



# بررسی تأثیر انواع بازشو و سخت کننده بر روی پاسخ دینامیکی صفحه های FGM تحت بارهای انفجاری

رضا جمعه منطری<sup>۱</sup>، فرزاد شهابیان مقدم<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱، shahabf@um.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲)

## چکیده

سیر صعودی خطرهای ناشی از بارهای انفجاری در صفحه های گسترده و کم ضخامت کنونی، مطالعات و ارزیابی پیرامون این چالش را ضروری ساخته است. حال آن که با فهم تغییر مکان زیاد سازه بر مبنای این بارها، راه کارهایی کاربردی و مقرون به صرفه نظیر تقویت صفحه ها با استفاده از سخت کننده توصیه می گردد. همچنین، معضلات اجرایی و احتمال ایجاد بازشو در صفحه ها و تغییر رفتار آن ها نیز مسئله ای مهم و پیشنهاد برای حل آن در این پژوهش ضرورت می یابد. صفحه های هدفمند (FGM) که ساختاری متشکل از یک توزیع توانی در راستای ضخامت دارند، به مثابه راه حلی برای این معضل قلمداد شده است. از این روی، پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار ABAQUS به سنجش پارامترهایی در صفحه های دارای بازشو از قبیل نوع، درصد و موقعیت قرارگیری بازشو و مقدار جرم ماده ای منفجره و در صفحه های دارای سخت کننده، نوع، تعداد و آرایش سخت کننده و شرایط مرزی و همچنین اثر توأم بازشو و سخت کننده پرداخته است. نتایج پژوهش از سویی حاکی بر آن است که ایجاد بازشو باعث کاهش سختی صفحه و به دنبال آن افزایش مقدار تغییر مکان می شود؛ اما با افزایش درصد بازشو و کاهش سطح اعمال بار، تغییر مکان صفحه به طور پیوسته کاهش می یابد. از سوی دیگر، سخت کننده از نوع مستطیلی تک به دلیل بیش تر بودن لنگر لختی و اجرای آسان تر آن در مقایسه با سایرین، دارای عملکرد مؤثرتری می باشد. در بررسی اثر توأم این عامل ها می توان دریافت که ایجاد بازشو و استفاده از سخت کننده ای مناسب، مقدار تغییر مکان صفحه را تا حد زیادی نسبت به انواع دیگر کاهش می دهد.

## واژگان کلیدی

صفحه ی FGM، بار انفجاری، بیشینه تغییر مکان، بازشو، سخت کننده

## A Survey of the Effect of Opening and Stiffener on Dynamic Response of FGM Plates under Blast Loads

R. Jome Manzari, F. Shahabian Moghaddam

### Abstract

The increasing risks resulted by blast loads in current broad and thin plates necessitate the studies and evaluation of these challenges. Practical and cost-effective solutions such as plates enforcement with stiffener are suggested due to high displacement of structure as a result of applied loads. Moreover, application issues and the possibility of developing opening in plates and thus their change of behavior are considered important issues, for which solutions are suggested in this study. Functionally graded plates (FGM) with a power distribution in the direction of thickness are suggested as a solution to this challenge. Accordingly, the present study assesses parameters related to plates with opening including kind, percentage and the position of opening, the mass amount of explosive material, and the parameters related to plates with stiffener including type, count, arrangement of stiffeners, boundary condition and also the joint effect of stiffener and opening using ABAQUS Software. The results indicate that opening decreases the plate hardness which consequently increases the amount of displacement. Plate displacement constantly reduces as a result of increase in opening percentage and hence decrease in the surface on which load is applied. On the other hand, the rectangle shape of stiffener has a better performance due to higher moment of inertia and easier application compared to other shapes. By studying the joint effects of these factors, it can be suggested that developing opening and application of an appropriate stiffener can significantly reduce the amount of plate displacement compared to other types.

### Keywords

FGM Plate, Blast Load, Maximum Displacement, Opening, Stiffener

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۱۷



مواد مرکب به سبب دارا بودن خواص مکانیکی مناسب نظیر وزن سبک، مقاومت بالا، رسانایی پایین حرارتی، استحکام در برابر خوردگی و بارهای ضربه‌ای در مقایسه با مواد همگن، دارای کاربرد وسیعی می‌باشند. در سال‌های اخیر، FGM<sup>۱</sup> به‌عنوان نسل جدیدی از مواد، نقش مهمی در میان مواد مرکب پیشرفته ایفا کرده است. مواد مرکب چندلایه به‌طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی از قبیل سازه‌های دریایی و فراساحلی، نیروگاه‌های هسته‌ای، اجزای موشکی و فضاپیماها استفاده می‌شوند. سازه‌ها در برابر بارهای مختلف در معرض خطر تغییرشکل‌های بزرگ غیرخطی قرار دارند. لذا توجه به رفتار صفحه‌ها به‌عنوان یکی از پر کاربردترین اجزای تشکیل‌دهنده سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری‌که در سال‌های اخیر پژوهشگران ترغیب شده‌اند تا به بررسی رفتار صفحه‌های مرکب بپردازند [۱-۳].

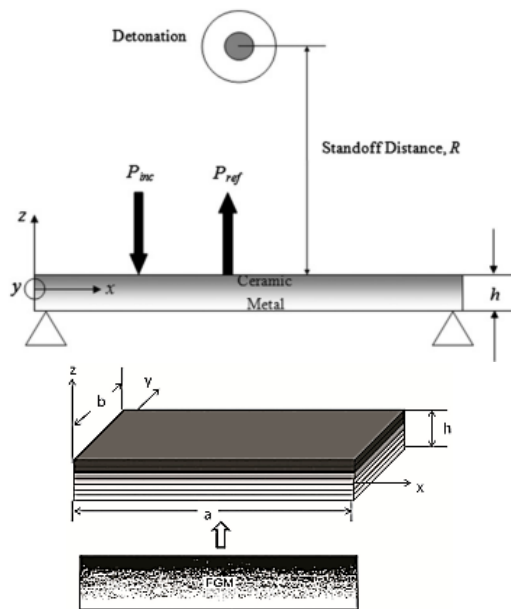
یکی از راه‌های جلوگیری از خطرهای ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ در صفحه‌ها، استفاده از سخت‌کننده<sup>۲</sup> است. سخت‌کننده‌ها به‌عنوان بخشی مجزا به هندسه‌ی صفحه اضافه می‌شوند. با انجام این عمل، ظرفیت تحمل بار صفحه افزایش یافته و در مقابل هرگونه تغییرشکل، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. این ویژگی منجر به کاربرد فراوان صفحه‌های تقویت‌شده در صنایع هوافضا، ساخت پل‌ها، ساختمان‌ها، تانکرها و صنایع پتروشیمی شده است. دو دیدگاه برای تحلیل صفحه‌های تقویت‌شده وجود دارد. اولین دیدگاه وقتی مطرح می‌شود که تعداد سخت‌کننده‌ها زیاد باشند. در این حالت سازه به‌طور تقریبی به شکل یک صفحه‌ی غیرهمسانگرد در نظر گرفته می‌شود که دارای ضخامت معادل با صفحه‌ی دارای سخت‌کننده است. در این صورت، معادله‌های حاکم این صفحه را به‌صورت یک صفحه‌ی بدون سخت‌کننده تحلیل می‌کنند. در دیدگاه دوم تعداد سخت‌کننده‌ها کم می‌باشد، صفحه و سخت‌کننده به‌عنوان دو بخش جدا از هم طوری عمل می‌کنند که پیوستگی آن‌ها در محل اتصال به یکدیگر تأمین می‌شود. دیدگاه دوم به‌عنوان نگره‌ی صفحه‌های تقویت‌شده‌ی مجزا<sup>۳</sup> برای تحلیل تغییرشکل‌های بزرگ کشسان و مومسان - کشسان صفحه‌های مستطیلی استفاده گردید [۴]. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از دیدگاه دوم که به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد، سود جسته شده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، استفاده از صفحه‌های

ساخته‌شده از مواد هدفمند باعث بهبود مقاومت و کاهش تغییرمکان می‌شود. ترکیب مواد هدفمند به‌طور پیوسته و تدریجی در راستای ضخامت متغیر است. به عبارت دیگر، دو ماده‌ی ناهمسان مانند سرامیک و فلز، به‌منظور تشکیل ماده‌ی جدید که خواص مکانیکی آن دارای تغییرات تدریجی و پیوسته در راستای ضخامت است، با هم ترکیب می‌شوند. این ترکیب با تغییر تدریجی شاخص توان حجمی مواد تشکیل‌دهنده به‌دست می‌آید. با توجه به پیوستگی مواد تشکیل‌دهنده، اثرات ناشی از تمرکز تنش بین لایه‌ای و تغییرات شدید دمایی در این ماده از بین می‌رود [۵]. طرح ساخت FGMها جهت استفاده در صنایع هوافضا برای اولین بار توسط پژوهشگران ژاپنی ارائه شد. هدف از ساخت این مواد ایجاد یک سد حرارتی در قسمت‌های محترقه‌ی سفینه‌های فضایی بود [۶]. از این رو، مسئله‌ی پایداری دینامیکی و استاتیکی سازه‌هایی همچون صفحه‌ها و پوسته‌های FGM، تلاش بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است.

تاکنون مطالعه‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی ماهیت پدیده‌ی انفجار و اثر بارهای انفجاری بر روی رفتار صفحه‌های گوناگون نظیر صفحه‌های ساده، مرکب، چندلایه و ساخته‌شده از مواد هدفمند انجام شده است. Taylor [۷] اولین پژوهشگری بود که به بررسی آزمایشگاهی و نظری اثر انفجار بر صفحه‌ها پرداخت. پژوهش در مورد اثر انفجار در هوا بر روی صفحه‌ها، به‌صورت آزمایشگاهی توسط Witmer و همکارانش [۸] صورت گرفت. Nurick و Martin [۹]، به بررسی تغییرشکل صفحه‌های نازک تحت بارهای انفجاری پرداختند. Neuberger و همکارانش [۱۰]، پاسخ صفحه‌های دایره‌ای در معرض انفجار کروی را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. Yuen و Nurick [۱۱]، به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی و مطالعه‌ی اثر بار انفجاری یکنواخت بر پاسخ صفحه‌های مربعی دارای سخت‌کننده پرداختند. Langdon و همکاران [۱۲]، رفتار صفحه‌های مربعی با ابعاد و آرایش مختلف سخت‌کننده تحت بار انفجاری موضعی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. Pan و Louca [۱۳]، آزمایش‌هایی را بر روی صفحه‌های فولادی دارای سخت‌کننده تحت بارهای انفجاری انجام دادند و نیز در پژوهشی عددی به بررسی تأثیر شرایط مرزی و نوع سخت‌کننده بر رفتار صفحه پرداختند. Cho و Park [۱۴]، به‌صورت عددی اثر انفجار بر روی صفحه‌های با و بدون سخت‌کننده تحت بار انفجاری را مورد مطالعه قرار دادند. Li و همکارانش [۱۵]، رفتار صفحه‌ای مربعی دارای بازشو را تحت

کارترین  $(x, y, z)$  صفحه‌ی FGM در سطح میانی صفحه قرار می‌گیرد. محور  $z$  در راستای ضخامت صفحه  $(h)$  و رو به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شود. طول  $a$  و عرض  $b$  صفحه به ترتیب در راستای محوره‌های  $x$  و  $y$  قرار دارند. تغییر مکان صفحه در راستای ضخامت صفحه با حرف  $w$  نشان داده می‌شود.



