

شبیه‌سازی عددی عملکرد فراماده جاذب صوت زیر آب دولایه بر پایه فوم متخلخل و لایه تطبیق امپدانس در محدوده فرکانس‌های پایین

امیرحسین مرادی^آ، ابوالفضل حسنی بافرانی^{ب*}

^آ ایران، تفرش، دانشگاه تفرش، دانشکده مکانیک، ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

^ب ایران، تفرش، دانشگاه تفرش، دانشکده مکانیک، ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، استادیار دانشکده مکانیک

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Baferani@tafreshu.ac.ir

چکیده

این پژوهش به شبیه‌سازی عددی عملکرد یک جاذب صوتی زیرآبی دولایه متشکل از فوم متخلخل آلومینیومی، لایه تطبیق امپدانس و قاب فلزی پرداخته است. در این ساختار فوم متخلخل آلومینیومی درون قاب فلزی قرار گرفته تا علاوه بر پشتیبانی مکانیکی، بر رفتار آکوستیکی نیز تأثیر بگذارد. هدف اصلی، بررسی رفتار جذب صوت در محدوده فرکانس‌های پایین و ارزیابی تأثیر مواد مختلف لایه تطبیق بر عملکرد کلی ساختار بوده است. برای این منظور از مدل JCA جهت توصیف ویژگی‌های آکوستیکی فوم متخلخل آلومینیومی و نرم‌افزار اجزای محدود کامسول برای تحلیل رفتار دینامیکی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور لایه تطبیق امپدانس شرایط انتقال انرژی صوتی از آب به فوم را بهبود داده و همراه با اثرات قاب فلزی موجب شکل‌گیری دو قله جذب اصلی در فرکانس‌های پایین و میانی می‌شود. بررسی تغییر ضخامت لایه‌ها نشان داد بهترین عملکرد در حالت ضخامت ۶ میلی‌متر فوم متخلخل آلومینیومی و ۴ میلی‌متر لایه تطبیق به دست آمده است. همچنین مقایسه مواد مختلف نشان داد لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین یکنواخت‌ترین و پایدارترین رفتار جذب را در کل بازه ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ارائه می‌دهند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های برتر در طراحی جاذب‌های صوتی زیرآبی با ضخامت پایین مطرح شوند.

کلمات کلیدی: فراماده جاذب صوت، زیر آب، فوم متخلخل آلومینیومی، شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

کنترل و کاهش نویز در محیط‌های زیرآبی از جمله موضوعات پرچالش در حوزه آکوستیک و مهندسی دریا به شمار می‌رود، زیرا انتشار امواج صوتی در آب نسبت به هوا بازده بالاتری دارد و می‌تواند عملکرد سامانه‌های مخابراتی، ناوبری و تجهیزات حساس دریایی را تحت تأثیر قرار دهد [۱-۳]. در این میان، استفاده از جاذب‌های صوتی کارآمد یکی از رویکردهای مؤثر برای کاهش بازتاب و افزایش اتلاف انرژی امواج صوتی است [۴-۶]. جاذب‌های متخلخل به دلیل داشتن شبکه پیچیده منافذ و قابلیت تبدیل انرژی صوتی به گرما، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند [۷-۹]. فوم‌های متخلخل فلزی، به‌ویژه فوم متخلخل آلومینیومی، به دلیل چگالی پایین، مقاومت مکانیکی مناسب و ویژگی‌های آکوستیکی مطلوب، به عنوان یکی از گزینه‌های نوین برای ساخت جاذب‌های زیرآبی مطرح شده‌اند. این مواد با ایجاد مکانیزم‌های اتلاف ویسکوزی و حرارتی در مقیاس میکروسکوپی می‌توانند ضریب جذب بالایی در گستره‌ای

وسیع از فرکانس‌ها فراهم کنند. با این حال، به دلیل اختلاف امپدانس^۱ صوتی میان آب و فوم متخلخل آلومینیومی، بخش قابل توجهی از انرژی صوتی در مرز مشترک بازتاب می‌شود که عملکرد کلی جاذب را محدود می‌سازد [۱۰، ۱۱]. برای رفع این مشکل، استفاده از لایه‌های تطبیق امپدانس به‌عنوان واسطه‌ای میان آب و لایه جاذب مورد توجه قرار گرفته است. انتخاب جنس این لایه به گونه‌ای که امپدانس آکوستیکی نزدیک به آب داشته باشد، نقش کلیدی در بهبود انتقال انرژی و افزایش بازده جذب ایفا می‌کند [۱۲]. افزون بر این، حضور قاب فلزی به عنوان پشتیبان مکانیکی در ساختار جاذب نه تنها استحکام لازم را ایجاد می‌کند، بلکه با القای مودهای تشدید می‌تواند بر رفتار آکوستیکی در بازه‌های فرکانسی خاص اثرگذار باشد [۱۳، ۱۴].

