

# محاسبه ضریب بازتاب و پراکندگی یک کاشی جاذب صوت و مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی

حسین شاهمیرزایی<sup>۱</sup>، محمد علی علی دوستان<sup>۲</sup> و قاسم صفربورد هکردی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، hshahmirzaee@mut.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، mdoostan@mut.ac.ir

<sup>۳\*</sup>نویسنده مسئول، دکترای فیزیک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، safarpour.ghasem@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۲

## چکیده

هدف این مقاله محاسبه ضریب بازتاب و پراکندگی امواج تخت صوتی تاییده شده به یک کاشی جاذب صوت می باشد. شبیه سازی های این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول انجام شده و نتایج به دست آمده بر حسب فرکانس موج فرودی گزارش شده است. لازم به ذکر است که کاشی جاذب صوت شامل یک آرایه از مخروط های تنگ پکیده است که روی یک صفحه تخت قرار دارند. به علاوه، جنس کاشی جاذب صوت لاستیک بوتیل آلییده شده با فلزات مختلف می باشد. از مقایسه نتایج به دست آمده در این مقاله با موارد تحلیلی یا آزمایشگاهی گزارش شده، به این نتیجه می رسیم که شبیه سازی های انجام شده از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین مشاهده می شود، که کاشی ساخته شده از لاستیک بوتیل آلییده شده با فلز آلومینیوم نسبت به سایر نمونه ها ضریب پراکندگی و ضریب بازتاب بالاتری دارد؛ بنابراین بهتر است برای کاهش شدت صوت در آزمایشگاه های صوتی از این نمونه استفاده شود.

**واژه های کلیدی:** ضریب پراکندگی، ضریب بازتاب، کاشی جاذب صوت، لاستیک بوتیل.

## ۱. مقدمه

بررسی برهمکنش امواج صوتی با اشیاء موجود یا قرار داده شده در یک محیط سیال از دیرباز از جمله موضوع های مهم و مورد علاقه دانشمندان بوده است. این برهمکنش ها، که آغازگری مطالعه آن ها را می توان به ریلی [۱] و لمب [۲] نسبت داد، در زیرگروه های متفاوتی همچون ساختارهای به منظور کاهش شدت صوت، مطالعه امواج صوتی در زیر آب و امواج صوتی غیر مخرب<sup>۱</sup> در مواد دسته بندی می شوند. در حالت خاص، که از جمله اهداف اصلی این مقاله نیز می باشد، پراکندگی امواج صوتی به وسیله اجسام متفاوت در مراجع مختلف مورد مطالعه قرار گرفته که از جمله این موارد می توان به مطالعه پراکندگی امواج صوتی با یک کره سخت [۳]، یک کره قابل نفوذ [۴]، یک کره قابل نفوذ با ساختار چندلایه [۵]، شبکه ای از پوسته های استوانه ای [۶]، دو کره قابل نفوذ غیر هم مرکز [۷]،

بررسی میزان پراکندگی صوتی از یک تیوپ استوانه ای دولایه [۸] و پراکندگی صوتی به وسیله محیط های ناهمگن با سطح مشترک ناپیوسته [۹]، اشاره کرد.

بر اساس تحقیقات انجام شده، روش های متفاوتی برای حل مسائل پراکندگی صوتی از سوی محققان استفاده شده است. از جمله دقیق ترین روش های ارائه شده می توان به حل مسائل پراکندگی با روش های تحلیلی اشاره کرد [۷]. نکته قابل توجه در اینجا این است که در بسیاری از موارد به دلیل ناهمگن بودن مواد به کاررفته در ساختار اجسام، حل تحلیلی این مسائل ممکن نبوده یا با دشواری بسیاری همراه است. به همین دلیل بیشتر محققان از روش های تقریبی برای حل این مسائل استفاده می کنند. به عنوان نمونه می توان به روش تابع گرین [۱۰]، روش بسط جواب ها بر اساس توابع هنکل، لژاندر و حل مسئله پراکندگی به شیوه نیمه تحلیلی [۱۱]،

سیستم مورد نظر ما یک جسم پراکنده کننده - صرف نظر از هندسه خاص جسم - واقع در یک سیال می باشد. در این مدل فرض می کنیم که امواج تخت صوتی موجود در سیال (با فشار زمینه  $P_b$ ) به جسم پراکنده کننده برخورد کرده، قسمتی از این امواج به داخل جسم نفوذ کرده و کسر دیگر به وسیله جسم پراکنده می شود. امواج پراکنده شده به وسیله جسم (یا امواج نفوذ پیدا کرده به داخل جسم) با نماد  $p$  و میدان صوتی کلی با نماد  $P_t$  نشان داده می شوند. بنابراین خواهیم داشت:

$$P_b = P_0 e^{-i(\vec{k}\cdot\vec{x})} \quad (1)$$

$$P_t = P_b + p \quad (2)$$

که در این روابط  $P_0$  دامنه امواج تخت فرودی است،  $\vec{k}$  بردار موج است که راستای آن نشان دهنده جهت امواج تخت و  $|\vec{k}| = 2\pi\omega/c$  عدد موج می باشد، که  $\omega$  و  $c$  به ترتیب فرکانس زاویه ای موج ورودی و سرعت صوت هستند. با در نظر گرفتن فرم خطی معادله های دینامیک سیالات - با فرض اینکه توزیع فشار دارای تغییرات کم دامنه ای در اطراف نقطه تعادل باشد - همچنین معادله های خطی چگالی جریان جرم (در یک جریان پایا) معادله های صوتی در حوزه زمانی به صورت زیر خواهند بود [10].

$$\begin{cases} \vec{\nabla} p_t + \frac{\partial \phi}{\partial t} = \vec{f} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = q \end{cases} \quad (3)$$

که در این رابطه  $p_t = p_t(\vec{x}, t)$  دامنه فشار کل،  $\vec{\phi} = \vec{\phi}(\vec{x}, t) = \rho(\vec{x})\vec{v}(\vec{x}, t)$  سرعت،  $\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, t)$  چگالی جریان جرمی،  $\rho(\vec{x})$  چگالی جرمی،  $\theta = \theta(\vec{x}, t) = -k(\vec{x})p(\vec{x}, t)$ ،  $k(\vec{x})$  تراکم پذیری ماده،  $\vec{f} = \vec{f}(\vec{x}, t)$  و  $q = q(\vec{x}, t)$  به ترتیب توزیع حجمی نیرو و توزیع چشمه می باشند؛ که در این مقاله برابر صفر در نظر گرفته می شوند.

