تحلیل عددی اثر حفره‌های پراکنده‌ساز روی عملکرد آکوستیکی لایه کاهنده اکوی دارای شبکه توزیعی تناوبی دوگانه با استفاده از FEM

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

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

کلمات کلیدی:
موج صوتی
پراکنده ساز
اتلاف انتقال
ضریب انعکاس
پوشش کاهنده اکو

چکیده

کاهش اکو از شناورهای زیرسطحی یکی از مهمترین دغدغه‌های مسئله اختفاء زیرسطحی است. اخیراً استفاده از پراکنده سازها به صورت توزیع در شبکه های تناوبی دوگانه، به دلیل عملکرد نسبتاً مطلوب و قابلیت ایجاد تنظیم در بازه فرکانسی موثر، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق مدلی از یک پوشش کاهنده اکوی صوتی با حفره‌های پراکنده‌ساز درونی در نظر گرفته شده است. همچنین کلیه پارامترهای موثر در عملکرد صوتی لایه از قبیل اندازه حفره‌ها، ثابت شبکه و محل قرارگیری حفره‌ها در پوشش، برای دو نوع هندسه حفره پراکنده‌ساز کروی و استوانه‌ای، تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد که هرچه اندازه حفره بزرگتر باشد، لایه اثر کاهش اکوی بیشتری از خود نشان خواهد داد. در رابطه با ثابت شبکه، در نظر گرفتن ثابت شبکه کوچکتر اثر منفی روی کاهش اکو داشته ولی اتلاف انتقال را افزایش خواهد داد. همچنین مکان قرارگیری حفره‌ها، اگر نزدیک به صفحه ورود موج باشد، اثر کاهش اکوی بهتری از خود نشان می دهد.

Numerical Analyzing of the Cavity Scatterer Effect on the Acoustic Performance of Echo Reducing Layers with Doubly Periodic Distribution Using FEM

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 Prof faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; ketabdar@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 3 Sep. 2019
Accepted: 2 Mar. 2020

Keywords:
Sound Wave
Scatterer
Transmission Loss
Reflection Coefficient
Echo Reducing Coating

ABSTRACT

The echo reduction of an underwater vessel is one of the major concerns of its concealing problem. Recently, using scatterers in the doubly periodic distribution has attracted enormous interest. This is because of their relatively good performance and the ability to tune in the effective frequency range. In this study, a model of an acoustic echo reducing coating with internal scatterer cavities is considered. Subsequently, the major parameters that affected the acoustical performance of the layer, such as the size, the number and the location of cavities along with the thickness, for two types of spherical and cylindrical cavity geometries, were analyzed and presented. The results showed that in the layer, the larger the cavity size, the greater the echo reduction effect. Regarding the lattice constants, considering the smaller one, decays the echo reduction. However, will increase transmission loss. Also, the location of the cavity, if close to the wave entry plane, demonstrates a better echo reduction effect.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

۱ - مقدمه

در عرصه جنگ دریایی اختفاء و استتار فاکتور بسیار حیاتی برای شناورهای زیر سطحی به شمار می رود. زیرا سرعت کم و در نتیجه قابلیت مانور پایین آنها در مقایسه با سلاح های هوشمند مهاجم امروزی، عملاً این شناورها را به یک هدف متحرک تبدیل می نماید. مهم ترین روش شناسایی شناورهای زیر سطحی، استفاده از امواج صوتی است. بنابراین کاهش نویز انتشاری شناورها از یک طرف و جذب و پراکنده سازی امواج سونارهای فعال دشمن از طرف دیگر، یک ضرورت برای ادامه حیات و عملیات شناور محسوب می‌گردد. برای مقابله با امواج سونارهای فعال، استفاده از پوشش‌های کاهنده اکو و به اصطلاح ضداکو، امری رایج در این زمینه است. به همین دلیل بررسی عملکرد این پوشش ها چه از نظر جذب و چه از نظر پراکنده سازی امواج صوتی و کاهش اکوی برگشتی در چند دهه گذشته بسیار مورد توجه محافل علمی قرار گرفته است.

این پوشش معمولاً از جنس لاستیک بوده و بسته به نوع مکانیزم کاهش اکوی خود دارای ساختارهای مختلفی خواهد بود. بعضی از این پوشش‌ها به صورت کامپوزیتی لایه لایه از چند ماده با امپدانس ویژه متفاوت، هستند[۱-۷]. پوشش‌های مورد استفاده در کاربردهای زیرسطحی علاوه بر خواص جذبی و پراکندگی امواج، بایستی دارای خواصی همچون مقاومت در برابر خوردگی دریایی، تحمل فشار هیدروستاتیک عمق و وزن خیس نزدیک به صفر (خاصیت شناور بودن) باشند. به همین دلیل در شناورهای زیرسطحی از انواع پوشش های دارای جنس لاستیکی که دارای حفره های درونی هستند، استفاده می شود[۳]. دسته دیگر به صورت فوم های متخلخل چه از جنس فلز [۸] و یا غیرفلز هستند [۹-۱۲]. بعضی دیگر دارای حفره-های پراکنده‌ساز با توزیع تناوبی در یک جهت [۱۳] و یا در دو جهت [۳۰-۱۴] بوده که میدان موج ورودی در درون پوشش را دچار پدیده پراکندگی موج می‌نماید. همچنین تحقیقاتی روی پوشش های دارای حفره های پراکنده ساز اما با دو و یا تعداد بیشتر لایه از حفره ها نیز انجام شده است [۱۶، ۲۲، ۳۱ و ۳۲]. جهت کاهش امواج انعکاس یافته از یک هدف (برای مثال یک شناور زیرسطحی) معمولاً می‌توان از چند مکانیزم استفاده نمود. یکی از این مکانیزمها استفاده از سطوح غیر همفاز مجاور همدیگر است. در این چیدمان موج فرودی پس از برخورد با این سطح ناهموار، به دلیل تداخل امواج برگشتی با فاز های متفاوت و بعضاً معکوس، دارای موج برگشتی ضعیفی خواهد بود. این روش به دلیل الزام به ایجاد سطحی ناهموار، به دلیل افزایش مقاومت اصطکاکی، قطعاً در اختفاء شناورهای زیرسطحی جایی ندارد. مکانیزم دیگر تبدیل حالت مود امواج است. امواج صوتی در هوا یا آب، به صورت امواج طولی اما در جامدات هم به صورت طولی (امواج فشاری) و هم به صورت عرضی (امواج برشی) حرکت می کنند.

روشهای مورد استفاده در تحلیل پوشش های کاهنده اکو نیز دارای گستردگی زیادی است. روشهای تحلیلی معمولاً در پوشش های ساده و یا با پراکنده سازهای کروی مورد استفاده قرار می گیرند[۳، ۲۱، ۳۷-۳۳]. روشهای تحلیلی همچون روش ماتریس انتقال، در بررسی پوشش های کامپوزیت چند لایه استفاده فراوانی دارد[۱۶، ۳۱، ۳۸]. اخیراً استفاده از این روش در تحلیل پوشش های دارای حفره های پراکنده ساز نیز مورد بررسی قرار گرفته است[۲۸]. روش پراکندگی الکترونی و تلفیق آن با روشهای عددی و تئوری و بازه های خاموشی، نیز روشی است که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است[۱۵،۲۱-۲۲ و ۲۴]. اما این روش معمولاً برای پوشش های دارای حفره های پراکنده ساز با هندسه مشخص مثل کره و یا نهایتاً بیضی بیشتر استفاده شده و استفاده از آن برای حفره‌های با اشکال هندسی پیچیده تر و یا دارای شکل ترکیبی، مشکل است. روشهای عددی در سالهای اخیر توانسته است با پر کردن خلا توانایی روشهای تحلیلی و یا روش پراکندگی الکترونی سهم عمده ای از مدلسازی های پدیده پراکندگی امواج صوتی را به خود اختصاص دهد[۱۳-۱۴، ۲۰-۱۹، ۳۱-۲۹].

در این تحقیق با استفاده از روش عددی، مدلی جهت بیان رفتار پوشش های کاهنده اکو استخراج گردیده است. پوشش در نظر گرفته شده یک پوشش لاستیکی بوده که دارای حفره های پراکنده ساز کروی و استوانه‌ای است. ماده به صورت ویسکوالاستیک مدلسازی شده و اثرات اتلافی در بازه فرکانسی، در نظر گرفته شده است. فعالیت انجام شده در این تحقیق شامل بررسی اثر پارامترهای مختلف مثل اندازه حفره، ضخامت پوشش، تعداد حفره، و نیز مکان قرارگیری حفره های پراکنده ساز در درون پوشش است. به دلیل حجم بالای محاسبات برای یک بازه فرکانسی گسترده، بررسی پارامترها با استفاده از شبیه سازی های مبتنی بر روشهای عددی صورت پذیرفته است. همچنین جهت کاهش زمان محاسبات، یک سلول واحد از پوشش به همراه شرایط مرزی تقارن صفحه‌ای در نظر گرفته شده است که در صورت تکرار در صفحه، کل پوشش را شبیه سازی خواهد نمود. با استفاده از این مدل و محاسبات مربوط به استخراج میدانهای تنشی و جابجایی، می توان میدانهای فشار اکوستیکی در محیط مجاور پوشش در آب را نیز محاسبه کرد. بر اساس این نتایج ضرایب انتقال و انعکاس پوشش، مشخص شده و می‌توان با تنظیم متغیرهای مسئله، رفتار پوشش را در بازه‌های مختلف کنترل نمود. برخورد مایل موج صوتی به مواد ویسکوالاستیک باعث انتشار غیرمتقارن[1] امواج شده که این خود باعث پیدایش چالشهایی در مراحل تحلیل می‌شود. بنابراین در این تحقیق به دلیل تحلیل ساده‌تر نتایج و نتیجه گیری بهتر، از برخورد عمودی موج، به عنوان تحریک استفاده می گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

۲ - معادلات اساسی حاکم

معادله حرکت یک موج صفحه‌ای در حال حرکت در جهت x را می توان با معادله (۱) نشان داد [۳۹].

$$p = p_0 \cos(\omega t - kx + \phi_0) \qquad (۱)$$

که p_0 و ϕ_0 فاز اولیه و دامنه حرکت هستند. فاز حرکت در هر لحظه با $(\omega t - kx + \phi_0)$ محاسبه می شود. k عدد موج، ω فرکانس زاویه ای و f فرکانس موج فرودی است. رابطه بین این سه پارامتر نیز به صورت معادلات (۲) تعریف می گردد:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad , \qquad \omega = 2\pi f \qquad (۲)$$

که λ طول موج ورودی است. فرم مختلط معادله (۱) را می توان به صورت معادله (۳) نمایش داد.

$$p = p_0 e^{j(\omega t - kx + \phi_0)} \qquad (۳)$$

در محیط های مختلف صوت با سرعت ثابت در حرکت است. برای یک موج صوتی که دارای یک طول موج است، سرعت موج و فرکانس به صورت معادله (۴) با هم مرتبط هستند.

$$c = f\lambda = \omega/k \qquad (۴)$$

در این رابطه c سرعت موج صفحه ای است. افزایش طول موج و کاهش فرکانس در میرایی صوت ایجا شده بسیار حائز اهمیت هستند. برای ایجاد یک موج الاستیک در ماده‌ای مانند لاستیک کافی است که سطح آن به صورت سینوسی به حرکت واداشته شود. اگر جهت اعمال نیرو عمود بر سطح باشد، این موج طولی خواهد بود. با نفوذ موج به داخل ماده، مولکول‌های آن با نوسان موج به صورت پیوسته به عقب و جلو حرکت می‌کنند. این اتفاق باعث می شود که فشار و چگالی ماده به صورت محلی تغییر کند. لاستیک هم امپدانس با آب[۲]، یکی از مواردی است که به صورت عمده در محیط های آبی استفاده می شود، زیرا خواص آکوستیک آن بسیار شبیه به آب است[۴۰].

