

بررسی شرایط مورد نیاز انتشار موج تخت در موج‌برهای

آکوستیکی پر شده از هوا و آب

علی لقمانی*

دانشیار

دانشگاه صنعتی اصفهان

a.loghmani@iut.ac.ir

علیرضا خاکپور

دانشجو کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی اصفهان

a.khakpour@me.iut.ac.ir

چکیده

برای اندازه‌گیری دقیق خواص آکوستیک در تجهیز لوله امپدانس، لازم است موج آکوستیکی تولید شده، به صورت موج تخت درون این موج‌بر منتشر شود. در استانداردهای لوله امپدانس، ابعاد موج‌بر، به نحوی انتخاب شده‌اند که انتشار موج تخت در آن تضمین شود. با توجه به عدم وجود استاندارد برای لوله امپدانس در محیط آب و نزدیک‌تر بودن امپدانس آکوستیکی آب و دیواره موج‌بر نسبت به محیط هوا، نیاز است که انتشار موج تخت درون موج‌بر پر شده از آب مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله به شبیه‌سازی انتشار موج درون لوله امپدانس پر از آب و بررسی شکل مودها، به روش اجزای محدود پرداخته شده است. دو نمونه لوله امپدانس در محیط هوا و سه نمونه در محیط آب شبیه‌سازی و مقدار حداکثر انحراف از موج تخت در همه مودها، گزارش شده است. همچنین مودهایی که در آن‌ها موج از حالت تخت خارج شده گزارش و شکل مودهای آن‌ها نمایش داده شده‌اند. در نهایت موج‌بری با ابعاد بهینه و بازه فرکانسی عریض‌تر نسبت به پژوهش‌های پیشین پیشنهاد شده است. علاوه بر آن انتشار موج تخت در موج‌بر پیشنهادی در سه حالت با دیواره صلب، ابعاد پیشنهادی مطابق با پیشینه و ضخامت بیش‌تر بررسی شده است.

واژگان کلیدی: آکوستیک زیر آب، لوله امپدانس، موج تخت، شبیه‌سازی اجزا محدود

۱. مقدمه

برخوردی به سطح آن تعریف می‌شود و مقداری بین صفر تا یک دارد [۲]. اندازه‌گیری ضریب جذب صوت، با سه روش متداول اتاق بازآوا، بازتابشی و لوله امپدانس^۳ انجام می‌شود.

اندازه‌گیری ضریب جذب صوت به روش لوله امپدانس در محیط هوا، در استانداردهای ISO 10534-1 [۳]، ISO 10534-2 [۴] و ASTM E1050-12 [۵] شرح داده شده است. در استاندارد ISO 10534-1 [۳]، روش نسبت موج ایستا^۴ و در دو استاندارد دیگر، روش

صوت‌شناسی آبی، دانش بررسی و استفاده از امواج صوت در آب است که به بررسی ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌شناسی موجودات و مصنوعات زیر آب می‌پردازد. با توجه به اهمیت خواص آکوستیکی مواد استفاده شده در پژوهش‌های در محیط آب، اندازه‌گیری این خواص در محیط آب مورد توجه است [۱]. ضریب جذب صوت^۱ به عنوان مثالی از خواص آکوستیک، به صورت مقدار انرژی جذب شده به ماده نسبت به انرژی

* نویسنده مسئول

تابع انتقال^۵ شرح داده شده است. لوله امپدانس، قدیمی‌ترین و ساده‌ترین شیوه‌ی اندازه‌گیری ضریب جذب صوت می‌باشد که در آن، در یک سمت موج بر^۶، نمونه و در سمت دیگر، منبع تولید صوت قرار گرفته است. موج بر معمولاً از جنس استیل یا آلومینیوم می‌باشد. یکی از مهم‌ترین فرض‌های موجود در این روش استاندارد شده، انتشار موج تخت آکوستیکی در موج بر در بازه فرکانسی طراحی شده است. در روش اندازه‌گیری به کمک تابع انتقال، به علت قرار گرفتن حسگرها بر دیواره موج بر، انتشار موج به شکل موج تخت اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، زیرا باید این اطمینان وجود داشته باشد که مقادیر فشار اندازه‌گیری شده توسط حسگرها، با مقادیر تمامی نقاط در آن مقطع از موج بر برابر هستند.

