مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال۱۴۰۲/ دوره ۱۳/ شماره ۲/ صفحه ۴۱-۵۴

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/JSFM.2023.12649.3690

# بررسی انتقال صوت در پانل‌های مستطیلی مرکب تحت برخورد موج با دو زاویه‌ی مختلف

**فرزان صمدانی[۱]، سید روح الله کاظمی[۲،*]**

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

## چکیده

امروزه، پانل‌های ساخته شده از مواد مرکب به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند و مطالعه‌ی رفتار این پانل‌ها تحت ارتعاشات صوتی، یکی از موارد دارای اهمیت در تحلیل‌های مهندسی است. در این تحقیق عباراتی برای فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت در پانل‌های مستطیلی نازک و ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک با طول بی‌نهایت به روش تحلیلی استحصال شده است؛ همچنین اثرات زوایای برخورد، سمتی و عدد ماخ مورد بررسی قرار گرفته و فرکانس بحرانی و افت انتقال صوت محاسبه شده با تحقیقات دیگر اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های بحرانی و انطباقی و میزان افت انتقال صوت تحت تاثیر عواملی چون رفتار ارتوتروپیک پانل و ضخامت آن، زوایای برخورد و سمتی، عدد ماخ موج صوتی و انعطاف‌پذیری برشی عرضی قرار دارد. افزایش زوایای برخورد و سمتی موجب افزایش فرکانس بحرانی و افت انتقال صوت می‌شود در حالی که افزایش پارامتر ارتوتروپیک اثر معکوس دارد. از طرفی افزایش عدد ماخ و کاهش ضخامت پانل نیز موجب کاهش افت انتقال صوت و افزایش فرکانس بحرانی پانل می‌گردد و همچنین با افزایش انعطاف‌پذیری برشی عرضی پانل، فرکانس بحرانی پانل، افزایش می‌یابد. روند تغییرات فرکانس انطباقی نیز نسبت به پارامترهای موثر بجز زاویه برخورد، مشابه روند فرکانس بحرانی است. بدین صورت که مطابق نتایج ارایه شده فرکانس انطباقی پانل، بر خلاف فرکانس بحرانی، با افزایش زاویه برخورد، کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** افت انتقال صوت؛ فرکانس بحرانی؛ فرکانس انطباقی؛ زاویه برخورد؛ زاویه سمتی.

# Investigation of sound transmission in composite rectangular panels under the incidence wave with two various angles

**F. Samadani[1], S.R. Kazemi[2,*]**

[1] Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran

[2] Assist. Prof., Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran

## Abstract

Nowadays, composite panels are widely used in various industries, and the study of the behavior of these panels under acoustic vibrations is one of the important cases in engineering analysis. Also, the effects of incidence and azimuthal angles and Mach number are investigated and the calculated critical frequency and sound transmission loss are validated with other works. The results show that the critical and coincidence frequencies and sound transmission loss are influenced by factors such as the orthotropic behavior of the panel and its thickness, incidence and azimuthal angles, sound wave Mach number, and transverse shear flexibility. Increasing the incidence and azimuthal angles causes the enhancement of the critical frequency and sound transmission loss, while the orthotropic parameter has the opposite effect. On the other hand, increasing the Mach number and decreasing the thickness of the panel reduces the sound transmission loss and increases the critical frequency of the panel. Also, with the increase of the transverse shear flexibility of the panel, the critical frequency is increased. The procedure of coincidence frequency changes with respect to the effective parameters, except for the incidence angle, is also similar to the procedure of the critical frequency. This means that the coincidence frequency of the panel decreases with the increase of the incidence angle.

**Keywords:** Sound Transmission Loss; Critical Frequency; Coincidence Frequency; Incidence Angle; Azimuthal Angle.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۱۳۳۳۶۹۱۰۶۵؛ فکس: ۰۱۳۳۳۶۹۱۰۶۵

آدرس پست الکترونیک: kazemi@guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

هنگامی که یک پانل با طول بی‌نهایت تحریک صوتی می‌شود، فرکانسی که در آن سرعت صوت در هوا با سرعت موج خمشی آزاد برابر می‌شود، فرکانس بحرانی[1] نامیده می‌شود [۱]. فرکانس بحرانی به ویژه هنگامی اهمیت دارد که با تابش صوت از سازه‌ها سروکار داشته باشیم. خصوصیات تابش صوت به بالاتر یا پایین‌تر بودن فرکانس تحریک از فرکانس بحرانی بستگی دارد. همچنین راندمان تابش یک سازه در نزدیکی فرکانس بحرانی بسیار زیاد است. رفتار پانل‌های با طول محدود به همین ترتیب نشان داده می‌شود. هنگامی که یک سازه با تحریک صوتی تحریک می‌شود، فرکانسی که در آن سرعت موج خمشی آزاد با سرعت موج خمشی اجباری برابر می‌شود، فرکانس انطباقی[2] نامیده می‌شود [۱]. انتقال صوت در نزدیکی فرکانس انطباقی بسیار زیاد است. خصوصیات انتقال صوت به بالاتر یا پایین‌تر بودن فرکانس تحریک از فرکانس انطباقی بستگی دارد.  پاسخ ارتعاشی یک پانل به یک میدان صوتی طنین انداز در اطراف فرکانس بحرانی آن بیشتر است؛ بنابراین برای به دست آوردن پاسخ یک سازه به تحریک صوتی لازم است که فرکانس بحرانی آن به طور دقیق مشخص باشد. در صورت لزوم کاهش پاسخ، می‌توان از اطلاعات فرکانس بحرانی سازه در طراحی آن استفاده کرد. به عنوان مثال، سازه می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که فرکانس بحرانی فراتر از محدوده‌ی فرکانس‌هایی باشد که در آن‌ها تحریک صوتی بیشتر است؛ بنابراین دانستن اطلاعات در مورد فرکانس‌های بحرانی و انطباقی یک سازه برای مطالعه‌ی تعامل ساختاری-صوتی[3] آن ضروری است؛ همچنین لازم به ذکر است که این دو پارامتر به هم وابسته‌اند. فرکانس‌های بحرانی و انطباقی پانل‌های ایزوتروپیک نازک به طور مفصل در مقاله‌های [۱-۳] بحث شده است. بسیاری از اجزای سازه‌های هوافضایی دارای ساختار مرکب هستند. انتظار می‌رود در چنین کاربردهایی، انعطاف-پذیری برشی عرضی نقش مهمی در رفتار آنها در فرکانس‌های بالا داشته باشد و تئوری ورق ضخیم بیشتر مناسب خواهد بود.

فرکانس‌های بحرانی و انطباقی ورق‌های ضخیم فقط به میزان بسیار محدودی در مقاله‌های [۴-۶] بحث شده است. در مرجع [۴] اثر انعطاف‌پذیری برشی عرضی در بیان افت انتقال صوت[4] گنجانده شده است؛ اما یک عبارت برای فرکانس بحرانی با انعطاف‌پذیری برشی عرضی پیشنهاد نشده است. نارایانان وشنبگ [۵] در مورد فرکانس‌های انطباقی پانل‌های دارای انعطاف‌پذیری برشی عرضی بحث کرده‌اند؛ با این حال، عبارتی برای فرکانس انطباقی در یک فرم مناسب و قابل استفاده ارائه نشده است. از این رو، در شرایط عملی که در آن پاسخ پانل‌های مرکب برای تحریک صوتی با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی آماری[5] به دست می‌آیند، میانگین هندسی دو فرکانس بحرانی، یکی بر اساس خمش خالص کل پانل و دیگری بر اساس خمش خالص سطح ورق، استفاده می‌شود [۶]. در محاسبات بالا، انعطاف‌پذیری برشی هسته گنجانده نشده است. پانل‌هایی که در سازه‌های هوافضایی استفاده می‌شوند، بیشتر از نوع پانل‌های مرکب[6] هستند. اطلاعات در مورد فرکانس‌های بحرانی و انطباقی چنین پانل‌هایی که تحت تحریک صوتی قراردارند؛ برای درک بهتر رفتار آن‌ها لازم است. روال متعارف در چنین شرایطی تعریف دو فرکانس بحرانی [۲, ۴, ۷] در دو جهت اصلی مواد، با استفاده از دو مقدار سفتی خمشی ارتوتروپیک[7] است. میانگین هندسی این دو فرکانس به عنوان فرکانس بحرانی استفاده می‌شود [۷]. گویادر و لژیور [۸] به بحث افت انتقال صوت در پانل‌های ارتوتروپیک پرداخته‌اند، اما هیچ عبارتی برای فرکانس‌های بحرانی به دست نیاورده‌اند. رینجی و همکاران [۹] برای پانل‌های مرکب عبارت‌هایی برای فرکانس-های بحرانی و انطباقی به دست آورده‌اند، ولی در مورد افت انتقال صوت، اثرات زاویه سمتی[8] و عدد ماخ[9] در این پانل‌ها صحبتی نکرده‌اند. مواد ارتوتروپیک به دلیل داشتن نسبت سختی به وزن زیاد، کاربرد وسیعی در صنایع خودرویی، دریایی و هوافضایی داشته و همچنین نقش بسزایی در کاهش نویز ورودی به سیستم‌های مکانیکی دارند و استفاده از این مواد به عنوان روشی ساده و ارزان قیمت کاربرد وسیعی پیدا کرده است. به عنوان مثال، برای کنترل نویز ورودی به داخل کابین

