

تحلیل صوتی پوسته محافظ سونار به روش تحلیل انرژی آماری

محمدصادق ابراهیمی^۱، عبدالرضا کبیری عطاآبادی^{۲*}، مهدی دادخواه^۳

msebrahimi69@yahoo.com

a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

mdadkxah7@gmail.com

^۱ کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^{۲*} استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۶

چکیده

روش انرژی آماری با توجه به محدودیت‌های سایر روش‌های تحلیلی از قبیل المان محدود و المان مرزی در تحلیل‌های صوتی و ارتعاشی مدل‌های مهندسی در فرکانس‌های بالا، به‌عنوان روشی مناسب در این تحلیل‌ها به کار گرفته می‌شود. این روش مبتنی بر میانگین‌گیری از جریان انرژی صوتی و ارتعاشی در زیرسیستم‌ها و روابط حاکم بر آن‌ها است. در این مقاله ابتدا به طور اجمالی روش انرژی آماری معرفی گردیده و سپس به معرفی و بررسی مسائل مهم در تحلیل صوتی یک ورق مرتعش با استفاده از روش انرژی آماری و نرم‌افزار VA One پرداخته می‌شود. در ادامه و پس از بررسی صحت نتایج حاصل از نرم‌افزار VA One عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار با تحریک پخشا بررسی می‌گردد و تاثیر ضخامت و همچنین جنس پوسته محافظ سونار بر فشار آکوستیکی در فاصله مشخصی از آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها بیانگر این مطلب است که با افزایش ضخامت، عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار در فرکانس‌های بالا بهبود پیدا می‌کند. با مشاهده نتایج حاصل از تحلیل جنس نیز می‌توان گفت به‌طور میانگین شفافیت صوتی کربن-پوکسی و گرافیت-پوکسی بهتر از مواد دیگر است و در بین فلزات نیز آلومینیوم عملکرد خوبی را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل انرژی آماری، تحلیل صوتی-ارتعاشی، نرم‌افزار VA One، گنبد سونار

۱. مقدمه

تحلیل صوتی-ارتعاشی در فرکانس‌های بالا برای انواع سازه‌های در معرض ارتعاش اهمیت زیادی دارد. انواع

سازه‌های موجود در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا و دریا در معرض ارتعاشات در محدوده فرکانسی بالا هستند. این ارتعاشات اغلب منجر به ناهنجاری‌های صوتی از قبیل

انرژی آماری مورد نیاز است با آزمون‌های جداگانه منطبق با استاندارد ISO 140-3:1995 محاسبه گردیده است [۶].

در کشور ما نیز در تعداد محدودی از مقالات به استفاده از این روش در تحلیل‌های صوتی ارتعاشی پرداخته شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی خصوصیات آکوستیکی ورق‌های متغیر تابعی (FGM) با استفاده از روش انرژی آماری [۷] و همچنین بررسی افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور با استفاده از مواد متخلخل عایق صوتی به روش انرژی آماری اشاره کرد [۸].

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. روش انرژی آماری

همان‌طور که گفته شد روش انرژی آماری به‌عنوان روشی مناسب برای تحلیل‌های صوتی ارتعاشی در فرکانس‌های بالا، مبتنی بر میانگین‌گیری از جریان انرژی بین زیرسیستم‌های مختلف مسئله می‌باشد. در این روش یک مدل به زیرسیستم‌های مختلف تقسیم می‌شود. سپس با ایجاد ارتباط بین زیرسیستم‌های مختلف و با استفاده از روابط جریان انرژی بین زیرسیستم‌ها به بررسی نحوه انتقال صوت ناشی از ارتعاش و یا بالعکس در یک مدل پرداخته می‌شود. در روش‌های حل عددی متداول از قبیل روش المان مرزی و المان محدود، مدل شبکه بندی شده و تعداد شبکه‌ها بسته به نوع تحلیل متفاوت است. برای حل المان محدود یک مدل صوتی - ارتعاشی، تعداد گره‌ها بر اساس فرکانس و طول موج تحریک تعیین می‌شود. به گونه‌ای که هرچه فرکانس تحلیل بالاتر (طول موج کوتاه‌تر) باشد به مدلی با شبکه بندی ریزتر نیاز خواهد بود. همین مساله سبب می‌شود که تحلیل‌های المان محدود و المان مرزی در تحلیل‌های صوتی - ارتعاشی در فرکانس‌های بالا دچار محدودیت باشند. اما روش انرژی آماری با تقسیم مدل به تعداد محدودی زیرسیستم و حل عددی روابط صوت و ارتعاش برای هر زیرسیستم و معادلات سازگاری برای برقراری روابط بین زیرسیستم‌ها اقدام به حل صوتی - ارتعاشی مدل در فرکانس‌های بالا می‌کند. در روش انرژی آماری برآورد دقیق و قابل‌اعتنا از

ایجاد سر و صدا و یا نویز در سازه می‌شوند که می‌تواند عواقب مکانیکی زیان‌بار برای سازه و همچنین عواقب زیستی زیان‌بار برای افراد داشته باشد. از این رو بهبود عملکرد صوتی و ارتعاشی سازه‌ها اهمیت به‌سزایی پیدا کرده است. همچنین بررسی رفتار صوتی از قبیل عبور دهی امواج صوتی، بازتاب امواج و ... نیز برای برخی از سازه‌ها از قبیل بدنه زیردریایی‌ها اهمیت زیادی دارد. روش انرژی آماری به‌عنوان روشی تحلیلی برای ایجاد ارتباط بین ارتعاشات موجود در یک سازه با امواج صوتی ایجاد شده از آن سازه در فرکانس‌های بالا توسعه یافته است.

نخستین بار لیون^۱ در سال ۱۹۷۵ در کتابی مستقل به شرح روش انرژی آماری برای سیستم‌های دینامیکی پرداخت [۱]. نظریات لیون سال‌های بعد توسط دانشمندانی چون هادگس^۲ و وودهاوس^۳ توسعه پیدا کرد [۲]. در دو دهه اخیر محققان و دانشمندان زیادی به تکمیل و توسعه تئوری انرژی آماری پرداخته‌اند، به طوری که امروزه این روش به‌عنوان روشی پذیرفته‌شده برای تحلیل‌های صوتی - ارتعاشی در فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تمام این تفاسیر روش انرژی آماری به‌عنوان روشی جدید شناخته می‌شود و استفاده از آن در صنعت هنوز فراگیر نشده به گونه‌ای که فعالیت‌های صورت گرفته با استفاده از این روش از تعدادی محدود فراتر نرفته است [۳]. نرم‌افزارهای مبتنی بر روش انرژی آماری نیز از سال ۱۹۹۷ وارد بازار شدند که اولین آن نرم‌افزار AUTOSEA بود. امروزه نرم‌افزارهای دیگری از قبیل VA One و ACTRAN از این روش برای تحلیل‌های صوتی - ارتعاشی در فرکانس بالا استفاده می‌کنند. از جمله کارهای انجام شده با استفاده از این روش می‌توان به بررسی خواص آکوستیکی پوشش یک نوع ماهواره توسط ناسا [۴] و همچنین بررسی انتشار صوت ناشی از ارتعاش موتور خودرو به داخل اتاق خودرو [۵] اشاره کرد. در سال ۲۰۱۶ ژانگ و همکاران، آنالیز صوتی کابین یک قطار پر سرعت را با روش تحلیل انرژی آماری انجام دادند و نتایج خود را با نتایج آزمایش مقایسه نمودند. در این تحقیق، مقادیر اتلاف و نیز چگالی مودال که در روش تحلیل

دوبعدی (مانند یک جریان کم عمق) و حجم های سه بعدی (مانند یک اتاق و یا یک محفظه) تقسیم می شوند. به عنوان مثال برای حجم های آکوستیک یک بعدی چگالی مودال از رابطه زیر بدست می آید:

$$n(f) = \frac{2L}{C} \quad (5)$$

که L طول حجم یک بعدی و C سرعت صوت می باشد. برای حجم های دوبعدی مثل یک حفره کم عمق با فرض اینکه طول موج صوتی حداکثر دو برابر عمق حفره باشد، چگالی مودال عبارت است از:

$$n(f) = \frac{PfA}{C^2} + \frac{P}{C} \quad (6)$$

در رابطه فوق A سطح کلی حفره و P محیط حفره می باشد. برای حجم های سه بعدی نیز رو چگالی مودال از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$n(f) = \frac{4\pi f^2 V}{C^3} + \frac{\pi f A}{2C^2} + \frac{P}{8C} \quad (7)$$

در این رابطه A مساحت سطح محفظه و V حجم محفظه و P طول کلی لبه های محفظه می باشد.

