

## بررسی شرایط لازم برای انتشار موج تخت در موج‌برهای آکوستیکی در محیط هوا و آب

علیرضا خاکپور<sup>۱</sup>، علی لقمانی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشجو کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشیار

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [a.loghmani@iut.ac.ir](mailto:a.loghmani@iut.ac.ir)

### چکیده

در صوت‌شناسی، اندازه‌گیری خواص آکوستیکی مواد اعم از ضریب جذب یا بازتاب صوت اهمیت دارد. لوله امیدانس به عنوان روش استاندارد شده برای اندازه‌گیری خواص آکوستیک مواد، متشکل از یک موج‌بر استوانه‌ای، یک منبع صوت و تعدادی حسگر است. برای اندازه‌گیری دقیق و محاسبه کمیت‌های آکوستیکی در این تجهیز، لازم است موج آکوستیکی تولید شده توسط منبع صوت، به صورت موج تخت درون موج‌بر منتشر شود. در استانداردها، ابعاد اجزای موج‌بر شامل قطر لوله، محل حسگرها و محل نمونه، به نحوی طراحی شده است که انتشار موج تخت در آن تضمین شود. با توجه به عدم وجود استاندارد برای لوله امیدانس در محیط آب و نزدیک‌تر بودن امیدانس آکوستیکی آب و دیواره موج‌بر (که معمولاً از جنس آلومینیوم یا استیل می‌باشد) 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 عددی انتشار موج درون لوله امیدانس پر شده از آب و بررسی شکل مودهای لوله، به روش اجزای محدود پرداخته شده است. در ابتدا یک مدل برای موج‌بر آکوستیکی در نرم‌افزار کامسول تبیین و معیار قضاوت تخت بودن موج تعیین شده است. سپس، دو نمونه لوله امیدانس در محیط هوا و سه نمونه در محیط آب شبیه‌سازی و انتشار موج تخت در آن‌ها بررسی 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 بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** آکوستیک زیر آب؛ لوله امیدانس؛ موج تخت؛ شبیه‌سازی اجزا محدود

## ۱- مقدمه

صوت‌شناسی آبی، دانش بررسی و استفاده از امواج صوت در آب است. در این شاخه از دانش، به بررسی ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌شناسی زیر آب پرداخته می‌شود. بررسی حضور یا عدم حضور، گستردگی، اندازه و رفتار گیاهان و جانوران زیر آب و ژرفاسنجی، مثال‌هایی از کاربرد صوت‌شناسی آبی هستند. با توجه به اهمیت خواص آکوستیکی مواد استفاده شده در محیط آب در این‌گونه پژوهش‌ها، اندازه‌گیری آن‌ها در محیط آب مورد توجه است. ضریب جذب صوت<sup>۱</sup> به عنوان مثالی از این خواص، به صورت مقدار انرژی جذب شده به ماده نسبت به انرژی برخوردی به سطح آن تعریف می‌شود و مقداری بین صفر تا یک دارد [۱]. اندازه‌گیری ضریب جذب صوت سه روش متداول دارد که دو مورد از آن‌ها در محیط آب کاربردی ندارند. این روش‌ها عبارت‌اند از: روش اتاق بازآوا<sup>۲</sup>، روش بازتابشی و روش لوله امپدانس<sup>۳</sup>.

اندازه‌گیری ضریب جذب صوت به روش لوله امپدانس در محیط هوا، در استانداردهای ISO 10534-2 [۲] و ASTM E1050-12 [۳] شرح داده شده است. این روش قدیمی‌ترین و ساده‌ترین شیوه‌ی اندازه‌گیری ضریب جذب صوت می‌باشد که در آن، در یک سمت موج‌بر<sup>۴</sup>، نمونه و در سمت دیگر، منبع تولید صوت قرار گرفته است. موج‌بر معمولاً از جنس استیل یا آلومینیوم می‌باشد. یکی از مهم‌ترین فرض‌های موجود در این روش استاندارد شده، انتشار موج تخت آکوستیکی در موج‌بر در بازه فرکانسی طراحی شده است. اهمیت این مسئله در اندازه‌گیری بدون مشکل حسگرهای نصب شده بر دیواره موج‌بر نهفته است. باید این اطمینان وجود داشته باشد که مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرها، با مقادیر تمامی نقاط در آن مقطع از موج‌بر برابر هستند.

