

مدل تحلیلی انتقال صوت از پوسته های دولایه - استوانه ای FGM

علی نوری^۱، محمد کاظمی نصرآبادی^۲، مینا بدلی^۳

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری - تهران مهرآباد جنوبی

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار

چکیده

مواد FGM (Functionally Gradient Materials) به عنوان عایق حرارتی که قابلیت تحمل تغییرات شدید دمایی را دارند در فضاپیماها، توربوماشینها و صنایع هسته ای و شیمیایی کاربردهای زیادی دارند در این تحقیق افت انتقال صوت از یک پوسته دولایه استوانه ای ساخته شده از مواد FGM با طول بی نهایت که در معرض امواج صفحه ای هارمونیک واقع شده، و پوسته دارای یک سرعت ثابت در راستای محوری می باشد، به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است؛ بدین منظور معادلات ارتعاشاتی پوسته های FGM در سه راستا بر اساس معادلات لاو (Love) با معادلات آکوستیکی هلمهولتز بدست آمده برای سیال داخل و خارج استوانه با هم کوپل شده و به صورت همزمان حل شده اند تا بتوان فاکتور افت انتقال صوت را در کل بازه فرکانسی محاسبه نمود. برای حل معادلات از روش تراکنش مودال استفاده گشته که در این روش همه متغیرها از جمله جابجایی های پوسته ها و فشارهای آکوستیکی به صورت سریهای بی نهایت بیان می گردند، بنابراین همگرایی سریها نیز در این تحقیق مدنظر قرار گرفته و به منظور اعتبار سنجی مدل، نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج سایر محققین در حالت خاص مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین اثرات خواص سازه ای و شرایط پروازی نظیر نسبت توان حجمی مواد FGM، سرعت پروازی و جنس لایه ها بر افت انتقال صوت مورد بررسی قرار گرفته و افت انتقال صوت پوسته FGM دولایه با پوسته FGM تک لایه و پوسته آلومینیومی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که در کل بازه فرکانسی، افت انتقال صوت پوسته های دولایه FGM بالاتر از تک جداره و آلومینیومی می باشند.

واژه های کلیدی: مواد FGM - پوسته دولایه استوانه ای - افت انتقال صوت - فرکانس رینگ - فرکانس بحرانی

مقدمه

پیشرفت های اخیر در زمینه مهندسی و مواد به همراه نیازمندی به ساخت سازه های با کیفیت به کلاس جدیدی از مواد به نام FGM (Functionally Gradient Materials) منتهی شد. این مواد به عنوان عایق حرارتی که قابلیت تحمل تغییرات شدید دمایی داشته و در فضاپیماها، توربوماشینها و صنایع هسته ای و شیمیایی کاربردهای زیادی دارند [۱]. مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ بوسیله تعدادی از محققین ژاپنی معرفی گردید این نوع مواد از ترکیب مواد مختلف و با روش متالورژی پودر ساخته می شوند. مواد FGM را می توان به صورت پیوسته با تغییر

نسبت حجمی آنها ساخت. به دلیل تغییرات پیوسته در خواص این مواد در مقایسه با مواد کامپوزیت تکنیکی تنش و ورقه ای شدن لایه در این گونه مواد از بین می رود [۲]. بررسی رفتار ناشی از صوت این سازه ها و تخمین میزان نویز وارد شده به آنها بدلیل کاربرد آنها در صنایع فضایی و دیگر صنایع بسیار پراهمیت می باشد. مطالعه انتقال صوت به داخل پوسته های استوانه ای بدلیل کاربردهای زیاد این پوسته در صنایع هوافضایی مانند فیرینگ ها، بدنه موشک ها و هواپیما، صنایع دریایی مانند بدنه زیردریایی ها و صنایع دیگر مانند لوله های صنعتی از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد.