فاکتور اتلاف کوپلینگ نیز عبارت است از میزان هدر رفت انرژی صوتی یا ارتعاشی بر اثر اتصال دو زیرسیستم و در موضع اتصال دو زیرسیستم با یکدیگر. این پارامتر برحسب نوع اتصال المان ها به یکدیگر به سه بخش فاکتور اتلاف کوپلینگ سازه - سازه، فاکتور اتلاف کوپلینگ سازه - حجم آکوستیک و فاکتور اتلاف کوپلینگ حجم آکوستیک - حجم آکوستیک تقسیم می شود. برای هر یک از انواع اتلاف کوپلینگ روابط تئوری در مراجع مقاله و به طور ویژه در مرجع شماره [۹] ارائه شده است.

فاکتور اتلاف داخلی η یک پارامتر مهم برای پیش بینی پاسخ ارتعاشی سیستم با استفاده از روش انرژی آماری و دیگر روش های مرسوم و متداول است. همانند چگالی مودال برای به دست آوردن فاکتور اتلاف داخلی نیز روش تئوری وجود ندارد، همچنین راه حل تحلیلی عمومی هم برای به دست آوردن فاکتور اتلاف داخلی المان های سازه ای و حجم های صوتی وجود ندارد. فاکتور اتلاف داخلی وابسته به عوامل

سطح واکنش صوتی - ارتعاشی یک سیستم نیازمند تخمین دقیق سه پارامتر است. این سه پارامتر عبارت اند از:

- چگالی مودال^۴ اختصاصی برای هر زیرسیستم
- فاکتور اتلاف کوپلینگ^۵ (درجه کوپلینگ) بین دو زیرسیستم
- فاکتور اتلاف داخلی^۶

۲-۲. تئوری و محاسبات

- چگالی مودال عبارت است از تعداد مودها در فرکانس واحد برای هر زیرسیستم. در روش انرژی آماری زیرسیستم ها به دو گروه زیرسیستم سازه ای و حجم های آکوستیک تقسیم می شوند. هر زیرسیستم رابطه منحصر به فردی برای دستیابی به چگالی مودال دارد که این روابط با استفاده از نتایج تجربی توسعه یافته اند؛ به عنوان مثال چگالی مودال برای میله های یکنواخت تحت ارتعاش از رابطه زیر به دست می آید:

$$n(f) = \frac{2L}{C_l} \quad (1)$$

که

$$C_l = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \quad (2)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسیته، ρ چگالی و L طول میله است. همچنین چگالی مودال برای یک تیر یکنواخت از رابطه زیر بدست می آید:

$$n(f) = \frac{L}{2\pi} \left(\frac{1}{2\pi Kf C_l}\right)^{1/2} \quad (3)$$

که

$$K = \left(\frac{I_{yy}}{A}\right)^{1/2} \quad (4)$$

در این روابط A مساحت سطح مقطع تیر و I ممان دوم سطح مقطع تیر است. روابط تئوری چگالی مودال برای سایر المان های سازه ای نیز موجود است که جهت مطالعه بیشتر می توان به مرجع [۹] مراجعه کرد.

چگالی مودال برای حجم های آکوستیک به عوامل متعددی بستگی دارد. این حجم ها برحسب ابعاد به سه گروه حجم های یک بعدی (مانند یک لاستیک استوانه ای شکل) حجم های

زیرسیستم و P_1 و P_2 توان ورودی به هر زیرسیستم (تحریک) می‌باشد. ω فرکانس زاویه‌ای، η_1 فاکتور اتلاف داخلی زیرسیستم ۱ و η_2 فاکتور اتلاف داخلی زیرسیستم ۲ می‌باشد. همچنین η_{12} فاکتور اتلاف کوپلینگ برای انتقال صوت یا ارتعاش از زیرسیستم ۱ به ۲ و η_{21} فاکتور اتلاف کوپلینگ برای انتقال صوت یا ارتعاش از زیرسیستم ۲ به ۱ می‌باشد. بنابراین $\omega E_1 \eta_1$ اتلاف انرژی ناشی از عوامل داخلی در زیرسیستم ۱ و $\omega E_2 \eta_2$ اتلاف انرژی ناشی از عوامل داخلی در زیرسیستم ۲ است. به علاوه رابطه $\omega E_1 \eta_{12}$ مربوط به اتلاف انرژی هنگام انتقال صوت یا ارتعاش از زیرسیستم ۱ به زیرسیستم ۲ می‌باشد. رابطه $\omega E_2 \eta_{21}$ نیز مربوط به اتلاف انرژی در انتقال از زیرسیستم ۲ به زیرسیستم ۱ می‌باشد. با محاسبه پارامترهای معرفی شده و ترم‌های انرژی و ایجاد ارتباط بین آن‌ها تحلیل انرژی آماری برای یک مدل صورت خواهد پذیرفت.

در این روش زیرسیستم‌ها از لحاظ خواص صوتی - ارتعاشی به دو گروه زیرسیستم‌های سازه‌ای و حجم‌های آکوستیک تقسیم می‌شوند. زیرسیستم‌های سازه‌ای از قبیل تیر، ورق، صفحات مختلف، استوانه جدار نازک و... هستند. حجم‌های آکوستیک هم به محیط‌هایی مشتمل بر سیال مانند یک اتاق که صوت، قابلیت انتشار در آن را دارد اطلاق می‌شود. پارامترهای انرژی آماری برای المان‌های سازه‌ای و حجم‌های آکوستیک به صورت مجزا و از روابط تئوری و آزمایشگاهی به دست می‌آیند [۹].

۳. یافته‌ها

۳-۱. شرح مساله

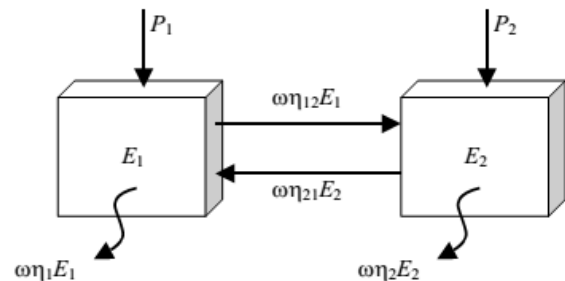
تحلیل صوتی - ارتعاشی یک نمونه پوسته محافظ سونار در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. این کار در راستای بررسی اثر جنس و اثر ضخامت پوسته بر عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار صورت گرفته است. بدیهی است که عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار بر کارایی بهتر سونار تاثیر مستقیم دارد.

هدر دهنده انرژی موجود در داخل هر زیرسیستم است و به میزان انرژی تلف شده داخل زیرسیستم بستگی دارد. برخی از این عوامل هدر دهنده انرژی عملکرد خطی دارند و برخی نیز عملکرد غیرخطی. دو شکل متداول پذیرفته شده برای اتلاف‌های خطی عبارت‌اند از اتلاف سازه‌ای که تابعی از خصوصیات سازه‌ای زیرسیستم است و اتلاف تابش صوتی که عبارت است از اتلاف صوت از طریق تابش از سطوحی که پیرامون آن سیال وجود دارد. اتلاف‌های غیرخطی نیز می‌تواند شامل اتلاف صوت در مرزهای سازه‌ای ناشی از اصطکاک و یا جابه‌جایی سیال در مرزهای سازه‌ای باشد. فاکتور اتلاف داخلی برای یک زیرسیستم مجموع هر سه نوع اتلاف است:

$$\eta = \eta_s + \eta_{rad} + \eta_j \quad (۸)$$

در این رابطه η_s اتلاف ناشی از خصوصیات سازه‌ای، η_{rad} اتلاف ناشی از تابش صوت و η_j اتلاف ناشی از هدر رفت انرژی در مرزهای سازه‌ای می‌باشد. عموماً زمانی که المان‌های سازه‌ای با دقت به هم متصل شده باشند $\eta_j < \eta_s$ و فاکتور اتلاف داخلی فقط تابعی از اتلاف سازه‌ای و اتلاف ناشی از تابش صوت می‌باشد. سهم این دو عامل نیز در اتلاف داخلی متفاوت و برحسب خصوصیات سازه‌ای است. به عنوان مثال برای سازه‌های سبک با شفافیت صوتی بالا عامل تابش سهم غالب را در اتلاف داخلی دارد.

