	درصد افزایش	درصد کاهش	درصد افزایش	موقعیت ضربه
کاهش مدت زمان برخورد	انرژی جذب شده	خیز محل برخورد	نیروی برخورد	$(x=0, y=a/4)$
۴/۵۵	۱۶/۴۰	۴/۴۸	۱/۳۹	$(x=0, y=a/4)$
۹/۰۹	۲۶/۳۴	۷/۸۴	۴/۲۳	$(x=y=a/4)$

## ۲-۵- اثر پیش تنش دو محوری صفحه‌ای

در بسیاری موارد، سازه‌های حامل بار، در معرض ضربه پیش‌بینی نشده قرار می‌گیرند که بار اصلی سازه در تحلیل ضربه را می‌توان به عنوان پیش بار در نظر گرفت. اکثر پژوهش‌های انجام شده تنها پاسخ ورق به ضربه را در حالت بدون پیش تنش در بر گرفته‌اند.

پیش از ارائه نتایج این بخش، جهت صحت‌گذاری نتایج تحلیل یک مسئله که قبلاً توسط ملک‌زاده و همکاران [۴۷] با استفاده از مدل گسسته- جرم فنر، نظریه Frostig [۴۸] و به‌کارگیری نظریه ورق برشی مرتبه اول برای رویه‌ها ارائه شده، به روش این مقاله حل می‌شود. ویژگی‌های هندسی و مواد رویه‌های کربن-اپوکسی ورق، عبارت‌اند از:

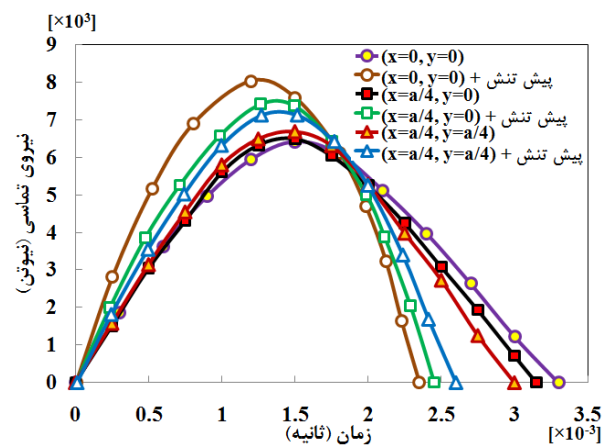
$$E_{11} = 123 \text{ GPa}, E_{22} = E_{33} = 9.5 \text{ GPa}, G_{12} = 47.3 \text{ GPa}, \\ G_{13} = G_{23} = 4.7 \text{ GPa}, \\ \nu_{12} = \nu_{13} = 0.3, \nu_{23} = 0.48, \rho = 1515 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, 3h = 8 \text{ mm}, \\ a = b = 0.5 \text{ m}$$

و مشخصات ضربه‌زنده فولادی عبارت‌اند از:

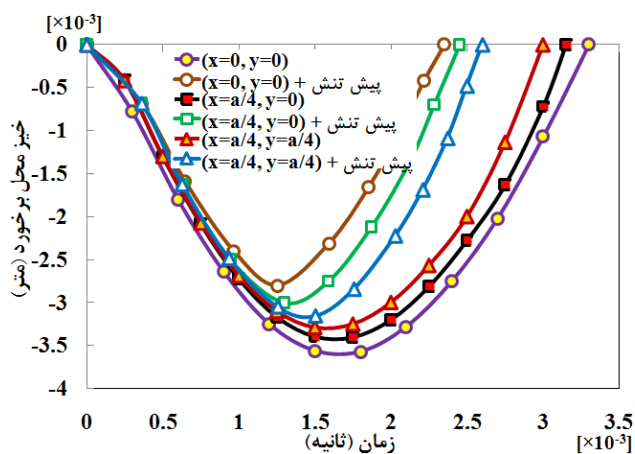
$$E = 211 \text{ GPa}, G = 82.46 \text{ GPa}, \rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, R = 25.4 \text{ mm}, \\ M = 0.2199 \text{ kg}, V = 0.25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

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 سه بعدی کنونی، با تاریخچه پیش‌بینی شده توسط مرجع [۴۷] در شکل (۱۶)، برای ورق‌های با و بدون پیش بار مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج، بیانگر تطابق خوب میان نتایج کنونی و نتایج مرجع [۴۷] می‌باشند.

