

رفتار پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چند لایه در برابر بارهای انفجاری

امیر اسماعیل خسروی^۱، فرزاد شهابیان^{۲*}، یونس نوری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

امروزه با توجه به افزایش خطرات ناشی از انفجار، بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر آن از اهمیت بالایی برخوردار است. انفجار باعث ایجاد موج‌های با شدت بالا بر روی سازه‌های مجاور خود می‌شود. در سال‌های اخیر از پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب در سازه‌های نوین در برابر انفجار استفاده گردیده است. این امر بعلاوه خصوصیات مکانیکی خوب این مواد از جمله مقاومت بالا نسبت به حجم، انعطاف پذیری و مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد. بنابراین، شناخت چگونگی رفتار سازه‌هایی که با این مواد ساخته می‌شوند در برابر این گونه بارها ضروری می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار Abaqus به بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای مرکب در برابر بارهای انفجاری که از نوع بارهای ضربه‌ای هستند، پرداخته شده است. بدین منظور، پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر روی رفتار مواد مرکب و نحوه اثرگذاری آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله این پارامترها می‌توان به تاثیر فاصله مرکز انفجار، میزان انحنا، نحوه لایه‌بندی و اندازه زاویه داخلی اشاره کرد. در عمل ممکن است به دلیل پاره‌ای از نیازهای موجود، بازشوهایی در پوسته تعبیه شود. با بررسی صورت گرفته مشخص شد که با ایجاد بازشو می‌توان تغییر مکان را کاهش داد. این راهکار با استفاده از پدیده کاهش سطح بارگیر پوسته در برابر بارهای ناشی از انفجار حاصل می‌شود.

کلمات کلیدی: پوسته، مواد مرکب، استوانه، بار انفجاری، بازشو.

* نویسنده مسئول: فرزاد شهابیان

پست الکترونیکی: shahabf@um.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.86888.1203

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86888.1203>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

۱- مقدمه

پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب کاربردهای متنوعی دارند. این پوسته‌ها معمولاً در صنایع فضایی، نظامی، حمل و نقل و ساخت و سازهای عمرانی استفاده می‌شوند. پوسته‌های مواد مرکب دارای ضخامت کم و سطحی گسترده هستند و زمانی که در معرض بارهای انفجاری قرار می‌گیرند دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌شوند. از این رو، بررسی عوامل موثر در ایجاد تغییر شکل ضروری می‌باشد و باعث شناخت بهتر و ایجاد سازه‌هایی با عملکرد بهتر می‌گردد. تاکنون، پژوهش‌های گوناگونی در زمینه‌ی اثرات انفجار بر روی پوسته‌ها انجام گردیده است.

۲- کارهای انجام شده

از جمله این پژوهش‌ها، می‌توان به بررسی بدنه زبرد ریایی‌ها اشاره کرد [۱، ۲]. تاثیر انحنای پوسته‌ها بر روی مقاومت در برابر انفجار نیز مورد بررسی قرار گرفت [۳، ۴]. در این میان، مطالعاتی نیز در مورد تاثیر انفجار بر روی پاسخ دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چند لایه انجام شد [۵].