شکل ۱- نمایش شماتیک هندسه‌ی صفحه‌ی FGM به صورت دوبعدی و سه‌بعدی تحت بارگذاری انفجار

بر اساس قانون توزیع توانی<sup>۸</sup>، خواص مکانیکی مواد همچون ضریب کشسانی  $(E)$ ، چگالی  $(\rho)$  و نسبت پواسون  $(\nu)$  در سراسر ضخامت متغیر است. این تغییر خواص به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود.

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

که در آن،  $P_c(T)$  و  $P_m(T)$  به ترتیب بیانگر خواص مواد وابسته به دمای فازهای سرامیک و فلز صفحه‌ی FGM می‌باشد که به عنوان تابعی از دما طبق رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود [۲۴ و ۲۵].

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

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.

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

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

شوک فشاری ناشی از انفجار تجزیه و تحلیل کردند. Langdon و همکارانش [۱۶]، روش‌های کاهش اثر انفجار بر صفحه‌های فولادی را با قرار دادن صفحه‌ای دارای بازشو بین مواد منفجره و صفحه‌ی هدف مورد بررسی قرار دادند. Nouri [۱۷]، به تحلیل صفحه‌های فولادی با بازشو و سخت‌کننده تحت بارهای انفجاری پرداخت.

Kazanci و همکارانش [۱۸]، به بررسی اثر سختی و لختی بر روی رفتار دینامیکی صفحه‌ی مرکب چندلایه تحت بار انفجاری پرداختند. Turkmen و Mecitoglu [۱۹]، پاسخ دینامیکی صفحه‌ی مرکب چندلایه‌ی دارای سخت‌کننده تحت بار انفجاری را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. Reddy و Praveen [۲۰]، پاسخ صفحه‌های FGM سرامیک - فلز را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. Hause [۲۱]، رفتار سازه‌های صفحه‌گونه‌ی FGM تحت اثر بار انفجاری را با بهره‌گیری از روش گلرکین<sup>۹</sup> و رانگ-کوتا<sup>۱۰</sup> مورد مطالعه قرار داد. Aksoylar و همکارانش [۲۲]، رفتار غیرخطی صفحه‌های مرکب چندلایه با الیاف فلزی (FML) و صفحه‌های هدفمند تحت بار انفجاری را با روش‌های آزمایشگاهی و اجزای محدود مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. Duc و همکارانش [۲۳]، پاسخ دینامیکی غیرخطی و ارتعاش تغییرشکل‌های برشی صفحه‌های هدفمند در برابر بارهای انفجاری و حرارتی را بر اساس نظریه‌ی تغییرشکل برشی مرتبه بالای ردی<sup>۷</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

با توجه به مطالعه‌های صورت گرفته بر روی صفحه‌ها، در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر انواع بازشو مانند دایره‌ای و مربعی و انواع سخت‌کننده نظیر مستطیلی، سپری، نبشی و ناودانی بر روی پاسخ دینامیکی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی در صفحه‌های دارای بازشو، نوع، درصد و موقعیت قرارگیری بازشو و مقدار جرم ماده‌ی منفجره و در صفحه‌های دارای سخت‌کننده، نوع، تعداد و آرایش سخت‌کننده و شرایط مرزی می‌باشد. در ادامه، به منظور بررسی کامل‌تر رفتار صفحه‌های دارای بازشو و سخت‌کننده، اثر توأم این عامل‌ها بر روی رفتار صفحه‌های هدفمند مورد بررسی قرار گرفته شده است. بدین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده می‌گردد.

## ۲- مبانی و مفاهیم پایه

هندسه‌ی کلی و نحوه‌ی اعمال بار انفجاری نمونه‌های مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. سیستم مختصات



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. خصوصیات بارگذاری انفجاری تحت تأثیر منبع و رفتار ماده‌ی منفجره می‌باشد. انفجارها بر اساس سرعت واکنش به دو دسته‌ی اصلی اشتعال<sup>۹</sup> (ناشی از انفجار مواد منفجره‌ی مایع و گاز) و شوک انفجاری<sup>۱۰</sup> (ناشی از انفجار مواد منفجره‌ی جامد) تقسیم می‌شوند. اشتعال یک فرآیند اکسیداسیون است که سرعت پخش امواج آن کم‌تر از سرعت صوت است و امواج از نوع فشاری می‌باشند. در این حالت، فشار حداکثر به‌طور ناگهانی افزایش نمی‌یابد (شکل (۳)). در حالی که در شوک‌های انفجاری سرعت پخش امواج فراصوتی بوده و امواج از نوع ضربه می‌باشند. در این حالت فشار حداکثر در زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد (شکل (۴)) [۲۶]. در پژوهش حاضر، به بررسی ضربه‌ی ناشی از مواد منفجره‌ی جامد (TNT) پرداخته شده است.

$$P(z, T) = [P_c(T) - P_m(T)]V_c(z) + P_m(T) \quad (۴)$$

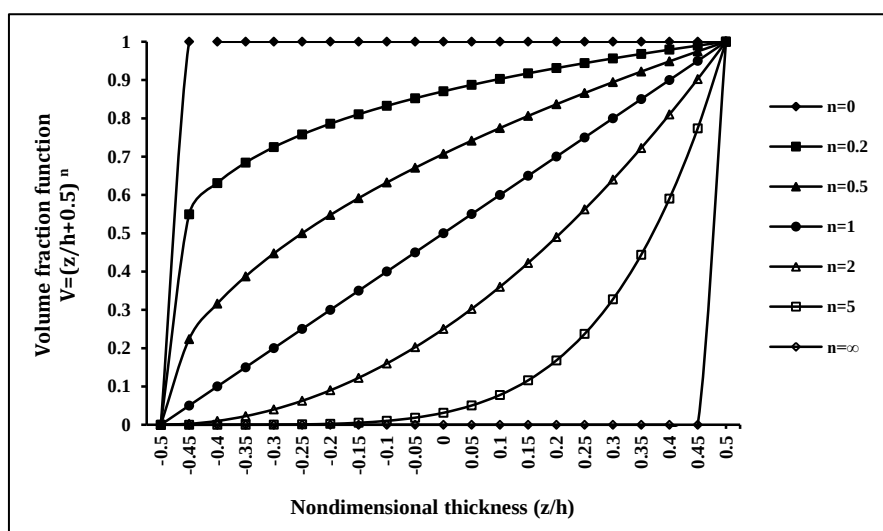
بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\begin{cases} P(z, T) = P_m(T) & \text{for } V_c(z) = 0 \\ P(z, T) = P_c(T) & \text{for } V_c(z) = 1 \end{cases} \quad (۵)$$

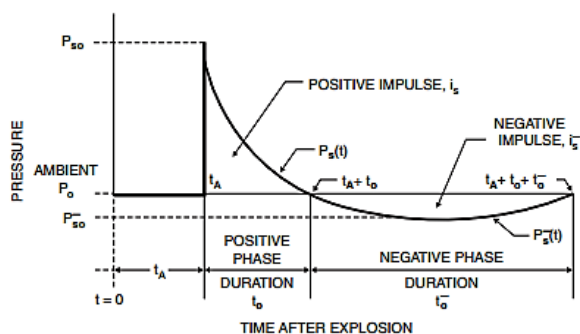
درجه‌بندی دو فاز اساسی سرامیک و فلز در راستای ضخامت صفحه به‌صورت رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود.

$$[E(z, T), \rho(z, T), v(z, T)] = [E_{cm}(T), \rho_{cm}(T), v_{cm}(T)] \left( \frac{h + 2z}{2h} \right)^n + [E_m(T), \rho_m(T), v_m(T)] \quad (۶)$$

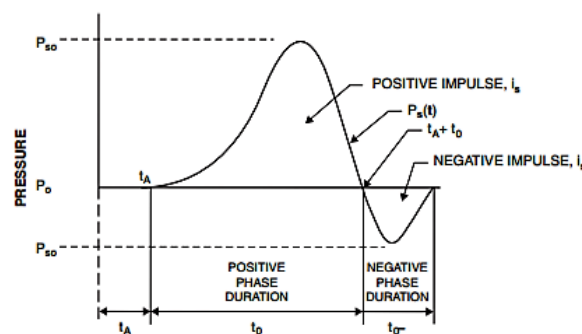
که در این رابطه،  $\rho_{cm} = \rho_c - \rho_m$ ،  $v_{cm} = v_c - v_m$ ،  $E_{cm} = E_c - E_m$  و  $n$  شاخص توان حجمی نامیده می‌شود که بر نحوه‌ی تغییر مواد در راستای ضخامت صفحه‌ی هدفمند دلالت دارد. تغییرات تابع توان حجمی  $(z/h + 0.5)^n$  در راستای ضخامت ( $h$ ) برای مقدارهای مختلف  $n$  در شکل (۲) نشان داده شده است. مقدار  $n = 0$  و  $n = \infty$  به ترتیب به صفحه‌ی سرامیکی و صفحه‌ی فلزی مربوط می‌شود.



شکل ۲- تغییرات تابع توان حجمی  $(z/h + 0.5)^n$



شکل ۴- شوک انفجاری حاصل از انفجار ناگهانی [۲۶]



شکل ۳- موج فشاری حاصل از اشتعال [۲۶]

( $W$ ) و در صفحه‌های دارای سخت‌کننده، نوع، تعداد و آرایش سخت‌کننده و شرایط مرزی) ترسیم و با هم مقایسه شده است.

