

## اثر بازشو و سخت کننده بر رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های تک‌انحنایی FGM تحت بارهای انفجاری

مجتبی شهرکی، فرزاد شهبابیان\*، رضا جمعه منظری  
دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۲۳  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۷-۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۰۱

**کلمات کلیدی:**  
پوسته‌ی FGM  
شاخص توان حجمی  
بار انفجاری  
بازشو  
سخت کننده

**خلاصه:** مواد هدفمند (FGM) گونه‌ای از مواد مرکب هستند که به واسطه‌ی پیوستگی ترکیب مواد تشکیل دهنده، خواص مکانیکی مؤثرتری نسبت به مواد مرکب چندلایه دارا می‌باشند که این مهم، منجر به از بین رفتن تمرکز تنش بین لایه‌ای می‌شود. بیشترین کاربرد این مواد در سازه‌های جدار نازک نظیر صفحه‌ها و پوسته‌ها می‌باشد. یکی از مؤثرترین عوامل تغییر رفتار این گونه سازه‌ها به‌ویژه پوسته‌های تک‌انحنایی، بارهای حرارتی و ضربه‌ای ناشی از انفجار می‌باشد که این چالش سبب رفتار دینامیکی غیرخطی آن‌ها می‌گردد. همچنین به دلیل بعضی مسایل اجرایی، ایجاد بازشو در پوسته‌ها و تغییر رفتار آن‌ها در برابر بارهای انفجاری مسأله‌ای مهم و پیشنهاد برای حل آن ضرورت می‌یابد. از این رو، به‌منظور بهبود مقاومت و کاهش مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان، بهره‌گیری از پوسته‌های هدفمند و استفاده از سخت کننده‌های مناسب، توصیه می‌گردد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Abaqus، به ارزیابی تأثیر انواع بازشو و سخت کننده بر روی رفتار دینامیکی پوسته‌های تک‌انحنایی FGM تحت بارهای انفجاری پرداخته شده است. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، اثر انواع بازشو و سخت کننده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شاخص توان حجمی مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته کاهش پیدا کرده است. ایجاد بازشو در مرکز پوسته عملکرد بهتری در مقایسه با ایجاد بازشوی گسترده در سطح پوسته داشته است. با افزایش لنگر لختی سخت کننده‌های طولی و حلقوی مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان کاهش یافته است. همچنین، با استفاده‌ی توأم از بازشوی گسترده و سخت کننده‌های طولی می‌توان مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته را تا حد زیادی کاهش داد.

### ۱- مقدمه

می‌تواند حرارت بالا را تحمل کند و از طرفی، ماده ساختاری دیگر، یعنی فلز، انعطاف‌پذیری مورد نیاز را فراهم می‌کند. قابل توجه است که به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی مشکلات عدم پیوستگی که در سازه‌های کامپوزیتی موجود است در مواد هدفمند به وجود نمی‌آید. در شکل ۱ نمای شماتیک یک ماده‌ی هدفمند متشکل از دو ماده‌ی A و B نشان داده شده است.

پوسته‌ها به دلیل سطح گسترده و ضخامت کم اغلب در برابر بارهای ناشی از انفجار دچار تغییر مکان زیادی می‌شوند. برای مقابله با این تغییر مکان‌ها می‌توان اقداماتی نظیر افزایش ضخامت پوسته انجام داد که به دلیل بالا رفتن وزن سازه و غیراقتصادی بودن مورد توجه قرار نمی‌گیرد. لذا به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها، استفاده مناسب از

مواد هدفمند در علم مواد به موادی جدید و پیشرفته با ساختاری ناهمگن گفته می‌شود که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. خواص مکانیکی این مواد به‌طور پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات به وسیله‌ی تغییر تدریجی نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده‌ی آن‌ها ایجاد می‌شود. مواد FGM<sup>۱</sup> به‌طور معمول از دو ماده‌ی سرامیک و فلز ساخته می‌شوند. با توجه به اینکه ماده‌ی ساختاری سرامیک ضریب انتقال حرارت پایین و مقاومت بالایی در برابر درجه حرارت دارد که

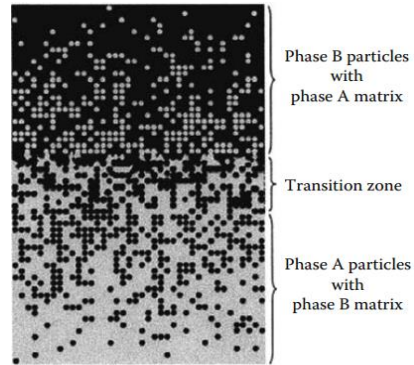
1 Functionally Graded Materials

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shahabf@um.ac.ir



قسمت سرامیکی قطعه قابلیت تحمل دماهای بالا را دارا می‌باشد و قسمت فلزی آن مقاومت مکانیکی لازم و هدایت گرمایی و در صورت نیاز هدایت الکتریکی را تامین می‌کند [۳].

بور<sup>۱</sup> و دیووز<sup>۲</sup> [۵] در سال ۱۹۷۲ میلادی مواد مرکب گردایانی که خواص مکانیکی آن‌ها در راستای مختصات محلی با شیبی مشخص تغییر می‌کند را به‌عنوان ایده‌ای برای استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد ارائه دادند و بر پایه‌ی این نظریه، یک تحقیق ملی در زمینه‌ی مواد با تغییر عملکرد تدریجی در سال ۱۹۸۴ میلادی به وسیله‌ی کوزومی<sup>۳</sup> و همکاران [۶] در آزمایشگاه ملی هوافضای ژاپن به دنبال راهی برای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت آغاز شد و در سال ۱۹۹۲ با ساخت یک پوسته FGM کروی برای نوک موشک اتمام یافت. هورگان<sup>۴</sup> و چان<sup>۵</sup> [۷] معادله‌های حاکم بر یک استوانه‌ی توخالی FGM در حالت کرنش صفحه‌ای با توزیع توانی ضریب کشسانی در راستای شعاعی به کمک معادله‌های لامه استخراج و توزیع تنش را به‌دست آوردند. توتونچو<sup>۶</sup> و ازترک<sup>۷</sup> [۸] حل دقیق مخازن تحت فشار استوانه‌ای و کروی جدار ثابت FGM را ارائه کردند. نقدآبادی و کردخیلی [۹] رابطه‌سازی اجزای محدودی برای تحلیل صفحه‌ها و پوسته‌های FGM ارائه دادند. ژیفای<sup>۸</sup> و همکاران [۱۰] با در نظر گرفتن تغییرات ضریب کشسانی به‌صورت خطی و توانی، استوانه‌ی FGM را با روش چند لایه‌ای کردن استوانه، تحلیل و با حل توتونچو [۸] مقایسه کردند. نوریک<sup>۹</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی صفحه‌ها تحت بارهای انفجاری پرداختند، آن‌ها در این آزمایش‌ها به روش‌های مختلفی مقدار تغییرمکان و همچنین ضربه وارده به صفحه را اندازه‌گیری نمودند. یوان<sup>۱۰</sup> و نوریک [۱۲] به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به مطالعه‌ی اثر بار انفجاری یکنواخت بر پاسخ صفحه‌های مربعی دارای سخت‌کننده پرداختند و بیان کردند که بدون توجه به ابعاد و آرایش سخت‌کننده، حالت تغییرشکل صفحه به صورت



شکل ۱. نمایش شماتیک ماده‌ی FGM تشکیل‌شده از دو فاز A و B [۱]  
 Fig. 1. FGM schematic consisting of two phases A and B [1].

مصلح و کاهش میزان تغییرمکان سازه‌های ورق‌گونه، پوسته‌ها تا حد امکان نازک طراحی شده و سپس با سخت‌کننده، تقویت می‌شوند. با توجه به نیازهای عملی از جمله عبور تأسیسات، امکان کنترل، بازدید و دسترسی، ایجاد بازشو در پوسته‌ها اجتناب‌ناپذیر است. وجود بازشو باعث کاهش مقاومت و به‌دنبال آن افزایش تغییرمکان پوسته می‌گردد.

امروزه توجه روز افزون به مواد هدفمند به علت کاربردهای صنعتی به‌ویژه سازه‌های اقیانوسی و فراساحلی، اجزای موشکی، صنایع هوافضا و در مواردی که استحکام بالا، چگالی کم و عدم نفوذ آب مورد توجه باشد، رو به رشد است [۲]. مواد هدفمند از جمله مواد مرکبی هستند که دارای تغییرات تدریجی و پیوسته در ترکیب، ساختار و خواص می‌باشند [۳]. از ویژگی‌های عمده‌ی این مواد می‌توان به دماهای کار بالا، شیب‌های حرارتی بسیار زیاد و تغییر خواص مطابق نظر طراح نام برد. در چند لایه‌های مرکب به علت این‌که خواص مواد در هر لایه ثابت است و در راستای ضخامت به‌صورت غیر پیوسته تغییر می‌کند، امکان وقوع شکست بین لایه‌ای وجود دارد. در حالی که امتیاز مواد هدفمند نسبت به چند لایه‌های مرکب در قابلیت تغییر خواص به‌صورت پیوسته در راستای ضخامت می‌باشد که در آن‌ها شکست بین لایه‌ای رخ نمی‌دهد [۴]. از جمله کاربردهای مواد هدفمند بکارگیری در سازه‌های جدارنازک نظیر صفحه‌ها و پوسته‌ها مانند راکتورها و توربین‌ها به علت شرایط کاری خاص مانند مجاورت با رطوبت و حرارت بالا در حین عملکرد را می‌توان نام برد [۴]. معمولاً اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مواد هدفمند از سرامیک و فلزات می‌باشند که هر کدام وظیفه‌ی مختلفی در ساختار قطعه دارند. به‌عنوان مثال

- 1 Bever
- 2 Duwez
- 3 Koizumi
- 4 Horgan
- 5 Chan
- 6 Tutuncu
- 7 Ozturk
- 8 Zhifei
- 9 Nurick
- 10 Yuen

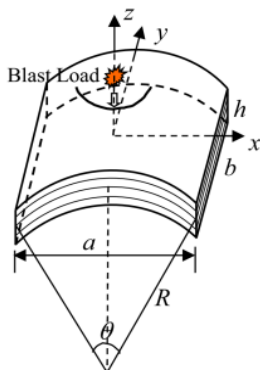
و افزایش فاصله‌ی مرکز انفجار تا صفحه، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان صفحه کاهش پیدا کرده است. از سوی دیگر، با بزرگ‌تر شدن ابعاد صفحه و افزایش مقدار ماده‌ی منفجره، بیشینه‌ی تغییرمکان صفحه افزایش یافته است. همچنین، مشاهده شد که تغییر خواص مواد در راستای ضخامت صفحه هیچ تأثیری بر روی مقیاس‌گذاری ندارد.

در این پژوهش، به ارزیابی تأثیر انواع بازشوها نظیر مربعی، دایره‌ای، مثلثی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و دوازده‌ضلعی و انواع سخت‌کننده مانند طولی و حلقوی بر روی رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های تک‌انحنایی FGM تحت بارهای انفجاری پرداخته می‌شود. برای این کار، ابتدا اثر شاخص توان حجمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، به بررسی پارامترهایی همچون نوع، درصد و موقعیت قرارگیری بازشو در پوسته پرداخته می‌شود. در پایان، در پوسته‌های دارای سخت‌کننده، نوع، تعداد، آرایش، ضخامت و ارتفاع سخت‌کننده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده می‌گردد.