سرعت موج (c) و چگالی ماده بستر انتقال (ρ)، دو مشخصه تشکیل دهنده امپدانس صوتی (Z) هستند. امپدانس مشخصه یک ماده، به صورت حاصل‌ضرب چگالی ماده در سرعت صوت در آن ماده تعریف می شود. اگر امپدانس دو ماده (محیط انتشار) مجاور یکسان باشد، هیچ گونه بازتابشی در انرژی صوتی که درحال انتقال است، وجود نخواهد داشت. در مواد ویسکوالاستیک با حرکت موج در ماده، انرژی موج به دلیل میرایی هدر می‌رود. از آنجایی که صوت یک موج مکانیکی است که توسط ذرات ماده منتقل می شود، گسترش موج به خواص الاستیک و چگالی ماده وابسته است. اگر امپدانس صوتی ماده (محیط انتشار) اول Z_1 و امپدانس محیط دریافت کننده Z_2 به صورت زیر باشد:

$$Z_1 = \rho_1 c_1 \qquad (۵)$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2 \qquad (۶)$$

در این معادلات c_1 و ρ_1 معرف سرعت صوت و چگالی محیط انتشار اول و c_2 و ρ_2 معرف سرعت صوت و چگالی محیط انتشار دوم هستند. ضریب انعکاس بر اساس امپدانس دو محیط تعریف شده و با معادله (۷) نشان داده می شود.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad (۷)$$

در موادی که خاصیت ویسکوالاستیک دارند، معادله امپدانس صوتی به صورت معادله (۸) اصلاح می شود:

$$Z_2 = \frac{\rho_2 c_2}{1 + r^2} + \frac{jr\rho_2 c_2}{1 + r^2} \qquad (۸)$$

$$r = \frac{a c_2}{\omega} \quad , \quad j = \sqrt{-1}$$

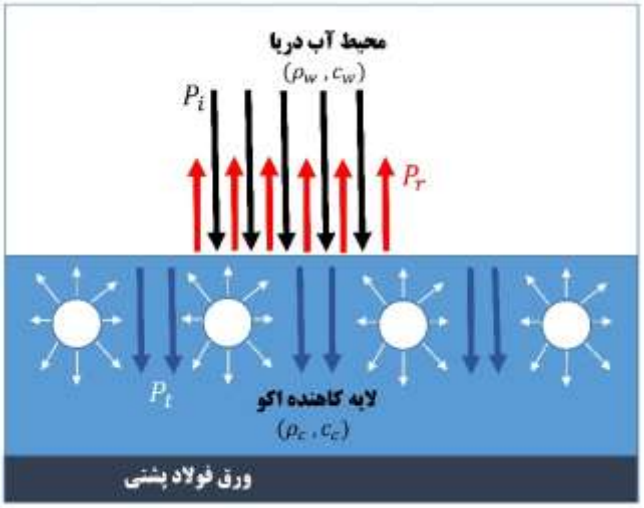
در معادله (۸)، a ضریب اتلاف در ماده لاستیکی است. با توجه به اینکه امپدانس لاستیک به دلیل ویسکوالاستیک بودن ماده، مختلط است، حتی با وجود فاز یکسان برای بخش حقیقی، همیشه یک عدم همفازی در بخش مختلط امپدانس وجود دارد. به همین دلیل غیر ممکن است که انعکاس و انتقال انرژی به محیط مجاور اتفاق نیفتد. با این وجود اگر در انتخاب ماده به خوبی عمل شود، امکان ایجاد ضریب انعکاس فشار نزدیک به صفر و ضریب انتقال فشار نزدیک به یک وجود دارد. تعیین رفتار موج صوتی در محیط یک جامد پلیمری با تعدادی پارامتر تعیین می شود که تعیین کننده بازتابش، انتقال و جذب انرژی هستند. بازتابش و انتقال در مرز محیط در شکل ۱ نشان داده شده است. ضرایب انعکاس، انتقال و توان اتلاف صوتی با روابط معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$R_p = \frac{p_r}{p_i}$$

$$T_p = \frac{p_t}{p_i} \qquad (۹)$$

$$PL = \left[1 - \left(R_p^2 + T_p^2\right)\right]$$

که p_i، p_r و p_t به ترتیب موج فشار ورودی، انعکاسی و انتقالی و PL معرف توان اتلافی در عبور موج از لایه است.



شکل ۱- تابش و انتقال صوت در سطح آب-پلیمر

بر این اساس، روابط مربوط به کاهش اکو و اتلاف انتقال برای یک محیط به صورت روابط معادله (۱۰) تعریف خواهد شد:

$$ER = 20\log\frac{p_i}{p_r} = 20\log(\frac{1}{R_p})$$
$$TL = 20\log\frac{p_i}{p_t} = 20\log\ (\frac{1}{T_p}) \qquad (۱۰)$$

در یک محیط بدون اتلاف، صوت با سرعت ثابت حرکت می کند و سرعت صوت به طول موج و فرکانس آن ربط دارد. همانطور که در معادله مشخص شده طول موج صوت به صورت عکس با فرکانس ارتباط دارد.

ضریب جذب صوت α که واحدش dB/cm است، مبین میزان انرژی تلف شده ناشی از عبور موج صوتی خروجی از محیط است. انرژی تلف شده به دو صورت گرما و انرژی مورد نیاز حرکت‌های داخلی ماده، خود را نشان می دهد. تضعیف صوت بین دو نقطه معمولا به صورت لگاریتمی و در واحد دسی بل بیان می شود. در عمل در یک ماده پلیمری چون ویسکوالاستیک است، سرعت صوت به مدول‌های دینامیکی وابسته است. همانطور که ذکر شد، در یک محیط ایزوتروپیک دو مدل مستقل از گسترش موج وجود دارد، یکی موج طولی و دیگری موج برشی. در حالت موج طولی جهت حرکت ذرات با جهت حرکت موج یکسان است، در حالیکه در حالت موج برشی جهت حرکت موج عمود بر جهت حرکت ذرات است.

برای تعیین مشخصات یک محیط جامد از لحاظ آکوستیکی، چهار پارامتر مورد نیاز است. سرعت صوت طولی C_l، سرعت صوت برشی C_s، جذب طولی α_l و جذب برشی α_s. روش دیگر مشخص کردن خصوصیات آکوستیکی یک محیط جامد استفاده از سرعت صوت و مدول های دینامیکی است [۳۹]. روابط به دست آمده در این روش عبارتند از سرعت مختلط موج که به صورت معادله (۱۱) تعریف می‌شود:

$$c^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \qquad (۱۱)$$

اگر فرم مختلط سرعت و مدول دینامیکی به صورت معادله (۱۲) باشد:

$$c^* = c_1 + jc_2$$
$$(c^*)^2 = \frac{G^*}{\rho} = \frac{\left(G^{'} + jG^{''}\right)}{\rho} = c_1^2 - c_2^2 + 2jc_1c_2 \qquad (۱۲)$$

با جداسازی قسمت حقیقی و موهومی، روابط معادله (۱۳) بدست خواهد آمد.

$$G^{'} = \rho(c_1^2 - c_2^2)$$
$$G^{''} = 2\rho c_1 c_2 \qquad (۱۳)$$

می توان بین c_1 و c_2 و مقادیر مشاهده شده سرعت موج (c) و ضریب جذب موج (α) معادله (۱۴) را نوشت:

$$c_1 = \frac{c}{\left(1 + \frac{\alpha^2 c^2}{\omega^2}\right)}$$
$$c_2 = \frac{\alpha c^2}{\omega\left(1 + \frac{\alpha^2 c^2}{\omega^2}\right)} \qquad (۱۴)$$
$$c^* = c\frac{[1 + j\alpha c/\omega]}{[1 + \alpha^2 c^2/\omega^2]}$$

از طرف دیگر با توجه به رابطه (۱۲) خواهیم داشت :

$$G^* = G' + jG'' = \rho(c^*)^2$$

این معادلات به ازای ورودی مشخص قابل حل هستند. با حل این معادلات بر حسب سرعت صوت و ضریب جذب، معادلات (۱۵) و (۱۶) حاصل می شود:

$$c^2 = \frac{2[(G')^2 + (G'')^2]}{\rho[[(G')^2 + (G'')^2]^{1/2} + G']} \qquad (۱۵)$$

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2\rho\left[[(G')^2 + (G'')^2]^{1/2} - G'\right]}{2[(G')^2 + (G'')^2]} \qquad (۱۶)$$

معادلات (۱۵) و (۱۶) نشان می دهند که با داشتن خواص دینامیک یک ماده مشخص، می توان ضرایب آکوستیک آن را به خوبی تقریب زد.

