کاهش ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای FGM هوشمند با استفاده از لایه‌های مگنتواستریکتیو

منصور درویزه[۱،*] رضا انصاری[۲] ابوالفضل درویزه[۳] رضا رجبیه فرد[۴]

* نویسنده مسئول: darvizeh@guilan.ac.ir

چکیده

در این مقاله تحلیل رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای FGM هوشمند مجهز به لایه‌های سنسور و عملگر مگنتواستریکتیو مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور کاهش ارتعاش، از یک کنترل تناسبی فیدبک منفی سرعت در تعامل با لایه‌های حسگر و عملگر استفاده شده است. برای لحاظ کردن اثرات تغییر شکل برشی و عرضی و اینرسی دورانی، فرمولبندی مسئله براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول موسوم به FSDT انجام شده است. پوسته‌های FGM مورد مطالعه ترکیبی از فلز و سرامیک در نظر گرفته شده است که خواص ساختاری آنها وابسته به دما و مدرج در جهت ضخامت پوسته استوانه‌ای مطابق با کسر حجمی قانون توانی می‌باشد. لایه‌های مگنتواستریکتیو نیز از جنس ترفنول دی در نظر گرفته شده‌اند. از روش انتگرال زمانی نیومارک و آنالیز مودال برای حل معادلات دیفرانسیل مربوطه به ترتیب در حوزه زمان و فرکانس استفاده شده است. اثرات مشخصه‌های کاهش ارتعاشات لایه‌های مگنتواستریکتیو در دو حوزه زمان و فرکانس، تأثیر موقعیت مکانی قرارگیری این لایه‌ها، ضخامت آنها و پارامترهای کنترل مورد تحقیق قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: کاهش ارتعاشات، ماده FGM، لایه‌های مگنتواستریکتیو، کنترل فیدبک سرعت

۱- استاد- دانشگاه گیلان، دانشکدهٔ فنی.

۲- استادیار- دانشگاه گیلان، دانشکدهٔ فنی.

۳- استاد- دانشگاه گیلان، دانشکدهٔ فنی.

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

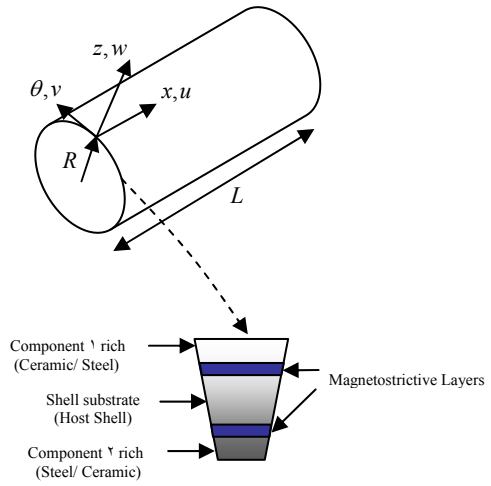
۱- مقدمه

مواد FGM، مواد مرکب چند وظیفه‌ای هستند که به طور میکروسکوپی غیرهمگن بوده و خواص آنها به طور پیوسته و آرام از یک سطح (معمولا سرامیک) تا سطح دیگر (معمولا فلز) تغییر می‌کند. بدین ترتیب مواد FGM خواص گوناگون جورنشدنی از جمله مقاومت در مقابل حرارت، سایش و اکسیداسیون سرامیکها را با چقرمگی، استحکام و قابلیت ماشینکاری فلزات در هم می‌آمیزند. این در حالی است که این مواد، خطر تورق ناشی از عدم تطابق خواص مکانیکی در فصل مشترک مواد مرکب به‌ویژه در دماهای بالا را نیز مرتفع می‌سازند. لذا مواد FGM مزیت تاب آوردن در شرایط محیطی با دمای بالا ضمن نگهداشتن یکپارچه ساختاری خودشان را دارا هستند. مروری بر کارهای اخیر در رابطه با ارتعاشات پوسته‌های FGM در مرجع [۱] آورده شده است.

در آستانه قرن بیست و یکم نسل جدیدی از سازه‌های پیشرفته با مواد هوشمند که کوپلینگ مگنتو- الکترو- ترمومکانیکی هستند، مورد توجه قرار گرفته‌است. در این مواد، هوشمندی هدفمند، کوچک سازی و یکپارچگی ترکیب شده است. کنترل، جداسازی و فرونشاندن ارتعاش، قابلیتهای حسگری، مانیتورینگ و خوداصلاحی و نیز انجام اقدامهای اصلاحی، شماری چند از موارد متعدد به‌کارگیری تکنولوژیکی این مواد است. مواد پیزوالکتریک، مگنتواستریکتیو، آلیاژهای حافظه‌دار و سیالات الکترورئولوژیکال در کنار سازه‌ها، سازه‌های هوشمند را خلق می‌کنند. در این میان، مواد پیزوالکتریک و مگنتواستریکتیو هر دو قابلیت حسگری و عملگری را توأماً دارند. مواد مگنتواستریکتیو نسبت به مواد پیزوالکتریک هیسترسیس کمتری دارند و خواص آنها نیز با گذشت زمان زوال نمی‌یابد. لذا این مواد، پتانسیل خود را برای جایگزینی مواد پیزوالکتریک مرسوم نشان داده‌اند. کومار استفاده از مواد مگنتواستریکتیو را به منظور کنترل ارتعاش پوسته‌های استوانه‌ای ایزوتروپیک با استفاده از روش المانهای محدود گزارش نمود[۲]. ردی حل دقیق ارتعاشات پوسته‌های دو انحنایی ارتوتروپیک ویژه با لایه‌های مگنتواستریکتیو تعبیه شده[۱] در درون ضخامتشان را بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول ارائه نمود[۳]. این لایه‌های فعال، جهت فرونشاندن ارتعاشات پوسته‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفتند. پرادهان ارتعاشات پانلهای کروی FGM با لایه‌های مگنتواستریکتیو را در حوره زمان تحقیق نمود[۴]. بهانگال و همکارانش تحلیل استاتیکی ورقهای FGM در حضور کوپلینگ مگنتو- الکترو- الاستیک را ارائه دادند[۵]. در مقاله حاضر مواد مگنتواستریکتیو جهت کاهش ارتعاش پوسته‌های استوانه‌ای باز و بسته FGM از دو منظر زمان و فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معادلات کلی پوسته‌ای استوانه‌ای

یک پوسته استوانه‌ای دایروی به طول L و شعاع R و ضخامت h را در نظر بگیرید. دستگاه مختصات مرجع بر روی سطح میانی پوسته به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که x و θ و z به ترتیب جهتهای محوری، محیطی و شعاعی باشند. لایه‌های مگنتواستریکتیو می‌توانند در داخل ضخامت پوسته مطابق شکل(۱) تعبیه شوند.



شکل(۱) المانی از پوسته FGM شامل لایه‌های مگنتواستریکتیو تعبیه شده

معادلات حاکم بر پوسته بر حسب نیروها و ممانهای منتجه شامل اثرات برشهای عرضی و ترمهای اینرسی دورانی به صورت زیر بیان می شوند [۶]:

۱- Embedded magnetostrictive layers .

$$\frac{\partial N_x}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial N_{\theta x}}{\partial \theta}=I_1\ddot{u}+I_2\ddot{\psi}_x$$
$$\frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial N_\theta}{\partial \theta}+\frac{Q\theta}{R}=I_1\ddot{v}+I_2\ddot{\psi}_x$$
$$\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta}-\frac{N_\theta}{R}+qn=I_1\ddot{w} \qquad (1)$$
$$\frac{\partial M_x}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial N_{\theta x}}{\partial \theta}-Q_x=I_2\ddot{u}+I_3\ddot{\psi}_x$$
$$\frac{\partial M_{x\theta}}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial M_\theta}{\partial \theta}-Q_\theta=I_2\ddot{v}+I_3\ddot{\psi}_x$$

۳- روابط تنش - کرنش ماده مگنتواستریکتیو

معادلات ساختاری مواد مگنتواستریکتیو به‌صورت زیر بیان می‌شوند: [۳]