در محیط هوا، با رعایت بازه فرکانسی پیشنهاد شده توسط استانداردهای مذکور، موج تخت منتشر خواهد شد. در محیط آب، دل‌گروسو [۴] با بررسی اثر الاستیک دیواره بر موج‌بر پر شده از مایعات، شرط انتشار موج تخت را صلب بودن دیواره بیان می‌کند. با توجه به عدم امکان ایجاد دیواره صلب، دل‌گروسو بیان می‌کند که در صورت نزدیک شدن ضخامت دیواره موج‌بر 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 [۵] 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 [۳]، با جاگذاری سرعت صوت در محیط آب به جای هوا، تعیین کرده‌اند. شرط برابری ضخامت دیواره موج‌بر و شعاع آن در این لوله رعایت شده است. آن‌ها انتشار موج تخت درون موج‌بر را با انجام آزمایش‌هایی تایید کرده‌اند. شن و همکاران [۶] 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 موج‌بر را رعایت نکرده، اما علی‌رغم آن نتایج خوبی را گزارش کرده‌اند. فو [۷] نیز در پژوهش خود لوله امپدانس با رعایت شرط مطرح شده توسط دل‌گروسو ساخته و نتایج خوبی را ارائه کرده است.

در این پژوهش، به بررسی شرط لازم و بیان علمی آن 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 [۲]، انتشار موج تخت درون موج‌بر آکوستیکی در هوا، تایید شده است. سپس صحت انتشار موج تخت در موج‌برهای پر شده از سیال آب موجود در پیشینه بررسی و شکل مودها ارائه شده‌اند. در نهایت یک نمونه طراحی شده بر اساس استاندارد ISO 10534-2 [۲] و با رعایت شرط ضخامت دیواره، برای توسعه لوله امپدانس پر شده از آب با بازه فرکانسی عریض‌تر و ابعاد بهینه، پیشنهاد شده است. همچنین امکان بهبود نتایج با افزایش ضخامت دیواره بررسی شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش، به روش اجزا محدود در نرم‌افزار کامسول<sup>۵</sup> انجام شده‌اند.

<sup>۱</sup> Sound Absorption Coefficient

<sup>۲</sup> Reverberant Room Method

<sup>۳</sup> Impedance Tube Method

<sup>۴</sup> Waveguide

<sup>۵</sup> COMSOL Multiphysics

## ۲- شرایط استاندارد انتشار موج تخت درون موج‌بر

مطابق با استانداردهای ISO 10534-2 [۲] و ASTM E1050-12 [۳]، 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 با 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 [3]	ISO 10534-2 [2]	
$K_l = 0.01$	$K_l = 0.05$	$f_l > K_l C_0 / s$
$K_{u1} = 0.586$	$K_{u1} = 0.58$	$f_u < K_{u1} C_0 / d$
$K_{u2} = 0.4$	$K_{u2} = 0.45$	$f_u < K_{u2} C_0 / s$

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.

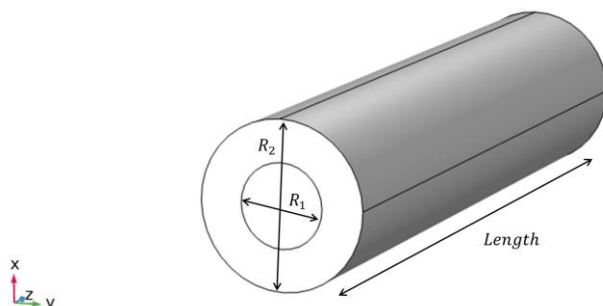
دومین مورد مربوط به فاصله نمونه تا حسگر مجاور می‌باشد. در این استانداردها برای نمونه با سطح صاف، نصف قطر داخلی، برای نمونه با سطح همگن، برابر با قطر داخلی و در نهایت برای نمونه با سطح ناهمگن (حالت عمومی) دو برابر قطر داخلی پیشنهاد شده است. این فاصله برای میرا شدن اختلال‌های ناشی از برخورد موج صوتی به 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 (Length)، قطر داخلی ( $R_1$ ) و قطر خارجی ( $R_2$ ) 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 [۱] ساخته شده و دیگری در آزمایشگاه آکوستیک و ارتعاشات دانشگاه صنعتی اصفهان موجود است. جنس بدنه آن‌ها از آلیاژ آلومینیم 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.

