الگوی تحلیلی انتقال صدا از پوسته‌های استوانه‌ای اِف‌جی‌اِم با طول بی‌نهایت

علی نوری*، محمد کاظمی نصرآبادی، سهراب آسترکی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

چکیده

مواد اِف‌جی‌اِم دسته‌ای از مواد مرکب (کامپوزیت‌ها) هستند که خواص آن به صورت پیوسته در راستای ضخامت تغییر می‌نمایند. بنابراین نسبت به مواد مرکب (کامپوزیت‌ها)، تمرکز تنش بین لایه از بین رفته و قابلیت تحمل تغییرات شدید دمایی را دارند. این مواد در فضاپیماها، تراگذارهای (مبدل‌های) حرارتی، صنایع نیروگاهی و اجزاء موتور کاربردهای زیادی دارند. در مقاله حاضر افت انتقال صدا از یک پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد اِف‌جی‌اِم نازک با طول بی‌نهایت که در معرض امواج صفحه‌ای هماهنگ (هارمونیک) واقع شده، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد؛ بدین منظور یک روش تحلیلی با استفاده از سری‌های بی‌نهایت دقیق ارائه شده است. پوسته در داخل محیط سیال غوطه‌ور بوده و سیال خارجی با سرعت ثابت از روی آن عبور می‌کند. معادلات ارتعاشی پوسته در سه راستا و معادلات موج صوتی سیال داخل و خارج پوسته به صورت هم‌زمان حل گشته و میزان افت‌های انتقال پوسته بر حسب بسامد محاسبه می‌گردد. افت‌های انتقال صدا به دست آمده از این تحقیق با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با یکدیگر هم‌خوانی بسیار خوبی دارند. چون متغیرهایی مانند جابه‌جایی پوسته و فشارهای صوتی به صورت سری‌های بی‌نهایت بیان می‌گردند، به‌منظور به دست آوردن میزان افت‌های انتقال صدا، هم‌گرایی سری‌ها هم مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین اثرات خواص سازه‌ای و شرایط پروازی نظیر عدد ماخ، توان نسبت حجمی مواد اِف‌جی‌اِم، و ارتفاع پروازی بر افت انتقال صدا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت حجمی، افت انتقال صدا در ناحیه سفتی کنترل کاهش می‌یابد اما در بسامدهای بالاتر از بسامد حلقوی (ناحیه جرم کنترل)، افت انتقال صدا مربوط به نسبت حجمی بالاتر، بیش‌تر است.

کلید واژه‌ها: صوت، افت انتقال، پوسته استوانه‌ای اِف‌جی‌اِم، ارتعاش

۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه مهندسی و مواد به همراه نیازمندی به ساخت سازه‌های با کیفیت به کلاس جدیدی از مواد به نام اِف‌جی‌اِم[1] منتهی شد. این مواد به عنوان عایق حرارتی که قابلیت تحمل تغییرات شدید دمایی دارد، در فضاپیماها، توربوماشین‌ها، صنایع نیروگاهی و شیمیایی کاربردهای زیادی دارند [۱]. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ به وسیله تعدادی از محققین ژاپنی معرفی گردید. این نوع مواد از ترکیب مواد مختلف و با روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند. مواد اِف‌جی‌اِم را می‌توان به صورت پیوسته با تغییر نسبت حجمی آن‌ها ساخت. به دلیل تغییرات پیوسته در خواص این مواد در مقایسه با مواد مرکب (کامپوزیت‌های)[2] تکینگی، تنش و ورقه‌ای شدن لایه در این گونه مواد از بین می‌رود [۲]. بررسی رفتار ناشی از امواج صوتی این سازه‌ها و تخمین میزان نوفه (نویز)[3] وارد شده به آن‌ها به‌دلیل کاربرد آن‌ها در صنایع فضایی و دیگر صنایع بسیار پر اهمیت است. اسمیت اولین کسی بود که در سال ۱۹۷۵ به بررسی انتقال صدا در پوسته‌های استوانه‌ای پرداخت [۳]. وایت الگویی را برای محاسبه افت انتقال (تی‌اِل)[4] صدا به داخل پوسته‌های استوانه‌ای با طول محدود ارائه نمود [۴]. کوال از روش مقاومت‌ظاهری (امپدانس)[5] مشخصه یک الگوی ریاضی برای محاسبه افت انتقال صدا پوسته استوانه‌ای جدار نازک با طول بی‌نهایت ارائه نمود [۵]. کیم و همکارانش یک الگوی