همان طور که مشاهده می کنیم مجموعه معادله های (3) تابع زمان هستند. با توجه به این فرض که توزیع فشار دارای نوسانات کم دامنه در اطراف نقطه تعادل است، می توان به جای حوزه زمانی از حوزه فرکانسی استفاده کرد. در مطالعات مربوط به ناحیه فرکانسی انتشار امواج صوتی به وسیله معادله های خطی شده دینامیک سیالات مدل می شوند. در این

محاسبه پراکندگی صوتی چندگانه با استفاده از الگوریتم های بازگشتی [12] و روش المان های محدود ترکیبی اشاره کرد [13].

همان طور که تا اینجا دیده شد؛ بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه پراکندگی امواج صوتی در ساختارهایی با هندسه ساده بوده است، در صورتی که در کاربردهای صنعتی متخصصان با مسائل بسیار پیچیده تری سروکار دارند. از طرف دیگر انجام محاسبات اولیه؛ کلید اصلی در ساخت قطعات آکوستیکی است. همین امر سبب شده که پژوهشگران در انجام تحقیقات اولیه از روش های عددی همچون روش المان های محدود استفاده کنند که از جمله آن ها می توان به مراجع [14-15] اشاره کرد. هدف این مقاله بررسی ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی یک آرایه از مخروط های تنگ پکیده<sup>۲</sup> است (شکل ۱). به این منظور از نرم افزار کامسول برای انجام شبیه سازی های مورد نظر استفاده شده است. در ابتدا لازم است اعتبار جواب های به دست آمده از قسمت آکوستیکی نرم افزار سنجیده شود. به این منظور جواب های به دست آمده با جواب های تحلیلی گزارش شده (برای ساختارهای ساده) مقایسه می شوند. سپس ساختار تنگ پکیده بررسی و نتایج محاسبات با نتایج آزمایش های گزارش شده مقایسه خواهند شد.

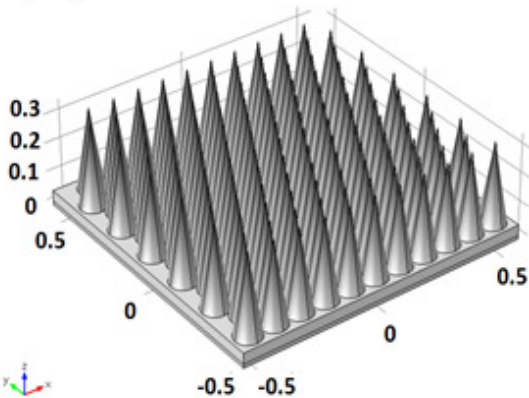
در ادامه مقاله نظریه پراکندگی امواج آکوستیکی شرح داده شده و شرایط مرزی لازم تعیین می شوند. در پایان نتایج به دست آمده از محاسبات گزارش شده است.

## ۲. معادله های خطی حاکم بر امواج صوتی، شرایط مرزی متفاوت و کاربرد آن ها در پراکندگی امواج تخت از اجسام قابل نفوذ

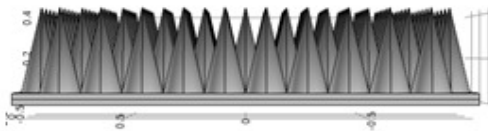
نقطه شروع برای حل معادله های حاکم بر انتشار و پراکندگی امواج صوتی (با استفاده از روش های عددی یا معادله های انتگرالی) بررسی معادله های دینامیکی حاکم بر سیستم است. در این قسمت معادله های خطی انتشار و پراکندگی امواج صوتی در حوزه زمانی و فرکانسی معرفی شده؛ سپس با معرفی شرایط مرزی حاکم بر مسئله به حل این معادله ها و بررسی اعتبار جواب های به دست آمده می پردازیم.

می شود؛

(الف)



(ب)



شکل ۱. نمایی از آرایه تنگ پکیده از مخروطهای جاذب صوت،

(الف) نمای بالایی و (ب) نمای از پهلو

$$\hat{P} = r^2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (۸)$$

درواقع قدرت بازتاب، مجموع شدت امواج پراکنده شده از جسم روی سطح یک نیم کره به شعاع  $r$  است. در رابطه (۸)  $I(\theta, \varphi) = P_{sc}^2$  شدت امواج بازتابیده،  $P_{sc}$  دامنه امواج بازتاب شده و  $r$  شعاع نیم کره‌ای است که انتگرال روی آن گرفته می‌شود.

در ادامه فرض می‌کنیم که دو نمونه جسم پراکنده کننده در شرایط کاملاً یکسان آزمایشگاهی، تحت تأثیر یک موج فشار ورودی قرار می‌گیرند. نمونه اول یک کاشی تشکیل شده از مخروطهای تنگ پکیده است که برای آن قدرت بازتاب با اندیس  $S$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{P}_s = r^2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_s(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (۹)$$

و نمونه دوم یک صفحه بازتابنده کامل (اغلب از جنس برنج یا آلومینیوم در نظر گرفته می‌شود) و قدرت بازتاب آن با اندیس  $p$  معین شده و رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\hat{P}_p = r^2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_p(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (۱۰)$$

ناحیه معادله‌های کلی، مستقل از زمان هستند و وابستگی هر پارامتر دلخواه  $f$  به زمان به صورت کلی زیر در نظر گرفته می‌شود؛

$$f = \hat{f} e^{i\omega t} \quad (۴)$$

پس با توجه به تبدیل حوزه زمانی به حوزه فرکانسی و با ترکیب معادله‌های موجود در رابطه (۳) رابطه حاکم بر توزیع فشار در یک شاره بدون حضور چشمه و بدون اتلاف عبارت است از [۱۰]:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} p) + \frac{\omega^2 p}{\rho c^2} = 0 \quad (۵)$$

در مرحله بعد لازم است که شرایط مرزی حاکم بر مسئله را تعریف کنیم. همان‌طور که گفته شد هندسه موردنظر در این مقاله یک آرایه تنگ پکیده از مخروطهاست که در یک محیط سیال (آب) قرار گرفته است. طرحی نمادین از این هندسه در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی چهار نوع شرط مرزی در مسائل آکوستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از:

۱. مرزهای صوتی سخت؛ ۲. مرزهای صوتی نرم؛ ۳.