جدول ۲. مشخصات موج‌برهای مورد مطالعه

مرجع	طول موج‌بر (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)	شعاع خارجی (میلی‌متر)	بازه فرکانسی (Hz)	محیط داخلی لوله	جنس بدنه
محمدی [۱]	۵۰۰	۳۰	۵۰	۶۷۰۰ - ۷۰۰	هوا	آلومینیم ۷۰۷۵
آوالب	۱۵۰۰	۶۰	۸۰	۳۳۵۰ - ۳۶۰	هوا	آلومینیم ۷۰۷۵
ویلسون [۵]	۳۶۶	۵۱/۷۸	۱۰۲/۶	۹۰۰۰ - ۵۰۰۰	آب	استیل ۳۰۴L
شن [۶]	۱۵۰۰	۱۱۶	۱۷۶	۷۰۰۰ - ۲۰۰۰	آب	استیل ۳۰۴L
فو [۷]	۱۲۰۰	۱۲۰	۲۵۰	۷۰۰۰ - ۱۵۰۰	آب	استیل ۳۰۴L
این پژوهش	۹۰۰	۱۱۰	۲۲۰	۷۸۰۰ - ۱۰۰۰	آب	استیل ۳۰۴L

### 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 خارج می‌شود. سطح محیط استوانه نیز 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 المان‌ها حداقل دو برابر از کوچک‌ترین طول موج منتشر شده، 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

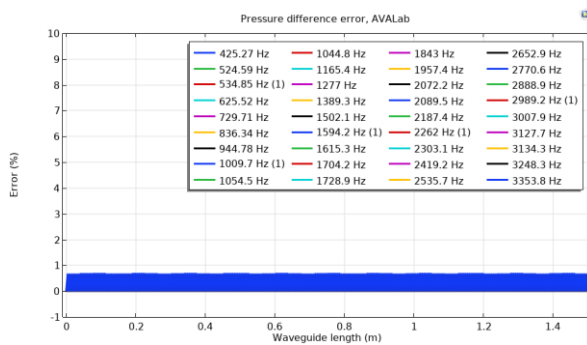
در موج تخت، مطابق با تعریف، جبهه‌های صوت<sup>۱</sup> (مقاطع در نقاط مختلف از موج‌بر) باید هم فشار بوده و عمود بر جهت انتشار صوت باشند. برای تحقیق تخت بودن امواج موج‌بر، پس از تعریف دو محور موازی با محور عمودی موج‌بر در بخش داخلی آن (با استفاده از خطوط برشی سه بعدی در کامسول)، فشار صوتی اندازه‌گیری شده 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 [۵].

### ۴- نتایج و بحث

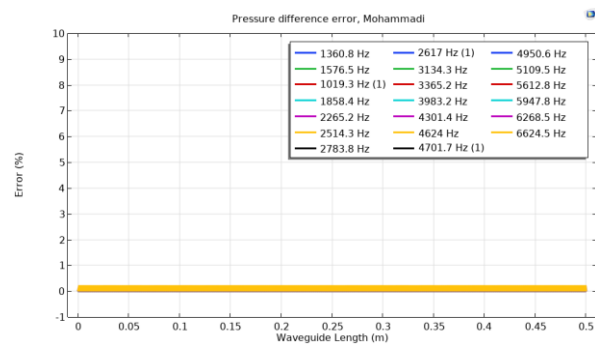
در ابتدا با بررسی دو مدل پر شده از هوا، انتشار موج تخت مطابق با محدودیت استاندارد تحقیق می‌شود. پس از آن با مدلسازی موج‌برهای پر شده از آب در پیشینه، انتشار موج تخت در آن‌ها بررسی می‌شود و در صورت وجود مود، مقدار مجاز انحراف از موج تخت آن و شکل مودها گزارش می‌شود. در قسمت بعد یک موج‌بر با ابعاد بهینه و بازه فرکانسی وسیع‌تر نسبت به پیشینه پیشنهاد می‌شود. در ابتدا با در نظر گرفتن دیواره صلب، نظریه دل‌گروسو [۴] تحقیق شده و پس از آن با در نظر گرفتن مدل مشابه پیش، امکان ساخت لوله امیدانس پر شده از آب با چنین ابعادی بررسی می‌شود. همچنین امکان بهبود نتایج با در نظر گرفتن ضخامت بیشتر برای دیواره بررسی می‌شود.

