

پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی صفحه‌های هدفمند فلزی - سرامیکی تحت بارگذاری انفجار

رضا جمعه منظری^۱، فرزاد شهابیان مقدم^{۲*}

۱- کارشناس ارشد عمران گرایش سازه، فارغ‌التحصیل دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

FGM ها یا مواد هدفمند گونه‌ای از مواد مرکب هستند که تغییرات تدریجی خواص مواد را از سطحی به سطح دیگر نشان می‌دهند. با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده، مواد هدفمند خواص مکانیکی مؤثرتری نسبت به مواد مرکب چندلایه دارا می‌باشند که این منجر به از بین رفتن تمرکز تنش بین لایه‌ای می‌شود. بیش‌ترین کاربرد این مواد در سازه‌های جدار نازک نظیر صفحه‌ها و پوسته‌ها می‌باشد. صفحه‌ها به دلیل سطح گسترده و ضخامت کم، در برابر بارهای انفجاری از یک سو دارای مقاومت کمی هستند و از سوی دیگر، تغییر مکان‌های زیادی پیدا می‌کنند. از این رو، بهره‌گیری از صفحه‌های هدفمند به دلیل ساختار مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها که از یک توزیع توانی در راستای ضخامت برخوردار است، باعث بهبود مقاومت و کاهش تغییر مکان خواهد شد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود *Abaqus* به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی صفحه‌های هدفمند استاینلس استیل - سیلیکون نیتريد تحت بارهای انفجاری پرداخته شده است. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، نسبت ابعاد صفحه، ضخامت صفحه، مقدار ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی آن و نیز اثر مقیاس ریلیکا همراه با مقیاس هوپکینسون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که با افزایش شاخص توان حجمی (از صفر تا بی‌نهایت)، افزایش فاصله‌ی مرکز انفجار تا صفحه (از ۵۰۰ به ۹۰۰ میلی‌متر) و افزایش ضخامت صفحه (از ۶ به ۱۸ میلی‌متر)، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان صفحه به ترتیب ۲۹/۱٪، ۴۳/۶۴٪ و ۸۷/۷۴٪ کاهش پیدا کرده است. از سوی دیگر، با بزرگ‌تر شدن نسبت ابعاد صفحه (از ۱ به ۲) و افزایش مقدار ماده‌ی منفجره (از ۵ به ۲۵ گرم)، بیشینه‌ی تغییر مکان صفحه به ترتیب ۱/۰۶ و ۳/۰۹ برابر شده است. همچنین، مشاهده شد که تغییر خواص مواد در راستای ضخامت صفحه هیچ تأثیری بر روی مقیاس‌گذاری ندارد.

کلمات کلیدی: مواد هدفمند، صفحه‌ی *FGM*، شاخص توان حجمی، پاسخ غیرخطی هندسی، بارگذاری انفجار.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.120873.1482	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.120873.1482	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۳/۲۶	۱۳۹۶/۱۲/۱۰
فرزاد شهابیان مقدم			*نویسنده مسئول:		
shahabf@um.ac.ir			پست الکترونیکی:		

The Geometrically Nonlinear Dynamic Response of Metal-Ceramic FGM Plates under the Blast Loading

Reza Jome Manzari¹, Farzad Shahabian Moghaddam^{2*}

¹- Graduated in Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^۲- Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Functionally Graded Materials (FGMs) are kinds of composite materials which exhibit continuous variation of material properties from one surface to another. With regard to the continuity of mixture of constituent materials, FGMs have more effective mechanical properties compared to laminated composite materials, which leads to eliminate the interlayer stress concentration. The most common usage of such materials is in thin-wall structures, such as plates and shells. Plates due to their extensive surface and low thickness, not only have low resistance against the blast loads, but also experience large displacements. Hence, utilizing FGM plates because of their constituents materials which have a power distribution in the direction of thickness, will lead to resistance improvement and displacement reduction. In this research, ABAQUS finite element software has been used to study geometric nonlinear dynamic response of Stainless steel-Silicon nitride FGM plates against the blast loads. The effect of volume fraction index, plate aspect ratio, plate thickness, the amount of explosive material and its distance and also the effect of Replica scale with Hopkinson scale are investigated in this study. The results show that with rising in the volume fraction index (from zero to infinity), increasing in the distance of explosion center to the plate (from 500mm to 900mm) and plate thickness (from 6mm to 18mm), the maximum amount of displacement of the plate have decreased by %29/1, %43/64 and %87/74 respectively. On the other hand, by expansion of the plate dimensions ratio (from 1 to 2) and increasement in the amount of explosive material (from 5 to 25gr), the maximum displacement of the plate have increased by 1/06 and 3/09 respectively. Also, it has been observed that changes in materials properties along with plate thickness don't have any effect on scaling.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.120873.1482

*Corresponding author: Farzad Shahabian Moghaddam
Email address: shahabf@um.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 01 March 2018

Revised: 16 June 2018

Accepted: 12 July 2018

Keywords:

Functionally Graded Materials
FGM plate
Volume fraction index
Geometric nonlinear response
Blast loading

۱- مقدمه

انفجار ناشی از مواد منفجره هم می‌تواند مفید و مؤثر و هم مخرب و ویران‌کننده باشد. وقوع انفجار از یک سو، باعث بروز صدمه‌های جانی و مالی ساکنین و از سوی دیگر، باعث خسارت و خرابی سازه‌ها می‌شود. باید این را هم مد نظر داشت که بدون وقوع انفجار، تونل‌های بزرگ، معادن، کانال‌ها و آبراهه‌های مهم وجود نداشتند. تمام هنر مهندسی این است که در انفجارهای کنترل‌شده و نشده، تخریب و تلفات را به حداقل ممکن کاهش دهد. صفحه‌ها در ساخت سازه‌های صنعتی و نظامی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود اعضای صفحه‌گونه در سازه‌ها به دلیل سطح گسترده و ضخامت کم، آن‌ها را مستعد تغییر مکان‌های زیاد و غیرخطی در اثر بارهای دینامیکی ناشی از انفجار می‌سازد. در علوم مهندسی، مواد هدفمند به طور متعارف شامل دو نوع فاز از مواد همسانگرد می‌باشند. یکی از ساختارهای رایج این مواد متشکل از دو فاز مواد فلزی و آلیاژهای وابسته به آن نظیر فلزهایی هم‌چون استاینلس استیل، آلومینیم، منیزیم، مس، تیتانیوم، تنگستن و فولاد و مواد سرامیکی نظیر سیلیکون نیترید، زیرکونیا، آلومین، سیلیکون کاربید و کاربید تنگستن است. پژوهش بر روی ماده‌ی هدفمند (از نوع فلز - سرامیک) نشان داده است که خاصیت مقاومت حرارتی بالا در سرامیک، سد حرارتی مناسبی را در درجه‌های حرارتی بالا ایجاد می‌کند و خاصیت سختی فلز و مقاومت کشسانی بالای آن، پوشش مقاوم خوبی در برابر ضربه به‌شمار می‌رود. بدین ترتیب نیاز به استفاده از این دو ماده به‌صورت هم‌زمان، به‌سوی اختلاط آن مواد سوق داده می‌شود [۱]. مواد هدفمند از نوع مواد مرکبی هستند که به‌صورت میکروسکوپی دارای تغییرات تدریجی خصوصیات مواد در راستاهای مختلف می‌باشند. دستیابی به ساخت یک ماده‌ی مرکب که در راستاهای مختلف تغییرات تدریجی داشته باشد، وابسته به توزیع حجم مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن است. 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 [۲]. از این رو، مطالعه‌ی رفتار صفحه‌های FGM تحت اثر بارهای انفجاری در درک و شناسایی هر چه بهتر رفتار سازه‌های ساخته‌شده از اجزای ورق‌گونه ضروری به‌نظر می‌رسد.

