شبیه‌سازی عددی پوشش های ضد اکو حفره دار با استفاده از ترکیب روشهای اجزاء محدود و کانال آکوستیکی

سید حمید سهرابی[۱]، محمدجواد کتابداری[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *s.h.sohrabi@aut.ac.ir*
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *ketabdar@aut.ac.ir*

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
پوشش ضداکو
جاذب صوتی
ضریب کاهش اکو
انتشار موج
روش اجزاء محدود

چکیده

عملکرد جذبی پوشش های ضداکو به خواص مواد، ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده و همچنین اندازه و چگالی توزیع حفره‌ها بستگی دارد. در این مقاله یک روش طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی با ترکیب روش المان محدود و روش کانال آکوستیکی ارائه شد. آنالیز پوشش های ضداکو، تحت برخورد موج صفحه‌ای با زاویه فرود عمودی انجام شده است. در این روش با در نظر گرفتن یک سلول واحد از پوشش ضداکو و در نظر گرفتن دو کانال سیال در طرفین آن، مشخصات انعکاسی و ضریب انتقال صوت پوشش ضداکو با استفاده از تئوری کانال آکوستیکی محاسبه گردید. جهت صحت سنجی نتایج از داده های تجربی در دسترس این زمینه استفاده شد. همچنین یک کد شبیه‌سازی پوشش ضداکو در نرم‌افزار ANSYS ایجاد شد. در نهایت با استفاده از این کد و مدل ارائه شده، رفتار ارتعاشاتی-آکوستیکی پوشش‌های ضداکو بررسی شد. نتایج نشان داد که ضریب انتقال صوت برای پوشش با حفره استوانه ای نسبت حفره کروی دارای مقدار بیشتری است. همچنین برخلاف ضریب انتقال، برای همه فرکانس‌های بالاتر از ۱۵۰۰ هرتز، وجود حفره استوانه‌ای شکل، کاهش انعکاس بیشتری داشته و در نتیجه برای بهبود عملکرد آکوستیکی بهتر از حفره کروی شکل است.

Numerical Simulation of Anechoic Coating by Combining FEM and ADM

Sayyed Hamid Sohrabi[1], Mohammad Javad Ketabdari[2*]

[1] PhD student, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of technology; s.h.sohrabi@aut.ac.ir
[2] Associate Professor, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of technology; ketabdar@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 2 Jul. 2017
Accepted: 22 Sep. 2017

Keywords:
Anechoic coating
Absorption layer
Echo reduction coefficient
Wave propagation
Finite element method

ABSTRACT

The absorption performance of anechoic coatings depends on the material properties, layer thicknesses and cavity distribution density and cavity size. In this paper a design method based on numerical simulation was presented by combining FEM and acoustic duct method (ADM). Analyzing of anechoic coatings was performed under active sonar impinging plane wave by normal incident angle. In this approach considering a unit cell of anechoic coating and two ducts of the fluid on its both sides, the reflection characteristics, transmission and reflection coefficients of anechoic coating were calculated using acoustic duct theory. Validation was performed by comparing the results of simulation with the available experimental data. Also a design code in ANSYS software was developed.

Finally using this code and the proposed model, the acoustical behavior of anechoic coatings was investigated. The results show that sound transmission coefficient for coating with cylindrical cavity is larger than that of spherical cavity. Furthermore unlike the transmission coefficient, for all frequencies upper than 1500 Hz, coating with cylindrical cavity has a greater echo reduction and therefore its anechoic performance is better than that of spherical cavity.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

۱ - مقدمه

پوشش خارجی زیردریایی نظامی باید قابلیت جداسازی و تضعیف نوفه بدنه[۱] را داشته باشد. همچنین خاصیت ضد اکو در مقابل امواج سونار دشمن از مشخصات دیگر این پوششها است. بنابراین دو ویژگی یا دو ماده مانع صوت[۲] و ماده ضد انعکاس[۳] برای رسیدن به این هدف مورد نیاز است[۱].

طرح ایده آل برای ماده مانع صوت یک لایه نازک هوا بین بدنه و آب دریا است که به دلیل اختلاف امپدانس زیاد بین آب و هوا مانع ورود نوفه بدنه به آب دریا می‌گردد. اما در عمل نمی‌توان این لایه نازک هوا را ایجاد کرد و از موادی استفاده می‌شود که دارای حفره‌های هوایی یا متخلخل باشند. چگالی این مواد نزدیک به آب دریا است و از جنس الاستومرهای با میرایی بالا هستند. این مواد مانع صوت معمولاً به دو گروه تقسیم می‌گردند:

- مواد با حفره‌های میکرو
- مواد با حفره‌های ماکرو

در گروه اول میکرو سلول‌های حاوی هوا به طور منظم در شبکه گسترده شده‌اند. نوع حفره‌ها به روش‌های مختلفی از جمله واکنش شیمیایی که با تولید هوا و گاز همراه است و یا اضافه کردن ذرات ریز و مخلوط کردن آن‌ها قبل از فرایند پخت الاستومر، قابل تنظیم است. در گروه دوم، حفره‌ها، بزرگ و به شکل‌های مختلفی است که در فرایند قالب‌گیری و یا ماشین‌کاری بعد از پخت کامل الاستومر ایجاد می‌گردد. در هر دو گروه گفته شده حفره‌های هوا بایستی کاملاً بسته باشند و امکان نفوذ آب به آن‌ها نباشد در غیر این صورت کارایی خود را در عمق بالا از دست می‌دهند.

در طراحی این مواد، پارامترهای مختلفی دخیل هستند: پارامترهای خود ماده (مانند ضخامت، چگالی و تراکم‌پذیری هیدرواستاتیک) و پارامترهای کاری (مانند فرکانس، عمق و دما). تکنولوژی‌های مختلفی بایستی با هم ترکیب گردند تا ماده مورد نظر طراحی و ساخته شود. در کاربرد زیردریایی، فشار آب در عمقی که زیردریایی حرکت می‌کند بر روی عملکرد آکوستیکی مواد تأثیرگذار است. به همین دلیل معمولاً برای هر کلاس زیردریایی پوشش و ماده مخصوص به آن، برای برآورده نمودن شرایط زیر، طراحی می‌گردد:

- همخوانی با تغییرات بالاست زیردریایی (جبران کاهش حجم پوشش هنگام پایین رفتن)
- داشتن بیشترین کارایی آکوستیکی در عمق مورد نظر

بر خلاف مواد مانع صوت که معمولاً اختلاف امپدانس قابل توجهی با آب دریا دارند، مواد ضد اکو بایستی امپدانس نزدیکی با آب دریا داشته و همچنین بایستی اتلاف یا میرایی قابل توجهی در اثر انتشار موج در آن‌ها دیده شود. برای این دسته از مواد ضد اکو ایجاد هماهنگی بین تراکم‌پذیری و کارایی ضد اکو راحت‌تر است چرا که سرعت انتشار موج در آن‌ها به اندازه مواد مانع شونده پایین نیست. معمولاً در این مواد برای دستیابی به عملکرد مورد نظر، امپدانس به طور پیوسته در جهت ضخامت ماده تغییر می‌کند[۲].