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

نوع اختلاط مواد FGM به صورت فلز - سرامیک و استاینلس استیل<sup>۱۸</sup> - سیلیکون‌نیتريد<sup>۱۹</sup> انتخاب شده است. خواص مکانیکی این مواد نظیر ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون بر اساس آیین‌نامه‌ی ASTM-C20 در جدول (۱) آورده شده است. رویه‌های بالا و پایین صفحه‌ی FGM به ترتیب سرامیک و فلز می‌باشند. پس از بررسی نتایج تحلیل‌ها مشخص گردید، هنگامی‌که بار انفجاری از طرف رویه‌ی سرامیکی وارد می‌شود، صفحه‌ی FGM دارای عملکرد بهتری نسبت به حالتی است که بار انفجاری از طرف رویه‌ی فلزی وارد می‌گردد. از این رو در فرآیند تحلیل‌ها، بار انفجاری از طرف رویه‌ی سرامیکی اعمال گردیده است. همان‌طور که در بخش دوم بیان شد، توزیع خواص مکانیکی مواد در راستای ضخامت صفحه بر اساس رابطه‌ی توزیع قانون توانی صورت گرفته است.

جدول ۱- خواص مکانیکی مواد FGM

| خواص مواد               | ضریب کشسانی (GPa) | چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) | نسبت پواسون |
|-------------------------|-------------------|---------------------------|-------------|
| استاینلس استیل (فلز)    | ۲۰۱/۰۴            | ۸۱۶۶                      | ۰/۳۲۶۲      |
| سیلیکون‌نیتريد (سرامیک) | ۳۴۸/۴۳            | ۲۳۷۰                      | ۰/۲۳        |

### ۳-۲- راستی‌آزمایی

به منظور راستی‌آزمایی پژوهش حاضر، از نتایج پژوهش انجام شده توسط Aksoylar و همکارانش [۲۲] استفاده شده است. صفحه‌ی مربعی به ضلع ۳۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۲/۶۲ میلی‌متر و اندازه‌ی شبکه‌بندی ۲۰×۲۰ میلی‌متر با تکیه‌گاه گیردار در ۱۰ لایه از کربن-اپوکسی (C)، آرامید-اپوکسی (A)، شیشه-اپوکسی (G) و فلز برنج (B) به صورت G/G/G/A/A/C/C/C/B لایه‌چینی شده بود. تمام لایه‌های صفحه‌ی مرکب با زاویه‌ی صفر درجه در راستای طولی قرار داده شدند. صفحه‌ی FML با مشخصات فوق تحت فشار انفجاری اندازه‌گیری شده از آزمایش، مدل‌سازی گردید. نتایج آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد. در جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه و بیشینه تغییر شکل نسبی در راستای محور  $x$  ( $\epsilon_{xx}$ ) و در شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان و تغییر شکل نسبی  $\epsilon_{xx}$  مرکز صفحه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی از

برای تعیین مشخصات هر انفجار، نیاز به سه پارامتر اضافه فشار بیشینه<sup>۱۱</sup>، مدت زمان انفجار<sup>۱۲</sup> و ضربه<sup>۱۳</sup> است. قسمت مثبت نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری نشان داده شده در شکل (۴) با رابطه‌ی شبه نمایی (۷-۱) و (۷-۲) بیان می‌گردد [۲۷].

$$P_t(t) = (P_{so} - P_0)(1 - t/t_p)e^{-\alpha t/t_p} \quad (1-7)$$

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (2-7)$$

در این رابطه‌ها،  $P_{so}$  مقدار اضافه فشار بیشینه‌ی انفجار،  $t_0$  زمان انفجار در فاز مثبت، ضریب افت<sup>۱۴</sup>  $\alpha$  یک مقدار ثابت و  $Z$  فاصله‌ی مقیاس شده است. بر اساس رابطه‌ی هوپکینسون - کرانز<sup>۱۵</sup> فاصله‌ی مقیاس شده به صورت رابطه‌ی (۸) بیان می‌شود [۲۷].

$$Z = R/\sqrt[3]{W} \quad (8)$$

در این رابطه،  $R$  فاصله‌ی مرکز انفجار تا نقطه‌ی مورد نظر بر حسب متر و  $W$  جرم ماده‌ی منفجره بر حسب کیلوگرم است.

### ۳-۳ مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی صفحه‌های ساخته شده از مواد هدفمند در نرم‌افزار آباکوس از جزء پوسته‌ای<sup>۱۶</sup> مثلثی سه‌گره‌ی (S3R) برای مدل‌سازی صفحه‌های دارای بازشوی دایره‌ای، جزء پوسته‌ای چهاروجهی چهارگره‌ی (S4R) برای مدل‌سازی صفحه‌های دارای بازشوی مربعی و صفحه‌های دارای سخت‌کننده و نیز، برای مدل‌سازی انفجار از روش کانوپ<sup>۱۷</sup> استفاده گردیده است [۲۸]. به منظور ارزیابی تأثیر انواع بازشو و سخت‌کننده بر روی پاسخ دینامیکی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری، صفحه‌ی مربعی شکل به ضلع ۱۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر با رفتار دینامیکی غیرخطی و در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفته شده است. ابتدا، با هدف دست‌یابی به شبکه‌بندی مناسب برای صفحه، ابعاد جزء تغییر داده شد تا پاسخ به یک مقدار مشخص همگرا گردد. سپس، به منظور تعیین تعداد لایه‌های معادل صفحه‌ی FGM، تحلیل‌های همگرایی توسط صفحه‌ی هدفمند مرجع [۲۲] انجام شد. در تمام تحلیل‌ها، مدت زمان بارگذاری ۵۰ میلی‌ثانیه انتخاب شده است. همچنین، به منظور بررسی کامل‌تر رفتار صفحه‌های دارای بازشو و سخت‌کننده و اثر توأم این عامل‌ها بر روی رفتار صفحه‌های هدفمند، رابطه‌ی بین تغییر مکان صفحه‌ها بر حسب هر یک از پارامترها (در صفحه‌های دارای بازشو، نوع، درصد و موقعیت قرارگیری بازشو و مقدار جرم ماده‌ی منفجره



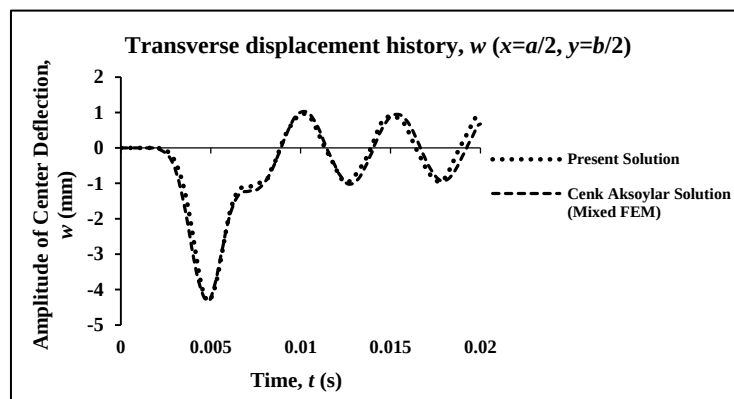
دقت قابل قبولی در مقایسه با مقدارهای گزارش شده برخوردار است.

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS و روش عددی

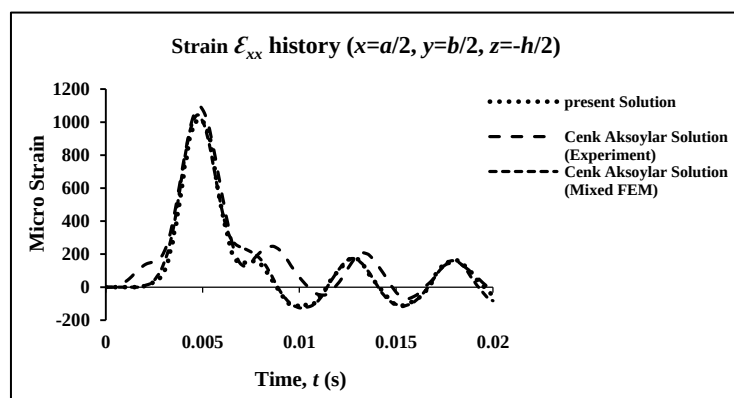
| تغییر مکان مرکز صفحه (mm) | ABAQUS | عددی مختلط [۲۲] | خطا (%) |
|---------------------------|--------|-----------------|---------|
| بیشینه مقدار              | -۴/۳۱۵ | -۴/۳۲۹          | -۰/۳۲   |

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS، آزمایش و روش عددی

| تغییر شکل نسبی ( $\epsilon_{xx}$ ) | ABAQUS         | تجربی [۲۲]     | عددی مختلط [۲۲] | خطا (%) |
|------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|---------|
| بیشینه مقدار                       | $1/0.12e^{-3}$ | $1/0.91e^{-3}$ | -               | ۷       |
|                                    | $1/0.12e^{-3}$ | -              | $1/0.44e^{-3}$  | ۲/۹     |



شکل ۵- مقایسه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه‌ی FML حاصل از ABAQUS و روش عددی [۲۲]



شکل ۶- مقایسه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه‌ی FML حاصل از ABAQUS، آزمایش و روش عددی [۲۲]

### ۳-۳- نحوه‌ی شبکه‌بندی صفحه‌ی FGM

به منظور شبکه‌بندی صفحه، از جزءهایی با ابعاد مختلف استفاده شد و تأثیر اندازه‌ی شبکه‌بندی صفحه مورد بررسی قرار گرفت. از این رو، در صفحه‌ی مربعی شکل به ضلع ۱۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر با شاخص توان حجمی ( $n$ ) برابر ۱ و شرط مرزی گیردار تحت بار انفجاری ۴۰ گرم، ابعاد جزء تغییر داده شد تا پاسخ به یک مقدار مشخص همگرا گردد. پس از بررسی اندازه‌ی شبکه‌بندی‌های مختلف (شکل ۷)، جزءهای ۲۰×۲۰ میلی‌متری به عنوان حالت مناسب انتخاب شد. بدین ترتیب، تعداد

۲۵۰۰ جزء برای شبکه‌بندی صفحه مورد استفاده قرار گرفت.