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & . & . & .\\ Q_{12} & Q_{22} & . & . & .\\ . & . & Q_{66} & . & .\\ . & . & . & Q_{44} & .\\ . & . & . & . & Q_{55}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_6\end{Bmatrix}-z\begin{Bmatrix}e_{31}\\ e_{32}\\ e_{36}\\ .\\ .\end{Bmatrix}H \qquad (2)$$

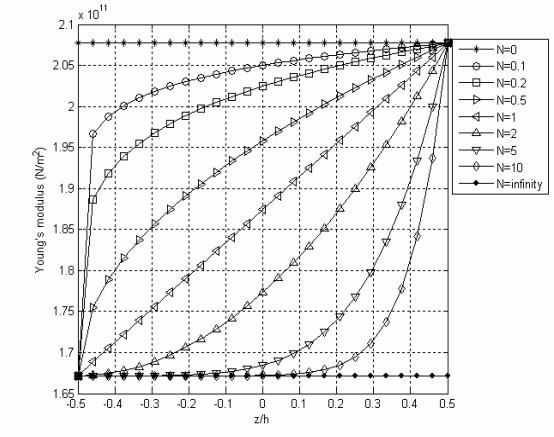
$$e^{(m)}=Q^{(m)}d^{(m)}=E^{(m)}d^{(m)}$$

در این رابطه $d^{(m)}$ کوپلینگ مکانیکی- مغناطیسی و $E^{(m)}$ مدول لایه مگنتواستریکتیو هستند.

٤- تغییرات خواص مکانیکی انواع پوسته‌های FGM

یک پوسته FGM مرکب از فلز و سرامیک را در نظر بگیرید. خواص مکانیکی در جهت ضخامت آن به صورت پیوسته و مطابق با روابط زیر تغییر می‌نماید:

$$E(z)=E_m+E_{cm}V_f(z) \qquad E_{cm}=E_c-E_m$$
$$v(z)=v_m+v_{cm}V_f(z) \qquad v_{cm}=v_c-v_m \qquad (3)$$
$$\rho(z)=\rho_m+\rho_{cm}V_f(z) \qquad \rho_{cm}=\rho_c-\rho_m$$



شکل (۲) منحنی نمایش تغییرات مدول یانگ FGM قانون توانی در جهت ضخامت

که در آن اندیسهای m و c به ترتیب به فلز و سرامیک اشاره دارند. همچنین $V_f(z)$ جزء حجمی مواد ساختاری FGM است که توسط توابع ریاضی مختلفی قابل تعریف می‌باشد. برای یک FGM قانون توانی، تابع جزء حجمی به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_f(z)=\left(\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\right)^N \qquad (4)$$

در این رابطه N به عنوان شاخص ماده، پروفیل تغییرات ماده در جهت ضخامت را نشان می‌دهد. منحنی تغییرات مدول یانگ بر حسب ضخامت برای FGM قانون توانی در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دو حالت حدی $N=0$ و $N=\infty$ به ترتیب مربوط به پوسته‌های ایزوتروپیک ساخته شده از سرامیک و فلز می‌باشند. ضمناً نظر به اینکه بیشتر مواد FGM در محیطهای با گرادیانهای شدید حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، وابستگی خواص مکانیکی آنها به دما نیز باید لحاظ شود. یک خاصیت نمونه P_i مادی نمونه تابعی از دما به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

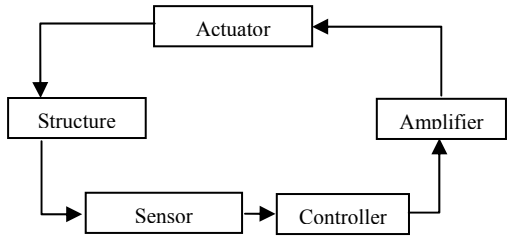
$$P_i=P_0(P_{-1}T^{-1}+1+P_1T+P_2T^2+P_3T^3) \qquad (5)$$

که در آن $P_i(i=0,1,2,3)$ ثابتهای منحصر به‌فردی برای هر یک از مواد ساختاری می باشند.

۵- کنترل فیدبک سرعت

در تحلیل حاضر، از یک کنترل فیدبک منفی سرعت با هدف استهلاک فعال، استفاده شده و در شکل(۳) نشان داده شده است. با مشتق گرفتن از سیگنال فیدبک، اطلاعات مربوط به سرعت به‌دست می‌آید. این فیدبک سرعت مشخصه‌های استهلاکی سیستم را افزایش داده و بنابراین به‌گونه‌ای موثر، دامنه نوسانات را کاهش می‌دهد. برای این منظور شدت میدان مغناطیسی بر حسب ثابت کویل k_c و جریان گذرنده آن $I(x,y,t)$ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$H(x,y,t)=k_cI(x,y,t) \qquad (6)$$



شکل(۳) نمایی از مدار کنترلی برای المانی از پوسته FGM شامل لایه‌های مگنتواستریکتیو تعبیه شده

که جریان I با سرعت عرضی پوسته رابطه زیر را دارد:

$$I(x,y,t)=c(t)\frac{\partial(x,y,t)}{\partial t} \qquad (۷)$$

در اینجا $c(t)$ بهره کنترلی بوده که ثابت در نظر گرفته شده است. ثابت کویل مغناطیسی k_c به تعداد دور آن n_c و پهنای کویل b_c و شعاع آن به رابطه زیر بستگی دارد:

$$k_c=\frac{n_c}{\sqrt{b_c^{۲}+۴r_c^{۲}}} \qquad (۸)$$

۶-روابط تنشهای منتجه - کرنش پوسته مگنتو استریکتیو

شدت نیروها و ممانها برای یک پوسته استوانه‌ای شامل لایه‌های مگنتواستریکتیو با لحاظ تغییر شکل برشی عرضی بر حسب کرنشها و انحناهای سطح میانی پوسته با استفاده از رابطه (۲) به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{Bmatrix}N_x\\N_\theta\\N_{x\theta}\\M_x\\M_\theta\\M_{x\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{۱۱}&A_{۱۲}&A_{۱۶}&B_{۱۱}&B_{۱۲}&B_{۱۶}\\A_{۱۲}&A_{۲۲}&A_{۲۶}&B_{۱۲}&B_{۲۲}&B_{۲۶}\\A_{۱۶}&A_{۲۶}&A_{۶۶}&B_{۱۶}&B_{۲۶}&B_{۶۶}\\B_{۱۱}&B_{۱۲}&B_{۱۶}&D_{۱۱}&D_{۱۲}&D_{۱۶}\\B_{۱۲}&B_{۲۲}&B_{۲۶}&D_{۱۲}&D_{۲۲}&D_{۲۶}\\B_{۱۶}&B_{۲۶}&B_{۶۶}&D_{۱۶}&D_{۲۶}&D_{۶۶}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\varepsilon_x}\\\dot{\varepsilon_\theta}\\\dot{\gamma_{x\theta}}\\k_x\\k_\theta\\k_{x\theta}\end{Bmatrix}-\begin{Bmatrix}N_x^M\\N_\theta^M\\\cdot\\M_x^M\\M_\theta^M\\\cdot\end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix}Q_\theta\\Q_x\end{Bmatrix}=K_s\begin{bmatrix}A_{۴۴}&A_{۴۵}\\A_{۴۵}&A_{۵۵}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\varepsilon_{\theta z}}\\\dot{\varepsilon_{xz}}\end{Bmatrix}-\begin{bmatrix}Q_\theta^M\\Q_x^M\end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که در آن مولفه‌های A_{ij} ، B_{ij} و D_{ij} از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$(A_{ij},B_{ij},D_{ij})=\int_{-\frac{h}{۲}}^{-Z_m-\frac{h_m}{۲}}Q_{ij}(۱,z,z^{۲})dz+\int_{-Z_m-\frac{h_m}{۲}}^{-Z_m+\frac{h_m}{۲}}Q_m(۱,z,z^{۲})dz+\int_{-Z_m+\frac{h_m}{۲}}^{Z_m-\frac{h_m}{۲}}Q_{ij}(۱,z,z^{۲})dz$$
$$+\int_{Z_m-\frac{h_m}{۲}}^{Z_m+\frac{h_m}{۲}}Q_m(۱,z,z^{۲})dz+\int_{Z_m+\frac{h_m}{۲}}^{\frac{h}{۲}}Q_{ij}(۱,z,z^{۲})dz\quad(i,j=۱,۲,۶)$$

$$A_{ij}=\int_{-\frac{h}{۲}}^{-Z_m-\frac{h_m}{۲}}Q_{ij}dz+\int_{-Z_m-\frac{h_m}{۲}}^{-Z_m+\frac{h_m}{۲}}Q_m dz+\int_{-Z_m+\frac{h_m}{۲}}^{Z_m-\frac{h_m}{۲}}Q_{ij}dz$$
$$+\int_{Z_m-\frac{h_m}{۲}}^{Z_m+\frac{h_m}{۲}}Q_m dz+\int_{Z_m+\frac{h_m}{۲}}^{\frac{h}{۲}}Q_{ij}dz\quad(i,j=۴,۵) \qquad (۱۰)$$