* نویسنده پاسخگو: ali_nori@iust.ac.ir

[1] FGM; Functionally Gradient Materials

[2] Composite
[3] Noise
[4] Tl; Transmission loss
[5] Impedance

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

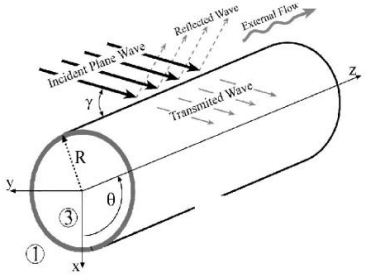
تحلیلی برای محاسبه انتقال نوفه (نویز) به داخل یک پوسته استوانه‌ای به طول بی‌نهایت را با استفاده از حل هم‌زمان معادلات ارتعاش پوسته و موج صوتی توسعه دادند [۶]. در اکثر کارهای انجام‌شده در بالا که جمله‌های فشار و جابه‌جایی پوسته به صورت سری‌های بی‌نهایت نشان داده‌اند، هم‌گرایی سری‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. دانشجو و همکارانش یک الگوی تحلیلی برای محاسبه افت انتقال صدا پوسته‌های استوانه‌ای مواد مرکب ارائه نمودند. آن‌ها هم‌چنین افت انتقال صدا را برای پوسته‌های ارتوتروپیک[1] دو جداره محاسبه نمودند [۸ و ۷].

در مقاله حاضر افت انتقال صدا از یک پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد اِف‌جی‌اِم با طول بی‌نهایت که در معرض امواج صفحه‌ای هماهنگ (هارمونیک) واقع شده، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است؛ بدین منظور معادلات تحلیلی با حل هم‌زمان معادلات پوسته اِف‌جی‌اِم در سه راستا براساس معادلات لاو[2] و جفت (کوپل) نمودن آن‌ها با معادلات صوتی بدست آمده و افت انتقال صدا بر حسب بسامد محاسبه گردیده است. چون جابه‌جای‌های پوسته و فشارهای صوتی به صورت سری‌های بی‌نهایت بیان می‌گردند، بنابراین هم‌گرایی سری‌ها نیز در این مقاله مد نظر قرار گرفته است. به‌منظور اعتبارسنجی الگو، نتایج بدست آمده از این مقاله با نتایج سایر محققین در حالت خاص مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. هم‌چنین، اثرات خواص سازه‌ای و شرایط پروازی نظیر عدد ماخ، توان نسبت حجمی مواد اِف‌جی‌اِم، جنس، ضخامت و شعاع پوسته و زاویه برخورد بر افت انتقال صدا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بعلاوه افت انتقال صدا پوسته اِف‌جی‌اِم با پوسته آلومینیومی و مواد مرکب مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. تشریح مسأله

شکل ۱ طرح‌واره[3] مسأله مورد بحث را نشان می‌دهد که در آن یک موج صفحه‌ای با زاویه γ به یک پوسته استوانه‌ای اِف‌جی‌اِم با طول نامحدود برخورد می‌کند. چگالی و سرعت امواج صوتی در سیال خارج و داخل محفظه به ترتیب (ρ_1, c_1) و (ρ_2, c_2) می‌باشند و پوسته با سرعت ثابت V در راستای محور z حرکت می‌کند.



شکل ۱ پوسته استوانه‌ای و امواج صوتی.