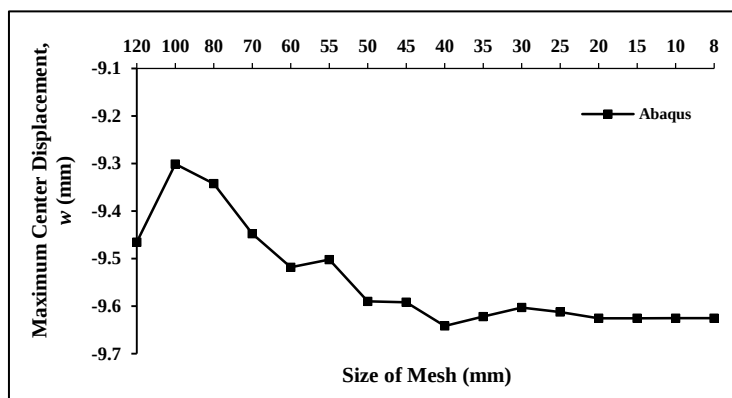
### ۳-۴- تعیین تعداد لایه‌های صفحه‌ی FGM

به منظور تعیین تعداد لایه‌های معادل صفحه‌ی FGM ( $N$ )، چندین تحلیل همگرایی صورت پذیرفت. تحلیل‌های همگرایی توسط صفحه‌ی هدفمند مرجع [۲۲] با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر، شاخص توان حجمی ۰/۲، ضخامت ۳ میلی‌متر، اندازه‌ی شبکه‌بندی ۱۲×۱۲ میلی‌متر با گام زمانی ۰/۱ میلی‌ثانیه تحت بار انفجار انجام گردیده است. پس از بررسی بیشینه تغییر مکان مرکز

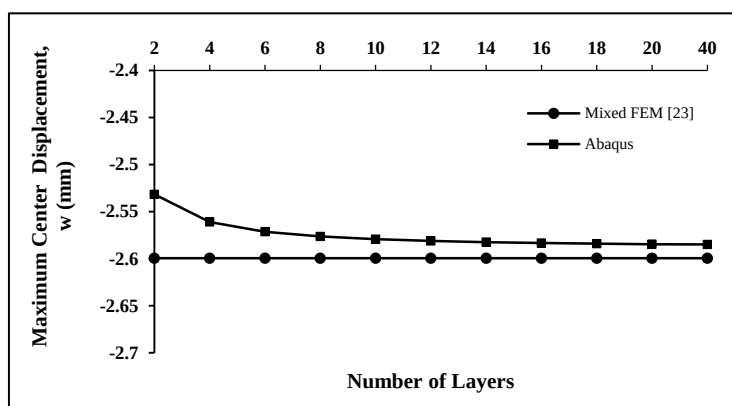


دیگر، در ادامه‌ی محاسبات، صفحه‌های مورد تحلیل از ۲۰ لایه تشکیل شده‌اند.

صفحه (جدول ۴) و شکل (۸)، در تحلیل صفحه‌های هدفمند از ۲۰ لایه‌ی معادل به‌عنوان حالت مناسب استفاده شد. به عبارت



شکل ۷- مقایسه‌ی اندازه‌ی ابعاد جزء در شبکه‌بندی‌های مختلف



شکل ۸- تعیین تعداد لایه‌های معادل صفحه‌ی FGM

پس از اطمینان از توانایی مدل تحلیلی در تخمین نتایج آزمایشگاهی و عددی، برای مدل‌سازی صفحه‌های هدفمند، نخست خواص هر لایه با استفاده از رابطه‌های حاکم بر مواد FGM محاسبه شد و سپس، صفحه‌ها با استفاده از روش چندلایه‌ی معادل در ۲۰ لایه به‌صورت گیردار و ساده تحت بار انفجاری مدل‌سازی گردید.

#### ۴- صفحه‌های FGM دارای بازشو

به‌منظور ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی صفحه‌های FGM دارای بازشو، صفحه‌ی مربعی با شاخص توان حجمی ( $n$ ) برابر ۱ تحت بارهای انفجاری ۴۰، ۵۰ و ۶۰ گرم با فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متری تا مرکز صفحه تجزیه و تحلیل گردیده است. برای درک بهتر رفتار صفحه‌های هدفمند دارای بازشو، نوع بازشو ( $OT$ )، درصد بازشو ( $OR$ )، موقعیت قرارگیری بازشو

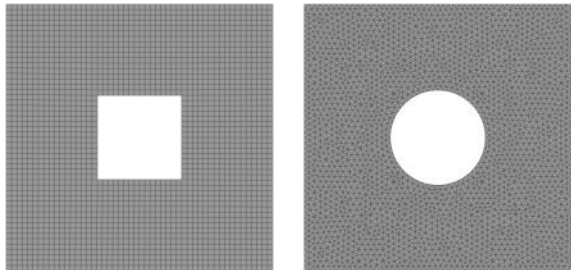
جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه حاصل از

نرم‌افزار ABAQUS و روش عددی در مرجع [۲۲]

| بیشینه تغییر مکان (mm) | N  | ABAQUS | عددی مختلط [۲۲] | خطا (%) |
|------------------------|----|--------|-----------------|---------|
| مرکز صفحه              | ۲  | -۲/۵۳۲ | -۲/۵۹۹          | -۲/۶۱   |
|                        | ۴  | -۲/۵۶۱ | -۲/۵۹۹          | -۲/۴۸   |
|                        | ۶  | -۲/۵۷۱ | -۲/۵۹۹          | -۱/۰۸   |
|                        | ۸  | -۲/۵۷۶ | -۲/۵۹۹          | -۰/۸۸   |
|                        | ۱۰ | -۲/۵۷۹ | -۲/۵۹۹          | -۰/۷۷   |
|                        | ۱۲ | -۲/۵۸۱ | -۲/۵۹۹          | -۰/۷    |
|                        | ۱۴ | -۲/۵۸۲ | -۲/۵۹۹          | -۰/۶۵   |
|                        | ۱۶ | -۲/۵۸۳ | -۲/۵۹۹          | -۰/۶۲   |
|                        | ۱۸ | -۲/۵۸۴ | -۲/۵۹۹          | -۰/۵۹   |
|                        | ۲۰ | -۲/۵۸۵ | -۲/۵۹۹          | -۰/۵۷   |
|                        | ۴۰ | -۲/۵۸۶ | -۲/۵۹۹          | -۰/۴۸   |



بازشوی مربعی در وسط ضلع مربع گزارش شده است. در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان صفحه با درصد بازشوهای مختلف برای ۳ مقدار جرم ماده‌ی منفجره و ۱۰ مقدار درصد بازشو با شرط مرزی گیردار نشان داده شده است.



شکل ۹- نمایش هندسه و شبکه‌بندی صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای (راست) و مربعی (چپ) (OR=۱۰٪)

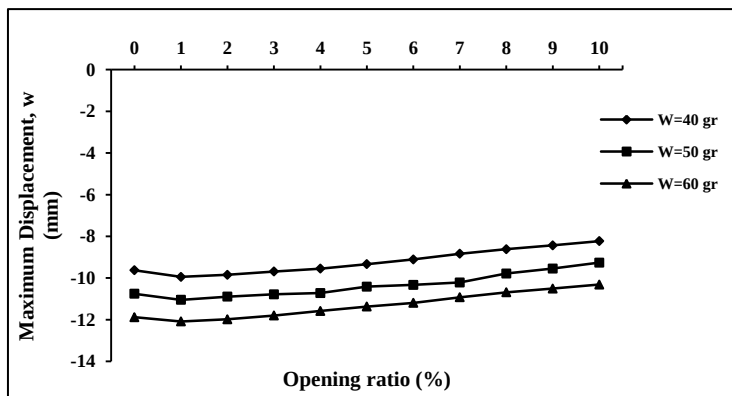
و جرم ماده‌ی TNT مورد توجه قرار گرفته است. درصد بازشو بر اساس نسبت مساحت بازشو به مساحت صفحه (رابطه‌های (۹) و (۱۰))، مقدارهای ۱ تا ۱۰ درصد انتخاب شده است.

$$\text{Circular Opening Ratio} = \frac{A_{\text{opening}}}{A_{\text{plate}}} \times 100 = \frac{\pi r^2}{a^2} \times 100 \quad (9)$$

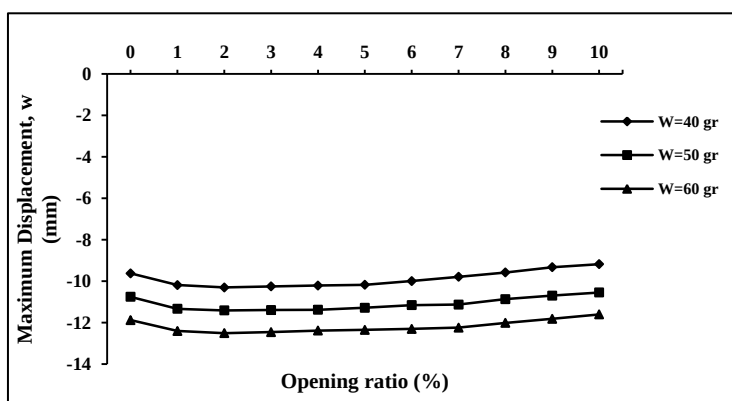
$$\text{Square Opening Ratio} = \frac{A_{\text{opening}}}{A_{\text{plate}}} \times 100 = \frac{e^2}{a^2} \times 100 \quad (10)$$

در این رابطه‌ها،  $A_{\text{opening}}$  مساحت بازشو،  $A_{\text{plate}}$  مساحت صفحه،  $a$  طول ضلع صفحه،  $r$  شعاع بازشوی دایره‌ای و  $e$  ضلع بازشوی مربعی می‌باشد.