ضمناً منتجه‌های تنش القا شده توسط این لایه‌ها، به‌وسیله کنترل فیدبک به سرعت عرضی پوسته مربوط می‌شوند.

$$\begin{Bmatrix}N_x^M\\N_\theta^M\end{Bmatrix}=cK_c\sum_{k=۱}^{N_a}\int_{zk}^{zk+۱}\begin{Bmatrix}e_{۳۱}\\e_{۳۲}\end{Bmatrix}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial t}dz=\begin{Bmatrix}\xi_{۳۱}\\\xi_{۳۲}\end{Bmatrix}\frac{\partial w}{\partial t}$$

$$\begin{Bmatrix}M_x^M\\M_\theta^M\end{Bmatrix}=cK_c\sum_{k=۱}^{N_a}\int_{zk}^{zk+۱}\begin{Bmatrix}e_{۳۱}\\e_{۳۲}\end{Bmatrix}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial t}zdz=\begin{Bmatrix}\xi_{۳۱}\\\xi_{۳۲}\end{Bmatrix}\frac{\partial w}{\partial t} \qquad (۱۱)$$

$$\xi_{ij}=cK_c\sum_{k=۱}^{N_a}e_{ij}^{(k)}(z_{k+۱}-z_k)$$

$$\xi_{ij}=\frac{۱}{۲}cK_c\sum_{k=۱}^{N_a}e_{ij}^{(k)}(z_{k+۱}^{۲}-z_k^{۲})\qquad(i=۳\ ,\ j=۱,۲)$$

۷- معادلات میدان برای پوسته‌های استوانه‌ای FGM هوشمند

اکنون با جایگذاری روابط کرنشها و انحناهای پوسته درون رابطه ماتریسی (۹) و قرار دادن حاصل در معادلات حاکم بر پوسته استوانه‌ای که توسط رابطه (۱) بیان می‌شوند می‌توان معادلات مذکور را بر حسب میدان u,v,w,ψ_x و ψ_θ نوشت که در زیر آورده شده است:

$$A_{۱۱}u_{,xx}+A_{۱۲}\frac{۱}{R}(v_{,\theta x}+w_{,x})+A_{۶۶}\frac{۱}{R}(\frac{u_{,\theta\theta}}{R}+v_{,x\theta})$$
$$+B_{۱۱}\psi_{x,xx}+B_{۱۲}\frac{۱}{R}(\psi_{\theta,\theta x}+\frac{۱}{R}v_{,\theta x})+B_{۶۶}\frac{۱}{R}(\frac{\psi_{x,\theta\theta}}{R}$$
$$+\psi_{\theta,x\theta}+\frac{v_{,x\theta}}{R})-\zeta_{۳۱}\dot{w}_{,x}=I_۱\ddot{u}+I_۲\ddot{\psi}_x \qquad (۱-۱۲)$$

$$A_{۱۲}\frac{۱}{R}u_{,x\theta}+A_{۲۲}\frac{۱}{R^{۲}}(v_{,\theta\theta}+w_{,\theta}+A_{۶۶}(\frac{u_{,x\theta}}{R}+v_{,xx})$$
$$+A_{۵۵}\frac{۱}{R}(\psi_\theta+\frac{w_{,\theta}}{R}-\frac{v}{R})+B_{۱۲}\frac{۱}{R}\psi_{x,x\theta}+B_{۲۲}\frac{۱}{R^{۲}}(\psi_{\theta,\theta\theta}$$
$$+\frac{v_{,\theta\theta}}{R})+B_{۶۶}(\frac{۱}{R}\psi_{x,\theta x}+\psi_{\theta,xx}+\frac{۱}{R}v_{,xx})-\zeta_{۲۲}\frac{\dot{w}_{,\theta}}{R}$$
$$=I_۱\ddot{v}+I_۲\ddot{\psi}_\theta \qquad (۲-۱۲)$$

$$-A_{۱۲}\frac{۱}{R}u_{,x\theta}-A_{۲۲}\frac{۱}{R^{۲}}(v_{,\theta}+w)$$
$$+A_{۵۵}\frac{۱}{R}(\psi_{\theta,\theta}\frac{w_{,\theta\theta}}{R}-\frac{v_{,\theta}}{R})+A_{۵۵}(w_{,xx}+\psi_{x,x})-B_{۱۲}\frac{۱}{R}\psi_{x,x}$$
$$-B_{۲۲}\frac{۱}{R^{۲}}(\psi_{\theta,\theta}+\frac{v_{,\theta}}{R})-\zeta_{۳۲}\frac{\dot{w}}{R}+q=I_۱\ddot{w} \qquad (۳-۱۲)$$

$$A_{۴۴}\ (\psi_x + w_{,x}) + B_{۱۱}\ u_{,xx} + \frac{B_{۱۲}}{R}\ (u_{,x\theta} + w_{,x})$$
$$+ B_{۶۶}\ \frac{۱}{R}(\frac{u_{,\theta\theta}}{R} + u_{,x\theta}) + D_{۱۱}\psi_{x,xx} + D_{۱۲}\ \frac{۱}{R}(\psi_{\theta,\theta x}$$
$$+ \frac{v_{\theta x}}{R}) + D_{۶۶}\ \frac{۱}{R}(\psi_{\theta,xx} + \frac{\psi_{x,\theta\theta}}{R} + \frac{u_{,x\theta}}{R})$$
$$-\xi_{۳۱}\dot{w}_{,x} = I_۲\ddot{u} + I_۳\ddot{\psi}_x \qquad (۴-۱۲)$$

$$- A_{۵۵}(\psi_\theta + \frac{w_{,\theta}}{R} - \frac{v}{R}) + \frac{B_{۱۲}}{R}u_{,x\theta} + \frac{B_{۲۲}}{R^۲}(u_{,\theta\theta} + w_{,\theta})$$
$$+ B_{۶۶}(\frac{u_{,x\theta}}{R} + u_{,xx}) + \frac{D_{۱۲}}{R}\psi_{x,x\theta} + \frac{D_{۲۲}}{R^۲}(\psi_{\theta,\theta\theta} + \frac{v_{,\theta\theta}}{R})$$
$$+ D_{۶۶}\ \frac{۱}{R}(\psi_{x,\theta x} + \psi_{\theta,xx} + \frac{۱}{R}v_{,xx}) - \xi_{۳۲}\ \frac{\dot{w}_{,\theta}}{R}$$
$$= I_۲\ddot{v} + I_۳\ddot{\psi}_\theta \qquad (۵-۱۲)$$