برای بررسی اثر پیش بار، تنش دومحوری درون صفحه‌ای به میزان ۸ مگاپاسکال در سه وضعیت متفاوت دو طرف فشاری، یک طرف



شکل ۱۹- تأثیر محل ضربه بر نیروی برخورد در حالت پیش بار دو بعدی کششی ۱۰۰MPa.



شکل ۲۰- تأثیر محل ضربه بر خیز محل برخورد در حالت پیش بار دوبعدی کششی ۱۰۰MPa.

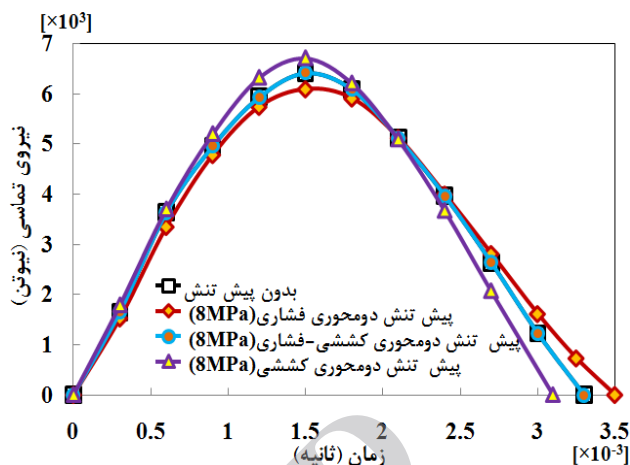
جدول ۱۰- مقادیر پارامترهای مختلف ضربه مرکزی و خارج از مرکز بدون پیش بار و با پیش بار دو بعدی کششی ۱۰۰MPa.

موقعیت ضربه زنده	وجود و یا عدم وجود پیش بار دوبعدی	بیشینه نیروی برخورد (kN)	خیز محل برخورد (mm)	مدت زمان برخورد (ms)
(x=y=0)	بدون پیش بار	۶/۴۱۲	۳/۵۷	۳/۳۰
	با پیش بار	۸/۳۴	۲/۸۰	۲/۳۵
(x=0, y=a/4)	بدون پیش بار	۶/۵۰۱	۳/۴۱	۳/۱۵
	با پیش بار	۷/۴۱۷	۳	۲/۴۵
(x=y=a/4)	بدون پیش بار	۶/۶۸۳	۳/۲۹	۳
	با پیش بار	۷/۱۱۶	۳/۱۵	۲/۶۰

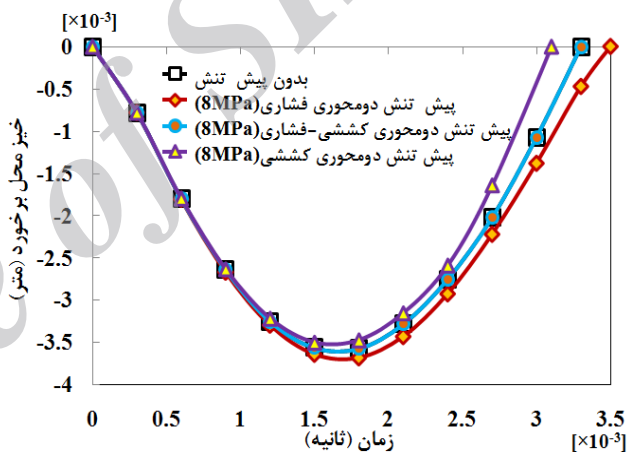
جدول ۱۱- تأثیر پیش بار دوبعدی کششی بر درصد تغییرات پارامترهای مختلف در مقایسه با حالت های اولیه بدون پیش بار.