مواد اِف‌جی‌اِم از ترکیب دو یا چند ماده بدست می‌آیند. V_{f_i} نسبت حجمی مواد تشکیل‌دهنده بوده که در راستای ضخامت Z به صورت پیوسته تغییر می‌کند و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_f = \left(\frac{2z+h}{h}\right)^N \ , \ \sum_{j=1}^{k} V_{f_i} = 1 \qquad (1)$$

که k نشان‌دهنده تعداد مواد تشکیل‌دهنده ماده اِف‌جی‌اِم و N توان نسبت حجمی می‌باشد. ضریب کشسانی (الاسیسیته)، چگالی و ضریب پواسون یک ماده اِف‌جی‌اِم ساخته شده از دو ماده مختلف به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$E = \left(E_1 - E_2\right)\left(\frac{2z+h}{h}\right)^N + E_2$$
$$\rho = \left(\rho_1 - \rho_2\right)\left(\frac{2z+h}{h}\right)^N + \rho_2 \qquad (2)$$
$$\nu = \left(\nu_1 - \nu_2\right)\left(\frac{2z+h}{h}\right)^N + \nu_2$$

قابل ذکر است که شاخص‌های (اندیس‌های) ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به سطح خارجی و سطح داخلی پوسته می‌باشند.

۲-۲. معادلات ارتعاشات ناشی از صدا

فشار صوتی در بیرون پوسته خارجی، برابر با مجموع فشار موج برخوردی p^I و موج بازتابیده از پوسته خارجی p_1^R است و معادله موج صوتی به صورت زیر در می‌آید:

[1] Orthotropic
[2] Love
[3] Schematic

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

$$\frac{\partial\left(p^I+p_1^R\right)}{\partial r}=-r_1\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \qquad (r=R \text{ در}) \quad (۳)$$

که w جابه‌جایی پوسته خارجی در راستای شعاعی می‌باشد. فرض می‌شود که فضای داخل پوسته کاملاً جاذب است بنابراین در فضای داخلی فقط فشار صوتی موج منتقل شده p_2^T وجود دارد. معادله موج صوتی به صورت زیر درمی‌آید:

$$\frac{\partial p_2^T}{\partial r}=-r_2\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \qquad (r=R \text{ در}) \quad (۴)$$

۲-۳. معادلات حاکم بر پوسته

برای پوسته استوانه‌ای، مطابق با فرضیه کیرشهف با صرف نظر کردن از تغییر شکل برشی ε_z، رابطه تنش-کرنش به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{21} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_{12}\end{bmatrix} \qquad (۵)$$

سفتی[1] Q_{ij} را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned}Q_{11}&=Q_{22}=\frac{E}{1-\nu^2}\\ Q_{12}&=\frac{\nu E}{1-\nu^2}\\ Q_{66}&=\frac{E}{2(1+\nu)}\end{aligned} \qquad (۶)$$

که E مدول کشسانی (الاسیسیته) و ν ضریب پواسون هستند. با استفاده از نظریهٔ (تئوری) لاو [۹] مؤلفه‌های بردار کرنش به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_{x\theta}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}e_1+zk_1\\ e_2+zk_2\\ \gamma+2z\tau\end{Bmatrix} \qquad (۷)$$

که e_1، e_2 و γ کرنش‌های صفحه میانی پوسته و k_1، k_2 و τ انحنا سطح هستند [۱۰].

برای یک پوسته استوانه‌ای جدار نازک، نیروها و گشتاورهای (ممان‌های) منتجه با انتگرال‌گیری از تنش‌ها روی کل ضخامت پوسته به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned}\{N_x,\ N_\theta,\ N_{x\theta}\}&=\int_{-h/2}^{h/2}\{\sigma_x,\ \sigma_\theta,\ \sigma_{x\theta}\}dz\\ \{M_x,\ M_\theta,\ M_{x\theta}\}&=\int_{-h/2}^{h/2}\{\sigma_x,\ \sigma_\theta,\ \sigma_{x\theta}\}zdz\end{aligned} \qquad (۸)$$