از سوی دیگر، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی به کمک روش اجزای محدود و مدل‌های آکوستیکی همچون JCA^۲، امکان تحلیل دقیق برهم‌کنش‌های صوتی، مکانیکی و حرارتی در چنین ساختارهایی را فراهم می‌سازد [۸]. این ابزارها کمک می‌کنند تا پیش از ساخت نمونه‌های واقعی، اثر پارامترهایی مانند ضخامت لایه‌ها، جنس مواد و هندسه قاب بر عملکرد جذب صوت بررسی شود. با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی عملکرد یک جاذب صوتی زیرآبی دولایه شامل فوم متخلخل آلومینیومی، لایه تطبیق امپدانس و قاب فلزی پرداخته و تلاش کرده است تا تأثیر ضخامت و جنس مواد مختلف بر رفتار جذب در بازه فرکانسی پایین مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش

۲-۱ مواد

لایه‌ی تطبیق امپدانس، جزء کلیدی و حساس این ساختار است که نقش واسطه بین محیط آب و لایه فومی جاذب را ایفا می‌کند. انتخاب ماده این لایه به گونه‌ای انجام شده که امپدانس صوتی آن به آب نزدیک باشد تا بازتاب موج در مرز آب و جاذب کاهش یابد و امکان نفوذ بیشتر امواج صوتی به داخل ساختار فراهم شود [۱۲]. در این مطالعه، برای لایه تطبیق امپدانس، تأثیر پنج ماده مختلف مورد بررسی قرار گرفته است تا ماده‌ای با بهترین ترکیب خواص مکانیکی و امپدانس برای کاربرد زیرآبی انتخاب شود. خواص مکانیکی (مدول الاستیسیته، چگالی، ضریب پواسون و ضریب تلفات) این مواد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در لایه تطبیق امپدانس و فولاد پشتیبان صلب [۱۲، ۱۴-۱۶].

مواد	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	ضریب تلفات
اپوکسی ^۳	۱۱۰۰	۲۷	۰.۴۹	۰.۶
ترموپلاستیک پلی‌یورتان ^۴	۱۱۵۰	۲۰	۰.۴۸۵	۰.۸
لاستیک بوتادین نیتریل ^۵	۱۰۵۶	۱۴.۵	۰.۴۶	۱.۳
لاستیک استایرون بوتادین ^۶	۱۰۳۹	۹۶	۰.۴۸	۱
لاستیک پلی‌اتیلن کلردار ^۷	۱۲۱۰	۹۸.۹	۰.۴	۱
فولاد پشتیبان صلب	۷۸۵۰	۲۰۰۰۰۰	۰.۳	-

بخش جاذب اصلی از فوم آلومینیومی متخلخل تشکیل شده که داخل یک فریم فلزی مستحکم جای‌گذاری شده است. فریم فلزی علاوه بر تأمین پشتیبانی ساختاری، نگهداری هندسی دقیق فوم را تضمین می‌کند و از تغییر شکل‌های ناخواسته فوم در طول

^۱ Impedance

^۲ Johnson-Champoux-Allard

^۳ Epoxy

^۴ Thermoplastic polyurethane (TPU)

^۵ Nitrile butadiene rubber (NBR)

^۶ Chlorinated polyethylene rubber (CPR)

^۷ Styrene butadiene rubber (SBR)

عملیات و شرایط مرزی جلوگیری می‌کند. در عین حال، تماس فوم با فریم فلزی ممکن است تأثیراتی بر رفتار صوتی داشته باشد؛ فریم فلزی به دلیل صلبیت بالا می‌تواند به عنوان یک زمینه سفت عمل کرده و در فرایند جذب امواج باعث بازتاب ناشی از چارچوب شود یا مسیرهای انتقال ساختاری-مکانیکی بین فوم و فریم ایجاد نماید. برخی مطالعات نشان داده‌اند که حضور قاب فلزی ممکن است باعث کاهش جذب در فرکانس‌های خاص شود؛ در مقابل، طراحی قاب با ضخامت و آرایش مناسب می‌تواند تأثیر منفی را کاهش دهد [۱۰]. برای مدل‌سازی آکوستیکی فوم، از مدل JCA بهره گرفته شده است که پارامترهای ترمودینامیکی و ارتعاشی محیط متخلخل را لحاظ می‌کند و امکان پیش‌بینی ضریب جذب صوت را فراهم می‌آورد. مقادیر پارامترهای آکوستیکی تعیین‌شده بر اساس این مدل برای فوم آلومینیومی در جدول (۲) آورده شده‌اند. در کل، این ترکیب از یک لایه تطبیق امپدانس با خواص مناسب و یک لایه جاذب فومی با پشتیبانی فریم فلزی، امکان بررسی رفتار صوتی دقیق ساختار را فراهم می‌آورد و زمینه‌ای برای مقایسه بین گزینه‌های مختلف مواد تطبیقی در محیط زیرآبی فراهم می‌کند.

جدول ۲. پنج پارامتر آکوستیکی مورد استفاده در مدل JCA برای فوم آلومینیومی [۱۰].