برای دستیابی به کارایی جذب انرژی بایستی از اتلاف مرتبط با مدول برشی دینامیکی مواد ویسکوالاستیک استفاده نمود. موج آکوستیکی ورودی فشاری است که بایستی به موج عرضی (برشی) تبدیل گردد. نکته دیگر اینکه ضخامت ماده ضد اکو بایستی قابل مقایسه با طول موج آکوستیک منتشر شده در آن باشد تا جذب انرژی امکان‌پذیر باشد.

نسل فعلی پوشش‌های آکوستیکی از لایه‌های مختلفی استفاده می‌کنند که هم خاصیت ضد اکو و هم خاصیت تعدیل[۴] نوفه داخلی را داشته باشد. زیردریایی‌های روسی و انگلیسی از این ساختار چندلایه‌ای استفاده می‌کنند. لایه داخلی به گونه‌ای طراحی می‌شود که نوفه‌های داخلی که معمولاً فرکانس مشخصی دارد را تعدیل کرده و انرژی آن را به گرما تبدیل نماید. به این ترتیب قابلیت سونار غیرفعال دشمن در شناسایی کاهش می‌یابد. با تنظیم جنس پلیمر، ضخامت آن و حفره‌های هوایی از یک طرف و جنس لایه جرمی از طرف دیگر، می‌توان در محدوده فرکانسی مورد نظر، باعث کاهش نوفه داخلی انتقالی به پوسته خارجی شد. لایه خارجی به گونه‌ای طراحی می‌شود که به صورت ضد اکو عمل کند و سیگنال‌های سونار فعال را در فرکانس‌های اصلی که سونارهای دشمن عمل می‌کند، جذب کند. ضخامت این لایه بستگی به فرکانس سونار دارد و معمولاً بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر بوده و در شرایطی ممکن است به ۱۰۰ میلی‌متر نیز برسد[۳].

۲ - مکانیزم جذب و انعکاس صدا

عملکرد آکوستیکی یک جاذب صدا با استفاده از ضرایب انعکاس صوت معادله (۱) و انتقال صوت معادله (۲) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

$$R = \frac{p_{ref}}{p_{in}} = \left|\frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0}\right| \quad (۱)$$

$$T = \frac{p_{trans}}{p_{in}} \quad (۲)$$

که در این روابط p_{ref} و p_{trans} به ترتیب امواج منعکس شده و منتقل شده در طرف‌های فرود و گسیل پوشش جاذب صدا هستند که تحت موج فرودی p_{in} قرار گرفته است. علامت بار[۵] نشان‌دهنده‌ی دامنه[۶] است. Z_c امپدانس ویژه ورودی در سطح مشترک (سطح جلویی) بین پوشش جاذب و محیط پیرامون (سیال) در طرف فرود موج است که به صورت نسبت فشار صوت به سرعت ذره‌ای یا سرعت ارتعاشات سازه‌ای در سطح بیرونی پوشش جاذب تعریف می‌شود. همچنین $Z_0 = \rho_0 c_0$ امپدانس مشخصه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

سیال، ρ_0 و c_0 هم به ترتیب چگالی سیال و سرعت صوت در سیال هستند.

$$Z_c = \frac{p_{ref} + p_{in}}{V} = \frac{p}{i\omega u} \quad (۳)$$

که در این رابطه u و V به ترتیب جابجایی و سرعت عمودی پوشش جاذب هستند. همچنین p فشار آکوستیکی مختلط است که شامل فشارهای آکوستیکی فرودی و انعکاسی است. $\omega = 2\pi f$ هم فرکانس زاویه‌ای است که در این رابطه f همان فرکانس بر حسب Hz است. نماد موهومی هم j ($j = \sqrt{-1}$) است.

از معادله (۱) مشخص می‌شود که برابر بودن امپدانس ویژه ورودی پوشش جاذب (Z_c) و امپدانس مشخصه سیال (Z_0) باعث حذف انعکاس از پوشش جاذب می‌شود. در حالت کلی یک بخشی از موج صوتی فرودی[۷] به دلیل نامساوی بودن Z_c و Z_0 منعکس می‌شود و بقیه آن به درون پوشش جاذب منتقل می‌شود[۴].

۳- استخراج ضرایب انعکاس و انتقال به روش عددی

دو پارمتری که برای کمیت بخشیدن به دو پدیده مهم مربوط به پوشش‌های جاذب صوت به کار برده می‌شوند، یکی کاهش اکو[۸] است که اثر پوشش را در کاهش انعکاس صوت نشان می‌دهد و دیگری افت انتقال[۹] است که کارایی پوشش را در جلوگیری از انتقال صوت نشان می‌دهد. بنابراین مراحل تحلیل این پوشش‌های ویسکوالاستیک به صورت زیر است[۵-۷] :

- با در نظر گرفتن تقارن و تناوب در توزیع حفره‌های تعبیه شده در پوشش‌های جاذب، بخشی از ساختار پوشش که بتواند بیان کننده کل ساختار پوشش جاذب باشد، به همراه اعمال شرایط مرزی مناسب، مدل می‌شود (یک سلول واحد).
- سلول واحد برای تحلیل به روش المان محدود توسط المان‌های ۸ گره ای شبکه بندی می‌شود.
- ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی با استفاده از مجزاسازی معادلات دیفرانسیل حرکت سیستم به روش فرم ضعیف[۱۰] و با در نظر گرفتن جنس مواد، تشکیل شده که البته این مرحله توسط نرم افراز انجام می‌شود.
- برای در نظر گرفتن تقارن نواحی، شرایط مرزی مناسب از نوع جابجایی در نظر گرفته شده است.
- شرط مرزی امپدانس برای شبیه‌سازی ناحیه نیمه‌بی‌نهایت آب در طرف پایین‌دست و بالادست پوشش جاذب اعمال می‌شود.
- یک بارگذاری از نوع فشار با اندازه دامنه‌ی واحد فشار روی سطح بیرونی پوشش جاذب یا در یک مقطع از کانال بالادست، برای شبیه‌سازی موج صوتی فرودی اعمال می‌شود. توجه شود که محدودیتی برای اندازه دامنه فشار اعمالی وجود ندارد. زیرا در نهایت نسبت اندازه دامنه موج‌های انعکاسی و انتقالی برای ارزیابی ضرایب انعکاس و جذب مورد استفاده قرار خواهد گرفت.
- با حل معادلات حرکت سیستم توسط حلگر نرم‌افزار، مقادیر مختلط جابجایی‌های گره ای به دست می‌آیند.
- مقادیر مختلط فشارها و سرعت‌های گره ای متناظر، با استفاده از نتایج مرحله قبل، حاصل می‌شوند. همه این مقادیر در مطابقت با امواج ایستا[۱۱] در نواحی به دست می‌آیند.
- از مقادیر سرعت‌های ذره‌ای در جهت عمود بر سطح پوشش جاذب (در جهت انتشار موج) متوسط گیری به عمل می‌آید (سرعت ذره‌ای متوسط در جهت انتشار موج).
- امپدانس آکوستیکی ویژه ورودی در جهت انتشار موج در سطح برخورد موج[۱۲] صوتی (سطح مشترک یا سطح جلویی بین پوشش جاذب و محیط سیال در طرف فرود موج) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_c = \frac{p_{st}}{V_z} \quad (۴)$$