[1] Critical Frequency
[2] Coincidence Frequency
[3] Structural–Acoustic
[4] Sound Transmission Loss (STL)
[5] SEA
[6] Composite Panels
[7] Orthotropic
[8] Azimuthal Angle
[9] Mach Number

هواپیما، از مواد مرکب به صورت گسترده‌ای در محفظه میانی پانل‌ها استفاده می‌گردد. از این رو، نیاز مبرم برای به دست آوردن یک عبارت برای فرکانس‌های بحرانی، انطباقی، افت انتقال صوت پانل‌ها با در نظر گرفتن رفتار ارتوتروپیک و انعطاف‌پذیری برشی عرضی و بررسی اثرات زاویه سمتی در کنار زاویه برخورد[1] و اثر عدد ماخ وجود دارد. انتقال صوت در مواد مختلف توسط محققین زیادی بررسی شده است. طالبی توتی و چودری خامنه [۱۰]، انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای ارتوتروپیک دو جداره را تحت برخورد موج با زوایای برخورد و سمتی بر پایه تئوری الاستیسیته سه‌بعدی، تحلیل کردند. جعفری و همکاران [۱۱]، انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی سه جداره در حضور جریان خارجی (عدد ماخ) را بررسی کردند. امیرنژاد و همکاران [۱۲]، انتقال صوت از یک ورق فوم پلیمری را با استفاده از مدل ریاضی برای مواد ویسکوالاستیک تابعی هدفمند[2] تحلیل کردند. در مقاله‌ی حاضر، با توجه به اهمیت آگاهی از فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت در پانل‌ها پیش از استفاده از آن‌ها در سازه‌ها، فرمول‌بندی جدیدی با در نظر گرفتن زوایای سمتی و برخورد و عدد ماخ برای پانل‌های نازک و ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک ارائه شده است و تأثیر رفتار ارتوتروپیک و انعطاف‌پذیری برشی عرضی و اثرات زوایای فوق و عدد ماخ بر روی فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت مورد بحث قرار گرفته است. عبارات به دست آمده با نمونه آزمایشگاهی و مقاله‌های دیگر اعتبارسنجی شده است.

## ۲- فرکانس‌های بحرانی و انطباقی موج صوتی در پانل‌ها

در این بخش روش اصلی بدست آوردن عبارات فرکانس بحرانی و انطباقی برای پانل نازک ایزوتروپیک به طور خلاصه مطرح شده است که مقدمه‌ای به منظور استحصال عبارات مذکور برای پانل نازک ارتوتروپیک و پانل‌های ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک که شامل اثرات برشی عرض هستند؛ فراهم می‌کند.

[1] Incidence Angle
[2] FGV

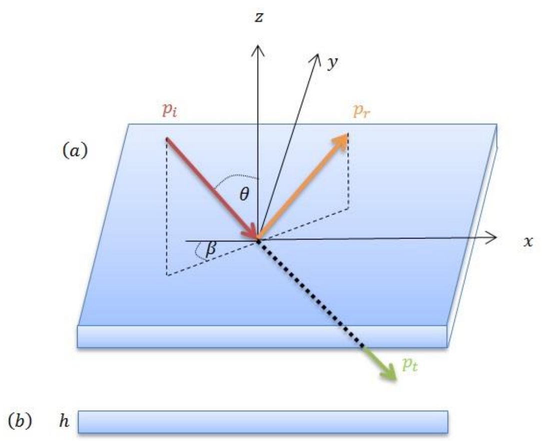
### ۲-۱- فرکانس‌های بحرانی و انطباقی موج صوتی در پانل‌های ایزوتروپیک

معادله‌ی حاکم بر ارتعاش اجباری یک پانل نازک ایزوتروپیک به صورت زیر است [۹]:

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\left(\frac{\rho}{D}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right)=\frac{q}{D} \qquad (۱)$$

که $\rho$، $D$ و $q$ به ترتیب چگالی، سفتی خمشی و بار خارجی وارد بر ورق است. موج صوت برخوردی به پانل مستطیلی و امواج صوت انعکاسی و انتقالی از آن در محور مختصات عمود بر هم در شکل ۱ نشان داده شده است. فرض می‌شود که پانل در صفحه‌ی $x-y$ باشد. لیستی از نمادهای استفاده شده در فهرست علایم آورده شده است. مساله‌ی پانل بی‌نهایت را می‌توان با قرار دادن $w$ به صورت زیر تحلیل کرد:

$$w=Ae^{i(\omega t-k_x x-k_y y)} \qquad (۲)$$




**شکل ۱- پانل مستطیلی مرکب: (الف) انتقال موج صوت از پانل و (ب) نمای جانبی**

که $k_x$ و $k_y$ اجزای عدد موج $k$ در جهت‌های $x$ و $y$، $A$ دامنه‌ی جابجایی و $\omega$ فرکانس زاویه‌ای است. عدد موج در ماده ایزوتروپیک مستقل از زاویه برخورد بوده و $k_x =$

$k_y = k\sin\gamma, k\cos\gamma$ و $k = \frac{\omega}{c}$ می‌باشند. $\gamma$ متفاوت از زاویه برخورد است $(0^0 \leq \gamma \leq 90^0)$ که در دستگاه مختصات قطبی[1] تعریف می‌شود [۹]. با قراردادن معادله‌ی (۲) در فرم آزاد معادله‌ی (۱) یعنی $q = 0$ به معادله مشخصه‌ی فرکانس دست خواهیم یافت:

$$\frac{\rho\omega^2}{D} = k^4 \quad (۳)$$

با استفاده از تعریف فرکانس بحرانی و حل معادله مشخصه‌ی فوق، فرکانس بحرانی $\omega_{cr}$ بر حسب رادیان بر ثانیه برای یک پانل نازک ایزوتروپیک بصورت زیر به دست می‌آید:

$$\omega_{cr}^2 = \frac{\rho c^4}{D} \quad (۴)$$

هنگامی که یک موج صوتی با زاویه برخورد $\theta$ به پانل برخورد می‌کند، یک موج موثر در پانل تولید می‌شود که موج $\lambda_{tr} = \frac{\lambda_i}{\sin\theta}$ اجباری[2] نامیده می‌شود. طول موج این موج اجباری برابر است که $\lambda_i$ طول موج برخورد است. سرعت این موج خمشی اجباری برابر $\frac{c}{\sin\theta}$ است [۱-۳]. انطباق زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت موج خمشی اجباری با سرعت موج خمشی آزاد برابر باشد، بنابراین فرکانس انطباقی $\omega_{co}$ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\omega_{co}^2 = \frac{\rho c^4}{D\sin^4\theta} \quad (۵)$$

