


Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using Finite Element Method

Research Note

Mojtaba Shahraki¹, Farzad Shahabian Moghadam² DOI: [10.22067/jfcej.2023.79505.1189](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.79505.1189)

1. Introduction

Functionally Graded Materials (FGMs) are well-known for their high thermal resistance and low thermal stresses. These materials are commonly used in structures that are subjected to impact and thermal shocks. FGMs consist of a pure ceramic layer on one side, which is weak in comparison to other materials, especially metals, due to their low ductility; the feature makes them very susceptible to cracking. Therefore, there is a strong need to increase the ductility of ceramics. Incorporating a resistant coating can lead to better performance. Moreover, the other side of FGMs is made of pure metal, which can be improved by a resistant coating to increase its thermal capacity, corrosion resistance, and surface wear resistance. These resistant coatings are multi-layered composite materials that are placed next to each other but are not soluble in each other. These materials are made up of a polymeric resin (plastic reinforced with coarse molecules) as a base with strings and fibers as the reinforcing agent. Therefore, in this study, multi-layered composite materials were placed on both sides of the FGM core. One of the innovations of this study is the comparative performance analysis of the impact of parameters on the dynamic response of cylindrical shells with MLC-FGM-MLC structure under impact loading. This includes the investigation of the influential impacts of FGM core volumetric power index, types of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) and GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) layers, angles of layer orientation, and the number of layers of composite materials on the shell's response. For this purpose, the shell is modeled as a set of smaller shell elements using the finite element method in Abaqus software, and its nonlinear geometric dynamic behavior is examined by applying the equations governing the deformed elements in each time step.

2. Fundamentals and concepts

In this study, the target shell's core is made of ceramic and metal phases and has a gradual and continuous change of material properties along its thickness. Using the mixing law, material properties such as elasticity modulus, density, and Poisson's ratio vary throughout the variable

thickness. This change in material properties is defined by Equation 1.

$$p(z) = p_c V_c(z) + p_m V_m(z) \quad (1)$$

where p_c and p_m represent the material properties of ceramic and metal phases in FGM, respectively, and $V_c(z)$ and $V_m(z)$ are the volume fractions of ceramic and metal, respectively, which is expressed as follows:

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

$$V_c = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n \quad (3)$$

In these equations, n is the volume power index of volume and h is the thickness of the desired shell.

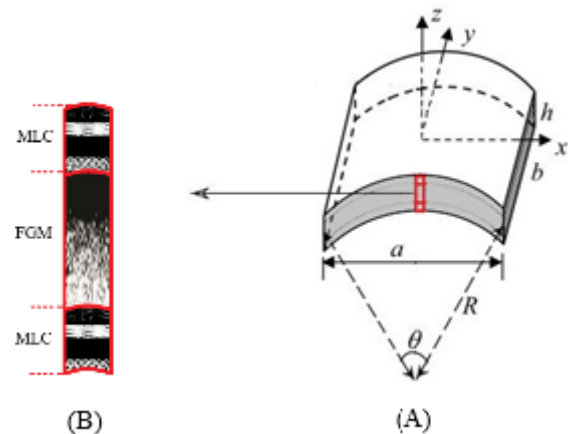


Figure 1. A) geometry and coordinates of the hollow cylindrical shell; B) schematic placement of MLC and FGM layers along the thickness of the shell

The shell has dimensions $a=b=1$ (Figure 1) and simple boundary conditions at the four edges of the shell (Figure 1). A Frenner impact is applied to the outer surface of the cylindrical shell according to Equation 4. The studied cylindrical shell is composed of composite and functionally graded materials, and the materials used in the

*Manuscript received: November 8, 2022, Revised, February 20, 2023, Accepted, May 14, 2023.

1. PhD Candidate, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Corresponding author. Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: shahabf@um.ac.ir

shell's skin and core are represented as inner skin/core/outer skin. Therefore, for examining the influential parameters, four different cases of CFC, CFG, GFC, and CFG are considered, where CFC stands for CFRP/FGM/CFRP, CFG stands for CFRP/FGM/GFRP, GFC stands for GFRP/FGM/CFRP, and GFG stands for GFRP/FGM/GFRP.

$$\begin{aligned}
 P(x, y, t) &= P_0 P_t(t) P_s(x, y) \\
 P_0 &= 100 \text{ kPa} \\
 P_s(x, y) &= 1.0 \\
 P_t(t) &= \begin{cases} \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_p}} & t \leq t_p \\ 0 & t > t_p \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Here P_0 is the maximum pressure during loading time, $P_t(t)$ is the pressure distribution over time range, and P_s is the pressure distribution on the shell surface, α is the wave shape parameter, t is the elapsed time, and t_p is the loading time considered for $t_p=20\text{ms}$, $\alpha=2$ in this study.

The type of material mixture for FGM is selected as metal-ceramic (aluminum-silicon carbide). Table 1 presents the mechanical properties of these materials such as Young's modulus, density, and Poisson's ratio. The upper and lower MLC surfaces of the shells are made of composite materials GFRP and CFRP. Table 2 shows their mechanical specifications.

Table 1. Mechanical properties of FGM materials

Mechanical properties	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Aluminum	67	2702	0.33
Silicon Carbide	302	3100	0.17

Table 2. Mechanical properties of composite materials

Mechanical properties	CFRP	GFRP
Density (kg/m ³)	1572	2301
E_x (GPa)	121	46.3
E_y (GPa)	14	11.6
E_z (GPa)	14	11.6
G_{xy} (GPa)	5.05	4.28
G_{yz} (GPa)	5.02	4.18
G_{xz} (GPa)	5.05	4.28
ν_{xy}	0.17	0.25
ν_{yz}	0.40	0.39
ν_{xz}	0.020	0.062

3. Examined parameters

First, the impact of the volume power index of the FGM material in the core of the shell was examined. For this purpose, seven volume power indices ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) with a curvature of 0.25 (4-meter radius) were modeled under impact loading. The multilayer composite surfaces on both sides of the FGM core were arranged in four layers and with angles of $45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$. Next, the placement of monolayers in the

multilayer composite surfaces was examined and five angles ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) were analyzed. Shells with a curvature of 0.25, 12 mm thickness, and FGM core with volume power index $n=1$ were modeled under impact loading. Finally, the impact of the number of layers in the composite surfaces of the shell was examined, and models with 4, 8, 12, 16, and 32 layers were modeled under impact loading. In this study, a curvature of 0.25 and layering of $-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$ for every 4 layers in the composite surfaces of the shell and volume power index $n=1$ for the FGM core were considered.

4. Conclusion


The effective factors of composite cylindrical shells with FGM core, including the volumetric power index, different angles of fiber placement in the composite materials, and the number of composite layers, were investigated. The results of comparing and evaluating the dynamic behavior of the shells are summarized as follows.

- Nonlinear geometric displacement is more significant than linear displacement at the center of the shell, and with the increase of the volumetric power index, the amount of displacement at the center of the shell has increased. The maximum displacement occurred in the all-metallic shell ($n=\infty$), and the minimum displacement occurred in the all-ceramic shell ($n=0$), and the response of other shells was between the two states. Moreover, in the CFC and GFG states, the shell has the least and most displacements, respectively;
- By examining the arrangement of monolayers, it was observed that selecting $\theta=15^\circ$ will cause the minimum displacement in the shell, and selecting $\theta=60^\circ$ will cause the maximum displacement in the shell;
- Examining the impact of the number of multilayer composite layers on the upper and lower surfaces of the shell showed that when the number of layers increases the maximum displacement at the center of the shell decreases.



تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM تحت بار ضربه با استفاده از روش اجزای محدود*

یادداشت پژوهشی

مجتبی شهرکی^(۱) فرزاد شهابیان مقدم^(۲) 

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79505.1189

چکیده شناخت رفتار تغییرشکل‌های بزرگ پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چندلایه (MLC) با هسته مواد هدفمند (FGM) که دارای ضخامت کم هستند در برابر بارهای ضربه‌ای، مهم می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای اثرگذار (شاخص توان حجمی مواد هدفمند، نحوه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مواد مرکب) بر روی پاسخ دینامیکی پوسته مورد نظر تحت بار ضربه پرداخته می‌شود. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته استوانه‌ای به روش المان محدود توسط مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است و اثر شاخص توان حجمی هسته FGM و پارامترهای اثرگذار مواد مرکب چندلایه همچون نوع لایه‌ها شامل پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)، زوایه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییر مکان پوسته کاهش می‌یابد. به طوری که بیشینه تغییر مکان در پوسته CFRP/FGM/CFRP با هسته تمام فلزی و کمینه تغییر مکان در پوسته GFRP/FGM/GFRP با هسته تمام سرامیکی اتفاق می‌افتد. بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها نشان می‌دهد که انتخاب زوایه قرارگیری ۱۵ درجه، موجب وقوع تغییر مکان کمتری می‌گردد و همچنین با افزایش تعداد لایه‌ها، کاهش تغییر مکان مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی مواد مرکب چندلایه، مواد هدفمند، پوسته استوانه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی، بار ضربه.

Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using by Finite Element Method

Mojtaba Shahraki

Farzad Shahabian Moghadam

Abstract In recent decades, shells made of composite materials have been used in modern structures under impact load. Multi-Layer Composites (MLC) and Functionally Graded Materials (FGMs) are the upgrades of composites that have been considered due to their suitable mechanical properties such as high resistance to weight ratio, flexibility and impact resistance. In this research, geometric nonlinear dynamic behavior on multilayer composite cylindrical shells with FGM core under impact load has been analyzed; because it is necessary to know how structures made of these materials behave under such loads. For this purpose, the effect of FGM core volume fraction index and the effective parameters of multi-layer composites such as the angles of the layers and the number of layers have been investigated. The results of this study show that by increasing the volume fraction index, the maximum displacement of the shell decreases. The maximum displacement occurs in the CFC (CFRP/FGM/CFRP) shell with pure metal FGM and the minimum displacement occurs in the GFG shell with pure ceramic FGM. Evaluation of the different positions of the layers shows that selecting a 15-degree positioning angle causes less displacement and also decreases the displacement as the number of layers increases.

Keywords Multi-Layer Composites (MLC), Functionally Graded Material (FGM), Cylindrical Shell, Geometric nonlinear dynamic analysis, Impact Load.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۲۴ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

Email: shahabf@um.ac.ir

مقدمه

پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب کاربردهای متنوعی دارند. این پوسته‌ها معمولاً در صنایع فضایی، نظامی، حمل و نقل و ساخت و سازهای عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوسته‌ها دارای ضخامت کم و سطحی گسترده هستند و زمانی که در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌گردند.

امروزه مواد هدفمند به‌عنوان موادی با مقاومت حرارتی بالا و تنش‌های حرارتی پایین شهرت یافته‌اند. کاربرد این مواد در سازه‌هایی که تحت ضربه و شوک‌های حرارتی قرار می‌گیرند، مرسوم است. بور و دیووز [1] با الهام از نحوه ساخت مواد مرکب گرادینانی که خواص مکانیکی آنها در راستای مورد نظر با شیب ملایمی تغییر می‌کند، ایده‌ای را برای استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد ارائه دادند. پس از آن، یک تحقیق گسترده در زمینه مواد با تغییر عملکرد تدریجی به وسیله کوزومی و همکاران [2] در آزمایشگاه هوافضای ژاپن برای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت آغاز شد که با ساخت پوسته تمام یافت. هورگان و چان [3] به بررسی اثرات ناهمگنی مواد (FGM) بر پاسخ استوانه‌ها و دیسک‌های دایره‌ای توخالی همسانگرد خطی الاستیک پرداختند که تحت فشار داخلی یا خارجی یکنواخت می‌باشند. بدین منظور، معادله‌های حاکم را در حالت کرنش صفحه‌ای با توزیع توانی ضریب کشسانی در راستای شعاعی به کمک معادله‌های لامه استخراج کردند و مشاهده شد که تنش‌های ایجاد شده در استوانه و دیسک FGM به طور قابل توجهی با حالت همگن متفاوت است. به عنوان مثال، حداکثر تنش حلقه‌ها، برخلاف مواد همگن، بر روی سطح داخلی رخ نمی‌دهد.

اگرچه تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه ضربه بر روی صفحات مرکب انجام شده است، لیکن اثر ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای مرکب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. توتونسو و ازترک [4] رفتار سازه‌های گرادینانی و مشخص کردن روش‌های تحلیلی برای بررسی تنش‌ها در وسایل شکست‌پذیر را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش تحلیلی، روابط دقیقی برای تنش‌ها در سازه‌های فشاری گرادینانی ارائه کرده‌اند که ویژگی و نوآوری بارز این کار محسوب می‌شود. از طرفی دیگر محدودیت در مدل‌سازی سازه‌های گرادینانی و عدم در

نظر گرفتن عوامل بیرونی مانند حرارت و فشار در مدل‌سازی تنش‌ها از ضعف‌های این کار می‌باشد. در این مقاله، از تابعی برای توزیع متغیرهای مکانیکی در سازه استفاده شده است که به صورت خطی و صعودی تغییر می‌کند و نتایج نشان می‌دهند که تنش‌های پایه در سازه‌های فشاری گرادینانی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و با تغییرات در پارامترهای سازه مانند شیب گرادینان، توزیع تنش در سازه نیز تغییر می‌کند. صیدی [5] به تحلیل کمانشی سازه‌های مخروطی شکل ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند پرداختند که از یک روش تحلیلی با تئوری مرتبه بالاتر بهبود یافته شده بهره جستند. از قدرت این مقاله می‌توان به دقت بالای نتایج به دست آمده و استفاده از تئوری با دقت بالاتر بهبود یافته برای بررسی رفتار پوسته‌های ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند اشاره نمود و از طرفی عدم ارائه مقایسه نتایج با روش‌های موجود در این زمینه می‌تواند به عنوان یک ضعف در این مقاله مطرح شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که رفتار پوسته‌های ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند به شدت تحت تأثیر پارامترهای مختلف مانند ضخامت، نسبت شعاع کف و بالا، توزیع تنش در پوسته می‌باشد.

شینمن و گریف [6] به بررسی تحلیل دینامیکی پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت با شکل‌دهی با استفاده از تئوری هوگرن-لوکاس-کرکهایمر (HLK) Hogben-Lucas-Krecker پرداختند. این تئوری، به عنوان یکی از تئوری‌های پیشرفته محاسباتی، قابلیت استفاده در بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی را داراست. در این مقاله، نویسندگان با استفاده از روش المان محدود و تئوری HLK، برای پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت، نتایج تحلیلی را ارائه داده‌اند که به دلیل استفاده از روش تحلیلی دقیق و تئوری پیشرفته، قابل توجه است و می‌تواند به عنوان یکی از منابع مفید برای بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی با شکل‌دهی لایه‌ای دو لایه، استفاده شود. با این حال، ضعف این مقاله می‌تواند شامل عدم مطالعه تأثیر اثرات ترک‌ها و شکستگی‌ها بر رفتار دینامیکی پوسته باشد. همچنین، این مقاله تنها به پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت پرداخته است و به بررسی پوسته‌های با لایه‌های بیشتر و یا با جنس‌های متفاوت، پرداخته نشده است و در آخر نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه برشی و شعاع

نرم افزار آنالیز المان محدود آباکوس باعث افزایش دقت و دقت تحلیل شده است و از طرفی ضعف این مطالعه این است که آزمایش ها فقط بر روی نمونه های خاصی از فیبر فلز لامینه شده انجام شده و ممکن است به نتایجی که در سایر شرایط یا با استفاده از مواد مختلف به دست می آید، نیازمند بازبینی باشد و در آخر، نتایج نشان داد که ترک های شکست در پوسته فلزی باعث خرابی فیبر شده و به شکل خطی در آنها گسترش می یابد، افزایش سختی فلز داخلی موجب کاهش رشد ترک می شود و با افزایش ضخامت فلز داخلی، رفتار رشد ترک تغییر کمی می کند. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که میزان رشد ترک در لایه فلزی بیشتر از لایه فیبری است.

کریستوفرو و همکاران [9,10] خرابی ناشی از ضربه به بافت کربن/اپوکسی در شکل سیلندری مورد بررسی قرار دادند. نوآوری این کار در استفاده از مدل سازی المان محدود برای تحلیل خرابی ضربه در این بافت بوده است. برای بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی، از مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند سرعت ضربه، شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی مورد بررسی قرار گرفته است. قدرت این کار در استفاده از مدل سازی المان محدود در بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی است که می تواند در طراحی سازه های سبک و مقاوم استفاده شود و از سوی دیگر، ضعف این کار می تواند مربوط به محدودیت در انجام آزمایش های عملی باشد. همچنین، مدل سازی المان محدود نیازمند دقت در مشخص کردن شرایط مرزی و پارامترهای ورودی است و در آخر، نتایج نشان می دهد که شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی تأثیر به سزایی دارند و خرابی بیشتر در محدوده سطح ضربه ایجاد می شود. همچنین، سرعت ضربه نیز تأثیر زیادی بر روی خرابی دارد. کومار و همکاران [11] به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند خصوصیات لمینت، ساختار توده ای و نحوه برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت های کامپوزیتی خمیده می پردازند. نوآوری این کار در بررسی تأثیر شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت های کامپوزیتی خمیده است. قدرت این پژوهش، استفاده از تحلیل عددی و آزمایش های عملی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، به عنوان یک روش تحقیقی

پوسته، تنش های اصلی در پوسته افزایش می یابند و همچنین، با افزایش بار انتقالی، نقطه شکست پوسته به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

رامکومار و ثاکار [7] پوسته های چندلایه دارای انحنا را تحت اثر بار ضربه ای تحلیل کردند این کار در حوزه مواد مرکب و بهبود عملکرد سازه های مرکب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله، از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه ها بر روی پاسخ دینامیکی بررسی شده است.