تکالار^۱ و همکاران در زمینه رفتار مواد مرکب تحت اثر بارهای استاتیکی و انفجاری تحقیق کرد [۶]. آنها مواد مرکب ساخته شده از دو نوع الیاف شیشه‌ای و کربنی را تحت اثر بارهای انفجاری و بارهای استاتیکی قرار دادند و مشاهده کردند که تحت بار انفجاری، مواد مرکب با الیاف کربنی خرابی ناگهانی از خود نشان می‌دهند، در حالی که مواد مرکب با الیاف شیشه‌ای از خود رفتاری با خرابی پیشرونده بروز می‌دهند. آرورا^۲ و همکاران رفتار سازه‌های ساندویچی مرکب با مقیاس واقعی را تحت اثر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار دادند [۳]. آنها از فن تصویر برداری با سرعت بالا و روش دی‌آی‌سی^۳ برای تحلیل پاسخ استفاده کردند. نتایج بررسی نشان داد که خرابی در اثر خمش یا کشش از یک ترک در لایه بیرونی در نزدیکی لبه تکیه‌گاه شروع می‌شود، در حالی که ترک‌های برشی در لایه‌های داخلی نمایان می‌گردد. آنها این آزمایش را با روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند. یا فی^۴ و همکاران کماتش دینامیکی پوسته‌ها تحت اثر بارهای انفجاری را بررسی کردند [۷، ۸]. آنها در تحقیق خود با استفاده از نرم افزار MATLAB، معادلات لاگرانژی حاکم بر رفتار پوسته‌های تحت بارهای انفجاری را مطالعه کردند و سپس با استفاده از روش تحلیلی و نرم‌افزار Abaqus کار خود را صحت‌سنجی نمودند.

در پژوهش حاضر، رفتار پوسته‌های دارای انحنای استوانه‌ای تحت اثر بارهای انفجاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بدین‌منظور اثر عامل‌های مختلفی همچون جنس ماده، شرایط مرزی، زاویه داخلی، شعاع داخلی، تعداد لایه‌ها، فاصله انفجار و اثر باز شو بر تغییر مکان بیشینه سازه در نظر گرفته شده است. برای این کار از نرم‌افزار Abaqus استفاده گردیده است.

۳- روش تحقیق

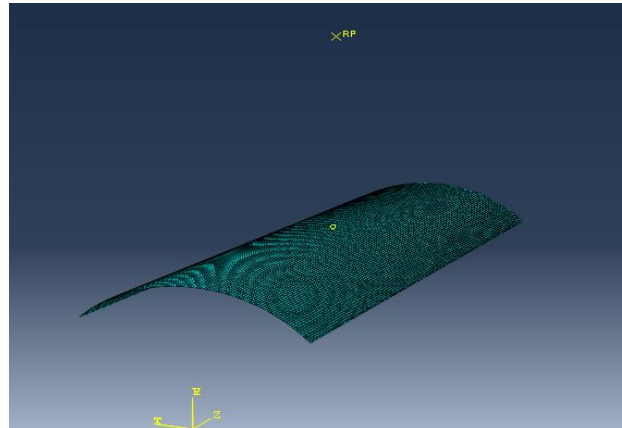
۳-۱- ماده و مدل‌ها

پوسته‌های مدل‌سازی شده از دو ماده مرکب دارای الیاف شیشه‌ای و کربنی می‌باشند. این پوسته‌ها در سه شعاع ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و سه زاویه داخلی ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه برای بررسی تاثیر انحنای و زاویه داخلی انتخاب شده‌اند. برای مطالعه تاثیر تعداد لایه‌ها، سه نوع لایه بندی ۴، ۸ و ۱۶ لایه با زاویه قرارگیری [۹۰°، ۳۰°، ۴۵°] انتخاب شده‌اند. در همه مدل‌ها ضخامت هر لایه ۱ میلی‌متر می‌باشد. خصوصیات مکانیکی این دو ماده در جدول ۱ ارایه شده است.

1 Tekular
2 Arora
3 DIC
4 Yefei

۳-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

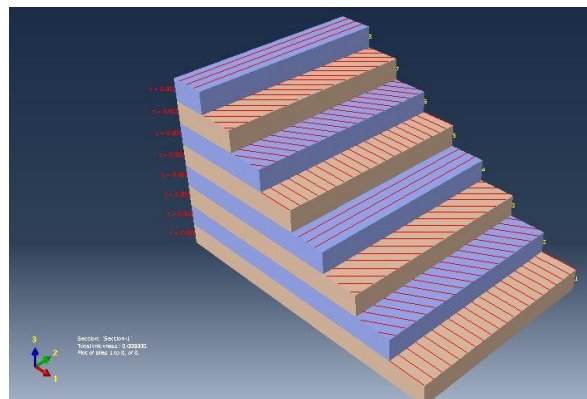
در این مدل‌سازی‌ها برای بررسی تاثیر فاصله انفجار بر روی پوسته‌ها، انفجار ماده منفجره معادل یک کیلوگرم TNT در فاصله‌های ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ متر از محل مورد بررسی، شبیه‌سازی شده است. همچنین مدل‌ها دارای دو حالت شرط مرزی گیردار و آزاد می‌باشند. یک نمونه از مدل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل نمونه و موقعیت منبع انفجار.