### ۴-۱ 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 ۱ درصد می‌باشد. بنابر این نتایج، انتشار موج تخت مطابق با محدودیت فرکانس نسبت به قطر داخلی بیان شده در استانداردها، تایید می‌شود. شکل ۲ مقادیر انحراف از موج تخت در مودهای مختلف برای هر دو موج‌بر را نشان می‌دهد.



ب



الف

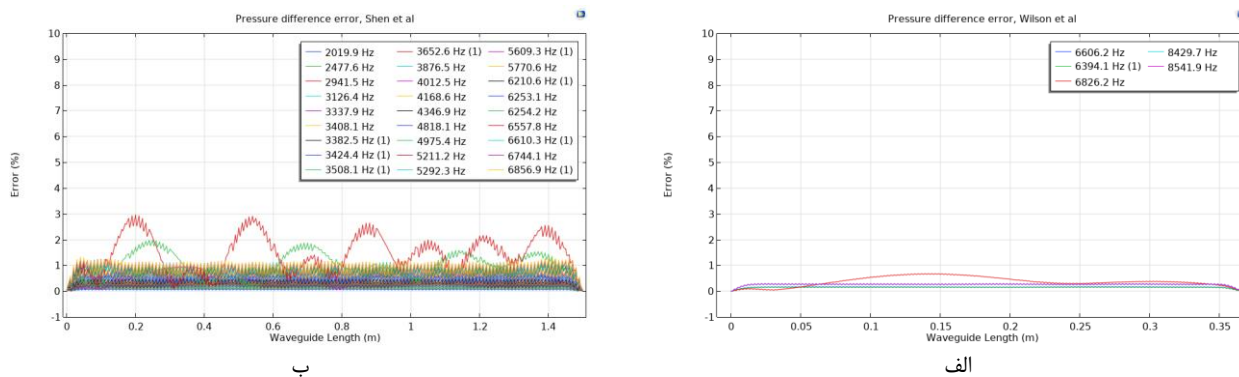
شکل ۲. انحراف از موج تخت در محیط هوا (الف) موج‌بر محمدی [۱] (ب) موج‌بر آزمایشگاه آکوستیک و ارتعاشات

### ۴-۲ انتشار موج تخت مطابق با استاندارد در آب

برای بررسی انتشار موج تخت در محیط آب، در ابتدا موج‌بر سوم در جدول ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، انحراف از موج تخت در این مدل نیز، کمتر از ۱ درصد است. پس انتشار موج تخت در آن مورد تایید