شرایط مرزی امیدانس؛ ۴. شرایط مرزی تابشی.

در این مقاله ما با شرایط مرزی سخت و امیدانس سروکار داریم که در روی مرزها به ترتیب با روابط (۶) و (۷) اعمال می‌شوند. در اینجا لازم به یادآوری است که در شبیه‌سازی‌ها شرط مرزی سخت برای صفحه بازتابنده کامل و شرط مرزی امیدانس برای کاشی جاذب صوت مورد استفاده قرار گرفته که به شرح زیر می‌باشند [۱۶]:

$$\hat{n} \cdot \vec{\nabla} p_t = 0 \quad (۶)$$

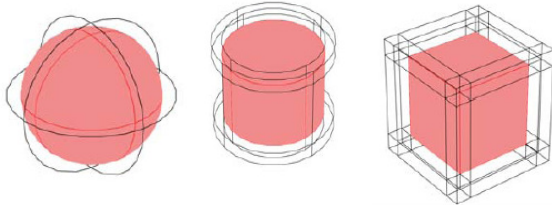
$$-\hat{n} \cdot \vec{\nabla} p_t = \frac{i\omega\rho}{Z} p_t \quad (۷)$$

در معادله (۷) پارامتر  $Z$  درواقع امیدانس صوتی در محیط است که به صورت حاصل ضرب چگالی در سرعت صوت در محیط تعریف می‌شود.

در بعضی از مراجع (به‌عنوان مثال مرجع [۱۷]) به جای بررسی فشار بازتابیده از سیستم، ضریب جذب و ضریب بازتاب سیستم بررسی شده است. در این مراجع فرض بر این است که یک موج ورودی به نمونه تابیده شده و به وسیله آن پراکنده می‌شود و کمیتی به نام قدرت بازتاب به صورت زیر تعریف

باید محاسبه شود. دلیل این امر این است که در این تقریب فاز  $p_{far}$  برای ما تعریف نشده است.

نکته نهایی که در این قسمت باید بیان شود؛ این است که در بسیاری از مسائل پراکندگی و مدل های موج بر، توانایی درست تشریح برای تابش امواج تخت فرودی را نداریم. در این حالت لازم است که از لایه های تطبیق یافته کامل (PML<sup>2</sup>) استفاده کنیم. لایه های تطبیق یافته کامل؛ تنها یک شرط مرزی نیستند بلکه تعریف کننده یک ناحیه جذبی می باشند. این لایه ها امواج تابیده شده به آن ها را به طور کامل جذب می کنند. این لایه ها کاربرد خوبی برای گستره وسیعی از زاویه های تابشی دارند و به شکل جبهه موج تابشی وابسته نیستند. از طرف دیگر در بسیاری از شبیه سازی ها، محیط مورد نظر ما نامحدود است. تعریف یک مسئله با مرزهای نامحدود در فرایندهای شبیه سازی در عمل غیرممکن است. به همین دلیل لازم است که از ترفندهای شبیه سازی برای این محیط ها استفاده کنیم. یکی از این ترفندها به کار بردن شرایط مرزی دوره ای است، ولی این شرایط مرزی تنها در ساختارهایی با دوره تناوب مشخص کاربرد دارند. ترفند دیگر استفاده از لایه های تطبیق یافته کامل است که به ما این امکان را می دهد که مسئله ای با ساختار نامحدود را به یک مسئله محدود در یک لایه تطبیق یافته تبدیل کنیم. در شکل ۲ مثالی از لایه های تطبیق یافته کامل نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که تعریف فیزیکی مسئله و معادله های موج در لایه های تطبیق یافته کامل با دشواری بسیاری همراه است [۱۷، ۱۸] ولی در نرم افزار کامسول یک ماژول برای این لایه ها وجود دارد که تاحدی از این دشواری کم می کند.



شکل ۲. نمونه هایی از لایه های تطبیق یافته کامل

در نهایت ضریب بازتاب را به صورت زیر تعریف می کنیم که برابر نسبت قدرت بازتاب نمونه اول به قدرت بازتاب صفحه فلزی است [۱۷].

$$R_c = \frac{P_s}{P_p} \quad (11)$$

لازم به یادآوری است که در واقع هدف اصلی در این مقاله بررسی نتایج در تقریب میدان های دور می باشد. در تقریب میدان های دور جواب ها مستقل از زاویه سمتی (نسبت به محور Z) هستند [۱۷]؛ بنابراین ضریب بازتاب را می توان برحسب دسی بل به صورت زیر نوشت [۱۷]:

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{I_{max}^s}{I_{max}^p} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{\pi/2} (I_s / I_{max}^s) \sin \theta \, d\theta}{\int_0^{\pi/2} (I_p / I_{max}^p) \sin \theta \, d\theta} \right) \quad (12)$$

که به صورت اختصاری

آن را با نمادهای زیر نشان می دهیم

$$R = \Delta + S \quad (13)$$

در این رابطه  $\Delta$  بیشینه مقدار ضریب بازتاب و  $S$  ضریب پراکندگی است.

نکته دیگری که در اینجا باید به آن اشاره شود این است که در حل معادله های صوتی اغلب به دنبال یافتن میدان فشار در تقریب میدان های دور هستیم [۱۸]. نرم افزار کامسول یک ماژول برای به دست آوردن این تقریب ارائه می دهد. در تقریب میدان های دور امواج پراکنده یا تابشی به صورت تخت هستند، سرعت و فشار با همدیگر همفاز بوده و نسبت بین فشار و اندازه سرعت به امپدانس امواج تخت در فضای آزاد میل می کند. برای به دست آوردن مرز میدان های دور هیچ قانون خاصی وجود ندارد؛ ولی اغلب برای اجسام پراکنده کننده با هندسه ساده، دامنه فشار در فراسوی این مرز متناسب با عکس فاصله از چشمه یا اجسام پراکنده کننده است. از دیدگاه ریاضی و در کاربردهای صنعتی مرز شروع تقریب میدان های دور با رابطه زیر داده می شود [۱۶]:

$$R > \frac{8a^2}{\lambda} = \frac{8}{2\pi} ka^2 \quad (14)$$

در این رابطه  $a$  شعاع کره ای است که تمام اجسام و چشمه ها را در برمی گیرد،  $\lambda$  طول موج و  $k$  عدد موج می باشد. نکته مهم دیگری که در تقریب میدان دور باید به آن توجه کنیم این است که در تقریب میدان های دور اندازه فشار ( $|p_{far}|$ )

به ترتیب در شکل‌های 4a تا 4d رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش  $R_{far}$  حاصل ضرب  $r^2|P_{far}|^2$  تغییر محسوسی نمی‌کند، پس نتیجه می‌گیریم که تقریب میدان‌های دور به‌ازای  $R_{far} = 5 m$  کاملاً صادق است. نتیجه دوم که از این شکل به‌دست می‌آید، این است که جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار کامسول در حالت حدی با موارد مورد انتظار ما مطابقت دارند.