نوآوری این مقاله، استفاده از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین است. علاوه بر این، بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه ها بر روی پاسخ دینامیکی نیز از دیگر نوآوری های این مقاله است. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحقیق، نشان می دهد که برخی پارامترهای مانند ضخامت و جنس لایه ها می توانند تأثیر مهمی بر روی پاسخ دینامیکی پوسته های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین داشته باشند. به علاوه، این پژوهش به نشان دادن تأثیر طرح لایه بندی بر روی پاسخ دینامیکی صفحات لامینه ای نیز می پردازد. ضعف این مطالعه، محدودیت در استفاده از روش تحلیلی مورد استفاده است که ممکن است برای برآورد پاسخ دینامیکی بعضی از سازه های مرکب به خصوص در شرایط مختلف، دقت کافی را نداشته باشد.

جانسون و هاموند [8] به بررسی رفتار رشد ترک داخلی پلی های تیتانیوم (Ti) در لایه های داخلی یک لامینه فایبر-فلز (Fiber Metal Laminate) با استفاده از روش های آزمایشگاهی پرداختند. یکی از ویژگی های نوآورانه این پژوهش، انجام آزمایش های ترکی بر روی پلی های تیتانیوم داخلی لامینه فایبر-فلز بوده است که پیش تر در تحقیقات بسیار کمی مورد بررسی قرار گرفته بود. برای انجام این پژوهش، ابتدا نمونه های آزمایشی ساخته شده و سپس با استفاده از روش آزمایش ترکی، رفتار رشد ترک در پلی های تیتانیوم داخلی بررسی شده است. قدرت این پژوهش در بررسی دقیق و اصولی رفتار شکست و رشد ترک در فیبر فلز لامینه شده با استفاده از تحلیل ترموشعاعی و آزمون کرنش فیلم است. همچنین، استفاده از

ساختارهای ساندویچی FML/Core/FML عبارتند از دو رویه (Fiber Multi-layer) FML که در بالا و پایین هسته واقع شده‌اند. رویه‌های FML می‌توانند از مواد فلزی مانند آلومینیم، فولاد، مس و تیتانیوم به همراه الیاف از نوع شیشه، کولار و کربن ساخته شوند. هسته می‌تواند از جنس فوم (از نوع متخلخل و یا متراکم) و یا ماده FGM باشد [13]. هاجینسون و هی [14] به بررسی رفتار بالقوه برای پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی پرداختند. برای این منظور از روش المان محدود استفاده شده است تا رفتار مکانیکی پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی را برای بارگذاری‌های محوری و فشاری بررسی کنند. قدرت این پژوهش این است که به دلیل اینکه در پژوهش‌های قبلی بررسی نشده بود، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شود اما ضعف این مطالعه این است که تنها رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی بررسی شده است و تأثیر پارامترهای دیگری مانند جنس پوسته و هسته بر رفتار پوسته‌های فوم فلزی در برابر بارگذاری ناشی از فشار مؤثر بررسی نشده است. به علاوه، رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم پلیمری مورد مطالعه قرار نگرفته است و نتایج نشان می‌دهد که پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی در مقایسه با پوسته فوم پلیمری با هسته فوم فلزی، عملکرد بسیار بهتری در برابر فشار مؤثر دارد. همچنین، این مطالعه نشان داد که با افزایش ضخامت پوسته، باربری مؤثر پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی افزایش می‌یابد. گارگ و همکاران [15] به طراحی و تحلیل سازه‌های مرکب، به‌ویژه پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، متمرکز شدند. در این پژوهش، روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله ارتعاش آزاد پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس تئوری لایه‌ای پوسته و با در نظر گرفتن تأثیر تغییرات ضخامت و جهت المان‌ها به کار گرفته شده‌اند. استفاده از روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله‌های پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، مزیت‌هایی مانند دقت بیشتر و سرعت حل بیشتر را به دنبال دارد. همچنین، در این مقاله به‌عنوان یک نوآوری، تأثیر ضخامت و جهت المان‌ها بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، ضعف این پژوهش ممکن است شامل محدودیت در نوع سازه‌های مورد مطالعه و انجام آزمایش بر روی آنها باشد.

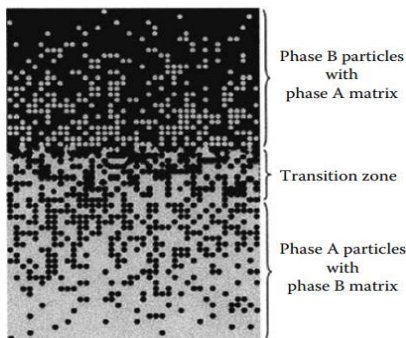
کارآمد، می‌باشد و از طرف دیگر، ضعف این کار نیز می‌تواند عدم در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم مانند اثرات پیشرونده، تغییر شکل‌های پلاستیکی و تغییر شکل‌های شکستی در تحلیل عددی و آزمایش‌های عملی باشد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تغییر در خصوصیات لمینت، شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد، تأثیر بسیاری بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت دارد.

هر و همکاران [12] از روش المان محدود برای بررسی رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت استفاده کرده‌اند. نوآوری این پژوهش ارائه روش المان محدود برای شبیه‌سازی ضربه‌های کم سرعت بر روی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای است که از المان‌های سه بعدی برای مدل‌سازی سازه‌های لایه‌ای استفاده شده است. در روش تحقیق، نویسندگان ابتدا رفتار آزمایشی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای را بررسی کرده و سپس مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی رفتار آنها توسعه داده‌اند و سپس با استفاده از این مدل المان محدود، بررسی شده است که نحوه قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر بسیار زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد. از قوت‌های این پژوهش، استفاده از روش المان محدود برای تحلیل واکنش محیطی این نوع مواد است. همچنین، نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مقاله، توانایی بالایی در توصیف واکنش محیطی مواد مرکب دارد و از سوی دیگر، ضعف احتمالی این مقاله ممکن است به دلیل نبود تجربه عملی محاسبات باشد که می‌تواند از دقت و اعتبار نتایج تحلیلی کاسته شود. همچنین، محدودیت‌هایی مانند تأثیرات دما، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی در نظر گرفته نشده است که می‌تواند به ناهمخوانی بین نتایج تحلیلی و تجربی منجر شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ترک‌ها و خراش‌های جدی در سطح سازه ایجاد می‌شود. همچنین، ملاحظه شد که روش قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد.

شود. همچنین، پوسته‌ها به دلیل سطح گسترده و ضخامت کم اغلب در برابر بارهای ضربه‌ای دچار تغییر مکان زیادی می‌شوند. بر اساس جستجوهای انجام شده، تاکنون کمتر به بحث ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM پرداخته شده است. لذا از جمله نوآوری‌ها و ویژگی‌های این پژوهش، بررسی عملکرد مقایسه‌ای پارامترهای اثرگذار بر پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای با ساختار MLC-FGM-MLC تحت بار ضربه عنوان نمود که شامل بررسی تأثیرگذاری شاخص توان حجمی هسته FGM، نوع لایه‌ها (CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic و GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic)، زوایای قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مواد مرکب چندلایه، بر روی پاسخ پوسته می‌باشد. برای این کار، با استفاده از روش المان محدود، پوسته به عنوان یک مجموعه از المان‌های پوسته‌ای کوچک‌تر در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی می‌شود و رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی آن با استفاده از معادلات حاکم بر المان‌های تغییر شکل یافته شده در هر گام زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مبانی و مفاهیم پایه

مواد هدفمند گونه‌ای از مواد مرکب هستند 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 وسیله تغییر تدریجی نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده آنها ایجاد می‌شود. قابل توجه است که به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی، مشکلات عدم پیوستگی که در ساختارهای مرکب موجود است در مواد هدفمند به وجود نمی‌آید. در شکل (۱) نمای شماتیک یک ساختار هدفمند متشکل از دو ماده A و B نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایش شماتیک ماده FGM تشکیل شده از دو فاز A و B [17]

همچنین، محدودیت‌هایی مانند عدم نظر گرفتن تأثیر شکل هندسی و تغییرات دما بر رفتار سازه‌ها نیز می‌تواند به عنوان ضعف مطرح شود.

رحمانی و همکاران [16] به بررسی و پژوهش پاسخ لرزشی یک پوسته استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر می‌پردازد. در این پژوهش، از روش المان محدود برای مدل‌سازی پوسته با هسته استفاده شده است و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. نوآوری این پژوهش، استفاده از یک هسته انعطاف‌پذیر در ساختار پوسته‌ای استوانه‌ای است. بدین منظور ابتدا مدل المان محدود پوسته‌ای استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر ساخته شده و پس از آن پاسخ لرزشی سازه با استفاده از روش المان محدود به دست آمده است. در انتها، نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه و تحلیل شده‌اند. قدرت این پژوهش در بررسی تأثیر هسته انعطاف‌پذیر در پوسته‌های استوانه‌ای است که می‌تواند بهبود خواص لرزشی و استحکام سازه را فراهم کند، اما ضعف آن مربوط به محدودیت در بررسی تأثیر مختصات هسته بر خواص سازه است و در آخر نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از هسته انعطاف‌پذیر در پوسته‌های استوانه‌ای می‌تواند خواص لرزشی و استحکام سازه را بهبود بخشد.