با استفاده از معادله‌ی (۴)، فرکانس انطباقی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\omega_{co}^2 = \frac{\omega_{cr}^2}{\sin^4\theta} \quad (۶)$$

معادله‌ی (۶) نشان می‌دهد که فرکانس انطباقی با فرکانس بحرانی رابطه‌ی مستقیم دارد. در ادامه به بررسی پانل‌های ضخیم ایزوتروپیک پرداخته می‌شود. معادله‌ی حاکم بر ارتعاش اجباری این پانل‌ها بر اساس نظریه میندلین به صورت زیر است [۱۳، ۱۴]:

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \left(\frac{\rho}{D}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right) - \left(\frac{\rho}{N}\right)\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial t^2}\right) = \frac{q}{D} \quad (۷)$$

که $N$ سفتی برشی ورق و پارامتر $\frac{\rho c^2}{N}$ معرف انعطاف‌پذیری برشی است. این نظریه در نمایش تغییر شکل برشی در پانل-های مرکب دقیق‌تر است. یک پانل مستطیلی مرکب به ضخامت ورق $t$ و ضخامت هسته $h$ و سفتی برشی $N = Gh\left(1+\frac{t}{h}\right)^2$ را که $G$ مدول برشی هسته است، در نظر می-گیریم. با قراردادن معادله‌ی (۲) در فرم آزاد معادله‌ی (۷) یعنی $q = 0$ و با استفاده از فرآیند مشابه پانل نازک، عبارت فرکانس بحرانی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\omega_{cr}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D}}{\left(1-\frac{\rho c^2}{N}\right)} \quad (۸)$$

برای پانل نازک که $N$ خیلی بزرگ است، $\omega_{cr}^2 = \frac{\rho c^4}{D}$ می-شود که همان معادله‌ی (۴) است. به روشی مشابه که برای یک پانل نازک انجام شد، فرکانس انطباقی پانل ضخیم را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\omega_{co}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D\sin^4\theta}}{\left(1-\frac{\rho c^2}{N\sin^2\theta}\right)} \quad (۹)$$

از معادله‌ی (۹) می‌توان دریافت که در پانل ضخیم $\omega_{co}^2 = \frac{\omega_{cr}^2}{\sin^4\theta}$ نیست. برای پانل‌های نازک (مقادیر بالای $N$)، معادله‌ی (۹) به معادله‌ی (۵) تبدیل می‌شود.

## ۲-۲- فرکانس‌های بحرانی و انطباقی موج صوتی در پانل‌های ارتوتروپیک

معادله‌ی حاکم بر ارتعاش اجباری پانل‌های نازک ارتوتروپیک بدون در نظر گرفتن اثرات برشی عرضی به صورت زیر است [۱۵]:

$$\left(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 y^2} + D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \rho\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right) = q \quad (۱۰)$$

[1] Polar Coordinate System

[2] Forced Wave

عدد موج در ماده ارتوتروپیک وابسته به زاویه برخورد و سمتی می‌باشد؛ یعنی $k_x = k\cos\beta\sin\theta$ و $k_y = k\cos\theta$ که $(0^0 \le \theta \le 90^0)$ زاویه برخورد موج به پانل و $(0^0 \le \beta \le 360^0)$ زاویه سمتی موج (شکل ۱) می‌باشند. عدد موج در فرکانس $\omega$ بصورت $k = \frac{\omega}{c}\left(\frac{1}{1+M\cos\beta\sin\theta}\right)$ تعریف می‌شود که $c$ سرعت انتشار موج در هوا و $M$ عدد ماخ است [۱۲, ۱۶, ۱۷]. با قراردادن معادله‌ی (۲) در فرم آزاد معادله‌ی (۱۰) یعنی $q = 0$ به معادله مشخصه‌ی فرکانس دست خواهیم یافت.

$$\frac{\rho\omega^2}{k^4} = (D_{11}\cos^4\beta\sin^4\theta + 2(D_{12} + 2D_{66})\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta + D_{22}\cos^4\theta) \qquad (۱۱)$$

با تقسیم طرفین معادله‌ی بالا بر $\sqrt{D_{11}D_{22}}$ معادله‌ی (۱۱) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\rho\omega^2}{k^4\sqrt{D_{11}D_{22}}} = \left(\frac{D_{11}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}\cos^4\beta\sin^4\theta + \frac{2(D_{12}+2D_{66})}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{D_{22}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}\cos^4\theta\right) \qquad (۱۲)$$

که $\alpha = \frac{(D_{12}+2D_{66})}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}$، پارامتری است که خصوصیات ارتوتروپیک پانل را نشان می‌دهد. برای پانل ایزوتروپیک $\alpha = 1$ است. در بسیاری از واقیت‌های عملی $D_{11} = D_{22} = D$ است که این باعث ساده شدن معادله‌ی (۱۲) به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{\rho\omega^2}{k^4 D} = (\cos^4\beta\sin^4\theta + 2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta + \cos^4\theta) \qquad (۱۳)$$

که در این $\alpha = \frac{(D_{12}+2D_{66})}{D}$ حالت است. با قرار دادن $k = \frac{\omega}{c}\left(\frac{1}{1+M\cos\beta\sin\theta}\right)$ در معادله‌ی بالا و با استفاده از تعریف فرکانس بحرانی و حل معادله مشخصه‌ی فوق، عبارت فرکانس بحرانی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\omega_{cr}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D}}{\frac{(\cos^4\beta\sin^4\theta+2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta+\cos^4\theta)}{(1+M\cos\beta\sin\theta)^4}} \qquad (۱۴)$$

به روش مشابه پانل نازک ایزوتروپیک، فرکانس انطباقی پانل نازک مرکب را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\omega_{co}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D\sin^4\theta}}{\frac{(\cos^4\beta\sin^4\theta+2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta+\cos^4\theta)}{(1+M\cos\beta\sin\theta)^4}} \qquad (۱۵)$$

برای محاسبه فرکانس‌های بحرانی و انطباقی پانل‌های ضخیم مرکب اثرات برشی عرضی در این پانل‌ها در نظر گرفته می‌شود. اجزای ساختار بسیاری از فضاپیماها از این نوع سازه‌ها می‌باشند. در این حالت، از نظریه میندلین استفاده می‌شود. معادله‌ی حاکم بر ارتعاش اجباری چنین پانل‌هایی به صورت زیر است [۱۸]:

$$\left(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2} + D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \rho\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right) - \left(\frac{\rho}{N}\right)\left(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2} + D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^2\partial t^2}\right) = q \qquad (۱۶)$$

به روش مشابه پانل نازک مرکب، با قراردادن معادله‌ی (۲) در فرم آزاد معادله‌ی (۱۶) یعنی $q = 0$، به معادله مشخصه‌ی فرکانس دست خواهیم یافت.

$$\frac{\rho\omega^2}{Dk^4} = \frac{(\cos^4\beta\sin^4\theta+2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta+\cos^4\theta)}{\left(\frac{Dk^2(\cos^2\beta\sin^2\theta+\cos^2\theta)}{N}+1\right)} \qquad (۱۷)$$

با قرار دادن $k = \frac{\omega}{c}\left(\frac{1}{1+M\cos\beta\sin\theta}\right)$ در معادله‌ی بالا و با استفاده از تعریف فرکانس بحرانی و حل معادله مشخصه‌ی فوق، عبارت فرکانس بحرانی را نیز می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\omega_{cr}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D}}{\frac{(\psi-\phi)}{(1+M\cos\beta\sin\theta)^4}} \qquad (۱۸)$$

به روش مشابه پانل نازک مرکب، فرکانس انطباقی پانل ضخیم مرکب را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\omega_{co}^2 = \frac{\frac{\rho c^4}{D\sin^4\theta}}{\frac{\left(\psi-\frac{\phi}{\cos^2\beta\sin^2\theta}\right)}{(1+M\cos\beta\sin\theta)^4}} \qquad (۱۹)$$

$$\psi = (\cos^4\beta\sin^4\theta + 2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta + \cos^4\theta)$$
$$\phi = \frac{\rho c^2}{N}(\cos^2\beta\sin^2\theta + \cos^2\theta)(1 + M\cos\beta\sin\theta)^2$$