## ۲- مبانی و مفاهیم پایه

سیستم مختصات کارتزین  $(x, y, z)$  پوسته‌ی FGM در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد. محور  $z$  در راستای ضخامت پوسته و رو به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شود و محور  $y$  عمود بر محور  $x$  در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد (شکل ۲). تغییرمکان پوسته در راستای ضخامت پوسته با حرف  $w$  نشان داده می‌شود.

نظریه‌ی غیرخطی پوسته‌های هدفمند با استفاده از نظریه‌ی کلاسیک تغییرشکل پوسته، توسعه یافته است [۲۰]. فرض می‌شود که پوسته‌ی هدفمند ساخته‌شده از فازهای سرامیک و فلز، دارای

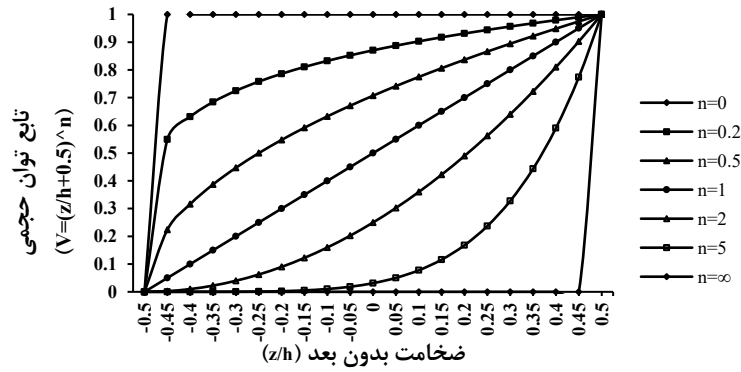


شکل ۲. هندسه و مختصات کارتزین پوسته‌ی تک‌انحنایی FGM [۱۹]

Fig. 2. Cartesian geometry and coordinates of single-curved FGM shell [19].

سه‌موی شکل می‌باشد و بیشینه‌ی تغییرمکان در مرکز صفحه اتفاق می‌افتد. خسروی و همکاران [۱۳]، رفتار دینامیکی غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چندلایه و عملکرد بازشو در این نوع پوسته‌ها در برابر بارهای انفجاری که از نوع بارهای ضربه‌ای هستند را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی قرار دادند. چلیبیر<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] به‌طور آزمایشگاهی به بررسی رفتار صفحه‌های فولادی دارای بازشو تحت اثر موج فشاری ناشی از انفجار گاز در یک مخزن پرداختند. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار صفحه با بازشو در عرشه‌ی سازه‌های دریایی و تیغه‌ی دیوار کشتی‌ها تحت اثر بارهای ضربه‌ای بود. لاورا<sup>۲</sup> و همکاران [۱۵] به تحلیل و بررسی بسامد اصلی صفحه‌های مستطیلی با بازشوهایی مربعی و دایره‌ای تحت ارتعاش آزاد پرداختند. همچنین، آن‌ها [۱۶] به تحلیل ارتعاشی صفحه‌ی مستطیلی تقویت‌شده به‌وسیله تیری با طول و زاویه جهت‌گیری دلخواه با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. ترکمن<sup>۳</sup> و مسعود اوغلو<sup>۴</sup> [۱۷]، پاسخ دینامیکی یک صفحه‌ی مرکب چندلایه‌ی دارای سخت‌کننده تحت بار انفجاری را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج اندازه‌گیری فشار انفجار بر روی صفحه نشان داد که ویژگی تغییرات فشار وابسته به فاصله از انتهای باز لوله تا صفحه‌ی هدف بوده است. همچنین، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی به دلیل وجود میرایی سازه بوده است. این تفاوت در حالت فاصله‌ی انفجار کم به‌وضوح قابل مشاهده است؛ زیرا در این حالت، صفحه با توجه به بار انفجار با سرعت بالا حرکت می‌کند. به همین دلیل میرایی سازه عامل مهمی برای محدود کردن پاسخ‌ها بوده است. جمعه‌منظری و شهابیان [۱۸]، پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی صفحه‌های هدفمند فلزی - سرامیکی تحت بارگذاری انفجار را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور، اثر شاخص توان حجمی، نسبت ابعاد صفحه، ضخامت صفحه، مقدار ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی آن تا مرکز صفحه و نیز اثر مقیاس رپلیکا<sup>۵</sup> همراه با مقیاس هوپکینسون<sup>۶</sup> را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده‌اند که با افزایش شاخص توان حجمی، افزایش ضخامت صفحه

- 1 Schleyer
- 2 Laura
- 3 Turkmen
- 4 Mecitoglu
- 5 Replica
- 6 Hopkinson



شکل ۳. تغییرات تابع شاخص توان حجمی  $(z/h+0.5)^n$

Fig. 3. Changes in the volume fraction index  $(z/h + 0.5)^n$ .

$$[E(z, T), \rho(z, T), v(z, T)] = \quad (6)$$

$$[E_{cm}(T), \rho_{cm}(T), v_{cm}(T)] \left( \frac{h+2z}{2h} \right)^n + [E_m(T), \rho_m(T), v_m(T)]$$

که در این رابطه،  $\rho_{cm} = \rho_c - \rho_m$ ،  $v_{cm} = v_c - v_m$ ،  $E_{cm} = E_c - E_m$  و  $n$  شاخص توان حجمی نامیده می‌شود که بر نحوه‌ی تغییر مواد در راستای ضخامت پوسته‌ی هدفمند دلالت دارد [۲۲].

در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل نیز هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ( $n$ ) در نظر گرفته شده است [۱۸].

در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل نیز هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ( $n$ ) در نظر گرفته شده است [۱۸].

$$n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$$

مقدار  $n = 0$  و  $n = \infty$  به ترتیب به پوسته‌ی کاملاً سرامیکی و پوسته‌ی کاملاً فلزی مربوط می‌شود. تغییرات تابع شاخص توان حجمی  $(z/h+0.5)^n$ ، در راستای ضخامت ( $h$ ) برای مقدارهای مختلف  $n$  در شکل ۳ نشان داده شده است.

انفجار یک انرژی ناگهانی، سریع و اتفاقی است که با آزادسازی مقدار زیادی گاز با سرعت و فشار بالا در زمان بسیار کوتاهی همراه است که باعث به وجود آمدن جبهه‌ای از سیال متراکم در محیط می‌شود و ممکن است با پخش و پراکنده شدن ترکش‌های انفجاری همراه باشد [۲۳]. برای تعیین مشخصات هر انفجار، نیاز به بررسی پارامترهای مختلفی از جمله اضافه فشار بیشینه<sup>۱</sup> و مدت تداوم انفجار<sup>۲</sup>

تغییری تدریجی و پیوسته از خواص مواد در راستای ضخامت خود باشد. با استفاده از قانون اختلاط، خواص مواد هم‌چون ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در سراسر ضخامت متغیر است. این تغییر خواص به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود.

$$P(z, T) = P_c(T)V_c(z) + P_m(T)V_m(z) \quad (1)$$

که در آن،  $P_c(T)$  و  $P_m(T)$  به ترتیب بیانگر خواص مواد وابسته به دمای فازهای سرامیکی و فلزی پوسته‌ی هدفمند می‌باشد و به عنوان تابعی از دما به صورت رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود [۲۱، ۲۲].

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (2)$$

در این رابطه،  $P_0, P_{-1}, P_1, P_2, P_3$  ضریب‌های دمایی مواد تشکیل دهنده هستند.  $V_m(z)$  و  $V_c(z)$  به ترتیب تابع حجمی سرامیک و فلز می‌باشند که رابطه‌ی (۳) را برآورده می‌کنند [۲۲].

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (3)$$

با توجه به رابطه‌ی (۳)، رابطه‌ی (۱) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$P(z, T) = [P_c(T) - P_m(T)]V_c(z) + P_m(T) \quad (4)$$

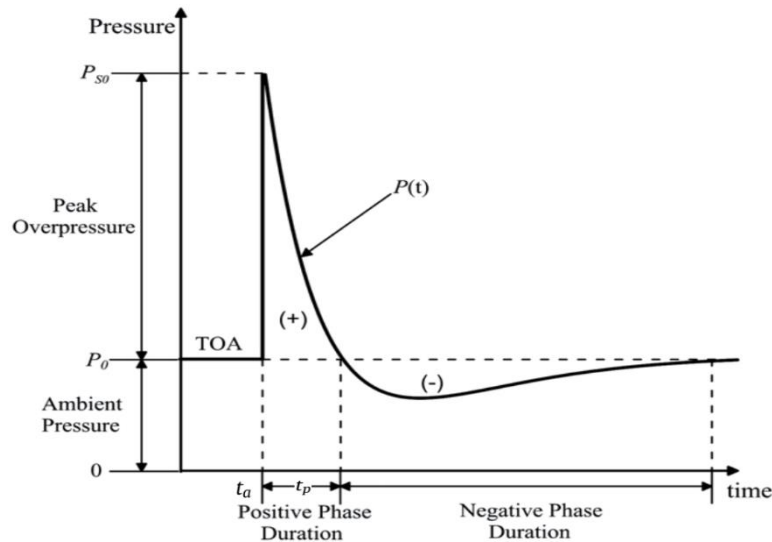
بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\begin{cases} P(z, T) = P_m(T) & \text{for } V_c(z) = 0 \\ P(z, T) = P_c(T) & \text{for } V_c(z) = 1 \end{cases}$$

درجه‌بندی دو فاز اساسی سرامیک و فلز در راستای ضخامت پوسته به صورت رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود.

1 Peak Overpressure

2 Explosion Time Duration



شکل ۴. نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری [۲۵]

Fig. 4. The time history of the pressure of an explosive wave [25].

شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها از جزء پوسته‌ای<sup>۴</sup> مثلثی سه‌گره‌ای (S3R) برای مدل‌سازی پوسته‌های تک‌انحنایی دارای بازشو (به جز بازشوی مربعی)، جزء پوسته‌ای چهاروجهی چهارگره‌ای (S4R) برای مدل‌سازی پوسته‌های دارای بازشوی مربعی و پوسته‌های دارای سخت‌کننده و نیز، برای مدل‌سازی انفجار از روش کانوپ<sup>۵</sup> استفاده گردیده است [۲۶]. بدین منظور، پوسته‌ای با ابعاد  $a = b = 1$  (شکل ۲) با رفتار دینامیکی غیرخطی و در نظر گرفتن اثر تغییرشکل‌های بزرگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ابتدا، با هدف دستیابی به شبکه‌بندی مناسب برای پوسته، ابعاد جزء تغییر داده شد تا پاسخ به یک مقدار مشخص همگرا گردد. در تمام تحلیل‌ها، مدت زمان بارگذاری ۵۰ میلی‌ثانیه انتخاب گردید. سپس، به منظور تعیین تعداد لایه‌های معادل پوسته‌ای FGM، تحلیل‌های همگرایی مانند مرجع [۲۷] انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در پوسته‌ها، شاخص توان حجمی ( $n$ )، نوع، درصد و موقعیت قرارگیری بازشو و نوع، تعداد، آرایش، ضخامت و ارتفاع سخت‌کننده‌ها بوده است.

### ۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی و روش طراحی

نوع اختلاط مواد FGM به صورت فلز - سرامیک (آلومینیوم<sup>۶</sup> - سیلیکون کاربید<sup>۷</sup>) انتخاب شده است. خواص مکانیکی این مواد نظیر

- 4 Shell
- 5 ConWep
- 6 Stainless Steel (SUS304)
- 7 Silicon Nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

می‌باشد. قسمت مثبت نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری نشان داده شده در شکل ۴ با رابطه‌ی شبه‌نمایی (۷) بیان می‌گردد.

$$P_i(t) = (P_{so} - P_0) \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) e^{-\frac{at}{t_p}} \quad (7)$$

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (8)$$

در این رابطه‌ها، مقدار اضافه فشار بیشینه‌ی انفجار،  $t_p$  زمان انفجار در فاز مثبت، ضریب افت<sup>۱</sup>  $\alpha$  یک مقدار ثابت و  $Z$  فاصله‌ی مقیاس‌شده است [۲۴].