پژوهش‌ها و مطالعه‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی ماهیت پدیده‌ی انفجار و اثر بارهای انفجاری بر روی رفتار صفحه‌های گوناگون نظیر صفحه‌های ساده و مرکب چندلایه انجام شده است؛ اما بررسی اثر پدیده‌ی انفجار بر روی صفحه‌های ساخته‌شده از مواد هدفمند اندک می‌باشد. اولین مطالعه‌ها در زمینه‌ی رفتار مومسان سازه‌ها تحت اثر بارهای انفجاری را می‌توان در مقاله‌های مروری جونز^۱ [۳-۶] و سیموندز^۲ [۷] یافت. اولین پژوهشگری که به بررسی آزمایشگاهی و نظری اثر انفجار بر صفحه‌ها پرداخت، تیلور^۳ [۸] بود. پژوهش در مورد اثر انفجار در هوا بر روی صفحه‌ها، به‌صورت آزمایشگاهی توسط بالمر^۴ و همکاران [۹] صورت گرفت. نوریک^۵ و مارتین^۶ [۱۰] به بررسی تغییر شکل صفحه‌های نازک تحت بارهای انفجاری پرداختند، آن‌ها در این آزمایش‌ها به روش‌های مختلفی مقدار تغییر مکان و نیز ضربه‌ی وارده به صفحه را اندازه‌گیری نمودند. یوان^۷ و نوریک [۱۱]، به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی و مطالعه‌ی اثر بار انفجاری یکنواخت بر پاسخ صفحه‌های مربعی دارای سخت‌کننده پرداختند. نیوبرگر^۸ و همکاران [۱۲]، پاسخ صفحه‌های دایره‌ای در معرض انفجار کروی، تحت عنوان بارگذاری انفجاری در هوا را به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیل ریاضی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. لنگدان^۹ و همکاران [۱۳]، روش‌های کاهش اثر انفجار بر صفحه‌های فولادی را با قرار دادن یک صفحه‌ی دارای بازشو بین مواد منفجره و صفحه‌ی هدف مورد بررسی قرار دادند.

کازانچی^{۱۰} و همکاران [۱۴] اثر سختی و لختی را بر روی رفتار دینامیکی یک صفحه‌ی مرکب چندلایه تحت بار انفجاری را مورد بحث قرار دادند. ترکمن^{۱۱} و مسعود اوغلو^{۱۲} [۱۵]، پاسخ دینامیکی یک صفحه‌ی مرکب چندلایه‌ی دارای سخت‌کننده تحت بار انفجاری را

1 Jones

2 Symonds

3 Taylor

4 Balmer

5 Nurick

6 Martin

7 Yuen

8 Neuberger

9 Langdon

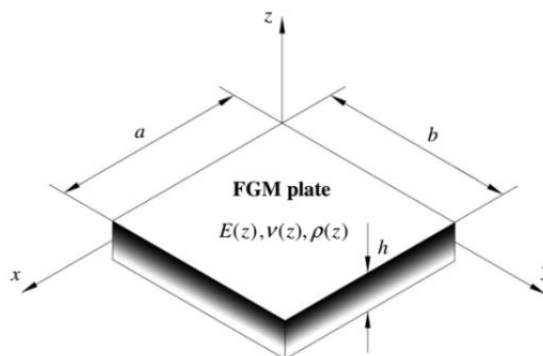
10 Kazanci

به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. پراوین^{۱۳} و ردی^{۱۴} [۱۶]، پاسخ صفحه‌های FGM سرامیک - فلز را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. آن‌ها توان حجمی سرامیک و فلز انتخاب شده را با استفاده از قانون توزیع توانی^{۱۵} در نظر گرفتند. وو^{۱۶} و مگید^{۱۷} [۱۷]، تغییر شکل‌های بزرگ صفحه‌های FGM و پوسته‌های نازک را تحت بارگذاری عرضی و دمایی مورد مطالعه قرار دادند. ابرات^{۱۸} [۱۸]، با بررسی رفتار صفحه‌های FGM با استفاده از نظریه‌ی کلاسیک صفحه‌ای توسعه یافته، نشان داد که رفتار صفحه‌های هدفمند مشابه رفتار صفحه‌های همگن است. سنک اکسویلاز^{۱۹} و همکاران [۱۹]، رفتار غیرخطی صفحه‌های مرکب چندلایه با الیاف فلزی (FML) تحت بار انفجاری و صفحه‌های نازک هدفمند تحت فشار یکنواخت را با روش‌های آزمایشگاهی و اجزای محدود توسعه یافته مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نگوین دینه دوک^{۲۱} و همکاران [۲۰]، پاسخ دینامیکی غیرخطی و ارتعاش تغییر شکل‌های برشی صفحه‌های هدفمند قرار گرفته بر روی بستر کشسان در برابر بارهای انفجاری و حرارتی را بر اساس نظریه‌ی تغییر شکل برشی مرتبه بالای ردی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها اثر پارامترهای هندسی، خواص مواد، نقص اولیه، افزایش دما و بستر کشسان را بر روی پاسخ دینامیکی و ارتعاش صفحه‌های هدفمند مورد بررسی قرار دادند.

در این پژوهش، به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی صفحه‌های FGM تحت اثر بارهای انفجاری پرداخته می‌شود. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، نسبت ابعاد صفحه، ضخامت صفحه، مقدار ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی آن تا صفحه و نیز اثر مقیاس رپلیکا^{۲۲} همراه با مقیاس هوپکینسون^{۲۳} مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌گردد.

۲- مبانی و مفاهیم پایه

سیستم مختصات کارتزین (x, y, z) صفحه‌ی FGM در سطح میانی صفحه قرار می‌گیرد. محور z در راستای ضخامت صفحه $(-h/2 \leq z \leq h/2)$ و رو به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شود و محور y عمود بر محور x در سطح میانی صفحه قرار می‌گیرد (شکل ۱). تغییر مکان صفحه در راستای ضخامت صفحه با حرف w نشان داده می‌شود.



شکل ۱: هندسه و مختصات کارتزین صفحه‌ی FGM [۲۱]

نظریه‌ی کشسان غیرخطی صفحه‌های هدفمند با استفاده از نظریه‌ی کلاسیک تغییر شکل صفحه، توسعه یافته است [۲۲]. فرض می‌شود که صفحه‌ی هدفمند ساخته شده از فازهای سرامیک و فلز، دارای تغییراتی تدریجی و پیوسته از خواص مواد در راستای ضخامت خود

¹¹ Turkmen

¹² Mecitoglu

¹³ Praveen

¹⁴ Reddy

¹⁵ Power Law Distribution

¹⁶ Woo

¹⁷ Meguid

¹⁸ Abrate

¹⁹ Cenk Aksoylar

²⁰ Fiber-Metal Laminated

²¹ Nguyen Dinh Duc

²² Replica

²³ Hopkinson

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 صفحه‌ی هدفمند می‌باشد و به عنوان تابعی از دما به صورت رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود [۲۳ و ۲۴].