در موج‌برهای پر شده از هوا، با رعایت بازه فرکانسی پیشنهاد شده توسط استانداردهای مذکور، موج تخت منتشر خواهد شد. در محیط آب، دل‌گروسو [۶] اثر الاستیک دیواره بر روی موج بر پر شده از مایعات را بررسی کرده و شرط انتشار موج تخت را صلب بودن دیواره می‌داند. با توجه به عدم امکان ایجاد دیواره صلب، دل‌گروسو بیان می‌کند که در صورت نزدیک شدن ضخامت دیواره موج بر به شعاع آن، در مود صفرم انتشار صوت در لوله که آن را مود ET0 می‌خواند، موج منتشر شده بسیار نزدیک به موج تخت است. ویلسون و همکاران [۷] در پژوهش خود، لوله امپدانس پیشرفته‌ای را با ارجاع به دل‌گروسو توسعه داده‌اند. آن‌ها بازه فرکانس کاری لوله خود را بر اساس استاندارد ASTM E1050-12 [۵]، با جاگذاری سرعت صوت در محیط آب به جای هوا، تعیین کرده‌اند. شرط برابری ضخامت دیواره موج بر و شعاع آن در این لوله رعایت

شده است. آن‌ها انتشار موج تخت درون موج بر را با انجام آزمایش تجربی تایید کرده‌اند. شن و همکاران [۸] با ارجاع به پژوهش دل‌گروسو و ویلسون و همکاران، لوله امپدانس خود را با قابلیت اندازه‌گیری تحت فشارهای مختلف هیدرواستاتیکی ساخته‌اند. آن‌ها شرط برابری ضخامت دیواره و شعاع موج بر را رعایت نکرده، اما علی‌رغم آن مشکلی در انتشار موج یا اندازه‌گیری‌ها، گزارش نکرده‌اند. فو [۹] نیز در پژوهش خود لوله امپدانس پر از آب با رعایت شرط مطرح شده توسط دل‌گروسو ساخته و نتایج خود را ارائه کرده است. در هیچ یک از پژوهش‌های مذکور، مسئله انتشار موج تخت درون موج بر پر از آب و شرایط تحقق آن، با شبیه‌سازی المان محدود، بررسی نشده است. در این پژوهش، با شبیه‌سازی موج‌برهای موجود در پیشینه، به بررسی شروط لازم برای تحقق موج تخت و پیشنهاد یک معیار کمی برای انتشار موج تخت درون لوله امپدانس پر از آب در حالت‌های مختلف پرداخته شده است. در ابتدا با شبیه‌سازی دو نمونه لوله امپدانس ساخته شده بر اساس استاندارد ISO 10534-2 [۴]، انتشار موج تخت درون موج بر آکوستیکی در هوا، تایید شده است. سپس صحت انتشار موج تخت در موج‌برهای پر شده از سیال آب موجود در پیشینه پژوهش بررسی و شکل مودها ارائه شده‌اند. در نهایت یک نمونه طراحی شده بر اساس استاندارد ISO 10534-2 [۴] و با رعایت شرط ضخامت دیواره، برای توسعه لوله امپدانس پر شده از آب با بازه فرکانسی عریض‌تر و ابعاد بهینه، پیشنهاد شده است. به‌طوری‌که می‌توان از این پیشنهاد برای ساخت یک لوله امپدانس پر از آب بهینه استفاده کرد. همچنین امکان بهبود نتایج با افزایش ضخامت دیواره بررسی شده است.

تمامی شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش، به روش اجزا محدود در نرم‌افزار کامسول^۷ انجام شده‌اند.

۲. شرایط استاندارد انتشار موج تخت درون

موج‌بر

مطابق با استانداردهای ISO 10534-2 [۴] و ASTM E1050-12 [۵]، برای انتشار موج تخت درون موج‌بر در محیط هوا، محدودیت‌هایی تعریف شده است. اولین مورد مربوط به بازه فرکانسی معتبر می‌باشد که با توجه به طول موج منتشر شده تعیین شده است. این مورد با قطر داخلی لوله یا اندازه وجه موج‌بر یا مقطع چهارگوش محدود شده است. جدول ۱ روابط محاسبه بازه فرکانسی براساس دو پارامتر قطر داخلی و فاصله حسگرها و بالعکس را نشان می‌دهد.

جدول ۱: روابط تعیین بازه فرکانسی موج‌بر

ضرایب مورد استفاده		روابط فرکانس حد بالا و پایین
ASTM E1050-12 [5]	ISO 10534-2 [4]	
$K_l = 0.01$	$K_l = 0.05$	$f_l > K_l C_0 / s$
$K_{u1} = 0.586$	$K_{u1} = 0.58$	$f_u < K_{u1} C_0 / d$
$K_{u2} = 0.4$	$K_{u2} = 0.45$	$f_u < K_{u2} C_0 / s$

در این روابط، f_l برابر با حد پایین فرکانس است که توسط s یا فاصله حسگرها محدود شده است. همچنین f_u برابر با حد بالای فرکانس است که توسط هم فاصله حسگرها و هم قطر داخلی موج‌بر یا d محدود شده است. C_0 نیز برابر با سرعت صوت در محیط انتشار می‌باشد.