ماده	تخلخل ϕ	تور توزیته α_{∞} ^۱	مقاومت جریانی σ ($Pa.s.m^{-3}$)	طول مشخصه ویسکوز $\Lambda(m)$	طول مشخصه حرارتی $\Lambda'(m)$
فوم آلومینیومی	۰.۸۵	۱.۰۴	۶۰۰۰	۶۶۶.۷۷×۱۰^{-۷}	۲۷۰.۱۳×۱۰^{-۷}

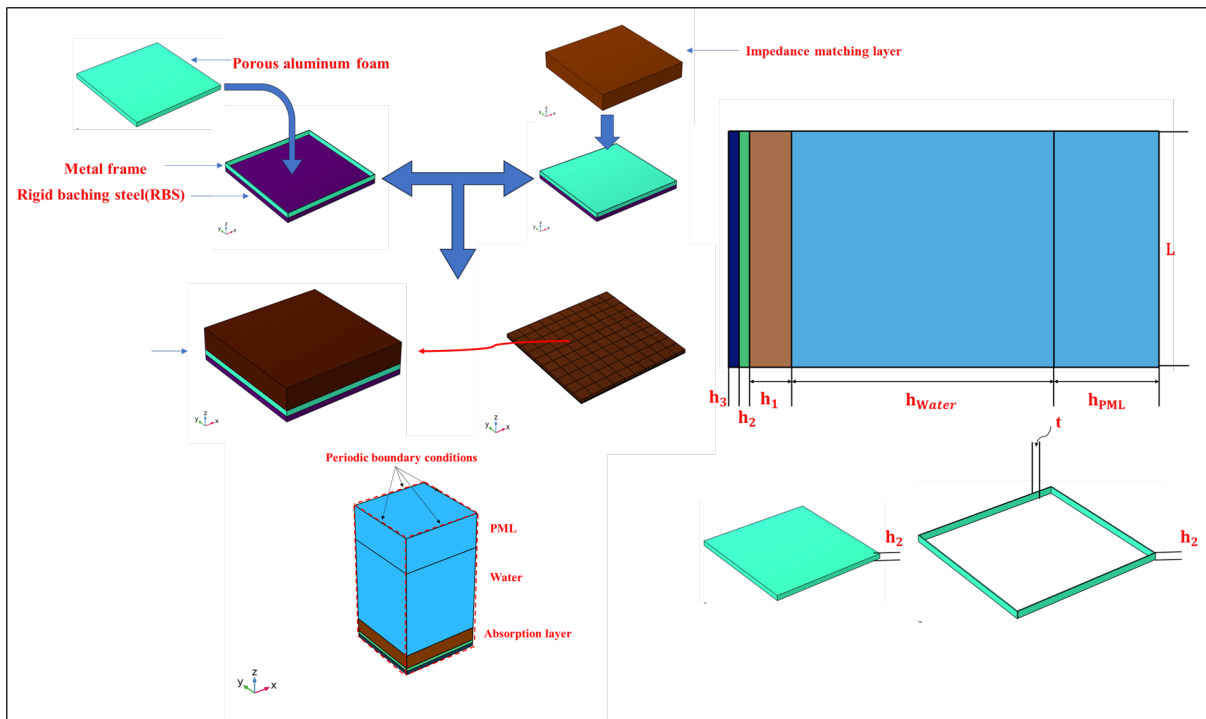
۲-۲ روش

در این تحقیق، برای محاسبه ضریب جذب صوت، از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. این نرم‌افزار، که بر پایه روش المان محدود عمل می‌کند، در زمینه‌های مختلف شبیه‌سازی کاربرد دارد و توانایی بالایی در حل مسائل آکوستیکی نشان داده است [۱۷-۲۰]. در این مطالعه، نمونه‌ها با بهره‌گیری از این نرم‌افزار اجزای محدود کامسول شبیه‌سازی شدند و معادلات حاکم به تفصیل در این مرجع آمده است [۱۲]. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سطح مقطع یک سلول از جاذب به شکل یک مقطع چهارضلعی انتخاب شده است، زیرا این شکل هندسی علاوه بر سادگی در مدل‌سازی، امکان ایجاد آرایش دوره‌ای سلول‌ها را فراهم می‌کند و می‌توان آن را به عنوان نماینده‌ای از یک فراساختار بی‌نهایت تکرار شونده در نظر گرفت. مسئله به صورت سه‌بعدی و با ترکیب فیزیک‌های فشار صوتی در حوزه فرکانس و مکانیک جامدات مدل‌سازی شده است. در بالای فضای آب، یک لایه به صورت کاملاً همسان قرار داده شده تا امواج صوتی ورودی با امواج انعکاس یافته از سطح جاذب تداخل نکنند و امواج بازتابی بتوانند به محیط بیرون منتقل شوند [۱۶]. ساختار مدل اجزای محدود از بالا به پایین شامل: لایه کاملاً منطبق (۲۰ میلی‌متر)، لایه آب (۵۰ میلی‌متر)، لایه جاذب صوتی (۱۰ میلی‌متر)، فولاد پشتیبان صلب (۲ میلی‌متر) و عرض هر سلول (۴۵ میلی‌متر) است. همچنین، در سطح تماس بین آب و جاذب، یک رابط جامد-سیال تعریف شده است تا تبادل نیرو و فشار به درستی شبیه‌سازی شود. برای تولید موج صوتی، یک میدان فشار پس‌زمینه در لایه آب اعمال شده است. با تعیین شرایط مرزی تناوبی در چهار ضلع سلول، می‌توان سلول را نماینده‌ای از یک ساختار تناوبی بی‌نهایت در نظر گرفت. این رویکرد باعث می‌شود که بعد جانبی جاذب به صورت نامتناهی مدل شود و ساختار کلی از تکرار سلول‌های چهارضلعی تشکیل گردد، که در شکل (۱) دیده می‌شوند. همچنین در شکل (۱)، پارامترهای هندسی پیش‌فرض بخش‌های مختلف مدل اجزای محدود نمایش داده شده‌اند و جدول (۳) شامل مقادیر عددی این پارامترها می‌باشد.