اسمیت (Smith) اولین کسی بود که در سال ۱۹۵۷ به بررسی انتقال صوت در پوسته های استوانه ای پرداخت [۳]. کوال (Koval) از روش امپدانس مشخصه یک مدل ریاضی برای محاسبه افت انتقال موج صوتی صفحه ای به داخل پوسته استوانه ای جدار نازک با طول بی نهایت ارائه کرد [۴]. وایت (White) مدلی را برای محاسبه افت انتقال صوت (Transmission Loss) به داخل پوسته های استوانه ای با طول محدود ارائه نمود [۵]. کیم (Kim) و لی (Lee) یک مدل آنالیتیک برای محاسبه انتقال نویز به داخل یک پوسته استوانه ای به طول بی نهایت با استفاده از حل همزمان معادلات ارتعاش پوسته و موج آکوستیکی توسعه دادند [۶]. در اکثر کارهای انجام شده در بالا که ترمهای فشار و جابجایی پوسته به صورت سریهای بینهایت نشان داده اند، همگرایی سریها مورد بررسی قرار نگرفته است. دانشجو و همکارانش یک مدل تحلیلی برای محاسبه افت انتقال صوت پوسته های استوانه ای کامپوزیتی ارائه نمودند. آنها همچنین افت انتقال صوت را برای پوسته های ارتوتروپیک دو جداره محاسبه نمودند [۷]. نوری و همکاران افت انتقال صوت پوسته های استوانه ای FGM را به صورت تحلیل محاسبه نمودند آنها همچنین روی بهینه سازی افت انتقال صوت پوسته های استوانه ای FGM تحقیق نمودند [۸ و ۹]. در مقاله حاضر افت انتقال صوت از یک پوسته دولایه استوانه ای ساخته شده از مواد FGM با طول بی نهایت که در معرض امواج صفحه ای هارمونیک واقع شده، مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد؛ پوسته در داخل محیط سیال غوطه ور بوده و سیال خارجی با سرعت ثابت از روی آن عبور می کند. بدین منظور معادلات تحلیلی با حل همزمان معادلات پوسته FGM در سه راستا بر اساس معادلات لاو (Love) و کوپل نمودن آنها با معادلات آکوستیکی بدست آمده و افت انتقال صوت بر حسب فرکانس محاسبه می گردد. چون جابجایی های پوسته و فشارهای آکوستیکی به صورت سریهای بی نهایت بیان می گردند، بنابراین همگرایی سریها نیز در این مقاله مد نظر قرار گرفته است. افت انتقال صوت بدست آمده از این تحقیق با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج نشان می دهد که با هم همخوانی بسیار خوبی دارند.

۱- استادیار، ۰۳۲۲۷۲-۶۴ ali_nori@just.ac.ir (نویسنده مخاطب)

۲- استادیار

۳- کارشناس ارشد هوافضا

$$E = E_{fgm}^{(1)} + E_{fgm}^{(2)}$$

$$\epsilon = \epsilon_{fgm}^{(1)} + \epsilon_{fgm}^{(2)} \quad (4)$$

$$\dots = \dots_{fgm}^{(1)} + \dots_{fgm}^{(2)}$$

معادلات حاکم بر پوسته

برای یک پوسته استوانه‌ای نازک، شرط تنش صفحه‌ای فرض شده و رابطه ساختاری به شکل زیر داده شده است:

$$\{ \sigma \} = [Q] \{ \epsilon \} \quad (5)$$

که $\{ \sigma \}$: بردار تنش، $\{ \epsilon \}$: بردار کرنش و $[Q]$: ماتریس سختی است. بردار تنش و بردار کرنش به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} x & x \\ x & x \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} x & x \\ x & x \end{Bmatrix} \quad (6)$$

\dagger_x, \dagger_y : به ترتیب تنش در راستاهای x و y : تنش برشی در صفحه x می‌باشد؛ e_x, e_y : به ترتیب کرنش در جهات x و y : کرنش برشی بر روی صفحه x می‌باشد. ماتریس سختی کاهش یافته نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[Q] = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \quad (7)$$

برای مواد ایزوتروپیک سختی کاهش یافته Q_{ij} ($i, j=1, 2$ and 6) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E}{1 - n^2}$$

$$Q_{12} = \frac{nE}{1 - n^2}$$

$$Q_{66} = \frac{E}{2(1 + n)} \quad (8)$$

که در آن E : ضریب الاستیسیته و n نسبت پواسون است. طبق تئوری لایه [۹] اجزای بردار کرنش به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e_1 + z | 1 \\ e_2 + z | 2 \\ x + 2z \dagger \end{Bmatrix} \quad (9)$$

که در آن e_1, e_2, g, t کرنش صفحات مرجع هستند و k_1, k_2, t : انحنای صفحات هستند [۱۳]. کرنش و انحنای صفحات به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\{ e_1, e_2, \gamma \} = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{1}{R} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right), \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right\}$$

$$\{ k_1, k_2, \tau \} = \left\{ -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, -\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial \theta} \right), -\frac{1}{R} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (10)$$

برای یک پوسته استوانه‌ای نازک برآیند نیروها و گشتاورها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\{ N_x, N_y, N_{xy} \} = \dot{\sigma}_{, h/2} \{ \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy} \} dz$$

$$\{ M_x, M_y, M_{xy} \} = \dot{\sigma}_{, h/2} \{ \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy} \} z dz \quad (11)$$

با جایگذاری معادلات (۹) و (۳) در معادله (۱۱) معادله زیر حاصل می‌شود:

$$[N] = [S] \{ \epsilon \} \quad (12)$$

که $\{ N \}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

همچنین، اثرات خواص سازه‌ای و شرایط پروازی نظیر عدد ماخ، توان نسبت حجمی مواد FGM و جنس پوسته بر افت انتقال صوت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین و افت انتقال صوت پوسته FGM دو لایه با پوسته FGM تک لایه و پوسته آلومینیومی مورد مقایسه قرار گرفته است.