دومین مورد مربوط به فاصله نمونه تا حسگر مجاور می‌باشد. در این استانداردها برای نمونه با سطح صاف، نصف قطر داخلی، برای نمونه با سطح همگن، برابر با

قطر داخلی و در نهایت برای نمونه با سطح ناهمگن (حالت عمومی) دو برابر قطر داخلی پیشنهاد شده است. این فاصله برای میرا شدن اختلال‌های ناشی از برخورد موج صوتی به سطح نمونه در نظر گرفته شده است. سومین مورد نیز مربوط به فاصله منبع انتشار صوت تا حسگر مجاور می‌باشد. در استانداردها، مقدار سه برابر و در پیشینه تا پنج برابر قطر داخلی پیشنهاد شده است. منبع صوتی در بدو انتشار صوت علاوه بر مود صفرم، شماری دیگر از مودها را نیز تحریک می‌کند. این مودهای اضافی و مزاحم در فاصله مطرح شده، میرا خواهند شد. بنابراین، ابعاد موج‌بر، شامل قطر داخلی، فاصله حسگرها و طول موج‌بر می‌باشد که مورد آخر دست کم برابر با پنج برابر قطر داخلی به علاوه فاصله حسگرها خواهد بود.

۳. تنظیمات استفاده شده برای شبیه‌سازی

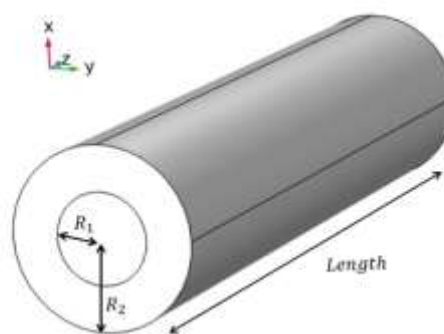
عددی

توسعه مدل عددی در نرم‌افزار کامسول، نیازمند تعیین فیزیک (یا فیزیک‌های) مورد استفاده، هندسه مدل، شروط مرزی، جنس مواد و سایر تنظیمات مورد نیاز است. در ادامه تنظیمات مورد استفاده در این پژوهش شرح داده شده‌اند.

۱.۳ پارامترها و هندسه مدل

هندسه مدل به صورت دو استوانه ساده دو سر باز هم‌مرکز تعریف شده است. این هندسه، یک موج‌بر ساده استوانه‌ای را شبیه‌سازی می‌کند. برای ایجاد آن، سه پارامتر مستقل مورد نیاز است. پارامترهای طول (R_2) و شعاع خارجی (R_1)، شعاع داخلی (Length) موج‌بر را می‌سازند.

شکل ۱ یک نمونه از هندسه ایجاد شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. هندسه موج‌بر در لوله امپدانس

در این پژوهش، مطالعه بر شش موج‌بر استوانه‌ای صورت گرفته است. دو نمونه در محیط هوا که یکی توسط محمدی [۲] ساخته شده و دیگری در آزمایشگاه آکوستیک و ارتعاشات دانشگاه صنعتی اصفهان (آوالب) موجود است. جنس بدنه آن‌ها از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد. چهار نمونه دیگر پر شده از آب هستند که سه نمونه برگرفته از پیشینه و مورد آخر، نمونه پیشنهادی این پژوهش می‌باشد. مشخصات موج‌برها در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۲.۳. تنظیمات کامسول و شرایط مرزی

در این پژوهش، مسئله چند فیزیکی با استفاده از فیزیک‌های فشار آکوستیک و مکانیک جامدات و تعامل این دو مدل شده است. همچنین دو مطالعه مقادیر ویژه و حوزه فرکانس برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند. استوانه داخلی هندسه، از جنس سیال مربوطه، به عنوان حوزه فشار آکوستیک تعریف شده است. در سطح ابتدایی با تعریف یک پورت، موج تخت آکوستیکی با دامنه یک پاسکال منتشر می‌شود. در سطح انتهایی نیز با تعریف پورت خروجی، این موج

جدول ۲: مشخصات موج‌برهای مورد

خارج می‌شود. در فیزیک مکانیک جامدات، میرایی به صورت همگن ساختاری بر ماده الاستیک خطی، قرار داده شده است. مقدار این ضریب میرایی، در جدول ۲ برای هر مدل گزارش شده است. سطح محیط استوانه به عنوان سطوح مشترک با بدنه در تعامل چند فیزیکی تعریف شده‌اند. استوانه خارجی از جنس فلز مربوطه، در تمامی سطوح خارجی، آزاد و در سطوح داخلی، مشابه با قبل، به عنوان بخش مشترک با سیال، تعریف شده است. پس از آن شبکه‌بندی المان‌ها بر مدل صورت گرفته است. در هر مدل، شبکه‌بندی به گونه‌ای است که در هر فرکانس طبیعی، المان‌ها از طول موج منتشر شده، ۲۰ برابر کوچک‌تر باشند.