جدول ۳. پارامترهای هندسی پیش‌فرض بخش‌های مختلف مدل اجزای محدود

عنوان	لایه کاملاً همسان (h_{PML})	لایه آب (h_{Water})	لایه تطبیق امپدانس (h_1)	لایه فوم متخلخل و قاب فلزی (h_2)	ضخامت ورق قاب فلزی (t)	لایه فولاد پشتیبان صلب (h_3)	عرض هر سلول (L)
مقدار (mm)	۲۰	۵۰	۸	۲	۰.۵	۲	۴۵

^۱ Tortuosity

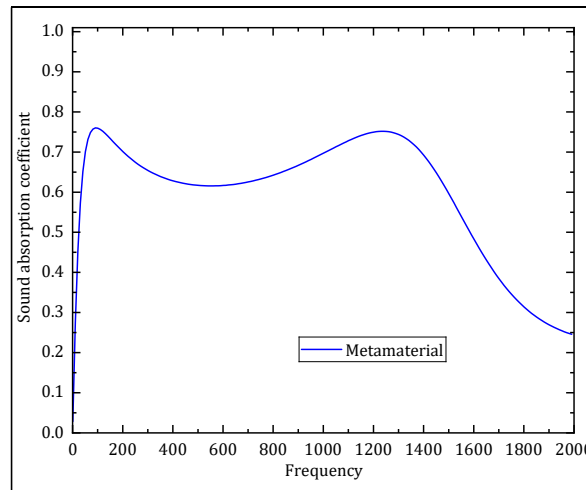


شکل ۱. مدل اجزای محدود، شرایط شبیه‌سازی و پارامترهای هندسی.

۳- نتایج و بحث

شکل (۲) تغییرات ضریب جذب صوتی نمونه‌ای شامل لایه تطبیق امپدانس اپوکسی، فوم آلومینیومی متخلخل و فریم فلزی را در بازه فرکانسی مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر هندسی به‌کاررفته برای این ساختار در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار جذب دارای دو قله اصلی است که در میان آن‌ها یک ناحیه افت نسبی نیز دیده می‌شود. در حدود فرکانس ۱۵۰ هرتز، حضور لایه تطبیق امپدانس اپوکسی موجب کاهش بازتاب اولیه در مرز آب و ساختار شده و شرایط مناسب‌تری برای نفوذ امواج صوتی به داخل لایه فوم فراهم می‌کند. این امر سبب ایجاد یک اوج جذب اولیه با مقدار نزدیک به ۷۶ درصد می‌شود که ناشی از ترکیب تطبیق امپدانس و شروع مکانیزم‌های اتلاف در منافذ فوم است. با افزایش فرکانس تا حدود ۸۰۰ هرتز، ضریب جذب کاهش یافته و به مقدار حداقلی حدود ۶۰ درصد می‌رسد. این افت به دلیل افزایش اختلاف امپدانس مؤثر میان ساختار و محیط و کاهش نسبی اثربخشی مکانیزم‌های اتلاف در این بازه رخ می‌دهد. با افزایش فرکانس تا حدود ۱۲۰۰ هرتز، اوج دوم در نمودار ظاهر می‌شود. این قله با مقدار نزدیک به ۷۴ درصد به برهم‌کنش میان فرآیندهای اتلاف ویسکوزی و حرارتی در منافذ فوم و اثرات ارتعاشی ناشی از تماس فوم و فریم فلزی نسبت داده می‌شود. فریم فلزی که وظیفه نگهداری و پشتیبانی مکانیکی را بر عهده دارد در این شرایط به‌عنوان مرز صلب عمل کرده و مودهای تشدیدی ایجاد می‌کند که بخشی از انرژی صوتی را به اتلاف مکانیکی و ساختاری منتقل می‌نماید. این فرآیند سبب افزایش مجدد ضریب جذب در محدوده میانی فرکانس‌ها و شکل‌گیری اوج ثانویه می‌شود.