تشریح مسأله

شکل (۱) شماتیک مسأله مورد بحث را نشان می‌دهد که در آن یک پوسته استوانه‌ای دولایه FGM با طول نامحدود که چگالی و سرعت صوت سیال خارج و داخل محفظه به ترتیب (ρ_1, c_1) و (ρ_3, c_3) می‌باشند؛ پوسته با سرعت ثابت V در راستای محور x حرکت می‌کند و دارای شعاع میانی R ، ضخامت h ، چگالی جرمی $\dots_{fgm}^{(1)}$ ، ضریب پواسون $\epsilon_{fgm}^{(1)}$ و ضریب الاستیسیته $E_{fgm}^{(1)}$ برای لایه داخلی و چگالی جرمی $\dots_{fgm}^{(2)}$ ، ضریب پواسون $\epsilon_{fgm}^{(2)}$ و ضریب الاستیسیته $E_{fgm}^{(2)}$ برای لایه بیرونی می‌باشد. مواد FGM از ترکیب دو یا چند ماده بدست می‌آیند. نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده Z به صورت پیوسته تغییر می‌کند و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\sum_{j=1}^k V_{f_j} = 1 \quad \text{و} \quad V_f = \left(\frac{2z + h}{h} \right)^N \quad (1)$$

که k نشاندهنده تعداد مواد تشکیل دهنده ماده FGM و N توان نسبت حجمی می‌باشد. برای لایه داخلی

$$E_{fgm}^{(1)} = (E_2 - E_1) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + E_1$$

$$\dots_{fgm}^{(1)} = (\dots_2 - \dots_1) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + \dots_1 \quad (2)$$

$$\epsilon_{fgm}^{(1)} = (\epsilon_2 - \epsilon_1) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + \epsilon_1$$

برای لایه خارجی

$$E_{fgm}^{(2)} = (E_4 - E_3) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + E_3$$

$$\dots_{fgm}^{(2)} = (\dots_4 - \dots_3) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + \dots_3 \quad (3)$$

$$\epsilon_{fgm}^{(2)} = (\epsilon_4 - \epsilon_3) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N + \epsilon_3$$

قابل ذکر است که اندیس‌های ۱ و ۳ در هر دو لایه مربوط به سطوح داخلی و اندیس‌های ۲ و ۴ مربوط به سطوح خارجی پوسته می‌باشند. در این صورت وقتی $Z = -h/2$ باشد $\rho = \rho_1, \epsilon = \epsilon_1, E = E_1$ و برای $Z = h/2$ باشد $\rho = \rho_4, \epsilon = \epsilon_4, E = E_4$ می‌باشد. خصوصیات مواد از ماده (۱) در سطح داخلی پوسته استوانه‌ای به ماده (۲) در سطح خارجی پوسته استوانه‌ای تغییر می‌کند.

برای پوسته تشکیل شده از دولایه ماده FGM ضریب الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی برابر حاصل جمع مقادیر مذکور برای هر لایه می‌باشد [۱۱ و ۱۲].

معادلات ارتعاشات ناشی از آکوستیک

فشار آکوستیکی در بیرون پوسته خارجی، برابر با مجموع فشار موج برخوردی P^I و موج منعکس شده از پوسته خارجی P_1^R می‌باشد و معادله موج آکوستیک به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial(p^I + p_1^R)}{\partial r} = -r_1 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \text{ at } r = R \quad (19)$$

w_1^0 جابجایی پوسته خارجی در راستای شعاعی می‌باشد. با فرض اینکه فضای داخلی پوسته کاملا جاذب است بنابراین در فضای داخلی فقط فشار آکوستیک موج منتقل شده P_3^T وجود دارد.

$$\frac{\partial p_3^T}{\partial r} = -r_3 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \text{ at } r = R \quad (20)$$