مدلسازی، با هندسه مطرح شده و شرایط بیان شده، انجام می‌شود. سپس مطالعه مقادیر ویژه بر مدل صورت گرفته تا فرکانس‌های طبیعی سیستم به همراه شکل مود آن‌ها استخراج شوند. در ادامه فرکانس‌های موجود در بازه فرکانسی مد نظر، انتخاب شده و اندازه آن‌ها برای مطالعه حوزه فرکانس در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام مطالعه حوزه فرکانس، با بررسی معیار تخت بودن موج منتشر شده، مودهای منتشر کننده صوت غیر تخت شناسایی شده و شکل مود آن‌ها گزارش می‌شود.

۳.۳. معیار تخت بودن موج صوتی منتشر شده

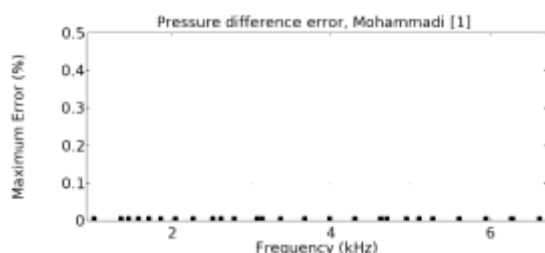
در موج تخت، مطابق با تعریف، جبهه‌های صوت^۸ (مقاطع در نقاط مختلف از موج‌بر) باید هم فشار بوده و عمود بر جهت انتشار صوت باشند. برای تحقیق تخت بودن امواج موج‌بر، پس از تعریف دو محور موازی با محور عمودی موج‌بر در بخش داخلی آن (با استفاده از خطوط برشی سه بعدی در کامسول)، فشار صوتی

موج بر	طول موج L (میلی متر)	شعاع داخلی R_1 (میلی متر)	شعاع خارجی R_2 (میلی متر)	بازه فرکانسی (Hz)	سیال داخل لوله	جنس بدنه	ضریب میرایی
محمدی [۲]	۵۰۰	۱۵	۲۵	۶۷۰۰ - ۷۰۰	هوا	آلومینیم ۷۰۷۵	۰/۰۰۰۰۵
آوالب	۱۵۰۰	۳۰	۴۰	۳۳۵۰ - ۳۶۰	هوا	آلومینیم ۷۰۷۵	۰/۰۰۰۰۵
ویلسون [۷]	۳۶۶	۲۵/۹	۵۱/۳	۹۰۰۰ - ۵۰۰۰	آب	استیل 304L	۰/۰۰۱
شن [۸]	۱۵۰۰	۵۸	۸۸	۷۰۰۰ - ۲۰۰۰	آب	استیل 304L	۰/۰۰۱
فو [۹]	۱۲۰۰	۶۰	۱۲۵	۷۰۰۰ - ۱۵۰۰	آب	استیل 304L	۰/۰۰۱
این پژوهش	۹۰۰	۱۱۰	۲۲۰	۷۸۰۰ - ۱۰۰۰	آب	استیل 304L	۰/۰۰۱

می‌شود. همچنین امکان بهبود نتایج با در نظر گرفتن ضخامت بیشتر برای دیواره بررسی می‌شود. در نمودارهای میله‌ای ارائه شده، محور افقی، شامل فرکانس‌های طبیعی (مودها) و محور عمودی، مقدار انحراف بیشینه از موج تخت را به درصد نشان می‌دهند.

۱.۴. انتشار موج تخت مطابق با استاندارد در هوا

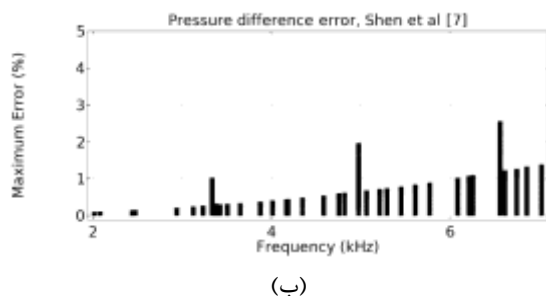
با شبیه‌سازی دو مدل اول از جدول ۲ مشاهده می‌شود که انحراف از موج تخت در این موج‌برها، در تمامی فرکانس‌های طبیعی، کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد که بسیار ناچیز است. در واقع این مقدار باید برابر با صفر باشد. مقادیر موجود، به علت خطای ناشی از شبکه‌بندی و محاسبات عددی می‌باشند. بنابر این نتایج، انتشار موج تخت مطابق با محدودیت فرکانس نسبت به قطر داخلی بیان شده در استانداردها، تایید می‌شود. شکل ۲ مقادیر حداکثر انحراف از موج تخت در مودهای مختلف برای هر دو موج‌بر، در تمامی مقاطع را نشان می‌دهد.



