

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.2.1.1](https://doi.org/10.24767/131.1401.8.2.1.1)

درصد همانندی: ۱۱٪

## مطالعه آزمایشگاهی اثرات سطح بر افت و خیزهای سیگنال آکوستیکی

زینب مسجدی<sup>۱</sup>، سارا اله یاری بیک<sup>۲\*</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۳</sup>، عباسعلی علی اکبر بیدختی<sup>۴</sup>، امیر هومن حمصی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران masjedi2007@gmail.com

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

s.allahyari@srbiau.ac.ir

m.akbarinasab@umz.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده علوم دریایی و محیطی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

bidokhti@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

h\_hemmasi@srbiau.ac.ir

<sup>۵</sup> دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

### چکیده

سیگنال‌های صوتی برای نقشه برداری از بستر دریا، ارتباطات دریایی، شناسایی موانع انتشار صوت که اثرات بازتابی یا جذبی دارند استفاده می‌شود. این فناوری برای کشف لکه‌های نفتی یا اشیاء روی آب نیز استفاده می‌شود. در این مقاله، از آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ای برای شناسایی مواد لایه سطحی استفاده می‌شود. برای این منظور، موج صوتی با بسامد ۵۹ کیلوهرتز در محیطی همگن در شرایط آزمایشگاهی ساطع و داده‌ها جمع‌آوری شد. آزمایش‌ها با استفاده از یک مخزن آب با سطح آزاد و پوشش روغن و با قرار دادن فرستنده در زوایای مختلف انجام شد. برای تأیید نتایج آزمایشگاهی با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی رایانه‌ای از نظریه پرتو استفاده می‌شود. آزمایش‌ها در یک مخزن شیشه‌ای به طول ۳۰۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و عمق ۸۰ سانتی‌متر انجام شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، تجمع پرتوها در اعماق بالای ۵۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن تفاوت‌های زمانی که در الگوهای مختلف ظاهر می‌شود و ناشی از لایه‌های سطحی و لایه‌بندی متفاوت آب است، می‌توان مواد لایه سطحی و نحوه حرکت سیگنال آکوستیک در آب را مشخص کرد. همچنین زاویه فرستنده تأثیر زیادی بر سیگنال دارد. با توجه به نتایج، زمانی که زاویه فرستنده ۲۵ درجه باشد، سیگنال آکوستیک بهتر منتشر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: امواج آکوستیک، نظریه پرتو، روش معکوس آکوستیک، لایه‌بندی آب، زاویه فرستنده

## ۱. مقدمه

فناوری ارسال سیگنال‌های صوتی از طریق لایه‌های مختلف آب به‌طور گسترده در سامانه‌های ارتباطی زیر آب یا برای کاربردهایی مانند ردیابی نشت روغن و آلودگی آب استفاده می‌شود [۱-۸]. از آنجایی که دریا محیطی پویا و دائماً در حال تغییر است، پدیده‌های مختلف در مقیاس‌های گوناگون بر پراکندگی سیگنال‌های آکوستیک در دریا تأثیر می‌گذارند. هر یک از این پدیده‌ها مانند جریان‌های اقیانوسی [۹، ۱۰]، امواج داخلی [۱۱-۱۳]، اسیدی شدن آب [۱۴]، تغییرات دما [۱۵-۱۷]، شوری [۱۷-۱۹] و امواج سطحی [۲۰، ۲۱]، پژواک‌های جدید و تغییر سیگنال و فاز ایجاد خواهند کرد. خواص فیزیکی آب دریا در اعماق مختلف و در لایه‌های افقی متفاوت آب یکسان نیست و دما، شوری و چگالی هر لایه با لایه‌های دیگر متفاوت است. همچنین حدفاصل لایه‌ها به‌صورت یک مرز که به آن نواحی جبهه‌ای<sup>۱</sup> نیز می‌گویند، تعریف می‌شود، به‌نحوی که آب لایه‌های بالایی و پایینی در این نواحی به آرامی در جهت عمودی مخلوط می‌شود [۲۲]. لایه‌بندی افقی آب باعث تغییر ضریب شکست و سرعت صوت در این لایه‌ها می‌شود که خود به ایجاد بازتاب<sup>۲</sup> صدا بر روی سیگنال خروجی منجر می‌شود. همچنین سیگنال‌های آکوستیک در زمان‌های مختلف با عبور از لایه‌های آب، شکل، فاز، جهت و سرعت خود را تغییر می‌دهند [۲۳-۲۵].