همچنین معادلات (۱۷) تا (۲۱) بین بخش های موهومی و حقیقی مدول‌های دینامیکی یک ماده ویسکوالاستیک برقرار است:

$$\tan\eta = G''/G' \qquad (۱۷)$$

$$\tan\eta = E''/E' \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

$$G = \frac{E}{3} \quad (۱۹)$$

$$G' = \frac{G}{\sqrt{1+\eta^2}} \quad (۲۰)$$

$$G'' = \frac{G\eta}{\sqrt{1+\eta^2}} \quad (۲۱)$$

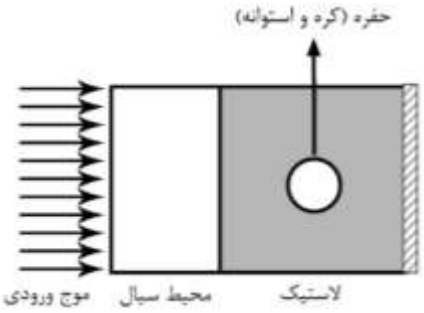
این معادلات مورد نیاز در شبیه سازی‌های رایانه‌ای هستند. این روابط نشان می دهند که چگونه با داشتن مدول‌های معمولی و ضریب میرایی ماده می توان بخش‌های حقیقی و موهومی مدول‌های دینامیکی را محاسبه نمود.

۳- مدلسازی عددی و صحت سنجی مدل

در این بخش به معرفی مدل اجزاء محدود در نظر گرفته شده برای پوشش کاهنده اکو پرداخته شده است. همچنین مشخصات مدل، مواد بکار رفته، مشخصات شبکه‌بندی و خروجی های مورد نظر معرفی شده‌اند.

۳-۱- مدلسازی عددی

مدل در نظر گرفته شده شامل یک لایه لاستیکی دارای توزیعی از حفره‌های درونی، یک لایه پشتی از ورق فولادی و نیز یک محیط آکوستیک آب در جلو و شرایط عدم انعکاس در پشت ورق فولادی است(شکل ۲). این مطالعه شامل استفاده از شبیه‌سازی سازه-آکوستیکی یک لایه لاستیک با خواص مکانیکی و پارامترهای هندسی مشخص است که در نهایت تغییرات رفتار آکوستیک این پوشش در فرکانس های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خروجی های شبیه سازی در نهایت ضرایب کاهش اکو و افت انتقال هستند. برای محاسبه این پارامترها بایستی میدانهای سرعت و تنش، یکی روی صفحه ورودی موج به لاستیک در بخش جلویی و دیگری روی صفحه پشتی پوشش لاستیکی که چسبیده به ورق فولای است، استخراج گردد. پارامترهای هندسی مورد نظر شامل ضخامت لاستیک، شکل حفره، اندازه حفره و مکان قرارگیری حفره می شود. هندسه مدل شده یک سلول واحد از لاستیک بوده که شامل تنها یک حفره درون آن به همراه اعمال شرایط مرزی تقارنی مناسب است. شبیه سازی ها توسط نرم افزار آباکوس[۳] و در حوزه فرکانس انجام شده است. همچنین در تحلیل‌ها از یک سیستم عامل هشت هسته ای $core\ i7$ با فرکانس $4\ GHz$ و 16 Gb حافظه رم استفاده شده است.



شکل ۲- شماتیکی از شکل هندسی حفره، لایه و نحوه اعمال بار و شرایط مرزی بر روی صورت مسئله

در نرم افزار بکارگرفته شده، محیط آکوستیکی با فرض حرکات کوچک یک سیال تراکم پذیر و غیر لزج در نظر گرفته می شود. در نتیجه مدل ساختاری سیال به صورتی است که فشار دینامیکی توسط مدول بالک به کرنش حجمی مرتبط شده و همچنین اتلاف انرژی در محیط آکوستیکی بوسیله ضریب درگ حجمی در نظر گرفته خواهد شد. برای مدلسازی محیط آکوستیک از المانهای آکوستیکی استفاده شده و تحریک در این ناحیه با یک تغییر فشار تعریف می گردد. شرط‌های مرزی امپدانس و سطوح جاذب یا تابشگر بر روی سطوح این المانها قابل تعریف هستند. همچنین المانهای تماس آکوستیک-سازه که محیط آکوستیک و مدل سازه ای را کوپل می کند نیز در این نرم افزار استفاده شده است. در این مطالعه جنس لایه از لاستیک نیتریل یا همان NBR[۴] در نظر گرفته شده و خواص آن مطابق داده های موجود در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل ها در بازه فرکانسی بین ۲ تا ۴۰ کیلوهرتز انجام شده است.

جدول ۱ - خواص مواد مورد استفاده در شبیه سازی

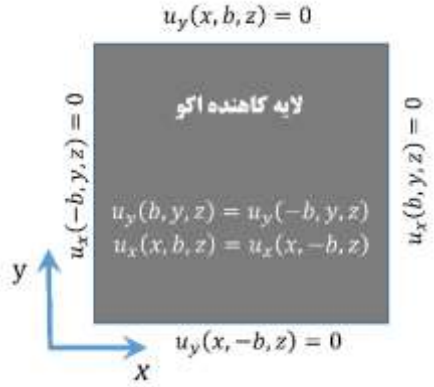
ماده	لاستیک NBR	محیط آکوستیک آب
مدول الاستیک (MPa)	۱٤۰	–
ضریب پواسون	۰/٤۹	–
ضرب اتلاف	۰/۲۳	–
چگالی(Kg/m3)	۱۱۰۰	۱۰۰۰
سرعت صوت (m/s)	۳۰۰	۱٤۸۹

۳-۲- شرایط مرزی

به دلیل در نظر گرفتن شرایط تقارنی حاکم بر مدل، تنها یک سلول واحد مدل شده است. جهت استفاده از نتایج این مدل برای یک پوشش لاستیکی شامل یک شبکه توزیع شده از حفره های مختلف، شرایط مرزی به صورت رابطه (۲۲) به مدل سلول واحد اعمال می-شود. شرایط مرزی اعمال شده روی سلول واحد در شکل ۳ نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

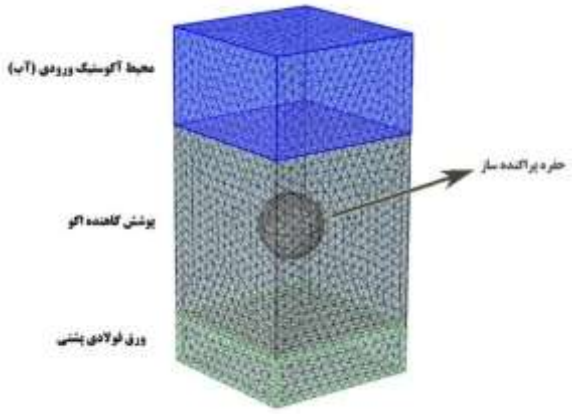
$$u_x(x,b,z) = u_x(x,-b,z)$$
$$u_x(b,y,z) = u_x(-b,y,z) = 0$$
$$u_y(b,y,z) = u_y(-b,y,z)$$
$$u_y(x,b,z) = u_y(x,-b,z) = 0 \quad (۲۲)$$



شکل۳-شرایط مرزی سلول واحد در نظر گرفته شده

۳-۳- شبکه بندی

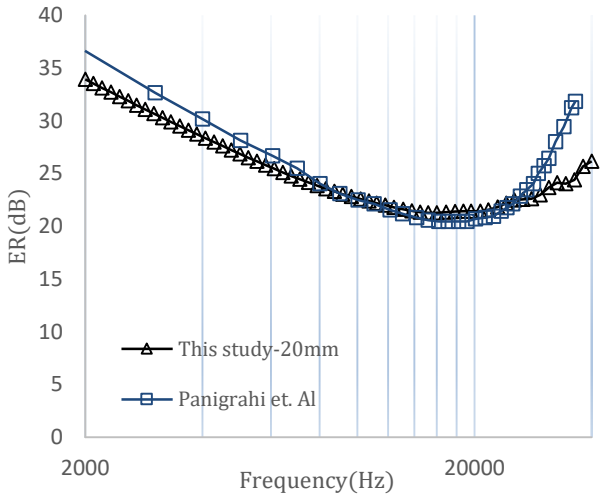
یکی از عوامل رایج خطا در تحلیل ارتعاشی/آکوستیکی ابعاد المانها است. برای دقت مطلوب بایستی حداقل چهار المان در کوچکترین طول موج مورد بررسی قرار گیرند. در رابطه زیر طول ماکزیمم المان بایستی از طول موج کمینه با ضریب کوچکتر باشد. با توجه به توضیحات هلادکی هنیون و دکارپیگنی [۱۴] اندازه طول المان بکار رفته در شبکه بندی، کوچکتر از $\lambda/4$ در نظر گرفته شد. شکل ۴ نمایشی از محیط‌های در نظر گرفته شده در مدلسازی و همچنین شبکه‌بندی انجام شده برای هر کدام را نشان می‌دهد.



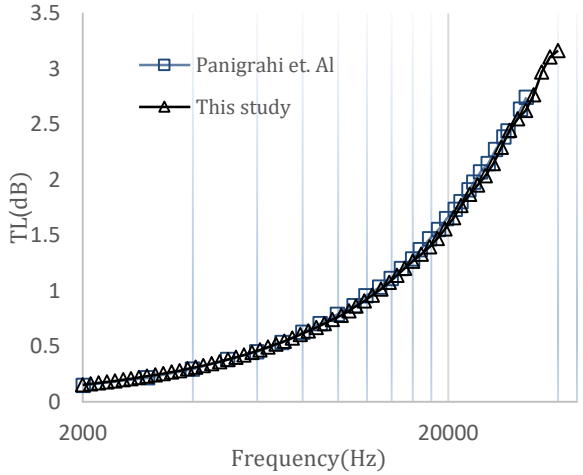
شکل ۴- معرفی شبکه بندی و محیط‌های مدلسازی شده در نرم افزار

۴-۳- اعتبار سنجی مدل

برای اطمینان از معتبر بودن مدل، نتایج با کار آزمایشگاهی پانیگراهی و همکاران [۲۵] مقایسه شده است.