موقعیت ضربه زنده	درصد افزایش نیروی برخورد	درصد کاهش محل برخورد	درصد کاهش مدت زمان برخورد
(x=y=0)	۲۵/۳۰	۲۱/۵۷	۲۸/۷۹
(x=0, y=a/4)	۱۴/۰۹	۱۲/۰۲	۲۲/۲۲
(x=y=a/4)	۶/۴۸	۴/۲۶	۱۳/۳۳

در جدول (۱۱) درصد تغییرات این پارامترها در مقایسه با حالت های اولیه بدون پیش بار خودشان بیان گردیده است.



شکل ۱۷- تأثیر پیش تنش های دوماحوری صفحه های کششی و فشاری بر نیروی برخورد.



شکل ۱۸- تأثیر پیش تنش های دو محوری صفحه های کششی و فشاری بر خیز محل برخورد.

جدول ۹- درصد تغییرات پارامترهای مختلف نسبت به حالت اولیه (بدون پیش تنش).

حالت پیش تنش دوماحوری	درصد تغییر نیروی برخورد	درصد تغییر محل برخورد	درصد تغییر مدت زمان برخورد
دو طرف فشاری	-۴/۹۹	+۲/۸۰	+۶/۰۶
یک طرف فشاری- یک طرف کششی	.	.	.
دو طرف کششی	+۴/۶۵	-۱/۹۶	-۶/۰۶

جدول ۱۲- تأثیر هم‌زمان پیش بار دو بعدی کششی و ضربه خارج از مرکز.

درصد افزایش نیروی برخورد نسبت به ضربه مرکزی بدون پیش‌بار	بیشینه نیروی برخورد (kN)	حالت ضربه
-	۶/۴۱۲	ضربه مرکزی بدون پیش‌بار کششی
۲۵/۳۰	۸/۰۳۴	ضربه مرکزی تحت پیش‌بار دوبعدی کششی ۱۰۰MPa
۴/۲۳	۶/۶۸۳	ضربه خارج از مرکز در نقطه $(x=y=a/4)$ بدون پیش‌بار کششی
۱۰/۹۸	۷/۱۱۶	ضربه خارج از مرکز در نقطه $(x=y=a/4)$ تحت پیش‌بار دوبعدی کششی ۱۰۰MPa

### ۳- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به تحلیل عددی سه بعدی ضربه کم‌سرعت بر صفحات ساندویچی مستطیلی با رویه‌های چندلایه فلز-الیاف پرداخته شده و تأثیر جنس الیاف، جنس فلز در رویه‌ها، انرژی ضربه‌زننده، ضربه خارج از مرکز و پیش‌تنش دومحوری صفحه‌ای بر پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی، نتایج عددی با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع دیگر مقایسه گردید و صحت مدل عددی مورد تأیید قرار گرفت. برای استخراج نتایجی دقیق با کم‌ترین خطای ممکن، از شبیه‌سازی سه بعدی ضربه در نرم‌افزار آباکوس برای استخراج پاسخ‌های ضربه بر پایه نظریه الاستیسیته استفاده گردیده است. نتایج این پژوهش نشان داد که هرچه محل برخورد ضربه زننده از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر شود از آنجایی که تأثیر تکیه‌گاه‌ها بر المان‌های محل برخورد بیشتر می‌گردد، میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش اما مقدار نیروی تماسی و میزان جذب انرژی توسط سازه افزایش می‌یابد. بنابراین، احتمال آسیب پدید آمده در ضربه خارج از مرکز بیشتر است. از طرف دیگر، در حالت پیش‌تنش دومحوری صفحه‌ای فشاری میزان نیروی برخورد به دلیل تمایل بار فشاری به ایجاد خیزهای بزرگ‌تر (و در حالت حدی، کمانش) و دور نمودن ورق از ضربه زننده کاهش یافته اما میزان خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد، درحالی‌که در حالت پیش‌تنش دو محوری صفحه‌ای 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 پیش‌تنش دو محوری صفحه‌ای کششی بیشتر است. با تحلیل هم‌زمان ضربه خارج از مرکز، تحت پیش‌بار دوبعدی مشخص شد که اثر پیش‌بار دارای تابعیت مکانی است به گونه‌ای که بیش‌ترین اثر پیش‌بار در مرکز رخ می‌دهد و هر چه از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها

همان‌طور که از جدول (۱۱) نمایان است اثر پیش‌بار دارای تابعیت مکانی است به گونه‌ای که بیش‌ترین اثر پیش‌بار در مرکز دیده می‌شود و هر چه از مرکز دور و به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر می‌شویم از تأثیر پیش‌بار کاسته می‌شود.