در محیط‌های دریایی عوامل مختلفی مانند باد، اثرات جزر و مدی، جریان‌های نفوذی، امواج داخلی و اثرات فراجوشی و فروجوشی بر انتشار سیگنال آکوستیک در دریا تأثیر می‌گذارد. هر یک از این عوامل تأثیرات متفاوتی بر این سیگنال‌ها دارند. از این رو مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است [۲۶-۲۷]. علاوه بر این، سطح آب می‌تواند بر انتشار سیگنال‌های آکوستیک تأثیر بگذارد. با بررسی تأثیر تغییر جنس، ابعاد و شکل لایه مرزی سطحی بر انتشار امواج آکوستیک، می‌توان به تحلیل کامل‌تری از محیط آبی دست یافت. با این حال، مطالعات روی سیگنال‌های آکوستیک زیر آب اغلب انتشار امواج در آب دریا را بدون در نظر گرفتن پیچیدگی و ویژگی‌های مرزها، به‌ویژه مرز سطح آب،

مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۸-۳۴]. در این پژوهش ابتدا یک مطالعه تجربی درباره انتشار سیگنال صوتی در مخزن آب با سطح آزاد و پوشش روغن و تأثیر زاویه فرستنده در زوایای ۰، ۲۵ و ۳۵ درجه انجام شده است. هدف اصلی این بخش از آزمایش، تجزیه و تحلیل تأثیر نوع پوشش سطح بر جذب و اتلاف سیگنال آکوستیک است. در ادامه آزمایش‌های بیشتری برای تعیین دامنه و تغییرات فاز سیگنال‌ها و ارتباط آن‌ها با لایه‌بندی آب انجام می‌شود. این آزمایش علاوه بر سطح آزاد، با پوشش روغن نیز انجام می‌شود. همچنین تغییرات سرعت ناشی از لایه‌های مختلف آب با استفاده از سیگنال‌های ضبط‌شده تعیین می‌شود و تأثیر لایه‌بندی بر انحراف، شکست و انتشار کلی پرتوهای صوتی بررسی می‌شود. سپس آزمایش‌های انجام‌شده در محیط آزمایشگاه با نرم‌افزار رایانه‌ای شبیه‌سازی شده و با استفاده از نظریه پرتو، نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مقایسه و تأیید می‌شود. ساختار این مقاله بدین شرح می‌باشد: بخش دوم مطالعاتی بررسی می‌شوند که با مفهوم انتشار سیگنال آکوستیک در زیر آب مرتبط بوده‌اند. در بخش سوم، درباره روش تحقیق به همراه روش شبیه‌سازی و تنظیم‌های مربوط به آزمایش‌ها بحث می‌شود. در بخش چهارم نیز نتایج تجربی و تجزیه و تحلیل یافته‌های این تحقیق ارائه می‌شود. در انتها در بخش پنجم نتایج نهایی این مقاله به‌طور خلاصه بیان شده و جمع‌بندی نهایی ارائه می‌شود.

## ۲. روش‌ها و ابزارها

## ۲-۱. بسامد کاری منبع سیگنال در شبیه‌سازی رایانه‌ای

مدل‌سازی مبتنی بر روش پرتو برای فرکانس‌های متوسط و بالا سازگار است. از این رو، در محیط‌های آزمایشگاهی، حداقل بسامد منبع را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ تعیین کرد:

$$f > \frac{10C}{h} \quad (1)$$

که در آن،  $f$  بیانگر مقدار بسامد منبع صوتی بر حسب هرتز،  $C$  سرعت انتشار صوت بر حسب متر بر ثانیه و  $h$  حداقل عمق مخزن یا به‌طور کلی محیط آبی بر حسب متر است.

## ۲-۲. اصول مدل‌سازی عددی انتشار امواج صوتی

اصل نظریه حاکم بر کلیه مدل‌های ریاضی انتشار صوت، معادله موج است. مدل‌های اولیه از روش‌های نظریه پرتو استفاده می‌کردند تا نشان‌دهنده پرتوهایی باشند که معرف مسیرهای اصلی انتشار هستند. روش‌های دیگری مبتنی بر نظریه موج و مدهای نرمال برای توصیف صدای حاصل از یک انفجار در آب کم‌عمق وجود دارد. همچنین روش‌های ترکیبی<sup>۳</sup> نیز برای این منظور استفاده می‌شوند که از ترکیب دو مدل پرتو و نظریه موج به دست آمده‌اند.

تمام ابزارهای شبیه‌سازی ایجاد شده برای بررسی انتشار امواج صوتی بر اساس معادله موج عمل می‌کنند. با توجه به ماهیت مسئله پیش رو و عمق مورد مطالعه، از تغییرات چگالی صرف نظر می‌کنیم؛ بنابراین رابطه کلی معادله موج در این شرایط به صورت رابطه ۲ است.