اندازه‌گیری شده بر آن‌ها در نقاط مختلف از هم کم شده و با مقدار دامنه فشار منتشر شده نرمال‌سازی می‌شوند. مقدار حاصل شده به عنوان انحراف از موج تخت تعریف شده و معیار قضاوت هستند. اگر موج صوتی در هر کدام از فرکانس‌های مورد مطالعه انحراف از موج تخت بالایی (بیشتر از ۱ درصد نسبت به سایر فرکانس‌ها) داشته باشد، آن مود (فرکانس) به عنوان مود غیر تخت قلمداد می‌شود. البته در انتشار صوت درون آب، با توجه به پیشینه، مقدار مجاز خطا می‌تواند بیشتر و در حدود ۵ درصد باشد [۷].

۴. نتایج و بحث

در ابتدا با بررسی دو مدل پر شده از هوا، انتشار موج تخت مطابق با محدودیت استاندارد تحقیق می‌شود. پس از آن با مدلسازی موج‌برهای پر شده از آب در پیشینه، انتشار موج تخت در آن‌ها بررسی می‌شود و در صورت وجود مود، مقدار مجاز انحراف از موج تخت آن و شکل مودها گزارش می‌شود. در قسمت بعد یک موج‌بر با ابعاد بهینه و بازه فرکانسی وسیع‌تر نسبت به پیشینه پیشنهاد می‌شود. در ابتدا با در نظر گرفتن دیواره صلب، نظریه دل‌گروسو [۶] تحقیق شده و پس از آن با در نظر گرفتن مدل مشابه پیش، امکان ساخت لوله امپدانس پر شده از آب با چنین ابعادی بررسی

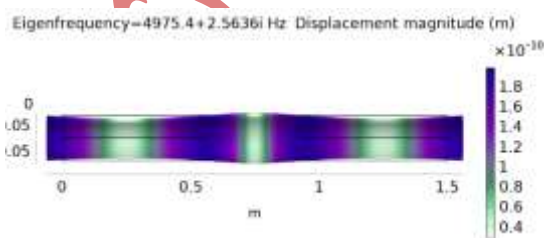


(ب)

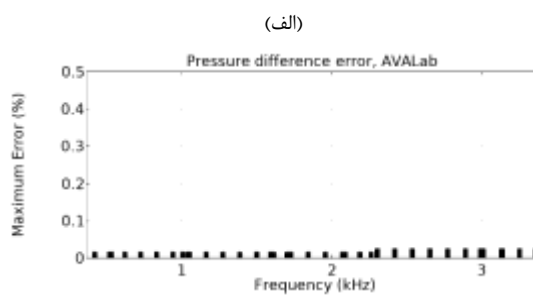
شکل ۳. انحراف از موج تخت در محیط آب الف)
موج بر ویلسون [۷] ب) موج بر شن [۸]

مطابق با نتایج، در مدل شن و همکاران نیز مقادیر خطا در حدود ۱ درصد هستند. اما در فرکانس ۴۹۷۵ هرتز، حداکثر انحراف از موج تخت در مقطعی به ۲ درصد نیز می‌رسد؛ همچنین در فرکانس ۶۵۵۷ نیز، خطا تا ۲/۵ درصد رشد می‌کند. این مقادیر از انحراف از موج تخت نسبت به مدل‌های پیشین قابل توجه هستند که ممکن است به علت عدم رعایت شرایط ضخامت در ساخت لوله باشد. شکل مود این فرکانس‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.

در ادامه، با بررسی موج بر پنجم از جدول ۲، مشاهده می‌شود که مقدار انحراف از موج تخت در اکثر مودها ۱ تا ۱/۶ درصد می‌باشد و این موج بر در فرکانس ۶۰۴۳/۵ بیش‌ترین خطا (۵/۷۹ درصد) را ثبت می‌کند (شکل ۵-الف).