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 است (پیش‌بار فشاری موجب کاهش نیروی برخورد می‌گردد درحالی‌که 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 دو بعدی کششی و خارج از مرکز شبیه یکدیگر است (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 کدام یک از این سه حالت بحرانی‌تر است بستگی دارد که در مسئله مورد بررسی اثر کدام‌یک از دو عامل پیش‌بار دوبعدی کششی و یا خارج از مرکز بودن ضربه بر دیگری غلبه کند. برای نمونه در مسئله خاص مورد بررسی در این مقاله با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۱۲) از بین سه مورد بحث شده، حالت ضربه مرکزی تحت پیش‌بار دوبعدی کششی ۱۰۰ مگاپاسکال بحرانی‌ترین حالت است.

- of Laminated Composite Plates"; 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Conference, 1998.
- [15] Damadar Ambur, R.; Kemmerly Heather, L. "Effect of Curvature on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates"; 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conference, 1998.
- [16] Carpino, G.; Teti, R. "Impact and Pot Impact Behavior of Foam Core Sandwich Structures"; *Compos. Struct.* 1994, 29, 47-55.
- [17] Anderson, T. A.; Madenci, E. "Experimental Investigation of Low-Velocity Impact Characteristics of Sandwich Composites"; *Compos. Struct.* 2000, 50, 239-247.
- [18] Anderson, T. A.; Madenci, E. "Graphite/Epoxy Foam Sandwich Panels under Quasi-Static Indentation"; *Eng. Fract. Mech.* 2000, 67, 329-344.
- [19] Carpino, G.; Crivelli Visconti, I.; Di Ilio, A. "Elastic Behavior of Composite Structures under Low Velocity Impact"; *Composites.* 1984, 15, 231-234.
- [20] Ambur, D. R.; Cruz, J. R. "Low-Speed Impact Response Characteristics of Composite Sandwich Panels"; *AIAA J.* 1995.
- [21] Olsson, R. "Improved Theory for Contact Indentation of Sandwich Panels"; *AIAA J.* 1996, 34, 1238-1244.
- [22] Herup, E.; Palazotto, A. N. "Elasticity Solutions for Hertzian Loaded Composite Sandwich Plates"; *J. Aerosp. Eng.* 1997, 10, 27-37.
- [23] Palazotto, A. N.; Herup, E. J.; Gummadi, L. N. B. "Finite Element Analysis of Low-Velocity Impact on Composite Sandwich Plates"; *Compos. Struct.* 2000, 49, 209-227.
- [24] Foo, C. C.; Seah, L. K.; Chai, G. B. "A Modified Energy-Balance Model to Predict Low-Velocity Impact Response for Sandwich Composites"; *Compos. Struct.* 2011, 93, 1385-1393.
- [25] Sburlati, R. "The Effect of a Slow Impact on Sandwich Plates"; *J. Compos. Mater.* 2002, 36, 1079-1092.
- [26] Icardi, U.; Ferrero, L. "Impact Analysis of Sandwich Composites Based on a Refined Plate Element with Strain Energy Updating"; *Compos. Struct.* 2009, 89, 35-51.
- [27] Lee, L. J.; Huang, K. Y.; Fann, Y. J. "Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted by a Rigid Ball"; *J. Compos. Mater.* 1993, 27, 1238-1256.
- [28] Kalili, S. M. R.; Malekzadeh, K. "Effect and Physical and Geometrical Parameters on Transverse Low-Velocity Impact Response of Sandwich Panels with a Transversely Flexible Core"; *Compos. Struct.* 2007, 77, 430-443.
- [29] Malekzadeh, K.; Kalili, S. M. R. "Response of Composite Sandwich Panels with Transversely Flexible Core to Low-Velocity Transverse Impact: A New Dynamic Model"; *Int. J. Impact. Eng.* 2007, 34, 522-543.
- [30] Sabzikar Boroujerdy, M.; Dariushi, S.; Sadighi, M. "Fiber Metal Laminates under Low Velocity Impact: An Experimental/Analytical Approach"; *Iran. J. Polym. Sci. Technol.* 2011, 24, 69-78.
- [31] Langdon, G. S.; Nurick, G. N.; Lemanski, S. L.; Simmons, M. C.; Cantwell, W. J.; Schleyer, G. K. "Failure Characterization of Blast-Loaded Fiber-Metal Laminate Panels Based on Aluminum and Glass-Fiber Reinforced Polypropylene"; *Compos. Sci. Technol.* 2007, 67, 1385-1405.
- [32] Langdon, G. S.; Lemanski, S. L.; Nurick, G. N.; Simmons, M. C.; Cantwell, W. J.; Schleyer, G. K. "Behavior of Fiber-Metal Laminates Subjected to Localized Blast Loading: Part I-Experimental Observations"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 1202-1222.
- [33] Caprino, G.; Lopresto, V.; Iaccarino, P. "A Simple Mechanistic Model to Predict the Macroscopic Response of Fiber Glass-Aluminum Laminates under Low-Velocity Impact"; *Compos. Part A.* 2007, 38, 290-300.