شکل ۵- مقایسه نتایج کاهش اکو با نتایج کار آزمایشگاهی پانیگراهی و همکاران [۲۵]



شکل ۶- مقایسه نتایج افت انتقال با با نتایج کار آزمایشگاهی پانیگراهی و همکاران [۲۵]

با توجه به شکلهای ۵ و ۶ می‌توان گفت که مدل همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای مقادیر کاهش اکو و اتلاف انتقال در بازه فرکانسی در نظر گرفته شده، از خود نشان می‌دهد. در صحت‌سنجی انجام شده ضخامت لاستیک ۲۰ میلیمتر و ابعاد آن ۳۰ * ۳۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. همچنین محیط آکوستیک در نظر گرفته شده برای این لایه لاستیکی در هر دو طرف، محیط سیال آب است. عدم همخوانی ناچیز دو نمودار در فرکانس های بالا را می توان به این صورت توضیح داد که در فرکانس های بالا، اندازه شبکه‌بندی بایستی متناسب با طول موج در آن فرکانس انتخاب شود. به همین دلیل نیاز به تعداد المان بسیار ریزتری است که در نتیجه باعث افزایش حجم محاسبات می گردد. همچنین برای انجام تحلیل-ها، سخت افزارهای قدرتمندتری نیز نیاز است که نویسندگان بر اساس سیستم سخت افزاری در دسترس، اندازه المان را تا حدی درشت‌تر در نظر گرفته‌اند. در نظر گرفتن المان‌های درشت‌تر باعث

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

ایجاد مقداری خطا در تحلیل خواهد شد. در شکل ۸ به دلیل وابستگی پاسخ به برآیند اتلافات در طول ضخامت و نیز سهم ورودی موج به داخل لاستیک، همخوانی خوب و خطای بسیار کمی انتظار می رود، که این موضوع در شکل ۸ مشاهده می شود. سهم ورودی موج به درون لاستیک با ضریب انعکاس مشخص می گردد، اما پس از ورود آن بخش از موج به درون ماده لاستیک رفتار اتلاف انتقالی تابع ضخامت درنوردیده شده توسط این بخش از موج خواهد بود.

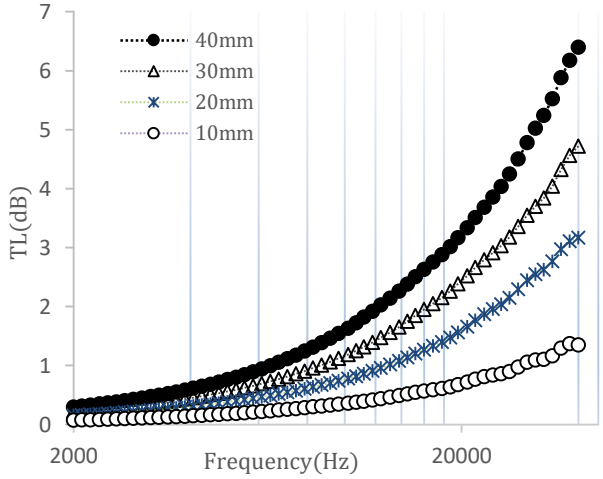
در رابطه با اختلاف مشاهده شده در شکل ۷ بین تحلیل عددی مطالعه حاضر با کار آزمایشگاهی، می توان اینگونه گفت که به دلیل وابستگی ضریب انعکاس و به تبع آن کاهش اکو به اندازه المانهای قرار گرفته در چند لایه اول وجه ورود موج لاستیک، مقداری خطا در فرکانسهای پایین و بالا مشاهده می شود. تحلیلهای عددی بر پایه المان محدود مسایل آکوستیکی، به فرکانس موج ورودی وابستگی دارد. فرکانس موج ورودی نیز تعیین کننده اندازه المان در بخش ویسکوالاستیک (لاستیک) خواهد بود. به همین دلیل در حل برای چند فرکانس بایستی برای هر فرکانس یک اندازه المان بر پایه معیار تعیین اندازه المان(مثلا $\frac{\lambda}{6}$ یا $\frac{\lambda}{4}$) محاسبه گردد و تحلیل با آن اندازه المان انجام شود. این فرآیند برای تحلیل های محدود در چند فرکانس مجزا قابل انجام است. اما در تحلیل‌های روی یک طیف فرکانسی گسترده‌تر (مثل مسئله حاضر از ۲ تا ۴۰ کیلوهرتز و با ۶۰ تا ۱۰۰ فرکانس در بازه مذکور)، کمی مسئله را مشکل می‌سازد. به همین دلیل در اینگونه مسایل با قبول یک خطای کم تمامی تحلیل ها در محدوده فرکانسی مشخص شده با یک اندازه المان انجام می-شوند. به همین دلیل در بخش میانی نمودار پاسخ کاهش اکو، به دلیل مناسب بودن کامل اندازه المان با آن فرکانسها، مطابقت بسیار بالایی با کار آزمایشگاهی پانیگراهی و همکاران نشان داده است. اما در بخشهای ابتدایی (با اندازه المانهای بزرگتر مورد نیاز) و بخش انتهایی در فرکانسهای بالاتر (با اندازه المانهای کوچکتر مورد نیاز) ، کمی اختلاف مشاهده شده است. اندازه المانها در بخش لاستیک، ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج بررسی اثر پارامترهای موثر در رفتار پوشش کاهنده اکو

عملکرد پوشش کاهنده اکو متاثر از تعدادی پارامتر است که مطالعه تغییرات این پارامترها، اثر آنها را روی عملکر کلی پوشش مشخص خواهد نمود. در این بخش اثر پارامترهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

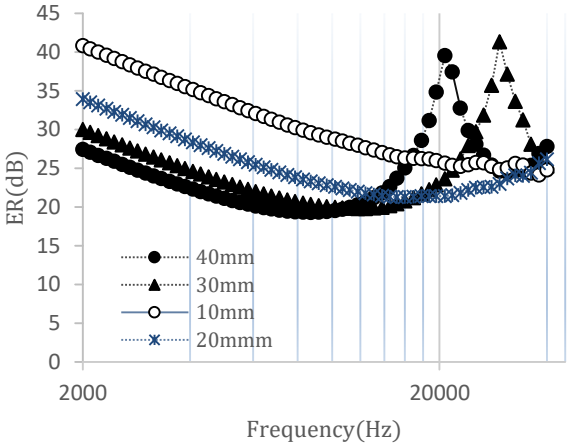
۴-۱- تاثیر ضخامت لاستیک

یکی از پارامترهای که از طریق آن می توان رفتار آکوستیکی پوشش را کنترل کرد، میزان ضخامت لاستیک است. به همین منظور با افزایش ضخامت لاستیک تغییرات هر دو مشخصه عملکردی پوشش، یعنی میزان کاهش اکو و میزان اتلاف انتقال بررسی شده است. در مورد افت انتقال (شکل ۷)، باید گفت که افزایش ضخامت به خوبی میزان افت انتقال را افزایش می‌دهد. روند افزایش اتلاف انتقال با توجه به محیط عبوری که یک ماده ویسکوالاستیک دارای میرایی درونی است، قابل انتظار است. در واقع هر چه مسیر عبوری موج از درون ماده پوشش بیشتر باشد، قاعدتاً انرژی بیشتری تبدیل به گرما شده و همچنین حرکات مولکولی بیشتری تحریک خواهد شد. حرکات ملکولی نیز نیازمند صرف انرژی موج ورودی به ماده هستند. در رابطه با میزان کاهش اکو، معمولاً پدیده رزونانس نقش مهمی را ایفاء می کند. همانطور که از شکل ۸ مشاهده می شود، در محدوده فرکانسهای پایین (زیر۱۰ کیلوهرتز) افزایش ضخامت باعث روندی نزولی در میزان کاهش اکو شده است. به بیان دیگر در این محدود فرکانسی هر چه به فرکانس ۱۰ کیلوهرتز نزدیک میشویم، مقدار کاهش اکو شتاب منفی به خود می‌گیرد. اما هنوز این کاهش وجود دارد. باید گفت که با وجود روند کاهشی در فرکانس های پایین، مقدار کاهش اکو در فرکانس های بالاتر روند افزایشی از خود نشان داد. برای ضخامت۴۰ میلی متر تقریباً در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز نمودار کاهش اکو دارای مقدار بیشینه شده و دوباره کاهش پیدا می کند. اختلاف فرکانس پیک کاهش اکو، به دلیل اختلاف در فرکانس تشدید پوشش‌های با ضخامت مختلف است. نمودار شکل ۸ نشان می دهد که با افزایش ضخامت، اثر توده‌ای بودن لاستیک در نتیجه فرکانس تشدید پایین‌تر آن، باعث اتلاف بیشتر و در نتیجه ایجاد پیک کاهش اکو در فرکانس‌های پایین‌تر خواهد شد.



شکل ۷- 0تغییرات افت انتقال با افزایش ضخامت پوشش لاستیکی در حالتی که در هر دو طرف پوشش محیط آب باشد

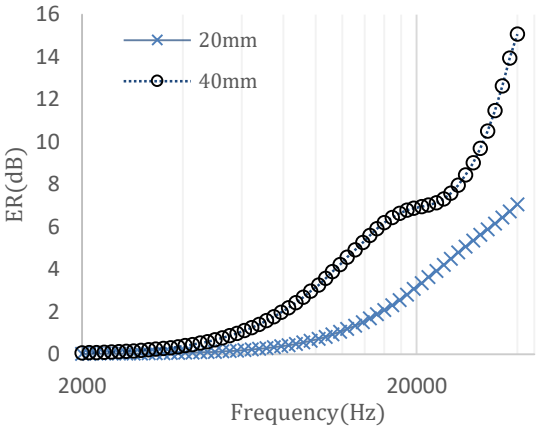
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]



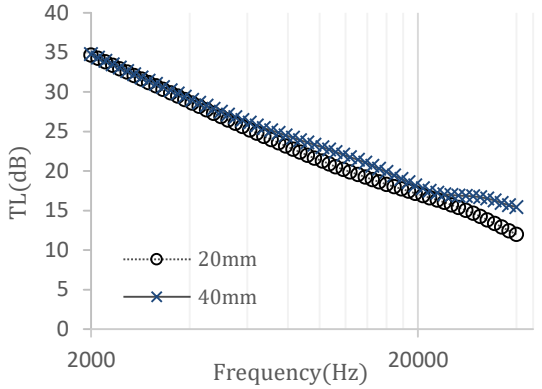
شکل ۸- تغییرات کاهش اکو با افزایش ضخامت پوشش لاستیکی در حالتی که در هر دو طرف پوشش محیط آب باشد

۴-۲- اثر محیط آکوستیک

اگر محیط انتشار صوت از آب به هوا تغییر کند، پاسخ مدل در دو مشخصه آکوستیکی اتلاف انتقال و کاهش اکو (شکلهای ۹ و ۱۰)، در مقایسه با حالتی که هر دو طرف نمونه با سیال آب احاطه شده باشد، دچار تغییرات اساسی هم از لحاظ مقدار و هم از لحاظ الگو خواهد شد. در محیط هوا با افزایش ضخامت لاستیک هم افت انتقال و هم کاهش اکو، افزایش پیدا می کنند گرچه این تغییرات در افت انتقال نسبت به کاهش اکو زیاد نیست.