حل معادلات

موج صفحه‌ای مایل هارمونیک با فشار آکوستیک P^I که از محیط خارج به پوسته استوانه‌ای برخورد می‌نماید، را به صورت زیر می‌توان نشان داد [۱۶].

$$p^I(r, x, n, t) = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} V_n (-j)^n J_n(k_{1r} r) \cos n_n e^{j(S t - k_{1x} x)} \quad (21)$$

که k_{1z} و k_{1r} به ترتیب اعداد موج در راستای شعاعی و محوری در محیط خارجی بوده و از رابطه زیر بدست می‌آیند.

$$K_{1x} = K_1 \cos(x_1), \quad K_{1r} = K_1 \sin(x_1), \quad K_1 = \frac{S}{c_1(1 + M \cos(x_1))} \quad (22)$$

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & (n=0) \\ 2 & (n \geq 1) \end{cases}$$

که ε_n ضریب نیومن، k_1 عدد موج در محیط خارجی، J_n تابع بسل نوع اول p_0 دامنه موج برخوردی، S فرکانس زاویه‌ای و $M_1 = (V/c_1)$ عدد ماخ جریان در محیط خارجی می‌باشد. امواج آکوستیک منعکس شده از روی پوسته و منتقل شده به داخل آن p_1^R و p_3^T ، به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$p_1^R(r, x, n, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{1n}^R H_n^2(k_{1r} r) \cos[n_n] e^{j(S t - k_{1x} x)}$$

$$p_3^T(r, x, n, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{3n}^T H_n^1(k_{3r} r) \cos[n_n] e^{j(S t - k_{3x} x)} \quad (23)$$

که P_{1n}^R دامنه فشار صوت منعکس شده از پوسته، P_{3n}^T دامنه فشار صوت منتقل شده به داخل پوسته، و H_n^1 و H_n^2 به ترتیب توابع هنکل نوع اول و دوم از مرتبه صحیح n می‌باشند.

چون موجهای پیش‌رونده در واسطه آکوستیک و داخل پوسته بوسیله موج برخوردی پیش‌رونده بوجود می‌آید، عدد موج (یا سرعت‌های) آن در جهت Z باید با هم مطابقت داشته باشد، بنابراین $k_{1z} = k_{3z}$. عددهای موج در محیط خارجی و داخلی با توجه به معادلات (۲۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$k_3 = \frac{S}{c_3}, \quad k_{3r} = \sqrt{k_3^2 - k_{1z}^2} \quad (24)$$

سه مولفه جابجایی پوسته به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\{N\}^T = \{N_x, N_z, N_{xz}, M_x, M_z, M_{xz}\} \quad (13)$$

$$\{v\}^T = \{e_1 e_2 x k_1 k_2 2t\}$$

و [S] به صورت زیر می‌باشد:

$$[S] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & B_{21} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 & D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که D_{ij} ($i, j=1, 2$ and 6) به ترتیب سختی کششی، کوبلی و خمشی هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱].

$$\{A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}\} = \int_{-\frac{h}{2}}^0 Q_{ij}^{(1)}(1, z, z^2) dz + \int_0^{\frac{h}{2}} Q_{ij}^{(2)}(1, z, z^2) dz \quad (15)$$

shell inner.FGM layer shell outer.FGM layer

معادلات ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۳ و ۱۴].

$$\begin{cases} -\frac{N_x}{R} + \frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial^2 M_{xz}}{\partial x \partial q} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M_a}{\partial q^2} + 2 \frac{\partial^2 M_a}{\partial x \partial q} \frac{\partial u}{\partial t} \\ + q_z = -M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial N_x}{\partial q} + \frac{\partial N_{xz}}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M_a}{\partial q^2} + \frac{\partial M_{xz}}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial t} + q_q = -M \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_{xz}}{\partial q} + q_x = -M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \end{cases} \quad (16)$$

در معادلات بالا q_x و q_q و q_z به ترتیب نیروهای خارجی (بر واحد سطح) در جهات محوری، محیطی، و شعاعی و t نشان دهنده متغیر زمان، $\{u, v, w\}$ جابجایی پوسته به ترتیب در جهات محوری، محیطی و شعاعی می‌باشد. و \bar{M} جرم پوسته بر واحد سطح می‌باشد.