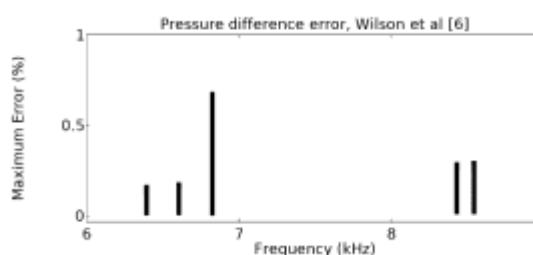
(الف)



(ب)

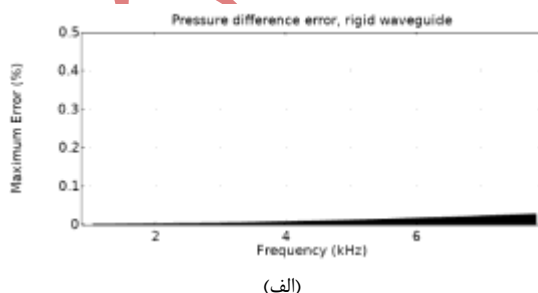
شکل ۲. انحراف از موج تخت در محیط هوا الف)
موج بر محمدی [۲] ب) موج بر آزمایشگاه آکوستیک و ارتعاشات (آوالب)

۲.۴. انتشار موج تخت مطابق با استاندارد در آب
برای بررسی انتشار موج تخت در محیط آب، در ابتدا موج بر سوم در جدول ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، انحراف از موج تخت در فرکانس‌های طبیعی در این مدل نیز، کمتر از ۱ درصد است. پس انتشار موج تخت در آن مورد تایید می‌باشد. باید توجه داشت که مطابق با گزارش محققین پژوهش مذکور، موج منتشر شده در لوله امپدانس ویلسون و همکاران در حدود یک درصد خطا در فرکانس ۵ کیلوهرتز و در حدود ۲ درصد خطا در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز ثبت کرده است [۷].
پس از آن، به بررسی موج بر چهارم در جدول ۲ پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳-ب قابل مشاهده هستند.

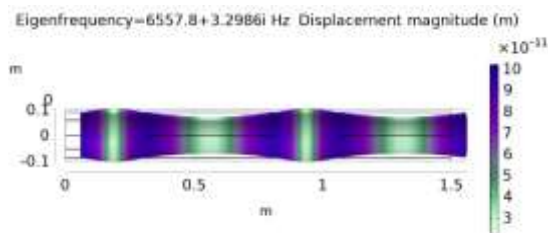


(الف)

مرزی دیواره صلب، مطالعه حوزه فرکانس صورت گرفته است. از آنجا که بررسی مقادیر ویژه و یافتن مودها برای لوله آکوستیکی با دیواره صلب، به علت استفاده از فیزیک فشار آکوستیک تعریف شده نیست، در بازه فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۷۸۰۰ هرتز تمامی فرکانسها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق با شکل ۶-الف مقدار خطا برای تمامی فرکانسها برابر با کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد. البته این مقدار باید برای تمامی فرکانسها صفر باشد. خطای موجود ناشی از خطای شبکه‌بندی و محاسبات عددی است. با توجه به این نتایج، نظریه دل‌گروسو [۶] صحیح بوده و در صورت صلب بودن دیواره لوله، موج در تمامی فرکانسها به صورت تخت منتشر خواهد شد. بنابراین، در نمونه پیشنهادی این پژوهش، مطابق با فرض دل‌گروسو [۶]، ضخامت دیواره دقیقاً برابر با شعاع موج‌بر انتخاب شده است. طول لوله نیز در حالی ۹۰ سانتی‌متر انتخاب شده است که از ۵ برابر قطر داخلی (محدودیت منبع صوت) به علاوه ۲ برابر قطر داخلی (محدودیت نمونه) به علاوه فاصله حسگرها بیش‌تر باشد. پس از تحلیل عددی این مدل، نیز، مشاهده می‌شود که مدل در بازه فرکانسی خود، تنها در فرکانس ۵۴۷۲ هرتز خطای در حدود ۳ درصد ثبت می‌کند (شکل ۶-ب و شکل ۶-پ).

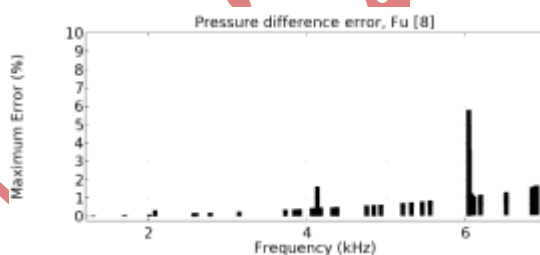


(الف)

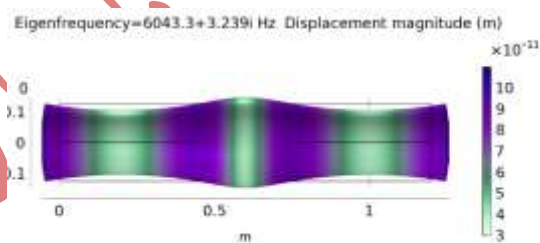


(ب)