شکل ۹- تغییرات کاهش اکو در دو ضخامت مختلف در حالتی که محیط آکوستیک دو طرف مدل، هوا باشد



شکل ۱۰- تغییرات افت انتقال در دو ضخامت مختلف در حالتی که محیط آکوستیک دو طرف مدل، هوا باشد

۴-۳- اثر حفره‌های پراکنده ساز

وجود حفره‌های پراکنده‌ساز مدفون شده در پوشش‌های کاهنده اکو بسیار مهم است. به نوعی شاید بتوان گفت از مهمترین پارامترهای موثر در عملکرد پوشش‌ها، مشخصات حفره‌های پراکنده‌ساز بکار رفته در پوشش است. مشخصات شامل اندازه حفره، تعداد حفره، محل قرارگیری حفره و نیز هندسه حفره می‌شود. در این تحقیق دو نوع هندسه یکی کره و دیگری استوانه، برای حفره‌های درون پوشش کاهنده اکو، در نظر گرفته شده است.

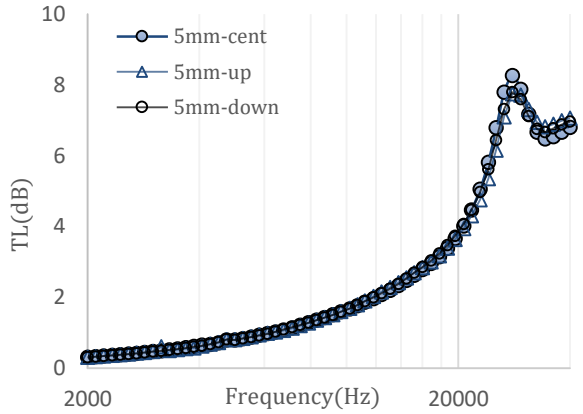
۴-۳-۱- حفره پراکنده‌ساز کروی

برای بررسی پوشش‌های کاهنده اکوی شامل حفره با هندسه کروی، سه پارامتر اندازه حفره، تعداد حفره‌ها و محل قرارگیری آنها نسبت به وجهی از پوشش که موج صوتی وارد می‌شود، مد نظر قرار گرفته است.

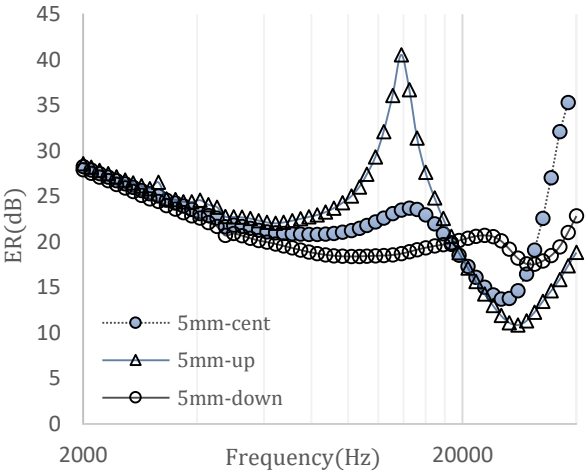
- **اثر مکان قرارگیری حفره کروی در امتداد ضخامت پوشش**

اثر مکان حفره در درون پوشش با در نظر گرفتن یک حفره کروی به قطر ۵ میلیمتر، در سه فاصله از وجه جلویی پوشش لاستیکی، مورد بررسی قرار گرفت. در نمودارهای اتلاف انتقال و کاهش اکو (شکل-های ۱۱ و ۱۲)، حالت 5mm-up نزدیک‌ترین مکان به وجه فرود موج ورودی است. با توجه به نتایج ارایه شده در شکل ۱۱، مشخص است که مکان حفره بر روی میزان افت انتقال اثری ندارد. اتلاف انتقال بیشتر متاثر از حجم، نوع و مشخصات اتلافی ماده قرار گرفته در مسیر عبور موج است. به همین دلیل اینکه یک حفره در ابتدای لایه نسبت به صفحه ورود موج قرار گرفته باشد و یا در مرکز و انتهای آن خیلی تاثیر در رفتار اتلاف انتقالی آن ندارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]



شکل ۱۱- تغییرات مقادیر افت انتقال با جا به جایی حفره کروی به قطر ۵ میلی متر در ضخامت پوشش لاستیکی ۴۰ میلی متر



شکل ۱۲- تغییرات مقادیر کاهش اکو با جا به جایی حفره کروی به قطر ۵ میلی متر، در ضخامت پوشش لاستیکی به قطر ۴۰ میلی متر

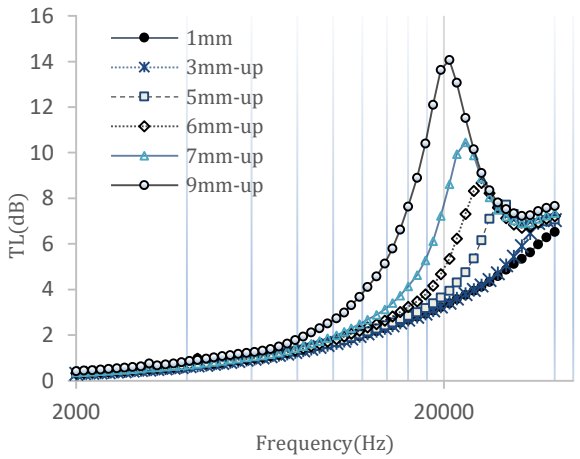
شکل ۱۲ تغییرات مقادیر کاهش اکو به دلیل تغییر محل قرارگیری حفره در درون ضخامت پوشش را نشان می دهد. نمودارهای شکل ۱۲ مبین تاثیر قابل توجه این پارامتر روی مقادیر کاهش اکو است. دلیل این تغییرات حساس بودن کاهش اکو به پدیده رزونانس حفره درون پوشش است. در صورت قرار گرفتن حفره در نزدیکی سطح ورود موج، احتمال ایجاد رزونانس در فرکانس های پایین‌تر محتمل‌تر است. دلیل این امر نیز افزایش احتمال ایجاد حرکات خمشی در محل نازکترین بخش پوشش، یعنی محل بین صفحه ورود موج و بدنه حفره، است. هر چه حفره در مکانی داخلی‌تر از پوشش قرار گیرد، رخ دادن این حرکات و در نتیجه رزونانس بدنه حفره در فرکانس‌های مشابه حفره نزدیک به سطح ورودی موج، امکان‌پذیر نخواهد بود. در واقع پدیده رزونانس حفره قرار گرفته در مرکز و یا انتهای پوشش، در فرکانس‌هایی بالاتر از فرکانس حفره جلویی، اتفاق می‌افتد. با نزدیک شدن این حفره به وجه ورودی موج به پوشش، کاهش اکو دارای یک پیک با اندازه ۴۰ دسی‌بل در فرکانس ۱۳۸۰۰ هرتز خواهد شد. این پیک کاهش اکو برای حفره قرار گرفته در مرکز، دارای مقدار ۲۳/۷ دسی‌بل و در فرکانس ۱۴۵۰۰ هرتز اتفاق افتاده است. کاهش مقدار قابل توجه پیک، به دلیل احاطه حفره کروی با توده بیشتری از ماده و در نتیجه آزادی حرکت کمتر آن در حین رزونانس است. در رابطه با حفره قرارگرفته در انتهای پوشش هم همین ادله برقرار خواهد بود. حفره انتهایی دارای پیکی به مقدار ۲۰/۷ دسی‌بل و فرکانس پیک ۲۲۹۰۰ هرتز است.

- **اثر اندازه حفره کروی**

برای بررسی اثر اندازه حفره کروی، چند حفره با قطرهای مختلف در نظر گرفته شده است. حفره های در نظر گرفته شده دارای قطرهای ۱، ۳، ۵، ۶، ۷ و ۹ میلیمتر هستند. در شکل ۱۳ تغییرات مربوط به افت انتقال و در شکل ۱۴، تغییرات مربوط به مقادیر کاهش اکو نشان داده شده است.

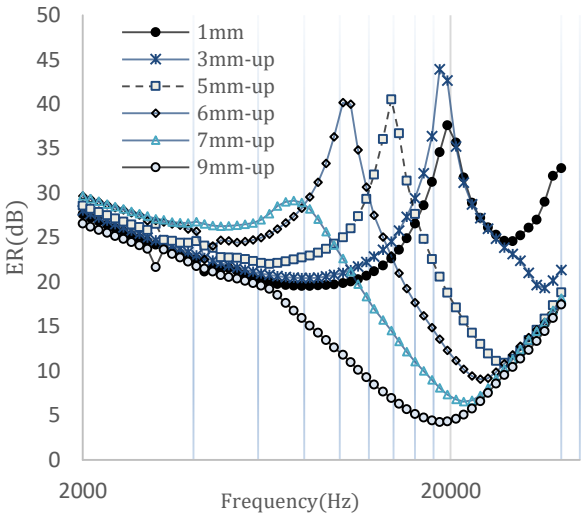
با توجه به شکل ۱۳، حداکثر تغییرات افت انتقال با وجود حفره با قطر ۹ میلیمتر در فرکانس ۲۰/۷ کیلوهرتز و به بیشینه‌ی ۱۴/۱ دسی‌بل رخ می‌دهد. روند تغییرات مشاهده شده نشان می دهد که با افزایش قطر حفره درون پوشش، افت انتقال بیشتری صورت خواهد گرفت.

در مورد مقادیر کاهش اکو باید گفت که افزایش اندازه قطر حفره، تاثیر عمده‌ای در جابجایی مقدار بیشنه کاهش اکو به سمت فرکانس های پایین دارد. این روند تا قطر ۷ میلی متر به خوبی مشخص است. همچنین با دقت در شکل ۱۴، می‌توان دید که مقدار بیشینه نمودار کاهش اکوی مربوط به پوشش دارای حفره با قطر ۱میلی متر از لحاظ مقدار بیشنیه با پوشش دارای حفره با قطر ۶ میلی متر، تفاوت معناداری ندارد ولی فرکانس به شدت کاهش پیدا کرده است. بنابراین افزایش قطر حفره تا ۶ میلی متر هم باعث افزایش افت انتقال می‌شود هم اینکه مقدار بیشینه به فرکانس های پایین‌تری منتقل می‌شود که این تغییرات بسیار مطلوب است.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات افت انتقال برای حفره های کروی با اندازه های مختلف در لاستیک با ضخامت ۴۰میلی متر.