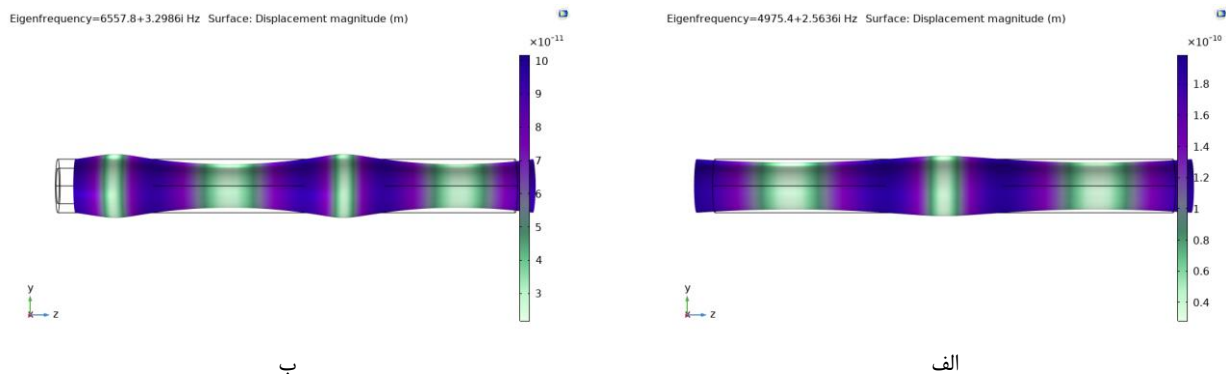
<sup>۱</sup> Wave front

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 [۵]. پس از آن، به بررسی موج‌بر چهارم در جدول ۲ پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳-ب قابل مشاهده هستند.



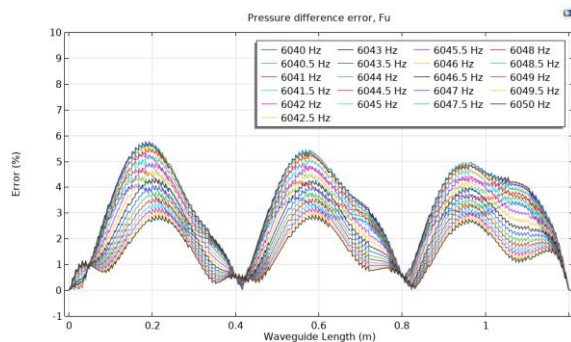
شکل ۳. انحراف از موج تخت در محیط آب (الف) موج‌بر ویلسون [۵] (ب) موج‌بر شن [۶]

مطابق با نتایج، در مدل شن و همکاران نیز مقادیر خطا در حدود ۱ درصد هستند. اما با این تفاوت که در فرکانس ۴۹۷۵ هرتز، انحراف از موج تخت در مقطعی به ۲ درصد نیز می‌رسد؛ همچنین در فرکانس ۶۵۵۷ هرتز، خطا تا ۳ 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 نمود این فرکانس‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.

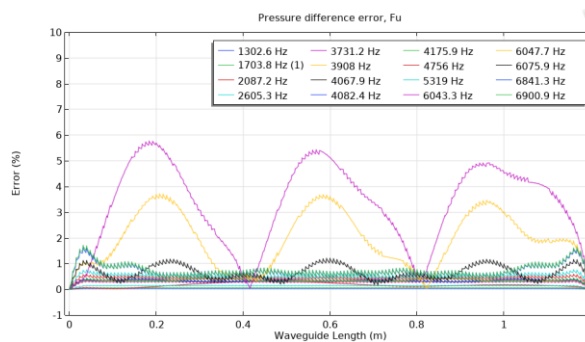


شکل ۴. شکل مودهای ایجاد کننده خطا در موج‌بر شن و همکاران (الف) فرکانس ۴۹۷۵ هرتز (ب) فرکانس ۶۵۵۷ هرتز

در ادامه با بررسی موج‌بر پنجم از جدول ۲، مشاهده می‌شود که مقدار انحراف از موج تخت در اکثر مودها به جز محدوده ۶۰۴۳ تا ۶۰۴۷ هرتز در حدود همان ۱ درصد می‌باشد (شکل ۵-الف).



ب

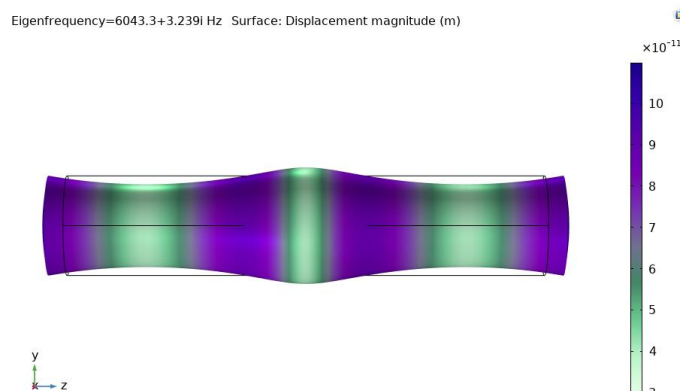


الف

شکل ۵. انحراف از موج تخت موج بر فو [۷] الف) فرکانس‌های طبیعی ب) بازه ۶۰۴۰ تا ۶۰۵۰ هرتز