## ۳- افت انتقال صوت در پانل‌ها

در این بخش افت انتقال صوت در پانل‌ها تحلیل می‌شود. بحث زیر مربوط به مواردی است که $\lambda_{tr} \ll h$ باشد. امواج فشاری هارمونیکی برخوردی، انعکاسی و انتقالی در دستگاه مختصات عمود بر هم به صورت رابطه‌ی (۲۰) بیان می‌گردند [۱۹, ۲۰]:

$$p_i(x,y,t) = P_i e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} \quad (۲۰)$$
$$p_r(x,y,t) = P_r e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)}$$
$$p_t(x,y,t) = P_t e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)}$$

که $P_i$، $P_r$ و $P_t$ به ترتیب دامنه‌ی فشار امواج برخوردی، انعکاسی و انتقالی است. برای به دست آوردن افت انتقال صوت در پانل، دو شرط مرزی یعنی شرط اول: برابر بودن جمع جبری نیروهای وارد بر پانل با نیروی خارجی وارد بر پانل در معادله‌ی ارتعاش اجباری پانل و شرط دوم: برابر بودن سرعت عمودی صوت در دوطرف پانل، باید رعایت شود [۱].
از شرط اول رابطه‌ی (۲۱) به دست می‌آید:

$$q = (p_i + p_r) - p_t \quad (۲۱)$$

از شرط دوم رابطه‌ی (۲۲) به دست می‌آید:

$$\frac{p_i(0,y,t)}{\rho c} - \frac{p_r(0,y,t)}{\rho c} = \frac{p_t(0,y,t)}{\rho c} \quad (۲۲)$$

با قرار دادن رابطه‌ی (۲۰) در (۲۲)، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P_i - P_r = P_t \quad (۲۳)$$

ضریب انتقال توان صوتی $\tau$ به صورت نسبت توان موج صوتی انتقالی به توان موج صوتی برخوردی در واحد سطح پانل‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲, ۱۶, ۱۷]:

$$\tau = \left|\frac{P_t}{P_i}\right|^2 \quad (۲۴)$$
$$\tau = (1 + M\cos\beta\sin\theta)^2\left|\frac{P_t}{P_i}\right|^2 \quad (۲۵)$$

در معادله (۲۵) به وضوح دیده می‌شود که در پانل‌های ارتوتروپیک، $\tau$ تابعی از زوایای برخورد و سمتی بوده و به عدد ماخ بستگی دارد. در نهایت، افت انتقال صوت در یک پانل در مقیاس لگاریتمی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۱۲, ۲۱, ۲۲]:

$$STL = -10\log\tau \quad (۲۶)$$

### ۳-۱- افت انتقال صوت در پانل‌های ایزوتروپیک

برای محاسبه افت انتقال صوت در پانل نازک ایزوتروپیک، با قراردادن معادله‌های (۲) و (۲۱) در معادله‌ی (۱) و با در نظر گرفتن معادله‌ی (۲۳)، یک دستگاه معادله‌ها بر حسب $A$، $P_r$، $P_i$ و $P_t$ به دست می‌آید که با حذف $P_r$ و $A$ در بین معادله‌ها، به جواب بی‌بعد زیر می‌رسیم:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1 + \eta\frac{D}{2}\left[k^4 - \frac{\rho\omega^2}{D}\right] \quad (۲۷)$$

که $\eta = \frac{A}{P_t}$ یک عبارت بی‌بعد است. با قرار دادن عبارت (۲۷) در معادله‌های (۲۶) و (۲۴)، عبارت افت انتقال صوت در پانل نازک ایزوتروپیک به صورت زیر به دست می‌آید:

$$STL = -10\log\left|\frac{1}{1+\eta\frac{D}{2}\left[k^4 - \frac{\rho\omega^2}{D}\right]}\right|^2 \quad (۲۸)$$

جواب بی‌بعد (۲۹) برای پانل ضخیم ایزوتروپیک، با جایگذاری معادله‌های (۲) و (۲۱) در معادله‌ی (۷) و با توجه به معادله‌ی (۲۳) و حذف $P_r$ و $A$ از دستگاه معادله‌ها، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1 + \eta\frac{D}{2}\left[k^4 - \rho\omega^2\left(\frac{1}{D} + \frac{k^2}{N}\right)\right] \quad (۲۹)$$

که این جواب بی‌بعد برای پانل‌های نازک ایزوتروپیک (مقادیر بالای $N$)، به جواب بی‌بعد (۲۷) تبدیل می‌شود. افت انتقال صوت در پانل ضخیم ایزوتروپیک، با قرار دادن عبارت

(۲۹) در معادله‌های (۲۴) و (۲۶)، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$STL = -10\log\left|\frac{1}{1+\eta\frac{D}{2}\left[k^4-\rho\omega^2\left(\frac{1}{D}+\frac{k^2}{N}\right)\right]}\right|^2 \qquad (۳۰)$$

### ۳-۲- افت انتقال صوت در پانل‌های ارتوتروپیک

برای محاسبه افت انتقال صوت در پانل نازک مرکب، با جایگذاری معادله‌های (۲) و (۲۱) در معادله‌ی (۱۰) و با توجه به معادله‌ی (۲۳)، یک دستگاه معادله‌ها بر حسب $A$، $P_i$، $P_r$ و $P_t$ حاصل می‌شود که با حذف $P_r$ و $A$ در بین معادله‌ها، جواب بی‌بعد زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1+\eta\frac{D}{2}\left[{k_x}^4+{k_y}^4+2\alpha {k_x}^2{k_y}^2-\frac{\rho\omega^2}{D}\right] \qquad (۳۱)$$

که با قرار دادن عبارت (۳۱) در معادله‌های (۲۵) و (۲۶)، افت انتقال صوت در پانل‌های نازک مرکب به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$STL = -10\log(1+M\cos\beta\sin\theta)^2\left|\frac{1}{1+\eta\frac{D}{2}\left(\Pi-\frac{\rho\omega^2}{D}\right)}\right|^2 \qquad (۳۲)$$
$$\Pi = {k_x}^4+{k_y}^4+2\alpha{k_x}^2{k_y}^2$$

برای پانل‌های ضخیم مرکب نیز، با قراردادن معادله‌های (۲) و (۲۱) در معادله‌ی (۱۶) و با در نظر گرفتن معادله‌ی (۲۳)، یک دستگاه معادله‌ها بر حسب $A$، $P_i$، $P_r$ و $P_t$ به دست می‌آید که با حذف $P_r$ و $A$ در بین معادله‌ها، به جواب بی‌بعد زیر می‌رسیم:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1+\eta\frac{D}{2}\left[{k_x}^4+{k_y}^4+2\alpha{k_x}^2{k_y}^2-\rho\omega^2\left(\frac{1}{D}+\frac{({k_x}^2+{k_y}^2)}{N}\right)\right] \qquad (۳۳)$$

برای حالتی که پانل‌های مرکب، نازک باشند، معادله‌ی (۳۳) به معادله‌ی (۳۱) تبدیل می‌شود. با قرار دادن عبارت (۳۳) در معادله‌های (۲۵) و (۲۶)، افت انتقال صوت در پانل‌های ضخیم مرکب به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$STL = -10\log\Theta\left|\frac{1}{1+\eta\frac{D}{2}(\Pi-\rho\omega^2 \mathrm{E})}\right|^2$$
$$\Theta = (1+M\cos\beta\sin\theta)^2 \qquad (۳۴)$$
$$\Pi = {k_x}^4+{k_y}^4+2\alpha{k_x}^2{k_y}^2$$
$$\mathrm{E} = \frac{1}{D}+\frac{{k_x}^2+{k_y}^2}{N}$$

## ۴- نتایج و بحث

در پانل ایزوتروپیک ($N$ خیلی زیاد و $\alpha = 1$) فرکانس بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت پانل مستقل از زاویه برخورد، سمتی و سرعت سیال خارجی است، ولی در پانل ارتوتروپیک پارامترهای انتقال صوت مستقل از موارد فوق نمی‌باشند. در این بخش، رابطه‌ی به دست آمده با مطالعه‌ی رفتار ارتعاش-صوت یک پانل مرکب دو لایه CFRP (0,90) که خواص فیزیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است، اعتبارسنجی می‌شود.