با جای‌گذاری معادلات ۵ در معادله ۸ می‌توان نوشت:

$$\begin{Bmatrix}N_x\\ N_\theta\\ N_{x\theta}\\ M_x\\ M_\theta\\ M_{x\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0\\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0\\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66}\\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0\\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0\\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}e_1\\ e_2\\ \gamma\\ k_1\\ k_2\\ 2\tau\end{Bmatrix} \qquad (۹)$$

که A_{ij}، B_{ij} و D_{ij} به ترتیب سفتی کششی جفت‌شده (کوپل شده) و خمشی بوده و به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\{A_{ij},\ B_{ij},\ D_{ij}\}=\int_{-h/2}^{h/2}Q_{ij}\left\{1,\ z,\ z^2\right\}dz \qquad (۱۰)$$

معادلات ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شوند [۸ و ۹]:

$$\begin{cases}-\frac{N_\theta}{R}+\frac{\partial^2 N_z}{\partial z^2}+\frac{2}{R}\frac{\partial^2 M_{z\theta}}{\partial z\partial\theta}+\frac{1}{R}\left[\frac{1}{R}\frac{\partial^2 M_\theta}{\partial\theta^2}+2\frac{\partial^2 M_\theta}{\partial z\partial\theta}\right]\\ \qquad +q_r=-\bar{M}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\\ \frac{1}{R}\frac{\partial N_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial N_{z\theta}}{\partial z}+\frac{1}{R}\left[\frac{1}{R}\frac{\partial M_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial M_{z\theta}}{\partial z}\right]+q_\theta\\ \qquad =-\bar{M}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\\ \frac{\partial N_z}{\partial z}+\frac{1}{R}\frac{\partial N_{z\theta}}{\partial\theta}+q_z=-\bar{M}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\end{cases} \qquad (۱۱)$$

در معادلات بالا q_z، q_θ و q_r به ترتیب نیروهای خارجی (بر واحد سطح) در جهات محوری، محیطی و شعاعی، t نشان‌دهنده متغیر زمان، $\{u,v,w\}$ جابه‌جایی پوسته به ترتیب در راستاهای محوری، محیطی و شعاعی و $\bar{M}$ جرم پوسته بر واحد سطح هستند.

$$\bar{M}=\int_{-h/2}^{h/2}\rho dz \qquad (۱۲)$$

۲-۴. حل معادلات

موج صفحه‌ای مایل هماهنگ (هارمونیک) با فشار صوتی p^I که از محیط خارج به پوسته استوانه‌ای

[1] Stiffness

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

برخورد می‌نماید، را به صورت زیر می‌توان نشان داد [۱۱]:

$$p^I(r,z,\theta,t) = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (-j)^n J_n\left(k_{1r} r\right) \cos n\theta \; exp\left[j(\omega t - k_{1z} z)\right] \quad (۱۳)$$

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

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1}\left(\frac{1}{1 + M_1 \cos\gamma}\right)$$
$$M_1 = \frac{V}{c_1} \quad (۱۴)$$
$$k_{1r} = k_1 \sin\gamma, k_{1z} = k_1 \cos\gamma$$

که ε_n ضریب نیومن، k_1 عدد موج در محیط خارجی، J_n تابع بسل نوع اول، P_0 دامنه موج برخوردی و ω بسامد زاویه‌ای است. امواج صوتی منعکس‌شده از روی پوسته و منتقل شده به داخل آن p_1^R و p_2^T، به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$p_1^R(r,z,\theta,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{1n}^R H_n^2(k_{1r} r)\cos[n\theta] exp\left[j\left(\omega t - k_{1z} z\right)\right]$$
$$p_2^T(r,z,\theta,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{2n}^T H_n^1(k_{2r} r)\cos[n\theta] exp\left[j(\omega t - k_{2z} z)\right] \quad (۱۵)$$