$$\nabla^2 p(r, t) - \frac{1}{c(r)^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = f(r, t) \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی،  $p$  فشار موج،  $t$  زمان و  $r$  بردار موقعیت فضایی است. همچنین  $\nabla$  اپراتور گرادیان فضایی،  $c$  سرعت صوت و  $f$  تابع توصیف‌کننده منبع تولید صوت است. شبیه‌سازی انتشار صوت با مدل ردیابی پرتو Bellhope در جعبه‌ابزار آکوستیک<sup>۴</sup> (AT) نرم‌افزار مطلب و با استفاده از رابط گرافیکی طراحی شده برای آن یعنی ابزار ActTUP V2.21 انجام می‌شود. این ابزار قبلاً در سایر مطالعات مشابه با موفقیت استفاده شده است [۳۵]. همه کدهای استفاده شده در جعبه‌ابزار ActTUP بر این فرض استوار هستند که جمله شامل نیرو<sup>۵</sup> و فشار موج، هر دو توابع هماهنگ هستند. با در نظر گرفتن این فرض، به معادله آشنای هلمهولتز<sup>۶</sup> که در رابطه (۳) آورده شده است که

$$\nabla^2 p(r) + k(r)^2 p(r) = f(r) \quad (3)$$

رابطه (۳) را می‌توان تنها برای یک طول موج حل کرد.

## ۳. یافته‌ها

در این بخش آزمایش و ترتیب مراحل آزمایشگاهی استفاده شده بیان می‌شود. برای این منظور ابتدا تجهیزات، چینش و سپس داده‌های حاصل از این چینش بیان می‌شود و در نهایت از این داده‌ها برای تحلیل و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

### ۳-۱. تجهیزات مورد نیاز

برای انجام آزمایش، تجهیزات زیر استفاده گردید:

۱. مخزن شیشه‌ای به طول ۳۰۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر؛
۲. نمک برای ایجاد محلول آب‌نمک؛
۳. آب تمیز و بدون املاح برای اندازه‌گیری سیگنال‌های آکوستیک در آب همگن؛
۴. شوری‌سنج و دماسنج برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدروفیزیکی؛
۵. شش عدد مبدل جهتی<sup>۷</sup> (برای کاهش خطا، گیرنده و فرستنده را در آزمایش مورد نظر از یک نوع قرار داده شدند.) با بسامد ۵۹ کیلوهرتز؛
۶. کارت نوسان نگار<sup>۸</sup> دیجیتال (Instek GDS-1052-U) 50 MHz, 2-Channel, Digital Storage Oscilloscope) برای ثبت داده‌های آکوستیکی به صورت دیجیتال؛
۷. تولیدکننده سیگنال<sup>۹</sup> برای تولید بسته موج سینوسی و ارسال آن به فرستنده‌ها؛
۸. رایانه برای ذخیره داده‌های آکوستیکی و هیدروفیزیکی؛
۹. منبع تغذیه برای تغذیه پمپ به منظور پمپاژ محلول آب‌نمک به مخزن شیشه‌ای؛
۱۰. سطل برای تولید محلول آب‌نمک؛
۱۱. تقویت‌کننده سیگنال؛
۱۲. شلنگ برای ریختن محلول آب‌نمک به مخزن شیشه‌ای با دبی پایین.

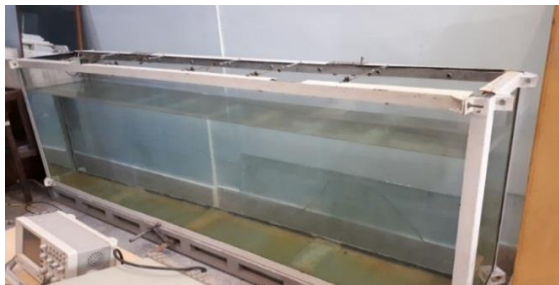
### ۳-۲. روش لایه‌بندی

روش‌های متفاوتی برای ایجاد لایه‌بندی وجود دارد. در

سینوسی بسته موج برای ارسال سیگنال‌های صوتی استفاده شده است. در کارت اسیلوسکوپ مورد استفاده، دو کانال A و B وجود دارد. از کانال A به عنوان کانال اتصال به زمین و از کانال B به عنوان خروجی تولیدکننده سیگنال استفاده می‌شود. در کانال B یک دوراهی قرار داده می‌شود. یکی از کانال‌های این دوراهی به خروجی تولیدکننده سیگنال و به دیگری خروجی گیرنده متصل می‌شود.

### ۳-۵. چیدمان سامانه‌های آکوستیک

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، این آزمایش در یک مخزن شیشه‌ای با ابعاد کوچک (۸۰ × ۵۰ × ۳۰ سانتی‌متر) انجام می‌شود؛ بنابراین، باید از مبدل‌های جهتی استفاده شود. در پایین این تصویر نوسان نگار استفاده شده برای ثبت داده نیز قابل مشاهده است.