جدول۱- خواص فیزیکی پانل مرکب [۹, ۱۵]

| علائم | توضیحات | مقدار |
|---|---|---|
| $a$ | طول پانل (m) | ۲,۱۵ |
| $b$ | عرض پانل (m) | ۱,۸۰ |
| $S$ | سطح مقطع پانل ($m^2$) | ۳,۸۷ |
| $m$ | جرم پانل (kg) | ۱۰,۹۱۸ |
| $h$ | ضخامت هسته (mm) | ۱۸ |
| $t$ | ضخامت ورق (mm) | ۰,۲ |
| $E$ | مدول یانگ (GPa) | ۱۳۵ |
| $G$ | مدول برشی(MPa) | ۸۱,۵۸ |
| $N$ | سفتی برشی ($\frac{MN}{m}$) | ۱,۵۰۱ |
| $D_{11}$ | سفتی خمشی (Nm) | ۵۱۳۵,۲۷ |
| $D_{22}$ | سفتی خمشی (Nm) | ۵۰۲۸,۰۲ |
| $D_{12}$ | سفتی خمشی (Nm) | ۶۹,۷۴ |
| $D_{66}$ | سفتی خمشی (Nm) | ۱۶۵,۶۳ |
| $\vartheta$ | ضریب پواسون | ۰,۳۴۶ |

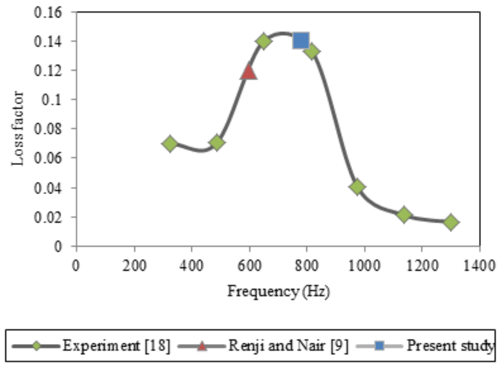
جدول ۲ مقایسه فرکانس بحرانی محاسبه شده به روش تحلیلی در نرم افزار میپل بر حسب هرتز را با نتایج مطالعه [۹] و نتایج نمونه آزمایشگاهی [۱۸] نشان می‌دهد. یکی از علل اختلاف نتایج مطالعه حاضر در جدول ۲ برای نمونه اورتوتروپیک نازک و ضخیم با نتایج مرجع [۹] می‌تواند این باشد که فرکانس بحرانی پانل‌ها در آن مرجع به صورت تخمینی (از روش تعادل انرژی و با استفاده از ضریب افت،

چگالی مودال و میانگین مقدار مربع نیروی تحریک) به دست آمده است.

**جدول۲- ارزیابی فرکانس‌های بحرانی پانل‌های مستطیلی**

| نوع پانل | مطالعه حاضر | مدل [۹] | نمونه [۱۸] |
|---|---|---|---|
| ایزوتروپیک نازک | ۴۴۱,۲ | ۴۴۱ | - |
| ایزوتروپیک ضخیم | ۴۹۹,۹ | ۵۰۰ | - |
| ارتوتروپیک نازک | ۶۰۰,۴ | ۵۰۳ | - |
| ارتوتروپیک ضخیم | ۷۸۱,۳ | ۵۹۵ | ۸۱۴-۶۵۱ |

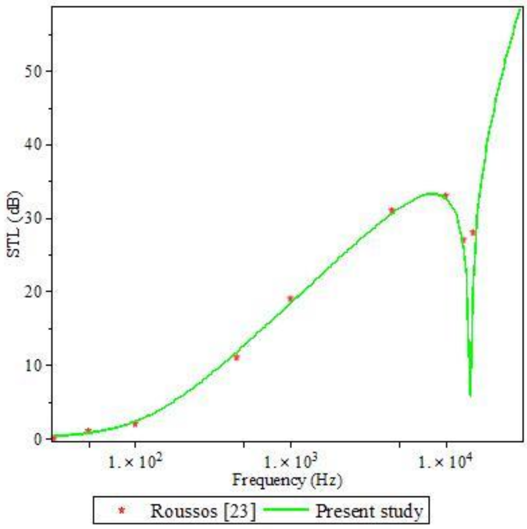
در شکل (۲) فرکانس بحرانی به دست آمده از رابطه‌ی (۲۲) با نتایج سایر محققین مقایسه‌ی شده است. در این شکل ضریب افت[1] نسبت به فرکانس‌های مختلف و به صورت تصادفی با استفاده از چگالی مودال[2] به دست آمده از نتیجه آزمایشگاهی رسم شده است. همانگونه که از شکل مشاهده می‌شود؛ فرکانس بحرانی به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر در مقایسه با مدل مرجع [۹] به نتیجه آزمایشگاهی [۱۸] نزدیکتر است.



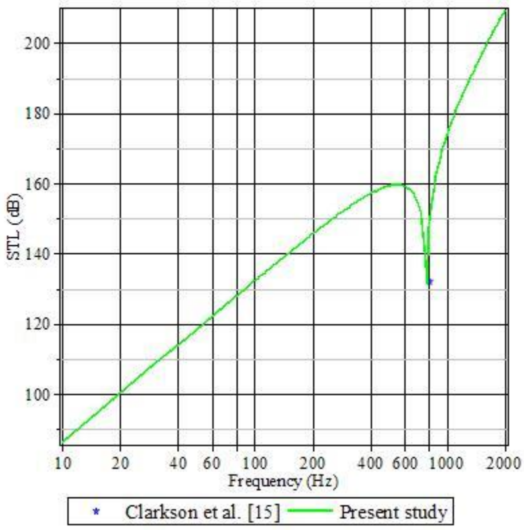

**شکل ۲- مقایسه‌ی فرکانس بحرانی مطالعه‌ی حاضر با مراجع [۹] و [۱۸]**

شکل (۳) مقایسه افت انتقال صوت در پانل نازک ایزوتروپیک به دست آمده از رابطه‌ی (۳۲) را با نتایج مرجع [۲۳] با فرض $M = 0$، $\beta = 0^0$، $\theta = 60^0$ و $h = 0.00081\ (m)$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود؛ افت انتقال صوت به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر با مدل مرجع [۲۳] مطابقت خوبی دارد.

نمودار افت انتقال صوت در پانل مرکب که با استفاده رابطه‌ی (۳۴) به دست آمده در شکل (۴) با فرض $M = 0$، $\beta = 0^0$ و $\theta = 45^0$ رسم شده است تا فرکانس بحرانی آن با نتیجه مرجع [۱۵] مقایسه شود. همانگونه که دیده می‌شود، فرکانس بحرانی به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر به مدل مرجع [۱۵] بسیار نزدیک است.