در این موج‌بر، در فرکانس ۶۰۴۳ و ۶۰۴۷ هرتز، مقادیر خطا به ترتیب به ۳/۶ درصد و ۵/۷ درصد می‌رسد. با بررسی مجدد بازه فرکانسی ۶۰۴۰ تا ۶۰۵۰ هرتز، به نظر می‌رسد که موج‌بر در فرکانس ۶۰۴۳/۵ بیش‌ترین خطا (کمتر از ۶ درصد) را ثبت می‌کند و در این فرکانس مود وجود دارد (شکل ۵-ب).

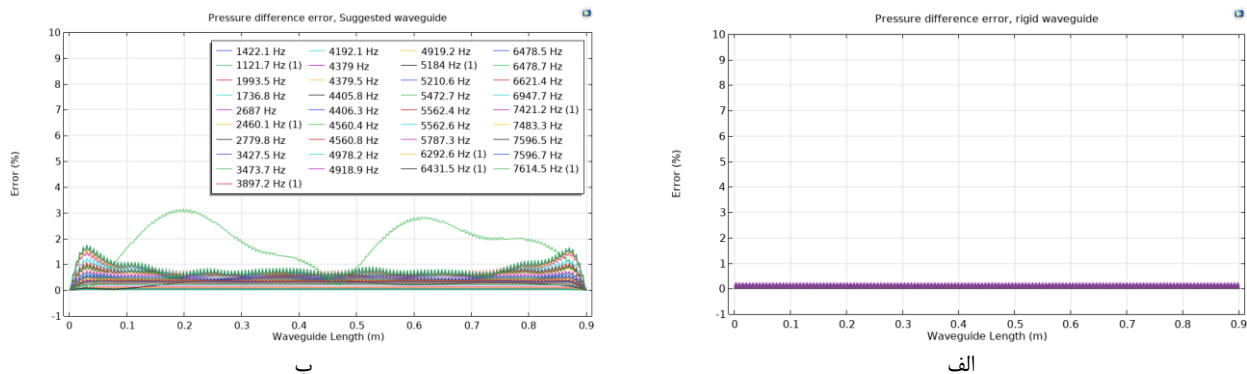
با بررسی شکل مود این فرکانس، به هندسه‌ای مشابه شکل ۴ برخورد می‌شود. ظاهراً مودهایی از موج‌بر که موجب چنین تغییر شکلی در لوله می‌شوند، باعث ایجاد بروز خطا در انتشار موج تخت می‌شوند. شکل ۶ نمایش شکل مود فرکانس مذکور در موج‌بر فو است.