که در این رابطه p_{st} فشار ورودی (موج ایستا) در سطح برخورد و V_z متوسط سرعت ذره‌ای[۱۳] یا سرعت ارتعاشات سازه‌ای[۱۴] در سطح بیرونی پوشش جاذب در جهت انتشار موج فشاری (صوتی) هستند.

- با استفاده از امپدانس آکوستیکی ورودی و امپدانس مشخصه سیال، ضریب انعکاس پوشش جاذب طبق معادله (۱) به دست می آید.
- چون فشارهای موج ایستا و سرعت‌های ذره‌ای با استفاده از مدل المان محدود به دست می‌آید، مؤلفه‌های موج در حال انتشار به صورت زیر هستند[۷]:

$$p_{st} = p_{in} + p_{ref} = p_{in}(1 + R) \quad (۵)$$

برای انتهای غیر بازتابنده در هر مقطع، بار ناشی از امپدانس در آن نقطه با امپدانس مشخصه سیال برابر است و درنتیجه:

$$p_0 = p_{trans} \quad (۶)$$

که در این رابطه p_0 و p_{trans} به ترتیب فشار موج ایستای منتقل شده و مؤلفه موج رو به جلو از فشار منتقل شده هستند. در نهایت ضریب انتقال فشار می‌تواند به فرم معادله زیر نوشته شود:

$$T = \frac{p_{trans}}{p_{in}} = \frac{p_{trans}}{p_{st}}(1 + R) \quad (۷)$$

- با استفاده از ضریب انعکاس پوشش جاذب، دو پارامتر ER و TL به صورت معادلات زیر حاصل می‌شوند:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

$$ER = 20\,log_{10}\left|\frac{1}{R}\right| = 20\,log_{10}\left|\frac{p_{in}}{p_{ref}}\right| \quad (۸)$$

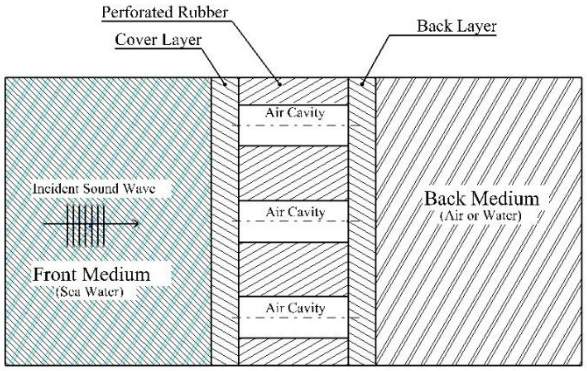
$$TL = 20\log_{10}\left|\frac{1}{T}\right| = 20\log_{10}\left|\frac{p_{in}}{p_{trans}}\right| = 20\log_{10}\left|\frac{p_{st}}{(1+R)p_{trans}}\right| \quad (۹)$$

که در این روابط p_{trans}، p_{in} و p_{st} به ترتیب فشار موج ایستای منتقل شده، مؤلفه موج فشاری فرودی و فشار موج ایستا در سطح پوشش جاذب هستند. این روابط با فرض برخورد عمود موج به لایه جاذب (با ابعاد بینهایت) است.

۴- شرایط مرزی سلول واحد

برای سلول واحد مجزا شده در مدل المان محدود و ایجاد یک موج آکوستیکی صفحه‌ای روی پوشش جاذب صدا، یک جابجایی یکنواخت u_z، روی سطح بالای کانال بالادست اعمال می‌شود. همچنین برای ایجاد وضعیت ضد اکو[۱۵]، شرط مرزی جذب کامل در انتهای کانال پایین‌دست و بالادست اعمال می‌شود، که در این صورت در کانال پایین‌دست تنها موج صوتی منتقل شده[۱۶] وجود خواهد داشت[۴و۸].

از طرف دیگر در شکل ۱ ۱ نمایشی از یک جاذب صوتی حفره دار چند لایه نشان داده شده است. موج‌های صفحه‌ای هارمونیک به صورت عمود از سمت سیال در جهت محور z به روی سطح پوشش جاذب فرود می‌آید.

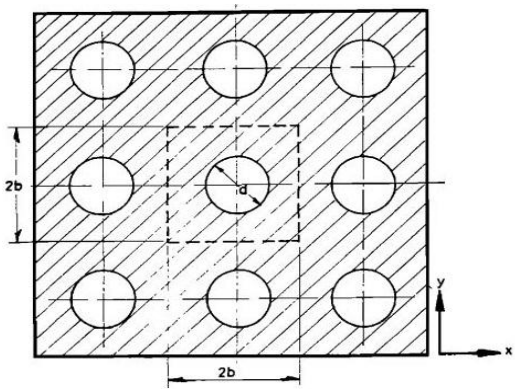


شکل ۱- نمایشی از جاذب‌های صوتی حفره دار چند لایه

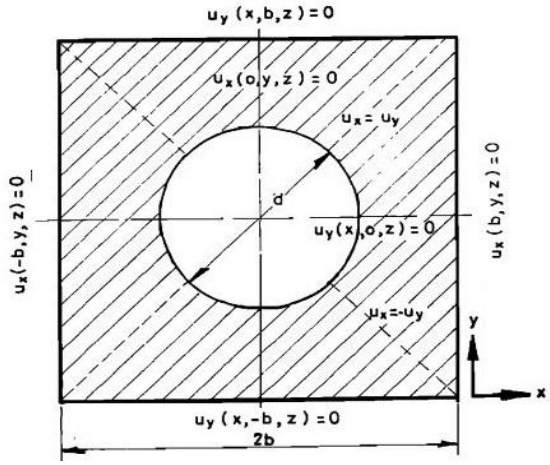
شکل ۲ ۲ مقطعی از لایه حفره‌دار از پوشش های نوع آلبریچ[۱۷] را نشان می‌دهد. به دلیل ساختار تناوبی مضاعف، ناحیه اطراف یک حفره که می‌تواند به عنوان یک سلول واحد در نظر گرفته شود و خود را در جهت محورهای x و y به صورت متناوب تکرار کند، جهت مطالعه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). شرایط مرزی لبه‌های سلول واحد به دلیل فرض تقارن مدل و برخورد موج صفحه‌ای هارمونیک به صورت عمودی و در جهت محور z به پوشش جاذب به صورت معادلات زیر هستند:

$$\begin{aligned} u_x(x,b,z) &= u_x(x,-b,z) \\ u_x(b,y,z) &= u_x(-b,y,z) = 0 \\ u_y(b,y,z) &= u_y(-b,y,z) \\ u_y(x,b,z) &= u_y(x,-b,z) = 0 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

چون سلول واحد در هر رو جهت x و y تا $\pm\infty$ توسعه پیدا می‌کند، یک مجموعه قوی‌تری از شرایط مرزی می‌تواند روی صفحات $x=0$، $x=b$، $y=0$ و $y=b$ اعمال شود. روی این صفحات، مؤلفه عمودی سرعت ذره‌ای و در نتیجه جابجایی متناظر به دلیل لغو موج‌های آکوستیکی صفر است.



شکل ۲- نمایش مقطعی از پوشش جاذب صدا



شکل ۳- شکل سلول واحد به همراه شرایط مرزی مناسب

۵- مدل‌سازی المان محدود

در این مقاله شاخص کاهش بازتاب صدا و اتلاف انتقال برای یک پوشش جاذب، با استفاده از یک تحلیل المان محدود آکوستیکی هارمونیک به‌دست‌آمده است.

۵-۱- انتخاب المان مناسب سیال و سازه

المان‌های آکوستیکی برای مدل‌سازی محیط آکوستیکی با تغییر فشارهای کم در این نرم‌افزار تعبیه شده است. جواب در ناحیه آکوستیکی با یک متغیر فشار تعریف می‌گردد. شرط مرزی امپدانس و سطوح جاذب یا تابشگر بر روی سطوح این المان‌ها قابل تعریف است. همچنین از قابلیت‌های دیگر، المان‌های آکوستیکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

بینهایت[18] است که افزایش دقت شبیه‌سازی برای مسائلی که محیط خارجی تأثیرگذار است را نتیجه می‌دهد.

جدول ۱ فهرست چهار المان اصلی نرم‌افزار انسیس برای آنالیز آکوستیکی را به همراه ویژگی‌های این المان‌ها نشان می‌دهد. به‌طور پیش‌فرض، همه این المان‌ها دارای دو یا سه درجه آزادی جابجایی به همراه یک درجه آزادی فشاری هستند. ماتریس‌های مربوط به المان سیالی که دارای درجات آزادی جابجایی و فشاری باشد نامتقارن می‌شوند. ماتریس‌های نامتقارن نیازمند حجم ذخیره‌سازی و زمان محاسبه بیشتری نسبت به ماتریس‌های متقارن هستند. از طرفی، درجات آزادی جابجایی فقط برای المان‌های سیالی که با سازه در تماس مستقیم هستند ضروری است و می‌توان با استفاده از گزینه‌های کلیدی[19] مربوط به المان سیال، درجات آزادی جابجایی المان‌های سیالی که در تماس مستقیم با سازه نیستند را حذف کرد[11]. به‌این‌ترتیب، تعداد ماتریس‌های نامتقارن در مدل کم شده و حجم ذخیره‌سازی و زمان محاسبات کاهش می‌یابد.

وجود ماتریس‌های نامتقارن در مدل، علاوه بر افزایش زمان محاسبات، محدودیت‌های دیگری هم ایجاد می‌کند. ازجمله این‌که امکان استفاده از آنالیزهای هارمونیک و گذرای کاهش‌یافته[20] و برهم‌نهی مودها[21] وجود ندارد و تنها گزینه برای حل مسائل هارمونیک و گذرا، آنالیز کامل[22] آن‌هاست. همچنین جدول ۲ دو المان کمکی را نشان می‌دهد. این المان‌ها گاهی به همراه المان‌های اصلی Fluid29 و Fluid30 برای مدل‌سازی شرط مرزی بی‌نهایت به کار می‌روند[۹].

جدول ۱- لیست چهار المان اصلی نرم‌افزار انسیس برای آنالیز آکوستیکی[۹]

نوع المان	تعداد نودها	درجات آزادی هر گره	نوع تحلیل (کوپله)	نوع تحلیل (غیر کوپله)
Fluid29	۴	U_x, U_y, P	*	**
Fluid30	۸	U_x, U_y, U_z, P	*	**
Fluid220	۲۰	U_x, U_y, U_z, P	*	**
Fluid221	۱۰	U_x, U_y, U_z, P	*	**

*:
۱- نامتقارن یا مدل میرا
۲- هارمونیک کامل
۳- گذرای کامل

**:
۱- استاتیکی
۲- مودال
۳- هارمونیک کاهش‌یافته

جدول ۲- المان کمکی برای مدل‌سازی شرط مرزی بی‌نهایت[۹]

نوع المان	تعداد نودها	درجات آزادی هر گره	نوع تحلیل
Fluid129	۲	P	مودال، هارمونیک، گذرا
Fluid130	۴	P	مودال، هارمونیک، گذرا

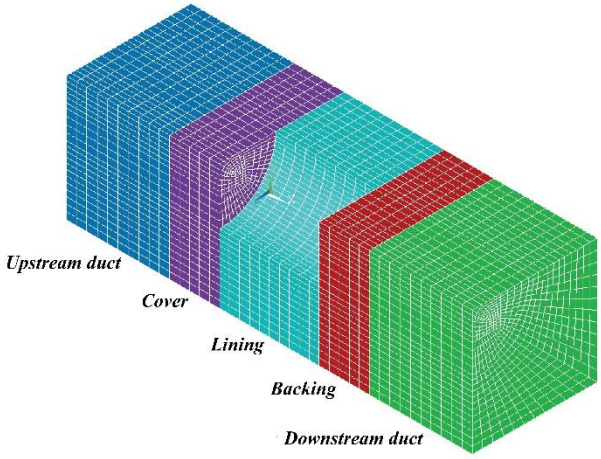
۵-۲- مدل هندسی

در این بخش مراحل مدل هندسی توضیح داده می‌شود.