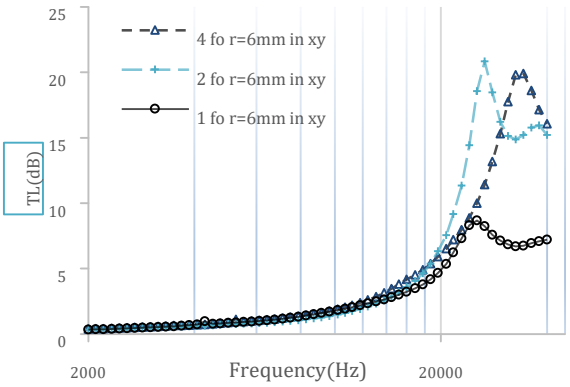
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]



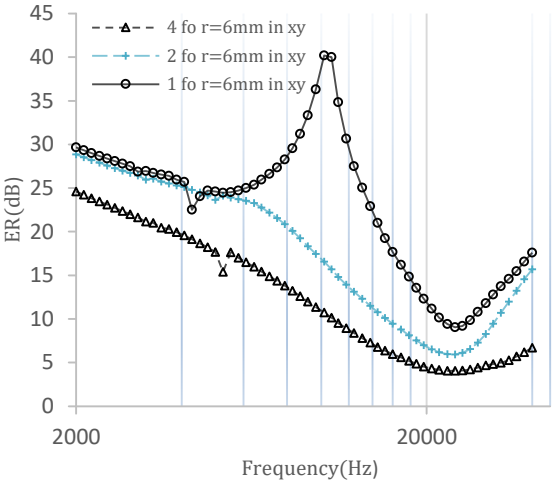
شکل ۱۴- نمودار تغییرات کاهش اکو برای حفره های کروی با اندازه های مختلف در لاستیک با ضخامت ۴۰ میلی متر

- **اثر تعداد حفره کروی**

برای بررسی اثر تعداد حفره های پراکنده ساز در یک اندازه شبکه مشخص (بررسی اثر ثابت شبکه)، سه حالت از پوشش در نظر گرفته شده است. اولین حالت مربوط به یک پوشش با ابعاد ۳۰*۳۰ با ضخامت ۲۰ میلیمتر که دارای یک حفره پراکنده ساز کروی با قطر ۶ میلیمتر است. دومین حالت مربوط به همان پوشش اما با دو عدد حفرع پراکنده‌ساز ۶ میلیمتری که به فاصله یکسانی از لبه‌ها و از همدیگر قرار گرفته‌اند. در سومین حالت، چهار حفره یکسان با قطر ۶ میلیمتر و با فاصله مساوی از لبه‌ها و از یکدیگر در نظر گرفته شده‌است. شکل ۱۵ نمودارهای اتلاف انتقال این سه پوشش را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، افزایش تعداد پراکنده ساز در واحد پوشش در یک جهت (پوشش دارای دو حفره) و یا در دو جهت (پوشش دارای چهار حفره)، ثابت شبکه باعث افزایش چشمگیر مقادیر اتلاف انتقال می شود. افزایش تعداد حفره پراکنده‌ساز به معنی کاهش ثابت شبکه است. همچنین مشاهده میشود که کاهش ثابت شبکه باعث انتقال بیشینه اتلاف انتقال به فرکانس‌های بالاتر می شود.



شکل ۱۵- اثر تعداد حفره (ثابت شبکه) بر روی افت انتقال در پوشش لاستیکی به ضخامت ۴۰ میلی متر



شکل ۱۶- اثر تعداد حفره (ثابت شبکه) بر روی ضریب کاهش اکو در پوشش لاستیک به ضخامت ۴۰ میلی متر

شکل ۱۶ نمایشگر اثر ثابت شبکه روی مقادیر کاهش اکوی برگشتی است. با توجه به شکل ۱۶ مشخص می‌شود که با کاهش ثابت شبکه (افزایش تعداد حفره در واحد پوشش)، روند کاهش اکوی برگشتی نزولی می‌شود. در محدوده فرکانسی مورد تحلیل، با افزایش ثابت شبکه، بیشینه نمودار کاهش اکو به فرکانس‌های پایین‌تر انتقال خواهد یافت. بیشینه مربوط به یک تک حفره (ثابت شبکه بزرگ‌تر) برابر با ۴۰/۲ دسی‌بل و در فرکانس ۱۰۲۰۰ هرتز رخ می‌دهد. تحلیل‌ها نشان می دهد بیشینه نمودارهای مربوط به شبکه‌های دارای ثابت شبکه کوچکتر به فرکانسهایی خارج از محدوده ۲ تا ۴۰ کیلوهرتز انتقال می‌یابد. به عنوان نتیجه، طراحی پوشش با ثابت شبکه بزرگ برای داشتن کاهش اکو در فرکانس‌های پایین تر، نتیجه بهتری می‌دهد.

۴-۳-۲- حفره پراکنده‌ساز استوانه ای

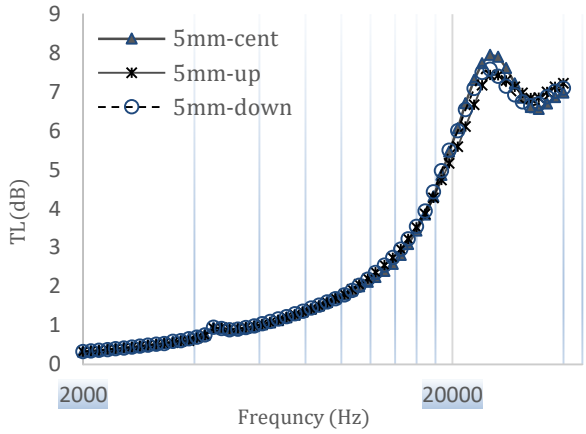
در این بخش پوشش‌های کاهنده اکوی دارای حفره های پراکنده‌ساز استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای قابل بررسی در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

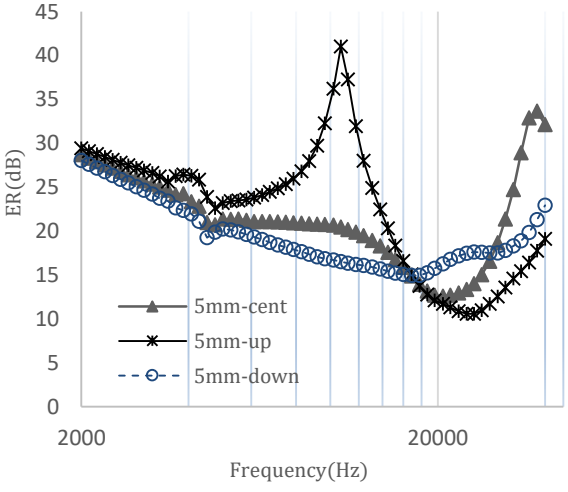
این بخش شامل قطر حفره استوانه‌ای، طول و مکان قرارگیری آن در درون پوشش و در امتداد ضخامت پوشش می شود.

- **اثر مکان قرار گیری**

استوانه در نظر گرفته شده دارای قطر و طول ۵ میلیمتر است. برای بررسی اثر مکان قرارگیری حفره‌ی استوانه‌ای در پوشش لاستیکی، سه مکان کیفی یکی در نزدیکی سطح ورود موج اکوستیکی به پوشش، یکی در مرکز ضخامت پوشش و دیگری در نزدیکی سطح انتهایی پوشش در نظر گرفته شده است. نتایج اتلاف انتقال (نمودار شکل ۱۷) نشان می دهد که مکان قرارگیری حفره استوانه‌ای تاثیری قابل توجه روی این پارامتر ندارد. این نتیجه در حالت وجود حفره کروی نیز مشاهده گردید (شکل ۱۱).



شکل ۱۷- اثر مکان قرار گیری حفره‌ی استوانه‌ای بر روی ضریب افت انتقال در لایه لاستیک به ضخامت ۴۰ میلی متر



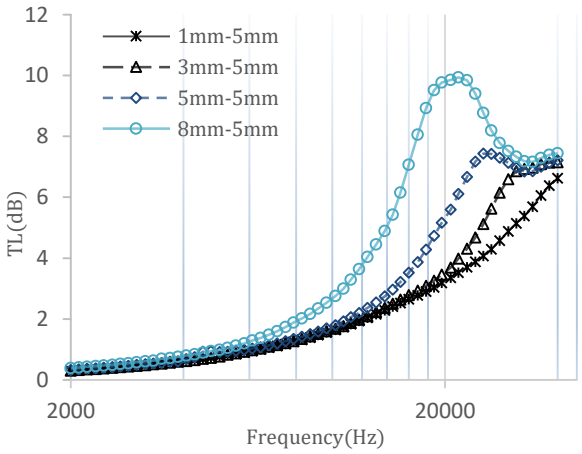
شکل ۱۸- اثر مکان قرار گیری حفره‌ی استوانه‌ای بر روی ضریب کاهش اکو در لاستیک به ضخامت ۴۰ میلی متر

همچنین نتایج اثر مکان حفره استوانه‌ای روی مقادیر کاهش اکوی برگشتی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که مکان قرار گیری حفره استوانه‌ای هم روی مقادیر کاهش اکو تاثیر قابل توجهی دارد. هرچه حفره به سطح ورود موج نزدیکتر باشد، سطح زیر نمودار مقادیر کاهش اکو بیشتر است.

در مقایسه بین حفره کروی و استوانه‌ای نتایج نمایش داده شده نشان می دهد که وجود یک حفره استوانه ای با قطر و طول ۵ میلیمتر باعث ایجاد یک بیشینه در مقادیر کاهش اکو مشابه حفره کروی با قطر ۵ میلیمتر خواهد شد. اما با این تفاوت که بیشینه مربوط به حفره استوانه‌ای در فرکانس پایین‌تری رخ خواهد داد. فرکانس بیشینه حفره کروی ۱۳۸۰۰ هرتز و فرکانس بیشینه حفره استوانه‌ای حدود ۱۰۷۰۰ هرتز مشاهده شد. مقدارهر دو پیک تقریباً یکسان است.