در ادامه با ارائه مثال به توضیح اجمالی روش انرژی آماری پرداخته خواهد شد.



شکل ۱. شماتیک روش انرژی آماری [۱]

مطابق شکل ۱ در صورتی که مدل مشتمل بر دو زیرسیستم باشد برای دو زیرسیستم ۱ و ۲ E_1 و E_2 انرژی داخلی هر

۳-۲. اقدامات صورت گرفته

در این مقاله ابتدا به صحت سنجی و اعتبار بخشی به نتایج خروجی از تحلیل صوتی - ارتعاشی نرم افزار VA One پرداخته شده است. برای این کار اقدام به مقایسه نتایج خروجی ناشی از حل ترکیبی (المان محدود - انرژی آماری) با نتایج خروجی ناشی از حل انرژی آماری یک ورق مرتعش شده است. در گام بعدی تحلیل صوتی یک نمونه پوسته محافظ سونار و بررسی اثر جنس و ضخامت، بر عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار صورت گرفته است.

◀ صحت سنجی و اعتبار بخشی حل انرژی آماری نرم افزار VA One

به عنوان مدل ابتدایی برای بررسی صحت و سقم نتایج خروجی از نرم افزار VA One ناشی از تحلیل انرژی آماری، تحلیل صوتی یک ورق مرتعش در بازه های فرکانسی مشخص با استفاده از نیروی نقطه ای و به روش انرژی آماری مورد بررسی قرار گرفته است. در راستای تایید نتایج خروجی ناشی از تحلیل صوتی به روش انرژی آماری و با استفاده از نرم افزار VA One اقداماتی صورت گرفته که در زیر به بررسی آن ها پرداخته خواهد شد:

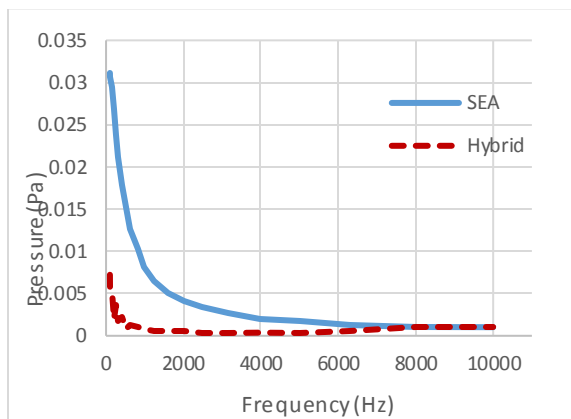
- مقایسه و انطباق نتایج خروجی از حل یک مدل مشابه به روش انرژی آماری و روش ترکیبی با استفاده از نرم افزار VA One
- بررسی علت عدم استفاده از شرایط مرزی سازه ای توسط نرم افزار VA One در تحلیل انرژی آماری
- بررسی علت عدم وابستگی و حساسیت روش انرژی آماری و نرم افزار VA One به مکان اعمال نیروی ورق
- تطبیق نتایج خروجی از نرم افزار VA One با تئوری روش انرژی آماری

قبل از بررسی تفصیلی اقدامات صورت گرفته بیان یک نکته ضروری است. این نکته آن است که نرم افزار VA One به عنوان یک نرم افزار تحلیل مهندسی قابلیت حل صوتی - ارتعاشی یک مدل را به سه روش المان محدود، المان مرزی

و انرژی آماری دارد. همچنین حل ترکیبی مدل ها به عنوان ویژگی منحصر به فرد این نرم افزار قابل مطرح می باشد. در حل ترکیبی (المان محدود - انرژی آماری) یک مدل (به عنوان مثال انرژی صوتی منتقل شده به یک سیال در فاصله یک متری از یک ورق مرتعش تحت تأثیر نیروی نقطه ای)، نرم افزار مدل را به صورت دو مرحله ای حل می کند. حل المان محدود منحصر به بخش سازه ای مدل است که شامل ورق می شود. بدین صورت که با المان ریزی ورق بر حسب بازه ی فرکانسی مورد نظر برای حل، انرژی ارتعاشی ورق با استفاده از روش المان محدود محاسبه می شود. این، بخش اول حل ترکیبی است که از آن به عنوان حل سازه ای لانه پرده می شود. پس از حل سازه ای با استفاده از روش المان محدود، برای محاسبه انرژی منتقل شده به سیال در فاصله معین از سازه از روش انرژی آماری استفاده می شود؛ به گونه ای که بازه فرکانسی مورد نظر به بازه های کوچک تر (به صورت لگاریتمی و یا ثابت بر حسب انتخاب کاربر) تقسیم می شود و از انرژی ارتعاشی ورق که به روش المان محدود محاسبه شده است در این بازه های کوچک تر با استفاده از روش انرژی آماری میانگین گیری کرده و در نهایت انرژی منتقل شده به سیال بر اثر ارتعاش ورق به دست می آید. به عبارت بهتر، روابط سازه ای با استفاده از روش المان محدود و روابط مربوط به انتقال صوت ناشی از ارتعاش با استفاده از فرمول های انرژی آماری مورد محاسبه قرار می گیرند. امکان ترکیب روش المان محدود و المان مرزی و همچنین المان مرزی و انرژی آماری نیز وجود دارد که بر حسب نوع تحلیل، مورد استفاده قرار می گیرند. با مطالعه و تحقیق بر روی عملکرد این نرم افزار این نتیجه به دست آمد که برای حل صوتی - ارتعاشی مدل ها در فرکانس های پایین مناسب ترین روش، روش المان محدود است. برای حل در فرکانس های میانی روش ترکیبی مناسب است و برای حل در فرکانس های بالا روش انرژی آماری عملکرد قابل قبولی دارد. پس از بیان این توضیح به بررسی چالش های بیان شده و اقدامات انجام شده در راستای حل مشکل پرداخته خواهد شد.

است که هرچه بازه فرکانسی شامل فرکانس های بزرگ تر باشد نیاز به المان های ریزتر وجود دارد که این امر خود سبب طولانی شدن زمان حل می شود. در مرحله بعد اقدام به حل همان ورق با همان مشخصات و در همان بازه فرکانسی این بار به روش انرژی آماری شده است (شکل ۳).

نتایج بدست آمده ناشی از حل صوتی - ارتعاشی یک ورق به دو روش ترکیبی (انرژی آماری - المان محدود) و روش انرژی آماری در نمودار شکل ۴ قابل مشاهده است.

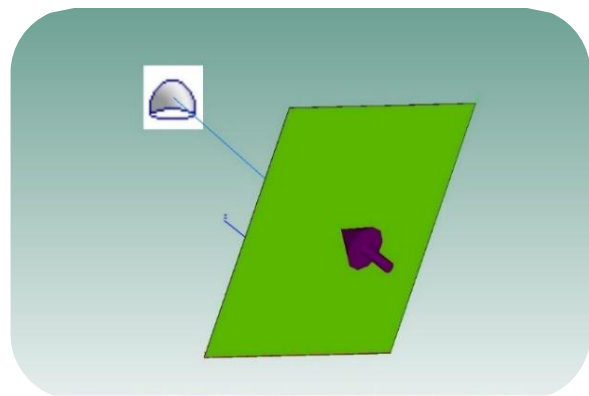


شکل ۴. مقایسه روش ترکیبی و روش انرژی آماری در حل یک مدل مشابه در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز

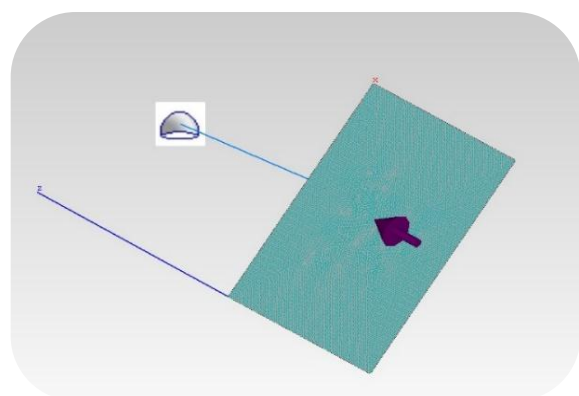
همان طوری که در نمودار شکل ۴ نیز مشخص است با افزایش فرکانس مقادیر روش انرژی آماری به روش ترکیبی نزدیک تر می شود. این می تواند مؤید خوبی بر دقت روش انرژی آماری در فرکانس های بالا باشد. دستیابی به نتایج قابل اعتماد برای یک تحلیل صوتی با استفاده از روش های المان محدود و ترکیبی در فرکانس های بالا نیازمند کوچک شدن کافی المان های سازه ای است. با افزایش فرکانس (کاهش طول موج) المان ها باید ریزتر شوند. این امر منجر به طولانی شدن بیش از حد فرآیند تحلیل صوتی با استفاده از این دو روش در فرکانس های بالا می گردد. به همین دلیل است که تحلیل به روش ترکیبی با المان های متناسب با بازه فرکانسی ساعت ها زمان می برد. این درحالی است که برای تحلیل انرژی آماری بیش از چند دقیقه زمان صرف نمی شود.