بر اساس رابطه‌ی هوپکینسون - کرانز<sup>۲</sup> فاصله‌ی مقیاس‌شده به صورت رابطه‌ی (۹) بیان می‌شود.

$$Z = \frac{D}{\sqrt[3]{M}} \quad (9)$$

در این رابطه،  $D$  فاصله‌ی مرکز انفجار تا نقطه‌ی مورد نظر بر حسب متر و  $M$  جرم ماده‌ی منفجره بر حسب کیلوگرم است [۲۴].

### ۳-۲ مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر، برای تحلیل پوسته‌های ساخته‌شده از مواد هدفمند تحت انفجار در نرم‌افزار آباکوس از روش صریح<sup>۳</sup> استفاده

- 1 decay
- 2 Hopkinson-Cranz
- 3 Explicit

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد FGM [۲۸]

Table 1. Mechanical properties of FGM [28].

نسبت پواسون	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	ضریب کشسانی (GPa)	خواص مواد
۰/۳۳	۲۷۰۲	۶۷	آلومینیوم (فلز)
۰/۱۷	۳۱۰۰	۳۰۲	سیلیکون کاربید (سرامیک)

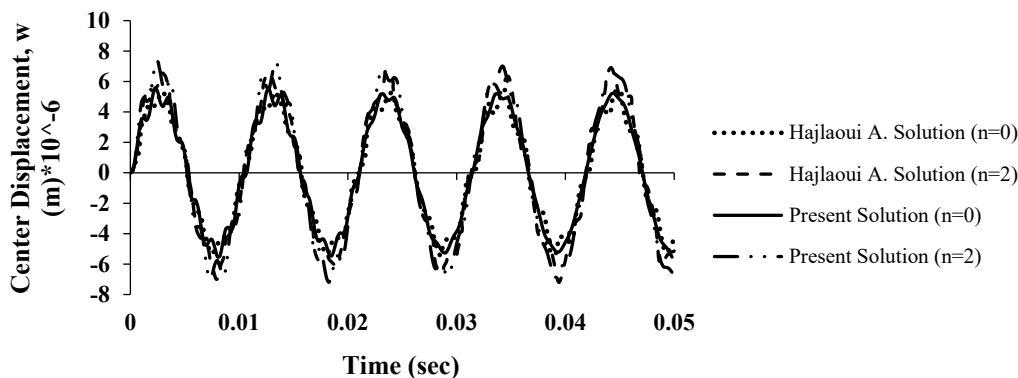
جدول ۲. خواص مکانیکی پوسته FGM [۲۹]

Table 2. Mechanical properties of FGM shell [29].

نسبت پواسون	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	ضریب کشسانی (GPa)	نوع مواد
۰/۲۹۸۱	۴۴۲۹	۱۰۵/۶۹۶۰	تیتانیوم <sup>۱</sup> (فلز)
۰/۲۹۸	۵۷۰۰	۱۵۴/۳۲۱۱	زیرکونیا <sup>۲</sup> (سرامیک)

<sup>1</sup> Titanium (Ti-6Al-4V)

<sup>2</sup> Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )



شکل ۵. مقایسه ی بین تاریخچه ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته ی FGM حاصل از نرم افزار آباکوس و مرجع [۲۹]

Fig. 5. Comparison between time history of center displacement of FGM shell by Abaqus and reference [29].

همکاران [۲۹] و نیوبرگر<sup>۲</sup> و همکاران [۳۰] استفاده شده است. حاج لویی و همکاران به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته های استوانه ای FGM تحت فشار یکنواخت  $q(t)=1500\sin(600t)$  پرداختند. این پوسته با ابعاد  $R/h=500$ ،  $L/R=80$  (که  $R$  شعاع،  $h$  ضخامت و  $L$  طول پوسته می باشد) و دارای تکیه گاه ساده با دو شاخص توان حجمی ( $n=0, 2$ ) در ۱۰ لایه مدل سازی گردید. خواص مکانیکی مواد در جدول ۲ آورده شده است. نتایج عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس راستی آزمایی شد. در شکل ۵ تاریخچه ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته و در جدول ۳ بیشینه ی تغییر مکان مرکز پوسته برای دو مقدار توان حجمی نشان داده شده است. همان طور

ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در جدول ۱ آورده شده است [۲۸]. رویه های بالا و پایین پوسته ها به ترتیب سرامیک و فلز می باشند. نحوه ی توزیع خواص مکانیکی مواد در راستای ضخامت پوسته بر اساس رابطه ی توزیع قانون توانی (رابطه ی (۶)) صورت گرفته است.

### ۳-۲- راستی آزمایی

به منظور راستی آزمایی نحوه ی مدل سازی پوسته ی FGM و موج انفجاری، از نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط حاج لویی<sup>۱</sup> و

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۲۹]

Table 3. Comparison of modeling results with Abaqus and reference [29].

شاخص توان حجمی	نرم‌افزار آباکوس	مرجع [۲۹]	درصد خطا (%)
۰	-۵/۵۱۸	-۵/۴۵۸	۱/۰۹
۲	-۷/۱۹۳	-۷/۲۰۴	۰/۱۵

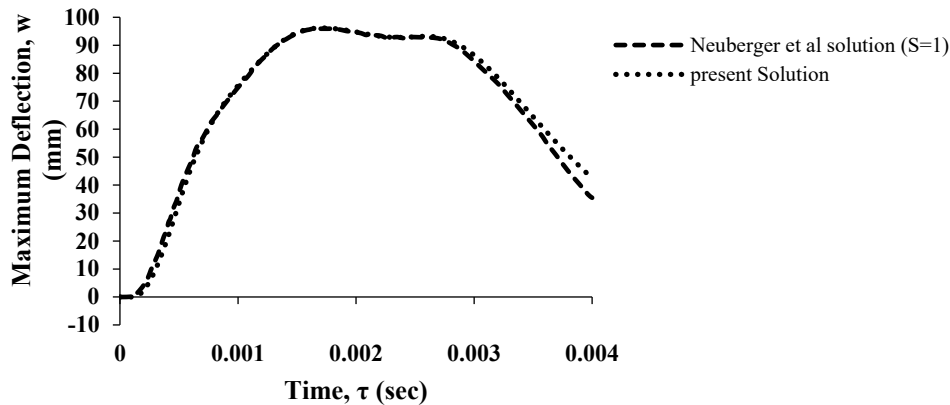
بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته (mm)

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۳۰]

Table 4. Comparison of modeling results with Abaqus and reference [30].

نرم‌افزار آباکوس	مرجع [۳۰]	درصد خطا (%)
۹۶/۱۷۳	۹۵/۹۰۹	۰/۲۷۴

بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه (mm)



شکل ۶. مقایسه‌ی بین تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان مرکز صفحه‌ی دایره‌ای شکل حاصل از نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۳۰]

Fig. 6. Comparison between the time history-displacement of the circular plate obtained from Abaqus and reference [30].

تغییرمکان مرکز صفحه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مرجع مورد نظر می‌باشد. در تحلیل‌های آزمایشگاهی [۳۰]، پارامترهای هندسی و جرم ماده‌ی TNT برای سه ضریب مقیاس (S) ۱، ۲ و ۴ به‌صورت جدول ۵ بود.

نتایج آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صحت‌سنجی گردید. در جدول ۶ بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز صفحه مربوط به مدل‌سازی با آباکوس و آزمایش نشان داده شده است. در این جدول،  $w$  تغییرمکان و  $h$  ضخامت صفحه است. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج مدل‌سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقدارهای ثبت‌شده در آزمایش می‌باشد.

که دیده می‌شود، نتایج مدل‌سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقدارهای گزارش شده حاصل از مرجع [۲۹] است. نیوبرگر و همکاران به تحلیل صفحه‌های دایره‌ای شکل با شرط مرزی گیردار تحت بارگذاری انفجار پرداختند. پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی مواد استفاده شده در تحلیل به شرح زیر بود.

$$E = 210 \text{ GPa}, \quad \rho = 7850 \text{ kg/m}^3, \quad \nu = 0.28, \\ \sigma = 1000 \text{ MPa}, \quad F = 2 \text{ GPa}$$

در مرجع [۳۰] برای ضریب مقیاس  $S = 1$ ، ضخامت و قطر صفحه به‌ترتیب برابر با ۵۰ و ۲۰۰۰ میلی‌متر، فاصله‌ی مرکز انفجار تا مرکز صفحه ۵۰۰ میلی‌متر و جرم ماده‌ی TNT برابر با ۵۰ کیلوگرم بود. در پژوهش حاضر، نتایج با استفاده از نرم‌افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد. در جدول ۴ بیشینه‌ی تغییرمکان و در شکل ۶ تاریخچه‌ی زمانی

جدول ۵. پارامترهای هندسی و جرم ماده‌ی TNT [۳۰]

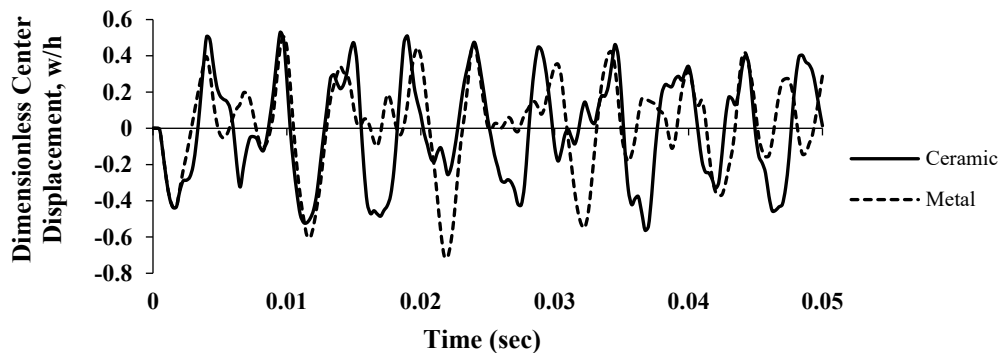
Table 5. Geometric parameters and mass of TNT material [30].

S	ضخامت صفحه‌ی دایره‌ای (mm)	قطر صفحه‌ی دایره‌ای (mm)	فاصله‌ی مرکز انفجار تا صفحه (mm)	جرم ماده‌ی TNT (kg)
۱	۴۰	۲۰۰۰	۴۰۰	۳۰
۲	۲۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۳/۷۵
۴	۱۰	۵۰۰	۱۰۰	۰/۴۶۸

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و آزمایش [۳۰] برای سه ضریب مقیاس ۱، ۲ و ۴

Table 6. Comparison of modeling results with Abaqus and experiments, for three scale coefficients 1, 2 and 4 [30].

S	نرم‌افزار آباکوس	آزمایش [۳۰]	درصد خطا (%)
۱	۲/۷	۲/۷	۰
۲	۲/۷۰۹	۲/۷	-۰/۳۳۲
۴	۲/۶۹۷	۲/۶	-۳/۶



شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته‌های FGM تحت بار انفجاری ۲۰ گرم TNT ( $d=500$  mm)

Fig. 7. Time history of displacement of the center of FGM shells under the explosive load of 20 gr of TNT ( $d=500$  mm).