۳-۳- تحلیل اجزای محدود

مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Abaqus نسخه ۶/۱۲ انجام شده است [۹]. در این مدل‌سازی‌ها از جزءهای پوسته‌ای Shell (S4R) استفاده شده است. ابعاد هر جزء ۲ میلی‌متر و رفتار غیرخطی در نظر گرفته شده است. زمان تحلیل ۰/۰۱۵ ثانیه می‌باشد. نقطه مرکزی پوسته‌ها به عنوان مبنایی برای بررسی تغییر مکان پوسته انتخاب شده است. نمونه‌ای از نحوه لایه بندی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲: نحوه زاویه‌بندی الیاف.

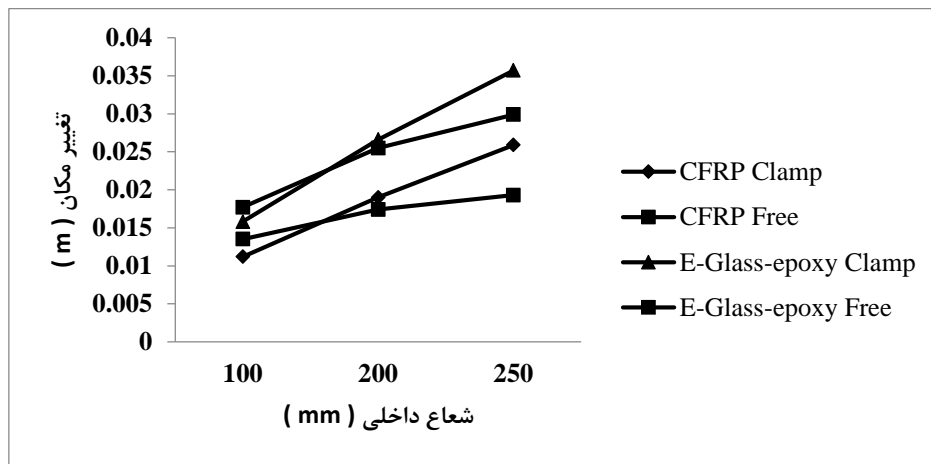
جدول ۱: خصوصیات مکانیکی مواد مرکب چند لایه [۱۰]

خصوصیات	گرافیت اپوکسی	شیشه اپوکسی
E_1 (GPa) مدول الاستیسیته	۱۴۳	۴۸
E_2 (GPa) مدول الاستیسیته	۱۰	۱۲
E_3 (GPa) مدول الاستیسیته	۱۰	۱۲
G_{12} (GPa) مدول برشی	۶	۶
G_{23} (GPa) مدول برشی	۳	۵
G_{13} (GPa) مدول برشی	۵	۶
ν_{12} ضریب پواسون	۰,۳	۰,۱۹
ν_{23} ضریب پواسون	۰,۵۲	۰,۲۶
ν_{13} ضریب پواسون	۰,۳	۰,۱۹
σ_{1c} (MPa) مقاومت کششی	۲۱۷۲	۱۰۲۰
σ_{1T} (MPa) مقاومت فشاری	۱۵۵۸	۴۹۰
σ_{2c} (MPa) مقاومت کششی	۵۴	۸
σ_{2T} (MPa) مقاومت فشاری	۱۸۶	۷۸
σ_{3c} (MPa) مقاومت کششی	۵۹	۸
σ_{3T} (MPa) مقاومت فشاری	۱۸۶	۷۸
τ_{12} (MPa) مقاومت برشی	۸۷	۲۳
τ_{23} (MPa) مقاومت برشی	۱۲۴	۶۶
τ_{13} (MPa) مقاومت برشی	۹۴	۶۶