◀ مقایسه و انطباق نتایج خروجی از حل یک مدل مشابه به روش انرژی آماری و روش ترکیبی با استفاده از نرم افزار VA One

به منظور تأیید نتایج تحلیل انرژی آماری اقدام به مقایسه نتایج ناشی از حل یک مدل مشابه به دو روش انرژی آماری و ترکیبی (المان محدود - انرژی آماری) شده است. این کار برای دست یابی به یک دید کلی از نتایج خروجی از نرم افزار VA One در حل انرژی آماری صورت گرفت. برای این منظور یک ورق آلومینیومی به ابعاد ۱ متر و ضخامت ۱ میلی متر تحت تأثیر یک نیروی ارتعاشی ۱ نیوتونی در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲. تحلیل صوتی - ارتعاشی یک ورق مرتعش با نیروی نقطه ای ۱ نیوتونی با روش ترکیبی در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز

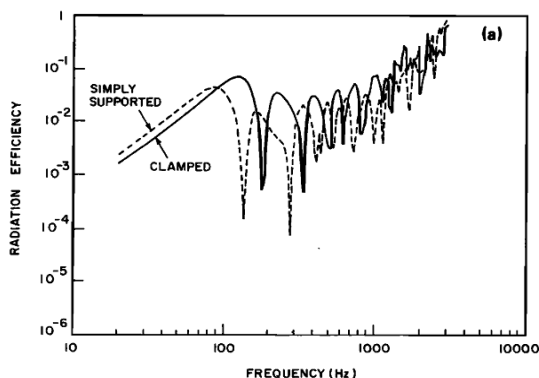


شکل ۳. تحلیل صوتی - ارتعاشی یک ورق مرتعش با نیروی نقطه ای ۱ نیوتونی با روش انرژی آماری در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز

برای حل ترکیبی ابتدا نیاز المان ریزی ورق است. مش ریزی برحسب بازه فرکانسی مورد نظر صورت می گیرد. بدیهی

سازه‌ای با بازه‌ی فرکانسی مدنظر متناسب‌تر باشد نتایج آن به نتایج تحلیل انرژی آماری در همان بازه نزدیک‌تر است.

بررسی عدم وابستگی شدید انتشار صوت از ورق مرتعش در فرکانس‌های بالا به شرایط مرزی با روش آزمایشگاهی در مقاله‌ای توسط آقای بری نیز به اثبات رسیده است که نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده است [۱۰].



شکل ۶ بررسی اثر شرایط مرزی بر انتشار صوت از یک ورق مرتعش به روش آزمایشگاهی [۱۱]

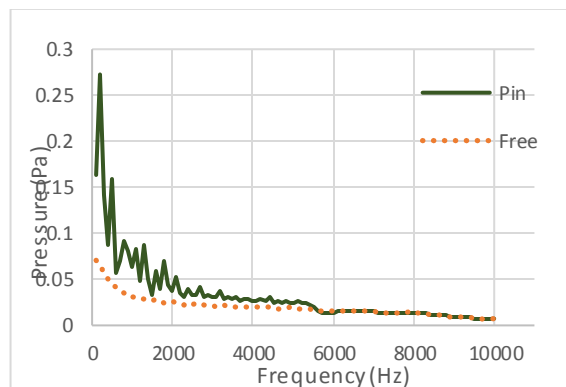
همان‌طور که در شکل هم مشخص است با افزایش فرکانس میزان وابستگی مقادیر متوسط انتشار موج به شرایط مرزی کاهش یافته است.

بررسی علت عدم وابستگی و حساسیت روش انرژی آماری و نرم‌افزار VA One به مکان اعمال نیروی ورق

از دیگر چالش‌های پیش رو در تحلیل صوتی ارتعاشی یک ورق مرتعش به روش انرژی آماری به‌وسیله نرم‌افزار VA One عدم حساسیت نتایج خروجی از این نرم‌افزار در روش انرژی آماری به موقعیت مکانی اعمال نیروی نقطه‌ای بود. برای بررسی این چالش مجدداً اقدام به حل ترکیبی صوتی- ارتعاشی دو ورق مرتعش با شرایط کاملاً مشابه و تفاوت در نقطه اعمال نیروی شده است. نتایج این تحلیل در شکل ۷ قابل مشاهده است.

بررسی علت عدم استفاده از شرایط مرزی سازه‌ای توسط نرم‌افزار VA One در تحلیل انرژی آماری

از دیگر ویژگی‌های تحلیل صوتی-ارتعاشی ورق مرتعش در نرم‌افزار VA-One عدم حساسیت این نرم‌افزار به شرایط مرزی سازه‌ای است. به‌گونه‌ای که در حل انرژی آماری هیچ‌گونه شرایط مرزی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این در حالی است که در حل المان محدود و ترکیبی با استفاده از نرم‌افزار VA One، شرایط مرزی سازه‌ای دخیل بوده و در نتایج مؤثر هستند. برای بررسی بیشتر این موضوع اقدام به حل ترکیبی ورق مرتعش این بار با دو شرط مرزی متفاوت شده است. ورق اول با شرایط مرزی آزاد^۸ و ورق دوم با شرایط مرزی گیردار^۹ در یک بازه فرکانسی مشابه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز مورد تحلیل قرار گرفته است. نمودار شکل ۵ نشان‌دهنده اثر شرط مرزی ورق بر فشار صوت منتقل شده به سیال در فاصله یک متری از ورق، ناشی از ارتعاش ورق می‌باشد.



شکل ۵ اثر شرایط مرزی در فشار صوتی منتقل شده به سیال در یک متری ورق مرتعش

با توجه به نمودار شکل ۵ می‌توان دریافت که در فرکانس‌های بالا سطح فشار صوتی ناشی از ارتعاش سازه به سیال از شرایط مرزی مستقل است و از آنجا که روش انرژی آماری روشی برای تحلیل در فرکانس‌های بالا می‌باشد و از طرفی مقادیر متوسط مورد نیاز است عدم استفاده از شرایط مرزی سازه‌ای در تحلیل انرژی آماری امری قابل قبول است. شایان ذکر است که در حل ترکیبی نیز هرچه میزان المان‌های

است، E مدول الاستیسیته، ρ چگالی و ν ضریب پواسون ورق است [۱۱].

برای یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی متر، مساحت ۱ متر، چگالی مودال برابر است با:

$$n(\omega) = 0.05094$$

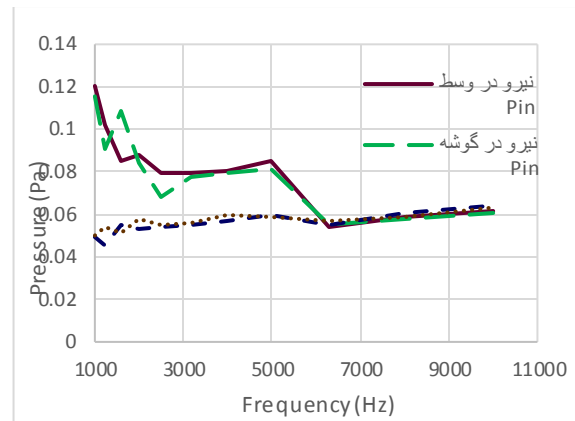
مقدار چگالی مودال برای ورق مزبور خروجی از نرم افزار VA One برابر با ۰/۰۵۰۹۴ است. انطباق نتایج خروجی از نرم افزار VA One با نتایج حاصل از محاسبات با استفاده از روابط تئوری انرژی آماری می تواند مؤیدی بر صحت نتایج خروجی از نرم افزار VA One در تحلیل انرژی آماری باشد.