که p_{1n}^R دامنه فشار صوتی منعکس شده از پوسته، p_{2n}^T دامنه فشار صوتی 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 هستند. چون موج‌های پیش‌رونده در واسطه صوتی و داخل پوسته به وسیله موج برخوردی پیش‌رونده به وجود می‌آیند، عدد موج (یا سرعت‌های) آن در جهت z باید با هم مطابقت داشته باشد، بنابراین $k_{1z} = k_{2z}$. عددهای موج در محیط خارجی، میانی و داخلی با توجه به معادلات ۱۴ می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$k_2 = \frac{\omega}{c_2}$$
$$k_{2r} = \sqrt{k_2^2 - k_{1z}^2} \quad (۱۶)$$

سه مؤلفه جابه‌جایی پوسته به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$u(z,\theta,t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos(n\theta)\, exp\left[j(\omega t - k_{1z} z)\right]$$
$$v(z,\theta,t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_{in} \sin(n\theta)\, exp\left[j(\omega t - k_{1z} z)\right] \quad (۱۷)$$
$$u(z,\theta,t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_{in} \cos(n\theta)\, exp\left[j(\omega t - k_{1z} z)\right]$$

معادلات حرکت را می‌توان بر حسب عبارت‌هایی از جابه‌جایی پوسته به صورت زیر نوشت [۹]:

$$L_{11}(u) + L_{12}(v) + L_{13}(w) = \bar{M}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
$$L_{21}(u) + L_{22}(v) + L_{23}(w) = \bar{M}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (۱۸)$$
$$L_{31}(u) + L_{32}(v) + L_{33}(w) + \left(P^I + P_1^R\right) - P_2^T = -\bar{M}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

ضرایب L_{ij} را می‌توان از مراجع [۱۰ و ۱۱] به دست آورد. با جایگذاری معادلات ۱۳ و ۱۵ و ۱۷ در سه معادله مربوط به معادلات حرکت پوسته و دو معادله شرایط مرزی (معادلات۳ و ۴) پنج معادله به دست می‌آیند. با حل این پنج معادله پنج مجهول، p_{1n}^R، p_{2n}^T، w_n، v_n، u_n بر حسب P_0 به دست خواهند آمد.

۲-۵. افت انتقال

افت انتقال به صورت نسبت شدت صدای برخوردکننده به پوسته بیرونی به شدت صدای وارد شده به پوسته داخلی بر واحد طول استوانه تعریف می‌گردد [۳ و ۱۲].

$$TL = 10\log_{10}\frac{W^I}{W^T} \quad (۱۹)$$

که W^T شدت جریان منتقل‌شده و W^I شدت صوت برخوردی در واحد طول پوسته می‌باشند. افت انتقال صدای پوسته استوانه‌ای دوجداره از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$TL = -10\log \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{Re\left\{ p_{2n}^T H_n^1(k_{2r}R_1) \right\} \times \rho_1 c_1 \pi}{\varepsilon_n \cos(\gamma) P_0^2} \right) \quad (۲۰)$$

که نمایه‌های $Re\{.\}$ و $*$ به ترتیب نشان‌دهنده قسمت حقیقی و مزدوج مختلط متغیر می‌باشند.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

جدول ۱ خواص محیطی و جنس پوسته.

	پوسته		داخل پوسته	خارج پوسته
ماده	فولاد	نیکل	هوا	هوا
چگالی (kg/m^3)	۸۱۶۶	۸۹۰۰	۱٫۲۱	۱٫۲۱
مدول کشسانی (الاسیسیته) (GPa)	۲۰۷	۲۰۵	-	-
ν	۰٫۳۱۷۷	۰٫۳۱	-	-
سرعت صدا (متر بر ثانیه)	-	-	۳۴۰	۳۴۰