نزدیک‌تر می‌شویم از اثر پیش بار کاسته می‌شود. با تغییر جنس الیاف از شیشه به کربن و بور و یا با تغییر جنس فلز از آلومینیوم به تیتانیوم و منیزیم به دلیل افزایش سفتی ناحیه تماس، میزان نیروی برخورد و میزان انرژی جذب شده توسط سازه افزایش اما خیز محل برخورد و مدت زمان برخورد کاهش یافته است. با افزایش انرژی ضربه زننده میزان نیروی برخورد، خیز محل برخورد و درصد انرژی جذب شده توسط سازه افزایش می‌یابد. مدت زمان برخورد در هنگام افزایش انرژی برخورد توسط افزایش جرم ضربه زننده، افزایش اما در حالت افزایش انرژی برخورد توسط افزایش سرعت ضربه زننده، کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Cleveland, M. A. "Acoustically Damped Composite Construction for the Forward Portion of a Rocket or Missile"; US Patent, 0,064,165, 2005.
- [2] Kalili, S. M. R.; Mittal, R. K.; Gharibi Kalibar, S. "A Study of the Mechanical Properties of Steel/Aluminum/GRP Laminates"; *Mater. Sci. Eng.* 2005, 412, 137-140.
- [3] Nam, H. W.; Hwang, W. "Stacking Sequence Design of Fiber-Metal Laminate for Maximum Strength"; *J. Compos. Mater.* 2001, 35, 1654-1683.
- [4] Botelho, E. C.; Silva, R. A.; Pardini, L. C.; Rezende, M. C. "A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures"; *Mater. Res.* 2006, 9, 247-256.
- [5] Botelho, E. C.; Almeida, R. S.; Pardini, L. C.; Rezende, M. C. "Elastic Properties of Hydrothermally Conditioned Glare Laminate"; *Int. J. Eng. Sci.* 2007, 45, 163-172.
- [6] Sadighi, M.; Tajdari, M.; Dariushi, S. "An Investigation on Tensile Properties of Glass Fiber/Aluminum Laminates"; *Iran. J. Polym. Sci. Technol.* 2009, 22, 31-39.
- [7] Volt, A.; Vogelesang, L. B.; de Vries, T. J. "Towards Application of Fiber Metal Laminates in Larger Aircraft"; *Aircraft Eng. Aero-space Technol.* 1999, 71, 558-570.
- [8] Sadighi, M.; Dariushi, S. "An Experimental Study on Impact Behavior of Fiber/Metal Laminates"; *Iran. J. Polym. Sci. Technol.* 2008, 21, 315-327.
- [9] Park, S. Y.; Choi, W. J.; Choi, H. S. "A Comparative Study on the Properties of GLARE Laminates Cured by Autoclave and Autoclave Consolidation Followed by Oven Post Curing"; *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2010, 49, 605-613.
- [10] Kiratisaevae, H.; Cantwell, W. J. "The Impact Response of Aluminum Foam Sandwich Structures Based on a Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Fiber-Metal Laminate"; *Polym. Composite.* 2004, 25, 499-509.
- [11] Abrate, S. "Impact on Composite Structures"; Cambridge University Press: New York, 2005.
- [12] Ellis, R. L. "Ballistic Impact Resistance of Graphite Epoxy Composites with Shape Memory Alloys and Extended Chain Polyethylene Spectra™ Hybrid 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, 1996.
- [13] Birman, V.; Chandrashekhara, K.; Sain, S. "An Approach to Optimization of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Plates Subjected to Low-velocity Impact"; *Compos. Part B.* 1996, 27, 439-446.
- [14] Damadar Ambur, R.; Kemmerly Heather, L. "Influence of Impact Mass on the Damage Characteristics and Failure Strength