جدول ۱. جدول پارامترهای مورد نیاز در حل مسئله یک بیضی گون غیرقابل نفوذ

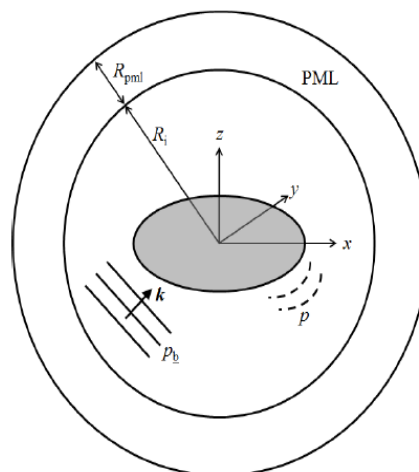
علامت	مقدار	توضیح
$R_i$	۱ متر	شعاع داخلی ناحیه مربوط به آب
$R_{pml}$	۰/۵۰۰۰ متر	ضخامت لایه تطبیق یافته کامل
$R_{far}$	۵ متر	فاصله‌ای که در آن تقریب میدان دور صادق است
$A$	۰/۵۰۰۰ متر	شعاع بیضی گون در راستای محور $x$
$B$	۰/۲۵۰۰	شعاع بیضی گون در راستای محور $y$
$C$	۰/۲۵۰۰	شعاع بیضی گون در راستای محور $z$
$\omega$	۱۰۰۰۰ هرتز	فرکانس موج ورودی
$c$	۱۵۰۰ متر بر ثانیه	سرعت صوت در آب
$\lambda$	۰/۱۵۰۰ متر	طول موج صوت در فرکانس $\omega$

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. صحت‌سنجی نتایج عددی

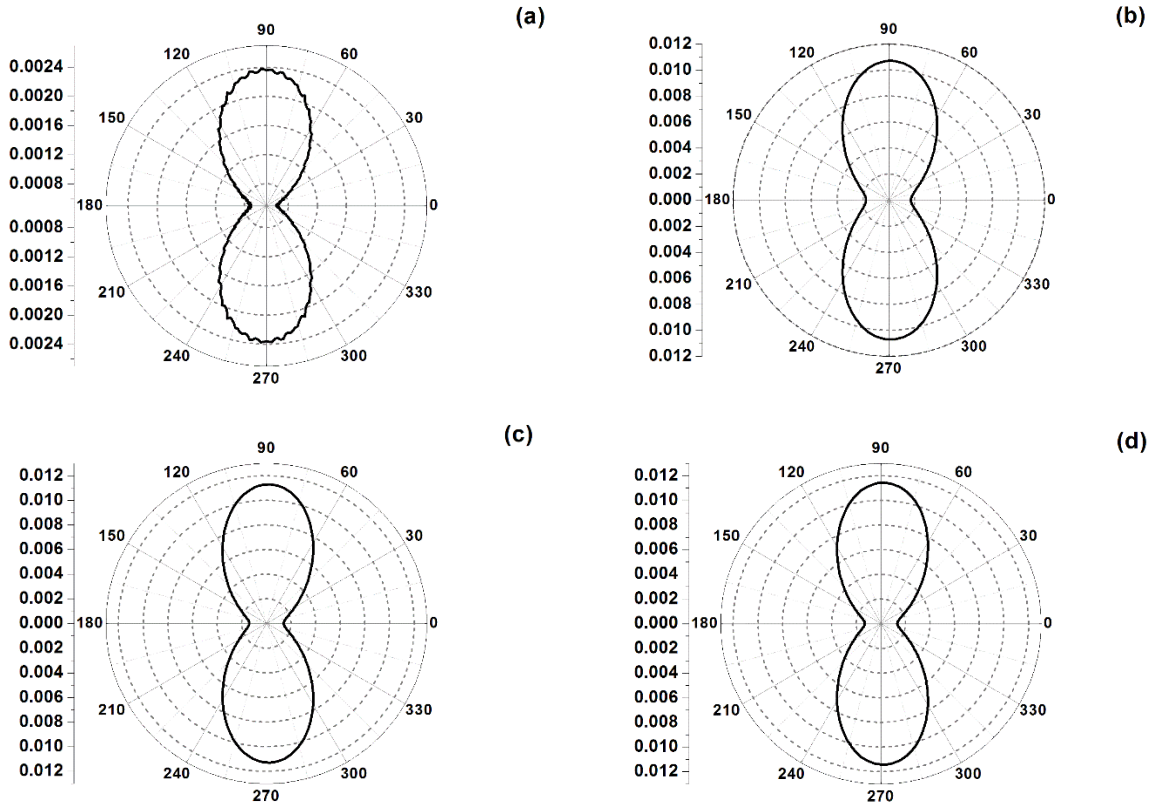
هدف این مقاله بررسی ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی یک آرایه از مخروط‌های جاذب صوت است که روی یک صفحه تخت قرار دارند. این سیستم یک کاشی جاذب صوت نامیده می‌شود. جنس این کاشی از لاستیک بوتیل آلائیده شده با فلز آلومینیوم یا سرب است.

در ابتدا لازم است که دقت و اعتبار جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار کامسول چک شود. به همین منظور ما دو ساختار ساده را در نظر گرفته و دقت جواب‌های به‌دست آمده برای آن‌ها را با موارد گزارش شده (حدی و دقیق) مقایسه می‌کنیم. در حالت اول جسم مورد نظر یک بیضی گون است که در آب قرار دارد. به منظور روشن شدن مسئله، در شکل ۳ هندسه ساختار مورد نظر رسم شده است. همچنین در جدول ۱ پارامترهای به کاررفته در شبیه‌سازی‌ها گزارش شده است.