مواد FGM در یک سطح خود دارای سرامیک خالص می‌باشند که نقطه ضعف سرامیک‌ها در مقایسه با دیگر مواد به ویژه فلزات، چقرمگی پایین آنها است که در عمل این مواد را در برابر ترک بسیار حساس کرده است. بنابراین نیاز شدیدی به افزایش چقرمگی سرامیک‌ها احساس می‌شود. لذا گنجاندن رویه‌ای مقاوم می‌تواند عملکرد بهتری را منجر شود. از طرفی سطح دیگر مواد FGM فلز خالص بوده که به منظور بهبود خواص آن می‌توان از رویه‌ای مقاوم بهره جست تا ظرفیت گرمایی، مقاومت به خوردگی و سایش سطح فلزی را افزایش دهد. این رویه‌های مقاوم به صورت مواد مرکب چند لایه می‌باشند، متشکل از چند لایه بوده که در کنار هم قرار گرفته‌اند ولی در عین حال قابل حل در یکدیگر نیستند این مواد از یک رزین پلیمری (پلاستیک تقویت شده با مولکول‌های درشت) به عنوان زمینه با رشته‌ها و الیافی به عنوان عامل تقویت‌کننده تشکیل می‌شوند. از این رو، در این پژوهش در دو طرف هسته FGM مواد مرکب چندلایه قرار داده شد و رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی این نوع سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفته می‌-

در این رابطه n شاخص توان حجمی، h ضخامت پوسته مورد نظر می‌باشد. در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل 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 صفحه کاملاً سرامیکی و صفحه کاملاً فلزی مربوط می‌شود. تغییرات تابع توان حجمی $(z/h+0.5)^n$ ، در راستای ضخامت صفحه (h) برای مقدارهای مختلف n در شکل (۲) نشان داده شده است.

سیستم مختصات کارتزین (x, y, z) پوسته استوانه‌ای MLC با هسته 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 ۳). تغییر مکان پوسته در راستای ضخامت پوسته با حرف w نشان داده می‌شود.

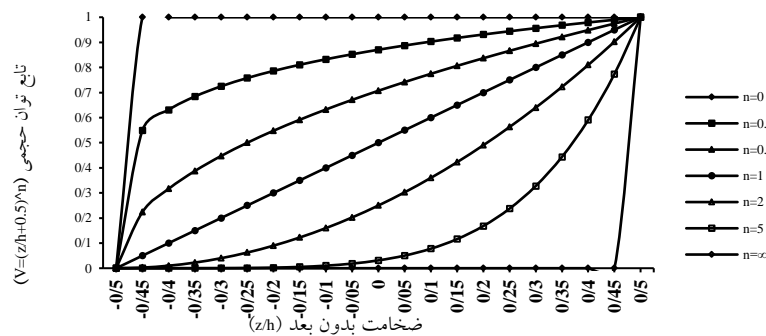
در این پژوهش پوسته هدفمند ساخته شده از فازهای سرامیک و فلز، دارای تغییری تدریجی و پیوسته از خواص مواد در راستای ضخامت خود باشد. با استفاده از قانون اختلاط، خواص مواد هم‌چون ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در سراسر ضخامت متغیر است. این تغییر خواص به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$p(z) = p_c V_c(z) + p_m V_m(z) \quad (1)$$

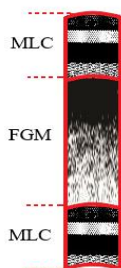
که در آن، p_c و p_m به ترتیب بیانگر خواص مواد فازهای سرامیکی و فلزی FGM می‌باشد و $V_c(z)$ و $V_m(z)$ به ترتیب تابع حجمی سرامیک و فلز می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌گردد [18-19].

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

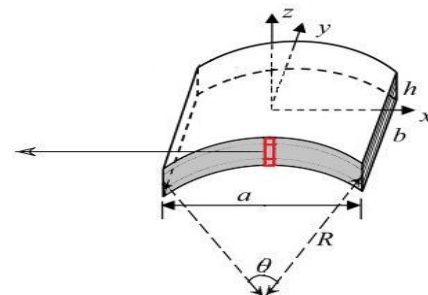
$$V_c = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n \quad (3)$$



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



ب



الف

شکل ۳ الف) هندسه و مختصات کارتزین پوسته استوانه‌ای توخالی ب) شماتیک قرارگیری لایه‌های MLC و FGM در راستای ضخامت پوسته

راستی آزمایی

به منظور راستی آزمایی نحوه مدل سازی پوسته استوانه ای FGM و پوسته MLC تحت بار ضربه در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، از نتایج عددی پژوهش انجام شده توسط حاج لویی (Hajlaoui) و همکاران [19] برای صحت سنجی پوسته های استوانه ای FGM و از پژوهش هوفت و همکاران [20] برای صحت سنجی پوسته های چند لایه تحت ضربه استفاده شده است.

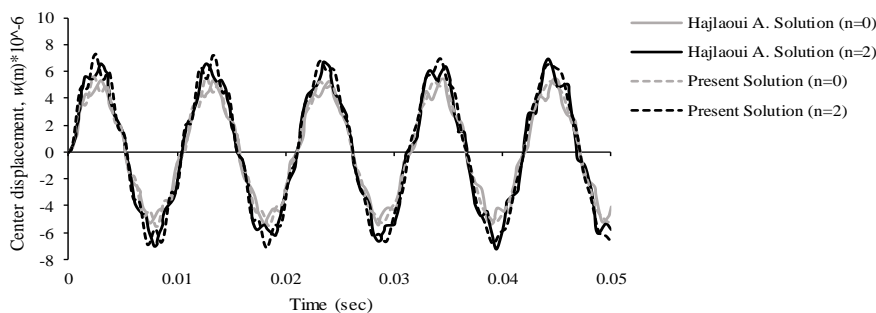
حاج لویی و همکاران به بررسی عددی پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته های استوانه ای توخالی FGM که سطح کل پوسته تحت فشار یکنواخت $q(t) = 1500 \sin(600t)$ می باشد، پرداختند. این پوسته با ابعاد $L/R=80$, $R/h=500$ (که R شعاع، h ضخامت و L طول پوسته می باشد) و دارای تکیه گاه ساده با دو شاخص توان حجمی $(n=0, 2)$ در ۱۰ لایه مدل سازی گردید. خواص مکانیکی مواد در جدول (۱) آورده شده است. شرایط مرزی در چهار لبه پوسته به صورت مفصلی می باشد و از اثر استهلاک و میرایی صرف نظر شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی با گام زمانی $\Delta t = 0.01T$ انجام شده است که T دوره تناوب طبیعی سازه می باشد. در این پژوهش، نتایج عددی مرجع [19] با استفاده از نرم افزار آباکوس راستی آزمایی شد که المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی برای تحلیل در نرم افزار آباکوس انتخاب شده است. در شکل (۴)

تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز پوسته توخالی و در جدول (۲) بیشینه تغییر مکان مرکز پوسته توخالی برای دو مقدار توان حجمی نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، نتایج مدل سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیرهای گزارش شده حاصل از مرجع [19] است.

در پژوهشی دیگر هوفت و همکاران [20] یک پوسته تک- لایه دو انحنایی از مواد مرکب با مشخصات $h = 2.5 \text{ mm}$ (ضخامت)، $R_1 = R_2 = 396 \text{ mm}$ (شعاع انحنا)، $\psi_0 = \theta_0 = 40^\circ$ (زاویه داخلی) را تحت اثر بار ضربه ای به معادله $P(t) = P_0 e^{-t/\tau}$ که در آن $P_0 = 0.9 \text{ MPa}$ و $\tau = 1 \text{ ms}$ می باشد، تحلیل کرده اند. در شکل (۵) هندسه این پوسته نشان داده شده است. شرایط مرزی در این مسئله به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است و از اثر میرایی صرف نظر شده است. خصوصیات ماده در جدول (۳) نشان داده شده است. در شکل (۶) و جدول (۴) نتایج حاصل از حل عددی مرجع [20] با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر توسط نرم افزار آباکوس نشان داده شده است. برای مدل سازی مسئله مورد نظر در نرم افزار آباکوس از المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج نرم افزار دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیر مرجع [20] می باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی پوسته FGM [19]

نوع مواد	ضریب کشسانی (GPa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون
تیتانیوم (فلز)	۱۰۵/۶۹۶۰	۴۴۲۹	۰/۲۹۸۱
زیرکونیا (سرامیک)	۱۵۴/۳۲۱۱	۵۷۰۰	۰/۲۹۸۰

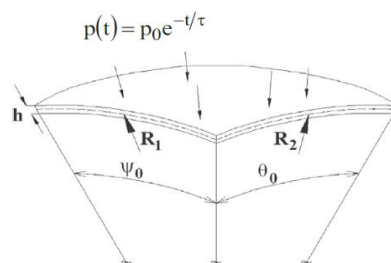


شکل ۴ مقایسه بین تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز پوسته استوانه ای توخالی FGM حاصل از نرم افزار آباکوس و مرجع [19]

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [19]

شاخص توان حجمی	نرم‌افزار آباکوس	مرجع [19]	درصد خطا (%)
۰	-۵/۵۱۸	-۵/۴۵۸	۱/۰۹
۲	-۷/۱۹۳	-۷/۲۰۴	۰/۱۵