### ۳-۴- تعیین تعداد لایه‌های پوسته‌ی FGM

به منظور تعیین تعداد لایه‌های معادل پوسته‌ی FGM (N)، چندین تحلیل همگرایی برای پوسته‌ی FGM (شکل ۲) با  $R/a=4$  شاخص توان حجمی ۱، ضخامت ۶ میلی‌متر، اندازه‌ی شبکه‌بندی  $20 \times 20$  میلی‌متر با زمان تحلیل  $(t_p)$  ۱۰ میلی‌ثانیه تحت بار انفجار با اضافه فشار بیشینه‌ی  $50 (p_0)$  کیلوپاسکال به صورت رابطه‌ی (۱۰) انجام گردید [۱۸].

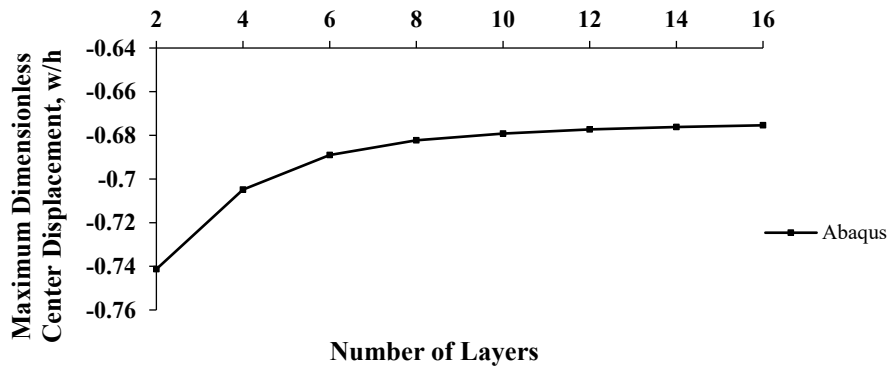
$$P(x, y, t) = P_0 P_t(t) P_s(x, y) \quad (10)$$

که در آن شدت بار انفجار در حوزه‌ی مکان و زمان به ترتیب به صورت رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) بوده است.

### ۳-۳- نحوه‌ی اعمال بار ناشی از انفجار

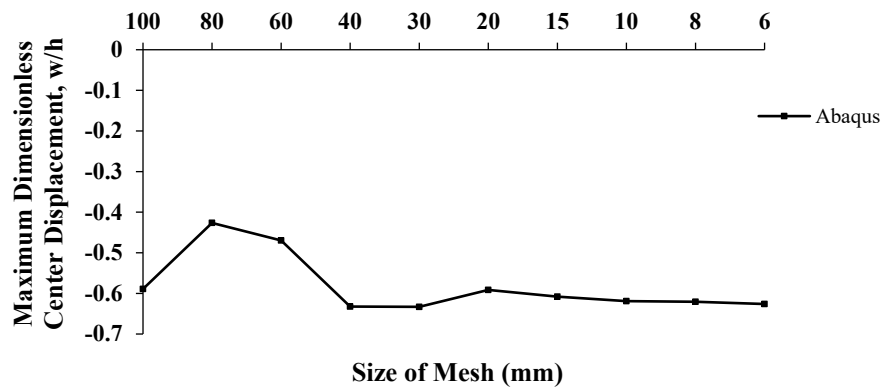
رویه‌های بالا و پایین پوسته‌ی FGM (شکل ۲) به ترتیب سرامیک و فلز می‌باشند. در این بررسی، پوسته‌ای با انحنای  $0/25$  (شعاع ۴ متر) تحت اثر بار ناشی از انفجار معادل ۲۰ گرم ماده‌ی منفجره قرار گرفت که دارای چهار لایه‌ی پیوسته با شاخص توان حجمی یک ( $n=1$ ) بوده است. پس از بررسی نتایج تحلیل‌ها (شکل ۷) مشخص گردید، هنگامی که بار انفجاری از طرف رویه‌ی سرامیکی وارد شده است، پوسته‌ی FGM دارای عملکرد بهتری نسبت به حالتی که بار انفجاری از طرف رویه‌ی فلزی وارد گردید، بوده است. از این رو در فرآیند تحلیل‌ها، بار انفجاری از طرف رویه‌ی سرامیکی اعمال گردیده است.





شکل ۸. تعیین تعداد لایه های معادل پوسته ی FGM

Fig. 8. Determine the number of layers equivalent to the FGM shell.



شکل ۹. مقایسه ی اندازه ی ابعاد جزء در شبکه بندی های مختلف

Fig. 9. Comparison of component size in different meshes.

متر)، ضخامت ۶ میلی متر، شاخص توان حجمی ( $n$ ) برابر ۱ و شرط مرزی ساده تحت بار انفجاری ۲۰ گرم، ابعاد جزء تغییر داده شد تا پاسخ به یک مقدار مشخص همگرا گردد. پس از بررسی اندازه ی شبکه بندی های مختلف (شکل ۹) از نوع Structured، جزء های  $10 \times 10$  میلی متری به عنوان حالت مناسب انتخاب شد. شکل ۱۰ هندسه و نحوه ی شبکه بندی پوسته را نشان می دهد.

#### ۴- بررسی اثر شاخص توان حجمی ( $n$ )

به منظور بررسی اثر شاخص توان حجمی، پوسته ی FGM با هفت توان حجمی ( $n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$ ) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. پوسته ها با انحنای  $0.1667$  (شعاع ۶ متر) و ضخامت ۶ میلی متر در معرض بار ناشی از انفجار ۲۰ گرم TNT در فاصله ی ۵۰۰ میلی متری از پوسته، مدل سازی شدند. تاریخچه ی

$$P_s(x, y) = 1.0 \quad (11)$$

$$\text{Step load: } \begin{cases} P_t(t) = 1, & t \leq t_p \\ = 0, & t > t_p \end{cases} \quad (12)$$

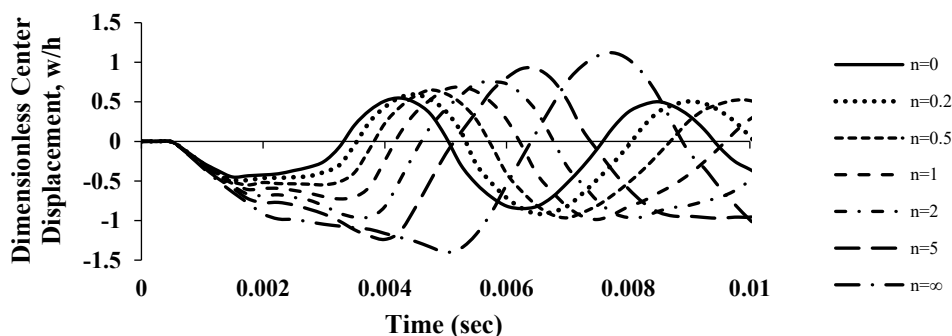
پس از بررسی بیشینه ی تغییر مکان مرکز پوسته، در تحلیل پوسته های هدفمند از ۱۴ لایه ی معادل به عنوان حالت مناسب استفاده شد. نتایج تحلیل های همگرایی برای ماده ی FGM در شکل ۸ نشان داده شده است.

#### ۵-۳- نحوه ی شبکه بندی پوسته ی FGM

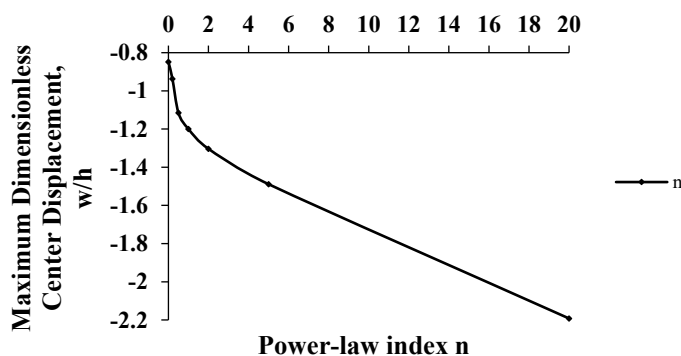
به منظور شبکه بندی پوسته، از جزء هایی با ابعاد مختلف استفاده شد و تأثیر اندازه ی شبکه بندی پوسته مورد بررسی قرار گرفت. از این رو، در پوسته ی تک انحنایی FGM با انحنای  $0.25$  (شعاع ۴



شکل ۱۰. هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی پوسته‌ی FGM  
Fig. 10. Geometry and meshing of FGM shell.



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته‌ی FGM با شاخص‌های توان حجمی مختلف  
Fig. 11. Time history-displacement of the center with different volume fraction index.



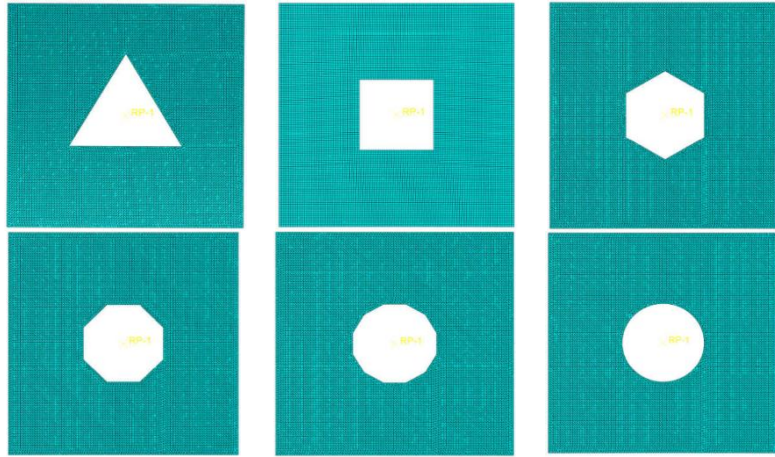
شکل ۱۲. بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی FGM بر حسب شاخص توان حجمی (n)  
Fig. 12. Maximum dimensionless displacement of the FGM shell center based on the different volume fraction index.

شکل ۱۲ اثر شاخص توان حجمی بر روی بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز پوسته ارائه شده است. برای بدون بعد کردن پاسخها، مقدار تغییر مکان ( $w$ ) بر ضخامت ( $h$ ) پوسته تقسیم شده است.

#### ۵- پوسته‌ی FGM دارای بازشو

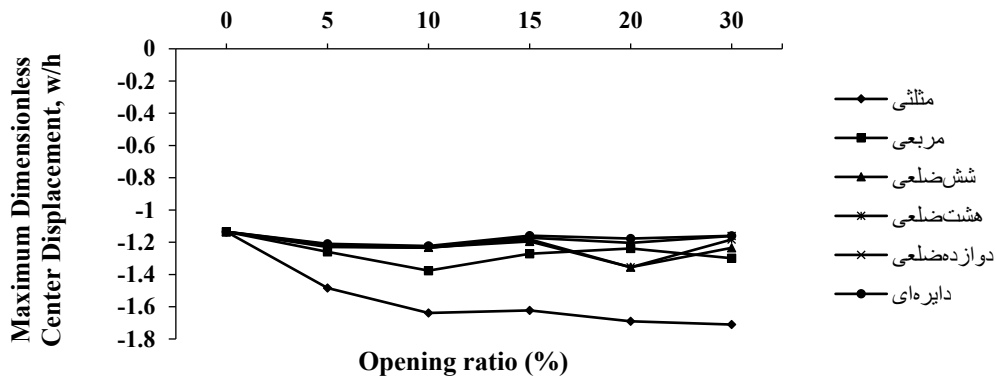
به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی پوسته‌های هدفمند دارای بازشو، پوسته‌ی تک‌انحنایی FGM با شاخص توان حجمی ( $n$ ) برابر ۱ تحت بار انفجاری ۲۰ گرم ماده‌ی TNT با فاصله‌ی

زمانی تغییر مکان مرکز پوسته در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شاخص توان حجمی، دامنه‌ی نوسان‌ها و تعداد نقاط اوج تغییر مکان به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. همچنین، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان در مرکز پوسته با ۲ (از ۱ به ۲) و ۵ (از ۱ به ۵) برابر کردن شاخص توان حجمی به ترتیب ۱۴/۸۵٪ و ۳۱/۱۶٪ افزایش یافته است، به طوری که بیشینه‌ی تغییر مکان در پوسته‌ی تمام فلزی ( $n = \infty$ ) و کمینه‌ی تغییر مکان در پوسته‌ی تمام سرامیکی ( $n = 0$ ) اتفاق افتاده است. در



شکل ۱۳. نمایش هندسه و شبکه‌بندی پوسته‌ی FGM با بازشوهای مختلف (OR=10%)

Fig. 13. Display geometry and meshing of FGM shell with different openings (OR = 10%).