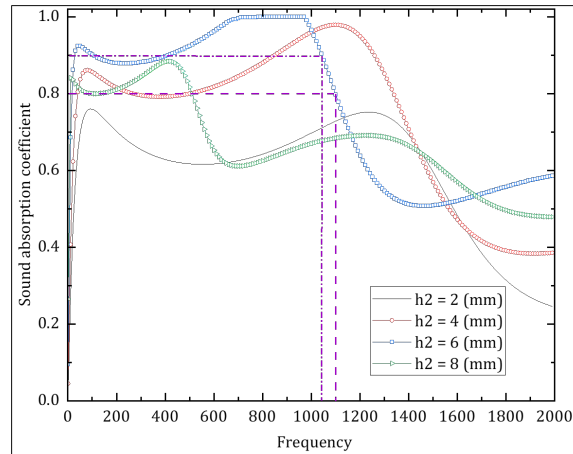
پس از این نقطه و در فرکانس‌های بالاتر از ۱۶۰۰ هرتز، ضریب جذب به‌تدریج کاهش می‌یابد و تا ۲۰۰۰ هرتز به حدود ۳۰ درصد می‌رسد. این کاهش ناشی از کوتاه‌تر شدن طول موج نسبت به ابعاد سلول و کاهش تدریجی کارایی مکانیزم‌های اتلاف ویسکوزی و حرارتی در فرکانس‌های بالاتر است. همچنین در این ناحیه، فاصله بیشتر میان امپدانس مؤثر ساختار و آب منجر به افزایش بازتاب سطحی و کاهش میزان انرژی نفوذی می‌شود. نمودار به روشنی نشان می‌دهد که ترکیب لایه تطبیق اپوکسی و فوم متخلخل همراه با فریم فلزی قادر است در دو ناحیه فرکانسی مجزا جذب قابل‌توجهی فراهم آورد. اوج نخست در حوالی ۱۵۰ هرتز عمدتاً تابع کارایی لایه تطبیق امپدانس است، در حالی که اوج دوم در حدود ۱۲۰۰ هرتز بیشتر متأثر از تعاملات میان فوم و قاب فلزی و تشدیدهای سازه‌ای است. این نتایج اهمیت انتخاب دقیق ماده و طراحی هندسی هر جزء را در بهینه‌سازی عملکرد جذب زیرآبی برجسته می‌سازد.



شکل ۲. نمودار ضریب جذب صوت زیر آب برای فراماده با مقادیر هندسی پیش فرض ارائه شده در جدول ۳ و لایه تطبیق امپدانس اپوکسی.

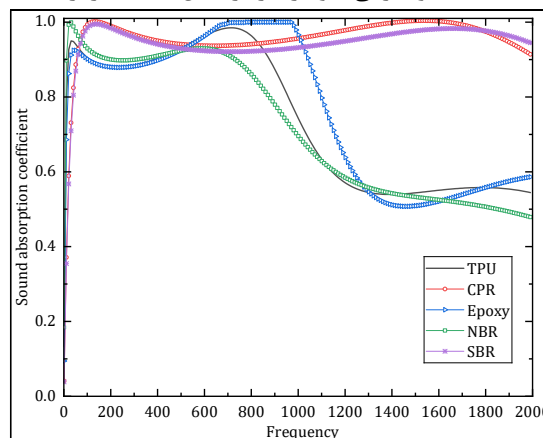
شکل (۳) تغییرات ضریب جذب صوتی ساختار متشکل از فوم آلومینیومی متخلخل و لایه تطبیق امپدانس اپوکسی را برای ضخامت‌های مختلف لایه فوم نشان می‌دهد. در تمام حالات، ضخامت کل ساختار ثابت و برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و بنابراین با افزایش ضخامت فوم، ضخامت لایه اپوکسی کاهش یافته است. این تغییر هندسی منجر به برهم‌کنش میان نقش تطبیق امپدانس در سطح و مکانیزم‌های اتلاف در حجم فوم شده و رفتار جذب صوتی متفاوتی را در بازه فرکانسی مورد مطالعه ایجاد کرده است. در ضخامت ۲ میلی‌متر برای فوم، لایه اپوکسی بیشترین ضخامت را دارد و تطبیق امپدانس با محیط آبی در بهترین شرایط قرار می‌گیرد. در این حالت ضریب جذب در فرکانس‌های پایین‌تر از ۵۰۰ هرتز مقادیر بالاتری نسبت به سایر ضخامت‌ها نشان می‌دهد و در نزدیکی ۱۵۰ هرتز مقدار آن به حدود ۷۵ درصد می‌رسد. با این حال، به دلیل ناکافی بودن ضخامت فوم برای فعال‌سازی کامل مکانیزم‌های اتلاف ویسکوزی و حرارتی، در ناحیه میانی و بالای فرکانس‌ها (۲۰۰ تا ۹۰۰ هرتز و ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز) افت محسوسی در جذب رخ می‌دهد. با افزایش ضخامت فوم به ۴ میلی‌متر، لایه اپوکسی نازک‌تر شده و شرایط تطبیق امپدانس ضعیف‌تر می‌شود، اما هم‌زمان ظرفیت اتلاف در فوم افزایش می‌یابد. این تغییر باعث جابجایی و بهبود اوج جذب در فرکانس‌های میانی شده است. به طور مشخص، در فرکانس حدود ۱۰۰۰ هرتز ضریب جذب به مقدار نزدیک به ۹۵ درصد می‌رسد که نسبت به حالت ۲ میلی‌متری بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد.