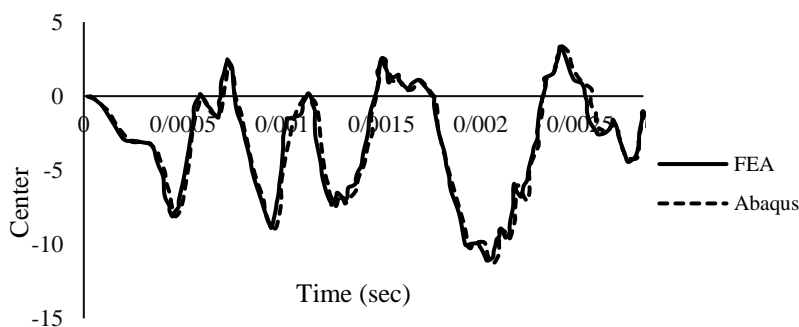
بیشینه تغییر مکان مرکز پوسته (mm)



شکل ۵ هندسه پوسته دو انحنایی [20]

جدول ۳ خواص مکانیکی ماده مرکب [20]

خواص مواد	0/90 Woven Roving E-Glass/Vinyl Ester
Density (kg/m ³)	1391
E _x (GPa)	17
E _y (GPa)	17
E _z (GPa)	7.48
G _{xy} (GPa)	4
G _{yz} (GPa)	1.73
G _{xz} (GPa)	1.73
ν _{xy}	0.13
ν _{yz}	0.28
ν _{xz}	0.28



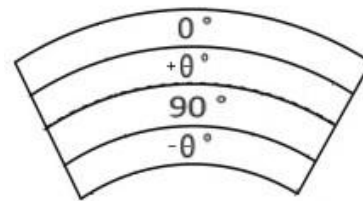
شکل ۶ مقایسه تغییر شکل مرکز پوسته حاصل از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

جدول ۴ نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

بیشینه تغییر شکل مرکز پوسته (mm)	نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر)	روش FEA مرجع [20]	درصد خطا (%)
۱۱/۵۲	۱۱/۳۶	۱/۴	

تحلیل و بررسی

رویه‌های پوسته مورد بررسی (شکل ۳) از مواد مرکب ساخته شده‌اند که از چینش تعدادی تک‌لایه روی یکدیگر حاصل می‌شوند. زاویه قرارگیری و تعداد لایه‌های MLC، در تعیین خصوصیات پوسته اهمیت دارد. لذا با توجه به تعداد لایه‌ها برای هر چهار لایه که بر روی هم قرار می‌گیرد لایه‌چینی $[0^\circ / +\theta^\circ / 90^\circ / -\theta^\circ]$ انتخاب شده که در صورت افزایش تعداد لایه‌ها همین لایه‌چینی تکرار گردیده است (شکل ۷). از طرفی هسته پوسته مورد نظر از FGM ساخته شده است که از عوامل مهم اثرگذار بر روی این مواد، شاخص توان حجمی می‌باشد. بنابراین در ادامه اثر شاخص توان حجمی FGM، زوایای قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های MLC مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۷ زاویه‌های قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه MLC

طبیعی سازه می‌باشد. انتخاب گام زمانی مناسب از طریق سعی و خطا انجام شده است بدین صورت که با کوچک‌تر کردن اندازه گام زمانی تلاش و زمان محاسبات به مقدار زیادی افزایش می‌یابد در صورتی که پاسخ به مقدار ناچیزی تغییر می‌کند. از اثر استهلاک و میرایی صرف‌نظر شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها از مرجع [22] بهره جسته شد و جزء پوسته‌ای چهارگره‌ای (S4R) به ابعاد 10×10 میلی‌متر برای مدل‌سازی پوسته‌ها انتخاب شد. به منظور مدل‌سازی هسته FGM پوسته از مرجع [22] کمک گرفته شد که به صورت ۱۴ لایه همگن با ضخامت ۶ میلی‌متر انجام گردید که به صورت لایه‌های پیوسته به هم در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. دو ماده مرکب CFRP و GFRP که دارای کاربرد فراوانی می‌باشد، به عنوان رویه‌های MLC پوسته استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. سعی بر آن بوده تا رویه‌های MLC به کار رفته هم‌وزن با هسته FGM باشند لذا با توجه به ثابت بودن طول و دهانه پوسته استوانه‌ای، تنها ضخامت رویه‌های MLC متغیر بوده و براساس نوع آن (CFRP و GFRP) و شاخص توان حجمی هسته FGM مشخص می‌گردد. همان‌طور که بیان شد پوسته استوانه‌ای مورد بررسی متشکل از مواد مرکب و مواد هدفمند می‌باشد که جنس به کار رفته شده در رویه‌ها و هسته پوسته به صورت، رویه داخلی / هسته / رویه خارجی، نمایش داده می‌شود. لذا در بررسی پارامترهای اثرگذار چهار حالت مختلف CFC مخفف CFRP/FGM/CFRP، مخفف CFRP/FGM/CFRP، مخفف GFC و GFRP/FGM/CFRP و مخفف GFG مخفف GFRP/FGM/GFRP در نظر گرفته شد.

$$P(x, y, t) = P_0 P_t(t) P_s(x, y) \quad (۴)$$

$$P_0 = 100 \text{ kPa} \quad (۵)$$

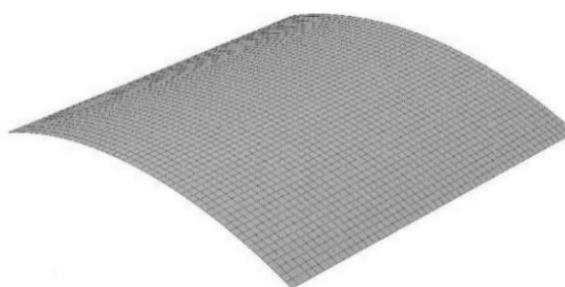
$$P_s(x, y) = 1.0 \quad (۶)$$

مدل‌سازی عددی. در پژوهش حاضر، تحلیل عددی به روش اجزای محدود برای پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از مواد مرکب چندلایه با هسته مواد هدفمند تحت ضربه انجام شده است که در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از روش صریح مدل‌سازی و تحلیل صورت پذیرفته شده است. پوسته دارای ابعاد $a = b = 1$ (شکل ۲) و شرایط تکیه‌گاهی در چهار لبه پوسته (شکل ۸) به صورت مفصلی می‌باشد. مابقی مشخصات هندسی پوسته بنابر مطالعه‌های پارامتری مشخص شده است. ضربه فرندر (Freuder) به معادله (۴)، به سطح خارجی پوسته اعمال می‌شود. با بهره‌گیری از گزینه Nigeom در نرم‌افزار آباکوس برای اثر تغییرشکل‌های بزرگ، پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و گام زمانی $\Delta t = 0.01T$ انتخاب شده است که T دوره تناوب

$$\text{Friedlander Function : } \begin{cases} P_t(t) = (1 - t/t_p)e^{-\alpha t/t_p}, & t \leq t_p \\ = 0, & t > t_p \end{cases} \quad (7)$$

جدول ۵ خواص مکانیکی مواد FGM [24]

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



شکل ۸ شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای در پژوهش حاضر

جدول ۶ خواص مکانیکی مواد مرکب [25]

خواص مواد	CFRP	GFRP
Density (kg/m ³)	1572	2301
E _x (GPa)	121	46.3
E _y (GPa)	14	11.6
E _z (GPa)	14	11.6
G _{xy} (GPa)	5.05	4.28
G _{yz} (GPa)	5.02	4.18
G _{xz} (GPa)	5.05	4.28
ν _{xy}	0.17	0.25
ν _{yz}	0.40	0.39
ν _{xz}	0.020	0.062

ساخته شده است و مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۶) نمایش داده شده است [25]. هندسه پوسته مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است و شبکه‌بندی پوسته نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

پارامترهای مورد بررسی

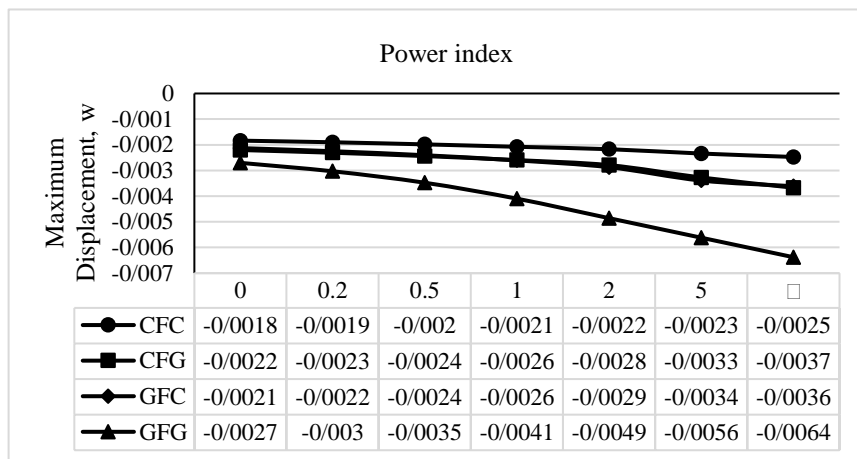
بررسی اثر شاخص توان حجمی (n). به منظور بررسی اثر شاخص توان حجمی ماده FGM در هسته پوسته هفت توان حجمی ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) با انحنای 0.25 (شعاع ۴ متر) در معرض بار ضربه مدل‌سازی شدند که رویه‌های مرکب چندلایه در دو طرف هسته FGM به صورت

که P_0 ماکزیمم فشار در مدت زمان بارگذاری می‌باشد، $P_t(t)$ توزیع فشار در محدوده زمان و P_s توزیع فشار بر روی سطح پوسته می‌باشد. α پارامتر شکل موج، t مدت زمان گذارنده شده و t_p زمان بارگذاری می‌باشد که در این پژوهش $t_p = 20ms$, $\alpha = 2$ در نظر گرفته شده است [23].