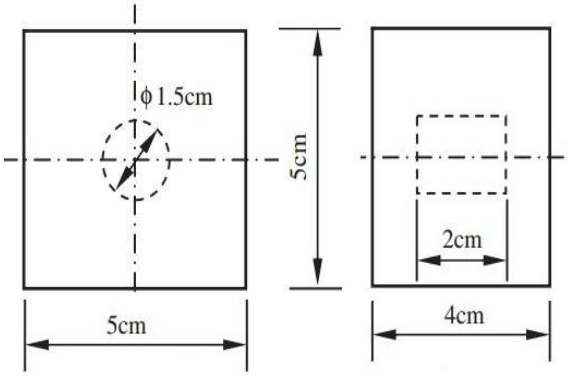
۵-۲-۱- مدل استفاده‌شده به منظور بررسی ضریب انتقال صوت

در این بخش مدل استفاده شده به‌منظور بررسی ضریب انتقال صوت تشریح شده و در ادامه مراحل مختلف شبیه‌سازی توضیح داده می‌شود.

یک مدل سه‌بعدی از نمونه‌ی آزمایشگاهی[23] مطابق تحقیق Hladky-Hennion [۸] شبیه‌سازی شده است. مطابق با شکل ۴ مدل المان محدود شامل دو کانال سیال است که توسط یک پوشش جاذب صوت چند لایه که شکل و ابعاد آن در شکل ۵ نشان داده شده است، از هم جداشده‌اند.



شکل ۴- نمایش شماتیکی از یک چهارم ساختار سه‌بعدی هندسی مدل المان محدود



شکل ۵- شکل و ابعاد مقطع پوشش جاذب

در جدول ۳ خواص مواد استفاده شده در مدل‌سازی بیان شده است.

به منظور دقیق‌تر شدن پاسخ، پرچم[24]های امپدانس در نواحی انتهای کانالهای بالادست و پایین‌دست فعال می‌شوند (این پرچم‌ها اگرچه بار واقعی نیستند، ولی سطوح جاذب صوت را نشان می‌دهند). پرچم‌های برهم‌کنش سازه و سیال (FSI) نیز به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

سطوحی که برهم‌کنش بین سیال و سازه در آن‌ها اتفاق می‌افتد اعمال می‌شوند و یک سیستم جفت[۲۵] تشکیل می‌شود.

جدول ۳- خواص مواد [۸،۴]

سیال (آب)	سیلیکون	مواد
-	۱/۸۶*۱۰^۶	ضریب الاستیسیته (E) $[pa]$
۱۰۰۰	۱۰۰۰	چگالی (ρ) $[\frac{kg}{m^3}]$
-	۰/۴۹۹۷۶	ضریب پواسون $[v]$
۱۴۸۹	-	سرعت صوت (C) $[\frac{m}{s}]$
-	۰/۱۵	ضریب اتلاف η

باید توجه داشت که کانالهای بالادست و پایین‌دست، تنها از طریق پوشش جاذب نصب‌شده دارای اتصال فیزیکی هستند و هیچ راه دیگری برای انتقال صدا از دو کانال به یکدیگر وجود ندارد. این ساختار ویژه که در اتاق‌های آزمایش وجود دارد، مانع از بروز پدیده انتقال از جانب[۲۶] می‌شود.

اغتشاش فشاری ایجاد شده در نزدیکیهای انتهای کانال بالادست و رسیدن آن به پوشش جاذب باعث ایجاد یک میدان جابجایی در نقاط مختلف آن می‌شود. با انتقال ارتعاشات به پایین‌دست پوشش جاذب، امواج فشاری شروع به تابش به فضای درون کانال پایین‌دست می‌کنند. بسته به میزان ضریب جذب در پوشش جاذب، بخشی از انرژی موج صوتی در پوشش جاذب، جذب شده و بخش دیگر به همراه موج انعکاسی از روی سطح مجدداً به فضای درون کانال بالادست بازمی‌گردد.

۵-۳- شبکه‌بندی

تحلیل رفتار صوتی پوشش جاذب در محدوده فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ هرتز انجام می‌شود. روش معمول برای شبکه‌بندی یک مدل آکوستیکی، استفاده از اندازه المان متناظر با بالاترین فرکانس بازه موردنظر است[۱۲]. بررسی حساسیت مسئله به شبکه‌بندی[۲۷] و تعیین شبکه‌های بهینه برای هر بازه فرکانسی در بخش ۲-۰۹ آورده شده‌اند.

۵-۴- شرایط مرزی روی مدل المان محدود

برای بارگذاری در روش المان محدود، بار می‌تواند روی گره یا روی المان اعمال شود. بارهای اعمال‌شده به یک گره، با یکی از درجات آزادی آن مرتبط می‌شوند و در ارتباط مستقیم با المان‌های آن نیستند[۲۸]. در مقابل بارهای واردشده به المان، همواره به‌طور مستقیم به یک یا چند المان مشخص وارد می‌شوند. حتی اگر این بارها از طریق تعدادی گره به این المان‌ها اعمال شود. بارگذاری روی المان به‌صورت بارهای سطحی[۲۹]، بارهای حجمی[۳۰] و بارهای اینرسی[۳۱] انجام می‌شود.

به جز موارد ذکرشده برای بارگذاری روی المان، برخی از المان‌ها دارای پرچم هستند. پرچم می‌تواند به یک سطح یا یک المان مرتبط باشد و به ترتیب به‌صورت بار سطحی و بار حجمی اعمال شود. بایستی توجه داشت علامت پرچم، یک بارگذاری واقعی به شمار نمی‌رود و تنها نشان‌دهنده انجام نوع خاصی از محاسبات روی المان است. مثلاً با فعال کردن پرچم برهم‌کنش سازه و سیال[۳۲]، یک وجه مشخص از المان آکوستیکی به‌عنوان واسط بین بخش سازه و بخش سیال مدل تعریف می‌شود[۱۳]. بارگذاری‌های موجود در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱- ارتعاش یک صفحه دیافراگم در کانال بالادست
۲- اعمال شرایط مرزی مکانیکی در تکیه‌گاه‌ها
۳- تعریف سطح واسط بین سازه و سیال برای انجام محاسبات مربوط به برهم‌کنش سازه و سیال

تعریف سطوح جذب برای انجام محاسبات مربوط به جذب انرژی صوتی در انتهای کانالهای بالادست و پایین‌دست جدول ۴ مشخصات بارگذاری‌های بالا را به همراه نوع، محل وارد شدن بار روی مدل و دستورات نرم‌افزار انسیس برای اعمال این بارگذاری‌ها نشان می‌دهد. در ادامه توضیحاتی پیرامون آن‌ها ارائه شده است[۱۴].