شکل ۱. مخزن در حال پر شدن با آب شیرین

با توجه به اینکه محیط لایه‌بندی شده مقیاسی از مرتبه سانتی‌متر دارد، سیگنال صوتی باید در بسامدهای بالا (کیلوهرتز) داده‌برداری شود که بتوان تأثیر این لایه‌ها را بر انتشار صوت مورد مطالعه قرار داد. در این آزمایش، از حسگرهای آکوستیک با بسامد مرکزی ۵۹ کیلوهرتز استفاده شد. چون این حسگرها نسبت به زاویه انتشار بسیار حساس هستند، بنابراین روی یک پایه فلزی نصب می‌شوند. در این آزمایش یک فرستنده بسامد متوسط درون منبع قرار می‌گیرد. سپس سیگنال‌های فرستنده در فواصل مختلفی از آن ثبت می‌شود. این آزمایش در دو حالت آب ساده و آب پیوسته لایه‌بندی شده و با سطح آزاد و پوشش روغن تکرار خواهد شد.

آزمایش صورت گرفته از روش دو سطلی<sup>۱۰</sup> [۳۶، ۳۷] برای لایه‌بندی پیوسته استفاده شده است. در این روش از دو منبع، یکی آب شیرین و دیگری آب شور استفاده می‌شود. دو منبع با استفاده از یک لوله به یکدیگر متصل هستند. منبع آب شور با استفاده از یک شلنگ که انتهای آن درون ظرف آزمایشگاهی و درون اسفنجی قرار داده شده است، آب را به درون ظرف هدایت می‌کند.

### ۳-۳. مشخصات سیگنال صوتی تولیدشده

برای تولید سیگنال، ابتدا از یک تولیدکننده سیگنال برای ارسال سیگنال در مخزن استفاده می‌شود. مشخصات سیگنال مورد نظر در جدول ۱ گزارش شده است. این سیگنال الکترونیکی، توسط فرستنده به سیگنال آکوستیکی تبدیل می‌شود و گیرنده آن را دریافت می‌کند.

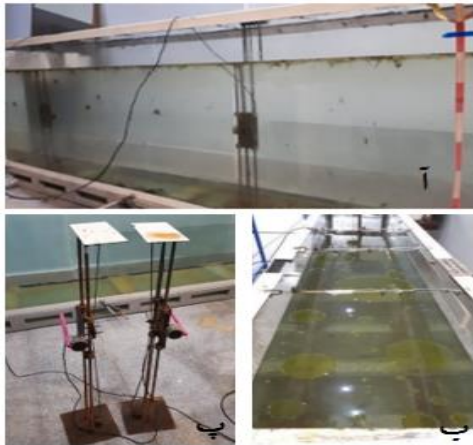
جدول ۱. مشخصات سیگنال تولیدشده

بسامد	۵۹ کیلوهرتز
پیک تا پیک ولتاژ ورودی	۵-۱۰-۲۰ ولت
تعداد سایکل	۱۰ عدد
تأخیر پالس	۱۰۰ میلی ثانیه
نوع پالس	بسته موج
شکل سیگنال ارسالی	سینوسی

### ۳-۴. مشخصات کارت داده‌برداری

در این آزمایش یکی از کانال‌های نوسانگر دو کاناله که قابلیت ضبط سیگنال با سرعت ۳۰ مگاهرتز را دارد، برای دریافت سیگنال ورودی از تولیدکننده و دیگری برای دریافت سیگنال خروجی از گیرنده‌ها استفاده می‌شود. برای اطمینان از عدم تأثیر نویزهای الکترونیکی بر نتایج، تمام تجهیزات به زمین متصل شده‌اند و با استفاده از اهم‌تر تمام قسمت‌های این چیدمان برای بررسی نویزهای الکترونیکی بررسی شده‌اند. این سامانه قابلیت تولید سیگنال‌ها تا ۵۰ مگاهرتز به شکل‌های مربعی<sup>۱۱</sup>، دنده‌ای<sup>۱۲</sup>، سینوسی<sup>۱۳</sup> و پله‌ای<sup>۱۴</sup> و همچنین به صورت بسته موج<sup>۱۵</sup> و تولید چند سیگنال در باندهای بسامدی مختلف<sup>۱۶</sup> را دارد. در این آزمایش‌ها، به دلیل محدودیت حسگرهای صوتی مورد استفاده، از سیگنال

### ۳-۶. روش آزمایش



شکل ۲. چینش کلی آزمایش: (آ) نحوه قرارگیری مبدل‌های فرستنده و گیرنده و (ب) پایه‌های نگه‌دارنده آن‌ها و (پ) مخزن با پوشش روغن

در مرحله نخست، سیگنالی با مشخصات مندرج در جدول ۲ توسط فرستنده‌ای که در عمق ۴۰ سانتی متری از سطح و ۴۵ سانتی متر از جداره پشتی مخزن قرار داشته، منتشر و گیرنده‌ای که در عمق ۴۰ سانتی متری از سطح و فاصله ۳۸ سانتی متر از فرستنده به صورت افقی قرار داده شده، آن را دریافت نمود. در مراحل بعد فاصله فرستنده تا گیرنده به تدریج افزایش یافته و آزمایش تکرار شد. داده‌های ثبت شده در این مرحله، برای همپوشانی و تعیین نوفه<sup>۱۷</sup>‌های خارجی و نوفه‌های داخلی درون مخزن آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