۴- مطالعه پارامتری

۴-۱- تاثیر شعاع پوسته

برای بررسی تاثیر شعاع، پوسته‌هایی با سه شعاع ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این پوسته‌ها در معرض انفجار یک کیلوگرم TNT در فاصله ۰/۳ متر از مرکز پوسته قرار گرفته است. هر پوسته در ۸ لایه با زاویه قرارگیری [۹۰°، ۳۰°، ۰°، ۳۰°، ۹۰°، ۰°، ۳۰°، ۹۰°] می‌باشند. طول پوسته ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

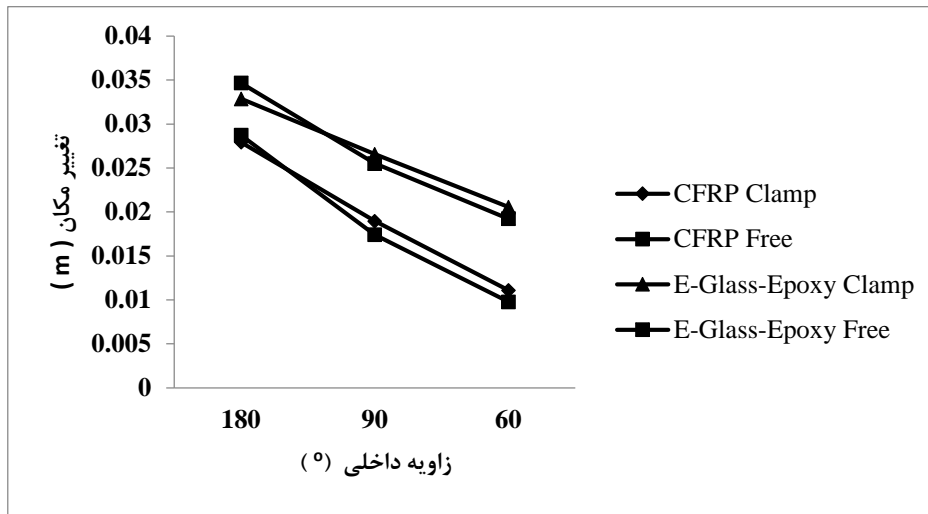


شکل ۳: رابطه تغییر مکان با شعاع پوسته.

با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع یا کاهش انحنا تغییر مکان افزایش می‌یابد که نشان دهنده رابطه معکوس انحنا با مقاومت پوسته در برابر تغییر شکل می‌باشد. بررسی جنس ماده و شرایط مرزی نیز مشخص می‌کند که ماده مرکب مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و تکیه‌گاه گیردار باعث کاهش تغییر مکان مرکز پوسته شده است.

۲-۴- تاثیر زاویه داخلی

در این مرحله، شعاع پوسته ثابت نگه داشته می‌شود و اندازه زاویه داخلی تغییر می‌کند تا تاثیر تغییر زاویه داخلی در حالت ثابت بودن بقیه پارامترها مشخص گردد. سه زاویه داخلی ۶۰°، ۹۰°، ۱۸۰° با شعاع ۲۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. مشابه حالت قبل این پوسته‌ها در معرض بار ناشی از انفجار یک کیلوگرم TNT در فاصله ۰/۳ متر قرار گرفته است و هر پوسته در ۸ لایه با زاویه‌بندی [۴۵°، ۹۰°، ۳۰°، ۰°، ۴۵°، ۳۰°، ۰°، ۹۰°] مدل‌سازی شده است. حداکثر تغییر مکان‌های بدست آمده در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