جدول ۴- مشخصات بارگذاری‌های به‌کاررفته در این گزارش

محل اعمال	دستور انسیس	نوع بارگذاری	بارگذاری
اطراف پوشش جاذب	D	بارگذاری گره‌ای	شرایط مرزی مکانیکی
همه المان‌های سیال در ناحیه برهم‌کنش سازه و سیال	SF	بارگذاری المانی و بارگذاری سطحی (پرچم FSI)	کوپلینگ المان‌های سازه و سیال
	SF	بارگذاری المانی و بارگذاری سطحی (پرچم $IMPD$)	جذب انرژی صوت

۶- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی عملکرد آکوستیکی پوشش جاذب و صحت نتایج حاصل از تحلیل المان محدود یک مدل سه‌بعدی آکوستیک-ارتعاشاتی[۳۳]، به‌وسیله‌ی مقایسه با نتایج آزمایشگاهی[۸] پرداخته می شود.

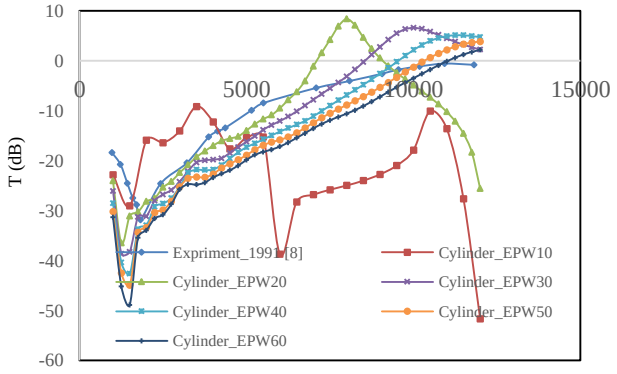
۶-۱- آزمایش تجربی و بررسی حساسیت شبکه‌بندی

مدل تجربی[۳۴] مورد نظر به همراه ویژگی‌های هندسی و شرایط مرزی و همچنین نکات مهم مربوط به مدل المان محدود آن در بخش ۵ توضیح داده شده‌اند. نتایج حاصل از مدل المان محدود با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

مقدار بزرگ‌تر ضریب انتقال در هر فرکانس به معنی وارد شدن انرژی موج صوتی به درون لایه جاذب است و اگر لایه جاذب دارای خواص مناسب جذبی باشد، می تواند به عنوان یک لایه دارای انعکاس کمتر در آن فرکانس عمل کند. در این حالت انتقال فشار صوتی (صدا) از کانال بالادست به کانال پایین‌دست از طریق پوشش جاذب بین آن‌ها بیشتر است. در شکل ۶ مقادیر ضریب انتقال برای مدل‌های عددی با اندازه‌های مختلف شبکه بندی و مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای تحلیل‌های آکوستیکی و ارتعاشاتی، برای مطالعه چگالی شبکه[۳۵] توصیه می‌شود که بر اساس تعداد المان در واحد طول موج[۳۶] (EPW) کار شود[۱۰] .



شکل ۶- مقایسه ضریب انتقال برای اندازه‌های مختلف شبکه بندی در مدل المان محدود

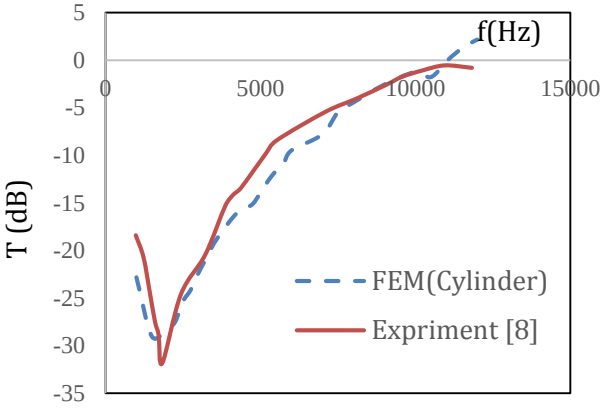
۶-۲- بحث در نتایج

از مقایسه مقادیر ضریب انتقال نشان داده شده در شکل ۶ این طور نتیجه می‌شود که اندازه شبکه اثر قابل توجهی بر مقادیر ضریب $f_{(Hz)}$ به دست آمده دارند و همان طور که انتظار می‌رفت اثر اندازه شبکه در فرکانس‌های بالا حداکثر و در فرکانس‌های پایین حداقل است. روش معمول در تحلیل مسائل ارتعاشات-آکوستیکی به روش المان محدود، به دست آوردن اندازه‌های بهینه شبکه در فرکانس‌های مختلف است. در نتیجه برای یک محدوده فرکانسی ۱۰۰۰-۲۰۰۰ هرتز، مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 10$، برای محدوده فرکانسی ۲۰۰۰-۶۰۰۰ هرتز مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 20$، برای محدوده فرکانسی ۶۰۰۰-۸۰۰۰ هرتز مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 30$، برای محدوده فرکانسی ۸۰۰۰-۹۰۰۰ هرتز مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 40$، برای محدوده فرکانسی ۹۰۰۰-۱۰۰۰۰ هرتز مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 50$، برای محدوده فرکانسی ۱۰۰۰۰-۱۲۰۰۰ هرتز مقادیر TL به دست آمده برای $EPW = 60$، نسبت به اندازه‌های دیگر شبکه بهتر هستند. بنابراین پس از این روند از تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه[۳۷]، می‌توان یک مدل شبکه بندی وابسته به فرکانس[۳۸] را ارائه داد (شکل ۷). اندازه‌های شبکه‌های بهینه متناظر با فرکانس تحریک برای این مدل، در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- توزیع اندازه‌ی المان‌ها نسبت به فرکانس تحریک

فرکانس (هرتز)	اندازه شبکه (متر)
۱۰۰۰-۲۰۰۰	$EPW = 10$
۲۰۰۰-۶۰۰۰	$EPW = 20$
۶۰۰۰-۸۰۰۰	$EPW = 30$
۸۰۰۰-۹۰۰۰	$EPW = 40$
۹۰۰۰-۱۰۰۰۰	$EPW = 50$
۱۰۰۰۰-۱۲۰۰۰	$EPW = 60$

$$Element\ size = \frac{\lambda}{EPW} = \frac{c_0/f}{EPW} \qquad (۱۱)$$



شکل ۷- مقایسه ضریب انتقال برای مدل FEM وابسته به شبکه و آزمایش تجربی[۸]