**شکل ۳- مقایسه‌ی** افت انتقال صوت پانل نازک ایزوتروپیک **با مرجع** [۲۳]

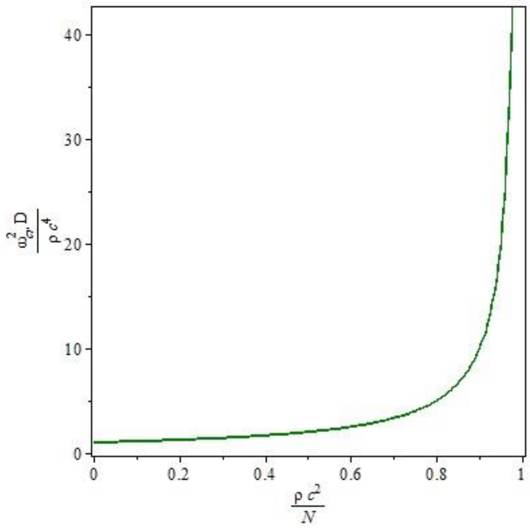



**شکل ۴- مقایسه‌ی فرکانس بحرانی پانل ضخیم ارتوتروپیک با مرجع [۱۵]**

[1] Loss Factor

[2] Modal Density

شکل (۵) تاثیر انعطاف‌پذیری برشی عرضی در پانل‌های ضخیم را با فرض $\alpha = 1$، $M = 0$ و$\beta = 0^0$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر انعطاف‌پذیری برشی عرضی پانل، فرکانس بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

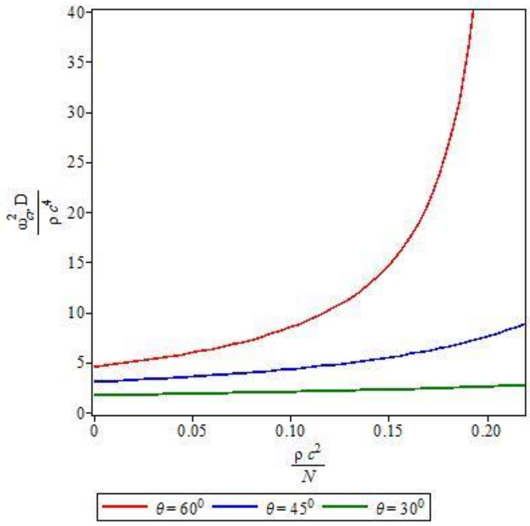



**شکل ۵- تأثیر انعطاف پذیری برشی عرضی بر روی فرکانس بحرانی پانل**

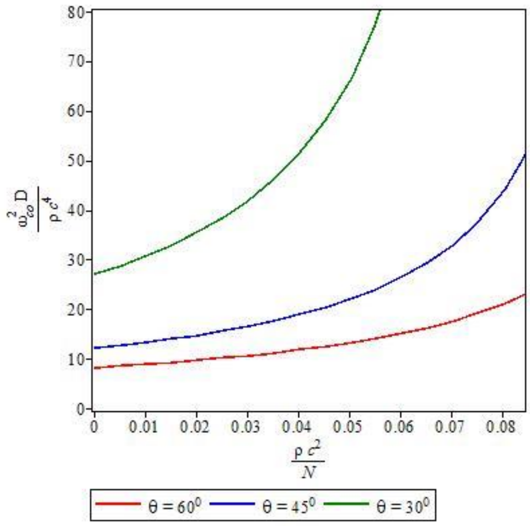
اثرات زوایای برخورد و سمتی بر روی فرکانس‌های بحرانی و انطباقی پانل مرکب را با فرض $\alpha = 0.08$، $M = 0$ می‌توان در شکل‌های ۶ الف و ب و ۷ مشاهده کرد. در شکل ۶ الف و ب، $\beta = 45^0$ و در شکل ۷، $\theta = 45^0$ در نظر گرفته شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در محدوده‌ی نشان داده شده، فرکانس بحرانی پانل با افزایش زاویه برخورد و سمتی، افزایش می‌یابد و فرکانس انطباقی پانل با افزایش زاویه برخورد، کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که انطباق زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه زیر برقرار شود:

$$\frac{\rho c^2}{N} < \frac{(\cos^4\beta\sin^4\theta + 2\alpha\cos^2\beta\sin^2\theta\cos^2\theta + \cos^4\theta)}{(\cos^2\beta\sin^2\theta + \cos^2\theta)(1 + M\cos\beta\sin\theta)^2}$$

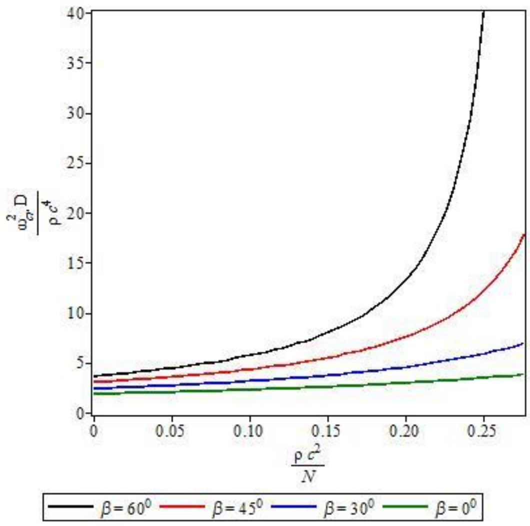
شکل ۸ تأثیر عدد ماخ، بر روی فرکانس بحرانی پانل مرکب را با فرض $\alpha = 0.08$،$\beta = 45^0$ و$\theta = 45^0$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در بازه‌ی رسم شده، فرکانس بحرانی پانل با افزایش عدد ماخ، افزایش می‌یابد.



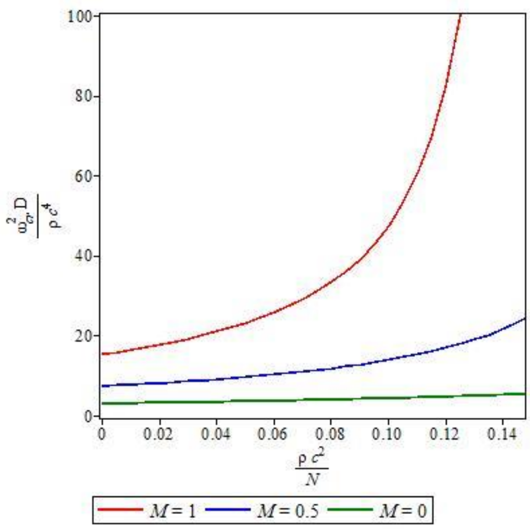

**شکل ۶ الف- تأثیر زاویه برخورد بر روی فرکانس بحرانی پانل مرکب**




**شکل ۶ ب- تأثیر زاویه برخورد بر روی فرکانس انطباقی پانل مرکب**

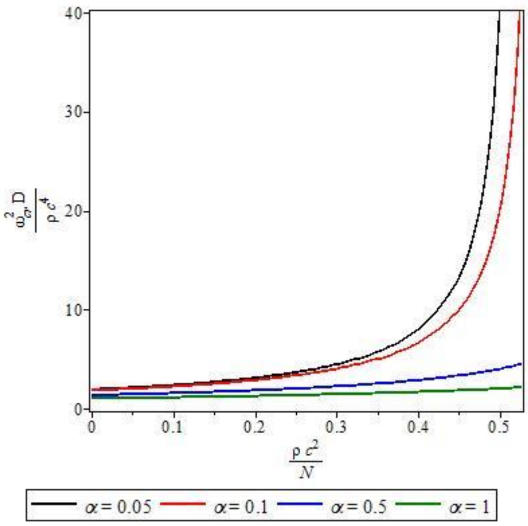



شکل ۷- تأثیر زاویه سمتی بر روی فرکانس بحرانی پانل مرکب



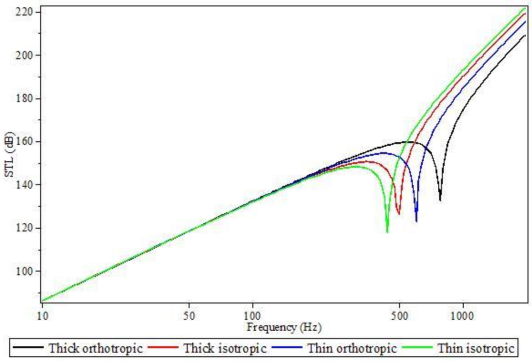

شکل ۸- تأثیر عدد ماخ بر روی فرکانس بحرانی پانل مرکب

تأثیر پارامتر ارتوتروپیک، بر روی فرکانس بحرانی پانل مرکب را با فرض $M = 0$، $\beta = 0^0$ و $\theta = 45^0$ می‌توان در شکل ۹ مشاهده کرد. ملاحظه می‌شود که در محدوده‌ی نشان داده شده، فرکانس بحرانی پانل با افزایش پارامتر ارتوتروپیک، کاهش می‌یابد.