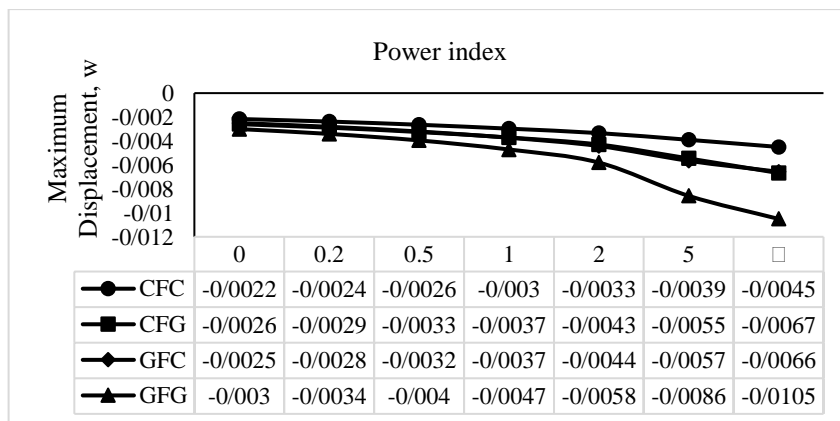
مشخصات مصالح مصرفی. نوع اختلاط مواد FGM به صورت فلز - سرامیک (آلومینیوم - سیلیکون کاربید) انتخاب شده است. خواص مکانیکی این مواد نظیر ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در جدول (۵) آورده شده است [24]. رویه‌های MLC بالا و پایین پوسته‌ها که از مواد مرکب CFRP و GFRP

بیشترین و کمترین مقدار می‌باشد که در شاخص‌های توان حجمی بزرگ از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۰-۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش شاخص توان حجمی، دامنه نوسانات و تعداد نقاط اوج تغییر مکان به ترتیب افزایش و کاهش یافته است که در حالت GFG دارای بیشترین دامنه نوسان و کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای کمترین دامنه نوسان و بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد و حالت‌های CFG و GFC بین دو حالت CFC و GFG می‌باشد.

چهارلایه و با زوایای $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]$ لایه‌چینی شده‌اند. در شکل (۹) ماکزیمم جابه‌جایی پوسته به ازای شاخص‌های توان حجمی مختلف هسته FGM پوسته برای چهار حالت GFG, GFC, CFG, CFC در تحلیل دینامیکی خطی (الف-۹) و غیرخطی هندسی (ب-۹) مورد بررسی قرار گرفته شد، همان‌طور که مشاهده می‌شود ماکزیمم جابه‌جایی پوسته در حالت خطی کمتر از حالت غیرخطی هندسی می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی مقدار بیشینه تغییر مکان افزایش یافته است، به طوری که بیشینه تغییر مکان در پوسته تمام فلزی ($n = \infty$) و کمینه تغییر مکان در پوسته تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است. همچنین ملاحظه می‌شود که شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی در حالت‌های GFG و CFC به ترتیب دارای

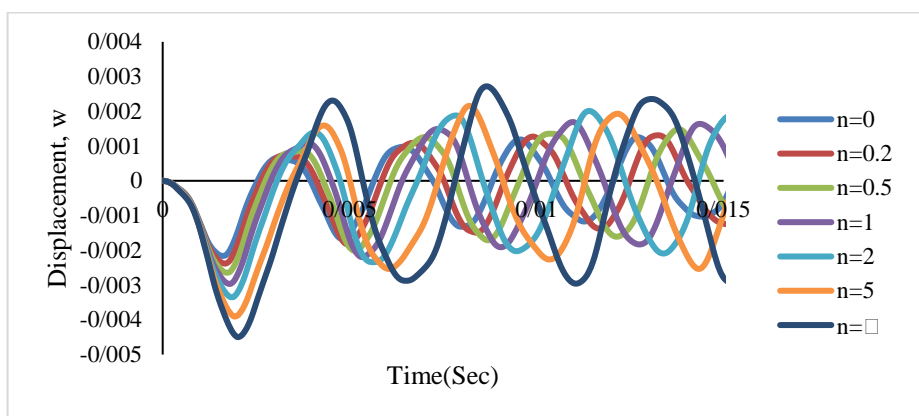


(الف)

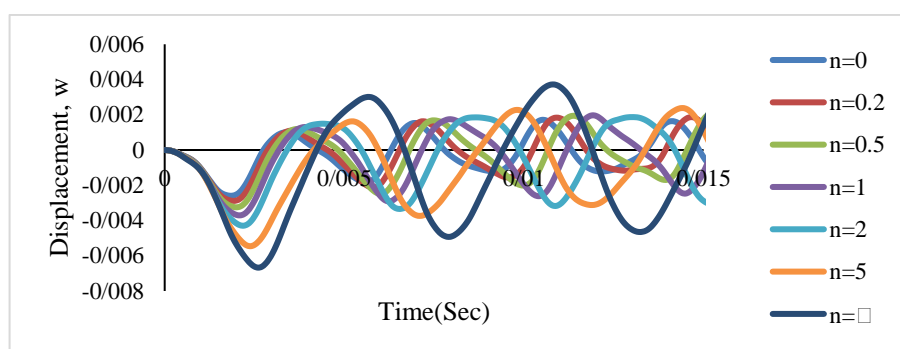


(ب)

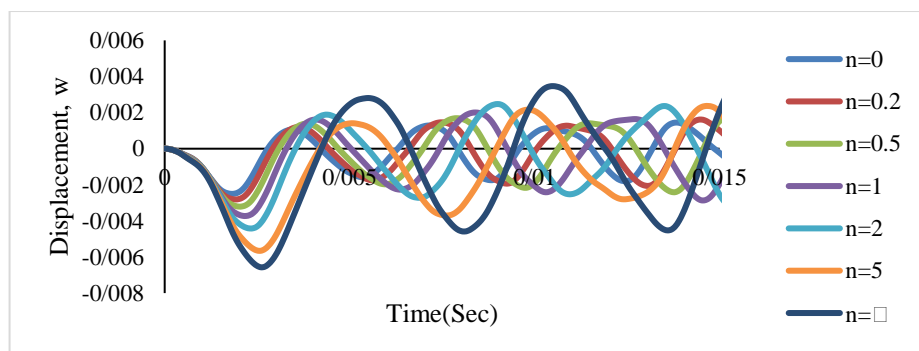
شکل ۹ بیشینه تغییر مکان پوسته بر حسب شاخص توان حجمی هسته FGM پوسته در تحلیل دینامیکی خطی (الف) و در تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی (ب)



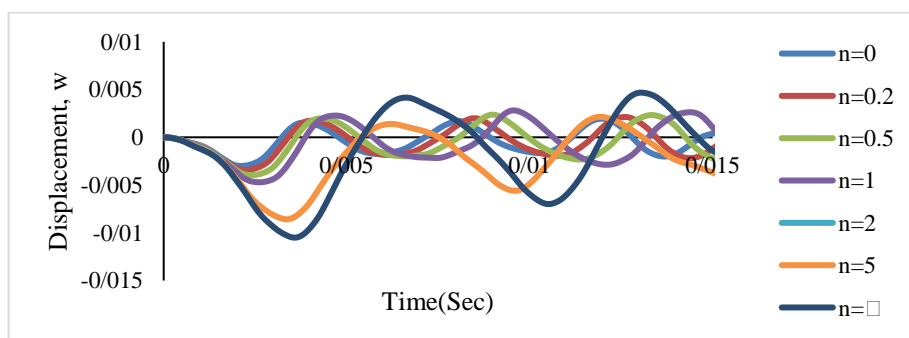
شکل ۱۰ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFC



شکل ۱۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFG



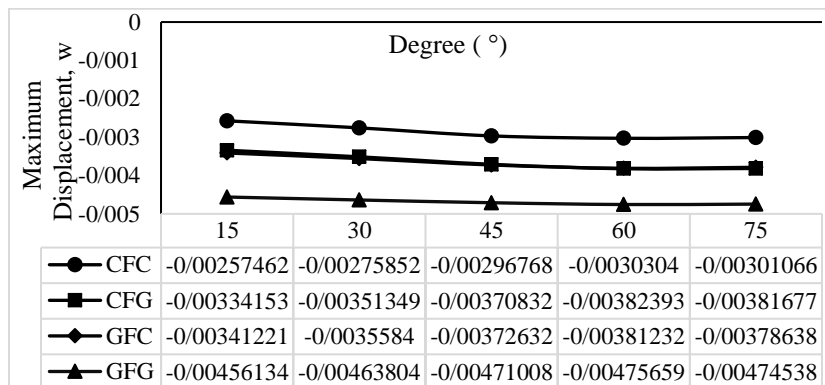
شکل ۱۲ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFC



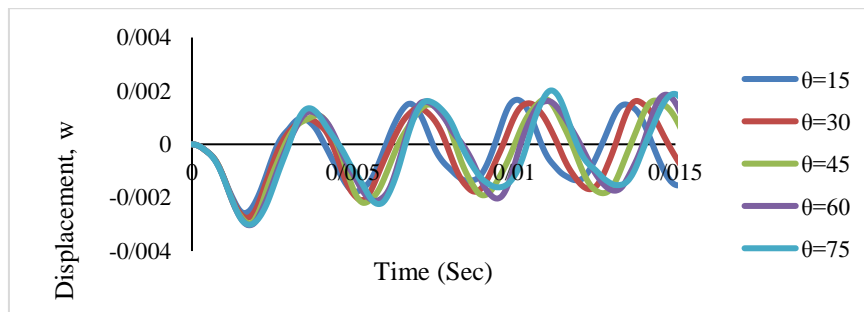
شکل ۱۳ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFG

جابه‌جایی را در پوسته می‌شود. از طرفی با افزایش زاویه قرارگیری الیاف نسبت به راستای بدون انحنای پوسته، شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد قرارگیری الیاف در راستای بدون انحنای پوسته تأثیر بیشتری بر روی پاسخ می‌گذارد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۸-۱۵) نشان داده شده است. با افزایش θ ، تعداد نقاط اوج تغییر مکان مرکز پوسته کاهش یافته است و همچنین در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.

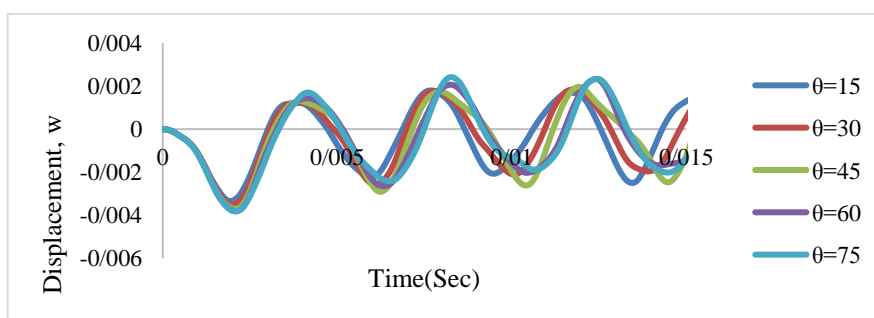
نحوه قرارگیری لایه‌ها در رویه‌های مرکب. به منظور بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه‌های مرکب چندلایه، پنج زاویه ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت (شکل ۳). پوسته‌هایی با انحنای 0.25 (شعاع ۴ متر)، ضخامت ۱۲ میلی‌متر و با هسته FGM دارای شاخص توان حجمی $n = 1$ در معرض بار ضربه مدلسازی شدند. در شکل (۱۴) ماکزیمم جابه‌جایی‌های غیرخطی هندسی پوسته به ازای زوایای مختلف در حالت‌های GFG, GFC, CFG, CFC به دست آورده شد که مشاهده می‌شود در حالتی که $\theta = 15^\circ$ انتخاب گردد کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی انتخاب $\theta = 60^\circ$ موجب بیشترین ماکزیمم



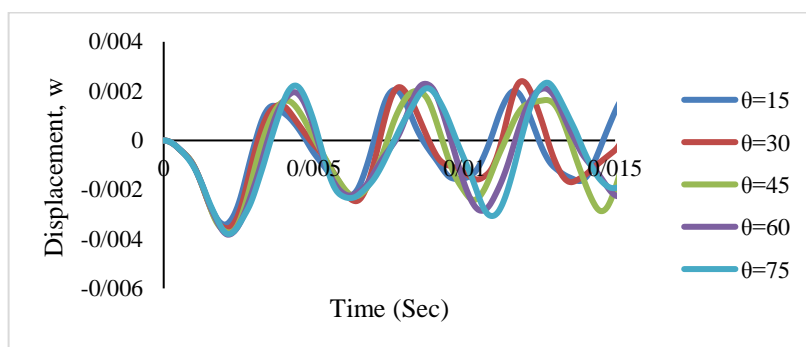
شکل ۱۴ بیشینه تغییر مکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها



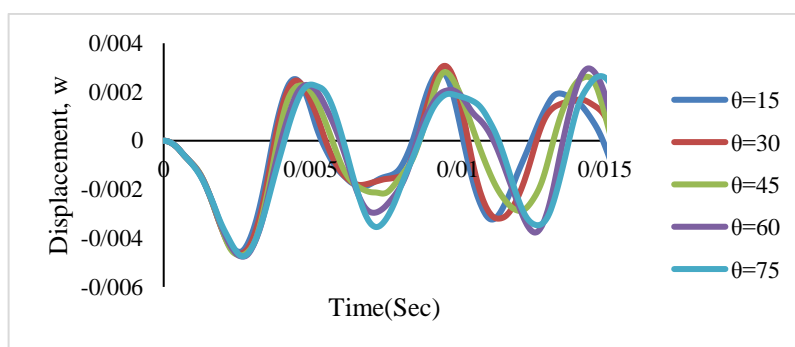
شکل ۱۵ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFC



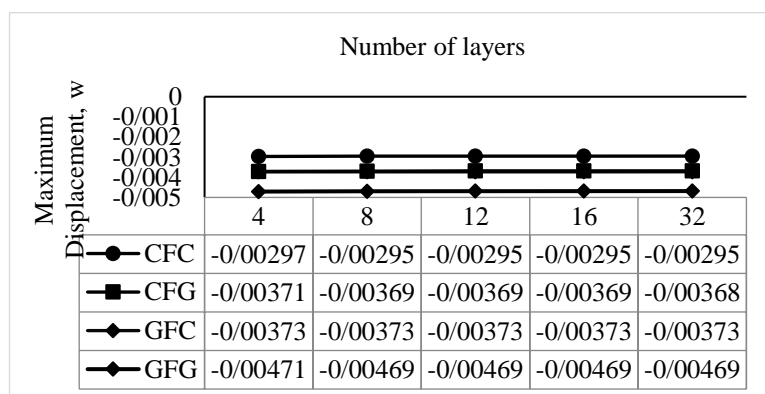
شکل ۱۶ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFG



شکل ۱۷ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFC



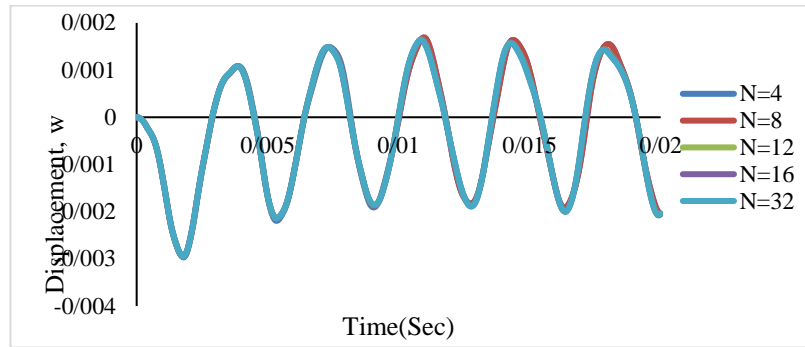
شکل ۱۸ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFG



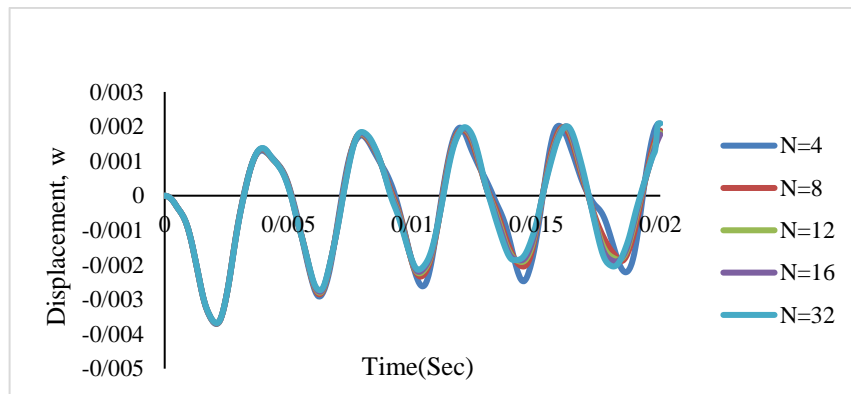
شکل ۱۹ بیشینه تغییر مکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب تعداد لایه‌های مختلف

رویه‌های مرکب پوسته بیشینه تغییر مکان با شیب ملایمی کاهش می‌یابد که در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییر مکان‌ها را دارد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, CFC, CFG, در شکل‌های (۲۳-۲۰) نشان داده شده است. با افزایش تعداد لایه، تعداد نقاط اوج تغییر مکان مرکز پوسته ثابت خواهد بود. از طرفی پوسته در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.