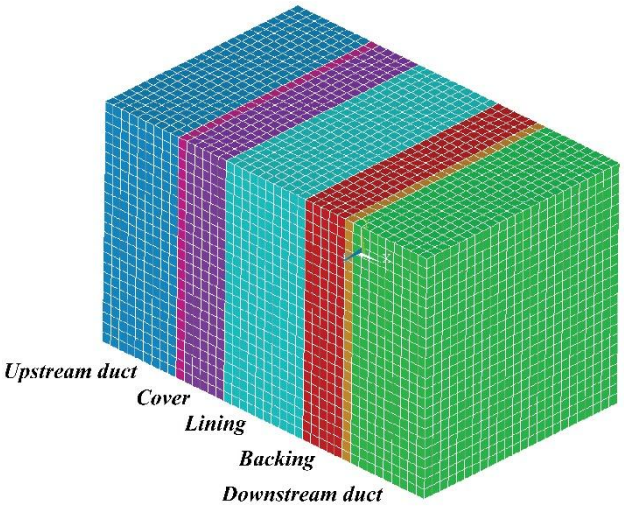
در نهایت با توجه به شکل ۷ و با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که برای اکثر فرکانس‌ها، نتایج عددی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. همچنین متوسط اختلاف بین مقادیر ضرایب انتقال حاصل از تست تجربی و مقادیر حاصل از مدل المان محدود کمتر از ۲ دسی‌بل است. در ادامه علاوه بر اثر حذف حفره موجود در پوشش جاذب، اثر تغییر هندسه حفره برای نوع مخروطی و کروی بررسی می‌شود. این بررسی جهت توسعه و بهبود در طراحی پوشش‌های جاذب، بسیار موثر است.

۶-۳- اثر حذف حفره در پوشش جاذب

در این بخش تحلیل مقادیر ضریب انتقال، برای پوشش جاذب بدون حفره میانی (شکل ۸) با استفاده از تحلیل المان محدود و مقایسه با مدل حفره‌دار انجام شده است.

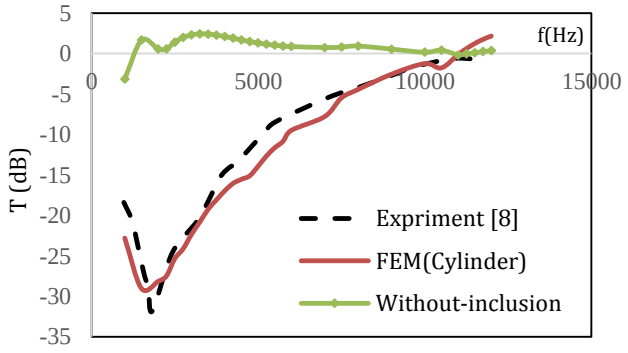
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]



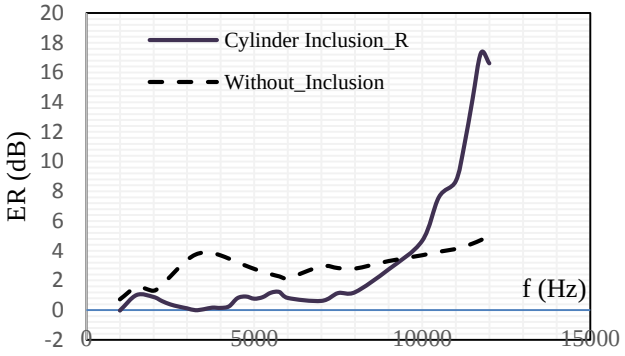
شکل ۸- مقطع برش خورده از پوشش جاذب بدون حفره به همراه کانالهای سیال

در شکل ۹ نتایج حاصل برای ضریب انتقال صدای مدل حفره‌دار به همراه مدل بدون حفره نمایش داده شده‌اند. از مقایسه‌ی نتایج مشخص می‌شود که از منظر این شاخص در همه فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۱۲۰۰ هرتز، وجود حفره استوانه‌ای به شدت باعث بهبود آکوستیکی شده است. ولی در فرکانس‌های موجود در بازه فرکانسی ۱۱۲۰۰-۱۲۰۰۰ هرتز شرایط کمی برعکس شده است که البته این اختلاف فقط در حدود ۱ دسی‌بل است.



شکل۹- مقایسه ضریب انتقال برای مدل المان محدود حفره‌دار و بدون حفره وابسته به شبکه

در شکل۱۰ نتایج حاصل برای ضریب کاهش بازتاب صدای مدل حفره‌دار به همراه مدل بدون حفره نمایش داده شده‌اند. از مقایسه‌ی نتایج مشخص می‌شود که در همه فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز، وجود حفره استوانه‌ای به شدت باعث بهبود آکوستیکی شده است. ولی در فرکانس‌های موجود در بازه فرکانس کمتر از ۱۰ کیلوهرتز شرایط برعکس شده است. درنتیجه مشاهده می‌شود که به طورکلی وجود حفره استوانه در پوشش جاذب در فرکانس های بالای ۱۰ کیلوهرتز باعث بهبود عملکرد آکوستیکی شده است، به این معنی که انتقال صدا و درنتیجه انتقال ارتعاشات به لایه پایین‌دست، کمتر صورت می‌گیرد و همچنین میزان بیشتری کاهش انعکاس وجود خواهد داشت. بنابراین در فرکانس‌های بالا می‌توان با استفاده از ماده با میرایی بیشتر عایق سازی و در نتیجه بهبود عملکرد آکوستیکی را افزایش داد که به دلیل بالا بودن هزینه محاسباتی کار کردن در فرکانس‌های بالا در این گزارش در نظر گرفته نشده است.



شکل ۱۰- مقایسه ضریب کاهش بازتاب برای مدل المان محدود حفره‌دار و بدون حفره وابسته به شبکه

۶-۴- اثر تغییر حفره موجود در پوشش جاذب از استوانه‌ای به کروی

در این بخش هدف تحلیل مقادیر ضریب انتقال، برای پوشش جاذب دارای حفره میانی کروی شکل با شعاعی برابر شعاع استوانه در نمونه آزمایشگاهی (۷/۵ میلی‌متر) است. بقیه ویژگی‌های ماده مشابه بخش ۵-۲ و شرایط مرزی مشابه با بخش ۴ هستند. همچنین مقایسه با پوشش جاذب دارای حفره میانی استوانه‌ای با استفاده از تحلیل المان محدود است. در شکل ۱۱ مقطع برش خورده از پوشش جاذب دارای حفره کروی آمده است. در شکل ۱۲ مقایسه نتایج ضریب انتقال برای حفره های استوانه ای و کروی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی برای حفره استوانه ای نشان داده شده‌اند.