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

در این رابطه، $P_0, P_{-1}, P_1, P_2, P_3$ ضریب‌های دمایی مواد تشکیل‌دهنده هستند. $V_c(z)$ و $V_m(z)$ 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) به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

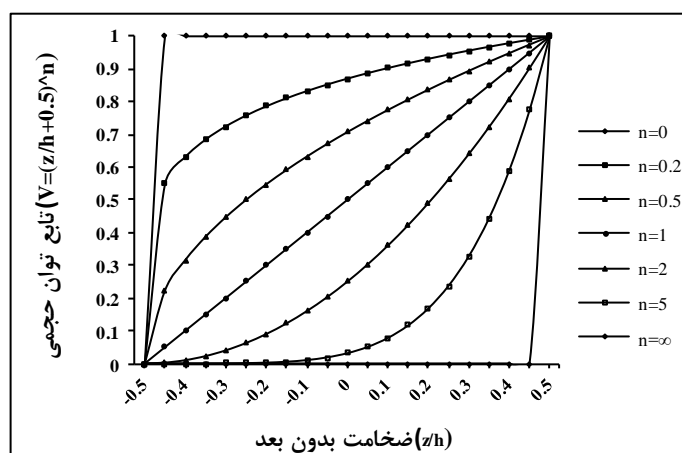
بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\begin{cases} P(z, T) = P_m(T) & \text{for } V_c(z) = 0 \\ P(z, T) = P_c(T) & \text{for } V_c(z) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

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

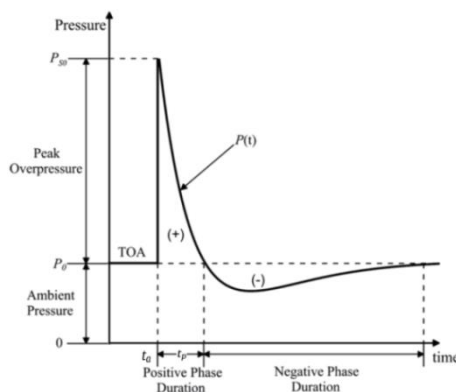
$$[E(z, T), \rho(z, T), \nu(z, T)] = [E_{cm}(T), \rho_{cm}(T), \nu_{cm}(T)] \left(\frac{h+2z}{2h} \right)^n + [E_m(T), \rho_m(T), \nu_m(T)] \quad (6)$$

در این رابطه، $E_{cm} = E_c - E_m$ ، $\rho_{cm} = \rho_c - \rho_m$ ، $\nu_{cm} = \nu_c - \nu_m$ و n شاخص توان حجمی نامیده می‌شود که بر نحوه‌ی تغییر مواد در راستای ضخامت صفحه‌ی هدفمند دلالت دارد. در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل نیز هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) در نظر گرفته شده است که دو مقدار صفر و بی‌نهایت به ترتیب به صفحه‌ی کاملاً سرامیکی و صفحه‌ی کاملاً فلزی مربوط می‌شود. تغییرات تابع توان حجمی $(z/h+0.5)^n$ ، در راستای ضخامت (h) صفحه برای مقادیر مختلف n در شکل ۲ نشان داده شده است.



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

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 [۲۵]. برای تعیین مشخصات هر انفجار، نیاز به سه پارامتر اضافه فشار بیشینه^{۲۴}، مدت زمان انفجار^{۲۵} و ضربه^{۲۶} است. زمان رسیدن موج در موارد طراحی اهمیت چندانی ندارد؛ ولی در بعضی موارد که مدت زمان واکنش به انفجار مورد نیاز باشد، این پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. قسمت مثبت نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری نشان داده شده در شکل ۳ با رابطه‌ی شبه‌نمایی (۷) بیان می‌گردد [۲۶]. در این رابطه، مقدار اضافه فشار بیشینه‌ی انفجار (که به صورت رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود)، t_p زمان انفجار در فاز مثبت، ضریب افت^{۲۷} α یک مقدار ثابت و Z فاصله‌ی مقیاس شده است.



شکل ۳: نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری [۲۷]

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

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

²⁴ Peak Overpressure

²⁵ Time Duration Explosion

²⁶ Impulse

²⁷ decay

برای آن که انفجارهای با مقدار ماده‌ی منفجره‌ی مختلف را به‌نوعی با هم مرتبط سازند، از رابطه‌های مقیاس‌شده استفاده می‌شود. اصل مقیاس‌سازی در انفجارها بر اساس تشابه هندسی و اصل بقای تکانه است که از نظریه‌ی پی‌باکینگهام^{۲۸} استفاده می‌گردد. بر اساس رابطه‌ی هوپکینسون - کرانز^{۲۹} فاصله‌ی مقیاس‌شده به‌صورت رابطه‌ی (۹) بیان می‌شود [۲۶]. در این رابطه، R فاصله‌ی مرکز انفجار تا نقطه‌ی مورد نظر بر حسب متر و W جرم ماده‌ی منفجره بر حسب کیلوگرم است.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (9)$$

۳- مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی صفحه‌های ساخته‌شده از مواد هدفمند در نرم‌افزار آباکوس از جزء پوسته‌ای^{۳۰} سه بعدی چهاروجهی چهارگره‌ی (S4R)، برای مدل‌سازی انفجار از روش کانوپ^{۳۱} و برای مدل‌سازی مواد هدفمند از روش چندلایه‌ی معادل استفاده گردیده است [۲۸]. به‌منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری، صفحه‌هایی با نسبت ابعاد $a/b=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ و اندازه‌ی شبکه‌بندی 20×20 میلی‌متر (به‌دست آمده از بررسی تأثیر اندازه‌ی شبکه‌بندی صفحه) با رفتار غیرخطی و در نظر گرفتن اثر تغییرشکل‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفته شده است. در تمام تحلیل‌ها، مدت زمان بارگذاری ۵۰ میلی‌ثانیه انتخاب شده است. پارامترهای مورد بررسی در صفحه‌ها، شاخص توان حجمی (n)، نسبت ابعاد صفحه (a/b)، ضخامت صفحه (h)، مقدار جرم ماده‌ی TNT (W) و فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه (R) در امتداد جهت مثبت محور z در محل برخورد دو قطر صفحه‌های مربعی و مستطیلی بوده است. در ادامه، اثر مقیاس ریلیکا (S) همراه با مقیاس هوپکینسون (Z) بر روی رفتار این‌گونه صفحه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی و روش طراحی

نوع اختلاط مواد FGM به‌صورت فلز - سرامیک و استاینلس‌استیل^{۳۲} - سیلیکون‌نیتريد^{۳۳} 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 صفحه‌ها به‌ترتیب سرامیک و فلز بوده است. پس از بررسی نتایج تحلیل‌ها مشخص گردید، هنگامی که بار انفجاری از طرف رویه‌ی سرامیکی وارد شده است، صفحه‌ی 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. همان‌طور که در بخش دوم بیان شد، توزیع خواص مکانیکی مواد در راستای ضخامت صفحه بر اساس رابطه‌ی توزیع قانون توانی (رابطه‌ی (۶)) صورت گرفته است.

جدول ۱: خواص مکانیکی مواد FGM

نوع مواد	ضریب کشسانی (GPa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون
استاینلس‌استیل (فلز)	۲۰۱/۰۴	۸۱۶۶	۰/۳۲۶۲
سیلیکون‌نیتريد (سرامیک)	۳۴۸/۴۳	۲۳۷۰	۰/۲۳

²⁸ Buckingham Pi Theorem

²⁹ Hopkinson-Cranz

³⁰ Shell

³¹ ConWep

³² Stainless Steel (SUS304)

³³ Silicon Nitride (Si_3N_4)

۳-۲- مشخصات هندسی صفحه‌ها

مشخصات هندسی صفحه‌های هدفمند ۱ تا ۴ با نسبت ابعاد مختلف نظیر طول (a) ، عرض (b) و ضخامت (h) در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: خواص هندسی صفحه‌های FGM

شماره‌ی صفحه	ضخامت صفحه (mm)	نسبت ابعاد صفحه (a/b)	عرض صفحه (mm)	طول صفحه (mm)
۱	۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰
۲	۶	۱/۵	۱۰۰۰	۱۵۰۰
۳	۶	۲	۱۰۰۰	۲۰۰۰
۴	۶	۲/۵	۱۰۰۰	۲۵۰۰