۸- روش حل

توابع مودال برای میدان جابه‌جایی و دوران برای پوسته استوانه‌ای باز با شرایط تکیه‌گاهی ساده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$u(x,\theta,t) = \sum_{m=۱}^{\infty}\sum_{n=۱}^{\infty} U_{mn}(t)\cos(\frac{m\pi x}{L})\sin(\frac{n\pi\theta}{\beta})$$
$$v(x,\theta,t) = \sum_{m=۱}^{\infty}\sum_{n=۱}^{\infty} V_{mn}(t)\sin(\frac{m\pi x}{L})\cos(\frac{n\pi\theta}{\beta})$$
$$w(x,\theta,t) = \sum_{m=۱}^{\infty}\sum_{n=۱}^{\infty} W_{mn}(t)\sin(\frac{m\pi x}{L})\sin(\frac{n\pi\theta}{\beta}) \qquad (۱۳)$$
$$\psi_x(x,\theta,t) = \sum_{m=۱}^{\infty}\sum_{n=۱}^{\infty} X_{mn}(t)\cos(\frac{m\pi x}{L})\sin(\frac{n\pi\theta}{\beta})$$
$$\psi_\theta(x,\theta,t) = \sum_{m=۱}^{\infty}\sum_{n=۱}^{\infty} Y_{mn}(t)\sin(\frac{m\pi x}{L})\cos(\frac{n\pi\theta}{\beta})$$

لازم به ذکر است که برای پوسته استوانه‌ای بسته، کافی است به‌جای β عدد π قرار داده شود. با جایگذاری توابع مودال جابه‌جایی (۱۳) در معادلات میدان پوسته FGM هوشمند (۱۲)، دستگاه معادله دیفرانسیل زمانی زیر حاصل می‌شود:

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=\{F\} \qquad (۱۴)$$
$$\{\delta\}=\{A_{mn}\ ,\ B_{mn}\ ,C_{mn}\ ,D_{mn}\ ,E_{mn}\}^T$$

که

$$[M]=\begin{bmatrix} I_۱ & ۰ & ۰ & I_۲ & ۰ \\ ۰ & I_۱ & ۰ & ۰ & I_۲ \\ ۰ & ۰ & I_۱ & ۰ & ۰ \\ I_۲ & ۰ & ۰ & I_۳ & ۰ \\ ۰ & I_۲ & ۰ & ۰ & I_۳ \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

و

$$[C]=\begin{bmatrix} ۰ & ۰ & -\left(\frac{m\pi}{L}\right)\varsigma_{۳۱} & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & -\frac{۱}{R}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)\varsigma_{۳۲} & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & \frac{۱}{R}\varsigma_{۳۲} & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & -\left(\frac{m\pi}{L}\right)\xi_{۳۱} & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & -\frac{۱}{R}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)\xi_{۳۲} & ۰ & ۰ \end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

[K] ماتریس متقارن می‌باشد و ضرایب آن به خواص ماده، پارامترهای هندسی و شماره مدهای محیطی و محوری بستگی دارند که در پیوست آورده شده است. برای حل معادلات دیفرانسیل (۱۴) در حوزه زمان از روش انتگرال زمانی نیومارک و در حوزه فرکانس از روش آنالیز مودال استفاده شده است. ضمناً به منظور بهبود کارایی محاسباتی، از روش مد سوپرپوزیشن جهت انتقال معادلات به فضای مودال به‌کار استفاده شده است.

۹- نتایج

در این مقاله پوسته‌های FGM با دو ترکیب ساختاری مختلف فولاد- زیرکونیا و اکسید آلومینیم- زیرکونیا در نظر گرفته شده‌است. مشخصات مکانیکی این دو ترکیب به ترتیب در جداول(۱)و(۲) آورده شده است. همانطورکه ملاحظه می‌شود، ضرایب مربوطه به دما نیز وابسته‌اند. در اینجا خواص مکانیکی پوسته‌های FGM مورد مطالعه در دمای متعارف محاسبه شده‌اند. ماده مگنتواستریکتیو مورد استفاده ترفنول دی می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن عبارت‌اند از:

$$E^{(m)} = ۲۶/۵\ GPa \quad , \quad d^{(m)} = ۱/۶۷\times۱۰^{-۸}\ mA^{-۱}$$
$$\rho^{(m)} = ۹۲۵۰\ kg/m^۳ \quad , \quad \upsilon^{(m)} = ۰$$

همچنین مشخصات هندسی پوسته مذکور به صورت زیر در نظر گرفته شده است

$$\frac{L}{R}=۲ \quad , \quad \frac{h}{R}=۰.۰۱ \quad , \quad R=۲ \quad , \quad h_m=۰.۰۰۱$$

قبل از اینکه به بررسی تأثیر لایه‌های مگنتواستریکتیو بر روی کاهش ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای پرداخته شود، باید صحت نتایج فرکانسهای طبیعی به‌دست آمده را بررسی کرد. برای این منظور فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های باز ایزوتروپیک با زوایای ۶۰°، ۹۰° و ۱۲۰° محاسبه گردیده‌اند که در جدول(۳) آورده شده‌اند. مقایسه نتایج حاصله با مرجع [۷]، صحت مقادیر به‌دست آمده را مورد تأیید قرار می‌دهد. مشخصات هندسی پوسته و خواص مکانیکی ماده ایزوتروپیک مورد استفاده عبارت است از:

$$\frac{L}{R}=۲ \quad , \quad \frac{h}{R}=۰/۰۲ \quad , \quad R=۰/۰۵$$
$$\rho = ۷/۸\times۱۰^۳ \quad , \quad E = ۲/۱\times۱۰^{۱۱} \quad , \quad \upsilon = ۰/۳$$

جدول(۱) خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده پوسته FGM فولاد- زیرکونیا

	Stainless Steel		Zirconia	
	$E(\mathrm{Nm}^{-2})$	υ	$E(\mathrm{Nm}^{-2})$	υ
P_{-1}	۰	۰	۰	۰
P_0	۲۰۱/۰۴×۱۰^۹	۰/۳۲۶۲	۲۴۴/۲۷×۱۰^۹	۰/۲۸۸
P_1	۳/۰۸×۱۰^-۴	-۲×۱۰^-۴	-۱/۳۷۱×۱۰^-۳	۱/۱۳×۱۰^-۴
P_2	-۶/۵۳×۱۰^-۷	۳/۸×۱۰^-۷	۱/۲۱×۱۰^-۶	۰
P_3	۰	۰	-۳/۶۸×۱۰^-۱۰	۰
ρ	۸۱۶۶ (kgm^{-3})		۵۷۰۰ (kgm^{-3})	

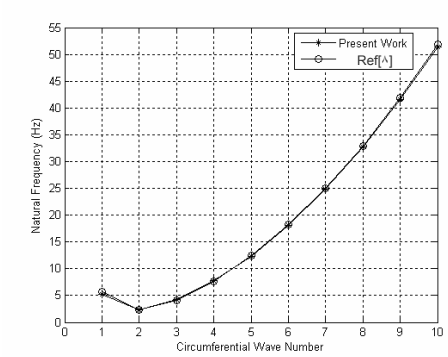
جدول(۲) خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده پوسته FGM اکسید آلومینیم- زیرکونیا

	Aluminum oxide		Zirconia	
	$E(\mathrm{Nm}^{-2})$	υ	$E(\mathrm{Nm}^{-2})$	υ
P_{-1}	۰	۰	۰	۰
P_0	۳۴۹/۵۵×۱۰^۹	۰/۲۶۰	۲۴۴/۲۷×۱۰^۹	۰/۲۸۸
P_1	-۳/۸۵۳×۱۰^-۴	۰	-۱/۳۷۱×۱۰^-۳	۱/۱۳×۱۰^-۴
P_2	۴/۰۲۷×۱۰^-۷	۰	۱/۲۱×۱۰^-۶	۰
P_3	-۱/۶۷۳×۱۰^-۱۰	۰	-۳/۶۸×۱۰^-۱۰	۰
ρ	۳۹۷۰ (kgm^{-3})		۵۷۰۰ (kgm^{-3})	