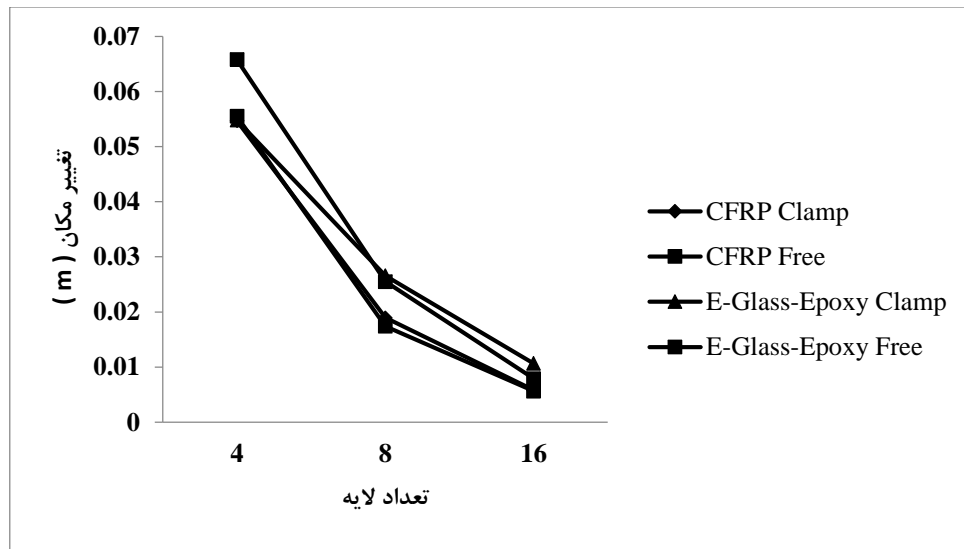


شکل ۴: رابطه تغییر مکان با زاویه داخلی.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با کاهش زاویه داخلی تغییر مکان پوسته‌ها کاهش می‌یابد که نشان دهنده رابطه معکوس زاویه داخلی و بیشینه تغییر مکان است. لازم به ذکر است که سطح بارگیر این پوسته‌ها با افزایش زاویه داخلی افزایش می‌یابد و باعث افزایش شدت تغییرات تاثیر زاویه داخلی می‌شود.

۳-۴- تاثیر تعداد لایه

برای در نظر گرفتن اثر تعداد لایه‌ها بر روی رفتار پوسته‌ها همانند دیگر پارامترها ۳ مدل ۴، ۸ و ۱۶ در نظر گرفته شده است. در این بررسی شعاع لایه‌ها ۲۰۰ میلیمتر و زاویه داخلی ۹۰° با تکرار زاویه‌بندی [۴۵°، ۳۰°، ۰°، ۹۰°] برای هر ۴ لایه می‌باشد. شرایط بارگذاری مشابه قسمت‌های قبل شبیه‌سازی شده است. رفتار پوسته‌ها در این حالت از مدل‌سازی در دو حالت شرایط مرزی و دو نوع جنس در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: رابطه تغییر مکان با تعداد لایه‌ها.

همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، با افزایش تعداد لایه‌ها، مقاومت در برابر تغییر مکان افزایش می‌یابد، ولی این عمل روندی کاهشی دارد به طوری که رابطه تعداد لایه با افزایش مقاومت خطی نیست. با توجه به شکل ۶ پوسته‌ای با الیاف کربن مقاومت کمتری نسبت به الیاف شیشه در برابر تغییر مکان دارد و تاثیر تکیه‌گاه در این حالت ناچیز می‌باشد.