◀ تحلیل صوتی پوسته محافظ سونار به روش انرژی آماری

این بخش به بیان روند تحلیل صوتی یک پوسته محافظ سونار اختصاص دارد. برای این کار یک نیم کره به شعاع ۱ متر در ضخامت های ۶ میلی متر، ۲۰ میلی متر، ۲۵ میلی متر و ۳۰ میلی متر برای مواد مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است تا عملکرد بهینه پوسته محافظ سونار در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز بدست آید.

◀ معرفی مدل

با توجه به توضیحات ارائه شده مدل مورد نظر در این تحقیق، متشکل از دو نوع زیرسیستم است؛ زیرسیستم اول از نوع سازه که همان پوسته محافظ سونار است و زیرسیستم دوم، سیال نیمه نامحدود که از نوع حجم آکوستیک است. بنابراین برای تحلیل صوتی پوسته محافظ سونار، این پوسته با یک میدان آکوستیک از نوع پخش از داخل در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز تحریک شده و فشار صوت منتقل شده از ارتعاش پوسته در فاصله یک متری از پوسته در ناحیه بیرونی بررسی می شود. در شکل ۸ پوسته سونار مدل سازی شده در نرم افزار VA One نشان داده شده است. همان طور که در بخش های قبل گفته شد، فشار آکوستیکی متوسط ناشی از ارتعاش ورق در فرکانس های بالا مستقل از شرایط مرزی ورق است. بنابراین در تحلیل انرژی آماری که منحصر به



شکل ۷. اثر مکان اعمال نیرو بر فشار منتقل شده به سیال در فاصله یک متری از ورق مرتعش در دو شرط مرزی Free و Pine

مطابق نمودار شکل ۶ با افزایش فرکانس وابستگی انتشار صوت به مکان اعمال نیرو کاهش یافته است. به گونه ای که از فرکانس ۶۰۰۰ هرتز به بعد تقریباً نتایج بر هم منطبق است. این انطباق شامل حالت با شرایط مرزی و بدون شرایط مرزی نیز می شود. دلیل این امر استفاده از مقادیر متوسط انتشاری انرژی در سازه است که وابستگی کمی به شرایط مرزی و محل تحریک دارد.

◀ تطبیق نتایج خروجی از نرم افزار VA One با تئوری روش انرژی آماری

در این مرحله به مقایسه نتایج خروجی از تحلیل انرژی آماری توسط نرم افزار VA One با نتایج حاصل از روابط تئوری انرژی آماری پرداخته می شود. برای این کار چگالی مودال برای یک ورق از طریق روابط تئوری و نرم افزار استخراج و مقایسه می شود.

چگالی مودال برای یک ورق با استفاده از تئوری انرژی آماری از روابط زیر به دست می آید [۱۱]:

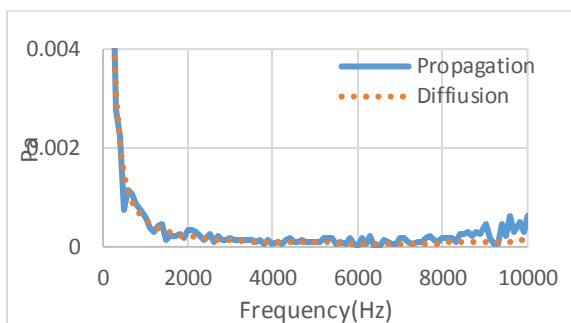
$$n(\omega) = \frac{S}{3/2 C_l h} \quad (1)$$

$$C_l = \left\{ \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

در رابطه (۱) که مربوط به چگالی مودال ورق می باشد S مساحت و h ضخامت ورق است. همچنین در رابطه (۲) که مربوط به سرعت موج صوتی شبه طولی در ورق مرتعش

در پی وجود داشته باشد (مثلاً در مواردی که انتقال صدا بین دو اتاقک کوچک مدنظر باشد) هر نقطه روی دیواره میان دو اتاق، علاوه بر موج اصلی، به طور پی در پی انعکاس‌های مختلف از سطوح را هم دریافت می‌کند و به این ترتیب توزیع دامنه و فاز یکسان تری به عنوان ورودی روی دیواره حاصل می‌شود که مستقل از محل تحریک و حتی هندسه منبع (کروی، خطی و ...) خواهد بود. در این حالت میدان تحریک صوتی، یک میدان پخشاست.

از آنجا که در این مقاله فقط بررسی تأثیر پوسته محافظ سونار مدنظر است، مطلوب آن است که اتلاف محیطی ناچیز در نظر گرفته شود و اتلاف سازه‌ای بررسی شود. به همین دلیل برای تحریک پوسته از تحریک پخشا استفاده شده است.



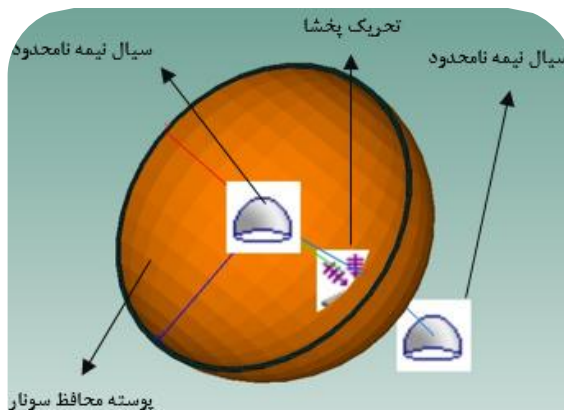
شکل ۹. مقایسه فشار صوت منتقل شده به سیال در یک متری ورق مرتعش در دو حالت تحریک پخشا و تحریک انتشاری

در فاصله یک متری از طرفین پوسته محافظ سونار، سیال نیمه نامحدود^{۱۲} (آب دریا) تعریف شده است. پوسته محافظ سونار با اتصال المان سازه به حجم آکوستیک، از دو طرف به سیال نیمه نامحدود متصل شده است. استفاده از سیال نیمه نامحدود در اطراف پوسته سونار به این معنی است که اطراف پوسته محافظ سونار یک فضای کروی از آب دریا در نظر گرفته شده است.

◀ معرفی مشخصات پوسته‌ها

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در این تحقیق تغییر عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار در مقابل تغییر ضخامت و تغییر جنس پوسته مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش به معرفی مشخصات پوسته‌های محافظ سونار به کار گرفته

تحلیل آکوستیک سازه‌ها در فرکانس‌های میانی و بالاست، شرایط مرزی سازه‌ای حائز اهمیت نیست.



شکل ۸. شماتیک مدل پوسته محافظ سونار در نرم‌افزار VA One

◀ بررسی نوع تحریک

برای تحریک صوتی پوسته در محیط نرم‌افزار VA One دو امکان وجود دارد. تحریک پخشا^{۱۰} و تحریک انتشاری^{۱۱}. تحریک پخشا مخصوص محیط‌ها با استهلاك محیطی پایین است. تحریک انتشاری نیز مربوط به انتقال موج صوتی در محیط مشتمل بر سیال با استهلاك محیطی طبیعی است. شدت تحریک و نتایج خروجی در هر دو حالت تقریباً با هم برابر است (شکل ۹). در تحلیل انتشاری، انتشار خطی موج را دو بعد (x و y) قابل شبیه‌سازی بوده و نرم‌افزار انتشار موج را با استفاده از سرعت انتشار خطی صوت در سازه و سیال مورد نظر مدل می‌کند. در تحلیل پخشا، انتشار موج به صورت یکنواخت شبیه‌سازی می‌شود. این نوع تحریک امکان بررسی بهتر اثرات انتشار و یا انعکاس موج صوتی از سطح سازه را مقدور می‌سازد. برای درک بهتر تفاوت میان این دو نوع تحریک، می‌توان به بارگذاری فشار صوتی روی یک دیواره اشاره داشت. چنانچه منبع این بارگذاری به دور از سطوح بازتاب صوتی باشد هر نقطه دیواره صرفاً یک موج را دریافت می‌کند که می‌تواند به لحاظ هندسی شکل صفحه - ای، کروی یا استوانه‌ای داشته باشد؛ بنابراین نقاط روی دیواره مقادیر متفاوتی از دامنه و فاز فشار صوتی را بنا به رابطه توزیع هندسی فشار صوتی منبع، دریافت می‌کنند که در این جا بارگذاری از نوع انتشاری است؛ اما در مواردی که قبل از برخورد موج به دیواره فوق‌الذکر، انعکاس‌های پی

شده پرداخته و سعی شده است که از مواد مهندسی متداول برای تحلیل‌ها استفاده شود.