- [42] Reddy, J. N. "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells"; Second Edition, CRC PRESS: New York, 1945.
- [43] Kistler, L. S.; Waas, A. M. "On the Response of Curved Laminated Panels Subjected to Transverse Impact Loads"; Int. J. Solids Struct. 1999, 36, 1311–27.
- [44] Tarfaoui, M.; Gning, P. B.; Hamitouche, L. "Dynamic Response and Damage Modeling of Glass/epoxy Tubular Structures: Numerical Investigation"; Compos. Part A. 2008, 39, 1–12.
- [45] Anderson Todd, A. "An Investigation of SDOF Models for Large Mass Impact on Sandwich Composites"; J. Compos. B. 2005, 42–135.
- [46] Seyed Yaghoubi, A.; Liaw, B. "Effect of Lay-Up Orientation on Ballistic Impact Behaviors of Glare5 FML Beams"; Int. J. Impact. Eng. 2012.
- [47] Malekzadeh, K.; Khalili, M. R.; Mittal, R.K. "Response of In-Plane Linearly Prestressed Composite Sandwich Panels with Transversely Flexible Core to Low-velocity Impact"; J. Sandwich Struct. Mat. 2000, 8, 157-181.
- [48] Frostig, Y. "Buckling of Sandwich Plates with a Flexible Core: High-Order Theory"; Int. J. Solids Struct. 1998, 35, 183–204.
- [34] Abdullah, M. R.; Cantwell, W. J. "The Impact Resistance of Polypropylene Based Fiber-Metal Laminates"; Compos. Sci. Technol. 2006, 66, 1682-1693.
- [35] Raville, M. E.; Ueng, C. E. S. "Determination of Natural Frequencies of Vibration of a Plate"; Exp. Mech. 1967, 7, 490-493.
- [36] Soutis, C.; Duan, D. M.; Goutas, P. "Compressive Behavior of CFRP Laminates Repaired with Adhesively Bonded External Patches"; Compos. Struct. 1999, 45, 289-301.
- [37] Shivakumar, K. N.; Elber, W.; Illg, W. "Prediction of Impact Force and Duration Due to Low-Velocity Impact on Circular Composite Laminates"; Int. J. Appl. Mech. 1985, 52, 674–80.
- [38] Ambur, D. R.; Starnes, J. H.; Prasad, C. B. "Influence of Transverse-Shear and Large-deformation Effects on the Low-speed Impact Response of Laminated Composite Plates"; NASA TM 107753, 1993.
- [39] Chattopadhyay, S. "Response of Elastic Plates to Impact Including the Effects of Shear Deformation"; Lehigh University Press, Rec. Adv. Eng. Sci. 1977, 127–38.
- [40] Dassault System's Simulia Corp., The ABAQUS 6.12-1 user's manual, USA, 2012.
- [41] Khalili, S. M. R.; Soroush, M.; Davar, A.; Rahmani O. "Finite Element Modeling of Low-Velocity Impact on Laminated Composite Plates and Cylindrical Shells"; Compos. Struct. 2011, 93, 1363–1375.

Archive of SID