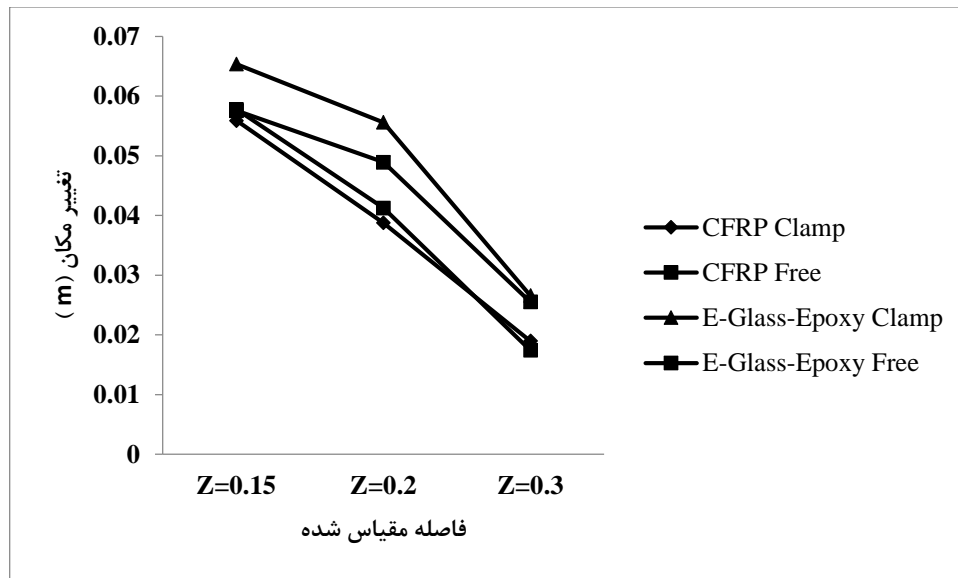
۴-۴- تاثیر فاصله مرکز انفجار

برای این که انفجارهای با خرج‌های مختلف را بتوان با هم مقایسه کرد، از رابطه‌های مقیاس‌سازی استفاده می‌کنند. مقیاس‌سازی براساس تشابه هندسی می‌باشد و این روش در انفجارها از اصل بقای تکانه یا همان تئوری پی باکینگهام استفاده می‌شود. یکی از معروفترین مقیاس‌سازی‌ها مقیاس هاپکینز کرنز^۵ ریشه سوم است. در این رابطه چگالی محیط برابر با یک در نظر گرفته می‌شود، انرژی آزاد شده نیز به صورت معادل جرم TNT در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه این مقیاس‌سازی به صورت ساده شده رابطه (۱) در می‌آید.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

که در آن R فاصله مرکز انفجار تا نقطه مورد بررسی، W جرم ماده انفجاری و Z فاصله مقیاس شده است.

در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر فاصله مقیاس شده سه اندازه $Z=0/15$ ، $Z=0/2$ و $Z=0/3$ در نظر گرفته شده است و W برابر یک کیلوگرم TNT انتخاب شده است. پوسته‌ها به صورت ۸ لایه با زاویه بندی $[45^\circ, 90^\circ, 30^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$ مدل‌سازی گردیده است. در شکل ۶ تاثیر تغییر فاصله مقیاس شده در رفتار پوسته برای دو نوع ماده با الیاف کربنی و شیشه‌ای و دو نوع تکیه‌گاه نشان داده شده است.



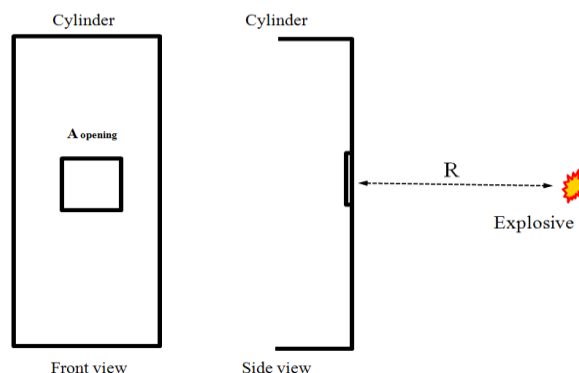
شکل ۶: رابطه تغییر مکان با فاصله مقیاس شده.

با توجه به شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله انفجار در مواد مرکب با الیاف شیشه تاثیر بیشتری نسبت به الیاف کربن در ایجاد تغییر مکان دارد و همچنین با افزایش این فاصله تاثیر تکیه‌گاه گیردار در کاهش تغییر مکان، روندی نزولی دارد.