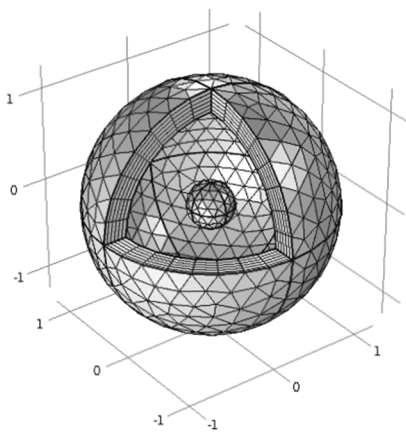


شکل ۳. نمایی نمادین از یک جسم غیرقابل نفوذ بیضی شکل که در یک محیط بی‌نهایت قرار دارد.

همان‌طور که گفته شد در تقریب میدان‌های دور، برای ساختارهایی با هندسه ساده  $|P_{far}| \propto \frac{1}{r}$ . بنابراین باید حاصل ضرب  $r^2|P_{far}|^2$  برابر یک مقدار ثابت باشد. نمودار  $r^2|P_{far}|^2$  به ازای مقادیر متفاوت  $R_{far} = 1, 2, 5, 10 m$



شکل ۴. نمودار  $r^2 |P_{far}|^2$  به ازای مقادیر متفاوت:  $R_{far} = 1 m$ ،  $R_{far} = 2 m$ ،  $R_{far} = 5 m$  و  $R_{far} = 10 m$



شکل ۵. طرح نمادین از یک کره قابل نفوذ و لایه PML.

در ادامه؛ مطابق مرجع [۷] دامنه موج تخت تابشی برابر با ۱ پاسکال در نظر گرفته می شود. همچنین در مرجع [۷] سطح مقطع امواج پراکنده شده بررسی شده است. سطح مقطع پراکندگی با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\sigma(r, \theta, \varphi) = 4\pi r^2 \left( \frac{|p_{sc}(r, \theta, \varphi)|}{|p_{in}(r, \theta, \varphi)|} \right)^2 \quad (15)$$

که در این رابطه  $(r, \theta, \varphi)$  مختصات نقطه مورد مشاهده،

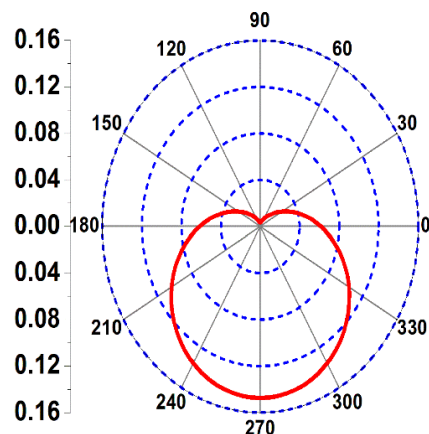
در حالت دوم به بررسی امواج تخت پراکنده شده توسط یک کره قابل نفوذ می پردازیم. هئنده ساختار مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است. فرض می کنیم که شعاع کره  $R_1$  باشد و چگالی جرمی و سرعت صوت در این محیط با  $\rho_1$  و  $c_1$  نمایش داده شوند. همچنین فرض می کنیم که این کره در یک محیط با مشخصات  $R_2$ ،  $\rho_2$  و  $c_2$  قرار دارد. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی در نرم افزار کامسول با نتایج تحلیلی ارائه شده در مراجع، از مواد مشابه با مواد به کاررفته در مرجع [۷] استفاده کرده ایم یعنی:  $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ،  $\frac{c_1}{c_2} = 1.2700$ ،  $c_2 = 343.2000 \text{ m/s}$ ،  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1.2200$  و  $\frac{R_1}{\lambda_2} = 0.7000$  که  $\lambda_2$  طول موج امواج صوتی در محیط ۲ است. همچنین فرکانس امواج تخت برابر  $\omega = 1000 \text{ Hz}$  است [۷].

این نمونه انجام شده، ولی اغلب آن‌ها به صورت اسناد طبقه‌بندی شده هستند و دسترسی به جواب‌های قابل اطمینان بسیار محدود است. به عنوان نمونه می‌توان به مراجع [۱۰، ۱۷] اشاره کرد. با انجام تحقیقات گسترده، به این نتیجه رسیدیم که نتایج گزارش شده در مرجع [۱۰] به هیچ عنوان قابل اطمینان نیستند.

مرجع [۱۷] یکی از بهترین نتایج گزارش شده در زمینه مطالعه بازتاب امواج از کاشی جاذب صوت است. این مرجع در واقع یک اختراع ثبت شده در سال ۱۹۵۳ است که به صورت گسترده به بررسی پراکندگی امواج صوتی با یک آرایه تنگ پیکیده از مخروط‌های جاذب صوت پرداخته است. در مرجع [۱۷] پارامترهای ضریب بازتاب، بیشینه مقدار ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی برای سه نمونه از کاشی‌های مخروطی گزارش شده‌اند. جنس این سه نمونه متفاوت لاستیک بوتیل آلاییده شده با فلز سرب یا آلومینیوم است. با توجه به مطالب ذکر شده در این مرجع سه نوع فرایند آلایدیگی برای لاستیک بوتیل در نظر گرفته شده و نتایج برای این سه نمونه گزارش شده‌اند. نکته دیگر اینکه این کاشی جاذب صوت روی یک صفحه تخت از همان جنس قرار دارد. پارامترهای بیان شده در این مرجع برای این ساختارها عبارت‌اند از [۱۷]:

- چگالی لاستیک بوتیل آلاییده شده توسط سرب و سرعت صوت در آن به ترتیب برابر  $\rho = 2614 \text{ kg/m}^3$  و  $c = 1800 \text{ m/s}$  (نمونه ۱ در این مقاله)؛
- چگالی لاستیک بوتیل آلاییده شده با آلومینیوم و سرعت صوت در آن به ترتیب برابر  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$  و  $c = 1600 \text{ m/s}$  (نمونه ۲ در این مقاله)؛
- چگالی لاستیک بوتیل آلاییده شده با سرب و سرعت صوت در آن به ترتیب برابر  $\rho = 2075 \text{ kg/m}^3$  و  $c = 1800 \text{ m/s}$  (نمونه ۳ در این مقاله)؛
- ارتفاع مخروط‌ها برابر  $h = 3.7320 \text{ cm}$ ؛
- شعاع سطح مقطع مخروط‌ها برابر  $s = 1 \text{ cm}$ ؛
- طول صفحه زیرین که مخروط‌ها روی آن چیده شده‌اند برابر  $a = 22.5000 \text{ cm}$ ؛

$p_{sc}(r, \theta, \phi)$  فشار پراکنده شده در نقطه  $(r, \theta, \phi)$  و  $p_{in}(r, \theta, \phi)$  فشار امواج تخت تابشی در نقطه  $(r, \theta, \phi)$  است. در شکل ۶ نمودار سطح مقطع پراکندگی در تقریب میدان‌های دور در صفحه YZ رسم شده است.