۳-۳- راستی آزمایی

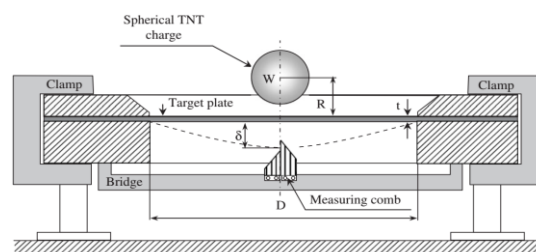
در پژوهش حاضر، نخست، به منظور راستی‌آزمایی نحوه‌ی تحلیل موج انفجاری و مقیاس‌گذاری، یک نمونه‌ی انفجار در هوا که به صورت آزمایشگاهی و تحلیل ریاضی (کدنویسی) توسط نیوبرگر و همکاران [۱۲] انجام گردیده بود، مدل‌سازی شد. سپس، با هدف صحت‌سنجی چگونگی مدل‌سازی ماده‌ی هدفمند، صفحه‌ی ساخته‌شده از مواد هدفمند که توسط سنک اکسویلا و همکاران [۱۹] تحت بار فشار یکنواخت قرار گرفته بود، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

نیوبرگر و همکاران به تحلیل صفحه‌های دایره‌ای شکل با شرط مرزی گیردار تحت بارگذاری انفجار پرداختند (شکل‌های ۴ و ۵). پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی مواد استفاده‌شده در تحلیل‌های ریاضی و آزمایش به شرح زیر بود.

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



شکل ۵: تنظیم و راه‌اندازی آزمایش در دو مقیاس مختلف در $S=2$ در سمت راست و $S=4$ در سمت چپ [۱۲]



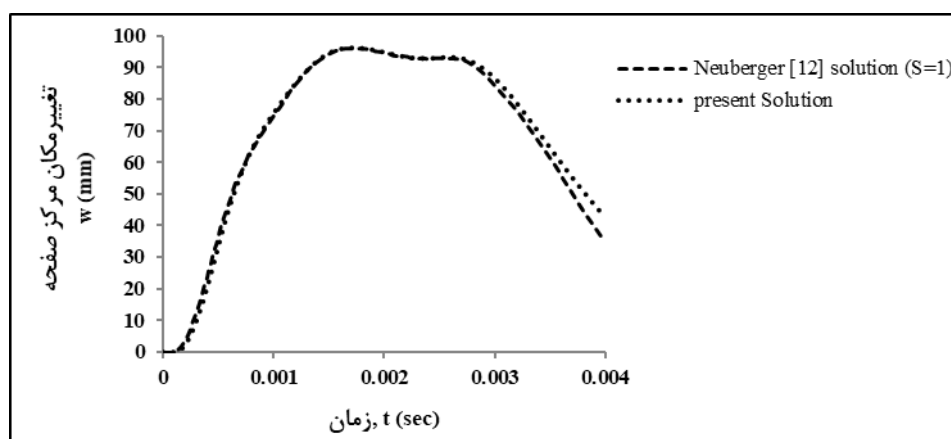
شکل ۴: نمایش شماتیک طرح آزمایش، مرکز انفجار و شرط مرزی گیردار صفحه‌ی دایره‌ای [۱۲]

در مرجع [۱۲] برای ضریب مقیاس $S=1$ ، ضخامت و قطر صفحه به ترتیب برابر با ۵۰ و ۲۰۰۰ میلی‌متر، فاصله‌ی مرکز انفجار تا مرکز صفحه ۵۰۰ میلی‌متر و جرم ماده‌ی TNT برابر با ۵۰ کیلوگرم بود. نتایج با استفاده از نرم‌افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد. در جدول ۳ پیشینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه و در شکل ۶ تاریخچه‌ی زمانی 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.

جدول ۳: مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۱۲]

نرم‌افزار آباکوس	مرجع [۱۲]	درصد خطا (%)
۹۶/۱۷۳	۹۵/۹۰۹	۰/۲۷۴

پیشینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه (mm)



شکل ۶: مقایسه‌ی بین تاریخی‌ی زمانی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی دایره‌ای شکل حاصل از نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۱۲]

در تحلیل‌های آزمایشگاهی [۱۲]، پارامترهای هندسی و جرم ماده‌ی TNT برای سه ضریب مقیاس ۱، ۲ و ۴ به صورت جدول ۴

بود.

جدول ۴: پارامترهای هندسی و جرم ماده‌ی TNT [۱۲]

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

نتایج آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صحت‌سنجی گردید. در جدول ۵ بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز صفحه مربوط به مدل‌سازی با آباکوس و آزمایش نشان داده شده است. در این جدول، w تغییر مکان و h ضخامت صفحه است. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج مدل‌سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیرهای ثبت شده در آزمایش می‌باشد.

جدول ۵: مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و آزمایش [۱۲] برای سه ضریب مقیاس ۱، ۲ و ۴

S	نرم‌افزار آباکوس	آزمایش [۱۲]	درصد خطا (%)
۱	۲/۷	۲/۷	۰
۲	۲/۷۰۹	۲/۷	-۰/۳۳۲
۴	۲/۶۹۷	۲/۶	-۳/۶

بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد مرکز صفحه
(w/h)

سنگ اکسولار و همکاران [۱۹] با استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافته (کدنویسی) به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی صفحه‌های هدفمند تحت فشار یکنواخت پرداختند. صفحه‌ی هدفمند با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر با تکیه‌گاه گیردار تحت بار ۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. نوع اختلاط مواد هدفمند آلومینیم^{۳۴} - زیرکونیا^{۳۵} بود (جدول ۶).

جدول ۶: خواص مکانیکی مواد هدفمند [۱۹]

نسبت پواسون	چگالی (kg/m^3)	ضریب کشسانی (GPa)	نوع مواد
۰/۳	۲۷۰۷	۷۰	آلومینیم
۰/۳	۳۰۰۰	۱۵۱	زیرکونیا

³⁴ Aluminum
³⁵ Zirconia

فشار ناشی از انفجار به صورت رابطه‌ی (۱۰) اعمال گردید.

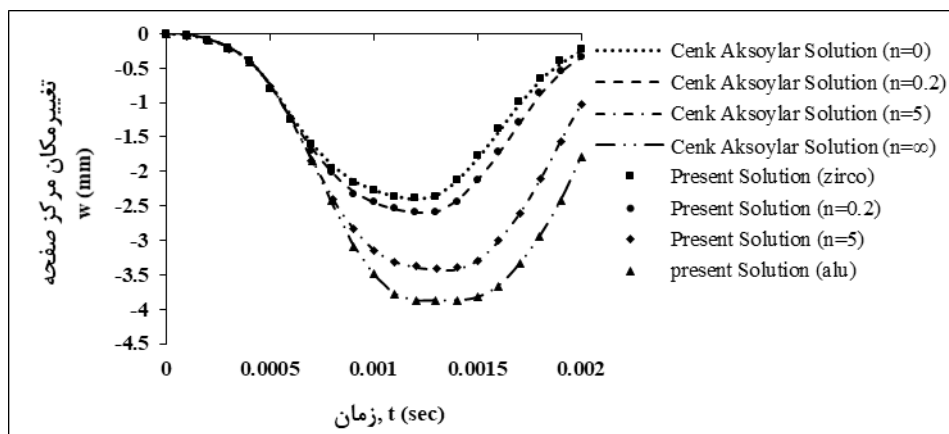
$$P(x, y, t) = P_0 P_t(t) P_s(x, y) \quad (10)$$

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

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

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

نتایج با استفاده از نرم‌افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد. در شکل ۷ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان مرکز صفحه و در جدول ۷ بیشینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه برای چهار مقدار شاخص توان حجمی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج مدل‌سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقدارهای گزارش شده حاصل از مرجع [۱۹] است.