جدول ۱. مشخصات مواد همگن به کار گرفته شده در تحلیل صوتی [۱۲]

جنس	چگالی [kg/m ³]	مدول الاستیسیته (GPa)	مدول برشی (GPa)	ضریب پواسون	ضخامت (mm)	وزن (Kg)
فولاد	۷۸۰۰	۲۱۰	۸۰	۰/۳۱۲۵	۶	۲۹۲/۵
					۲۵	۹۷۵
					۳۰	۱۲۱۸
تیتانیوم	۴۵۰۰	۱۱۰	۴۱	/۲۴۱۵	۶	۱۶۸
					۲۵	۵۶۲
					۳۰	۷۰۳
آلومینیوم	۲۷۰۰	۷۱	۲۶/۷	۰/۳۲۹۶	۶	۱۰۱
					۲۵	۳۳۷
					۳۰	۴۲۱
					۳۰	۵۰۶

با توجه به رشد روزافزون استفاده از مواد کامپوزیت در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی علاوه بر مواد همگن معرفی شده در جدول ۱، برخی از مواد کامپوزیت بافته شده نیز برای تحلیل صوتی پوسته محافظ سونار انتخاب شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است در تحلیل برای کامپوزیت بافته شده از لایه چینی ۰ و ۹۰ درجه استفاده شده است. همچنین ضخامت هر لایه ۱/۲۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مشخصات کامپوزیت‌های به کار رفته در تحلیل صوتی [۱۲]

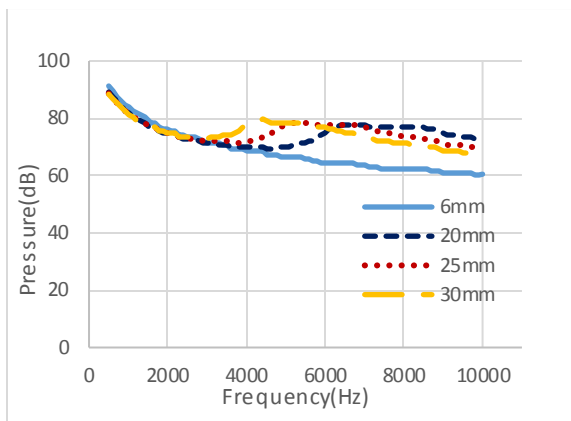
جنس	چگالی (kg/m ³)	E _۱ (GPa)	E _۲ (GPa)	ν _{۱۲}	G _{۱۲} (GPa)	G _{۲۳} (GPa)	ضخامت (mm)	تعداد لایه‌ها	وزن Kg
گرافیت اپوکسی	۱۶۰۰	۱۲۵	۱۰	/۴	۵/۹	۵/۹	۶	۴۸	۶۱
							۲۵	۱۹۷	۲۵۰
							۳۰	۲۳۷	۳۰۰
کربن اپوکسی	۱۶۰۰	۳۳۴	۵/۹	/۳۳	۱/۱	۱/۱	۶	۴۸	۶۱
							۲۵	۱۹۷	۲۵۰
							۳۰	۲۳۷	۳۰۰
برن اپوکسی	۲۱۰۰	۲۱۰	۱۹	/۲۱	۴/۸	۴/۸	۶	۴۸	۸۰
							۲۵	۱۹۷	۲۵۰
							۳۰	۲۳۷	۲۶۳
آرامید اپوکسی	۱۵۰۰	۷۶	۵/۵	/۲۴	۲/۳	۲/۳	۶	۴۸	۵۷
							۲۵	۱۹۷	۲۳۸
							۳۰	۲۳۷	۳۹۵
فایبرگلاس اپوکسی	۱۹۰۰	۵۶	۱۳	/۲۶	۴/۲	۴/۲	۶	۴۸	۷۲
							۲۵	۱۹۷	۲۳۸
							۳۰	۲۳۷	۲۹۷
							۳۰	۲۳۷	۳۵۷

بررسی ضخامت‌های ۶ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این راستا پوسته محافظ سونار به وسیله یک موج صوتی با فشار ۱ پاسکال تحریک می‌شود و فشار صوت در سیال به فاصله ۱ متر از پوسته خوانده می‌شود. برای تمام مواد مورد بررسی اعم از مواد همگن و مواد مرکب مشاهده شد که با افزایش ضخامت، عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار بهتر می‌شود. البته این بهبود عملکرد در فرکانس‌های بالا مشهودتر است. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت فشار صوت منتقل شده به سیال در یک متری پوسته، ناشی از ارتعاش پوسته افزایش پیدا می‌کند. بدیهی است که مقدار این افزایش متناسب با میزان تغییر ضخامت پوسته است و هرچه ضخامت پوسته بیشتر افزایش پیدا کند، رشد مقدار فشار صوت انتقال یافته به سیال محسوس‌تر است. البته با افزایش ضخامت محدودیت‌های دیگری از قبیل افزایش وزن به وجود خواهد آمد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ اثر تغییر ضخامت برای مواد مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد حتی در فرکانس‌های بالا نیز رفتار بسیار مشابهی دارند. برای هر سه ماده تا حدود فرکانس ۴۰۰۰ هرتز ضخامت تاثیر چندانی در فشار آکوستیکی ندارد و در فرکانس‌های بالاتر با افزایش ضخامت پاسخ آکوستیکی بهتر می‌گردد. با بررسی نمودارها در شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ مشخص می‌شود که افزایش ضخامت در کامپوزیت کربن-اپوکسی در محدوده وسیع تری از فرکانس (حدود ۳۰۰۰ هرتز به بالا) تاثیر محسوس دارد. ولی در کامپوزیت آرامید-اپوکسی تا فرکانس حدود ۵۰۰۰ هرتز افزایش ضخامت تاثیر چندانی در فشار آکوستیکی ندارد. کمترین تاثیر ضخامت مربوط به کامپوزیت شیشه-اپوکسی است که تا فرکانس حدود ۸۰۰۰ هرتز تاثیر افزایش ضخامت محسوس نیست.

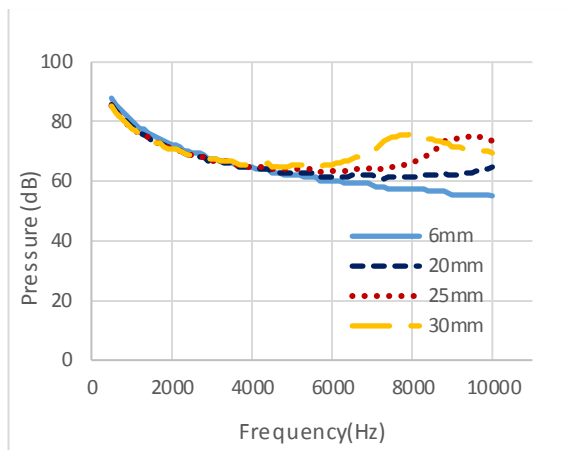
۴. بحث

۴-۱. اثر ضخامت بر عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار

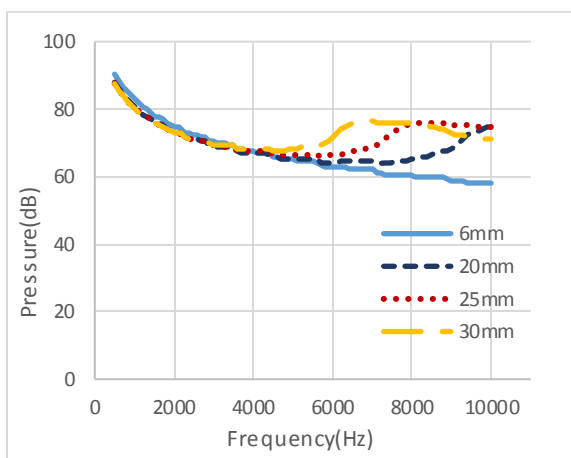
در این مرحله اقدام به بررسی اثر ضخامت پوسته محافظ سونار در انتقال صوت برای مواد مختلف شده است. در این