در شکل (۹) هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی صفحه‌های دارای بازشو مشاهده می‌شود. مقدار بیشینه تغییر مکان بازشوهای مرکزی برای بازشوی دایره‌ای بر روی محیط دایره و برای

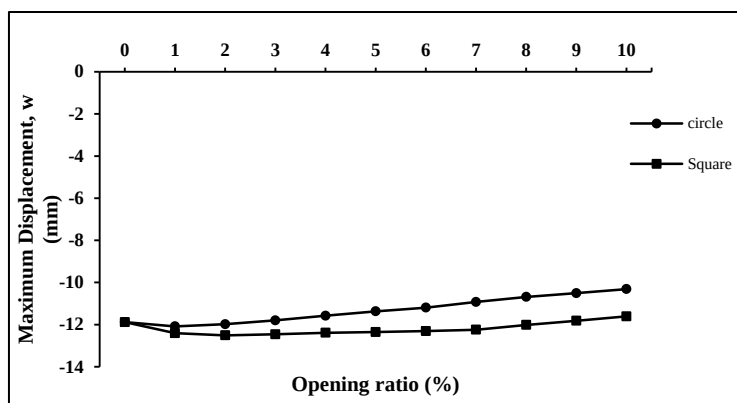


شکل ۱۰- رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان صفحه با درصد بازشوی دایره‌ای با شرط مرزی گیردار



شکل ۱۱- رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان صفحه با درصد بازشوی مربعی با شرط مرزی گیردار

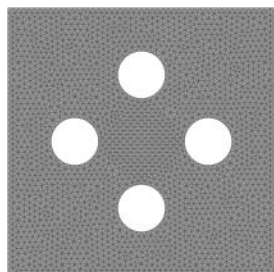




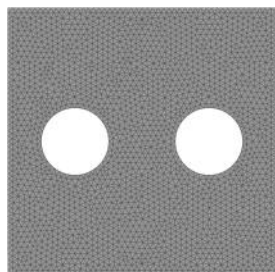
شکل ۱۲- مقایسه‌ی بین بیشینه تغییر مکان صفحه‌ی FGM دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی تحت بار انفجاری ۶۰ گرم

به صفحه‌ی دارای بازشوی مربعی منجر به کاهش سختی بیش‌تر صفحه و افزایش تنش در چهار گوشه‌ی بازشو می‌گردد. در نتیجه، مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه‌ی دارای بازشو مربعی در مقایسه با صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای (با درصد بازشوی یکسان) به میزان بیش‌تری افزایش پیدا می‌کند. به‌عنوان نمونه، با ثابت گرفتن جرم ماده‌ی منفجره، مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه‌های دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی برای درصد بازشوی ۱٪ به ترتیب ۱/۶۸٪ و ۴/۴۱٪ و برای درصد بازشوی ۲٪ به ترتیب ۰/۸۲٪ و ۵/۲۸٪ افزایش یافته است.

به‌منظور بررسی بیش‌تر و دقیق‌تر رفتار صفحه‌های هدفمند دارای بازشو، صفحه‌هایی با تعداد بازشوی بیش‌تر با سطح و درصد بازشوی یکسان و موقعیت قرارگیری متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (شکل‌های (۱۳) تا (۱۶)). برای این کار، صفحه‌ی هدفمند دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی با ۱، ۲ و ۴ بازشو با درصد بازشوی یکسان (۱۰ درصد) مدل‌سازی گردید. مقدار بیشینه تغییر مکان بازشوهایی که در فاصله‌ی یک‌چهارم از مرکز قرار گرفته‌اند، برای هر دو بازشو در مرکز صفحه گزارش شده است



شکل ۱۴- نمایش هندسه‌ی چهار بازشوی دایره‌ای ۲/۵ درصد



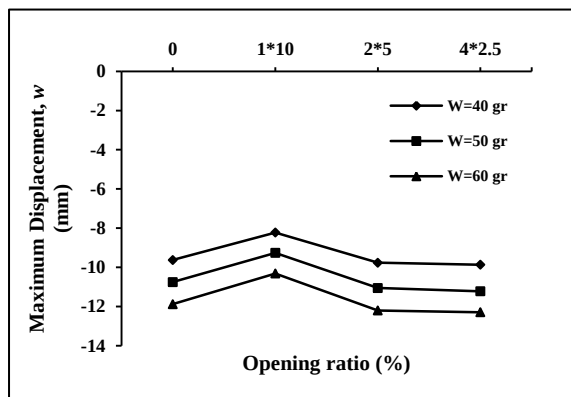
شکل ۱۳- نمایش هندسه‌ی دو بازشوی دایره‌ای ۵ درصد

با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، مشاهده می‌شود که با ایجاد بازشو، مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای نسبت به صفحه‌ی بدون بازشو ابتدا برای درصد بازشوهایی ۱، ۲ و ۳ درصد افزایش و برای درصد بازشوهایی ۴ تا ۱۰ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه‌ی دارای بازشوی مربعی برای درصد بازشوهایی ۱ تا ۷ درصد افزایش و برای درصد بازشوهایی ۸، ۹ و ۱۰ درصد کاهش یافته است. همچنین، با افزایش درصد بازشو برای هر دو نوع بازشو، مقدار تغییر مکان به‌صورت پیوسته کاهش پیدا کرده است. در ابتدا با ایجاد بازشو سختی صفحه کاهش پیدا می‌کند و موج ناشی از انفجار باعث افزایش تغییر مکان صفحه نسبت به صفحه‌ی بدون بازشو می‌گردد. از آنجایی‌که موج انفجار به‌دلیل ماهیت اعمال بار، به سطح بدون بازشوی صفحه وارد می‌شود، هر چه از سطحی که موج به آن اعمال می‌گردد کاسته شود، مقدار بار انفجاری کم‌تری به صفحه وارد می‌شود و در نتیجه مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه کاهش می‌یابد.

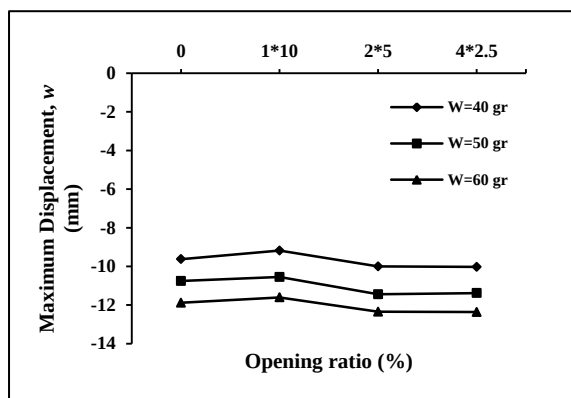
درصد بازشو دارای مقدار حدی می‌باشد، به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای بازشوی دایره‌ای در درصد بازشوی ۱٪ و برای بازشوی مربعی در درصد بازشو ۲٪ رخ می‌دهد. مقایسه‌ی عددی نشان می‌دهد که مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه به ازای مواد منفجره‌ی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ گرم با تغییر درصد بازشو از ۱ به ۱۰ درصد برای صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای به ترتیب ۱۷/۲۶٪، ۱۶/۱۴٪ و ۱۴/۶۲٪ و با تغییر درصد بازشو از ۲ به ۱۰ درصد برای صفحه‌ی دارای بازشوی مربعی به ترتیب ۱۰/۹٪، ۷/۵۶٪ و ۷/۲۱٪ کاهش را نشان داده است.

در مقایسه‌ای بین دو بازشوی دایره‌ای و مربعی (شکل (۱۲))، مشاهده می‌شود که برخورد موج ناشی از انفجار

پشت صفحه (پشت به انفجار) در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۶- رابطه‌ی تغییر مکان صفحه با درصد بازشوهای دایره‌ای با سطح یکسان و موقعیت قرارگیری متفاوت

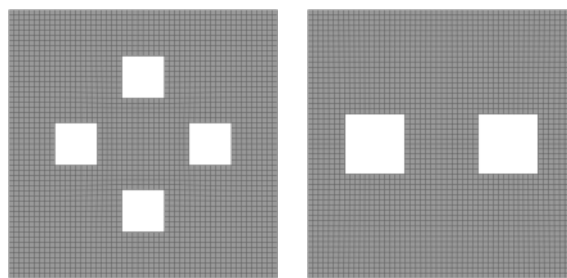


شکل ۱۷- رابطه‌ی تغییر مکان صفحه با درصد بازشوهای مربعی با سطح یکسان و موقعیت قرارگیری متفاوت

جدول ۵- ابعاد هندسی سخت‌کننده‌ها

| نوع سخت‌کننده                       | نماد   | تعداد | ابعاد (mm) |
|-------------------------------------|--------|-------|------------|
| مستطیلی تک <sup>۲۲</sup>            | I (S)  | ۱     | ۱۰۰×۲      |
| مستطیلی دوتایی <sup>۲۳</sup>        | I (D)  | ۲     | ۵۰×۲       |
| مستطیلی متقاطع <sup>۲۴</sup>        | I (C)  | ۲     | ۵۰×۲       |
| مستطیلی دوتایی متقاطع <sup>۲۵</sup> | I (DC) | ۳     | ۳۳×۲       |
| سپری                                | T      | ۱     | ۵۰×۲       |
| نبشی                                | L      | ۱     | ۵۰×۲       |
| ناودانی                             | [      | ۱     | ۵۰×۲۵×۲    |

در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به ترتیب رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند با آرایش مختلف سخت‌کننده‌ی مستطیلی (تک، دوتایی، متقاطع و دوتایی متقاطع) و با انواع مختلف سخت‌کننده‌ها (مستطیلی، سپری، نبشی و ناودانی) از جنس



شکل ۱۵- نمایش هندسی دو شکل ۱۶- نمایش هندسی چهار بازشوی مربعی ۵ درصد بازشوی مربعی ۲/۵ درصد