شکل ۷: مقایسه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه‌ی FGM حاصل از نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۱۹]

جدول ۷: مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [۱۹]

n	نرم‌افزار آباکوس	مرجع [۱۹]	درصد خطا (%)
۰	-۲/۳۹۱	-۲/۴۰۱	-۰/۴۱
۰/۲	-۲/۵۸۵	-۲/۵۹۹	-۰/۵۴
۵	-۳/۴۱۲	-۳/۴۲۹	-۰/۴۹
∞	-۳/۸۷۷	-۳/۸۷۲	۰/۱۳

۳-۴- پارامترهای مورد بررسی

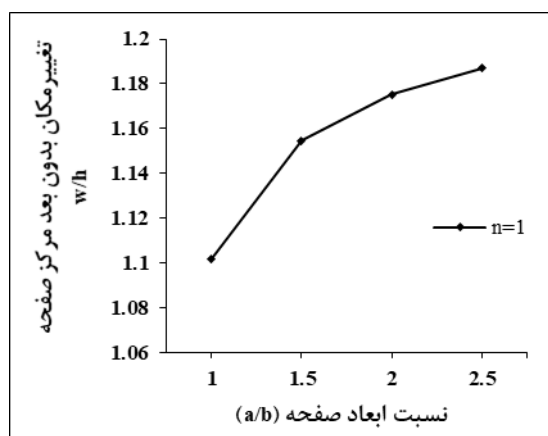
در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شده است. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی صفحه‌های هدفمند، نخست، خواص هر لایه با استفاده از رابطه‌های حاکم بر مواد FGM محاسبه شد و سپس، صفحه‌ها با استفاده از روش چندلایه‌ی معادل در ۲۰ لایه به صورت گیردار مدل‌سازی گردید. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، نسبت ابعاد صفحه، ضخامت صفحه، مقدار جرم ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی مرکز انفجار تا صفحه مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۴-۱- اثر شاخص توان حجمی (n)

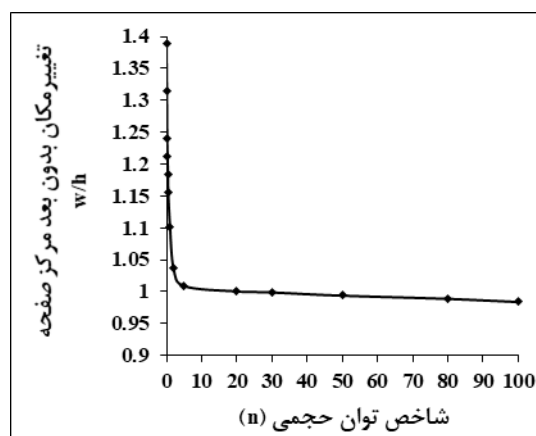
به منظور بررسی اثر شاخص توان حجمی، صفحه‌ی هدفمند ۱ (جدول ۲) با ابعاد 1000×1000 و ضخامت ۶ میلی‌متر تحت بار ناشی از انفجار ۲۰ گرم TNT با هفت شاخص توان حجمی تجزیه و تحلیل شده است. در شکل ۸ اثر شاخص توان حجمی بر روی بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز صفحه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کمینه‌ی تغییرمکان در صفحه‌ی تمام فلزی ($n = \infty$) و بیشینه‌ی تغییرمکان در صفحه‌ی تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است. پاسخ صفحه‌های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است. برای بدون بعد کردن پاسخ‌ها، مقدار تغییرمکان (w) بر ضخامت (h) صفحه تقسیم شده است.

۳-۴-۲- اثر نسبت ابعاد صفحه (a/b)

به منظور بررسی اثر نسبت ابعاد صفحه، صفحه‌های هدفمند ۱ تا ۴ (جدول ۲) با نسبت ابعاد مختلف و ضخامت ۶ میلی‌متر تحت انفجار ۲۰ گرم TNT با شاخص توان حجمی برابر ۱ تجزیه و تحلیل گردیده است. در شکل ۹ بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز صفحه‌های هدفمند بر حسب نسبت ابعاد صفحه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه با بزرگ‌تر شدن ابعاد افزایش یافته است.



شکل ۹: بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز صفحه‌های هدفمند ۱ تا ۴ بر حسب نسبت ابعاد تحت بار انفجاری ($R=500$ mm)



شکل ۸: بیشینه‌ی تغییرمکان بدون بعد مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ بر حسب شاخص توان‌های حجمی تحت بار انفجاری ($R=500$ mm)

۳-۴-۳- اثر ضخامت صفحه (h)

به منظور بررسی اثر ضخامت صفحه، صفحه‌ی هدفمند ۱ با ابعاد 1000×1000 میلی‌متر تحت بار انفجار ۲۰ گرم TNT و شاخص توان‌های حجمی مختلف ۰/۲، ۱ و ۵ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در جدول‌های ۸ تا ۱۰ بیشینه و کمینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه و در شکل ۱۰ رابطه‌ی بین تغییرمکان مرکز صفحه با پنج ضخامت مختلف و سه توان حجمی ۰/۲، ۱ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، تغییرمکان مرکز صفحه با افزایش ضخامت صفحه کاهش یافته است.

جدول ۸: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای ضخامت‌های مختلف ($n=0.2$)

n	ضخامت صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان کاهش (%)
۰/۲	۱۲	۲/۲۰۲	۷۰/۲۸	-۲/۲۱۱	-
۱	۹	۳/۸۴۹	۴۸/۰۴	-۳/۸۱۸	-
۵	۶	۷/۴۰۸	-	-۷/۴۳۹	-

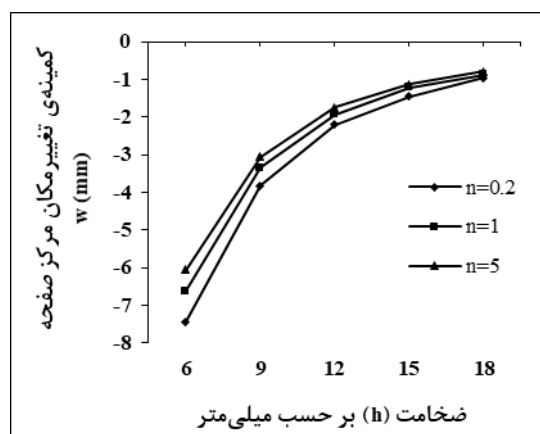
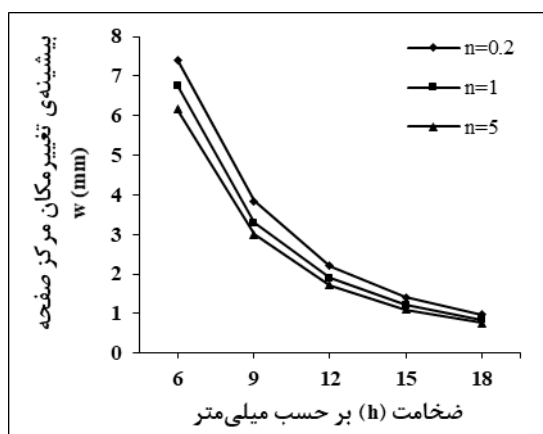
۸۰/۵۲	-۱/۴۴۹	۸۰/۹۷	۱/۴۱۰	۱۵
۸۷/۱۸	-۰/۹۵۴	۸۶/۷۹	۰/۹۷۸	۱۸

جدول ۹: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای ضخامت‌های مختلف ($n=1$)

n	ضخامت صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)
۱	۶	۶/۷۵۶	-	-۶/۶۱۳	-
	۹	۳/۲۹۷	۵۱/۱۹	-۳/۳۴۰	۴۹/۴۹
	۱۲	۱/۹۰۰	۷۱/۸۸	-۱/۹۳۳	۷۰/۷۷
	۱۵	۱/۲۲۰	۸۱/۹۴	-۱/۲۲۰	۸۱/۵۵
	۱۸	۰/۸۳۸	۸۷/۵۹	-۰/۸۷۶	۸۶/۷۵