شکل ۶. نمودار سطح مقطع پراکندگی در تقریب میدان‌های دور در صفحه YZ

با توجه به روابط تحلیلی گفته شده در مرجع [۷] سطح مقطع پراکندگی مستقل از فاصله نقطه مورد مشاهده از مرکز جسم پراکنده کننده است و از طرف دیگر با توجه به تقارن سمتی موجود در مسئله این کمیت به زاویه سمتی نیز وابسته نیست. پس سطح مقطع پراکندگی تنها تابعی از زاویه قطبی است. در این مرجع مقدار  $\sigma(\theta = \pi) = 0.157$  برای سطح مقطع پراکندگی گزارش شده است. با انجام دادن شبیه‌سازی برای ساختاری با همان مشخصات (شکل ۶ را ببینید)، مقدار  $\sigma(\theta = \pi) = 0.1480$  را محاسبه کرده‌ایم که با مقایسه این مقدار درصد خطای نسبی برابر مقدار زیر است:

$$RPD = \frac{\sigma_{\text{exact}} - \sigma_{\text{calculated}}}{\sigma_{\text{exact}}} \times 100 = -5.7300 \% \quad (16)$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ما به مقدار قابل قبولی به نتایج تحلیلی گزارش شده در مرجع [۷] نزدیک است و این اطمینان را می‌دهد که روش شبیه‌سازی ما دارای دقت قابل قبولی است.

## ۲-۳. نتایج ضریب بازتاب و پراکندگی کاشی جاذب صوت

در ادامه این مقاله به بررسی پراکندگی امواج تخت با یک آرایه منظم از مخروط‌های قابل نفوذ می‌پردازیم. با توجه به اهمیت زیاد این ساختار در صنعت، تحقیقات گسترده‌ای روی

پراکندگی زیاد شده، به یک مقدار بیشینه رسیده؛ سپس کاهش می یابد؛

۴. با مقایسه ضریب پراکندگی سه نمونه به این نتیجه می رسیم که نمونه ۲ ضریب پراکندگی بزرگ تری نسبت به دو نمونه دیگر دارد، که به این معنی است که علاوه بر جذب بهتر، نمونه ۲، امواج صوتی تابیده شده را به میزان بیشتری در راستاهای مختلف (راستای موازی با صفحه کاشی) پراکنده می کند؛

۵. برای نمونه های ۱ و ۳ در فرکانس های پایین ضریب پراکندگی منفی است. تفسیر فیزیکی این مطلب این است که در فرکانس های پایین این نمونه ها بیشتر به صورت یک جسم بازتابنده رفتار می کنند تا یک جسم پراکنده کننده. در کاربردهای تجربی ما به نمونه هایی نیاز داریم که هم جاذب خوب و هم پراکنده کننده خوب باشند؛

۶. با مقایسه نتایج گزارش شده در مرجع [۱۷] و نتایج محاسبه شده به وسیله نرم افزار کامسول مشاهده می شود که تفاوت هایی در این دو دسته جواب وجود دارد. به منظور توضیح بیشتر این تفاوت ها باید به موارد زیر اشاره کنیم. نخست اینکه در شرایط آزمایشگاهی فاکتورهای متعددی روی نتیجه اندازه گیری تأثیر می گذارند. به عنوان نمونه می توان به نویز موجود در سیستم، یکنواخت بودن موج تابیده به نمونه، خطای شخص و دستگاه مورد استفاده در اندازه گیری اشاره کرد. دوم اینکه در نمونه های مدل شده به وسیله نرم افزار شرایط کاملاً ایده آل در نظر گرفته می شود که در واقعیت فراهم کردن چنین شرایطی امکان پذیر نیست. نکته آخر اینکه در تمامی شبیه سازی های عددی، نتایج به دست آمده دارای خطا می باشند که در این گزارش ما سعی کرده ایم با به کار بردن مش بندی های مناسب مقدار این خطا را به حداقل برسانیم. همان طور که از شکل های ۷ تا ۹ مشاهده می شود؛ موارد به دست آمده تا حد قابل قبولی به موارد گزارش شده نزدیک هستند که بیانگر قابل اعتماد بودن نرم افزار به کار رفته است.

• عرض صفحه زیرین که مخروط ها روی آن چیده شده اند برابر  $b = 21.8000 \text{ cm}$ ؛

• ارتفاع صفحه زیرین که مخروط ها روی آن چیده شده اند برابر  $c = 5 \text{ cm}$ .

لازم است یادآور شویم که در اینجا کمیت های ضریب بازتاب، بیشینه مقدار ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی برای نمونه های ۱، ۲ و ۳ به صورت نسبت قدرت پراکندگی کاشی جاذب صوت به قدرت پراکندگی یک صفحه پراکنده کننده کامل تعریف می شوند. بنابراین دامنه موج ورودی در این نسبت حذف شده و یک پارامتر تعیین کننده نیست.