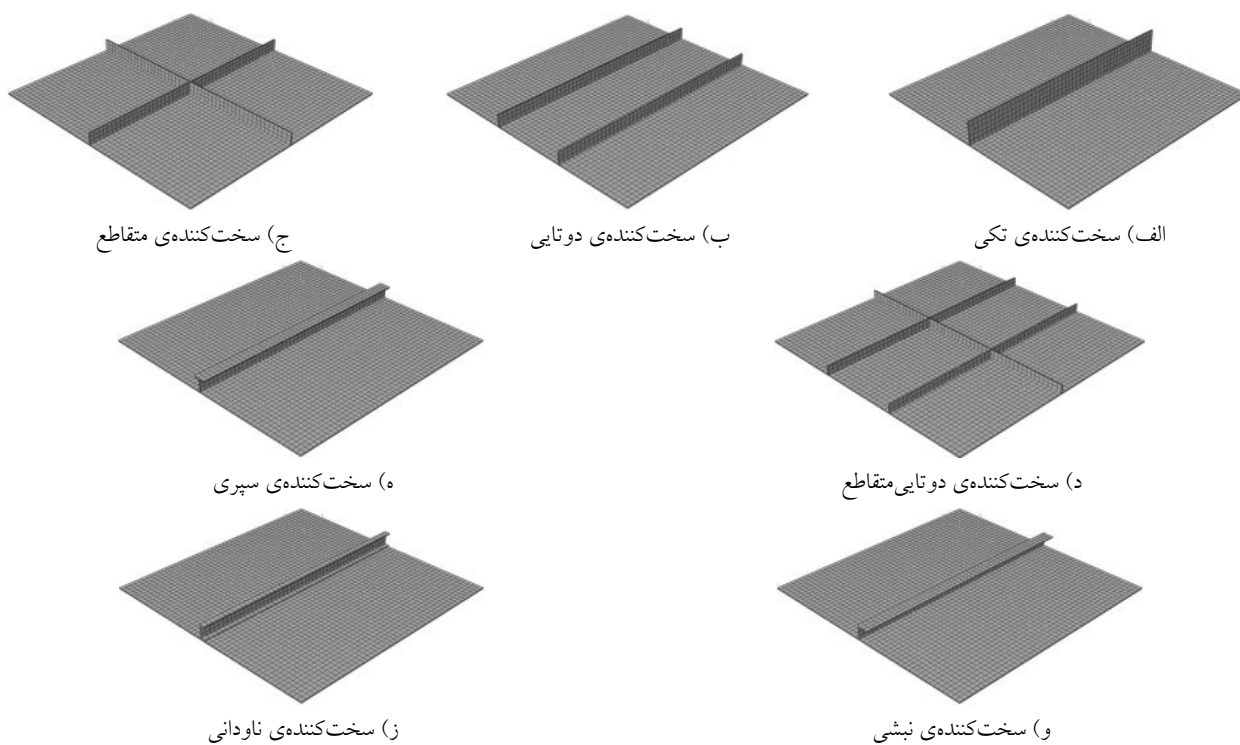
با توجه به شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، مشاهده می‌شود که ایجاد ۱ بازشو ۱۰ درصدی در مرکز صفحه باعث کاهش مقدار بیشینه تغییر مکان صفحه برای هر دو بازشوی دایره‌ای و مربعی می‌گردد. این در حالی است که ایجاد ۲ بازشوی ۵ درصدی و ۴ بازشوی ۲/۵ درصدی در فاصله‌ی یک‌چهارم از مرکز صفحه، منجر به افزایش مقدار بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه می‌گردد. به عنوان مثال، برای ماده‌ی منفجره ۴۰ گرم در صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای، ایجاد ۱ بازشو ۱۰ درصدی باعث کاهش ۱۴/۵۲ درصدی تغییر مکان می‌گردد، در حالی که ایجاد ۲ بازشوی ۵ درصدی و ۴ بازشوی ۲/۵ درصدی به ترتیب منجر به افزایش ۱/۴۸ و ۲/۵۳ درصدی تغییر مکان می‌شود. همچنین، در صفحه‌ی دارای بازشوی مربعی، ایجاد ۱ بازشوی ۱۰ درصدی باعث کاهش ۴/۶۱ درصدی، ایجاد ۲ بازشوی ۵ درصدی و ۴ بازشوی ۲/۵ درصدی به ترتیب منجر به افزایش ۳/۹۴ و ۴/۲ درصدی بیشینه تغییر مکان گردیده است.

## ۵- صفحه‌های FGM دارای سخت‌کننده

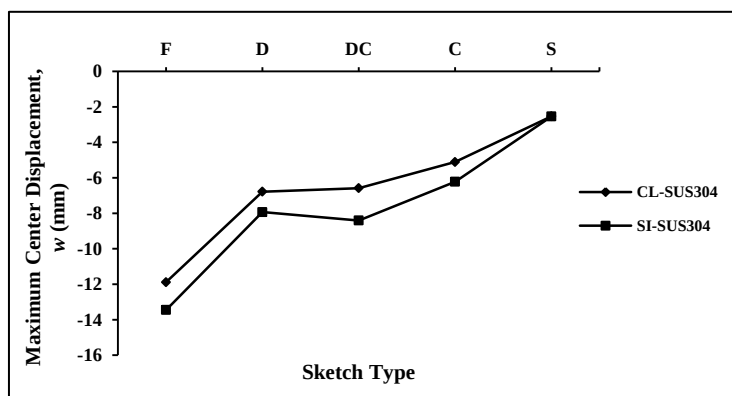
به منظور ارزیابی رفتار صفحه‌های FGM دارای سخت‌کننده، صفحه‌ی مربعی با شاخص توان حجمی ( $n$ ) برابر ۱ تحت بار انفجاری ۶۰ گرم با فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، آرایش و ابعاد انواع سخت‌کننده‌ها در جدول (۵) آورده شده است. سخت‌کننده‌ها دارای سطح مقطع یکسان و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر بوده و نوع ماده‌ی استفاده شده برای آن‌ها، به دلیل مقاومت کشسانی بالای فلز، استاینلس استیل انتخاب شده است. در شکل (۱۹) هندسه، نحوه‌ی شبکه‌بندی و آرایش مختلف سخت‌کننده‌ها مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر، به منظور جلوگیری از ایجاد تنش‌های فشاری و کماتش لبه‌ی آزاد سخت‌کننده و نیز به منظور تقلیل مقدار تغییر مکان در هنگام انفجار، سخت‌کننده‌ها در قسمت

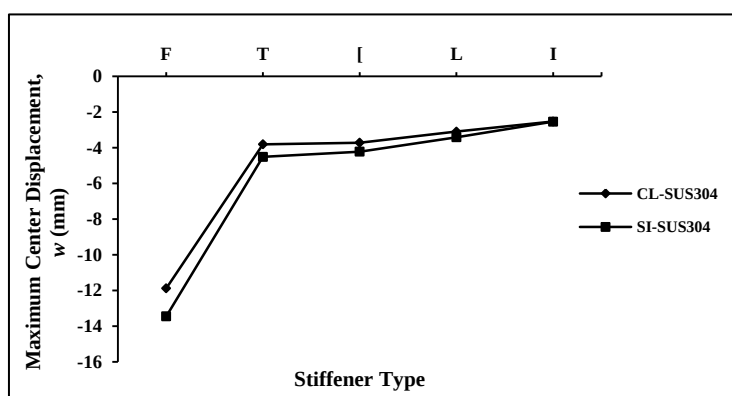




شکل ۱۹- نمایش هندسه و نحوه ی شبکه بندی صفحه ی تقویت شده با انواع سخت کننده ها



شکل ۲۰- رابطه ی بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه با آرایش مختلف سخت کننده ی مستطیلی با شرط مرزی گیردار



شکل ۲۱- رابطه ی بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه با انواع مختلف سخت کننده با شرط مرزی گیردار

ماده‌ی استاینلس استیل برای دو شرط مرزی گیردار و ساده نشان داده شده است. یافته‌ها مبین آن است که برای هر دو شرط مرزی، صفحه‌ی دارای سخت‌کننده‌ی مستطیلی تک در بین چهار آرایش دیگر سخت‌کننده‌ی مستطیلی با حجم یکسان به دلیل بیش‌تر بودن لنگر لختی آن، دارای کم‌ترین تغییر مکان می‌باشد. همچنین، در بررسی انواع مختلف سخت‌کننده‌ها با سطح مقطع یکسان، مشاهدات حاکی بر عملکرد بهتر سخت‌کننده‌ی مستطیلی نسبت به سایر سخت‌کننده‌ها در کاهش مقدار تغییر مکان صفحه می‌باشد. به همین دلیل سخت‌کننده‌ی نوع مستطیلی مؤثرتر، اجرایی‌تر و مقرون به صرفه‌تر از دیگر سخت‌کننده‌ها می‌باشد. البته می‌توان با تغییر ابعاد سایر مقاطع نظیر بخش بال و جان سخت‌کننده‌ی سپری به نتایج بهتری

دست یافت. در جدول (۶) مقدار کاهش تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند، به ازای مقدار ماده‌ی منفجره‌ی برابر ۶۰ گرم با شرط مرزی گیردار برای آرایش و انواع مختلف سخت‌کننده‌ها نشان داده شده است.

در بررسی رفتار کلیه‌ی صفحه‌های تقویت‌شده با شرایط مشابه قبل، می‌توان عملکرد بهتر شرط مرزی گیردار نسبت به شرط مرزی ساده را اذعان داشت. به‌طوری‌که با تغییر شرط مرزی از ساده به گیردار، مقدار بیشینه تغییر مکان مرکز صفحه برای سخت‌کننده‌های مستطیلی تک، نبشی، ناودانی، مستطیلی دوتایی، سپری، مستطیلی متقاطع و دوتایی متقاطع به ترتیب ۰/۴۱٪، ۹/۳۵٪، ۱۱/۹۶٪، ۱۴/۴۹٪، ۱۵/۵۶٪، ۱۷/۹۱٪ و ۲۱/۷٪ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶- درصد کاهش مقدار تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند با استفاده از سخت‌کننده

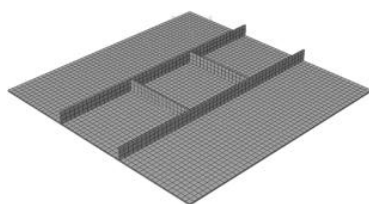
| نوع سخت‌کننده  | مستطیلی تک | نبشی  | ناودانی | سپری  | مستطیلی متقاطع | مستطیلی دوتایی متقاطع | مستطیلی دوتایی |
|----------------|------------|-------|---------|-------|----------------|-----------------------|----------------|
| میزان کاهش (%) | ۷۸/۶۹      | ۷۳/۹۲ | ۶۸/۶۹   | ۶۷/۹۲ | ۵۷/۰۲          | ۴۴/۶۰                 | ۴۲/۹۱          |

## ۶- صفحه‌های FGM دارای بازشو و سخت‌کننده

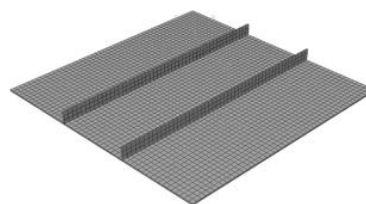
به‌منظور ارزیابی رفتار دینامیکی صفحه‌های FGM دارای بازشو و سخت‌کننده تحت بارهای انفجاری، صفحه‌ی مربعی با شاخص توان حجمی (n) برابر ۱ تحت بار انفجاری ۶۰ گرم با فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این بخش، اثر توأم بازشو و سخت‌کننده، درصد بازشو، نوع و آرایش سخت‌کننده و شرایط مرزی بررسی شده است. صفحه‌ها با و بدون بازشو با استفاده از سخت‌کننده‌های مستطیلی دوتایی

(D) و دوتایی متقاطع (DC) با ارتفاع ۵۰ و ضخامت ۶ میلی‌متر تقویت شده‌اند. مقدارهای ۵ و ۱۰ درصد برای بازشوهای مرکزی انتخاب شده است.

در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی صفحه‌های هدفمند با و بدون بازشو و سخت‌کننده نشان داده شده است. برای مدل‌سازی این‌گونه صفحه‌ها از جزء پوسته‌ای چهاروجهی چهارگره‌ی (S4R) استفاده و نوع ماده‌ی سخت‌کننده استاینلس استیل انتخاب شده است.