$$\bar{M} = \int_{-\frac{h}{2}}^0 \dots_{jgm}^{(1)} dz + \int_0^{\frac{h}{2}} \dots_{jgm}^{(2)} dz \quad (17)$$

$$q_z = P_3^T - (P^I + P_1^R), \quad q_x = q_q = 0$$

حرکت ارتعاشی پوسته را می‌توان با معادله لاو توصیف کرد [۱۵]. معادلات کلاسیک حرکت پوسته‌های نازک، به خصوص برای یک پوسته استوانه‌ای، برحسب عبارت‌هایی از جابجایی پوسته می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند [۱۳ و ۱۴]:

$$\begin{cases} L_{11}(u) + L_{12}(v) + L_{13}(w) = \bar{M} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ L_{21}(u) + L_{22}(v) + L_{23}(w) = \bar{M} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ L_{31}(u) + L_{32}(v) + L_{33}(w) + (P^I + P_1^R) \\ - P_2^T = -\bar{M} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases} \quad (18)$$

ضرایب L_{ij} را می‌توان از مراجع [۱۳ و ۱۴] بدست آورد.

اعتبارسنجی مدل تحلیلی ارائه شده

به منظور اعتبار سنجی، نتایج تحلیلی بدست آمده از این تحقیق با نتایج دیگر محققان در حالت خاص مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۲). بدین ترتیب که جنس دولایه داخلی و خارجی آلومینیوم در نظر گرفته شده است و با نتایج مرجع [۴] مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با هم همخوانی بسیار خوبی دارند

همگرایی

چنانچه در معادلات (۲۳)-(۲۱) و (۲۵) مشاهده می‌شود، متغیرهای فشار و جابه‌جایی بشکل سری بی‌نهایت نشان داده شده است. بنابراین در تحلیل همگرایی، باید از تعداد موده‌های کافی استفاده شود. الگوریتم همگرایی در شکل (۳) نشان داده شده است. روند همگرایی برای پوسته دولایه FGM، در شکل (۴) در فرکانس ۱۰ kHz نشان داده شده است. با افزایش فرکانس تعداد موده‌های مورد نیاز جهت همگرایی نیز بیشتر می‌گردد.

تأثیر سرعت خارجی

جریان هوای خارجی می‌تواند بر روی عدد موج محوری و شعاعی تأثیر می‌گذارد (شکل ۵). مشاهده می‌گردد که با کاهش عدد ماخ، مقدار افت انتقال صوت در ناحیه سختی کنترل و ناحیه هم زمانی کنترل، افزایش یافته، در صورتی که در ناحیه جرم کنترل، کاهش یافته است.

تأثیر توان حجمی

اثر نسبت حجمی بر افت انتقال صوت برای سه نسبت حجمی مختلف (N=0, 2, 5) در شکل (۶) نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهند که با کاهش نسبت حجمی، افت انتقال صوت در ناحیه جرم کنترل کاهش می‌یابد. در صورتی که در ناحیه سختی کنترل و ناحیه هم زمانی کنترل، ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد. با کاهش نسبت حجمی، محل فرکانس رینگ اندکی به سمت بالا انتقال می‌یابد ولی محل فرکانسهای میانبر و بحرانی تقریباً بدون تغییر می‌مانند.

تأثیر جنس

برای پوسته دو لایه دو حالت در نظر گرفته شده و با هم مقایسه شده‌اند. در حالت اول: لایه داخلی نیکل- آلومینیوم و لایه خارجی آلومینیوم - زیرکونیا بوده و در حالت دوم: لایه داخلی آلومینیوم - زیرکونیا و لایه خارجی نیکل- آلومینیوم می‌باشد. افت انتقال صوت برای این دو حالت با N=2 در شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که: حالت اولی در کل بازه فرکانسی افت انتقال صوت بالاتری دارد. و این مسئله بسیار مهمی در صنایع هوافضایی بوده که با ثابت ماندن جرم پوسته و چیدمان مناسب لایه‌ها، بتوان افت انتقال صوت بالاتری بدست آورد.

مقایسه پوسته‌های دولایه و تک‌لایه FGM با پوسته آلومینیومی

به منظور مقایسه افت انتقال صوت پوسته دو لایه FGM، تک لایه FGM و پوسته آلومینیومی با شعاع و ضخامت یکسان در شکل (۸) مقایسه شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهند که افت انتقال صوت پوسته دولایه در کل بازه فرکانسی بالاتر از پوسته تک‌لایه است؛ و افت انتقال صوت پوسته تک لایه نیز به نوبه خود در کل بازه فرکانسی بالاتر از پوسته آلومینیومی می‌باشد. و این نشان‌دهنده مزیت پوسته FGM دو لایه نسبت به تک لایه و پوسته آلومینیومی می‌باشد.