جدول ۱۰: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای ضخامت‌های مختلف ($n=5$)

n	ضخامت صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)
۵	۶	۶/۱۵۹	-	-۶/۰۵۵	-
	۹	۲/۹۹۸	۵۱/۳۲	-۳/۰۵۷	۴۹/۵۱
	۱۲	۱/۷۱۹	۷۲/۰۹	-۱/۷۴۸	۷۱/۱۳
	۱۵	۱/۰۹۳	۸۲/۲۵	-۱/۱۳۲	۸۱/۳۱
	۱۸	۰/۷۵۵	۸۷/۷۴	-۰/۷۸۴	۸۷/۰۵

شکل ۱۰: رابطه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ با ضخامت‌های مختلف تحت بار انفجاری ($R=500$ mm)۳-۴-۴- اثر جرم ماده‌ی TNT (W)

به منظور بررسی اثر مقدار جرم ماده‌ی TNT، صفحه‌ی هدفمند ۱ با ابعاد 1000×1000 و ضخامت ۶ میلی‌متر تحت بارهای انفجار ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم TNT با شاخص توان‌های حجمی ۰/۲، ۱ و ۵ تحلیل گردیده است. در جدول‌های ۱۱ تا ۱۳ بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه و در شکل ۱۱ رابطه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه با پنج مقدار ماده‌ی منفجره و سه شاخص توان حجمی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، با ثابت گرفتن فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه، با افزایش مقدار جرم ماده‌ی TNT تغییر مکان مرکز صفحه افزایش یافته است.

جدول ۱۱: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای جرم‌های مختلف ماده‌ی منفجره ($n=0.2$)

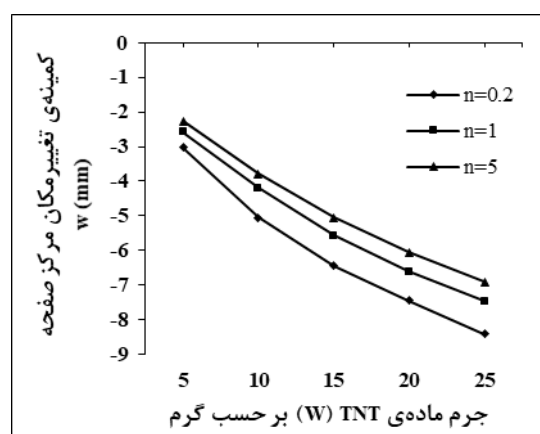
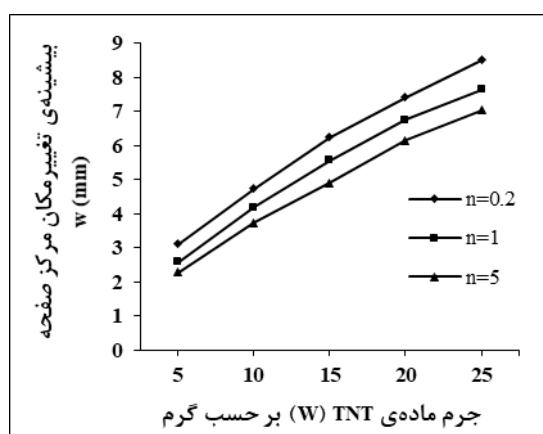
n	جرم ماده‌ی TNT (gr)	بیشینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش	کمینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش
۰/۲	۵	۳/۱۱۲	-	-۳/۰۳۲	-
	۱۰	۴/۷۴۴	۱/۵۲ برابر	-۵/۰۵۹	۱/۶۶ برابر
	۱۵	۶/۴۵۹	۲/۰۸ برابر	-۶/۴۴۳	۲/۱۲ برابر
	۲۰	۷/۴۰۸	۲/۳۸ برابر	-۷/۴۳۹	۲/۴۵ برابر
	۲۵	۸/۴۹۷	۲/۷۳ برابر	-۸/۴۰۹	۲/۷۷ برابر

جدول ۱۲: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای جرم‌های مختلف ماده‌ی منفجره ($n=1$)

n	جرم ماده‌ی TNT (gr)	بیشینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش	کمینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش
۱	۵	۲/۵۸۳	-	-۲/۵۸۴	-
	۱۰	۴/۱۸۹	۱/۶۲ برابر	-۴/۲۰۲	۱/۶۲ برابر
	۱۵	۵/۵۶۶	۲/۱۵ برابر	-۵/۵۶۴	۲/۱۵ برابر
	۲۰	۶/۷۵۶	۲/۶۲ برابر	-۶/۶۱۳	۲/۵۶ برابر
	۲۵	۷/۴۴۷	۲/۸۸ برابر	-۷/۴۵۹	۲/۸۸ برابر

جدول ۱۳: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییرمکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای جرم‌های مختلف ماده‌ی منفجره ($n=5$)

n	جرم ماده‌ی TNT (gr)	بیشینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش	کمینه‌ی تغییرمکان (mm)	میزان افزایش
۵	۵	۲/۲۸۱	-	-۲/۲۶۹	-
	۱۰	۳/۷۴۱	۱/۶۴ برابر	-۳/۷۹۳	۱/۶۷ برابر
	۱۵	۴/۹۱۱	۲/۱۵ برابر	-۵/۰۵۶	۲/۲۳ برابر
	۲۰	۶/۱۵۹	۲/۷۰ برابر	-۶/۰۵۵	۲/۶۷ برابر
	۲۵	۷/۰۴۴	۳/۰۹ برابر	-۶/۹۰۱	۳/۰۴ برابر



شکل ۱۱: رابطه‌ی بین تغییرمکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ با جرم‌های مختلف ماده‌ی TNT ($R=500$ mm)

۳-۴-۵- اثر فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه (R)

به منظور بررسی اثر فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه، صفحه‌ی هدفمند ۱ با ابعاد 1000×1000 و ضخامت ۶ میلی‌متر تحت بار انفجار ۲۰ گرم TNT در فاصله‌های ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متری با شاخص توان‌های حجمی ۰/۲، ۱ و ۵ مورد تجزیه و تحلیل

قرار گرفته است. در جدول‌های ۱۴ تا ۱۶ بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه و در شکل ۱۲ رابطه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه با پنج فاصله‌ی مختلف و سه شاخص توان حجمی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با ثابت گرفتن جرم ماده‌ی منفجره، با افزایش فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه، تغییر مکان مرکز صفحه کاهش یافته است.

جدول ۱۴: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای فاصله‌های مختلف مواد منفجره ($n=0.2$)

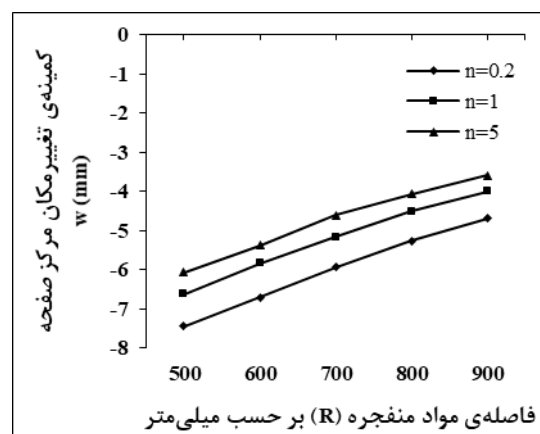
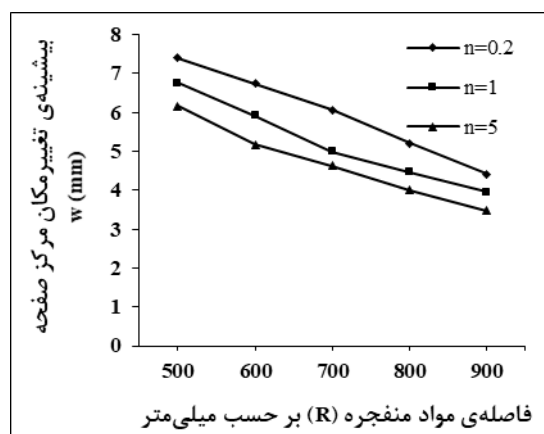
n	فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)
	۵۰۰	۷/۴۰۸	-	-۷/۴۳۹	-
	۶۰۰	۶/۷۴۴	۸/۹۵	-۶/۶۹۶	۹/۹۸
۰/۲	۷۰۰	۶/۰۵۵	۲۶/۱۸	-۵/۹۳۱	۲۰/۲۷
	۸۰۰	۵/۲۱۲	۲۹/۶۴	-۵/۲۵۵	۲۹/۳۶
	۹۰۰	۴/۴۱۶	۴۰/۳۹	-۴/۶۸۶	۳۷/۰۱