شکل ۱۴. بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی FGM با بازشوهای مختلف

Fig. 14. Maximum dimensionless displacement of the FGM shell center with different openings.

#### ۱-۵- اثر درصد و نوع بازشوهای متمرکز

در صورتی که مرکز سطح بازشوها بر روی مرکز سطح پوسته باشد، حداکثر نسبت بازشوی ایجاد شده بر روی پوسته برای بازشوها به شکل‌های مثلثی، شش ضلعی، دایره‌ای، دوازده ضلعی، هشت ضلعی و مربعی به ترتیب ۳۲٪، ۶۵٪، ۷۸٪، ۸۰٪، ۹۷٪ و ۱۰۰٪ می‌باشد. بنابراین، به منظور بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای هدفمند دارای بازشو، درصد بازشوهای متفاوتی از صفر تا ۳۰ برای این بازشوها انتخاب شده است (شکل ۱۳).

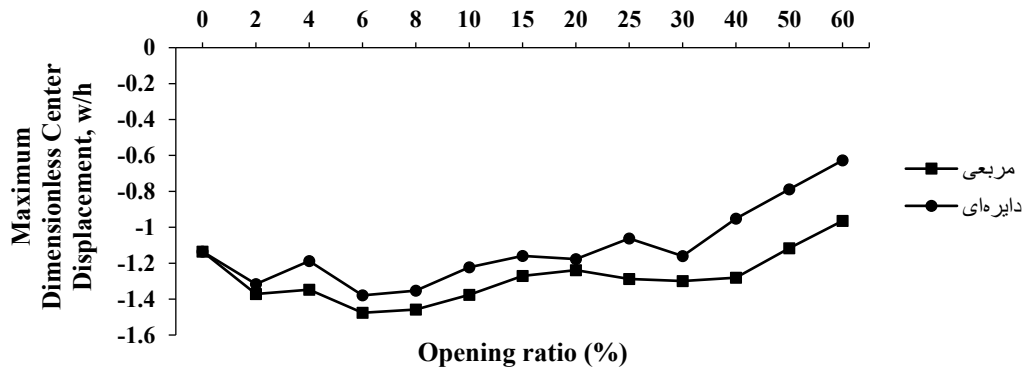
همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی تغییرمکان با افزایش تعداد ضلع در شکل بازشوها کاهش می‌یابد که میزان کاهش در بازشوهایی که به شکل چندضلعی منظم با ضلع‌های بیش‌تر می‌باشند، کم‌تر است. به‌عنوان نمونه برای ۱۰ درصد بازشو با تبدیل شکل بازشو از مثلثی به مربعی، مربعی به شش ضلعی، شش ضلعی به

۵۰۰ میلی‌متری از مرکز پوسته تجزیه و تحلیل گردیده است. برای درک بهتر رفتار پوسته‌های هدفمند دارای بازشو، نوع بازشو (OT)، درصد بازشو (OR) و تعداد بازشو (ON<sup>3</sup>) مورد توجه قرار گرفته است. درصد بازشو بر اساس نسبت مساحت بازشو به مساحت پوسته (رابطه‌ی (۱۳))، مقدارهای ۰ تا ۳۰ درصد انتخاب شده است.

$$OR = \frac{A_{opening}}{A_{shell}} \times 100 \quad (13)$$

در این رابطه،  $A_{opening}$  مساحت بازشو و  $A_{shell}$  مساحت پوسته می‌باشد.

- 
- 1 Opening Type
  - 2 Opening Ratio
  - 3 Opening Number



شکل ۱۵. رابطه ی بیشینه ی تغییر مکان پوسته ی FGM با درصد بازشوی دایره ای و مربعی با تکیه‌گاه ساده

Fig. 15. relation of between Maximum displacement FGM shell and percentage of circular and square opening with simple support.

شکل‌های ۲۱ تا ۲۵ با تعداد فرد می‌باشند. با افزودن یک عدد بازشو در مرکز پوسته، سختی پوسته کاهش می‌یابد که موجب افزایش بیشینه ی تغییر مکان می‌شود؛ اما افزایش تعداد بازشو در دو طرف پوسته همانند شکل‌های ۱۶ تا ۲۰ موجب کاهش سطح بارگیر پوسته شده که باعث کاهش بیشینه ی تغییر مکان می‌گردد. به‌عنوان نمونه، اگر پوسته با دو عدد بازشوی ۱۰٪ (شکل ۱۶) به پوسته‌هایی با سه عدد بازشوی ۶٫۶۷٪ (شکل ۲۱) و چهار عدد بازشوی ۵٪ (شکل ۱۷) تبدیل گردد، بیشینه ی تغییر مکان به ترتیب ۷/۱۶٪ افزایش و ۱۳/۹۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین، بازشوی گسترده با تعداد پایین دارای بیشینه ی تغییر مکان بیش‌تری نسبت به بازشوی متمرکز هستند؛ اما افزایش تعداد بازشو گسترده موجب کاهش بیشینه ی تغییر مکان می‌شود. به‌عنوان مثال، با افزایش تعداد بازشوی گسترده از ۴ به ۶ و از ۵ به ۷ به ترتیب ۲/۷۲٪ و ۱/۶۳٪ کاهش رخ می‌دهد، به‌طوری‌که از تعدادی مشخص به بعد بیشینه ی تغییر مکان در بازشوی گسترده کم‌تر از بیشینه ی تغییر مکان در بازشوی متمرکز می‌شود که این تعداد در بازشوی گسترده با تعداد زوج (شکل‌های ۱۶ تا ۲۰) کم‌تر از بازشوی گسترده با تعداد فرد (شکل‌های ۲۱ تا ۲۵) می‌باشد.

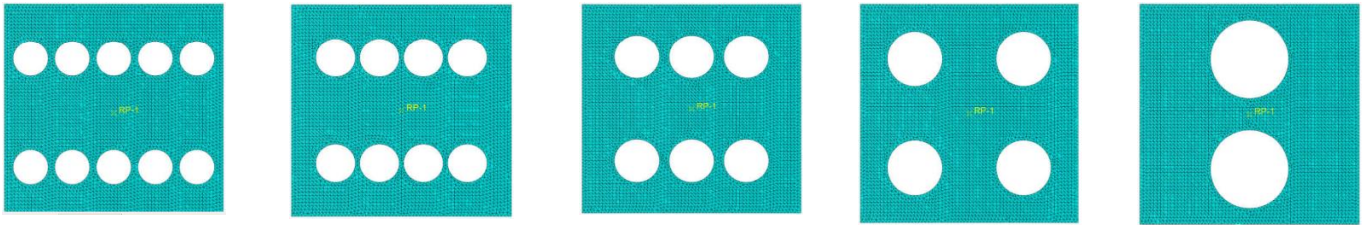
به منظور درک بهتر از بیشینه ی تغییر مکان ایجاد شده در پوسته‌های دارای بازشوی متمرکز و گسترده (۲۰ درصد بازشو)، از شکل‌های ۲۶-الف تا ج) استفاده شده است که در وسط پوسته، تغییر مکان پوسته به حداکثر اندازه ی خود رسیده است. همان‌طور که در شکل ۲۶-الف و ۲۶-ب مشاهده می‌شود در صورتی که درصدی از بازشو در مرکز پوسته قرار گیرد، بیشینه ی تغییر مکان در لبه ی بازشو رخ داده است اما اگر همانند شکل ۲۶-ج بازشوی در مرکز پوسته

هشت‌ضلعی و هشت‌ضلعی به دوازده‌ضلعی، بیشینه ی تغییر مکان به ترتیب ۱۶/۰۴٪، ۱۰/۴۸٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۱۱٪ کاهش می‌یابد.

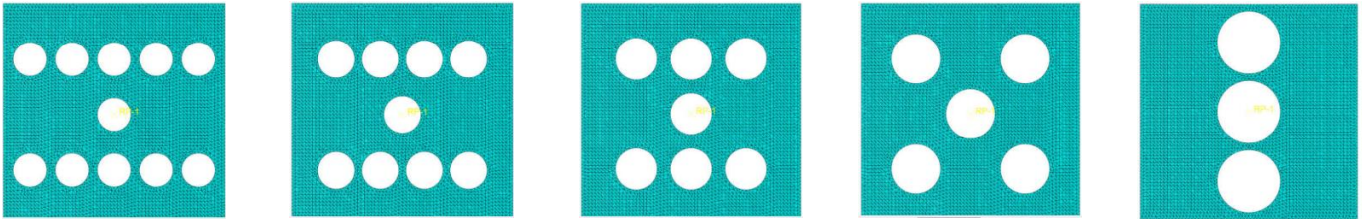
به‌منظور آگاهی بیش‌تر از اثر درصد بازشوها بر روی پوسته‌های تک‌انحنایی هدفمند، درصد بازشوی متنوعی از صفر تا ۶۰ درصد برای بازشوی مربعی و دایره‌ای مورد ارزیابی قرار داده شده است. در شکل ۱۳ هندسه و نحوه ی شبکه‌بندی پوسته‌های دارای بازشو مشاهده می‌شود. مقدار بیشینه ی تغییر مکان بازشوی مرکزی برای بازشوی دایره‌ای بر روی محیط دایره و برای بازشوی مربعی در وسط ضلع مربع گزارش شده است. در شکل ۱۵ رابطه ی بیشینه ی تغییر مکان پوسته با درصد بازشوی مختلف با شرط مرزی ساده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه ی تغییر مکان در پوسته با بازشوی دایره‌ای همواره کم‌تر از بازشوی مربعی می‌باشد. همچنین، ایجاد ۸ درصد بازشوی مربعی یا دایره‌ای در پوسته باعث می‌شود تا بیشینه ی تغییر مکان، به بیش‌ترین مقدار خود برسد. اما در ادامه با افزایش درصد بازشو، بیشینه ی تغییر مکان کم‌تر شده که از بازشوی ۴۰٪ به بالا دارای شیبی تقریباً یکنواخت می‌باشد.