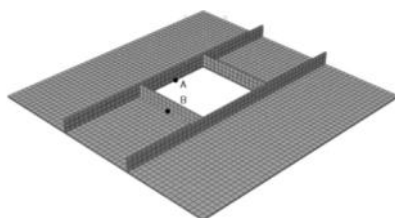


ب) سخت‌کننده‌ی دوتایی متقاطع

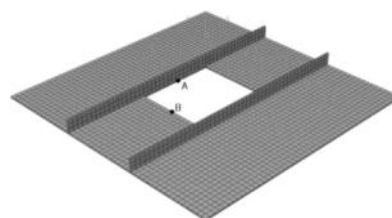


الف) سخت‌کننده‌ی دوتایی

شکل ۲۲- نمایش هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی صفحه‌ی بدون بازشو و دو سخت‌کننده



ب) سخت‌کننده‌ی دوتایی متقاطع



الف) سخت‌کننده‌ی دوتایی

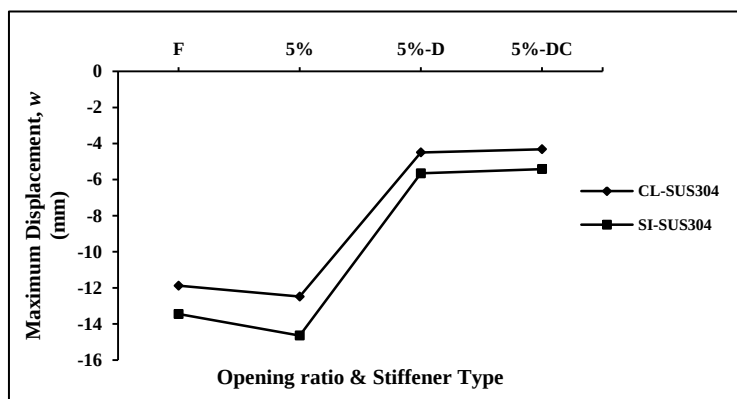
شکل ۲۳- نمایش هندسه و نحوه‌ی شبکه‌بندی صفحه‌ی با بازشو و دو سخت‌کننده



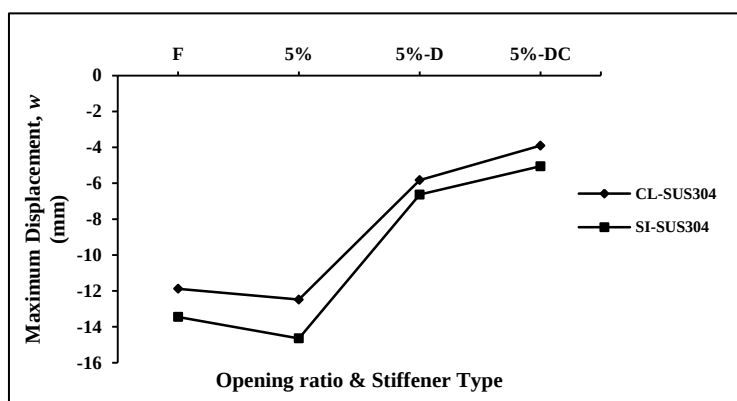
۶۱/۴۱٪ تا ۶۵/۴۰٪ و در نقطه‌ی B بین ۵۳/۳۵٪ تا ۶۸/۷۳٪ کاهش داد.

در بررسی اثر آرایش سخت‌کننده در اطراف بازشو مشاهده شد که با تغییر آرایش سخت‌کننده (از دوتایی (D) به دوتایی متقاطع (DC)) برای هر دو حالت شرط مرزی، مقدار بیشینه تغییر مکان در هر دو نقطه‌ی A و B کاهش یافته است. اما این کاهش در نقطه‌ی B نسبت به نقطه‌ی A بیش‌تر بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن سخت‌کننده در اطراف بازشو می‌توان مقدار بیشینه تغییر مکان را کاهش داد. برای نمونه، مقدار بیشینه تغییر مکان به ازای مقدار ماده‌ی منفجره‌ی ۶۰ گرم و شرط مرزی گیردار با تغییر آرایش سخت‌کننده از دوتایی به دوتایی متقاطع در نقطه‌های A و B به ترتیب به میزان ۳/۹۴٪ و ۳۲/۹۸٪ کاهش پیدا کرده است.

در صفحه‌های دارای بازشو و سخت‌کننده، به‌منظور بررسی تأثیر اضافه کردن سخت‌کننده در اطراف بازشو، مقدار بیشینه تغییر مکان در نقطه‌های A (وسط وجه عمودی بازشو) و B (وسط وجه افقی بازشو) در نظر گرفته شده است (شکل (۲۳)). در این بررسی، از دو درصد بازشوی ۵٪ و ۱۰٪ استفاده گردیده است. با توجه به شکل‌های (۲۴) و (۲۵) دیده می‌شود که به ازای مقدار ماده‌ی منفجره‌ی مشخص، ایجاد بازشو باعث افزایش تغییر مکان شده است. از این رو، می‌توان با اضافه کردن سخت‌کننده در اطراف بازشو مقدار بیشینه تغییر مکان در نقطه‌های A و B بازشو را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. به‌عنوان نمونه، با ایجاد بازشوی ۵٪ مقدار بیشینه تغییر مکان ۵/۰۵٪ افزایش می‌یابد. لذا با افزودن سخت‌کننده از جنس استاینلس استیل می‌توان مقدار تغییر مکان را در نقطه‌ی A بین



شکل ۲۴- رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان نقطه‌ی A با انواع سخت‌کننده و درصد بازشو با شرط مرزی گیردار



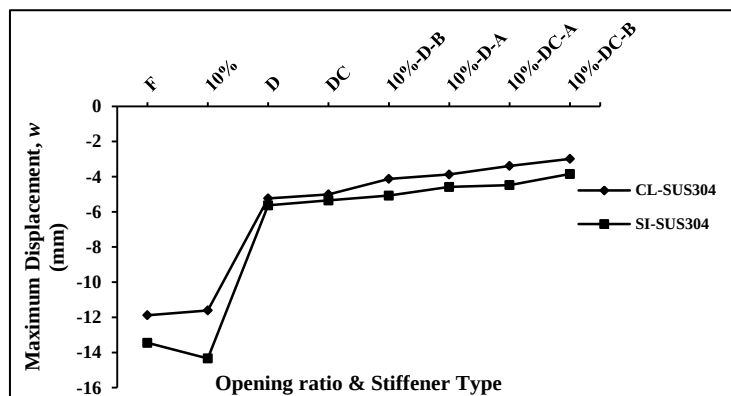
شکل ۲۵- رابطه‌ی بیشینه تغییر مکان نقطه‌ی B با انواع سخت‌کننده و درصد بازشو با شرط مرزی گیردار

تغییر مکان صفحه را نسبت به صفحه‌ی بدون بازشو و بدون سخت‌کننده و حتی نسبت به صفحه‌ی دارای بازشو و صفحه‌ی دارای سخت‌کننده کاهش داد (شکل (۲۶)). مقایسه‌ی عددی نشان می‌دهد که با استفاده از سخت‌کننده‌ی دوتایی متقاطع با

در مقایسه‌ای دیگر بین صفحه‌ی هدفمند بدون بازشو و سخت‌کننده با صفحه‌های هدفمند دارای بازشو، دارای سخت‌کننده و دارای بازشو و سخت‌کننده مشاهده گردید که می‌توان با ایجاد بازشو و استفاده از سخت‌کننده‌ی مناسب، مقدار

سخت‌کننده‌ی دوتایی ۵۵/۹۴٪، تقویت‌شده با سخت‌کننده‌ی دوتایی متقاطع ۵۷/۸۴٪، اثر توأم بازشوی ۱۰٪ و سخت‌کننده‌ی دوتایی در نقطه‌ی A و B به ترتیب ۶۵/۲۹٪ و ۶۷/۳۹٪ و اثر توأم بازشوی ۱۰٪ و سخت‌کننده‌ی دوتایی متقاطع در نقطه‌ی A و B به ترتیب ۷۱/۴۹٪ و ۷۴/۸۴٪ کاهش پیدا کرده است.

جنس استاینلس استیل همراه با بازشو می‌توان مقدار بیشینه تغییرمکان را بین ۷۱/۳۹٪ تا ۷۴/۸۴٪ نسبت به صفحه‌ی بدون بازشو و سخت‌کننده کاهش داد. برای نمونه، مقدار بیشینه تغییرمکان صفحه‌ی هدفمند بدون بازشو و سخت‌کننده به ترتیب با ایجاد بازشوی ۱۰ درصدی ۲/۳۱٪، تقویت‌شده با



شکل ۲۶- مقایسه‌ی بیشینه تغییرمکان صفحه‌های هدفمند با و بدون بازشو و سخت‌کننده تحت بار انفجاری ۶۰ گرم

انفجار به صفحه‌ی دارای بازشوی مربعی منجر به کاهش سختی بیش‌تر صفحه و افزایش تنش در چهار گوشه‌ی بازشو می‌گردد. در نتیجه، مقدار بیشینه تغییرمکان صفحه‌ی دارای بازشو مربعی در مقایسه با صفحه‌ی دارای بازشوی دایره‌ای (با درصد بازشوی یکسان) به میزان بیش‌تری افزایش پیدا می‌کند.

- به‌منظور بررسی بیش‌تر و دقیق‌تر رفتار صفحه‌های هدفمند دارای بازشو، صفحه‌هایی با تعداد بازشوی بیش‌تر با سطح و درصد بازشوی یکسان و موقعیت قرارگیری متفاوت بررسی شد. نتایج نشان داد که ایجاد ۱ بازشو ۱۰ درصدی در مرکز صفحه باعث کاهش مقدار بیشینه تغییرمکان صفحه برای هر دو بازشوی دایره‌ای و مربعی می‌گردد. این در حالی است که ایجاد ۲ بازشوی ۵ درصدی و ۴ بازشوی ۲/۵ درصدی در فاصله‌ی یک‌چهارم از مرکز صفحه، منجر به افزایش مقدار بیشینه تغییرمکان مرکز صفحه شده است.