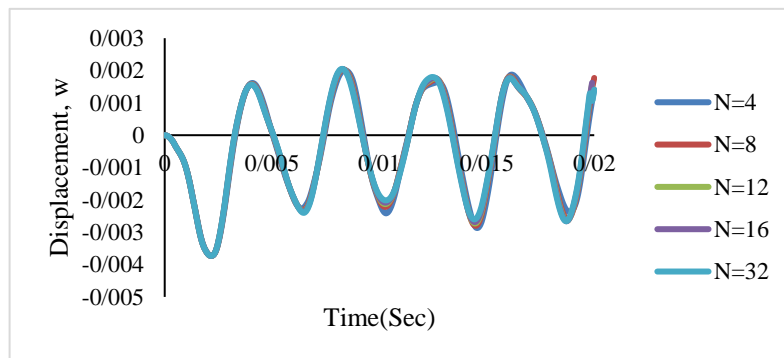
بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب. به منظور بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب در پوسته، مدل‌های دارای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۳۲ لایه در معرض بار ضربه قرار گرفته شدند. در این بررسی انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر) و لایه‌چینی $[-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}]$ برای هر ۴ لایه در رویه‌های مرکب پوسته می‌باشد و نیز برای هسته FGM پوسته، شاخص توان حجمی $n = 1$ در نظر گرفته شد. در شکل (۱۹) ماکزیمم جابه‌جایی غیرخطی هندسی پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف برای چهار حالت CFC, CFG, GFC, GFG مورد بررسی قرار گرفته شد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد لایه در



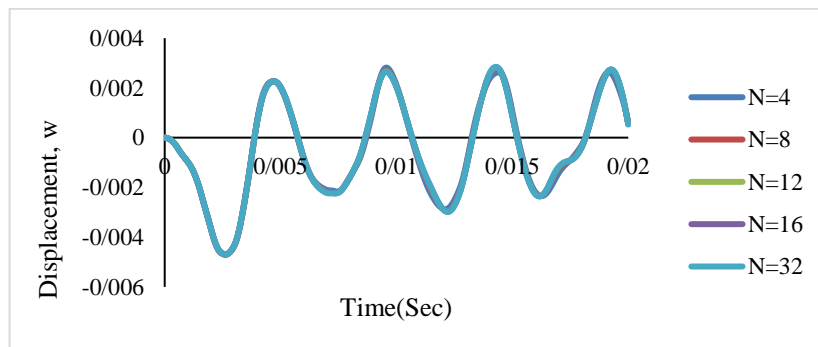
شکل ۲۰ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFC



شکل ۲۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFG



شکل ۲۲ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFC



شکل ۲۳ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFG

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای مواد مرکب با هسته FGM تحت بار ضربه از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شد. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی پوسته‌های هدفمند و پوسته‌های مواد مرکب، عوامل اثرگذار پوسته استوانه‌ای مرکب با هسته FGM شامل شاخص توان حجمی، زوایای مختلف قرارگیری الیاف در مواد مرکب و تعداد لایه‌های مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه و ارزیابی رفتار دینامیکی پوسته‌ها به‌طور خلاصه در ادامه آمده است.

- تغییر مکان غیرخطی هندسی بیشتر از تغییر مکان خطی در مرکز پوسته می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییر مکان مرکز پوسته افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که بیشینه تغییر مکان در پوسته تمام فلزی ($n = \infty$) و کمینه تغییر مکان در پوسته تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است و پاسخ پوسته‌های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است از طرفی در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییر مکان‌ها را دارد. به گونه‌ای که با تغییر شاخص توان حجمی از صفر (سرامیک خالص) تا بی‌نهایت (فلز خالص)، تغییر مکان در حالت CFC، $2/0.8$ برابر در حالت CFG $2/0.57$ برابر، در حالت GFC $2/0.63$ برابر و در حالت GFG $3/0.50$ برابر خواهد شد.

- با بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها مشاهده شد که با انتخاب $\theta = 15^\circ$ کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی با انتخاب $\theta = 60^\circ$ موجب بیشترین ماکزیمم جابه‌جایی را در پوسته خواهد شد. به گونه‌ای که با تغییر زاویه از 15° درجه به 60° درجه بیشینه تغییر مکان در حالت CFC $17/73\%$ ، در حالت CFG $14/43\%$ ، در حالت GFC $11/72\%$ و در حالت GFG $4/27\%$ افزایش خواهد یافت.

- با بررسی اثر تعداد لایه‌های مواد مرکب چندلایه در رویه‌های بالا و پایین پوسته مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها، مقدار

بیشینه تغییر مکان مرکز پوسته کاهش پیدا کرده است. به طوری که با بررسی تعداد لایه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۳۲ ملاحظه شد که کوچکترین بیشینه تغییر مکان در حالت CFC با ۳۲ لایه و بزرگترین بیشینه تغییر مکان در حالت GFG با ۴ لایه رخ می‌دهد. با تغییر تعداد لایه‌ها از ۴ به ۳۲ بیشینه تغییر مکان در حالت CFC $1/66\%$ ، در حالت GFC $0/74\%$ ، در حالت GFG $0/53\%$ کاهش مشاهده می‌شود.

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
n	شاخص توان حجمی
P_c	بیانگر خواص مواد سرامیکی
P_m	بیانگر خواص مواد فلزی
$P_s(x, y, t)$	تابع بار ضربه
$P_i(t)$	تابع بار ضربه در حوزه زمان
$P_s(x, y)$	تابع بار ضربه در حوزه مکان
t	زمان، sec
t_p	مدت زمان بارگذاری، sec
α	پارامتر شکل موج
θ	زاویه قرارگیری لایه‌ها
N	تعداد لایه‌ها

سپاسگزاری

مراجع

1. M. Bever, and P. Duwez, "Gradients in composite materials," *Materials Science and Engineering*, vol. 10, no.7, pp. 1-8, 1972.

2. M. Koizumi, "FGM activities in Japan," *Composites Part B: Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, 1997.
3. 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.
4. 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.
5. J. Seidi, "Buckling analysis of Truncated conical Sandwich Shells with FGM Face sheets using Improved Higher-order Theory," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 337-340, 2019.
6. Sheinman, and S. Greif, "Dynamic analysis of laminated shells of revolution," *Journal of Composite Materials*, vol. 18, pp. 200-215, 1984.
7. R. L. Ramkumar, and Y. R. Thakar, "Dynamic response of curved laminated plates subjected to low velocity impact," *ASME Journal of Engineering and Material Technology*, vol. 109, pp. 67-71, 1987.
8. W. S. Johnson, and M. W. Hammond, "Crack growth behavior of internal titanium plies of a fiber metal laminate," *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 1705-1715, 2008.
9. P. Christoforu, S. R. Swanson, S. C. Venterllo, and S. W. Beckwith, "Impact damage of carbon/epoxy composite cylinders," *Proceeding of the 32nd international SAMPE symposium and exhibition*, vol. 32, pp. 964-973, 1987.
10. P. Christoforu, S. R. Swanson, and S. W. Beckwith, "Lateral impact of composite cylinders," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, vol. 2, pp. 373-386, 1989.
11. S. Kumar, B. Nageswara Rao, and B. Pradhan, "Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, no. 13, pp. 1273-1290, 2007.
12. S. C. Her, and Y. C. Liang, "The finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact," *Composite Structures*, vol. 66, no. 1, pp. 277-285, 2004.
13. H. Kiratisaevae, and W. J. Cantwell, "The impact response of aluminum foam sandwich structures based on a glass fiber-reinforced polypropylene fiber-metal laminate," *Polymer Composite*, vol. 25, no. 5, pp. 499-509, 2004.
14. J. W. Hutchinson, and M. Y. He, "Buckling of cylindrical sandwich shells with metal foam cores," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, no. 46-47, pp. 6777-6794, 2000.
15. K. Garg, R. K. Khare, and T. Kant, "Higher-order closed-form solutions for free vibration of laminated composite and sandwich shells," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 8, no. 3, pp. 205-235, 2006.
16. O. Rahmani, S. M. R. Khalili, and K. Malekzadeh, "Free vibration response of composite sandwich cylindrical shell with flexible core," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 1269-1281, 2010.
17. 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.
18. H. S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*, CRC press, 2016. [E-book].
19. 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.

20. M. S. Hoo Fatt, and D. Sirivolu, "Dynamic Stability of Double-Curvature Composite Shells under External Blast," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 77, pp. 281-290, 2015.
21. V. Vasilief, and V. Morozof, *Advanced Mechanics of Composite Materials*", Elsevier, London, 1th ed, 2007. [E-book].
22. M. Shahraki, F. Shahabian, and M. Koohestani, "The nonlinear dynamic analysis of elasto-plastic behaviour of the single-curved FGM shells under impact load," *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, 2020.
23. 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.
24. 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.
25. S. T. Kaneko, S. Ujihashi, H. Yomoda and S. Inagi, "Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading. *Thin-walled structures*," vol. 46, no. 7-9, pp. 898-904, 2008.