### ۳-۷. محاسبه سرعت صوت در آب همگن و لایه‌بندی شده

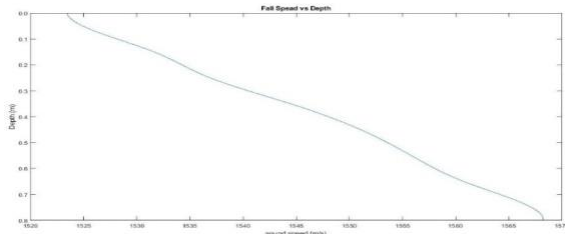
سرعت صوت تابعی از سه متغیر دما، شوری و فشار است. برای اندازه‌گیری این پارامترها از سطح تا کف مخزن، بر روی یکی از این پایه‌ها حسگر دما و هدایت الکتریکی نصب شد و با حرکت عمودی این پایه با سرعت ثابت، این داده‌ها با استفاده از سامانه بلوتوثی<sup>۱۸</sup> به رایانه ارسال و به صورت فایل متنی ذخیره شد. برای محاسبه سرعت صوت اطلاعات پارامترهای ثبت شده در رابطه تجربی زیر برحسب متر بر ثانیه<sup>۱۹</sup> قرار می‌گیرد [۳۸].

$$c(z) = 1449.2 + 4.6T(z) - 0.055T(z)^2 + 0.00029T(z)^3 + (1.34 - 0.01T(z))(S(z) - 35) + 0.016z \quad (4)$$

روند آزمایش نیاز به حداقل دو بار پرکردن مخزن آزمایش دارد. یک بار درون مخزن از آب معمولی تا ارتفاع ۸۰ سانتی متری از کف مخزن پر شده و بار دیگر با روش دو سطلی لایه‌بندی پیوسته تا ارتفاع ۸۰ سانتی متر ایجاد شد. سپس، مبدل‌هایی روی پایه‌های مخصوصی که به همین منظور طراحی شده است نصب و در داخل مخزن قرار داده شدند. در شکل ۲ (آ) مبدل‌های فرستنده و گیرنده مشاهده می‌شوند. این مبدل‌ها سپس مطابق شکل ۲ (ب) درون مخزن پر از آب قرار می‌گیرند و در انتها برای آزمایش‌هایی که نیاز به سطحی با پوشش روغن دارند، مطابق شکل روی سطح آب روغن ریخته می‌شود. ابتدا آزمایش برای آب بدون لایه‌بندی با سطح آزاد انجام می‌شود. سپس پوشش روغن روی سطح آب قرار گرفته و آزمایش با این پوشش تکرار می‌شود. پس از نصب مبدل‌ها و اتصال آن به قسمت‌های دستگاه‌های نوسان نگار و تولیدکننده سیگنال، نسبت به ارسال سیگنال با مشخصات مندرج در جدول ۲ اقدام شد. برای این کار فرستنده را در موقعیت خود ثابت کرده و تنها گیرنده حرکت داده شد. به‌طور میانگین داده‌ها برای هر آزمایش در ۵ فاصله مختلف فرستنده و گیرنده تکرار شد. پس از اتمام داده برداری از آب بدون لایه‌بندی، اقدام به لایه‌بندی پیوسته آب کرده و مراحل آزمایش همانند آزمایش با آب بدون لایه‌بندی انجام شدند.

جدول ۲. مشخصات محیط و تجهیزات آزمایشگاه

هدایت الکتریکی	۰/۴۵۶ میکروزیمنس
درجه حرارت آب	۱۵ درجه سانتی‌گراد
بسامد	۵۹ کیلوهرتز
ارتفاع پیک تا پیک موج	۲۰ ولت
تعداد موج درون بسته	۵۰ چرخه
آهنگ تغییرات شدت صوت	۱۰ هرتر بر ۱۰۰ میلی‌ثانیه



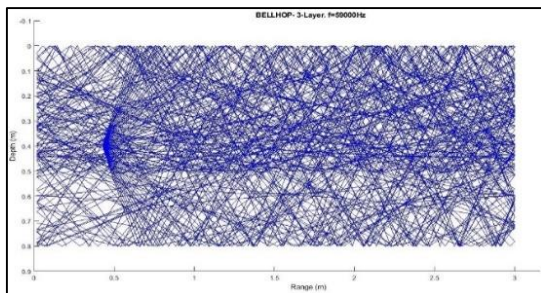
شکل ۳. تغییرات سرعت صوت بر مبنای عمق

جدول ۳. مشخصات منبع

مشخصه منبع	مقدار
نوع منبع	نقطه‌ای
بسامد	۵۹ کیلوهرتز
زاویه برحسب درجه	(۲۵، ۲۵) - درجه
سرعت پایه صوت	۱۴۴۰ متر بر ثانیه
دامنه	۵-۱۰-۲۰ ولت
سیکل	۳
مد اجرای کد	"R"، "C"، "A"