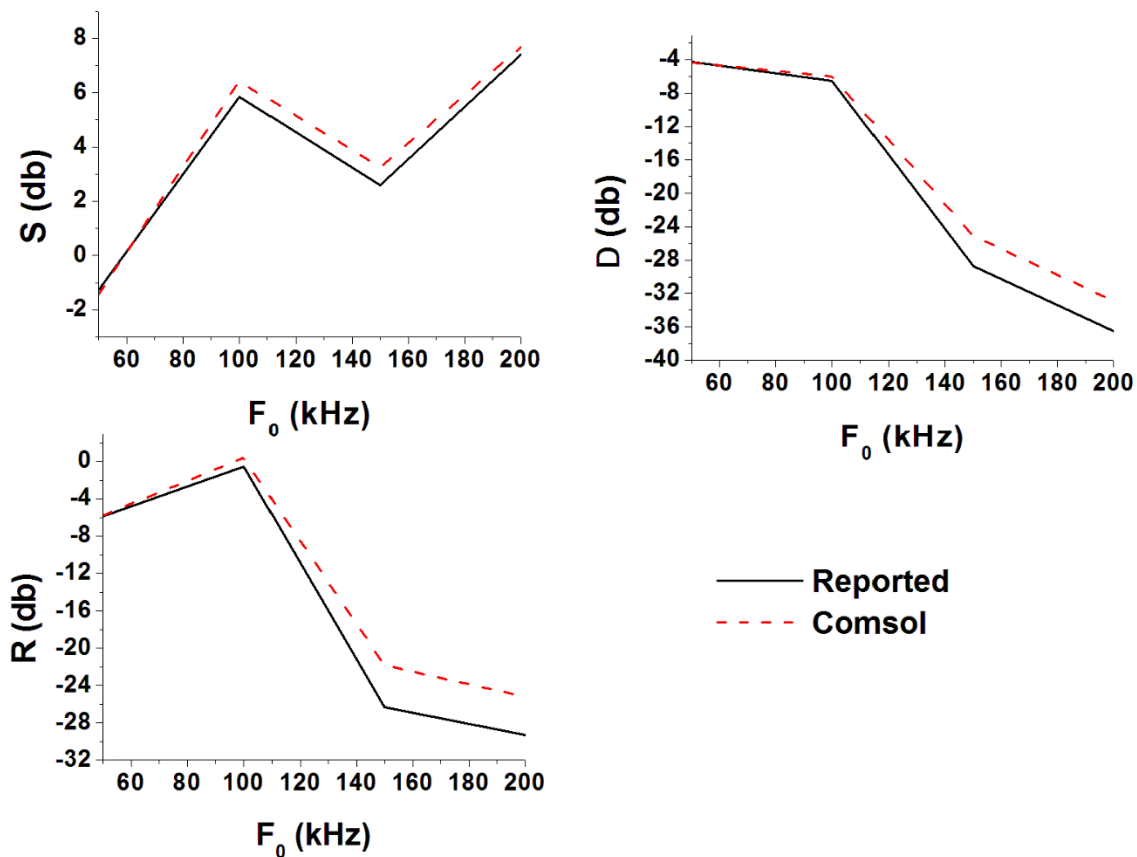
برای ساختار مورد نظر (هندسه ارائه شده در شکل ۱) ضریب بازتاب ( $R$ )، بیشینه مقدار ضریب بازتاب ( $\Delta$ ) و ضریب پراکندگی ( $S$ ) محاسبه شده با نرم افزار کامسول برای هر سه نمونه (نمونه های ۱، ۲ و ۳) به ترتیب در شکل های ۷، ۸ و ۹ به صورت تابعی از فرکانس موج تابیده شده، رسم شده اند. با توجه به این نمودارها موارد زیر قابل مشاهده هستند:

۱. برای هر سه نمونه با افزایش فرکانس، بیشینه مقدار ضریب بازتاب کاهش پیدا می کند، ولی برای نمونه های ۲ و ۳ در فرکانس های بالا یک رفتار متفاوت مشاهده می شود. در این نمونه ها با افزایش فرکانس افزایش اندکی در بیشینه مقدار ضریب بازتاب مشاهده می شود؛

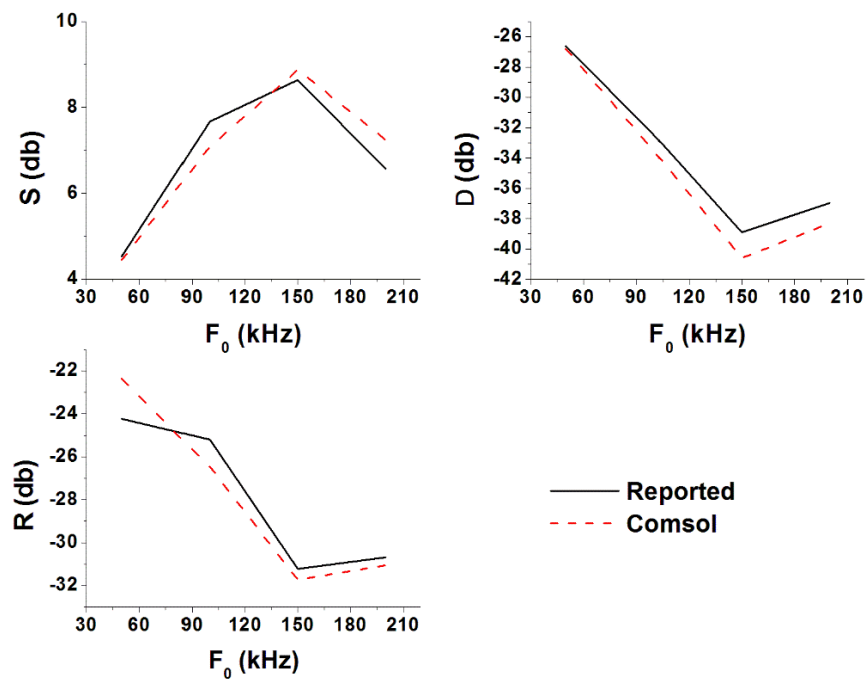
۲. با مقایسه دامنه تغییرات بیشینه مقدار ضریب بازتاب به این نتیجه می رسیم که در کاربردهای صنعتی به منظور جذب بالاتر امواج صوتی، بهتر است از نمونه ۲ استفاده کنیم. (نمونه لاستیک بوتیل آلائیده شده با آلومینیوم). دلیل این امر این است که این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر درصد بیشتری از امواج تابیده شده را جذب می کند (به تعریف بیشینه مقدار ضریب بازتاب در رابطه ۱۲ دقت کنید که به صورت لگاریتم یک نسبت است که این نسبت همواره کوچک تر از یک است)؛

۳. برای نمونه های ۱ و ۳ با افزایش فرکانس ضریب پراکندگی یک رفتار نوسانی را نشان می دهد، در صورتی که برای نمونه ۲ با افزایش فرکانس ضریب