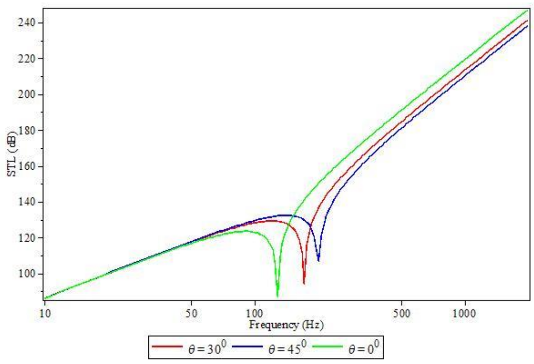

شکل ۹- تاثیر پارامتر ارتوتروپیک در فرکانس بحرانی پانل مرکب

در شکل ۱۰، فرکانس‌های بحرانی و افت انتقال صوت در پانل‌های نازک و ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک با فرض $M = 0$، $\alpha = 0.08$، $\beta = 0^0$ و $\theta = 45^0$ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل می‌توان دریافت؛ با افزایش فرکانس، افت انتقال صوت در پانل‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک افزایش می‌یابد. فرکانس بحرانی پانل‌ها که با جایگذاری خواص فیزیکی در عبارت استحصال شده برای فرکانس بحرانی آن‌ها به دست آمده‌اند؛ در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شوند. فرکانس بحرانی و افت انتقال صوت در پانل‌های ضخیم ارتوتروپیک بیشتر از موارد مشابه نازک ارتوتروپیک، نازک ایزوتروپیک و ضخیم ایزوتروپیک است. در پانل‌های ضخیم ارتوتروپیک، بدلیل تاثیر پارامترهای ارتوتروپیک و انعطاف‌پذیری برشی عرضی، انتقال صوت از سیستم نسبت به مدل‌سازی ارتوتروپیک نازک یا ایزوتروپیک ضخیم کمتر است.

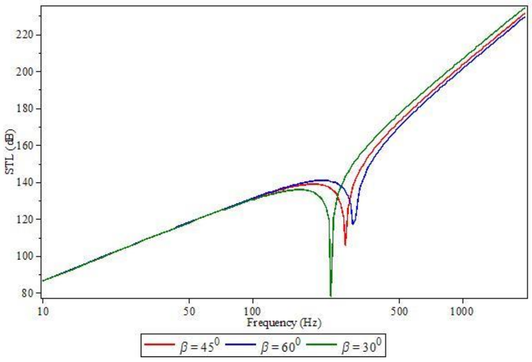



**شکل ۱۰- افت انتقال صوت در پانل‌های نازک و ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک**

اثرات زوایای برخورد و سمتی بر روی افت انتقال صوت پانل مرکب در بازه‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۵۰۰ هرتز با فرض $\alpha = 0.08$ و $M = 0.5$ را می‌توان برای مقادیر مختلف $\theta$ و $\beta = 45^0$ در شکل ۱۱ و برای مقادیر مختلف $\beta$ و $\theta = 45^0$ در شکل ۱۲ مشاهده کرد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که افت انتقال صوت و فرکانس بحرانی پانل با افزایش زاویه برخورد و سمتی، در این بازه‌ی فرکانسی افزایش می‌یابد. امواج صوتی با زوایای برخورد بزرگتر در مقایسه با امواج صوتی با زوایای برخورد کوچکتر، کمتر از سازه عبور می‌کنند و افت انتقال صوت در پانل افزایش می‌یابد.



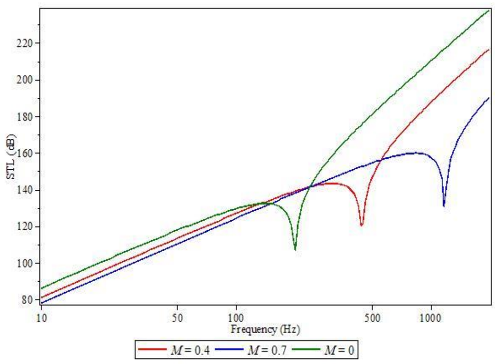

**شکل ۱۱- تأثیر زاویه برخورد بر روی افت انتقال صوت پانل مرکب**



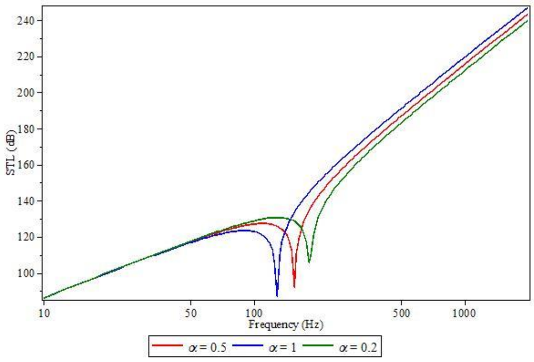

**شکل ۱۲- تأثیر زاویه سمتی بر روی افت انتقال صوت پانل مرکب**

شکل ۱۳، تاثیر میزان عدد ماخ بر افت انتقال صوت پانل‌های مرکب را نشان می‌دهد. در بررسی صورت گرفته در شکل ۱۳، میزان افت انتقال صوت با در نظر گرفتن عدد ماخ به میزان ۰، ۰،۴، ۰،۷ و با فرض $\alpha = 0.08$، $\beta = 0^0$ و $\theta = 45^0$ مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. همانگونه که شکل ۱۳ نشان می‌دهد؛ افزایش عدد ماخ باعث افزایش فرکانس بحرانی و کاهش افت انتقال صوت در بازه‌ی فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز و افزایش افت انتقال صوت در بازه‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز در پانل می‌شود. جریان سیال خارجی یک بار اضافی را به پانل اعمال می‌کند و باعث افزایش ضریب انتقال توان صوتی می‌شود، در نتیجه مقدار افت انتقال صوت از پانل کاهش می‌یابد.

تأثیر پارامتر ارتوتروپیک، بر روی افت انتقال صوت پانل مرکب را با فرض $M = 0$، $\beta = 0^0$ و $\theta = 45^0$ می‌توان در شکل ۱۴ مشاهده کرد. افت انتقال صوت و فرکانس بحرانی پانل با افزایش $\alpha$، کاهش می‌یابد.

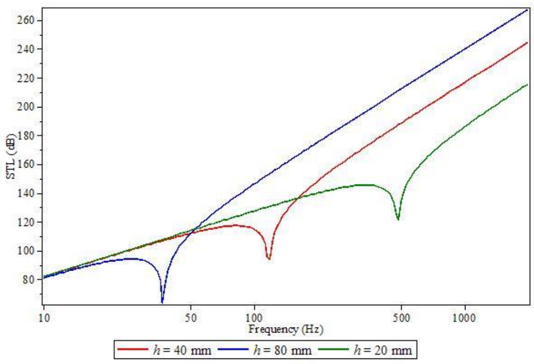



**شکل ۱۳- تأثیر عدد ماخ بر روی افت انتقال صوت پانل مرکب**




**شکل ۱۴- تاثیر پارامتر ارتوتروپیک در افت انتقال صوت پانل مرکب**

در شکل ۱۵ تأثیر ضخامت پانل، بر روی افت انتقال صوت در آن با فرض $M = 0.5$، $\alpha = 0.08$، $\beta = 45^0$ و $\theta = 45^0$ دیده می‌شود. همانطور که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت پانل، افت انتقال صوت افزایش و فرکانس بحرانی پانل کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت پانل، توان موج صوت انتقالی از آن کاهش می‌یابد، در نتیجه مقدار افت انتقال صوت از پانل افزایش می‌یابد. در ضمن با افزایش ضخامت پانل، سفتی آن افزایش می‌یابد و منجر به کاهش فرکانس بحرانی پانل می‌شود.