$$\begin{aligned} u(x, q, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos(nq) \exp(j(\omega t - k_{lx}x)) \\ v(x, q, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n \sin(nq) \exp(j(\omega t - k_{lx}x)) \\ w(x, q, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(nq) \exp(j(\omega t - k_{lx}x)) \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن U_n, V_n, W_n به ترتیب دامنه مودال جابجایی پوسته در جهات شعاعی، محوری و محیطی مود n می‌باشند. با جایگذاری معادلات (۲۱) و (۲۳) و (۵۳) در سه معادله مربوط به معادلات حرکت پوسته و دو معادله شرایط مرزی (معادلات (۱۹-۲۰)) پنج معادله به دست می‌آید. با حل این پنج معادله پنج مجهول $P_{1n}^R, P_{3n}^T, u_n, v_n, w_n$ برحسب P_0 به دست خواهند آمد.

افت انتقال

افت انتقال به صورت نسبت شدت صوت برخورد کننده به پوسته بیرونی به شدت صوت وارد شده به پوسته داخلی در واحد طول استوانه تعریف می‌گردد [۶،۷].

$$TL = 10 \log_{10} \frac{W^I}{W^T} \quad (26)$$

که W^T شدت جریان منتقل شده و W^I شدت صوت برخوردی در واحد طول پوسته می‌باشد. افت انتقال صوت پوسته استوانه‌ای دوجداره از رابطه زیر بدست می‌آید

$$TL = -10 \log_{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\operatorname{Re} \left\{ \frac{P_{3n}^T H_n^1(k_{3r} R_1)}{(jS W_{1n})^*} \right\} \times \dots \times c_{1f}}{v_n \cos(x) P_0^2} \right) \quad (27)$$

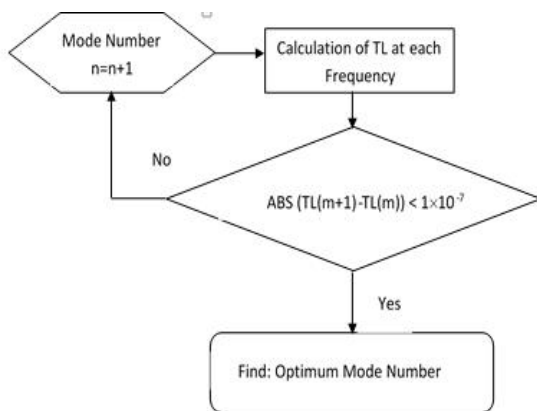
که نمایه‌های $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ * به ترتیب نشان دهنده قسمت حقیقی و مزدوج مختلط متغیر می‌باشد.

نتایج عددی

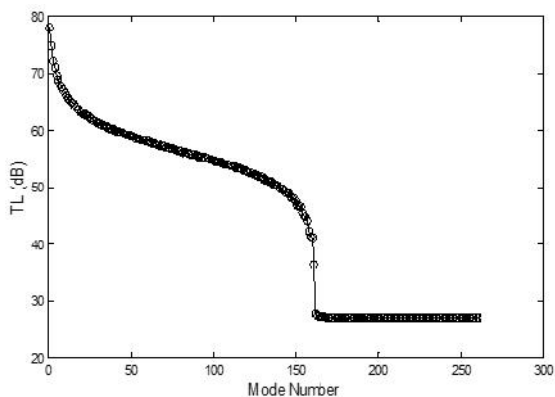
برای بدست آوردن نتایج عددی، بدنه هواپیمای جت باریک با شعاع $R=1.83$ m و ضخامت $h=0.159$ cm در نظر گرفته شده است، جنس بدنه متشکل از دو لایه ماده FGM می‌باشد؛ که در لایه اول: نیکل در سطح داخلی و آلومینیوم در سطح خارجی قرار دارند؛ و در لایه دوم: آلومینیوم در سطح داخلی و زیرکونیا در سطح خارجی قرار دارند. این دو لایه کاملاً به یکدیگر چسبیده‌اند. شرایط محیط داخلی و خارجی در شرایط سطح دریا در نظر گرفته شده، عدد ماخ جریان خارجی برابر $M=0$ فرض شده است (جدول ۱). همچنین زاویه برخورد امواج آکوستیک برخوردی 45° در نظر گرفته شده‌اند، نسبت حجمی نیز برابر $N=2$ می‌باشد.