جدول ۱۵: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای فاصله‌های مختلف مواد منفجره ($n=1$)

n	فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)
	۵۰۰	۶/۷۵۶	-	-۶/۶۱۳	-
	۶۰۰	۵/۹۲۱	۱۲/۳۶	-۵/۸۳۴	۱۱/۷۸
۱	۷۰۰	۴/۹۹۶	۲۶/۰۵	-۵/۱۶۷	۲۱/۸۶
	۸۰۰	۴/۴۵۹	۳۳/۹۹	-۴/۵۱۴	۳۱/۷۴
	۹۰۰	۳/۹۵۹	۴۱/۴۰	-۳/۹۹۲	۳۹/۶۳

جدول ۱۶: مقایسه‌ی بین بیشینه و کمینه‌ی تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ برای فاصله‌های مختلف مواد منفجره ($n=5$)

n	فاصله‌ی مواد منفجره تا صفحه (mm)	بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)	کمینه‌ی تغییر مکان (mm)	میزان کاهش (%)
	۵۰۰	۶/۱۵۹	-	-۶/۰۵۵	-
	۶۰۰	۵/۱۷۷	۱۵/۹۴	-۵/۳۶۹	۱۱/۳۳
۵	۷۰۰	۴/۶۲۷	۲۴/۸۷	-۴/۶۱۱	۲۳/۸۵
	۸۰۰	۳/۹۹۹	۳۵/۰۷	-۴/۰۷۰	۳۲/۷۸
	۹۰۰	۳/۴۷۱	۴۳/۶۴	-۳/۵۸۶	۴۰/۷۷



شکل ۱۲: رابطه‌ی بین تغییر مکان مرکز صفحه‌ی هدفمند ۱ با فاصله‌های مختلف مواد منفجره ($W=20$ gr)

۳-۵- اثر مقیاس هندسه‌ی رپلیکا (S) همراه با مقیاس هوپکینسون (Z)

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی اثر مقیاس‌های رپلیکا و هوپکینسون [۱۲] بر روی خواص مواد FGM، صفحه‌های هدفمند ۱، ۲ و ۳ با ضخامت ۶ میلی‌متر ($S=1$) تحت بارهای انفجاری مختلف با شاخص توان حجمی ۰/۲ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد. در این خصوص، تشابه و همسان‌سازی با استفاده از مقیاس رپلیکا برای تمام پارامترهای هندسی به دست آمد، در حالی که اثر انفجار با استفاده از روش معروف هوپکینسون (رابطه‌ی (۹)) مقیاس گردید. نتایج نرم‌افزار آباکوس، پارامترهای هندسی و جرم ماده‌ی TNT صفحه‌های هدفمند ۱، ۲ و ۳ با نسبت ابعاد مختلف برای پنج ضریب مقیاس ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ در جدول‌های ۱۷ تا ۱۹ آورده شده است. نتایج عددی نشان داد که پاسخ صفحه می‌تواند به‌طور مؤثر با استفاده از هندسه‌ی رپلیکا همراه با مقیاس هوپکینسون مدل‌سازی و محدود شود. با توجه به جدول‌های ۱۷ تا ۱۹ مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تغییر مکان بدون بعد (w/h) مرکز صفحه‌های هدفمند برای ضریب‌های مقیاس مختلف با هم برابر شده‌اند که این نشان‌دهنده‌ی مقیاس‌گذاری بسیار خوبی از تغییر مکان مرکز صفحه‌های هدفمند با مدل مواد کشسان می‌باشد.

جدول ۱۷: نتایج عددی صفحه‌ی هدفمند ۱ برای پنج ضریب مقیاس مختلف ($a/b=1$)

S	h (mm)	a (mm)	b (mm)	R (mm)	Z	W (gr)	w/h
۰/۵	۱۲	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱/۸۴۲	۱۶۰	۱/۲۳۹
۱	۶	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۱/۸۴۲	۲۰	۱/۲۳۹
۲	۳	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱/۸۴۲	۲/۵	۱/۲۳۹
۴	۱/۵	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۵	۱/۸۴۲	۰/۳۱۲	۱/۲۳۹
۸	۰/۷۵	۱۲۵	۱۲۵	۶۲/۵	۱/۸۴۲	۰/۰۳۹	۱/۲۳۹

جدول ۱۸: نتایج عددی صفحه‌ی هدفمند ۲ برای پنج ضریب مقیاس مختلف ($a/b=1.5$)

S	h (mm)	a (mm)	b (mm)	R (mm)	Z	W (gr)	w/h
۰/۵	۱۲	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱/۸۴۲	۱۶۰	۱/۴۰۸
۱	۶	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۱/۸۴۲	۲۰	۱/۴۰۸
۲	۳	۷۵۰	۵۰۰	۲۵۰	۱/۸۴۲	۲/۵	۱/۴۰۸
۴	۱/۵	۳۷۵	۲۵۰	۱۲۵	۱/۸۴۲	۰/۳۱۲	۱/۴۰۸
۸	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۱۲۵	۶۲/۵	۱/۸۴۲	۰/۰۳۹	۱/۴۰۸

جدول ۱۹: نتایج عددی صفحه‌ی هدفمند ۳ برای پنج ضریب مقیاس مختلف ($a/b=2$)

S	h (mm)	a (mm)	b (mm)	R (mm)	Z	W (gr)	w/h
۰/۵	۱۲	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱/۸۴۲	۱۶۰	۱/۴۷۸
۱	۶	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۱/۸۴۲	۲۰	۱/۴۷۸
۲	۳	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱/۸۴۲	۲/۵	۱/۴۷۸
۴	۱/۵	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	۱/۸۴۲	۰/۳۱۲	۱/۴۷۸
۸	۰/۷۵	۲۵۰	۱۲۵	۶۲/۵	۱/۸۴۲	۰/۰۳۹	۱/۴۷۸

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی صفحه‌های FGM استاینلس استیل - سیلیکون نیتريد تحت بارهای انفجاری از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شد. پس از اطمینان از روش 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 به صورت گیردار

مدل سازی گردید. برای این کار، اثر شاخص توان حجمی، نسبت ابعاد صفحه، ضخامت صفحه، مقدار جرم مادهی TNT و فاصله ی آن و نیز اثر مقیاس رپلیکا همراه با مقیاس هوپکینسون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه و ارزیابی رفتار دینامیکی صفحه ها به طور خلاصه در ادامه آمده است:

- در فرآیند تحلیل از هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ($n = 0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, \infty$) استفاده شد. پس از بررسی پاسخ ها، ملاحظه گردید که با افزایش شاخص توان حجمی مقدار تغییر مکان کاهش پیدا کرده است به طوری که کمینه ی تغییر مکان در صفحه ی تمام فلزی ($n = \infty$) و بیشینه ی تغییر مکان در صفحه ی تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است و پاسخ صفحه های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است. در مقایسه ی عددی مشاهده شد که با افزایش شاخص توان حجمی از صفر تا بی نهایت، مقدار بیشینه ی تغییر مکان صفحه ۱/۲۹٪ کاهش یافته است.