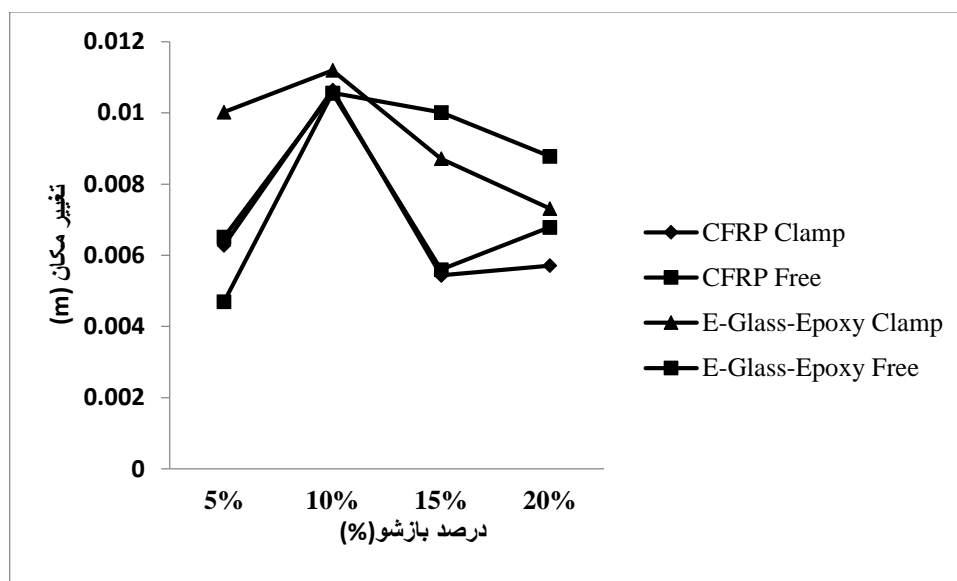
۴-۵- اثر بازشو

در این بخش، رفتار پوسته‌های دارای بازشو مورد بررسی قرار می‌گیرد. پوسته مورد بررسی دارای ۸ لایه، شعاع داخلی ۲۰۰ میلی‌متر، طول ۴۰۰ میلی‌متر، زاویه داخلی ۹۰ درجه و زاویه بندی [۹۰°، ۰°، ۳۰°، ۰°، ۴۵°، ۰°، ۳۰°، ۰°، ۴۵°] می‌باشد. فاصله مقیاس شده برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ نحوه مدل‌سازی مشاهده می‌شود. بازشو به صورت مربعی می‌باشد و درصد آن براساس نسبت سطح بازشو به سطح پوسته مطابق رابطه (۲) تعریف گردیده است. نتایج بدست آمده در شکل ۸ ارایه شده است.

$$\text{درصد بازشو} = \frac{A_{\text{opening}}}{A_{\text{shell}}} \quad (2)$$



شکل ۷: موقعیت بازشو.



شکل ۸: رابطه تغییرات درصد بازشو با تغییر مکان.

همان طور که شکل ۸ نشان می‌دهد که با ایجاد بازشو، بیشینه تغییر مکان‌ها نسبت به حالت بدون بازشو کاهش پیدا کرده است. دلیل اصلی این پدیده، کاهش سطح بارگیر در پوسته در برابر اثر بارهای ناشی از انفجار است. از طرف دیگر درصد بازشو دارای مقدار حدی می‌باشد، به طوری که بازشو ۱۰٪ حداکثر مقدار تغییر مکان را دارد و در درصدهای قبل و بعد از آن تغییر مکان کمتری دارد. برای مثال تغییر مکان در پوسته گیردار دارای الیاف کربن با ۱۰ درصد بازشو نسبت به پوسته حالت بدون بازشو ۵ درصد کاهش یافته است.