جدول ۴. مقادیر دما و هدایت الکتریکی ثبت شده در عمق‌های مختلف

عمق (cm)	دما (°C)	هدایت الکتریکی (μS)
۷۵	۱۲/۶	۹۱/۱
۶۵	۱۱/۹	۸۷/۵
۵۵	۱۱/۸	۸۳/۵
۴۵	۱۱/۸	۷۹/۸
۳۵	۱۱/۸	۷۴/۴
۲۵	۱۲/۰	۶۷/۷
۱۵	۱۲/۷	۶۱/۶
۵	۱۵	۵۰/۲



شکل ۴. اجرای برنامه در مد "R"، منبع در عمق ۴۰ سانتی متری و زاویه

صفر درجه

که  $T(z)$  دما و  $S(z)$  شوری در عمق  $z$  است. با توجه به این نکته که چگالی آب اختلاف قابل توجهی ندارد، از تغییرات آن چشم‌پوشی کرده و مقدار ثابت ۱۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب برای تمام عمق‌ها فرض می‌شود. برای محاسبه سرعت صوت در آب لایه‌بندی شده، مراحل اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها مانند مرحله قبل تکرار می‌شود با این تفاوت پس از لایه‌بندی محیط توسط دستگاه مخصوص و تنظیم موقعیت فرستنده و گیرنده همانند آزمایش آب همگن بر روی پایه‌های فلزی، مراحل انجام آزمایش تکرار می‌شود. سپس پارامترهای دما، شوری و فشار، از سطح آب تا کف مخزن شیشه‌ای اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. اولین سیگنالی که گیرنده دریافت می‌کند سیگنالی است که به صورت مستقیم انتشار می‌یابد. سیگنال‌های بعدی که در صفحه نوسان نگار مشاهده می‌شوند به خاطر پراکندگی‌هایی است که از بستر، سطح، دیواره‌ها و غیره بازتاب یافته است. جدول (۳) مشخصات منبع تولید صوت و مدهایی که برنامه در آن اجرا شده را نمایش می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه آزمایش‌ها برای هر دو حالت بدون لایه‌بندی و با لایه‌بندی صورت گرفته است، لذا در شبیه‌سازی‌ها این امر نیز بررسی می‌شود که آیا لایه‌بندی آب در تغییر الگوی بازتاب تأثیری دارد یا خیر. برای این منظور با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر شوری، رسانش الکتریکی و دمای آب در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری شد. این داده‌ها در جدول ۴ آورده شده‌اند. در آب بدون لایه‌بندی به دلیل رسانش یکسان، دمای آب در ابعاد عمق ۸۰ سانتی متر تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته و شوری آب عملاً ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. به همین دلیل از رابطه محاسبه سرعت صوت فقط برای آب لایه‌بندی شده استفاده می‌شود. البته این رابطه با توجه به اینکه در عمق صفر آب تقریباً شیرین فرض شده است، می‌تواند برای اندازه‌گیری سرعت صوت در مخزن با آب بدون لایه‌بندی با قرار دادن  $z = 0$  استفاده شود. شکل ۳ تغییرات تقریباً خطی سرعت صوت را در آب لایه‌بندی شده نشان می‌دهد. این نمودار با استفاده از تقریب اسپلین نقاط جدول ۴ به دست آمده است.

جدول ۵. شرایط آزمایش و حالت‌های مختلف داده برداری

مقدار	مشخصه
۵۹ کیلوهرتز	بسامد منبع
۴۰ سانتی‌متر	عمق منبع
نقطه‌ای	نوع منبع
(۲۵، ۲۵) - درجه	زاویه بر حسب درجه
۰ متر بر ثانیه	سرعت موج برشی

در این بخش، آزمایش‌ها به صورت چند سناریو به شکل حالت‌های مختلف آب همگن و آب لایه‌بندی شده با زوایای منبع مختلف تعریف شده است:

الف. آب همگن با سطح آزاد در دو زاویه منبع ۰ و ۳۵ درجه؛

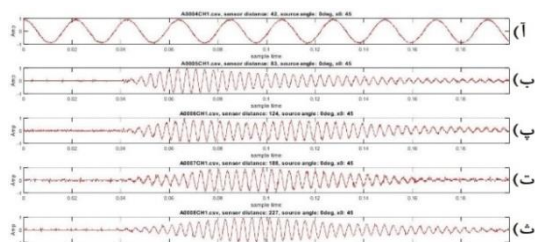
ب. آب همگن با پوشش روغن در سطح با دو زاویه ۰ و ۳۵ درجه؛

پ. آب لایه‌بندی شده با سطح آزاد در دو زاویه منبع ۰ و ۲۵ درجه؛

ت. آب لایه‌بندی شده با پوشش روغن در سطح با دو زاویه منبع ۰ و ۲۵ درجه.