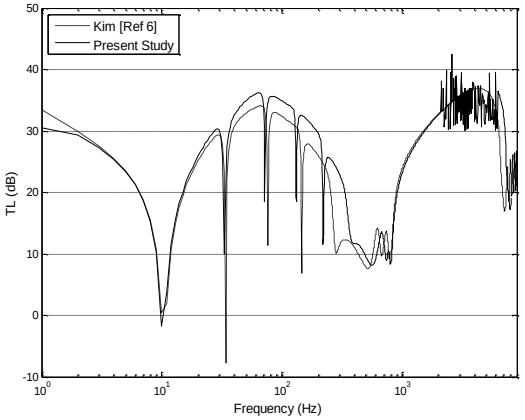
۳. نتایج

۳-۱. نتایج عددی

برای بدست آوردن نتایج عددی یک پوسته اِف‌جی‌اِم با شعاع ۱٫۰ متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پوسته استوانه‌ای اِف‌جی از جنس فولاد و نیکل است که نیکل سطح خارجی و فولاد سطح داخلی آن را تشکیل می‌دهند. خواص محیطی و خواص مکانیکی پوسته در جدول ۱ آمده‌اند.

۳-۲. اعتبارسنجی الگوی تحلیلی

به منظور اعتبارسنجی الگو، افت انتقال صدا به دست آمده در این مقاله در حالت همسانگرد (ایزوتروپیک)[1] با نتایج بدست آمده توسط دیگر محققان [۶] مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که این دو با یکدیگر هم‌خوانی بسیار خوبی دارند.

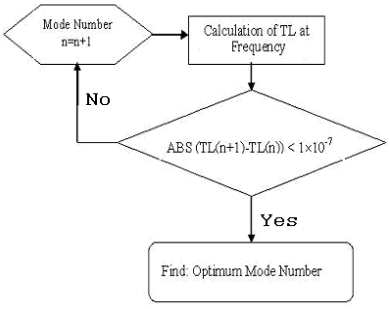


شکل ۲ مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج دیگر محققین.

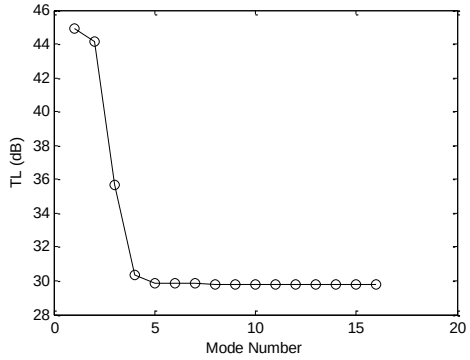
[1] Isotropic

۳-۳. هم‌گرایی

چنان‌چه در معادلات ۱۱ و ۱۷-۱۳ مشاهده می‌شود، متغیرهای فشار و جابه‌جایی به شکل سری بی‌نهایت نشان داده شده‌اند. بنابراین، در تحلیل هم‌گرایی، باید از تعداد مُدهای کافی استفاده شود. الگوریتم هم‌گرایی در شکل ۴ نشان داده شده است. روند هم‌گرایی برای پوسته اِف‌جی‌اِم، با توجه به داده‌های جدول ۱ در اشکال ۴ و ۵ در بسامدهای ۱ کیلوهرتز و ۱۰ کیلوهرتز برای زاویه برخورد ۴۵ درجه نشان داده شده است. مقایسه اشکال ۴ و ۵ نشان می‌دهد که با افزایش بسامد تعداد مُدهای مورد نیاز جهت هم‌گرایی نیز بیش‌تر می‌شود.



شکل ۳ الگوریتم هم‌گرایی.



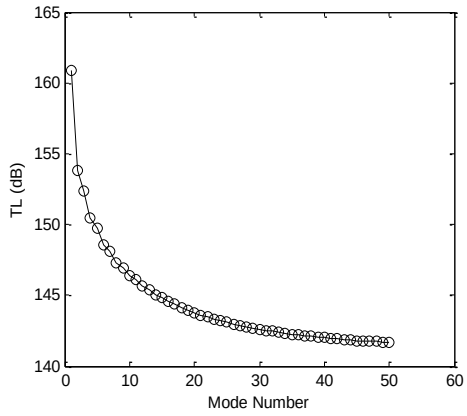
شکل ۴ نمودار هم‌گرایی برای پوسته اِف‌جی‌اِم در بسامد ۱۰۰۰ هرتز.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