- در تحلیل صفحه های هدفمند از چهار نسبت ابعاد مختلف ($a/b = 1.00, 1.50, 2.00, 2.50$) استفاده گردید. پس از مقایسه ی بیشینه ی پاسخ ها، دیده شد که تغییر مکان مرکز صفحه با بزرگ تر شدن ابعاد صفحه افزایش یافته است. به عنوان نمونه، برای صفحه ی هدفمند ۳ با نسبت ابعاد ۲، در مقایسه با صفحه ی هدفمند ۱ تغییر مکان مرکز صفحه ۶/۶۴٪ افزایش پیدا کرده است.

- ضخامت صفحه نقش مهمی در تغییر مکان مرکز صفحه داشته است، به طوری که افزایش ضخامت صفحه موجب کاهش تغییر مکان آن گردیده است. برای نمونه، به ازای ۲ برابر کردن مقدار ضخامت صفحه (از ۶ به ۱۲ میلی متر) برای شاخص توان های حجمی ۰/۲، ۱ و ۵، مقدار بیشینه ی تغییر مکان مرکز صفحه ی هدفمند ۱ به ترتیب ۷۰/۲۸٪، ۷۱/۸۸٪ و ۷۲/۰۹٪ کاهش را تجربه کرده است.

- در بررسی مقدار جرم ماده ی TNT، مشاهده شد که با ثابت گرفتن فاصله ی مواد منفجره تا صفحه، با افزایش جرم ماده ی منفجره، تغییر مکان مرکز صفحه افزایش یافته است. به عنوان نمونه، با ۲ برابر کردن جرم ماده ی منفجره (از ۵ به ۱۰ گرم) برای شاخص توان های حجمی ۰/۲، ۱ و ۵، مقدار بیشینه ی تغییر مکان مرکز صفحه ی هدفمند ۱ به ترتیب ۱/۵۲، ۱/۶۲ و ۱/۶۴ برابر شده است.

- با توجه به بررسی صورت گرفته، ملاحظه گردید که با ثابت گرفتن جرم ماده ی منفجره، با افزایش فاصله ی مواد منفجره تا صفحه، تغییر مکان مرکز صفحه کاهش یافته است. به عنوان مثال، با ۱/۲ برابر کردن فاصله ی ماده ی منفجره (از ۵۰۰ به ۶۰۰ میلی متر)، بیشینه ی تغییر مکان مرکز صفحه ی هدفمند ۱ برای هر یک از شاخص توان های حجمی ۰/۲، ۱ و ۵ به ترتیب ۸/۹۵٪، ۱۲/۳۶٪ و ۱۵/۹۴٪ کاهش را نشان دادند.

- در ارزیابی و اعتبارسنجی اثر مقیاس های رپلیکا و هوپکینسون بر روی خواص مواد هدفمند، مشاهده شد تا زمانی که تحلیل دینامیکی کشتان باشد، تغییر خواص مواد در راستای ضخامت صفحه هیچ تأثیری بر روی مقیاس گذاری ندارد. همچنین، با توجه به این که در مقیاس های ۰/۵ تا ۸ برای جرم های مختلف مواد منفجره، پاسخ یکسانی در صفحه های هدفمند ۱، ۲ و ۳ مشاهده شد، از این رو می توان از مقیاس های کوچک برای امکان عملی در آزمایشگاه ها استفاده کرد.

۵- فهرست علائم

a	طول صفحه در راستای محور x ، mm
b	عرض صفحه در راستای محور y ، mm
E	ضریب کشسانی، N/m^2
h	ضخامت صفحه در راستای محور z ، mm
n	شاخص توان حجمی
$P(z)$	توزیع خواص مواد
$P_t(t)$	تابع بار انفجار در حوزه ی زمان
$P_s(x, y)$	تابع بار انفجار در حوزه ی مکان

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 بیشینه‌ی بار انفجار، N/m^2	P_o
فاصله‌ی مرکز انفجار تا نقطه‌ی مورد نظر، mm	R
ضریب مقیاس گذاری	S
زمان، sec	t
مدت زمان انفجار، sec	t_p

مراجع

- [1] Pelletier, J. L. (2005). *Thermoelastic Analysis and Optimization of Functionally Graded Plates and Shells*. Doctoral Dissertation. The University of Maine.
- [2] Koizumi, M. F. G. M. (1997). FGM Activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 28, PP. 1-4.
- [3] Jones, N. (1974). A Literature Review of the Dynamic Plastic Response of Structures. MIT Department of Ocean Engineering, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 13, PP. 3-16.
- [4] Jones, N. (1978). Recent Progress in the Dynamic Plastic Behavior of Structures, Part I. MIT Department of Ocean Engineering, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 10, PP. 21-33.
- [5] Jones, N. (1978). Recent Progress in the Dynamic Plastic Behavior of Structures, Part II. *Shock and Vibration Information Center Shock and Vibration Digest*, Vol. 10, PP. 13-19.
- [6] Jones, N. (1981). Recent Progress in the Dynamic Plastic Behavior of Structures, Part III. *Shock and Vibration Information Center Shock and Vibration Digest*, Vol. 13, PP. 3-16.
- [7] Symonds, P. S. (1967). *Survey of Methods of Analysis for Plastic Deformation of Structures under Dynamic Loading*. Division of Engineering, Brown University Providence, Rhode Island.
- [8] Taylor, G. I. (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.
- [9] Balmer, H. A. Leech, J. W. Pian, T. H. H. and Witmer, E. A. (1963). Large Dynamic Deformations of Beams, Rings, Plates and Shells. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 1, PP. 1848-1857.
- [10] Nurick, G. N. and Martin, J. B. (1989). Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading—A Review part II: Experimental Studies. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, PP. 171-186.
- [11] Yuen, S. C. K. and Nurick, G. N. (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, PP. 55-83.
- [12] 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, PP. 859-873.
- [13] Langdon, G. S. Rossiter, I. B. Balden, V. H. and Nurick, G. N. (2010). Performance of Mild Steel Perforated Plates as A Blast Wave Mitigation Technique: Experimental and Numerical Investigation. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, PP. 1021-1036.
- [14] 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.
- [15] Türkmen, H. S. and Mecitoğlu, Z. (1999). Dynamic Response of A Stiffened Laminated Composite Plate Subjected to Blast Load. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 221, PP. 371-389.
- [16] 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, PP. 4457-4476.
- [17] Woo, J. and Meguid, S. A. (2001). Nonlinear Analysis of Functionally Graded Plates and Shallow Shells. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, PP. 7409-7421.
- [18] Abrate, S. (2008). Functionally Graded Plates Behave Like Homogeneous Plates. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, PP. 151-158.
- [19] Aksoylar, C. Ömercikoğlu, 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, PP. 731-744.

- [20] Dinh Duc, N. Tuan, N. D. Tran, P. and Quan, T. Q. (2017). 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, PP. 318-329.
- [21] Jung, W. Y. and Han, S. C. (2015). Static and Eigenvalue Problems of Sigmoid Functionally Graded Materials (S-FGM) Micro-Scale Plates Using the Modified Couple Stress Theory. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, PP. 3506-3524.
- [22] Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*. 2nd ed., CRC Press, 858 Pages.
- [23] 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, PP. 2403-2427.
- [24] Touloukian, Y. S. (1967). *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials*. Vol. 1: Elements, MacMillan.
- [25] Bangash, T. (2006). *Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies*. Springer Science and Business Media.
- [26] Kinney, G. F. and Graham, K. J. (2013). *Explosive Shocks in Air*. Springer Science and Business Media.
- [27] Dusenberry, D. O. (2010). *Handbook for Blast Resistant Design of Buildings*. John Wiley and Sons.
- [28] *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*. Dassault Systemes Simulia Crop.: Providence, RI, USA, 2014.