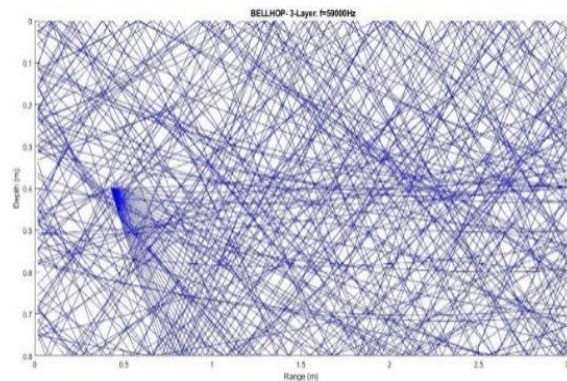
### ۳-۸-۱. سناریوی الف

در شکل‌های ۷ و ۸ داده‌های به دست آمده از تغییرات سرعت انتشار صوت در پوشش آب ساده همگن با زوایای مختلف فرستنده نشان داده شده است. انعکاس صوت در زوایای مختلف در مخزن باعث می‌شود سیگنال‌هایی اضافی با طول پالس‌های متفاوت در گیرنده مشاهده شود. در شکل ۷ زمانی که فاصله فرستنده و گیرنده ۴۲ سانتی‌متر است، سیگنال دریافتی با طول موج و دامنه بلندتری نسبت به دیگر شکل‌ها دریافت شده است.

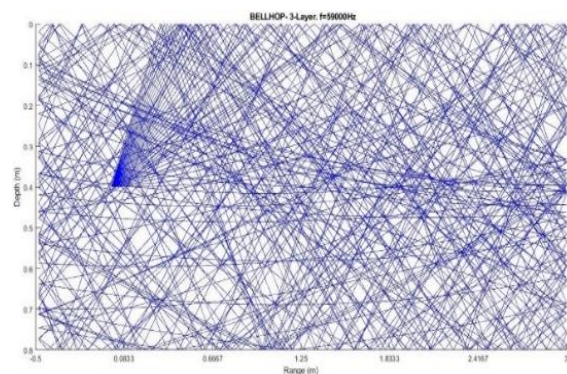


شکل ۷. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی الف با زاویه ۰ درجه و حسگر با فواصل (آ) ۴۲، (ب) ۸۳، (پ) ۱۲۴، (ت) ۱۸۸ و (ث) ۲۲۷ سانتی‌متر نسبت به منبع صوت

پس از اجرای برنامه در مد "R"، دیده می‌شود که حتی در محدوده عمقی زیر ۱ متر نیز می‌توان شاهد پدیده‌هایی مانند شکست و بازتاب داخلی بود. شکل ۴ الگوهای بازتاب درونی در عمق ۵۰ سانتی‌متری نشان داده شده است. الگوی تابش پرتوها در این شکل متقارن است اما الگوهای بازتاب آن‌ها یکسان نبوده و این به سبب شکست و بازتاب داخلی در مخزن و لایه‌های مختلف است. با مقایسه ۵ و ۶ دیده می‌شود که پرتوهایی که در طول سیال حرکت کرده‌اند تقریباً به سمت بالا دارند و تراکم پرتوهای بازتابی در مجموع قبل از عمق ۵۰ سانتی‌متر بیشتر است و از این عمق به پایین این تراکم کاهش می‌یابد. این رفتار همانند حالتی است که آزمایش برای زاویه صفر درجه انجام می‌شود.



شکل ۵. اجرای مدل با مد "R" با زاویه ۲۵- برای ۵۱ پرتو

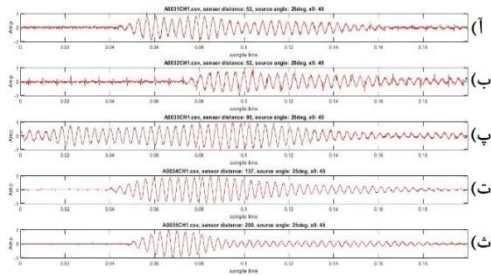


شکل ۶. اجرای مدل با مد "R" با زاویه ۲۵ درجه برای ۵۱ پرتو

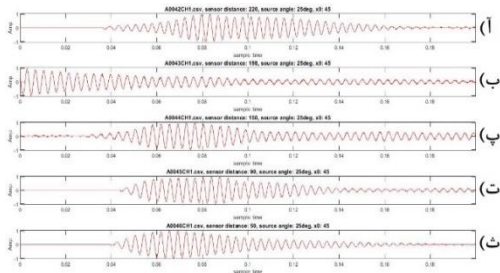
### ۳-۸. بررسی تغییرات سرعت صوت

مشخصات شبیه‌سازی انتشار صوت در محیط‌های اشاره شده به صورت جدول ۵ است.