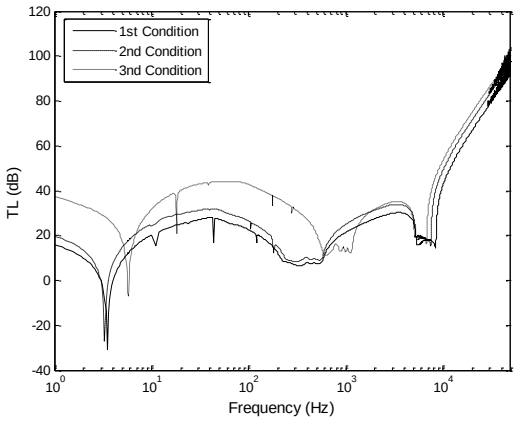
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

۳-۴. تأثیر ارتفاع مختلف پروازی

در شکل ۶ اثر شرایط محیطی مختلف پروازی مطابق با جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع پروازی بالاتر بر روی چگالی و سرعت صدا در سیال تأثیر می‌گذارد. بنابراین مقاومت صوتی سیال خارجی (ρ_1, c_1) کاهش خواهد یافت. در نتیجه اختلاف بین مقاومت‌های صوتی سیال‌های داخلی و خارجی پوسته باعث بیشتر شدن ناهمگونی مقاومت‌ظاهری (امپدانس) صوتی می‌شود. چنان‌چه در این شکل نشان داده شده است، افزایش ناهمگونی مقاومت‌ظاهری (امپدانس) صوتی، باعث بالا رفتن افت انتقال صدا در کل بازه بسامد می‌شود. ولی محل بسامد حلقوی و بسامد هم‌زمان تغییر نمی‌کند.



شکل ۵ نمودار هم‌گرایی برای پوسته اِف‌جی‌اِم در بسامد ۱ کیلوهرتز.



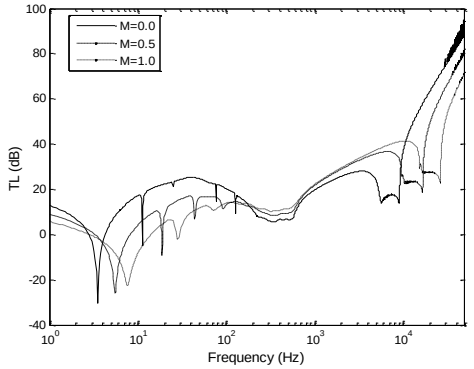
شکل ۶ اثر ارتفاع پروازی بر افت انتقال صدا پوسته اِف‌جی‌اِم.

جدول ۲ شرایط مختلف پروازی.

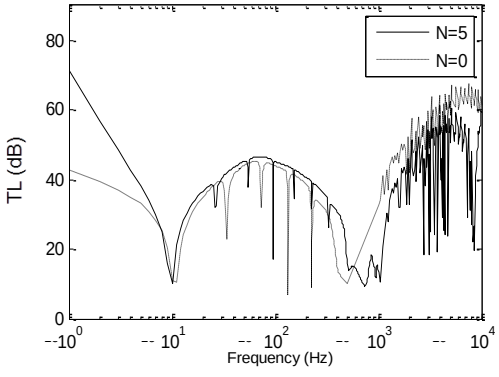
	شرایط اول	شرایط دوم	شرایط سوم
ارتفاع (ft)	۱۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۳۵۰۰۰
چگالی (kg/m^3)	۰٫۹۰۴۱	۰٫۵۴۸۹	۰٫۳۷۹۵
سرعت صدا (m/s)	۳۲۸٫۵۵۸	۳۰۹٫۹۶۶	۲۹۶٫۵۵۶

۳-۵. اثر سرعت هوای خارجی

جریان هوای خارجی می‌تواند بر روی عدد موج محوری و شعاعی اثر بگذارد. شکل ۸ تأثیر عددهای ماخ ۰ و ۰٫۲ و ۰٫۴ را بر روی تی‌اِل نشان می‌دهد. با افزایش عدد ماخ، مقدار افت انتقال صدا در ناحیه سفتی کنترل (پایین‌تر از بسامد حلقوی) مقداری کاهش یافته، در حالی‌که در بسامدهای بالا از بسامد حلقوی افزایش می‌یابد.