شکل ۱۳. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته کربن-اپوکسی

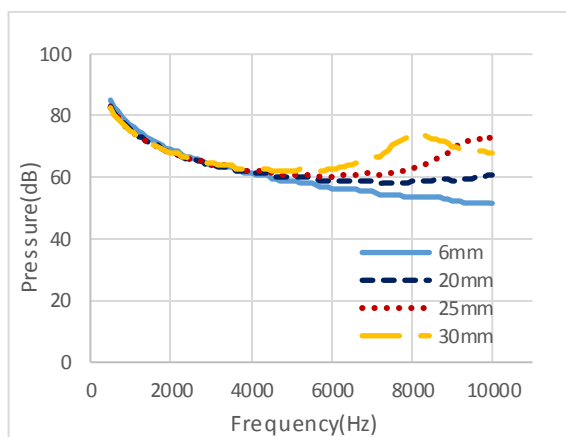


شکل ۱۰. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته آلومینیومی

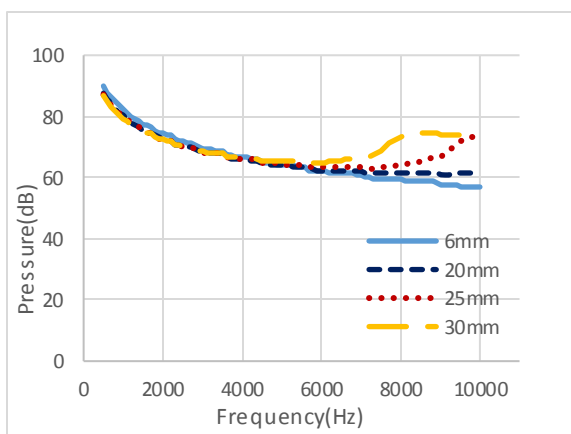


شکل ۱۴. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته گرافیت-

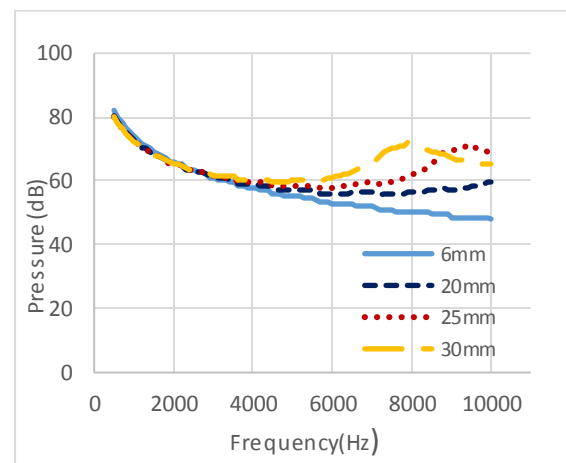
اپوکسی



شکل ۱۱. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته تیتانیومی

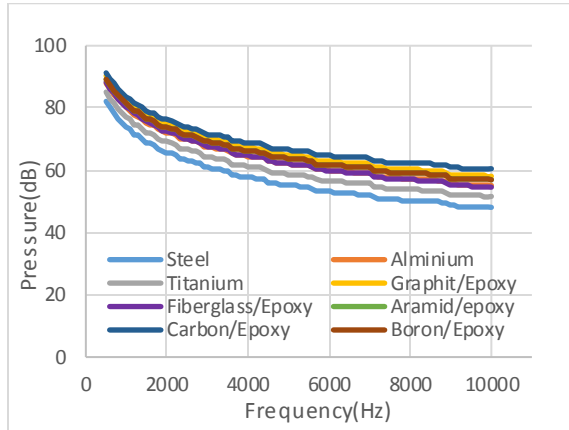


شکل ۱۵. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته آرامید-اپوکسی

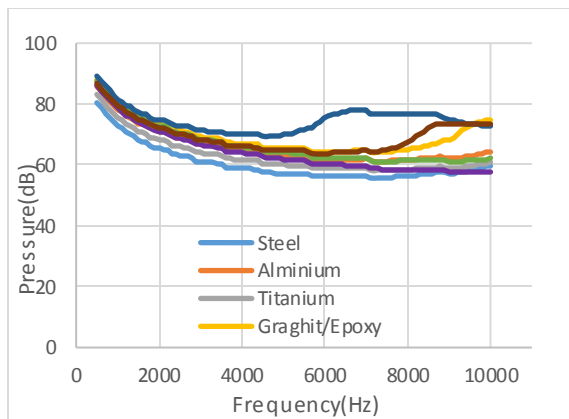


شکل ۱۲. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته فولادی

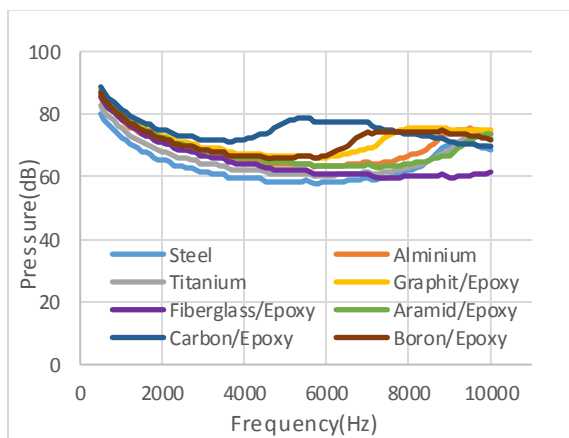
بهتری داشته است. از نمودارهای ارائه شده در شکل های ۱۹ تا ۲۱ مشاهده می گردد که با افزایش ضخامت محدوده فرکانسی برتری محسوس کربن- اپوکسی از ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰ هرتز به محدوده ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز کاهش یافته است.



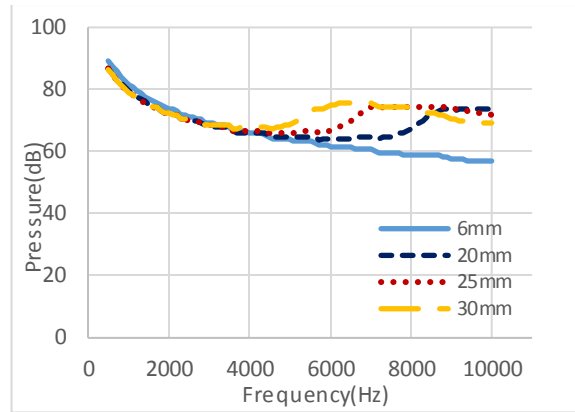
شکل ۱۸. اثر جنس بر عملکرد صوتی پوسته در ضخامت ۶ میلی متر



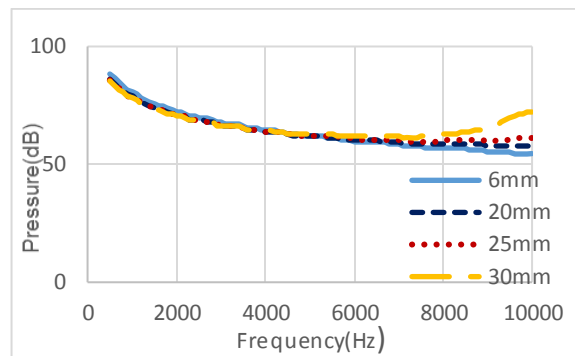
شکل ۱۹. اثر جنس بر عملکرد صوتی پوسته در ضخامت ۲۰ میلی متر