جدول ۱- خواص محیطی و مکانیکی پوسته دولایه [۱۱]

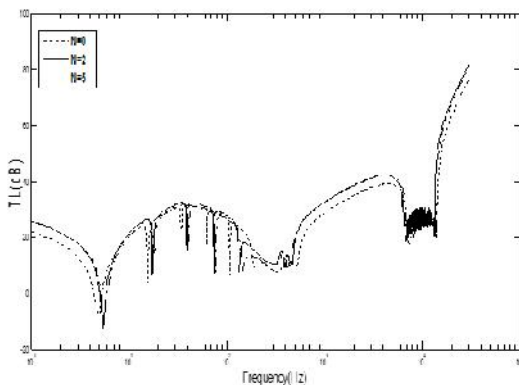
آلومینیوم	نیکل	زیرکونیا	هوا داخل پوسته	هوا خارج پوسته
۲۷۶۰	۸۹۰۰	۵۷۰۰	۱،۲۱	۱،۲۱
۷۲	۲۲۴	۲۴۴	-	-
۰،۳۳	۰،۳۴	۰،۳	-	-
-	-	-	۳۴۰	۳۴۰



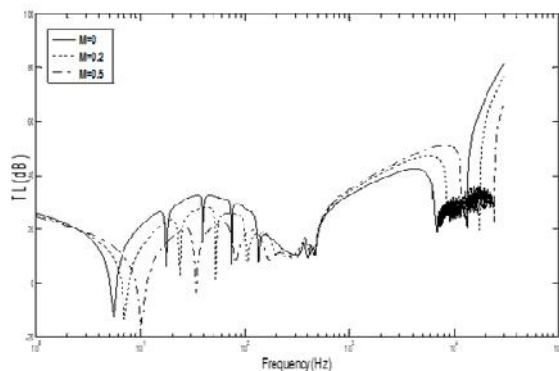
شکل ۳- الگوریتم همگرایی فرآیند حل مسئله



شکل ۴- نمودار همگرایی برای پوسته دو لایه در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز



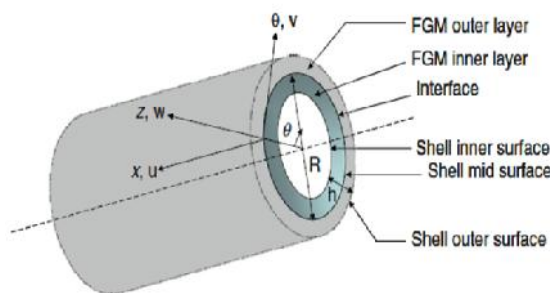
شکل ۵- تأثیر نسبت حجمی بر افت انتقال صوت پوسته دو لایه FGM



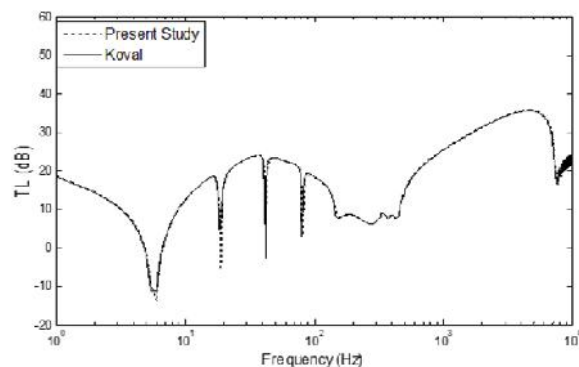
نتیجه گیری

- ۱- افت انتقال صوت بدست آمده از این تحقیق در حالت خاص با نتایج سایر محققان مقایسه شده که باهم همخوانی بسیار خوبی دارند.
- ۲- با کاهش عددماخ، مقدار افت انتقال صوت در ناحیه سختی کنترل و ناحیه همزمانی کنترل، افزایش یافته، در صورتی که در ناحیه جرم کنترل، کاهش یافته است.
- ۳- برای یک پوسته FGM دو لایه با ثابت ماندن جرم پوسته و چیدمان مناسب لایه‌ها می‌توان افت انتقال صوت بالاتری بدست آورد.
- ۴- با افزایش نسبت حجمی FGM، افت انتقال صوت در ناحیه سختی کنترل بیشتر شده اما در فرکانسهای بالاتر از فرکانس رینگ باعث افزایش افت انتقال صوت می‌گردد.
- ۵- برای یک پوسته با شعاع و ضخامت یکسان، افت انتقال صوت پوسته دولایه FGM در کل بازه فرکانسی بالاتر از یک لایه FGM و همچنین بالاتر از پوسته آلومینیومی می‌باشد.

شکل‌ها و نمودارها



شکل ۱- هندسه پوسته استوانه ای - دو لایه FGM



شکل ۲- مقایسه روش تحلیلی حاضر با نتایج دیگر محققان

هوافضای ایران تهران، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، اسفند ماه ۱۳۹۰.