شکل ۴. شکل مودهای ایجاد کننده خطا در موج‌بر شن و همکاران الف) فرکانس ۴۹۷۵ هرتز ب) فرکانس ۶۵۵۷ هرتز



(الف)



(ب)

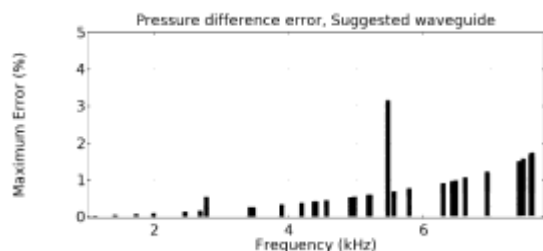
شکل ۵. انحراف از موج تخت موج‌بر فو [۹] الف) انحراف از موج تخت در فرکانسهای طبیعی ب) شکل مود ایجاد کننده خطا در موج‌بر فو

با بررسی شکل ۵-ب، هندسه‌ای مشابه شکل ۴ مشاهده می‌شود. ظاهراً مودهایی از موج‌بر که موجب چنین تغییر شکلی در لوله می‌شوند، باعث ایجاد بروز خطا در انتشار موج تخت می‌شوند.

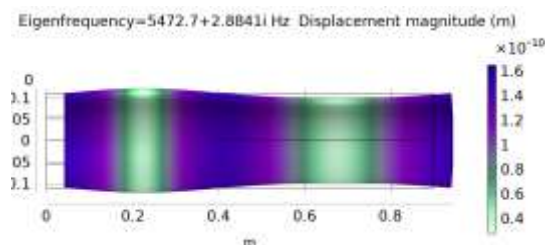
۳.۴. شبیه‌سازی با ابعاد پیشنهادی

در ادامه به بررسی و شبیه‌سازی مدل ششم و آخر از جدول ۲ پرداخته شده است. در ابتدا، تنها با شرط

موج بر پیشنهادی تنها در فرکانس ۵۴۷۲ هرتز مود مزاحم دارد در حالی که موج بر شن و همکاران در فرکانس ۴۹۷۵ و ۶۵۵۷ دارای مود است. همچنین موج بر فو در فرکانس ۶۰۴۳/۵ هرتز دارای مود است که از منظر تعداد مود با موج بر پیشنهادی یکی است، اما مقدار خطا در آن به حدود ۶ درصد می‌رسد که دو برابر مقدار خطا در مود موج بر پیشنهادی می‌باشد. لذا موج بر پیشنهادی نسبت به این دو مورد، عملکرد برتری خواهد داشت و نسبت به موج بر ویلسون و همکاران [۷] بازه فرکانسی عریض‌تری را پوشش خواهد داد.



(ب)



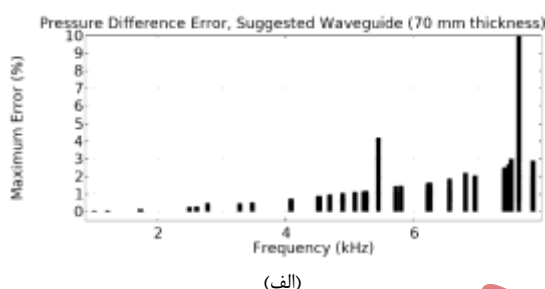
(پ)

شکل ۶. انحراف از موج تخت موج بر پیشنهادی الف)
دیواره صلب ب) دیواره با ضخامت برابر با شعاع پ)
شکل مود در فرکانس ۵۴۷۲ هرتز

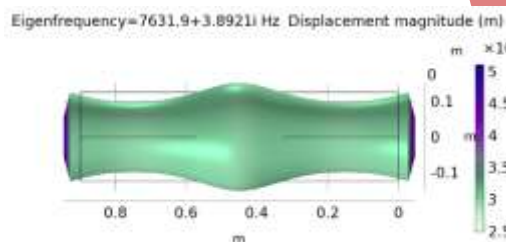
همچنین، شبیه‌سازی با همین ابعاد موج بر و ضخامت بیش‌تر دیواره (۷۰ میلی‌متر) نشان دهنده عدم کاهش انحراف از موج تخت است (شکل ۷-الف). علاوه بر آن، به علت ورود مدهای بالاتر به بازه فرکانسی موج بر (در ۷۶۳۲ هرتز)، نتایج بدتر شده و انتشار موج تخت با مشکل مواجه می‌شود. لذا همان ابعاد قبلی پیشنهاد می‌شوند.