## ۲-۵- بازشوی گسترده

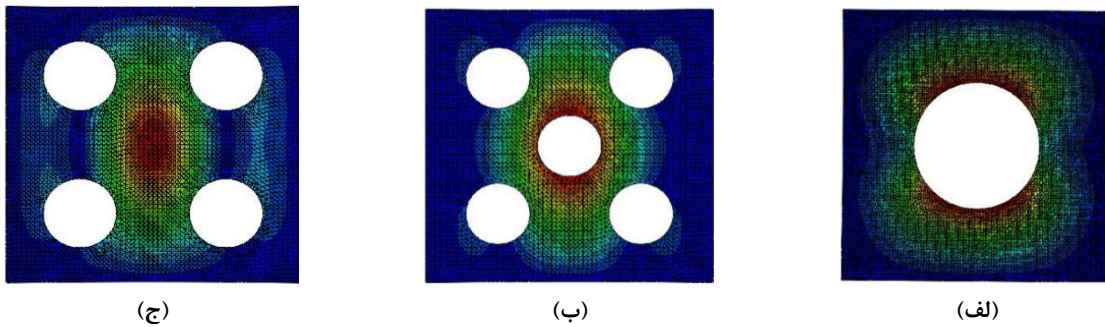
به‌منظور ارزیابی پوسته‌های تک‌انحنایی هدفمند دارای بازشوی گسترده، ۲۰ درصد بازشو به‌صورت گسترده بر روی سطح پوسته ایجاد شده است. بدین منظور ۱۰ مدل بازشوی گسترده (شکل‌های ۱۶ تا ۲۵) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود، بازشوی شکل‌های ۱۶ تا ۲۰ که با تعداد زوج هستند دارای بیشینه ی تغییر مکان کم‌تری نسبت به بازشوی



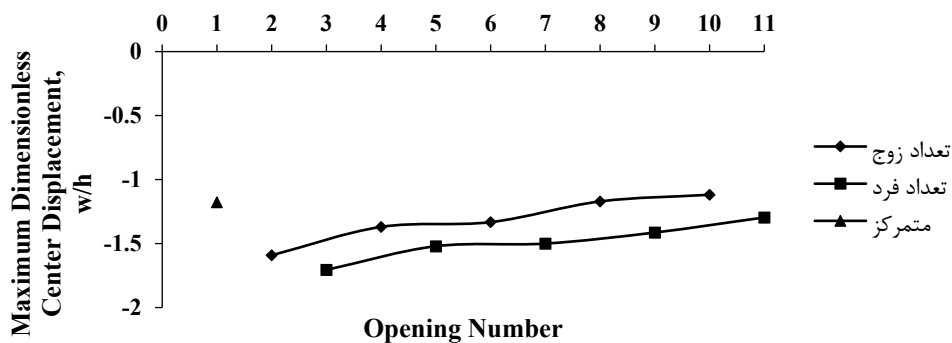
شکل ۲۰. ۱۰ بازشوی ۲٪ شکل ۱۹. ۸ بازشوی ۲.۵٪ شکل ۱۸. ۶ بازشوی ۳.۳۳٪ شکل ۱۷. ۴ بازشوی ۵٪ شکل ۱۶. ۲ بازشوی ۱۰٪  
 Fig. 20. 10 openings 2%. Fig. 19. 8 openings 2.5%. Fig. 18. 6 openings 3.33%. Fig. 17. 4 openings 5%. Fig. 16. 2 openings 10%.



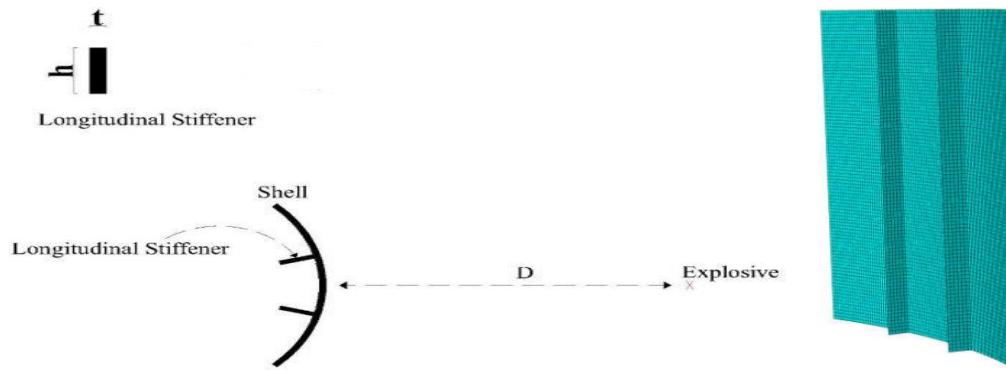
شکل ۲۵. ۱۱ بازشوی ۱.۸۲٪ شکل ۲۴. ۹ بازشوی ۲.۲۲٪ شکل ۲۳. ۷ بازشوی ۲.۸۵٪ شکل ۲۲. ۵ بازشوی ۴٪ شکل ۲۱. ۳ بازشوی ۶.۶۷٪  
 Fig. 25. 11 openings 1.82%. Fig. 24. 9 openings 2.22%. Fig. 23. 7 openings 2.85%. Fig. 22. 5 openings 4%. Fig. 21. 3 openings 6.67%.



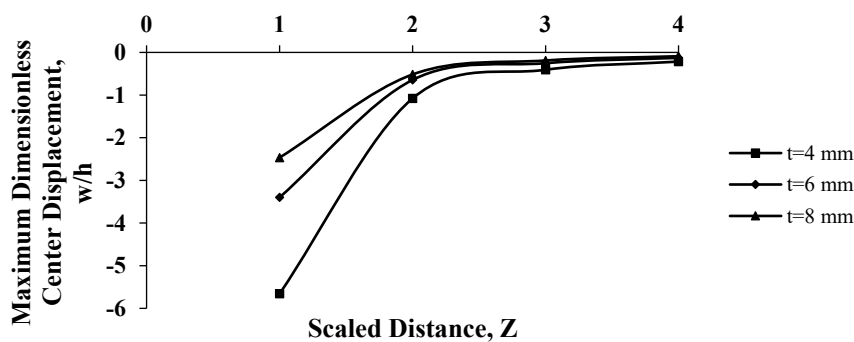
شکل ۲۶. کانتورهای تغییر مکان پوسته با ۲۰ درصد بازشو به صورت بازشو متمرکز (الف)، پنج بازشوی گسترده (ب) و چهار بازشوی گسترده (ج)  
 Fig. 26. Shell displacement contours with 20% opening in the form of (a) single opening, (b) five openings and (c) four openings.



شکل ۲۷. رابطه ی بیشینه ی تغییر مکان پوسته ی FGM با ۲۰ درصد بازشوی گسترده و متمرکز  
 Fig. 27. Maximum displacement FGM shell with 20% single opening and multiple opening.



شکل ۲۸. هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی طولی  
 Fig. 28. Geometry and meshing of FGM shell with longitudinal stiffener.



شکل ۲۹. رابطه‌ی بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی طولی با ضخامت سخت‌کننده و فاصله‌ی مقیاس‌شده  
 Fig. 29. Maximum displacement of FGM shell with longitudinal stiffener for stiffener thickness and scaled distance.

نباشد، بیشینه‌ی تغییر مکان در مرکز پوسته رخ می‌دهد.

قرار گرفته شده است. این سخت‌کننده‌ها با ضخامت ۲، ۴، ۶ میلی‌متر، با طولی برابر طول پوسته و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر با فاصله‌های مقیاس‌شده‌ی ۱، ۲، ۳ و ۴ (تحت انفجار با فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متر و مواد منفجره به جرم‌های ۱۲۵، ۱۵/۶۲۵، ۴/۶۳ و ۱/۹۵ گرم) مدل‌سازی شده است. پوسته و موقعیت سخت‌کننده‌های طولی در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار ضخامت و فاصله‌ی مقیاس‌شده، بیشینه‌ی تغییر مکان کاهش یافته است، به طوری که با فاصله‌ی مقیاس‌شده‌ی ۲، افزایش ضخامت از ۴ به ۶ و ۶ به ۸ میلی‌متر، بیشینه‌ی تغییر مکان به ترتیب ۱۰/۳۱٪ و ۶/۷۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین، در ضخامت ۶ میلی‌متر، با افزایش فاصله‌ی مقیاس‌شده از ۱ به ۲، ۲ به ۳ و ۳ به ۴ به ترتیب بیشینه‌ی تغییر مکان ۸۱/۰۲٪، ۶۰/۸۶٪ و ۴۹/۸۴٪ کاهش می‌یابد.

## ۶- پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده

در برخی شرایط امکان بهینه‌سازی پوسته از طریق تغییر ابعاد هندسی و تعداد لایه وجود ندارد. در این حالت می‌توان برای تقویت پوسته از سخت‌کننده استفاده کرد. در این بخش به بررسی نقش و اثر تغییر ابعاد هندسی سخت‌کننده بر پوسته‌های استوانه‌ای هدفمند تحت اثر بار انفجاری پرداخته شده است. برای این کار دو نوع سخت‌کننده‌ی طولی و حلقوی مورد توجه قرار گرفته است. سخت‌کننده‌ی طولی به‌طور سراسری در طول پوسته و سخت‌کننده‌ی حلقوی به‌صورت شعاعی در داخل پوسته قرار می‌گیرد. این سخت‌کننده‌ها از جنس فلز می‌باشند و به دلیل اجرایی در سطح داخلی پوسته تعبیه شده است.

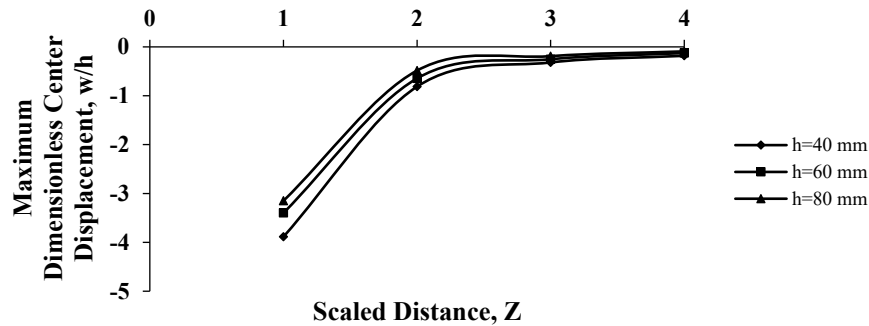
### ۶-۱- سخت‌کننده‌ی طولی

#### ۶-۱-۱- اثر ضخامت سخت‌کننده‌ی طولی

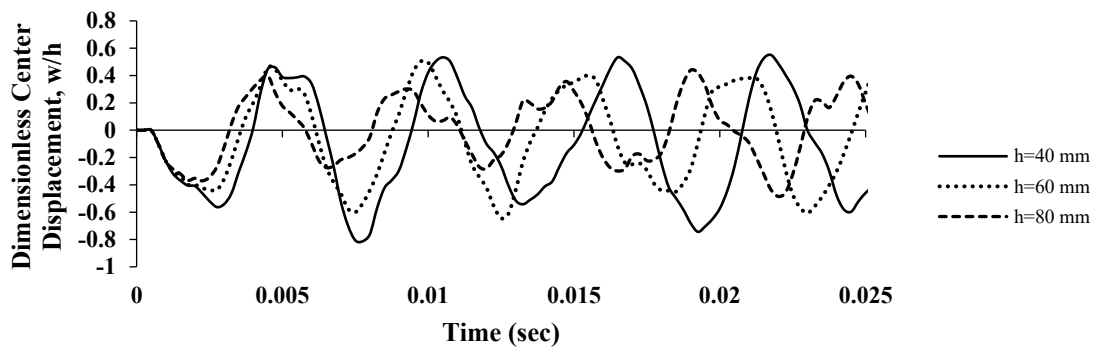
در این بخش پوسته‌های دارای سخت‌کننده طولی مورد بررسی

#### ۶-۱-۲- اثر ارتفاع سخت‌کننده‌ی طولی

به‌منظور بررسی اثر ارتفاع سخت‌کننده‌های طولی، پوسته‌هایی با



شکل ۳۰. رابطه ی بیشینه ی تغییر مکان پوسته ی FGM دارای سخت کننده ی طولی با ارتفاع سخت کننده و فاصله ی مقیاس شده  
 Fig. 30. Maximum displacement of FGM shell with longitudinal stiffener for stiffener height and scaled distance.



شکل ۳۱. تاریخچه ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته ی FGM دارای سخت کننده ی طولی برای ارتفاع های مختلف سخت کننده با  $Z=2$   
 Fig. 31. Time history of displacement FGM shell with longitudinal stiffener for different stiffener heights with  $Z = 2$ .