در شکل ۱۳ ضریب کاهش بازتاب برای مدل المان محدود دارای حفره کروی شکل و استوانه‌ای شکل مقایسه شده اند. همان طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود اگر چه حداکثر ضریب انتقال برای پوشش جاذب دارای حفره از نوع کروی نسبت به پوشش جاذب دارای حفره از نوع استوانه‌ای بیشتر به نظر می‌رسد ولی برای همه فرکانس‌های بالاتر از ۱۵۰۰ هرتز، وجود حفره استوانه‌ای شکل برای بهبود عملکرد آکوستیکی بهتر از حفره کروی شکل است.

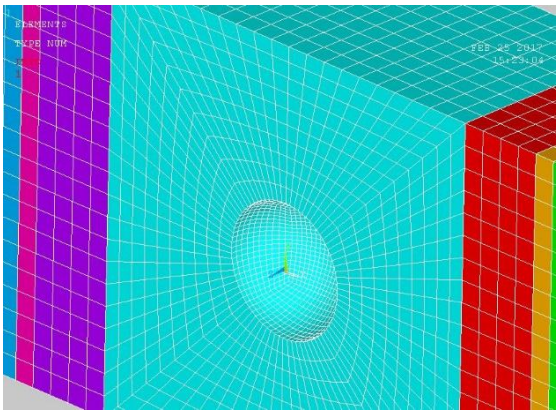
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

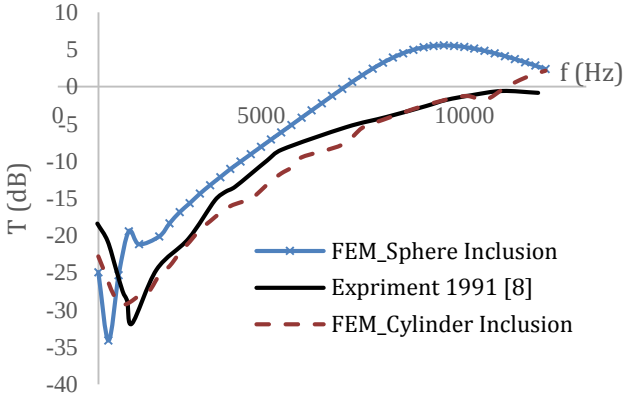
11- Standing waves
12- Impinging surface
13- Particle velocity
14- Structural vibration velocity
15- Anechoic end condition
16- Transmitted acoustic wave
17- Albrich
18- Acoustic infinite element
19- Key Option(2)=1
20- Reduced Analysis
21- Mode Super Position Analysis
22- Full Analysis
23- Test set-up
24- Flag
25- Coupled system
26- Flanking Transmission
27- Mesh sensitivity
28- D & F Command
29- Surface Load (SF Command)
30- Body Load (BF, BFE & BFUNIF Command)
31- Inertia Loads (ACEL & OMEGA Command)
32- FSI Flag (Fluid Structure Interaction Flag)
33- Vibroacoustic
34- Experimental model
35- Mesh study
36- Elements per wavelength
37- Mesh study
38- Frequency-dependent mesh model

۷- مراجع

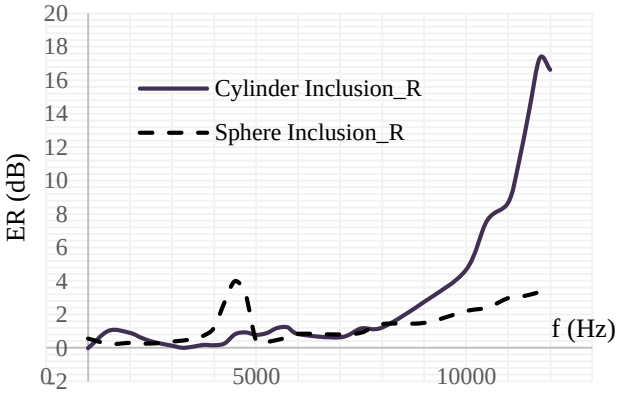
1- Ashrafi M.J., (2015), Conceptual design of external acoustic coating of submarine, Report, (In Persian), Marine Industries Organization, Shahid Ghorbani Industry, Isfahan.
2- Lawrence J. V. S., Kinsler E., Austin R.F., Alan B. C., (1999), Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition. London, UK, ISTE.
3- Barron R., (2002), Industrial Noise Control and Acoustics, Vol. 151. CRC Press.
4- Cai C., Hung K. C., and Khan M. S., (2006), Simulation-based analysis of acoustic absorbent lining subject to normal plane wave incidence, J. Sound Vib., Vol. 291, No. 3–5, pp. 656–680.
5- Panigrahi S. N., Jog C. S., and Munjal M. L., (2008), Multi-focus design of underwater noise control linings based on finite element analysis, Appl. Acoust., Vol. 69, No. 12, pp. 1141–1153.
6- Meng H., Wen J., Zhao H., and Wen X., (2012), Analysis of absorption performances of anechoic layers with steel plate backing, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 132, No. 1, pp. 69-75.
7- Easwaran V., (1992), Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave



شکل ۱۱- مقطع پوشش جاذب دارای حفره کروی شکل



شکل ۱۲- مقایسه ضریب انتقال برای مدل المان محدود دارای حفره کروی شکل و استوانه‌ای شکل وابسته به شبکه



شکل ۱۳- مقایسه ضریب کاهش بازتاب برای مدل المان محدود دارای حفره کروی شکل و استوانه‌ای شکل

کلید واژگان

1- Hall noise
2- Masking materials
3- Anechoic materials
4- Damp
5- Bar
6- Amplitude
7- Incident sound wave
8- Echo Reduction (ER)
9- Transmission Loss (TL)
10- Discretizing the weak formulation

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]

on resonant sound absorbers: A finite element approach, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 93, No. 3, pp. 1308-1318.
8- Hladky-Hennion A.C., (1991), Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 90, No. 6, pp. 3356-3367.
9- ANSYS Inc., (2012), ANSYS Mechanical APDL Element Reference, ANSYS Manual., Vol. 15317, No. October, pp. 1377–1390.
10- Howard C. Q. and Cazzolato B. S., (2015), Acoustic Analyses Using Matlab® and Ansys®. CRC Press.
11- Darabi K., (2012), Prediction of impact nosie in apartment floors, Isfahan university of technology, Iran, Report, (In Persian).
12- Kuttruff H., (2009) Room acoustics, Spon press, 5th edition, London, p. 374.
13- Kashkooli E. I., (2016), Assessment of acoustical performance of building floors under impact noise due to walking, Isfahan University of Technology, Report, (In persian).
14- ANSYS Inc., (2012), ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide, Vol. 3304, No. October, pp. 724–746.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.10.8]