جدول(۳) مقایسه فرکانسهای طبیعی(Hz) پوسته‌های باز ایزوتروپیک

β	m / n	۱	۲	۳	۴
۶۰	۱	۳۴۹۵/۶	۸۵۰۳/۴	۱۱۹۲۷	۱۴۴۵۰
		(۳۴۹۶/۱)	(۸۵۰۶/۱)	(۱۱۹۳۴)	(۱۴۱۶۴)
	۲	۳۸۲۴/۸	۵۶۲۴/۸	۸۳۸۸/۴	۱۱۲۸۰
		(۳۸۳۳/۴)	(۵۶۳۶/۲)	(۸۴۰۶/۴)	(۱۱۳۱۱)
	۳	۸۱۶۰/۹	۹۰۴۵/۸	۱۰۶۷۹	۱۲۹۴۹
		(۸۲۰۴/۵)	(۹۰۹۶/۰)	(۱۰۷۴۳)	(۱۳۰۳۵)
	۴	۱۴۳۵۷	۱۵۱۱۱	۱۶۴۲۳	۱۸۳۰۴
		(۱۴۴۹۰)	(۱۵۲۵۸)	(۱۶۵۹۴)	(۱۸۵۱۱)
۹۰	۱	۵۹۸۵/۲	۱۱۳۶۰	۱۴۰۳۲	۱۵۵۰۸
		(۵۶۸۵/۶)	(۱۱۳۶۲)	(۱۴۰۳۹)	(۱۵۵۲۱)
	۲	۲۷۱۸/۰	۶۵۸۴/۵	۱۰۱۱/۸	۱۲۸۲/۸
		(۲۷۲۰/۱)	(۶۵۸۸/۰)	(۱۰۱۲۶)	(۱۲۸۴۵)
	۳	۳۸۲۴/۹	۵۶۲۴/۸	۸۳۸۸/۴	۱۱۲۸۰
		(۳۸۳۳/۴)	(۵۶۳۶/۲)	(۸۴۰۶/۴)	(۱۱۳۱۱)
	۴	۶۴۹۱/۰	۷۵۱۰/۵	۹۳۹۸/۶	۱۱۸۸۴
		(۶۵۱۸/۱)	(۷۵۴۳/۳)	(۹۴۴۲/۴)	(۱۱۹۴۶)
۱۲۰	۱	۷۵۰۵/۳	۱۳۰۲۸	۱۵۰۳۱	۱۶۰۹۲
		(۷۵۰۵/۶)	(۱۳۰۳۰)	(۱۵۰۳۷)	(۱۶۱۰۶)
	۲	۳۴۹۵/۶	۸۰۵۳/۴	۱۱۹۲۷	۱۴۱۵۰
		(۳۴۹۶/۱)	(۸۵۰۶/۱)	(۱۱۹۳۴)	(۱۴۱۶۴)
	۳	۲۷۳۸/۱	۵۹۹۵/۹	۹۴۲۳/۰	۱۲۲۶۹
		(۲۷۴۰/۴)	(۶۰۰۰/۴)	(۹۴۳۲/۷)	(۱۲۲۸۸)
	۴	۳۸۲۴/۹	۵۶۲۴/۸	۸۳۸۸/۴	۱۱۲۸۰
		(۳۸۳۳/۴)	(۵۶۳۶/۲)	(۸۴۰۶/۴)	(۱۱۳۱۱)

اعداد داخل پرانتز برگرفته از مرجع [۷] است.



شکل(۴) منحنیهای فرکانس طبیعی برحسب شماره مدهای محیطی پوسته FGM فولاد - زیرکونیا با شرایط تکیه‌گاهی CF

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تئوری حاضر، تخمین پایین‌تری نسبت به مرجع مذکور به‌دست می‌دهند. دلیل این امر را می‌توان استفاده از تئوری FSDT به‌جای تئوری کلاسیک پوسته‌ها، که در مرجع مذکور مورد استفاده قرار گرفته است و نیز کاملتر بودن روابط سینماتیک به‌کار گرفته بسته شده برای پوسته می‌باشد. ضمناً، جهت صحه‌گذاری تأیید اعتبار روش حاضر برای پوسته‌های FGM، فرکانسهای طبیعی یک پوسته FGM فولاد- زیرکونیا با شرایط تکیه‌گاهی یک سرگیردار- یک سرآزاد(CF) به ازای ده مد محیطی اول

جدول(۴) مقایسه ضرایب مختلف پوسته FGM فولاد-زیرکونیا به ازای Z_m های مختلف

$Z_m(m)$	$D_{11}(Nm)$ (10^{4})	$D_{12}(Nm)$ (10^{5})	$D_{66}(Nm)$ (10^{5})	$-\xi_{31}$ (10^{2})	$-\zeta_{31}$ (10^{4})
۰/۰۰۰۵	۰/۱۶۳۶۹	۰/۵۰۱۲۳	۰/۵۶۷۸۴	۰/۹۲۶	۰/۰۴۶
	(۰/۱۶۳)	(۰/۵۰۱)	(۰/۵۶۷)	(۰/۹۲۶)	(۰/۰۴۶)
۰/۰۰۱۵	۰/۱۶۲۸۱	۰/۴۹۸۲۱	۰/۵۶۴۹۶	۰/۹۲۶	۰/۱۳۸
	(۰/۱۶۲)	(۰/۴۹۸)	(۰/۵۶۴)	(۰/۹۲۶)	(۰/۱۳۸)
۰/۰۰۲۵	۰/۱۶۱۰۶	۰/۴۹۲۱۷	۰/۵۵۹۲۱	۰/۹۲۶	۰/۲۳۱
	(۰/۱۶۱)	(۰/۴۹۲)	(۰/۵۵۸)	(۰/۹۲۶)	(۰/۲۳۱)
۰/۰۰۳۵	۰/۱۵۸۴۳	۰/۴۸۳۱۲	۰/۵۵۰۵۸	۰/۹۲۶	۰/۳۲۴
	(۰/۱۵۸)	(۰/۴۸۴)	(۰/۵۵۰)	(۰/۹۲۶)	(۰/۳۲۴)
۰/۰۰۴۵	۰/۱۵۴۹۲	۰/۴۷۱۰۶	۰/۵۳۹۰۶	۰/۹۲۶	۰/۴۱۶
	(۰/۱۵۵)	(۰/۴۷۳)	(۰/۵۳۸)	(۰/۹۲۶)	(۰/۴۱۶)
۰/۰۰۵۵	۰/۱۵۰۵۳	۰/۴۵۶	۰/۵۲۴۶۶	۰/۹۲۶	۰/۵۰۹
	(۰/۱۵۰)	(۰/۴۵۹)	(۰/۵۲۳)	(۰/۹۲۶)	(۰/۵۰۹)
۰/۰۰۶۵	۰/۱۴۵۲۷	۰/۴۳۷۹۵	۰/۵۰۷۳۸	۰/۹۲۶	۰/۶۰۱
	(۰/۱۴۵)	(۰/۴۴۲)	(۰/۵۰۵)	(۰/۹۲۶)	(۰/۶۰۱)
۰/۰۰۷۵	۰/۱۳۹۱۳	۰/۴۱۶۹۲	۰/۴۸۷۲۱	۰/۹۲۶	۰/۶۹۴
	(۰/۱۳۹)	(۰/۴۲۳)	(۰/۴۸۴)	(۰/۹۲۶)	(۰/۶۹۴)
۰/۰۰۸۵	۰/۱۳۲۱۲	۰/۳۹۲۹۴	۰/۴۶۴۱۴	۰/۹۲۶	۰/۷۸۷
	(۰/۱۳۲)	(۰/۴۰۱)	(۰/۴۶۰)	(۰/۹۲۶)	(۰/۷۸۷)
۰/۰۰۹۵	۰/۱۲۴۲۳	۰/۳۶۶۰۱	۰/۴۳۸۱۷	۰/۹۲۶	۰/۸۷۹
	(۰/۱۲۴)	(۰/۳۷۶)	(۰/۴۳۴)	(۰/۹۲۶)	(۰/۸۷۹)

اعداد داخل پرانتز برگرفته از مرجع [۴] است.