شکل ۶. شکل مود ایجاد کننده خطا در موج‌بر فو

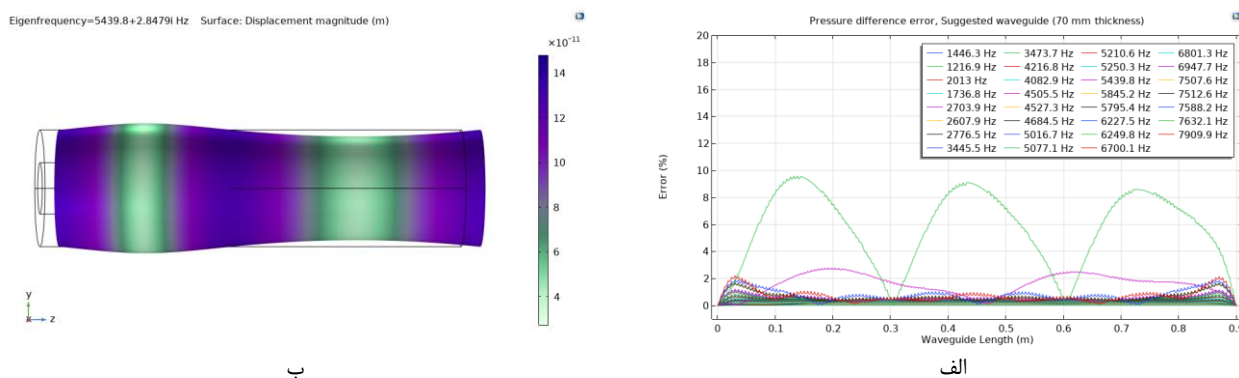
### ۳-۴ شبیه‌سازی با ابعاد پیشنهادی

در ادامه به بررسی و شبیه‌سازی مدل ششم و آخر از جدول ۲ پرداخته شده است. در ابتدا، تنها با شرط مرزی دیواره صلب، مطالعه حوزه فرکانس صورت گرفته است. از آنجا که بررسی مقادیر ویژه و یافتن مودها برای لوله آکوستیکی با دیواره صلب چندان منطقی نیست، در بازه فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۷۸۰۰ هرتز تمامی فرکانس‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق با شکل ۷-الف مقدار خطا برای تمامی فرکانس‌ها برابر با کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد.



شکل ۷. انحراف از موج تخت موج‌بر پیشنهادی (الف) دیواره صلب (ب) دیواره با ضخامت برابر با شعاع

با توجه به این مسئله، نظریه دل‌گروسو [۴] صحیح بوده و در صورت صلب بودن دیواره لوله، موج در تمامی فرکانس‌ها به صورت تخت منتشر خواهد شد. بنابراین، مطابق با فرض دل‌گروسو [۴]، 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 ۷-ب). همچنین، شبیه‌سازی با همین ابعاد موج‌بر و ضخامت بیش‌تر دیواره (۷۰ میلی‌متر) نشان دهنده کاهش خطا به مقدار ۲/۷ درصد است (شکل ۸-الف). البته به علت ورود مودهای بالاتر (۷۶۳۲ هرتز) به بازه فرکانسی موج‌بر، این کاهش خطای جزئی قابل چشم‌پوشی بوده و همان ابعاد قبلی پیشنهاد می‌شوند. با بررسی شکل مود فرکانس مذکور در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که مودهای ایجاد کننده خطا در موج‌بر، عموماً از هندسه مشابهی برخوردار هستند و طراح یا محقق باید چنین شکل مودهایی را در نظر داشته باشد. پس از ساخته شدن موج‌بر نیز، می‌توان از پیش، انتظار بروز نتایج غیرمنتظره در این‌گونه مودها را داشت.



شکل ۸. موج‌بر پیشنهادی با ضخامت بیشتر (الف) انحراف از موج تخت (ب) شکل مود

## ۵- جمع‌بندی

در این پژوهش، اثر دیواره الاستیک بر میزان تخت بودن موج صوتی انتشاری درون موج‌بر، از روش شبیه‌سازی اجزا محدود تحقیق شد. مشاهده شد که در صورت طراحی موج‌بر 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 شد و شرایط مورد نیاز برای تحقق موج تخت صحت‌سنجی شدند. 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 ایجاد نمی‌کند. در نهایت با توجه به دستاوردهای این پژوهش،

موج‌بری بر اساس استاندارد ISO 10534-2 [۲] طراحی شد که بازه وسیع‌تری از فرکانس را با ابعاد کوچک‌تر و هزینه ساخت کمتر فراهم می‌آورد. مشخصات دقیق این موج‌بر در جدول ۲ ذکر شدند. همچنین نشان داده شد با افزایش ضخامت دیواره، انحراف از موج تخت به مقدار اندکی کاهش می‌یابد که به علت ورود موده‌های بالاتر به بازه فرکانس کاری موج‌بر و افزایش هزینه ساخت، توجیه نداشته و ابعاد قبلی مناسب‌تر هستند.

## مراجع

- [۱] ع. محمدی‌وندیشی، "طراحی و ساخت لوله امپدانس برای تعیین ضریب جذب صوتی مصالح جاذب صوت بر مبنای تابع انتقال" پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۰۰.
- [۲] ISO 10534-2: 2023, Acoustics Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes Part 2: Transfer Function Method.
- [۳] ASTM E1050-12 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.
- [۴] D. grosso, "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.
- [۵] 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.
- [۶] 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.
- [۷] 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.