**شکل ۱۵**- تأثیر ضخامت هسته پانل مرکب بر روی افت انتقال صوت

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با توجه به اهمیت آگاهی از فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت در پانل‌ها پیش از استفاده از آن‌ها در سازه‌ها، با در نظر گرفتن زوایای سمتی، برخورد، عدد ماخ و با استفاده از تعریف فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و حل معادله مشخصه‌ی آن‌ها به روش تحلیلی، روابطی جهت پیش‌بینی فرکانس‌های بحرانی، انطباقی و افت انتقال صوت در پانل‌های نازک و ضخیم ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، استحصال شده است. از مقایسه نتایج و روابط مطالعه‌ی حاضر با نتایج مدل‌های دیگر، می‌توان نتیجه گرفت با ضخیم شدن پانل تا جایی که محدودیت وزن در طراحی اجازه دهد، موج صوت برخوردی نمی‌تواند به پانل نفوذ کند و توان موج صوت انتقالی از آن کاهش می‌یابد، در نتیجه مقدار افت انتقال صوت از پانل افزایش می‌یابد. در ضمن با افزایش ضخامت پانل، جرم، چگالی سطحی و سفتی آن افزایش می‌یابد و منجر به کاهش فرکانس بحرانی پانل می‌شود. بنابراین از لحاظ تئوری، اگر پانل مرکب، ماده ارتوتروپیک ضخیم در نظر گرفته شده و از مدل ورق میندلین استفاده شود، عایق‌بندی صوتی بیشتری نسبت به مدل‌سازی ارتوتروپیک نازک یا ایزوتروپیک ضخیم مشاهده خواهد شد؛ همچنین ملاحظه شد که وجود جریان سیال خارجی باعث افزایش ضریب انتقال توان صوتی می‌شود، در نتیجه مقدار افت انتقال صوت از پانل کاهش می‌یابد. در ضمن با افزایش عدد ماخ فرکانس بحرانی پانل افزایش می‌یابد. با افزایش زوایای برخورد و سمتی، عدد موج کاهش می‌یابد که منجر به افزایش افت انتقال صوت در پانل و افزایش فرکانس بحرانی آن می‌شود و این نشان می‌دهد که امواج صوتی با زوایای برخورد بزرگتر در مقایسه با امواج صوتی با زوایای برخورد کوچکتر، کمتر از سازه عبور می‌کنند. پارامترهای ارتوتروپیک و انعطاف‌پذیری برشی عرضی نیز تاثیر قابل توجهی بر انتقال صوت از پانل و فرکانس بحرانی آن دارند. به طوری که با افزایش پارامتر ارتوتروپیک، افت انتقال صوت در پانل و فرکانس بحرانی آن کاهش می‌یابد، ولی فرکانس بحرانی پانل، با افزایش پارامتر انعطاف‌پذیری برشی عرضی پانل، افزایش می‌یابد. روند تغییرات فرکانس انطباقی نیز نسبت به پارامترهای موثر بجز زاویه برخورد، مشابه روند فرکانس بحرانی است. بدین صورت که مطابق نتایج ارایه شده فرکانس انطباقی پانل، بر خلاف فرکانس بحرانی، با افزایش زاویه برخورد، کاهش می‌یابد.

## ۶- علایم

| | |
|---|---|
| $h$ | ضخامت هسته (m) |
| $t$ | ضخامت ورق (m) |
| $E$ | مدول یانگ (GPa) |

| | |
|---|---|
| $G$ | مدول برشی (GPa) |
| $c$ | سرعت صوت در هوا $\left(\frac{m}{s}\right)$ |
| $N$ | سفتی برشی $\left(\frac{N}{m}\right)$ |
| $D$ | سفتی خمشی (N m) |
| $M$ | عدد ماخ |
| $STL$ | افت انتقال صوت (dB) |
| $f$ | فرکانس (Hz) |
| $A$ | دامنه جابجایی |
| $k$ | عدد موج |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | پارامتر اثر ارتوتروپیک |
| $\beta$ | زاویه سمتی |
| $\theta$ | زاویه برخورد |
| $\vartheta$ | ضریب پوآسون |
| $\omega$ | فرکانس زاویه‌ای $\left(\frac{rad}{s}\right)$ |
| $\tau$ | ضریب انتقال توان صوتی |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| $i$ | برخوردی |
| $t$ | انتقالی |
| $r$ | انعکاسی |
| $cr$ | بحرانی |
| $co$ | انطباقی |
| $tr$ | موثر |

## ۷- مراجع


[1] Reynolds DD (1981) Engineering Principles of Acoustics Noise and Vibration. Boston, MA. Allyn & Bacon.

[2] Cremer L, Heckl M (2013) Structure-borne sound structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. Springer Science & Business Media.

[3] Norton MP, Karczub DG (2003) Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. Cambridge university press.

[4] Heckl M (1981) The tenth Sir Richard Fairey memorial lecture. Sound transmission in buildings. J. Sound Vib. 77(2): 165-189.

[5] Narayanan S, Shanbhag R (1982) Sound transmission through a damped sandwich panel. J. Sound Vib. 80(3): 315-327.

[6] Eaton D (1987) ESA PSS-03-1201 Issue 1. Structural acoustic design manual.

[7] Beranek L (1971) Noise and vibration control (Papers on noise and vibration control covering acoustics in free space, outdoors, small enclosures and rooms, measurement, analysis and design problems).

[8] Guyader J, Lesueur C (1978) Acoustic transmission through orthotropic multilayered plates, part II: transmission loss. J. Sound Vib.58(1): 69-86.

[9] Renji K, Nair P, Narayanan S (1997) Critical and coincidence frequencies of flat panels. J. Sound Vib.205(1): 19-32.

[10] Talebi Tooti R, Choudari Khameneh AM (2016) Sound transmission across double-walled orthotropic cylindrical shells under incidence wave with two various angles based on the three-dimensional elasticity theory. Mod. Mech. Eng. 16(9): 1-11.

[11] Jafari AA, Golzari M, and Jafari MS (2017) Sound transmission loss through triple-walled sandwich cylindrical shells in the presence of external flow. Mod. Mech. Eng. 17(10): 439-450.

[12] Amirinezhad H, Tarkashvand A, Talebi Tooti R (2020) Acoustic wave transmission through a polymeric foam plate using the mathematical model of functionally graded viscoelastic (FGV) material. Thin-Walled Struct. 148: 106466.

[13] Frampton KD (2005) The effect of flow-induced coupling on sound radiation from convected fluid loaded plates. J. Acoust. Soc. Am. 117(3): 1129-1137.

[14] Xin F, Lu T (2010) Analytical modeling of sound transmission across finite aeroelastic panels in convected fluids. J. Acoust. Soc. Am. 128(3): 1097-1107.

[15] Clarkson B, Pope R (1981) Experimental determination of modal densities and loss factors of flat plates and cylinders. J. Sound Vib. 77(4): 535-549.

[16] Renji K, Nair P, Narayanan S (1996) Modal density of spacecraft structural elements. J. Spacecr. Technol. 6(2): 40-48.

[17] Jones RM (1998) Mechanics of composite materials. CRC press.

[18] Renji K, Nair P, Narayanan S (1996) Modal density of composite honeycomb sandwich panels. J. Sound Vib.195(5): 687-699.

[19] Ghinet S, Atalla N, Osman H (2006) Diffuse field transmission into infinite sandwich composite and laminate composite cylinders. J. Sound Vib. 289(4-5): 745-778.

[20] Liu Y, He C (2015) On sound transmission through double-walled cylindrical shells lined with poroelastic material: comparison with Zhou's results and further effect of external mean flow. J. Sound Vib. 358: 192-198.

[21] Talebitooti R, Zarastvand M, Sharif Rouhani AH (2019), Investigating hyperbolic shear deformation theory on vibroacoustic behavior of the infinite functionally graded thick plate. Lat. Am. J. Solids Struct. 16.

[22] Ghafouri M, Ghassabi M, Zarastvand M.R, Talebitooti R (2022) Sound propagation of three-dimensional sandwich panels: influence of three-dimensional re-entrant auxetic core. AIAA J. 60(11): 6374-6384.

[23] Roussos LA, (1985) Noise transmission loss of a rectangular plate in an infinite baffle, NASA TR 2398, Washington, DC.