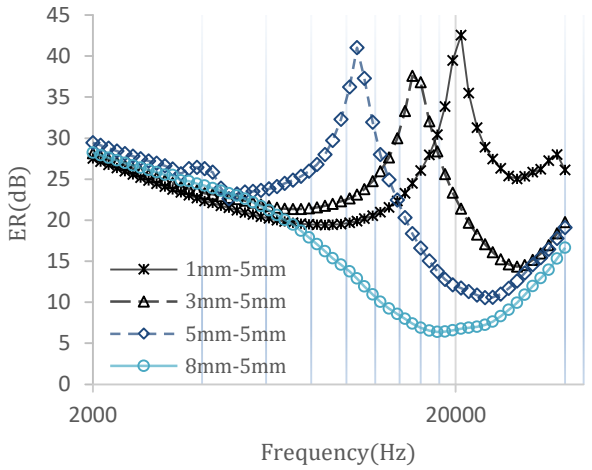
- **اثر اندازه قطر حفره استوانه‌ای**

برای بررسی اثر قطر حفره استوانه‌ای چهار قطر مختلف برای مقطع آن در نظر گرفته شده است. قطرهای در نظر گرفته شده ۱، ۳، ۵ و ۸ میلیمتر انتخاب شده است. طول استوانه در همه حالتها ۵ میلیمتر بود. شکل ۱۹، بیانگر تغییرات اتلاف انتقال در اثر قطرهای مختلف استوانه است. نمودار بدست آمده نشان داد که با افزایش قطر حفره‌ی استوانه‌ای ضریب افت انتقال افزایش خواهد یافت. این نتیجه در رابطه با حفره کروی نیز بدست آمد. در مقایسه با حفره کروی، بیشینه های ایجاد شده در حفره های استوانه‌ای با قطر مشابه، دارای مقادیر کوچکتر اما تقریباً با همان فرکانس هستند. این بدین معنا است که برای ایجاد اتلاف انتقال بیشتر در یک پوشش بهتر است که از حفره های پراکنده ساز کروی استفاده شود.



شکل ۱۹- نمودار افت انتقال برای حفره های استوانه‌ای با قطر های متفاوت در لاستیک به ضخامت ۴۰ میلی متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

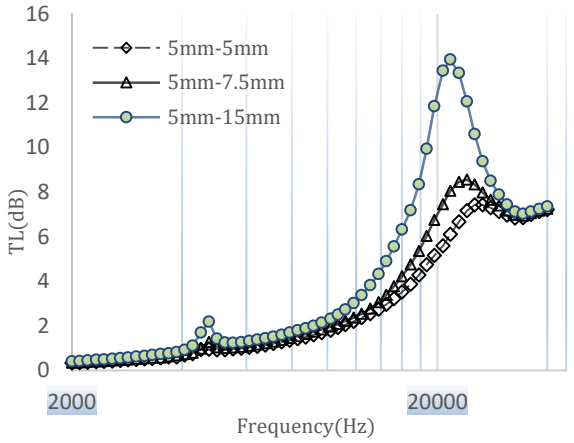


شکل ۲۰- نمودارضریب کاهش اکو برای حفره های استوانه ای با قطر های متفاوت در لاستیک به ضخامت ۴۰ میلی متر

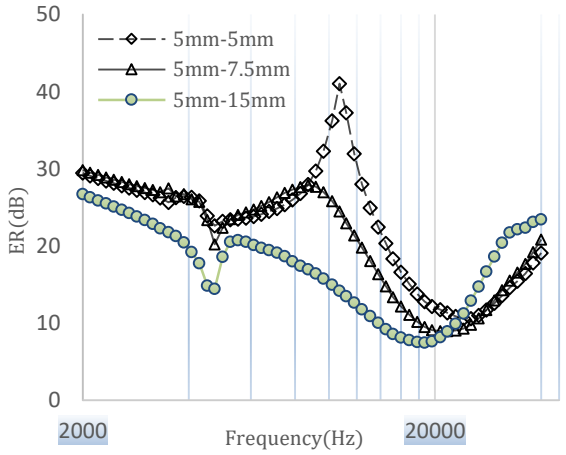
در رابطه با ضریب کاهش اکو باید گفت که افزایش قطر استوانه تا ۵ میلیمتر باعث کاهش فرکانس بیشینه به طور قابل توجهی می شود (شکل ۲۰). در حالتی که برای پوشش دارای حفره‌ای استوانه‌ای به قطر ۵ میلیمتر یک بیشینه در فرکانس ۳۸۵۰ هرتز مشاهده می گردد. بنابر نتایج می توان گفت که با تنظیم پارامترهای هندسه حفره استوانه ای می توان نتایجی قابل انتظار برای بازه‌های فرکانسی مشخص بدست آورد. اثر تغییرات قطر استوانه در مقایسه با نمودار ضریب کاهش اکو مربوط به تغییرات قطر حفره کروی، اختلاف زیادی نشان نمی دهد.

- **اثر طول حفره استوانه ای**

یکی دیگر از پارامترهای قابل تنظیم در حفره‌های پراکنده‌ساز استوانه‌ای، طول حفره است. برای مشاهده اثر این پارامتر سه طول متفاوت از استوانه با اندازه‌های ۵، ۷/۵ و ۱۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. قطر تمامی حفره‌های استوانه‌ای در این حالت ۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. شکل های ۲۱ و ۲۲ نشان دهنده اثر این تغییرات به ترتیب روی اتلاف انتقال و مقادیر کاهش اکوی برگشتی پوشش هستند. نمودارها بیانگر این هستند که پارامتر طول استوانه نیز روی خواص آکوستیک پوشش کاهنده اکو اثر خواهد گذاشت. افزایش طول حفره‌ی استوانه ای باعث روند افزایشی در ضریب افت انتقال می‌شود. هرچه طول استونه افزایش می‌یابد، نمودار اتلاف انتقال از خود بیشینه بیشتری را نشان خواهد داد. استوانه های دارای طول ۵، ۷/۵ و ۱۵ میلیمتر به ترتیب مقادیر بیشینه اتلاف انتقال ۷/۲ دسی‌بل در حدود ۲۷ کیلوهرتز، ۸/۵ دسی‌بل در حدود ۲۲/۹ کیلوهرتز و ۱۴ دسی‌بل در ۲۱/۷ کیلوهرتز را به خود اختصاص داده-اند. همچنین می توان دید که با افزایش طول حفره استوانه‌ای فرکانس بیشینه در نمودار اتلاف انتقال کاهش یافته و به اصطلاح پوشش از نظر اتلاف انتقال دارای عملکرد بهتری در فرکانس‌های پایین‌تر می‌شود.



شکل ۲۱- اثر تغییرات طول استوانه به قطر ۵ میلی متر بر روی ضریب افت انتقال در لایه لاستیک به قطر ۴۰ میلی متر



شکل ۲۲- اثر تغییرات طول استوانه به قطر ۵ میلی متر بر روی ضریب کاهش اکو در لایه لاستیک به قطر ۴۰ میلی متر

افزایش طول حفره استوانه‌ای اثر منفی روی مقادیر کاهش اکو دارد. منظور از اثر مثبت، افزایش مقادیر کاهش اکو است. افزایش طول حفره در این حالت، باعث ایجاد کمینه‌ای با فرکانس حدود ۴۸۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز خواهد شد. نمودارها نشان می دهد که بهترین عملکرد مربوط به حفره با طول کوچکتر است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک پوشش کاهنده اکو به روش عددی شبیه سازی شد. پوشش در نظر گرفته شده دارای دو نوع حفره پراکنده‌ساز کروی و استوانه‌ای بود. صحت سنجی روش عددی با داده های آزمایشگاهی [۲۵] انجام گردید. مطابقت خوب و قابل قبولی بین نتایج شبیه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی حاصل گردید. در ادامه اثر پارامترهای مهم هندسی حفره‌های پراکنده‌ساز از قبیل اندازه قطر، ثابت شبکه و مکان قرارگیری حفره در امتداد ضخامت پوشش، برای حفره کروی و اندازه قطر، طول و محل قرار گیری برای حفره استوانه ای در نظر گرفته شد.

در رابطه با مکان قرار گیری در حالتی که حفره کروی به عنوان حفره پراکنده‌ساز در نظر گرفته شد، مشاهده گردید که با نزدیک شدن مکان حفره به وجه ورودی موج، وضعیت کاهش اکوی برگشتی به مراتب بهتر از حالتی است که حفره در وسط لاستیک و یا انتهای لاستیک (نزدیک به ورق فولادی پشتی) است. در این حالت‌ها، کاهش اکوبرای حالتی که حفره نزدیک به سطح ورود موج به لاستیک است، دارای یک پیک با اندازه ۴۰ دسی‌بل در فرکانس ۱۳۸۰۰ هرتز خواهد شد. این پیک کاهش اکو برای حفره قرار گرفته در مرکز، دارای مقدار ۲۳/۷ دسی‌بل و در فرکانس ۱۴۵۰۰ هرتز اتفاق افتاده است. نتایج نشان داد که اگر حفره استوانه ای به عنوان پراکنده‌ساز در نظر گرفته شود، همین الگو تکرار شده اما ماکزیمم کاهش اکو به مقدار ۴۱ دسی‌بل و در فرکانس ۱۰۷۰۰ هرتز اتفاق افتاده است. نکته دیگر اینکه لایه دارای حفره استوانه ای دارای پیک ماکزیمم اول بیشتر و در فرکانس پایین تری است.

در رابطه با اندازه حفره‌های پراکنده ساز هم می توان گفت که بر اساس نتایج دو بخش حفره کروی و استوانه‌ای، هر دو لایه کاهنده اکو دارای الگوی رفتاری مشابهی در مقدار کاهش اکو بر حسب اندازه حفره هستند. در این الگو با افزایش اندازه حفره ها، پیک ماکزیمم اول به سمت فرکانسهای پایین تر انتقال یافته، اما از اندازه پیک کاسته می گردد. این کاهش اندازه پیک در اندازه‌های بزرگ حفره منجر به از بین رفتن حدودی پیک ماکزیمم خواهد شد. یعنی اینکه در افزایش اندازه حفره به منظور انتقال فرکانس تشدید (کاهش اکو ماکزیمم) به فرکانسهای پایین‌تر، بایستی دقت نمود. برای مثال می‌توان به جای استفاده از یک حفره با قطر ۳ میلیمتر که پاسخی با پیک کاهش اکویی برابر با ۴۲/۶ دسی‌بل در فرکانس ۱۹۶۰۰ هرتز بدست می دهد، از یک حفره با اندازه قطر ۶ میلیمتر که پیک کاهش اکویی برابر با ۴۰ دسی‌بل اما در فرکانسی به مراتب پایین‌تر (۱۰۷۰۰ هرتز) استفاده نمود. این الگو در رابطه با حفره استوانه ای نیز صادق است.