شکل ۲۰. اثر جنس بر عملکرد صوتی پوسته در ضخامت ۲۵ میلی متر



شکل ۱۶. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته برن- اپوکسی

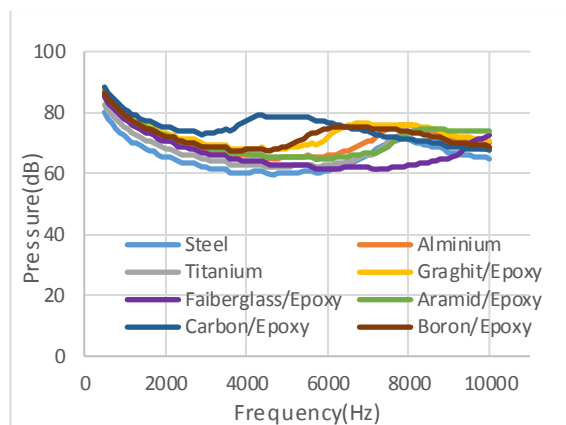


شکل ۱۷. تاثیر ضخامت بر روی فشار صوت برای پوسته شیشه- اپوکسی

۴-۲. اثر جنس پوسته محافظ سونار

گام بعد بررسی اثر جنس بر عملکرد صوتی پوسته است. برای این منظور اقدام به تحلیل صوتی پوسته محافظ سونار در یک ضخامت واحد با جنس های مختلف شده است. در زیر به ارائه نتایج این تحلیل برای چهار ضخامت ۶، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی متر و ۸ جنس معرفی شده پرداخته خواهد شد. با توجه به شکل ۱۸ مشاهده می گردد که در همه مواد مورد بررسی در ضخامت کم (۶ میلی متر) با افزایش فرکانس، فشار آکوستیکی کاهش می یابد. با افزایش ضخامت به ۲۰ میلی متر برای کامپوزیت کربن- اپوکسی بیشترین فشار آکوستیکی ثبت شده است. این برتری به خصوص در محدوده فرکانسی حدود ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰ هرتز واضح تر می باشد (شکل ۱۹). با توجه به شکل های ۲۰ و ۲۱ با افزایش بیشتر ضخامت کامپوزیت های آرامید- اپوکسی و شیشه- اپوکس نیز در فرکانس های بالا فشار آکوستیکی افزایش یافته ثبت نموده اند؛ هر چند در مجموع کامپوزیت کربن- اپوکسی نتایج

(۱۷) بیانگر این مطلب است که با افزایش ضخامت عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار در فرکانس‌های بالا بهبود پیدا می‌کند. به طوری که برای پوسته نازک (۶ میلی متر) با افزایش فرکانس صوت، شفافیت صوتی پوسته برای تمام مواد کاهش می‌یابد، اما برای پوسته‌های با ضخامت بالاتر با افزایش فرکانس، شفافیت صوتی پوسته برای بیشتر مواد بهبود پیدا می‌کند که البته این بهبود عملکرد برای تمام مواد یکسان نیست. با مشاهده نتایج حاصل از تحلیل جنس (شکل‌های ۱۸ تا ۲۱) نیز می‌توان گفت به طور میانگین شفافیت صوتی کربن-اپوکسی و گرافیت-اپوکسی بهتر از مواد دیگر و شفافیت صوتی فولاد ضعیف‌تر از ۷ ماده دیگر می‌باشد. در بین فلزات نیز آلومینیوم عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت انتخاب جنس و ضخامت پوسته محافظ سونار باید بر اساس بازه فرکانسی عملیاتی سونار صورت بگیرد. عملکرد صوتی مواد مختلف در قبال تغییر فرکانس و همچنین تغییر ضخامت، متفاوت است. در بازه فرکانس پایین (۵۰۰ هرتز تا ۴۰۰۰ هرتز) این تغییرات ناچیز است. اما در بازه فرکانس میانی و فرکانس بالا عملکرد مواد دچار دگرگونی می‌شود. این دگرگونی عملکرد منجر می‌شود که نتوان با قاطعیت در مورد عملکرد صوتی یک ماده صحبت کرد و برای بیان قطعی جنس و ضخامت مناسب برای یک نمونه پوسته محافظ سونار باید بازه فرکانسی سونار عملیاتی سونار مشخص باشد. البته خصوصیات سازه‌ای دیگر از قبیل مقاومت به خوردگی، وزن و استحکام و همچنین محدودیت‌های ساخت و مونتاژ نیز در انتخاب جنس پوسته محافظ سونار نیز حائز اهمیت است.



شکل ۲۱. اثر جنس بر عملکرد صوتی پوسته در ضخامت ۳۰ میلی‌متر

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به صحت سنجی و اعتباربخشی به تحلیل انرژی آماری نرم افزار VA One پرداخته شد. برای این منظور یک ورق آلومینیومی با مشخصات معلوم به عنوان مدل انتخاب شد. با تحلیل صوتی این ورق در بازه فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰۰ هرتز به دو روش ترکیبی و انرژی آماری و مقایسه نتایج به دست آمده، مشخص شد که:

- نتایج ناشی از تحلیل صوتی ورق به دو روش ترکیبی و انرژی آماری در فرکانس‌های بالا بر هم منطبق است.
- فشار صوت منتقل شده به سیال ناشی از ارتعاش ورق در فرکانس‌های بالا مستقل از شرایط مرزی است.
- فشار صوت منتقل شده به سیال ناشی از ارتعاش ورق در فرکانس‌های بالا مستقل از محل اعمال نیروی ورق است.

پس از تأیید نتایج خروجی از نرم‌افزار VA One ناشی از تحلیل انرژی آماری، به تحلیل صوتی یک نمونه پوسته محافظ سونار پرداخته شد. تحلیل با تحریک واحد (1Pa) از نوع پخش و در بازه فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰۰ هرتز برای یک نمونه پوسته محافظ سونار صورت گرفت. برای این کار ابتدا تأثیر نوع تحریک بررسی شد و سپس به بررسی اثر ضخامت و جنس پوسته بر عملکرد صوتی پوسته محافظ سونار پرداخته شد. در این بررسی ۸ جنس (۵ ماده کامپوزیت و ۳ ماده همگن) و برای هر جنس ۴ ضخامت مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها (شکل‌های ۱۰ تا

مراجع

- [1] Lyon RH. Statistical energy analysis of dynamical systems. Theory and Applications. M.I.T. Press: 1975.
- [2] White RG, Walker JG. Noise and Vibration. Book Review: Applied Acoustics. 1982. vol.17.
- [3] Hodges CH, Woodhouse J. Theories of noise and vibration transmission in complex structures. Reports on Progress in Physics. 1986 Feb;49(2):107.
- [4] Larko JM, Cotoni V. Vibro-acoustic Response of the NASA ACTS Spacecraft Antenna to Launch

6. Internal Loss Factor (Damping)
7. Structural
8. Free
9. Pin
10. Diffuse Acoustic Field (DAF)
11. Propagation Wave Field (PWF)
12. Semi-Infinite Fluid
- Acoustic Excitation. Cleveland, Ohio: NASA; 2008.
- [5] Zhang L, Blanchet D. Modeling vibro-acoustical behavior of cockpit module using statistical energy analysis (SEA) method. The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering; 2002 Aug 19; Dearborn, MI, USA.
- [6] Zhang J, Xiao X, Sheng X, Zhang C, Wang R, Jin X. SEA and contribution analysis for interior noise of a high speed train. Applied Acoustics. 2016 Nov 1;112:158-70.
- [7] یمانی ابوالحسن، شعبانی مطلق میثم، هاشمی نژاد سیدمحمد. بررسی خصوصیات آکوستیکی ورق‌های متغیر تابعی (FGM) با استفاده از روش انرژی آماری. دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران؛ اسفند ۱۳۸۹؛ تهران، ایران.
- [8] شجاعی فرد محمدحسن، طالبی روح الله، امیرپور ملا مائه. بررسی افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور با استفاده از مواد متخلخل عایق صوتی به روش تحلیل انرژی آماری. فصلنامه تحقیقات موتور. ۱۳۸۹: ۲۹:(۱۹)۶.
- [9] Norton MP, Nelson FC. Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. 2nd edition. Cambridge University Press; 2003.
- [10] Berry A, Guyader JL, Nicolas J. A general formulation for the sound radiation from rectangular, baffled plates with arbitrary boundary conditions. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990 Dec;88(6):2792-802.
- [11] Lomas NS, Hayek SI. Vibration and acoustic radiation of elastically supported rectangular plates. Journal of Sound and Vibration. 1977 May 8; 52(1):1-25.
- [12] VA One [computer program], Version 2016. Material Library. Orthotropic solids. Paris, France, ESI Group; 2016.

پی‌نوشت‌ها

1. Lyon
2. Hodges
3. Woodhouse
4. Modal Density
5. Coupling Loss Factor