پوسته ترسیم و نمودار آن با مرجع[۸] مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه که در شکل(۴) صورت گرفته است، توافق بسیار خوبی را برای پوسته‌های FGM نیز نشان می‌دهد. ضمناً پوسته FGM فوق الذکر از نوع قانون توانی بوده و شاخص پروفیل آن $N=10$ در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات هندسی $h/R=0.002$ و $L/R=20$ و $R=1$ می‌باشد. در جدول(۴) مقادیر سفتی و پارامترهای استهلاک پوسته FGM هوشمند که از مواد ساختاری فولاد- زیرکونیا تشکیل شده‌اند به ازای فاصله‌های مختلف لایه‌های مگنتواستریکتیو (Z_m) از سطح میانی محاسبه و با مرجع[۴] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. ضمن توافق خوب به‌دست آمده نکته قابل توجه این است که با افزایش فاصله لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی مقادیر پارامتر استهلاکی ζ_{31} به‌طور متناسب با این فاصله افزایش می‌یابند که بیانگر شدت تأثیر موقعیت لایه‌های مگنتواستریکتیو بر روی مشخصه‌های استهلاک سیستم می‌باشد. بیشترین قدرت استهلاک مربوط به $Z_m=0.0095$ و کمترین آن مربوط به $Z_m=0.0005$ است. همچنین با افزایش فاصله لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی مقدار سفتی پوسته کاهش پیدا می‌کند. برای مطالعه تأثیر لایه‌های مگنتواستریکتیو بر روی مشخصه‌های کاهش ارتعاشات نخست به تعریف زمان نشست و نسبت آن می‌پردازیم. زمان نشست (t_s)، زمان مورد نیاز برای کاهش دامنه ارتعاشات کنترل شده به میزان یک دهم دامنه اولیه تعریف می‌شود. حال اگر زمان نشست را به‌وسیله مقدار بیشینه آن وقتی که لایه‌های مگنتواستریکتیو در نزدیکترین فاصله از سطح میانی پوسته قرار می‌گیرند، نرمالیزه کنیم، نسبت زمان نشست (t_n) به‌دست می‌آید:

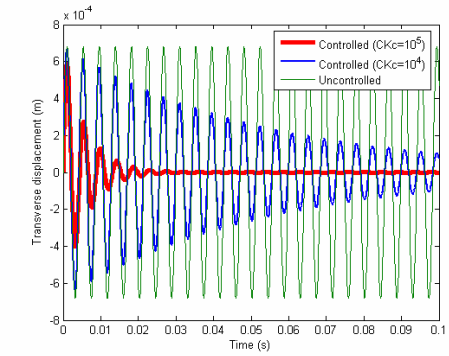
$$t_n=\frac{t_s}{(t_s)_{\max}}=\frac{t_s}{t_s|_{(Z_m)_{\min}}}$$

زمان نشست و مقدار نرمالیزه آن برای زوایای مختلف پوسته FGM (β) و فاصله لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی(Z_m) در جدول(۵) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با دور نمودن لایه‌های مذکور زمان نشست کاهش یافته که دلیل این امر را می‌توان در گشتاور خمشی بزرگتر ایجاد شده به‌وسیله نیروهای عمل‌کننده در لایه‌های مگنتواستریکتیو جستجو کرد. بیشترین زمان نشست هنگامی است که لایه‌های مگنتواستریکتیو کاملاً به سطح میانی نزدیک بوده و کمترین زمان نشست وقتی اتفاق می‌افتد که لایه‌های مگنتواستریکتیو در دورترین فاصله از سطح میانی قرار گیرند. ضمناً کمترین مقدار آن به ازای $\beta=90$ اتفاق می‌افتد و با دورتر شدن لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی مقادیر فرکانس طبیعی میرا نشده نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر به ازای کمترین فاصله لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی، پوسته بیشترین صلبیت خمشی را دارد. حال آنکه با افزایش فاصله این لایه‌ها، پوسته نرمتر می‌شود. ضمناً کاهش مقادیر فرکانس طبیعی میرا شده پوسته با دورتر نمودن لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی قابل ملاحظه‌تر می‌باشد که دلیل آن را می‌توان افزایش قدرت استهلاک سیستم دانست. اثرات مستقیم افزایش شدت بهره کنترلی میدان مغناطیسی(cK_c) بر افزایش استهلاک از دو منظر زمان و فرکانس برای پوسته FGM به ازای $Z_m=0.0025$ در شکلهای(۵) و (۶) نشان داده شده‌است. همانطور ملاحظه می‌شود با افزایش شدت بهره کنترلی میدان مغناطیسی، زمان نشست کاهش یافته و دامنه ارتعاشات عرضی پوسته با سرعت بیشتری مستهلک می‌شود. ضمناً اثر استهلاک ناشی از کنترل فیدبک سرعت می‌تواند نقاط اوج خیز عرضی در همسایگی ناحیه تشدید را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. همچنین با افزایش cK_c ناحیه تشدید اول به سمت فرکانسهای کمتر حرکت می‌کند که این رفتار مشابه سیستمهای مکانیکی مرتعش متعارف می‌باشد و مورد انتظار نیز بوده است. تأثیر ضخامت لایه مگنتواستریکتیو (h_m) بر پاسخ زمانی و فرکانسی نیز در شکلهای (۷) و (۸) نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت لایه مگنتواستریکتیو، تشدید اول در فرکانسهای تحریک کوچکتر اتفاق می‌افتد. ضمناً مقدار خیز عرضی نقطه میانی پوسته در این ناحیه به‌طور موثرتری کاهش می‌یابد که این رفتار به خاطر تغییرات سفتی پوسته است. در شکل(۹) منحنیهای زمان نشست بر حسب فاصله لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی برای ضخامتهای مختلف این لایه‌ها مشاهده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود

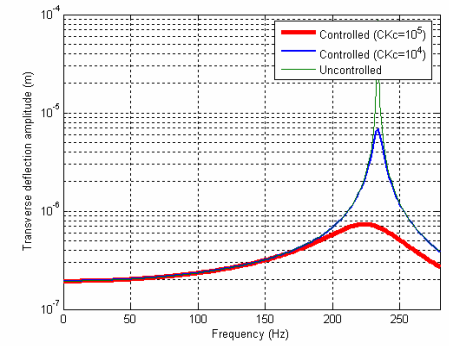
برای همه ضخامتها با دورتر شدن لایه‌های مذکور از سطح میانی، زمان نشست کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو زمان نشست کاهش می‌یابد. اما هر چقدر که این لایه‌ها در فاصله نزدیکتری نسبت به سطح میانی قرار گیرند تأثیر ضخامت لایه‌های مذکور قابل ملاحظه‌تر است و با افزایش فاصله این لایه‌ها از سطح میانی این تأثیر کمتر می‌شود. از طرفی بانگاه به شکل(۱۰) که مربوط به نسبت زمان نشست می‌باشد، این نکته قابل استنباط است که وقتی لایه مگنتواستریکتیو نازکتر باشد نسبت زمان نشست کاهش پیدا می‌کند. ضمناً هر چه لایه‌های مذکور نازکتر باشد و فاصله آنها از سطح میانی زیادتر شود نسبت زمان نشست کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر با این کار می‌توان از لایه‌های به‌طور مؤثرتر استفاده نمود. تأثیر شاخص پروفیل FGM منحنیهای پاسخ زمانی کنترل شده برای یک پوسته FGM ساخته شده از فولاد-زیرکونیا به ازای $Z_m = ۰/۰۰۴۵$ و $h_m = ۰/۰۰۲$ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل در این حالت تغییرات پروفیل ماده FGM بر روی زمان نشست قابل ملاحظه نیست. پاسخ فرکانسی متناظر این حالت در مختصات نیمه لگاریتمی نیز در شکل(۱۲) نمایش داده شده است. به منظور مطالعه جامعتر تأثیر شاخص پروفیل FGM و مواد ساختاری آن، پاسخهای فرکانسی کنترل شده مذکور در مختصات خطی در شکل(۱۳) آورده شده است. با افزایش شاخص پروفیل N و به تبع آن افزایش درصد حجمی زیرکونیا پیک منحنیهای پاسخ فرکانسی، کاهش تدریجی یافته و به آرامی به‌سمت راست (فرکانسهای تحریک بالاتر) حرکت می‌نماید. با تغییر مواد ساختاری FGM از فولاد- زیرکونیا به اکسید آلومینیم- زیرکونیا، شدت تأثیر شاخص پروفیل مطابق منحنی پاسخ فرکانسی شکل (۱۴) بارزتر می‌شود. بدین معنی که با افزایش N و به تبع آن افزایش مقدار زیرکونیا، پیک منحنیهای پاسخ فرکانسی به‌طور نسبتاً قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و به‌سمت فرکانسهای کمتر جابه‌جا می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر شاخص پروفیل FGM بر مقدار پیک منحنیهای پاسخ فرکانسی در ناحیه تشدید به نوع پروفیل FGM و اختلاف خواص مکانیکی دو ماده ساختاری آن بستگی دارد.