در ضخامت ۶ میلی‌متر، روند بهبود جذب در ناحیه فرکانسی میانی ادامه پیدا می‌کند و یک باند نسبتاً وسیع با جذب بالا شکل می‌گیرد. در این حالت، مقدار ضریب جذب در بازه ۱۰۰ تا ۱۰۵۰ هرتز به طور پایدار بالای ۸۵ درصد باقی می‌ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش ضخامت فوم علاوه بر تقویت مکانیزم‌های اتلاف داخلی، شرایطی برای برهم‌کنش مؤثرتر میان فوم و فریم فلزی ایجاد کرده و منجر به شکل‌گیری تشدیدهای ترکیبی سازه‌ای-آکوستیکی شده است. با این حال، در فرکانس‌های ۱۱۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز کارایی جذب کاهش یافته و مقدار آن به کمتر از ۶۰ درصد می‌رسد که ناشی از ضعف نسبی لایه تطبیق در این حالت است. در نهایت، در ضخامت ۸ میلی‌متر، گرچه فوم ضخیم‌ترین حالت را دارد و بالاترین ظرفیت اتلاف داخلی را ارائه می‌دهد، اما به دلیل کاهش بیش از حد ضخامت لایه اپوکسی، بازتاب سطحی در مرز آب و ساختار به میزان زیادی افزایش یافته است. در نتیجه در ناحیه فرکانسی پایین‌تر از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ضریب جذب به کمتر از ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. در مقابل، یک اوج جذب جدید در محدوده حدود ۴۰۰ هرتز با مقدار نزدیک به ۹۰ درصد شکل گرفته است که نشان‌دهنده تغییر شرایط تشدید و کوپلینگ آکوستیکی-سازه‌ای ناشی از افزایش ضخامت فوم می‌باشد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که تغییر ضخامت فوم آلومینیومی همراه با کاهش متناظر ضخامت لایه اپوکسی، یک رابطه معکوس میان کارایی جذب در فرکانس‌های پایین و میانی ایجاد می‌کند. بر این اساس، انتخاب ضخامت بهینه بستگی به بازه فرکانسی مورد نظر دارد و برای دستیابی به یک جذب باند پهن، ضخامت‌های میانی مانند ۶ میلی‌متر کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۳. نمودار تاثیر ضخامت لایه فوم متخلخل بر ضریب جذب صوت زیر آب فراماده آکوستیکی.

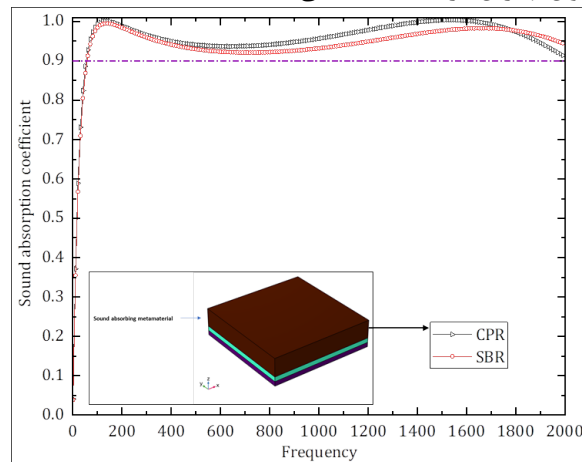
ضخامت کل ساختار جاذب در این تحقیق برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، بنابراین با انتخاب لایه فوم آلومینیومی متخلخل به ضخامت ۶ میلی‌متر، لایه تطبیق امپدانس ناگزیر به ضخامت ۴ میلی‌متر تعریف شده است تا ابعاد نهایی از حد مجاز تجاوز نکند. هدف از این ترکیب، دستیابی به تعادلی میان اتلاف مناسب انرژی صوتی توسط فوم و ایجاد شرایط تطبیق امپدانس به کمک لایه رویی است. انتخاب جنس این لایه ۴ میلی‌متری نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار جذب در گستره فرکانسی ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ایفا می‌کند و نتایج شبیه‌سازی به خوبی تفاوت عملکرد مواد مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) در ناحیه پایین‌تر از ۴۰۰ هرتز تمامی مواد مورد بررسی از جمله لاستیک استایرن بوتادین، لاستیک بوتادین نیتریل، لاستیک پلی‌اتیلن کلردار، ترموپلاستیک پلی‌یورتان و اپوکسی، به دلیل حضور فوم آلومینیومی و اثر ترکیبی آن با لایه تطبیق، جذب بالایی نزدیک به ۱۰۰ درصد را ارائه کرده‌اند. از حدود ۶۰۰ هرتز به بالا تفاوت‌ها نمایان می‌شود. لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین توانسته‌اند در کل گستره فرکانسی عملکرد یکنواخت و پایداری را نشان دهند و در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز همچنان ضریب جذب بالای ۹۰ درصد را حفظ کنند. این ویژگی نشان می‌دهد که این دو ماده قابلیت بالایی در ایجاد تطبیق امپدانس مؤثر دارند و برای دستیابی به جذب وسیع‌بند مناسب‌تر هستند. اپوکسی با وجود عملکرد قابل قبول در فرکانس‌های پایین، در بازه ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ هرتز افت محسوسی در جذب داشته و ضریب آن تا حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش ناشی از سختی بالای اپوکسی و محدودیت آن در ایجاد اتلاف مؤثر در این بازه است. ترموپلاستیک پلی‌یورتان نیز روندی مشابه داشته و در فرکانس‌های میانی ضریب جذب ۴۰ تا ۵۰ درصد را ثبت کرده است. لاستیک بوتادین نیتریل در فرکانس‌های پایین‌تر از ۷۰۰ هرتز جذب مطلوبی نزدیک به ۹۰ درصد داشته، اما با افزایش فرکانس تا ۲۰۰۰ هرتز به تدریج افت کرده و به کمتر از ۵۰ درصد رسیده است. این روند نشان می‌دهد که این ماده بیشتر برای جذب در فرکانس‌های پایین مناسب است و کارایی خود را در فرکانس‌های بالاتر از دست می‌دهد.