فاصله های مقیاس شده ی ۱، ۲، ۳، ۴ (تحت انفجار با فاصله ی ۵۰۰ میلی متر و مواد منفجره به جرم های ۱۲۵، ۱۵/۶۲۵، ۴/۶۳ و ۱/۹۵ گرم) مورد بررسی قرار گرفته است. پوسته و موقعیت سخت کننده های حلقوی در شکل ۳۲ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۳۳ مشاهده می شود با افزایش مقدار ضخامت و فاصله ی مقیاس شده، بیشینه ی تغییر مکان کاهش می یابد، به طوری که با فاصله ی مقیاس شده برابر ۲، افزایش ضخامت از ۴ به ۶ و ۶ به ۸ میلی متر، بیشینه ی تغییر مکان به ترتیب ۲/۹۵٪ و ۵/۱۳٪ کاهش یافته است. همچنین در ضخامت ۶ میلی متر، با افزایش فاصله ی مقیاس شده از ۱ به ۲، ۲ به ۳ و ۳ به ۴ بیشینه ی تغییر مکان به ترتیب ۷۶/۵۴٪، ۵۷/۴۹٪ و ۳۸/۳۷٪ کاهش پیدا کرده است.

#### ۶-۲-۲- اثر ارتفاع سخت کننده ی حلقوی

به منظور بررسی اثر ارتفاع سخت کننده های حلقوی، پوسته هایی با سخت کننده هایی به ضخامت ۶ میلی متر، با طولی برابر طول پوسته و

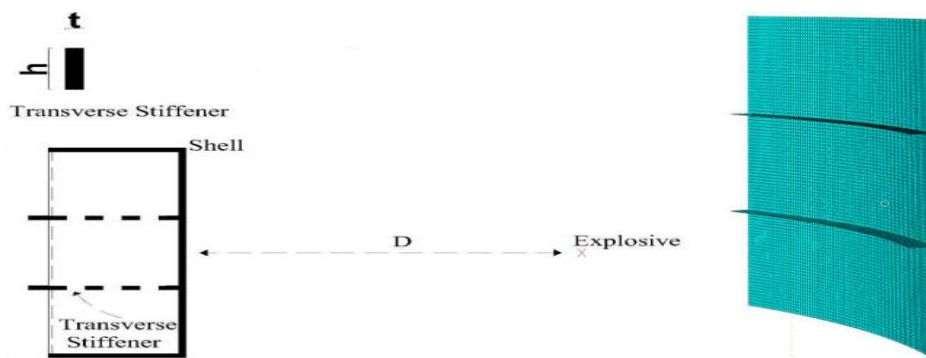
سخت کننده هایی به ضخامت ۶ میلی متر، با طولی برابر طول پوسته و ارتفاع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر با فاصله های مقیاس شده ی ۱، ۲، ۳ و ۴ (تحت انفجار با فاصله ی ۵۰۰ میلی متر و مواد منفجره به جرم های ۱۲۵، ۱۵/۶۲۵، ۴/۶۳ و ۱/۹۵ گرم) مدل سازی شده است.

همان طور که در شکل ۳۰ مشاهده می شود با افزایش مقدار ارتفاع و فاصله ی مقیاس شده، بیشینه ی تغییر مکان کاهش می یابد، به طوری که با فاصله ی مقیاس شده برابر ۲، افزایش ارتفاع از ۴۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۸۰ میلی متر، بیشینه ی تغییر مکان به ترتیب ۲۰/۶۷٪ و ۲۴/۹۲٪ کاهش یافته است. همچنین، در شکل ۳۱ مشاهده می گردد با افزایش ارتفاع سخت کننده، دامنه ی نوسان ها و نقاط اوج نمودار به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرده است.

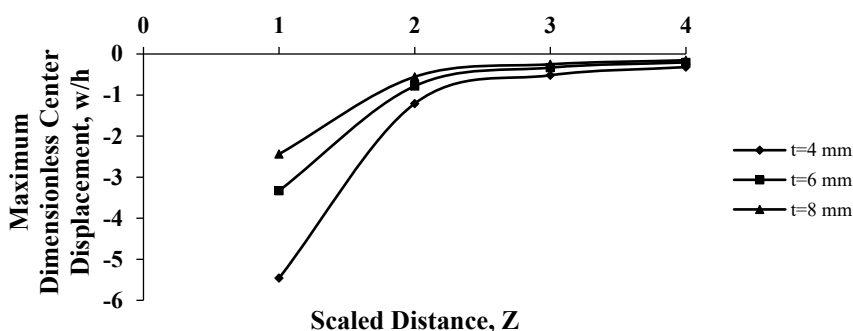
#### ۶-۲-۲-۲- سخت کننده ی حلقوی

##### ۶-۲-۲-۱- اثر ضخامت سخت کننده ی حلقوی

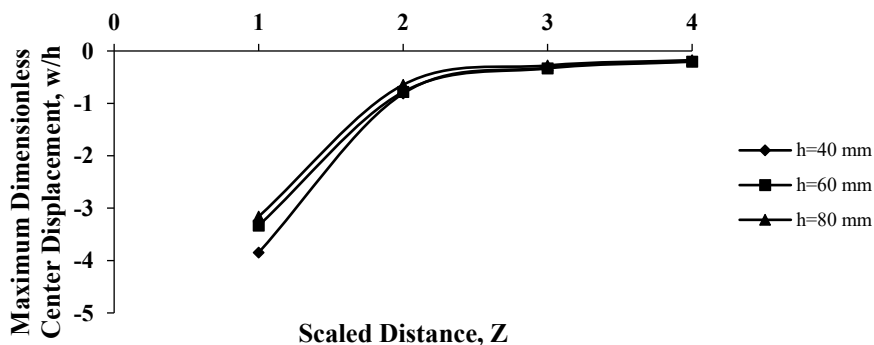
در این بخش پوسته های دارای سخت کننده ی حلقوی با ضخامت ۴، ۶ میلی متر، با طولی برابر طول پوسته و ارتفاع ۶۰ میلی متر با



شکل ۳۲. هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی حلقوی  
 Fig. 32. Geometry and meshing of FGM shell with circular stiffener.



شکل ۳۳. رابطه‌ی بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی حلقوی با ضخامت سخت‌کننده و فاصله‌ی مقیاس‌شده  
 Fig. 33. Maximum displacement of FGM shell with circular stiffener for stiffener thickness and scaled distance.

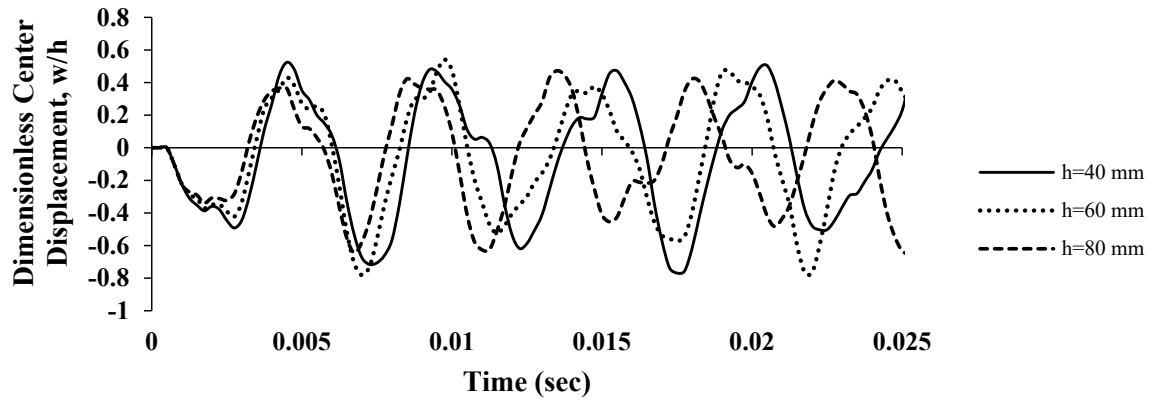


شکل ۳۴. رابطه‌ی بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی حلقوی با ارتفاع سخت‌کننده و فاصله‌ی مقیاس‌شده

که با فاصله‌ی مقیاس‌شده‌ی برابر ۲، افزایش ارتفاع از ۴۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۸۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی تغییر مکان به ترتیب ۳/۷۹٪ و ۱۷/۳۴٪ کاهش یافته است. همچنین در شکل ۳۵ مشاهده می‌گردد با افزایش ارتفاع سخت‌کننده، دامنه‌ی نوسان‌ها و نقاط اوج نمودار به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرده است.

ارتفاع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر با فاصله‌های مقیاس‌شده‌ی ۱، ۲، ۳ و ۴ (تحت انفجار با فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متر و مواد منفجره به جرم‌های ۱۲۵، ۱۵/۶۲۵، ۴/۶۳ و ۱/۹۵ گرم) مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۳۴ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار ارتفاع و فاصله‌ی مقیاس‌شده، بیشینه‌ی تغییر مکان کاهش می‌یابد، به‌طوری





شکل ۳۵: تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان مرکز پوسته‌ی FGM دارای سخت‌کننده‌ی حلقوی برای ارتفاع‌های مختلف سخت‌کننده با  $Z=2$ .  
 Fig. 34. Time history of displacement FGM shell with circular stiffener for different stiffener heights with  $Z = 2$ .

جدول ۷. بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی هدفمند با تعداد و آرایش مختلف سخت‌کننده و با  $Z=2$

Table 7.. Maximum dimensionless displacement of the FGM shell with different number and arrangement of stiffener and with  $Z = 2$ .

بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز پوسته	تعداد سخت‌کننده‌ها	نوع آرایش سخت‌کننده‌ها
۰/۹۶۴	۰	Without Stiffener
۰/۲۷۴	۱	L1
۰/۳۳۵	۱	T1
۰/۷۱۸	۲	L2
۰/۵۳۸	۲	L1-T1
۰/۷۱۵	۲	T2
۰/۷۲۶	۳	L3
۰/۶۴۶	۳	L2-T1
۰/۵۸۶	۳	L1-T2
۰/۷۱۷	۳	T3
۰/۸۶۹	۴	L4
۰/۷۲۶	۴	L3-T1
۰/۶۷۹	۴	L2-T2
۰/۶۷۵	۴	L1-T3
۰/۸۰۱	۴	T4

نماد (L) و سخت‌کننده‌های حلقوی با نماد (T) نمایش داده شده است. عدد قرار گرفته روبروی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی تعداد سخت‌کننده در پوسته‌ی هدفمند می‌باشد. به‌عنوان مثال L2-T1 نشان‌دهنده‌ی دو عدد سخت‌کننده طولی و یک عدد سخت‌کننده‌ی حلقوی که با

۳-۶- اثر تعداد و آرایش سخت‌کننده‌های طولی و حلقوی

به‌منظور بررسی تعداد و نوع آرایش قرارگیری سخت‌کننده‌ها بر روی پوسته استوانه‌ای هدفمند، سخت‌کننده‌های طولی و حلقوی با مساحت یکسان معادل ۶ سانتی‌متر مربع به تعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ با آرایش قرارگیری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای شناخت بهتر از قرارگیری هندسی سخت‌کننده‌ها، سخت‌کننده‌های طولی با

1 Longitudinal  
 2 Transvers

فاصله‌ی یکسان نسبت به هم قرار گرفته شده‌اند.

مطابق جدول ۷ مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته در مدل‌های T1 و L1 کم‌ترین مقدار را دارند. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها (از ۱ تا ۴ عدد سخت‌کننده طولی و حلقوی)، کم‌ترین مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته‌ی هدفمند با ۱، ۲، ۳ و ۴ سخت‌کننده طولی و حلقوی به ترتیب در مدل‌های L1، L1-T1، L1-T2، L1-T3 و L1-T3 اتفاق می‌افتد.

## ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی تأثیر انواع بازشو و سخت‌کننده بر روی رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های تک‌انحنایی FGM تحت بارهای انفجاری از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی پوسته‌های هدفمند، نخست، خواص هر لایه با استفاده از رابطه‌های حاکم بر مواد FGM محاسبه شد و سپس، پوسته‌ها با استفاده از روش چندلایه‌ی معادل مدل‌سازی گردید. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، اثر انواع بازشو و سخت‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه و ارزیابی رفتار دینامیکی پوسته‌ها به‌طور خلاصه در ادامه آمده است.

- با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییرمکان مرکز پوسته کاهش پیدا کرده است، به طوری که بیشینه‌ی تغییرمکان در پوسته‌ی تمام فلزی ( $n = \infty$ ) و کمینه‌ی تغییرمکان در پوسته‌ی تمام سرامیکی ( $n = 0$ ) اتفاق افتاده است و پاسخ پوسته‌های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است.

- در پوسته‌های تک‌انحنایی هدفمند بازشوه‌های متمرکز نسبت به بازشوه‌های گسترده (درصد بازشوه‌های یکسان) دارای بیشینه‌ی تغییرمکان کم‌تری می‌باشند. همچنین از بین بازشوه‌های متمرکز، بازشوی دایره‌ای در پوسته‌های تک‌انحنایی هدفمند دارای بهینه‌ترین سطح بازشو می‌باشند و از درصد بازشویی مشخص به بالا، بیشینه‌ی تغییرمکان با شیبی یکنواخت کاهش می‌یابد.

- در بازشوه‌های گسترده در صورتی که درصدی از بازشو در مرکز پوسته قرار داده شود، بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته افزایش می‌یابد لذا افزایش تعداد بازشوی گسترده با آرایش مشخص (در دو طرف پوسته) باعث کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته می‌شود؛ به گونه‌ای که می‌توان بیشینه‌ی تغییرمکان در بازشوه‌های گسترده را به کمتر از

بازشوی متمرکز در مرکز پوسته رساند.

- افزایش ضخامت و ارتفاع سخت‌کننده و فاصله‌ی مقیاس‌شده ( $Z$ ) در پوسته‌های تک‌انحنایی هدفمند دارای سخت‌کننده‌ی طولی و حلقوی باعث کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان می‌شود به طوری که فاصله‌ی مقیاس‌شده، ارتفاع و ضخامت به ترتیب میزان تأثیر از زیاد به کم را بر روی بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته دارند. به عنوان مثال با  $1/5$  برابر کردن فاصله‌ی مقیاس‌شده (از ۲ به ۳)،  $h_s = 60mm$  و  $t_s = 6mm$ ، بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته برای سخت‌کننده‌ی طولی و حلقوی به ترتیب  $60/186\%$  و  $57/49\%$  کاهش یافته است و نیز با  $1/5$  برابر کردن ارتفاع (از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر)،  $t_s = 6mm$  و بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته برای سخت‌کننده طولی و حلقوی به ترتیب  $20/67\%$  و  $3/79\%$  کاهش می‌یابد. همچنین با  $1/5$  برابر کردن ضخامت (از ۴ به ۶ میلی‌متر)،  $Z = 2$  و  $h_s = 60mm$ ، بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته برای سخت‌کننده طولی و حلقوی به ترتیب با  $10/31\%$  و  $2/95\%$  کاهش روبرو شده است.

- با بررسی افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها (تا ۴ عدد) و آرایش قرارگیری متفاوت (طولی و حلقوی)، بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته در حالت استفاده از یک سخت‌کننده‌ی طولی (L1) دارای کم‌ترین مقدار می‌باشد. همچنین اگر تعداد سخت‌کننده‌ها بیش‌تر از یک شود در صورتی که یک سخت‌کننده به‌صورت طولی و مابقی به‌صورت حلقوی قرار داده شود، بیشینه‌ی تغییرمکان کم‌تر از حالت‌های دیگر می‌باشد. به طوری که سخت‌کننده‌های L1، L1-T1، L1-T2 و L1-T3 به ترتیب باعث کاهش  $71/57\%$ ،  $44/19\%$ ،  $39/21\%$  و  $29/98\%$  بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته شده است.

- با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، در پوسته‌ی تک‌انحنایی FGM که دارای بازشو و سخت‌کننده به‌صورت توأم با درصد مشخصی می‌باشد، برای به حداقل رساندن بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته، استفاده از بازشوی گسترده در بالا و پایین پوسته و سخت‌کننده‌ی تک به‌صورت طولی این امکان را فراهم می‌آورد که با افزایش تعداد بازشوی گسترده بتوان بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته را کاهش داد.

## ۸- فهرست علائم

$a$	طول پوسته در راستای محور $x$ ، mm
$b$	عرض پوسته در راستای محور $y$ ، mm
$h$	ضخامت پوسته در راستای شعاع استوانه mm

- [5] M. Bever and P. Duwez, "Gradients in composite materials", *Materials Science and Engineering*, vol. 10, pp. 1-8, 1972.
- [6] M. Koizumi, *The concept of FGM*. 1993.
- [7] C. Horgan and A. Chan, "The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials", *Journal of Elasticity*, vol. 55, no. 1, pp. 43-59, 1999.
- [8] N. Tutuncu and M. Ozturk, "Exact solutions for stresses in functionally graded pressure vessels", *Composites Part B: Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 683-686, 2001.
- [9] R. Naghdabadi and S. H. Kordkheili, "A finite element formulation for analysis of functionally graded plates and shells", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 74, no. 5-6, pp. 375-386, 2005.
- [10] Z. Shi, T. Zhang, and H. Xiang, "Exact solutions of heterogeneous elastic hollow cylinders", *Composite Structures*, vol. 79, no. 1, pp. 140-147, 2007.
- [11] G. Nurick and J. Martin, "Deformation of thin plates subjected to impulsive loading a review part II: experimental studies", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 171-186, 1989.
- [12] S. C. K. Yuen and G. Nurick, "Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 55-83, 2005.
- [13] A. Esmael Khosravi, F. Shahabian and Y. Nouri, "The behavior of the composite multi-layer cylindrical shells subjected to blast load", *Journal of Structural and Construction Engineering*, [online] vol. 4, pages 26-34, 2017, (in Persian).
- [14] G. Schleyer, N. Underwood, H. Do, J. Paik, and B. Kim, "On pulse pressure loading of plates with holes", *Open Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 496-508, 2012.
- [15] P. Laura, R. Gutierrez, L. Ercoli, J. Utjest, and R. Carnicer, "Free vibrations of rectangular plates elastically restrained against rotation with circular or square free openings", *Ocean Engineering*, vol. 14, no.

ضخامت سخت کننده	$t_s$
ارتفاع سخت کننده	$h_s$
تابع بار انفجار در حوزه‌ی مکان	$P_s(x, y)$
ضریب‌های دمایی مواد تشکیل دهنده‌ی فازهای سرامیک - فلز	$P_3, P_2, P_1, P_{-1}, P_0$
بیانگر خواص مواد سرامیکی	$P_c$
بیانگر خواص مواد فلزی	$P_m$
اضافه فشار بیشینه‌ی انفجار، $N/m^2$	$P_{so}$
مقدار بیشینه بار انفجار، $N/m^2$	$P_o$
فاصله‌ی مرکز انفجار تا نقطه‌ی مورد نظر، mm	$D$
ضریب مقیاس‌گذاری	$S$
زمان، sec	$t$
مدت زمان انفجار، sec	$t_p$
دما، k	$T$
تابع حجمی سرامیک	$V_c$
تابع حجمی فلز	$V_m$
تغییر مکان در راستای محور z، mm	$w$
جرم ماده‌ی TNT، kg	$M$
فاصله‌ی مقیاس‌شده، $m/kg^{1/3}$	$Z$
ضریب افت	$\alpha$
چگالی، $kg/m^3$	$\rho$
تنش تسلیم، $N/m^2$	$\sigma_y$
نسبت پواسون	$\nu$

## مراجع

- [1] H. Yin, L. Sun, and G. H. Paulino, "Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions", *Acta Materialia*, vol. 52, no. 12, pp. 3535-3543, 2004.
- [2] G. Li, B. Z. Chen, X. F. Deng, and R. Eckhoff, "Explosion resistance of a square plate with a square hole", in *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 12, no. 7, pp. 121-124, EDP Sciences 2002.
- [3] D. Y. Gao, "Nonconvex semi-linear problems and canonical duality solutions", in *Advances in Mechanics and Mathematics*, pp. 261-312, Springer, Boston, MA, 2003.
- [4] L. Qian, R. Batra, and L. Chen, "Analysis of cylindrical bending thermoelastic deformations of functionally graded plates by a meshless local Petrov-Galerkin method", *Computational Mechanics*, vol. 33, no. 4, pp. 263-273, 2004.

- analysis, and case studies*. Springer Science and Business Media, 2006.
- [24] G. F. Kinney and K. J. Graham, *Explosive shocks in air*. Springer Science and Business Media, 2013.
- [25] D. O. Dusenberry, *Handbook for blast resistant design of buildings*. John Wiley and Sons, 2010.
- [26] *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*. Dassault Systemes Simulia Crop.: Providence, RI, USA, 2016.
- [27] C. Aksoylar, A. Ömercikoğlu, Z. Mecitoğlu, and M. H. Omurtag, "Nonlinear transient analysis of FGM and FML plates under blast loads by experimental and mixed FE methods", *Composite Structures*, vol. 94, no. 2, pp. 731-744, 2012.
- [28] R. Gunes, M. Aydin, M. K. Apalak, and J. Reddy, "The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low-velocities", *Composite Structures*, vol. 93, no. 2, pp. 860-869, 2011.
- [29] A. Hajlaoui, E. Triki, A. Frikha, M. Wali, and F. Dammak, "Nonlinear dynamics analysis of FGM shell structures with a higher order shear strain enhanced solid-shell element", *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 1, pp. 72-91, 2017.
- [30] Neuberger, S. Peles, and D. Rittel, "Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, no. 5, pp. 859-873, 2007.
- 4, pp. 285-293, 1987.
- [16] H. Xu, J. Du, and W. Li, "Vibrations of rectangular plates reinforced by any number of beams of arbitrary lengths and placement angles", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 18, pp. 3759-3779, 2010.
- [17] H. Türkmen and Z. Mecitoğlu, "Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 221, no. 3, pp. 371-389, 1999.
- [18] R. Jome Manzari and F. Shahabian, "The Geometrically nonlinear dynamic response of metal-ceramic FGM plates under the blast loading", *Journal of Structural and Construction Engineering*, [online] vol. 5, pages 16, 2018, (in Persian).
- [19] E. Kumari and M. Singha, "Nonlinear Response of Laminated Panels under Blast Load", *Procedia Engineering*, vol. 173, pp. 539-546, 2017.
- [20] J. N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. CRC press, 2004.
- [21] X. L. Huang and H. S. Shen, "Nonlinear vibration and dynamic response of functionally graded plates in thermal environments", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, no. 9, pp. 2403-2427, 2004.
- [22] H. S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*. CRC press, 2016.
- [23] T. Bangash, *Explosion-resistant buildings: design*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Shahraki, F. Shahabian, R. Jome Manzari, Effect of Opening and Stiffener on Geometric Nonlinear Dynamical Behavior of Single-Curved FGM Shells under the Blast Loads, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 691-710.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14849.5759