10 - Nouri A., Astaraki S., Optimization of Sound Transmission Loss through a Thin Functionally Graded Material Cylindrical Shell. *Shock and vibration*, Published 14 July 2014

11 - Arshad S. H., Naeem M. Nawaz. N., Shah . G., Iqbal Z. Vibration analysis of bi-layered FGM cylindrical shells. *Arch Appl. Mech.*, v.81,2011, pp.319-343.

12 - Arshad S. H., Naeem M. Nawaz. N., Shah . G., Iqbal Z., Vibration of bilayered cylindrical shells with layers of different materials, *Journal of Mechanical Science and Technology*, v.24, n.3,2010, pp 805-810.

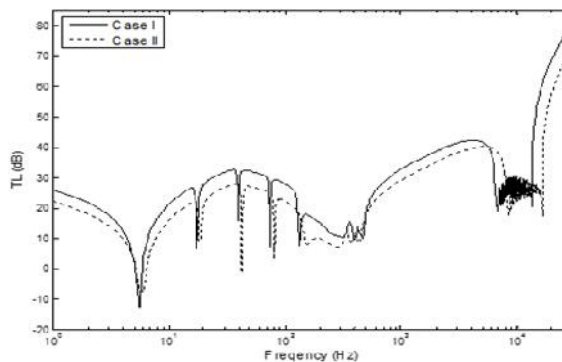
13 - Reddy J. N., *Mechanics of laminated composite plates and shells, Theory and analysis*. 2nd ed. , CRC Press, 2004.

14 - Qatu M. S., "Vibration of laminated shells and plates". Elsevier Academic Press, 2004.

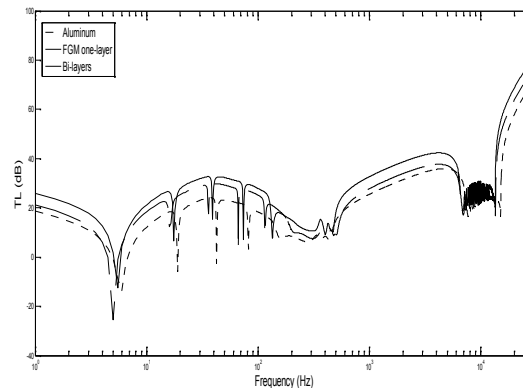
15 - A. Leissa, *Vibration of Shells*, Scientific and Technical Information Center NASA, Washington D. C., 1973.

16 - Howe M. S., *Acoustics of Fluid-Structure Interaction*. Cambridge University Press, 2000.

شکل ۶- تأثیر سرعت هوا بر افت انتقال صوت پوسته- دو لایه FGM



شکل ۷- تأثیر جنس بر افت انتقال صوت پوسته- دو لایه FGM



شکل ۸- مقایسه پوسته FGM تک لایه، دو لایه و پوسته آلومینیومی

مراجع

- 1 - Loy C.T., Lam K.Y., Reddy J.N., Vibration of functionally graded cylindrical shells. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.41, 1999, pp.309-324.
 - 2 - Patel B.P., Gupta S.S. , Loknath M.S., Kadu C.P., Free vibration analysis of functionally graded elliptical cylindrical shells using higher-order theory. *Composite Structures*, v.69, 2005, pp. 259-270.
 - 3 - Smith P. W., Sound Transmission through Thin Cylindrical Shells. *Journal of Acoustical Society of America*, vol.29, 1957, pp.712-729.
 - 4 - Koval L. R., On sound transmission into a thin cylindrical shell under flight conditions. *Journal of sound and vibration*, v. 48, 1976, pp. 265-275.
 - 5 - White P. H., Sound Transmission through a Finite, Closed, Cylindrical Shell. *Journal of Acoustical Society of America*, v. 40, N.5, 1966, pp. 1124-1130.
 - 6 - Lee J. H., Kim J., Study on sound transmission characteristics of a cylindrical shell using analytical an experimental models. *Applied Acoustic*, v. 64, 2003, pp. 611-632.
 - 7 - Daneshjou K. Nouri A., Talebitooti R, Sound transmission through laminated composite cylindrical shells using analytical model. *Archive of Applied Mechanics*, v. 77, 2007, pp 363-379.
 - 8 - Daneshjou K. Nouri A., Talebitooti R., Analytical model of sound transmission through orthotropic double-walled cylindrical shells. *Transaction of CSME*, 2008, pp.43-66.
- نوری، علی، آسترکی، سهراب، رحمانیان محمد، تحلیل انتقال صوت از پوسته های استوانه‌ای FGM با طول بی‌نهایت. یازدهمین کنفرانس انجمن