در ادامه به بررسی ضریب افت انتقال و ضریب کاهش اکو پرداخته شد. از لحاظ الگوی رفتاری حفره‌ها، می‌توان گفت که الگوی رفتاری پوشش‌های شامل هر دو نوع حفره کروی و استوانه‌ای در رابطه با تغییرات اندازه حفره و مکان قرارگیری حفره‌ها نسبت به صفحه ورود موج به پوشش، تقریباً مشابهت داشت. ولی با فرض حجم حفره یکسان در ضریب افت انتقال، حفره کروی عملکرد بهتری را نشان داد. در مورد ضریب کاهش اکو می توان گفت که تفاوت زیادی مشاده نشد.

فهرست علائم و اختصارات

a	Attenuation coefficient
c	Sound Speed
c^*	Complex Wave Speed
C_l	Longitudinal Wave Speed
C_t	Transverse Wave Speed
ER	Echo Reduction
E^*	Dynamic Elastic Modulus
E'	Elastic Storage Modulus
E''	Elastic Loss Modulus
FEM	Finite Element Model
f	Frequency
G^*	Dynamic Shear Modulus
G'	Shear Storage Modulus
G''	Shear Loss Modulus
k	Wave number
p	Acoustic Pressure
p_0	Acoustic pressure Amplitude
p_i	Incident Acoustic pressure
p_r	Reflected Acoustic pressure
p_t	Transmitted Acoustic pressure
PL	Power Loss
R_p	Reflection coefficient
TL	Transmission Loss
T_p	Transmission coefficient
Z	Impedance
Z_i	Impedance of i^{th} Medium
α	Absorption coefficient
η	Loss Factor
λ	Wave Length
ν	Poisson Ratio
ρ	Density
ϕ_0	Initial Phase
ω	Angular Frequency

۶- کلید واژگان

[1] Non-axisymmetric

[2] Rho-C rubber

[3]Abaqus/CAE 6.14-1, Build ID: 2014_06_05-02.41.02134264@Dussault Systems, 2014

[4]Acrylonitrile Butadiene Rubber

۷- مراجع

1- Barge, F. A., (1978), *Underwater acoustic absorption characteristics of composites of wood, rubber and steel*, Technical memorandum, File No. TM

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings, Journal of Acoustical Society of America, Vol.90(6), p.3356-3367.
15- Ivansson, S., (2005), *Reflections from steel plates with doubly periodic anechoic coatings*, Theoretical and Computational Acoustics (With CD), p.89-98.
16- Hao, Z., Bi-long, L. and Zheng-tao, S., (2015), *Sound absorption features of double layered structures coated with acoustic absorption layers*, Journal of Vibration and Shock, Vol.34, No.23, p.31-36.
17- Ma, T. C., Scott, R. A. and Yang, W. H., (1980), *Harmonic wave propagation in an infinite viscoelastic medium with a periodic array of cylindrical elastic fibres*, Journal of Sound and Vibration, Vol.69, p.257-264.
18- 17- Ma, T. C., Scott, R. A. and Yang, W. H., (1980), *Harmonic wave propagation in an infinite elastic medium with a periodic array of cylindrical pores*, Journal of Sound and Vibration, Vol.71, p.473-482.
19- Easwaran, V. and Munjal, M. L., (1993), *Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach*, Journal of Sound and Vibration, Vol.93 (3), p.1308-1318.
20- Langlet, P., Hladky-Hennion, A. C. and Decarpigny, J. N., (1995), *Analysis of the propagation of plane acoustic waves in passive periodic materials using the finite element method*, Journal of Sound and Vibration, Vol.98 (5), p.2792-2800.
21- Ivansson, S., (2004), *Sound absorption by viscoelastic coatings with periodically distributed cavities*, Swedish Defense Research Agency, Technical Report, ISSN. 1650-1942, p.1-30.
22- Ivansson, S., (2005), *Numerical modeling for design of viscoelastic coatings with favorable sound absorbing properties*, Journal of Nonlinear Analysis, Vol.63, p.1541–1550.
23- Cai, C., Hung, K. C. and Khan M. S., (2006), *Simulation-based analysis of acoustic absorbent lining subject to normal plane wave incidence*, Journal of Sound and Vibration, Vol.124 (4), p.1974–1984.
24- Ivansson S., (2008), *Numerical design of Alberich anechoic coatings with superellipsoidal cavities of mixed sizes*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.87 (5), p.1861-1870.
25- Panigrahi, S. N., Jog, C. S. and Munjal, M.L., (2008), *Multi-focus design of underwater noise control linings based on finite element analysis*, journal of Applied Acoustics, Vol.69, p.1141-1153.
26- Meng, H., Wen, J., Zhao, H., Lv, L. and Wen X., (2012), *Analysis of absorption performances of anechoic layers with steel plate backing*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.132(1), p.69-75.
27- Hai-Bin, Y., Yue, L., Hong-Gang, Z., Ji-Hong, W. and Xi-Sen, W., (2014), *Acoustic anechoic layers with singly periodic array of scatterers: Computational* 78-52, The Pennsylvania State University Applied Research Laboratory.
2- Hinders, M.K., Rhodes, B.A. and Fang, T.M., (1995), *Particle loaded composites for acoustic anechoic coatings*, journal of sound and vibration, Vol. 185(2), p.219-46.
3- Cederholm, A., (2003), *Homogeneous models of anechoic rubber coatings*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, ISBN. 91-7283-580-X.
4- Yang, X. Wang, Y. and Yu, H., (2007), *Sound Performance of Multilayered Composites*, Journal of Materials and Manufacturing Processes, Vol.22(6), p.721-725.
5- Cheng, Y., Xu, J. Y. and Liu, X. J., (2009), *Broadband Acoustic Cloak with Multilayered Homogeneous Isotropic Materials*, PIERS Online, Vol.5(2), p.177-180.
6- Zakharov, D.D., (2010), *Effective high-order approximations of layered coatings and linings of anisotropic elastic, viscoelastic and nematic materials*, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol.74, p.286–296.
7- Baker, R. M. L. and Baker, B. S., (2012), *Multiple-layer radiation absorber*, Physics Procedia, Vol.38, p.298-303.
8- Chevillotte, F., Perrot, C. and Ranneton, R., (2010), *Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.128 (4), p.1766-1776.
9- Chevillotte, F. and Ranneton, R., (2007), *Elastic characterization of closed cell foams from impedance tube absorption tests*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.122 (5), p.2653-2660.
10- Chekkal, Bianchi, M., Remillat, C., Becot, F. X., Jaouen, L. and Scarpa F., (2010), *Vibro-Acoustic Properties of Auxetic Open Cell Foam: Model and Experimental Results*, Acta Acustica United with Acustica, Vol.96, p.266-274.
11- Jaouen, L. and Becot, F. X., (2010), *Indirect acoustical characterization of foams with two scales of porosity, case of micro-scale characteristic length of the order of 1 micron*, The 17th International Congress on sound and vibration, Cairo, Egypt, p.1-8.
12- Shin, H. C., Taherzadeh, S. and Attenborough, K., (2012), *Estimation of acoustic and elastic properties of plastic foam using acoustic-to-frame coupling*, Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, France, p.1967-1971.
13- Hennion, A. C., Bossut, R., Decarpigny, J. N. and Audoly, C., (1990), *Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a periodic elastic structure using the finite element method: Application to compliant tube gratings*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.87(5), p.1861-1870.
14- Hladky-Hennion, A. C. and Decarpigny, J. N., (1991), *Analysis of the scattering of a plane acoustic*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]

Damping with Polymer, Chapter 10, ACS Symposium Series 424, Dallas, Texas.

40- Adair, L. and Cook, R., (1973), *Acoustic Properties of Rho-C Rubber and ABS in the Frequency Range 100-kHz-2 MHz*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.54 (6), p.1763-1765.

methods, absorption mechanisms, and optimal design, journal of Chinese Physics B, Vol.23, No.10, p. 104304-1 104304-9.

28- Meng, T., (2014), *Simplified model for predicting acoustic performance of an underwater sound absorption coating*, Journal of Vibration and Control, Vol.20 (3), p.339-354.

29- Guo-Liang, J., Jian-Fei, Y., Ji-Hong, W. and Xi-Sen,W., (2016), *Investigation of underwater sound scattering on a cylindrical shell coated with anechoic coatings by the finite element method based on an equivalent parameter inversion*, Acta Physica Sinica, Vol. 65, No. 1, p. 014305-1- 014305-8.

30- Ye, C., Liu, X., Xin, F., and Lu, T. J., (2018), *Underwater acoustic absorption of composite anechoic layers with inner holes*, Journal of Sound and Vibration, Vol.426, p.54-74.

31- Meng, T. and Hong-Xing, H., (2011), *Improved low-frequency performance of a composite sound absorption coating*, Journal of Vibration and Control, Vol.18, p.48-57.

32- Zhao, H., Wen, j.,Yang, H., Lv, L. and Wen, X., (2014), *Backing effects on the underwater acoustic absorption of a viscoelastic slab with locally resonant scatterers*, Applied Acoustics, Vol.76, p.48-51.

33- Meyer, E., Brendel, K. and Tamm, K., (1958), *Pulsation Oscillations of Cavities in Rubber*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.30 (12), p.1116-1124.

34- Gaunaurd, G. C. and Oberall, H., (1978), *Theory of resonant scattering from spherical cavities in elastic and viscoelastic media*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.63 (6), p.1699-1712.

35- Gaunaurd, G. C., Scharnhorst, K. P. and Oberall, H., (1978), *Giant monopole resonances in the scattering of waves from gas-filled spherical cavities and bubbles*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.65 (3), p.573-594.

36- Fiorito, R., Madigosky, W. and Oberall, H., (1979), *Resonance theory of acoustic waves interacting with an elastic plate*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.66 (6), p.1857-1866.

37- Brill, D., Gaunaurd, G. C. and Oberall, H., (1980), *Resonance theory of elastic shear-wave scattering from spherical fluid obstacles in solids*, Journal of Acoustical Society of America, Vol.67 (2), p. 414-424.

38- Li, W., (2014), *Experimental studies on the determination of acoustic bulk material properties and transfer impedance*, Master of Science Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.

39- Jarzynski, J., (1990), *Mechanisms of Sound Attenuation in Materials, Sound and Vibration*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.7.6]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.13]