جدول(۵) زمان نشست برای پوسته‌های باز و بسته FGM فولاد- زیرکونیا

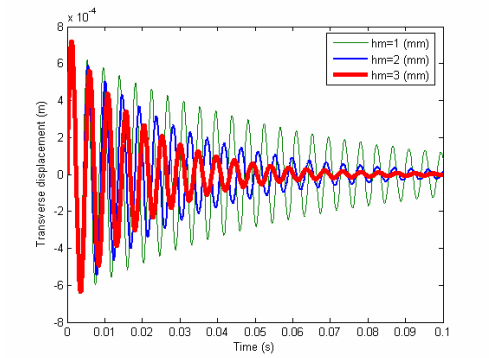
β	Z_m	ω_n	ω_d	t_s	t_n
۳۰	۰/۰۰۰۵	۳۲۶/۷۲۵۱	۳۲۶/۷۱۹	۱/۱۶۰۹	۱
	۰/۰۰۳۵	۳۲۲/۶۳۰۸	۳۲۲/۲۹۱۶	۰/۱۵۶۲۵	۰/۱۳۴۵۹
	۰/۰۰۶۵	۳۱۲/۱۵۹۱	۳۱۰/۸۰۶۳	۰/۰۷۹۵۷	۰/۰۶۸۵۴
	۰/۰۰۹۵	۲۹۴/۶۲۸۲	۲۹۱/۲۱۹۲	۰/۰۵۱۶۶	۰/۰۴۴۵
۶۰	۰/۰۰۰۵	۵۰۳/۶۸۲۲	۵۰۳/۶۵۷۷	۰/۴۷۸۶۱	۱
	۰/۰۰۳۵	۵۰۳/۴۶۰۸	۵۰۲/۲۰۵۷	۰/۰۶۶۸۴۱	۰/۱۳۹۶۵
	۰/۰۰۶۵	۵۰۲/۹۰۶۷	۴۹۸/۳۷۵	۰/۰۳۵۲۲	۰/۰۷۳۶۰
	۰/۰۰۹۵	۵۰۲/۰۱۹	۴۹۱/۸۷۷۶	۰/۰۲۳۶۱	۰/۰۴۹۳
۹۰	۰/۰۰۰۵	۸۴۰/۴۲۷۹	۸۴۰/۴۰۱۱	۰/۳۹۷۷۹	۱
	۰/۰۰۳۵	۸۴۰/۳۷۸۸	۸۳۹/۰۲۵۸	۰/۰۵۵۹۰	۰/۱۴۰۵۴
	۰/۰۰۶۵	۸۴۰/۲۵۵۹	۸۳۵/۴۶۵۶	۰/۰۲۹۶۷	۰/۰۷۴۵۹
	۰/۰۰۹۵	۸۴۰/۰۵۹۲	۸۲۹/۵۷۹۱	۰/۰۲۰۰۴	۰/۰۵۰۳
۱۲۰	۰/۰۰۰۵	۱۱۱۱/۳۳۵۴	۱۱۱۱/۳۰۹۳	۰/۴۲۱۹۸	۱
	۰/۰۰۳۵	۱۱۱۱/۳۰۸۷	۱۱۰۹/۹۹۸۶	۰/۰۵۹۳۷	۰/۱۴۰۷۰
	۰/۰۰۶۵	۱۱۱۱/۲۴۱۹	۱۱۰۶/۶۴۶۱	۰/۰۳۱۵۷	۰/۰۷۴۸
	۰/۰۰۹۵	۱۱۱۱/۱۳۵	۱۱۰۱/۱۹۵۱	۰/۰۲۱۳۹	۰/۰۵۰۶
۱۵۰	۰/۰۰۰۵	۱۳۱۵/۲۸۳۸	۱۳۱۵/۲۵۹۵	۰/۴۹۵۷۸	۱
	۰/۰۰۳۵	۱۳۱۵/۲۶۲۷	۱۳۱۴/۰۴۸۴	۰/۰۶۹۶۸	۰/۱۴۰۵۴
	۰/۰۰۶۵	۱۳۱۵/۲۰۹۹	۱۳۱۰/۹۶۸	۰/۰۳۷۰۴	۰/۰۷۴۷۱
	۰/۰۰۹۵	۱۳۱۵/۱۲۵۵	۱۳۰۶/۰۰۴۵	۰/۰۲۵۱۱	۰/۰۵۰۶
۱۸۰	۰/۰۰۰۵	۱۴۶۹/۰۶۵۶	۱۴۶۹/۰۴۴۱	۰/۶۱۷۱۱	۱
	۰/۰۰۳۵	۱۴۶۹/۰۴۶۳	۱۴۶۷/۹۷۰	۰/۰۸۶۴۸	۰/۱۴۰۱۴
	۰/۰۰۶۵	۱۴۶۸/۹۹۸	۱۴۶۵/۲۴۲	۰/۰۴۵۸۸	۰/۰۷۴۳۵
	۰/۰۰۹۵	۱۴۶۸/۹۲۰۷	۱۴۶۰/۸۵۷۹	۰/۰۳۱۰۵	۰/۰۵۰۳



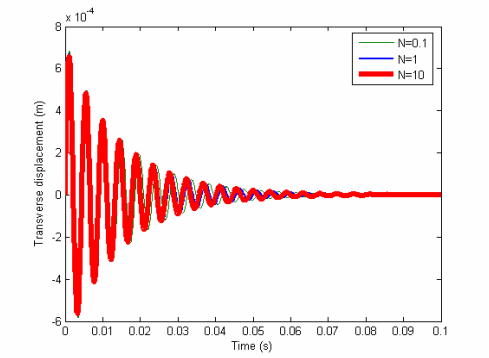
شکل(۵) منحنیهای پاسخ زمانی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف cK_c



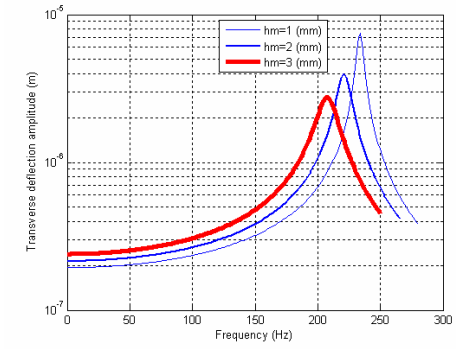
شکل(۶) منحنیهای پاسخ فرکانسی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف cK_c



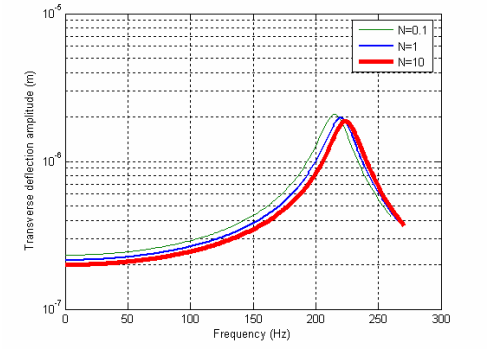
شکل(۷) منحنیهای پاسخ زمانی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو



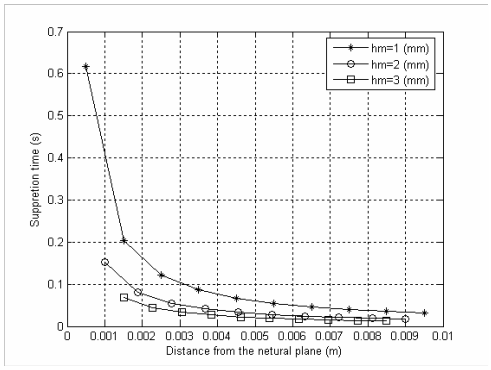
شکل(۱۱) منحنیهای پاسخ زمانی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف N



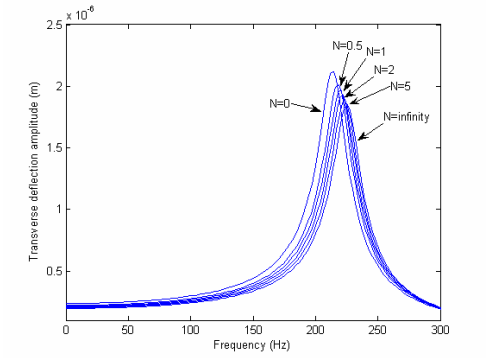
شکل(۸) منحنیهای پاسخ فرکانسی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو



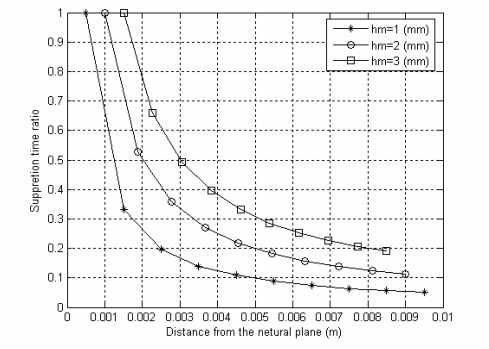
شکل(۱۲) منحنیهای پاسخ فرکانسی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف N



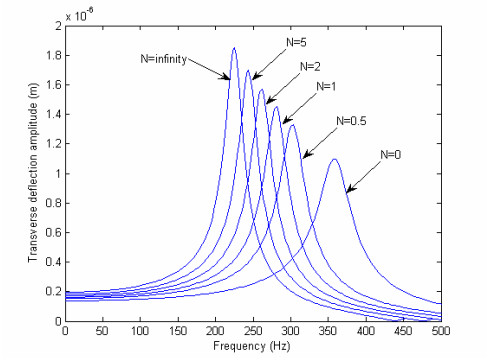
شکل(۹) منحنیهای زمان نشست برحسب فاصله مختلف لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی برای پوسته FGM فولاد- زیرکونیا



شکل(۱۳) منحنیهای پاسخ فرکانسی پوسته FGM فولاد- زیرکونیا برای مقادیر مختلف N



شکل(۱۰) منحنیهای نسبت زمان نشست برحسب فاصله مختلف لایه‌های مگنتواستریکتیو از سطح میانی برای پوسته FGM فولاد- زیرکونیا



شکل(۱۴) منحنیهای پاسخ فرکانسی پوسته FGM اکسید آلومینیم- زیرکونیا برای مقادیر مختلف N

نتیجه‌گیری

در این مقاله تحلیل کاهش ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای FGM هوشمند مجهز به لایه‌های حسگر و عملگر مگنتواستریکتیو تعبیه شده درون ضخامت پوسته مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول‌بندی مسئله بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول (FSDT) صورت گرفته است. روش حل به‌کارگیری گرفته شده بر مبنای حل دقیق ناویر برای پوسته‌های استوانه‌ای FGM با شرایط تکیه‌گاهی ساده است. برای حل معادلات دیفرانسیل زمانی نیز از روش انتگرال زمانی نیومارک بهره جسته شده است. اثرات ترکیب مواد سازنده پوسته FGM، موقعیت لایه‌های مگنتواستریکتیو، ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو و اثر بهره کنترلی میدان مغناطیسی اعمالی بر روی زمان نشست و فرکانسهای تشدید مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات حاضر نشان می‌دهد که مواد مگنتواستریکتیو در کاهش دامنه ارتعاشات، عملکرد بسیار مطلوبی دارند. با افزایش فاصله لایه‌های مگنتواستریگتیو از سطح میانی، اثرات میرایی به‌طور مستقیم افزایش می‌یابد. ضمناً لایه‌های مگنتواستریکتیو نسبتاً نازکتر که در فاصله دورتری از سطح میانی قرار می‌گیرند میرایی مؤثرتری از خود نشان می‌دهند. همچنین با افزایش شدت بهره کنترلی میدان مغناطیسی اعمالی، زمان نشست مستقیماً کاهش می‌یابد. پیک منحنیهای پاسخ فرکانسی در ناحیه تشدید نیز تا حدودی با تغییر خواص مکانیکی مواد ساختاری FGM و نوع پروفیل آن (تغییر شاخص پروفیل ماده FGM) قابل کنترل است.

مراجع

[۱] Ansari R., Darvizeh M., Prediction of Dynamic Behaviour of FGM Shells Under Arbitrary Boundary Conditions, *J. Composite Structures*, (Article in press).

[۲] Kumar J.S., Ganesan N., Swarnamani S. and Padmanabhan, C., Active control of cylindrical shell with magnetostrictive layer, *J. Sound & Vibration*, ۲۶۲, pp. ۵۷۷-۵۸۹.

[۳] Reddy J.N., Mechanics of laminated composite plates and shells, ۲۰۰۴, CRC Press LLC.

[٤] Pradhan S.C, Vibration suppression of FGM shells using embedded magnetostrictive layers, *Int. J. Solid and Structures*, Vol. ۴۲, pp. ۲۴۶۵-۲۴۸۸.

[٥] Bhangale R.K. and Ganesan N., ۲۰۰۶, Static analysis of simply supported functionally graded and layered magneto-electro-elastic plates, *In. J. Solids and Structures*, ۴۳،۳۲۳۰-۳۲۵۳.

[٦] Toorani M.H. and Lakis A.A., ۲۰۰۰, General equations of anisotropic plates and shells including transverse shear deformations, rotary inertia and initial curvature effects, *J. Sound & Vibration*, Vol. ۲۳۷ (۴), pp. ۵۶۱-۶۱۵.

[۷] Tzou H.S., Piezoelectric shells distributed sensing and control of continua, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston, ۱۹۹۳.

[۸] Pradhan S.C., Loy C.T., Lam K.Y. and Reddy J.N., Vibration Characteristics of Functionally Graded Cylindrical Shells under Various Boundary Conditions, *Applied Acoustics*, Vol. ۶۱, ۲۰۰۰, pp. ۱۱۱-۱۲۹.

پیوست

$$K_{11} = -A_{11}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - A_{66}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2$$

$$K_{12} = -(A_{12} + A_{66})\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{13} = A_{12}\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)$$

$$K_{14} = -B_{11}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - B_{66}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2$$

$$K_{15} = -(B_{12} + B_{66})\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{22} = -A_{66}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - A_{22}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2 - \frac{1}{R^2}A_{44}$$

$$K_{23} = (A_{22} + A_{44})\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{24} = -(B_{12} + B_{66})\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{25} = -B_{66}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - \frac{1}{R^2}B_{22}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2 + \frac{1}{R}A_{44}$$

$$K_{33} = -A_{55}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - A_{44}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2 - A_{22}\frac{1}{R^2}$$

$$K_{34} = -A_{55}\left(\frac{m\pi}{L}\right) + B_{12}\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)$$

$$K_{35} = -A_{44}\frac{1}{R}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right) + B_{22}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{44} = -D_{11}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - D_{66}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2 - A_{55}$$

$$K_{45} = -(D_{12} + D_{66})\frac{1}{R}\left(\frac{m\pi}{L}\right)\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)$$

$$K_{55} = -D_{66}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - D_{22}\frac{1}{R^2}\left(\frac{n\pi}{\beta}\right)^2 - A_{44}$$