- در ادامه روند پژوهش حاضر، ارزیابی سخت‌کننده‌ها بر صفحه‌های هدفمند نیز از دو وجه سنجیده شده است. نتایج این بررسی، نخست برای چهار آرایش از سخت‌کننده‌های مستطیلی (سخت‌کننده‌ی تک، دوتایی، متقاطع و دوتایی متقاطع) در شرایط یکسان بودن حجم، حاکی بر آن است که سخت‌کننده‌ی مستطیلی تک به‌دلیل ارتفاع بیش‌تر، دارای لنگر لختی بیش‌تری بوده که این مسئله نیز تغییرمکان صفحه را تعدیل و کم‌تر نموده و عملکرد بهتری را نسبت به سه حالت دیگر

## ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی تأثیر انواع بازشو و سخت‌کننده بر روی پاسخ دینامیکی غیرخطی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شد. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی صفحه‌های هدفمند، نخست، خواص هر نقطه از صفحه با استفاده از رابطه‌های حاکم بر مواد FGM محاسبه شد و سپس، صفحه‌ها با استفاده از روش چندلایه‌ی معادل به‌صورت گیردار و ساده مدل‌سازی گردید. برای این کار، اثر بازشوها و سخت‌کننده‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

- نتایج ناشی از ارزیابی رفتار صفحه‌های هدفمند دارای بازشو بر مبنای نوع و درصد بازشو، حاکی بر رفتار غیر یکسان آن‌ها در این صفحه‌ها می‌باشد. بازشوهای دایره‌ای از ۱ تا ۳ درصد روندی نازل بر استحکام و رفتار صفحه بر جای گذاشته است. این در حالی است که بازشوهای مربعی از ۱ تا ۷ درصد همین رفتار منفی را بر صفحه داشته است. این مهم نشان از مناسب بودن بازشوهای دایره‌ای در مقابل مربعی می‌باشد. پس از این رفتار نزولی، بازشوهای دایره‌ای از ۴ تا ۱۰ درصد و بازشوهای مربعی از ۸ تا ۱۰ درصد با بزرگ‌تر شدن سطح بازشو و به‌دنبال آن کاهش سطح اعمال بار، سبب بهبود رفتار صفحه‌های هدفمند شده‌اند. همچنین، در قیاسی دیگر میان دو بازشوی دایره‌ای و مربعی می‌توان چنین اذعان داشت که برخورد موج ناشی از





- [6] Koizumi, M. (1997), "FGM Activities in Japan", Composites Part B: Engineering, Vol. 28, No. 1-2, pp. 1-4.
- [7] Taylor, G. (1950), "The Distortion under Pressure of a Diaphragm which is Clamped Along its Edge and Stressed beyond the Elastic Limit", Underwater Explosion Research, Vol. 3, pp. 107-121.
- [8] Witmer, E.A. Balmer, H.A. Leech, J.W. and Pian, T.H. (1963), "Large Dynamic Deformations of Beams, Rings, Plates and Shells", American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, Vol. 1, No. 8, pp. 1848-1857.
- [9] Nurick, G. and Martin, J. (1989), "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.
- [10] Neuberger, A. Peles, S. and Rittel, D. (2007), "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.
- [11] Yuen, S.C.K. and Nurick, G. (2005), "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.
- [12] Langdon, G.S. Yuen, S.C.K. and Nurick, G.N. (2005), "Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates, Part II: Localized Blast Loading", International Journal of Impact Engineering, Vol. 31, pp. 85-111.
- [13] Pan, Y. and Louca, L.A. (1999), "Experimental and Numerical Studies on the Response of Stiffened Plates Subjected to Gas Explosion", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 52, pp. 171-193.
- [14] Park, B. and Cho, S. (2006), "Simple Design Formulae for Predicting the Residual Damage of Unstiffened and Stiffened Plates under Explosion Loadings", International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 10, pp. 1721-1736.
- [15] Li, G. Chen, Z. Deng, F. and Eckoff, R.K. (2002), "Explosion Resistance of a Square Plate with a Square Hole", Journal of Physics, Vol. 12, pp. 121-124.
- [16] Langdon, G. Rossiter, I. Balden, V. and Nurick, G. (2010), "Performance of Mild Steel Perforated Plates as a Blast Wave Mitigation Technique: Experimental and Numerical Investigation", International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 10, pp. 1021-1036.
- [17] Nouri, Y. (2015), "Analysis of Plates with Opening and Stiffener Subjected to Blast Loads", Master of Science Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
- [18] Kazanci, Z. Mecitoğlu, Z. and Hacıoğlu, A. (2004), "Effect of In-Plane Stiffnesses and Inertias on Dynamic Behavior of A Laminated Composite Plate under Blast Load", Proceedings of Ninth Biennial ASCE Aerospace Division International Conference in Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments: Earth and Space 2004, pp. 484-491.
- [19] Türkmen, H. and Mecitoğlu, Z. (1999), "Dynamic Response of A Stiffened Laminated Composite Plate Subjected to Blast Load", Journal of Sound and Vibration, Vol. 221, No. 3, pp. 371-389.
- [20] Praveen, G.N. and Reddy, J.N. (1998), "Nonlinear Transient Thermoelastic Analysis of Functionally Graded Ceramic-Metal Plates", International Journal of Solids and Structures, Vol. 35, No. 33, pp. 4457-4476.
- [21] Hause, T. (2011), "Advanced Functionally Graded Plate-Type Structures Impacted by Blast Loading", International Journal of Impact Engineering, Vol. 38, No. 5, pp. 314-321.

به همراه داشته است. حال آنکه در ارزیابی دیگر، سخت‌کننده‌ی مستطیلی تک با سخت‌کننده‌های سپری، نبشی و ناودانی با شرایط یکسان بودن سطح مقطع و موقعیت قرارگیری بر صفحه، قیاس شده‌اند. باید اذعان داشت که در این بررسی نیز سخت‌کننده‌ی مستطیلی بهترین عملکرد را به همراه داشته است، ولی لازم به ذکر است که می‌توان با تغییر ابعاد سایر مقاطع نظیر بخش بال و جان سخت‌کننده‌ی سپری (افزایش جان سخت‌کننده) به نتایج بهتری دست یافت.

- در نهایت پس از بررسی هر یک از عامل‌های بازشو و سخت‌کننده بر روی رفتار صفحه‌ی هدفمند، حال می‌توان تأثیرات توأم این عامل‌ها را چنین تفسیر نمود. از آنجایی‌که ایجاد بازشو باعث افزایش مقدار تغییر مکان می‌شود، می‌توان با اضافه کردن سخت‌کننده در اطراف بازشو، مقدار بیشینه تغییر مکان در نقطه‌های A (وسط وجه عمودی بازشو) و B (وسط وجه افقی بازشو) را به میزان قابل ملاحظه‌ای کم نمود. همچنین، در بررسی اثر آرایش سخت‌کننده در اطراف بازشو می‌توان با تغییر آرایش سخت‌کننده (از دوتایی به دوتایی متقاطع) برای هر دو حالت شرط مرزی، مقدار بیشینه تغییر مکان در دو نقطه‌ی A و B را کاهش داد، اما این کاهش در نقطه‌ی B نسبت به نقطه‌ی A بیش‌تر بوده است که این نتیجه‌ی اضافه کردن سخت‌کننده در اطراف بازشو می‌باشد.

- در مقایسه‌ای دیگر بین صفحه‌ی هدفمند با و بدون بازشو و سخت‌کننده مشاهده شد که می‌توان با ایجاد بازشو و استفاده از سخت‌کننده‌ی مناسب، مقدار تغییر مکان صفحه را نسبت به صفحه‌ی بدون بازشو و بدون سخت‌کننده و حتی نسبت به صفحه‌ی دارای بازشو و صفحه‌ی دارای سخت‌کننده کاهش داد.

#### ۸- مراجع

- [1] Naserian, A. and Tahani, M. (2009), "Static Analysis of Laminated Composite Plates with Piezoelectric Layers", Journal of Engineering Faculty of Ferdowsi University, Vol. 43, No. 4, pp. 582-566. (In Persian)
- [2] Jabbarzadeh, M. Eskandari Jam, J. and Khosravi, M. (2012), "The Analysis of Thermal Buckling of Circular Plates of Variable Thickness from Functionally Graded Materials", Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 59-73. (In Persian)
- [3] Jabbarzadeh, M. and Baghdar Delgosha, M. K. (2013), "Thermal Buckling Analysis of FGM Sector Plates using Differential Quadrature Method", Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 33-45. (In Persian)
- [4] Djahani, P. (1977), "Large-Deflection Elasto-Plastic Analysis of Discretely Stiffened Plates", Ph.D. Thesis, London, Imperial College.
- [5] Pelletier, J.L. (2005), "Thermoelastic Analysis and Optimization of Functionally Graded Plates and Shells", Master of Science Thesis, University of Maine.





[25] Huang, X.L. and Shen, H.S. (2004), "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.

[26] Dusenberry, O.D., (2010), "Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings", John Wiley & Sons Inc, Canada.

[27] Kinney, G.F. and Graham. K.J., (1985), "Explosive Shocks in Air", Second Edition, Springer Berlin Heidelberg, New York.

[28] Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14., (2014), Dassault Systemes Simulia Crop.: Providence, RI, USA.

[22] Aksoylar, C. Ömercikoglu, A. Mecitoğlu, Z. and Omurtag, M.H. (2012), "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.

[23] Duc, N.D. Tuan, N.D. Tran, Ph. and Quan, T.Q. (2016), "Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Imperfect Shear Deformable Functionally Graded Plates Subjected to Blast and Thermal Loads", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 24, No. 4, pp. 318-329.

[24] Touloukian, Y.S. (1967), "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials", NY: MacMillan.

## پی نوشت

- <sup>1</sup> Functionally graded material
- <sup>2</sup> Stiffener
- <sup>3</sup> Discretely stiffened plates theory
- <sup>4</sup> Galerkin
- <sup>5</sup> Runge-Kutta
- <sup>6</sup> Fiber-metal laminate
- <sup>7</sup> Reddy
- <sup>8</sup> Power law distribution
- <sup>9</sup> Deflagration
- <sup>10</sup> Detonation
- <sup>11</sup> Peak overpressure
- <sup>12</sup> Time duration explosion
- <sup>13</sup> Impulse
- <sup>14</sup> Decay
- <sup>15</sup> Hopkinson-Cranz
- <sup>16</sup> Shell
- <sup>17</sup> ConWep
- <sup>18</sup> Stainless steel (SUS304)
- <sup>19</sup> Silicon Nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
- <sup>20</sup> Opening type
- <sup>21</sup> Opening ratio
- <sup>22</sup> Single
- <sup>23</sup> Double
- <sup>24</sup> Cross
- <sup>25</sup> Double cross