شکل ۴. نمودار تاثیر جنس لایه تطبیق امپدانس بر ضریب جذب صوت زیر آب فراماده آکوستیکی.

در شکل (۵) برای دستیابی به انتخاب نهایی، تنها دو ماده‌ای که بهترین عملکرد را به‌عنوان لایه تطبیق امپدانس در کنار فوم آلومینیومی متخلخل و قاب فلزی نشان داده‌اند. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، استفاده از لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین موجب شده است تا ساختار پیشنهادی در کل بازه ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ضریب جذب بسیار بالایی ارائه کند و تقریباً در هیچ نقطه‌ای کاهش شدیدی در عملکرد مشاهده نشود. در فرکانس‌های پایین‌تر از ۳۰۰ هرتز هر دو ماده جذب قابل توجهی نزدیک به یک ثبت کرده‌اند که ناشی از ترکیب مناسب ویژگی‌های تطبیق امپدانس این مواد با اثر اتلافی لایه فوم است. با افزایش فرکانس تا حدود ۱۰۰۰ هرتز اگرچه اندکی کاهش در ضریب جذب مشاهده می‌شود، اما این افت محدود بوده و مقدار ضریب برای هر دو ماده بالاتر از ۹۰ درصد باقی می‌ماند. در بازه ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ هرتز نیز روندی صعودی در جذب مشاهده می‌شود و هر دو ماده توانسته‌اند مجدداً مقادیر نزدیک به یک ارائه دهند. این رفتار پایدار نشان می‌دهد که انتخاب این مواد امکان دستیابی به جذب یکنواخت و وسیع‌بند را فراهم می‌کند. مقایسه دقیق‌تر نشان می‌دهد که لاستیک پلی‌اتیلن کلردار در فرکانس‌های میانی کمی عملکرد بهتری داشته و در حوالی ۱۵۰۰ هرتز به ضریب جذب بیش از ۹۵ درصد رسیده است، در حالی که لاستیک استایرن بوتادین در همین بازه کمی پایین‌تر قرار گرفته اما در فرکانس‌های پایین‌تر از ۵۰۰ هرتز رفتار یکنواخت‌تری داشته است. به این ترتیب هر دو ماده می‌توانند بسته به نیاز طراحی به‌عنوان گزینه‌های نهایی مورد استفاده قرار گیرند.

به طور کلی نتایج این بخش تأیید می‌کند که ترکیب فوم آلومینیومی متخلخل با ضخامت ۶ میلی‌متر و لایه تطبیق امپدانس لاستیکی با ضخامت ۴ میلی‌متر می‌تواند به ساختاری منجر شود که در بازه وسیعی از فرکانس‌ها جذب صوتی نزدیک به یک داشته باشد. انتخاب لاستیک‌های نرم‌تر با ویژگی‌های الاستیکی مناسب نه تنها شرایط تطبیق امپدانس بهتری را ایجاد می‌کند، بلکه موجب بهبود پایداری عملکرد در فرکانس‌های بالا نیز می‌شود. این موضوع اهمیت انتخاب دقیق ماده لایه تطبیق را به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در طراحی جاذب‌های صوتی زیرآبی نازک‌لایه برجسته می‌سازد و نتیجه‌گیری این تحقیق را به سمت معرفی لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین به‌عنوان بهترین گزینه‌ها هدایت می‌کند.



شکل ۴. نمودار مقایسه ضریب جذب صوت زیر آب فراماده آکوستیکی با در نظر گرفتن لایه تطبیق امپدانس از جنس لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین .

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک جاذب صوتی زیرآبی دولایه متشکل از فوم متخلخل آلومینیومی، لایه تطبیق امپدانس و قاب فلزی مورد بررسی عددی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که قرارگیری فوم متخلخل آلومینیومی در قاب فلزی علاوه بر ایجاد استحکام مکانیکی، بر رفتار آکوستیکی نیز اثرگذار بوده و موجب شکل‌گیری تشدیدها و قله‌های جذب در نواحی فرکانسی پایین و میانی می‌شود. نتایج حاکی از آن است که وجود لایه تطبیق امپدانس برای کاهش بازتاب در مرز آب و جاذب ضروری است و انتخاب جنس این لایه تأثیر مستقیمی بر پهنای باند و پایداری ضریب جذب دارد. بررسی تغییر ضخامت‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت فوم متخلخل آلومینیومی ظرفیت اتلاف داخلی افزایش می‌یابد، اما کاهش بیش از حد ضخامت لایه تطبیق منجر به افت عملکرد در برخی

نواحی فرکانسی می‌شود. ترکیب ۶ میلی‌متر فوم و ۴ میلی‌متر لایه تطبیق بهترین توازن میان این دو عامل را ایجاد کرده و توانست در گستره ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز جذب بالای ۸۵ درصد را تضمین کند. از میان مواد بررسی‌شده، لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک استایرن بوتادین توانستند عملکردی یکنواخت و پایدار در کل بازه ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز ارائه دهند، در حالی که موادی مانند اپوکسی و پلی‌یورتان تنها در بخشی از طیف رفتار قابل قبول داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مواد نرم‌تر برای لایه تطبیق نه‌تنها شرایط انتقال انرژی صوتی را بهبود می‌دهد، بلکه موجب پایداری جذب در فرکانس‌های بالا نیز می‌شود. بنابراین طراحی جاذب‌های صوتی زیرآبی با ضخامت پایین نیازمند توجه هم‌زمان به ویژگی‌های مکانیکی و آکوستیکی اجزا، نقش قاب فلزی و تعامل آن با فوم متخلخل آلومینیومی است. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند به توسعه جاذب‌های نوین برای کاربردهای دریایی و فراصوتی منجر شود.

مراجع

1. Katsnelson, B., V. Petnikov, and J. Lynch, *Fundamentals of shallow water acoustics*. 2012: Springer Science & Business Media.
2. Pickett, J.P. and S.R. Kleinedler, *The American heritage dictionary of the English language*. 2018: Houghton Mifflin Harcourt.
3. Bjørnø, L., T. Neighbors, and D. Bradley, *Applied underwater acoustics*. 2017: Elsevier.
4. Dong, E., et al., *Underwater acoustic metamaterials*. National Science Review, 2023. **10**(6): p. nwac246.
5. Dong, J. and P. Tian. *Review of underwater sound absorption materials*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
6. Gao, N., et al., *Acoustic metamaterials for noise reduction: a review*. Advanced Materials Technologies, 2022. **7**(6): p. 2100698.
7. Cavalieri, T., et al., *Graded and anisotropic porous materials for broadband and angular maximal acoustic absorption*. Materials, 2020. **13**(20): p. 4605.
8. Hasani Baferani, A., A. Ohadi, and R. Keshavarz, *Toward mechanistic understanding of the relationship between the sound absorption and the natural and resonant frequencies of porous media*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016. **140**(6): p. 4246-4259.
9. Ren, S., et al., *Water-Saturated Porous Sound-Absorbing Metamaterials Resistant to High Hydrostatic Pressures and Low Temperatures*. Available at SSRN 4753491.
10. Gao, N., et al., *Experimental investigation of composite metamaterial for underwater sound absorption*. Applied Acoustics, 2023. **211**: p. 109466.
11. Yang, M. and P. Sheng, *Sound absorption structures: From porous media to acoustic metamaterials*. Annual Review of Materials Research, 2017. **47**(1): p. 83-114.
12. Moradi, A.H. and A. Hasani Baferani, *The effect of the mechanical properties of impedance-matched materials in underwater environments on sound absorption coefficient using the finite element method*. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 2025. **57**(1): p. 43-68.
13. Moradi, A. and A.H. Baferani, *Numerical investigation of the effect of air cavities and metal oscillators on the absorption coefficient of impedance matching materials in the underwater environment*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025. **47**(9): p. 1-16.
14. Moradi, A.H. and A.H. Baferani, *The novel underwater acoustic metamaterial for improvement of sound absorbing in low and high frequencies*. Journal of Vibration and Control, 2025: p. 10775463251353299.
15. Zhang, Z., et al., *Global Sound Absorption Prediction for a Composite Coating Laid on an Underwater Submersible in Debonding States*. Journal of Marine Science and Engineering, 2023. **11**(9): p. 1671.
16. Hu, J., et al., *Study on the Low-Frequency and Broadband Sound Absorption Performance of an Underwater Anechoic Layer with Novel Design*. Journal of Marine Science and Engineering, 2023. **11**(2): p. 409.
17. Duan, M., et al., *Deep subwavelength hybrid metamaterial for low-frequency underwater sound absorption by quasi-Helmholtz resonance*. AIP Advances, 2023. **13**(2): p. 025352.
18. Fang, X., et al., *Underwater metagratings for sub-kilohertz low frequency and broadband sound absorption*. International Journal of Mechanical Sciences, 2023. **260**: p. 108630.
19. Fu, Y., *Measurement of Underwater Sound Absorption Coefficient at Variable Hydrostatic Pressures Using an Improved Transfer Function Method*. Journal of Testing and Evaluation, 2023. **51**(5): p. 3237-3254.
20. Fu, Y., H. Wang, and P. Cao, *Numerical design and optimization of metamaterials for underwater sound absorption at various hydrostatic pressures*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2023. **42**(3): p. 1434-1450.