با بررسی شکل مود فرکانس مذکور در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود که مدهای ایجاد کننده خطا در موج بر، عموماً از هندسه مشابهی برخوردار هستند و طراح یا محقق باید چنین شکل مدهایی را در نظر داشته باشد. پس از ساخته شدن موج بر نیز، می‌توان از پیش، انتظار بروز نتایج غیرمنتظره در این گونه مودها را داشت.

موج بر پیشنهادی از نظر بازه فرکانسی، با موج بر شن و همکاران [۸] و از نظر ابعاد و بازه فرکانسی با موج بر فو [۹] قابل مقایسه است. همان‌گونه که مشاهده شد،



(الف)



(ب)

شکل ۷. موج بر پیشنهادی با ضخامت بیشتر الف)
انحراف از موج تخت ب) شکل مود در فرکانس ۷۶۳۱
هرتز

۵. جمع‌بندی

در این پژوهش، اثر دیواره الاستیک بر میزان تخت بودن موج صوتی انتشاری درون موج بر، از روش شبیه‌سازی اجزا محدود تحقیق شد. مشاهده شد که در صورت طراحی موج بر بر اساس استانداردها، در محیط

هوا، انتشار موج تخت بدون مشکل صورت می‌گیرد. همچنین با رجوع به پیشینه، انتشار موج صوتی در موج‌بر پر شده از آب نیز بررسی و شرایط مورد نیاز برای تحقق موج تخت، برابری مقدار شعاع موج‌بر با ضخامت لوله فلزی، در لوله‌های استیل عنوان شد. این‌گونه به نظر می‌رسد که بروز انحراف از موج تخت آکوستیک تا مقادیر ۶ درصد نیز اختلالی در اندازه‌گیری‌های لوله امیدانس برای محاسبه ضریب بازتاب یا جذب صوت در آب ایجاد نمی‌کند. در نهایت با توجه به دستاوردهای این پژوهش، موج‌بری بر مبنای پیشنهادات موجود در استاندارد ISO 10534-2 [۴] و تعمیم آن‌ها به محیط

آب، طراحی شد که بازه وسیع‌تری از فرکانس را نسبت به موج‌بر ویلسون و همکاران [۷]، ابعاد کوچک‌تر و هزینه ساخت کمتر نسبت به موج‌بر فو [۹] فراهم می‌آورد. همچنین مشاهده شد که این موج‌بر، نسبت به موج‌بر شن و همکاران [۸] دارای تعداد مود کمتری است. مشخصات دقیق این موج‌بر در جدول ۲ ذکر شدند. همچنین نشان داده شد افزایش ضخامت دیواره، به علت ورود موده‌های بالاتر به بازه فرکانس کاری موج‌بر و افزایش هزینه ساخت، توجیه نداشته و ابعاد قبلی (موجود در جدول ۲) مناسب‌تر هستند.

۶. منابع

- [۱] ا. کاظمی آهویی and ا. حسینی بافرانی، "هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی: تعاریف و کاربردها"، نشریه علمی صوت و ارتعاش، vol. 14, no. 27, pp. 126–150, 2025. [Online]. Available: https://jvs.isav.ir/article_728837_038e11adb6b6b206f2f6b6ac1edb82f4.pdf
- [۲] ع. محمدی‌وندیشی، "طراحی و ساخت لوله امیدانسی برای تعیین ضریب جذب صوتی مصالح جاذب صوت بر مبنای تابع انتقال"، پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۰۰.
- [۳] ISO 10534-1; 1996, Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and impedance .in Impedance Tubes Part 1: Method using Standing Wave Ratio
- [۴] ISO 10534-2: 2023, Acoustics Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance .in Impedance Tubes Part 2: Transfer Function Method
- [۵] ASTM E1050-12 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials .Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System
- [۶] V. A. Delgrosso, "Analysis of multimode acoustic propagation in liquid cylinders with realistic boundary conditions. Application to sound speed and absorption measurements," (in undefined), *Acustica*, Article vol. 24, no. 6, pp. 299–311, 1971
- [۷] P. S. Wilson, R. A. Roy, and W. M. Carey, "An improved water-filled impedance tube," (in English), *J. Acoust. Soc. Am*, Article vol. 113, no. 6, pp. 3245–3252, 2003.
- [۸] Z. Y. Shen, C. J. Huang, and K. W. Liu, "Development and Applications of a Pressurized Water-Filled Impedance Tube," (in English), *Sensors*, Article vol. 22, no. 10, 2022
- [۹] Y. Fu, "Measurement of Underwater Sound Absorption Coefficient at Variable Hydrostatic Pressures Using an Improved Transfer Function Method," (in English), *J Test Eval*, Article vol. 51, no. 5, 2023

Sound Absorption Coefficient^۱
Reverberant Room Method^۲
Impedance Tube Method^۳

نسخه قبیل از ویراستاری