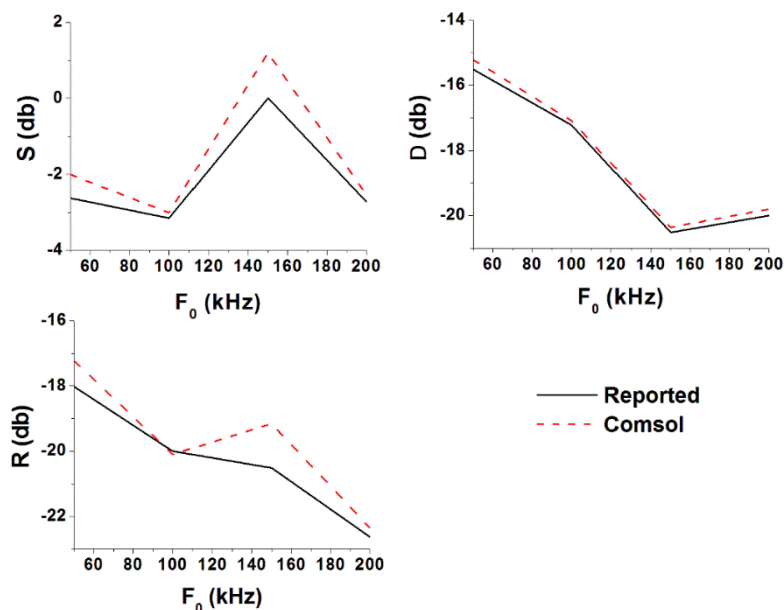




شکل ۷. ضریب بازتاب، بیشینه مقدار ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی گزارش شده در مرجع [۱۷]؛ همچنین مقادیر حساب شده با نرم افزار کامسول برای نمونه



شکل ۸. ضریب بازتاب، بیشینه مقدار ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی گزارش شده در مرجع [۱۷]؛ همچنین مقادیر حساب شده با نرم افزار کامسول برای نمونه ۲



شکل ۹. ضریب بازتاب، بیشینه مقدار ضریب بازتاب و ضریب پراکندگی گزارش شده در مرجع [۱۷]

همچنین مقادیر حساب شده با نرم افزار کامسول برای نمونه ۳

- [3] Mitri FG. Acoustic scattering of a Bessel vortex beam by a rigid fixed spheroid. *Annals of Physics*. 2015 Dec 31;363:262-74.
- [4] Faran Jr JJ. Sound scattering by solid cylinders and spheres. *The Journal of the acoustical society of America*. 1951 Jul;23(4):405-18.
- [5] Diercks KJ, Hickling R. Echoes from hollow aluminum spheres in water. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1967 Feb;41(2): 380-93.
- [6] Sodagar S, Honarvar F, Sinclair AN. Multiple scattering of an obliquely incident plane acoustic wave from a grating of immersed cylindrical shells. *Applied Acoustics*. 2011 Jan 31;72(1):1.
- [7] Kakogiannos NB, Roumeliotis JA. Acoustic scattering from a sphere of small radius coated by a penetrable one. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1995 Dec;98(6):3508-15.
- [8] Elhanaoui A, Aassif E, Maze G, Décultot D. Acoustic scattering by a two-layer cylindrical tube immersed in a fluid medium: Existence of a pseudo wave. *Ultrasonics*. 2016 Feb 29;65:131-6.
- [9] Anand A, Pandey A, Kumar BR, Paul J. An efficient high-order Nyström scheme for acoustic scattering by inhomogeneous penetrable media with discontinuous material interface. *Journal of Computational Physics*. 2016 Apr 15;311:258-74.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

هدف این مقاله محاسبه ضریب بازتاب و پراکندگی امواج تخت صوتی تاییده شده به یک کاشی جاذب صوت است. هندسه کاشی جاذب صوت شامل؛ یک آرایه از مخروطهای تنگ پکیده است که روی یک صفحه تخت قرار دارند و جنس کاشی از لاستیک بوتیل آلاییده شده با فلز آلومینیوم و سرب است. محاسبات انجام شده در این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول انجام شده است. از مقایسه نتایج به دست آمده در این مقاله با موارد آزمایشگاهی گزارش شده به این نتیجه می رسیم که:

(۱) شبیه سازی های انجام شده با نرم افزار کامسول دقت قابل قبولی دارند؛

(۲) کاشی ساخته شده از لاستیک بوتیل آلاییده شده با فلز آلومینیوم دارای اندازه ضریب پراکندگی و بازتاب بالاتری می باشد؛

(۳) بهتر است در دستگاه های آزمایشگاهی از کاشی جاذب صوت آلاییده شده با فلز آلومینیوم استفاده شود.

#### ۵. مراجع

- [1] Rayleigh JWS. *The Theory of Sound*. 2nd ed. New York: Dover;1945.
- [2] Lamb H. *Hydrodynamics*. 6th ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press: 1932.

- [16] COMSOL Multiphysics®. Acoustics Module User's Guide. Version 4.2. USA: Inc. Burlington, MA; 2011.
- [17] Heller A. Anechoic tank lining. Washington, DC. assignor to the United States of America as represented by the Secretary of the Navy, Filed Dec 29, 1955, Ser No 556. Patented Aug. 01, 1961.
- [18] Lyrintzis AS. Surface integral methods in computational aeroacoustics—From the (CFD) near-field to the (Acoustic) far-field. International journal of aeroacoustics. 2003 Apr;2(2):95-128.
- [19] Berenger JP. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of computational physics. 1994 Oct 1;114(2):185-200.
- [20] Berenger JP. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of computational physics. 1996 Sep 1;127(2):363-79.
- [10] Di Meglio A. Finite element-boundary elements modelling of acoustic scattering from viscoelastic anechoic structures [dissertation]. Univ. Birmingham; 2000.
- [11] Lee WM. Three-dimensional acoustic scattering by multiple spheres using collocation multipole method. International Journal of Solids and Structures. 2015 Jun 15;63:39-49.
- [12] Amirkulova FA, Norris AN. Acoustic multiple scattering using recursive algorithms. Journal of Computational Physics. 2015 Oct 15;299:787-803.
- [13] Chai Y, Li W, Gong Z, Li T. Hybrid smoothed finite element method for two-dimensional underwater acoustic scattering problems. Ocean Engineering. 2016 Apr 1;116:129-41.
- [14] Hennion AC, Bossut R, Decarpigny JN, Audoly C. Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a periodic elastic structure using the finite element method: Application to compliant tube gratings. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990 May;87(5):1861-70.
- [15] Easwaran V, Munjal ML. Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach. The Journal of the Acoustical Society of America. 1993 Mar;93(3):1308-18.

## ۶. پی نوشت

<sup>1</sup> nondestructive acoustic waves

<sup>2</sup> closed-packed

<sup>3</sup> perfectly matched layers