۵- بحث بر روی نتایج

در پژوهش حاضر تغییر شکل پوسته‌های مواد مرکب با و بدون بازشو تحت اثر بارهای انفجاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید.

الف- با افزایش شعاع یا کاهش انحنا تغییر مکان افزایش می‌یابد که نشان دهنده رابطه معکوس انحنا با تغییر مکان پوسته می‌باشد.

ب- با کاهش زاویه داخلی تغییر مکان پوسته‌ها کاهش می‌یابد که نشان دهنده رابطه مستقیم زاویه داخلی و تغییر مکان است.

ج- با افزایش تعداد لایه‌ها، تغییر مکان کاهش می‌یابد ولی این عمل روندی کاهشی دارد، بطوری که رابطه تعداد لایه با کاهش تغییر مکان خطی نیست.

د- افزایش فاصله مرکز انفجار در مواد مرکب با الیاف شیشه‌ای تاثیر بیشتری نسبت به الیاف کربن در افزایش تغییر مکان دارد و همچنین با افزایش این فاصله تاثیر تکیه‌گاه گیردار در کاهش تغییر مکان روندی نزولی دارد.

ه- با ایجاد بازشو بیشینه تغییر مکان‌ها نسبت به حالت بدون بازشو کاهش پیدا می‌کند که دلیل اصلی آن کاهش سطح بارگیر پوسته در برابر بارهای ناشی از انفجار می‌باشد.

و- درصد بازشو دارای مقدار حدی می‌باشد، به طوری که بازشو ۱۰٪ حداکثر تاثیر را در میزان تغییر مکان دارد.

ز- تغییر مکان در پوسته گیردار دارای الیاف کربنی با ۱۰ درصد بازشو نسبت به پوسته حالت بدون بازشو ۵ درصد کاهش یافته است.

با توجه به مطالب بررسی شده در پژوهش حاضر می‌توان گفت که رابطه تغییر مکان در پوسته مرکب با الیاف شیشه‌ای و کربنی تحت اثر بار انفجاری با شعاع داخلی و زاویه داخلی مستقیم و با تعداد لایه‌ها و فاصله مرکز انفجار معکوس می‌باشد که این روابط لزوماً خطی نمی‌باشد، همچنین با ایجاد بازشو در پوسته بیشینه تغییر مکان کاهش پیدا می‌کند.

مراجع

- [1] LeBlanc J, Shukla A. Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: experimental and computational comparisons. *Composite Structure* 2011;93:3072–81.
- [2] Kumar P, Stargel DS, Shukla A. Effect of plate curvature on blast response of carbon composite panels. *Compos Struct* 2013;99:19–30.
- [3] Arora H, Hooper PA, Dear JP. Dynamic response of full-scale sandwich composite structure subject to air-blast loading. *Composites Part A* 2011;42:1651–62.
- [4] Turkmen HS. Structural response of laminated composite shells subjected to blast loading: comparison of experimental and theoretical methods. *J Sound Vib* 2002;249(4):663–78.
- [5] Lee Y-S, Lee K-D. On the dynamic response of laminated circular cylindrical shells under impulse loads. *Computite Structrucre* 1997;63(1):149–57.
- [6] Tekalur SA, Shivakumar K, Shukla A. Mechanical behavior and damage evolution in E-glass vinyl ester and carbon composites subjected to static and blast loads. *Composites Part B* 2008;39:57–65.
- [7] Yifei Gao, Michelle S. Hoo Fatt., “Dynamic pulse buckling of single curvature composite shells under external blast,” Department of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron, 2011.
- [8] Dushyanth Sirivolu, Michelle S. Hoo Fatt., “Dynamic stability of double-curvature composite shells under external blast,” Department of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron, 2015.
- [9] Abaqus, Inc., Abaqus user manual, version 6.12. Dassault Systèmes, 2012.
- [10] Lapp CK. Design allowables substantiation. In: Peters ST, editor. *Handbook of composites*. London: Chapman & Hall; 1998. p. 758–77.