شکل ۷ اثر سرعت هوا بر افت انتقال صدا در پوسته اِف‌جی‌اِم برای اعداد ماخ صفر، ۰٫۵ و ۱.



شکل ۸ اثر نسبت حجمی بر افت انتقال صدا در پوسته اِف‌جی‌اِم.

۳-۶. اثر نسبت حجمی مواد اِف‌جی‌اِم

اثر نسبت حجمی بر افت انتقال صدا برای دو نسبت حجمی مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]

مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت حجمی، افت انتقال صدا در ناحیه سفتی کنترل کاهش می‌یابد، اما در بسامدهای بالاتر از بسامد حلقوی (ناحیه جرم کنترل)، افت انتقال صدا مربوط به نسبت حجمی بالاتر، بیش‌تر است.

۴. نتیجه‌گیری

۱. افت انتقال صدا به دست آمده از این تحقیق در حالت خاص با نتایج سایر محققان مقایسه شده که با هم هم‌خوانی بسیار خوبی دارند.

۲. با افزایش بسامد، تعداد مُدهای لازم برای هم‌گرایی نیز افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش عدد ماخ، مقدار افت انتقال در ناحیه سفتی کنترل (پایین‌تر از بسامد حلقوی) مقداری کاهش یافته، اما در بسامدهای بالاتر از بسامد حلقوی افزایش می‌یابد.

۴. با افزایش نسبت حجمی اِف‌جی‌اِم، افت انتقال صدا در ناحیه سفتی کنترل بیش‌تر شده، اما در بسامدهای بالاتر از بسامد حلقوی باعث افزایش افت انتقال صدا می‌گردد.

۵. فهرست منابع

[1] C.T. Loy, K.Y. Lam, J.N. Reddy, "Vibration of functionally graded cylindrical shells," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 41, pp. 309-324, 1999.

[2] B.P. Patel, S.S. Gupta, M.S. Loknath, C.P. Kadu, "Free vibration analysis of functionally graded elliptical cylindrical shells using higher-order theory," Composite Structures, vol. 69, pp. 259-270, 2005.

[3] P.W. Smith, "Sound transmission through thin cylindrical shells," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 29, pp. 721-729, 1957.

[4] P. White, "Sound transmission through a finite, closed, cylindrical shell," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 40, pp. 1124- 1130, 1966.

[5] L.R. Koval, "Sound transmission into a laminated composite cylindrical shell," Journal of Sound and Vibration, vol. 71, pp. 523-530, 1980.

[6] J.H. Lee, J. Kim, "Study on sound transmission characteristics of a cylindrical shell using analytical an experimental models," Applied Acoustics, vol. 64, pp. 611-632, 2003.

[7] K. Daneshjou, A. Nouri, R. Talebitooti, "Sound transmission through laminated composite cylindrical shells using analytical model," Archive of Applied Mechanics, vol. 77, pp. 363-379, 2007.

[8] K. Daneshjou, A. Nouri, R. Talebitooti, "Analytical model of sound transmission through orthotropic double-walled cylindrical shells," Transactions CSME Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 32, pp. 43-66, 2008.

[9] M.S. Qatu, "Vibration of Laminated Shells and Plates," Elsevier Academic Press, 2004.

[10] J.N. Reddy, "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, Theory and Analysis," CRC Press, second edition, 2004.

[11] A.W. Leissa, "Vibration of Shells," Scientific and Technical Information Center NASA, Washington D. C., 1973.

[12] M.S. Howe, "Acoustics of Fluid Structure Interaction," Cambridge University Press, 2000.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.1.4]