و ۱۲ به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۱۱. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی پ با زاویه ۰ درجه و فاصله (آ) ۵۲، (ب) ۹۰، (پ) ۱۳۷ و (ت) ۲۰۰ سانتی‌متر

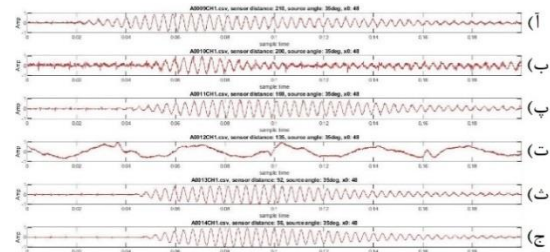


شکل ۱۲. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی پ با زاویه ۲۵ درجه و فاصله (آ) ۲۲۰، (ب) ۱۹۸، (پ) ۱۵۰، (ت) ۹۰ و (ث) ۵۰ سانتی‌متر

در این حالت نیز الگویی مشابه با سطح آب آزاد به دست آمد، با این تفاوت که با تغییر زاویه فرستنده انعکاس صوت در دامنه کمتری مشاهده شده و این موضوع اهمیت زاویه فرستنده را نشان می‌دهد. همچنین در صورت افزایش دقت زمانی در همپوشانی، انعکاس‌هایی که در دامنه بسامدهای نسبتاً پایین ظاهر می‌شوند، گاهی اوقات به صورت قله‌های جداگانه در خروجی ظاهر می‌شود.

#### ۴-۸-۳. سناریوی ت

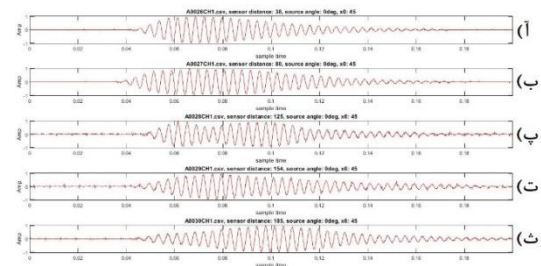
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز داده‌های به‌دست‌آمده از تغییرات سرعت انتشار صوت در آب لایه‌بندی شده با روغن با زاویه‌های متفاوت فرستنده را بررسی می‌کند. در نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که تغییر در زاویه فرستنده به کاهش دامنه انعکاس منجر می‌شود. همچنین اختلاف زمانی ایجاد شده به علت تفاوت پوشش در آب لایه‌بندی شده با پوشش روغن و همچنین تغییرات طولی و پراکندگی در مسیر بازگشت را می‌توان با تغییر مناسب زاویه فرستنده خنثی کرد.



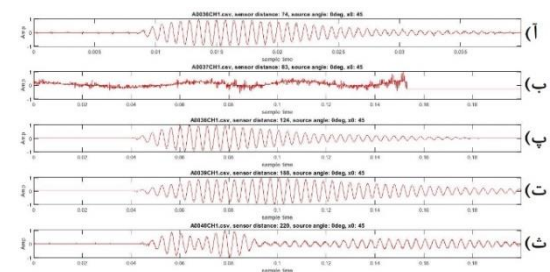
شکل ۸. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی الف با زاویه ۳۵ درجه و حسگر با فواصل (آ) ۲۱۰، (ب) ۲۰۰، (پ) ۱۶۹، (ت) ۱۳۵، (ث) ۹۲ و (ج) ۵۶ سانتی‌متر

#### ۲-۸-۳. سناریوی ب

در شکل‌های ۹ و ۱۰ داده‌های به‌دست‌آمده از تغییرات سرعت انتشار صوت در پوشش روغن با در نظر گرفتن زاویه فرستنده ارائه شده است. در پوشش روغن نسبت به آب ساده همگن با سطح آزاد، تأثیرات انعکاسی بیشتری مشاهده شده و دامنه انعکاس بزرگ‌تر شده است و سیگنال‌های دریافتی از محیط در عین بی‌نظمی، به‌صورت تکرارپذیری در آزمایش مشابه در محیط‌های قبلی مشاهده شده است.



شکل ۹. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی ب با زاویه ۰ درجه و فاصله (آ) ۳۸، (ب) ۸۰، (پ) ۱۲۵، (ت) ۱۵۴ و (ث) ۱۸۵ سانتی‌متر



شکل ۱۰. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی ب با زاویه ۳۵ درجه و فاصله (آ) ۷۴، (ب) ۸۳، (پ) ۱۲۴، (ت) ۱۸۸ و (ث) ۲۲۰ سانتی‌متر

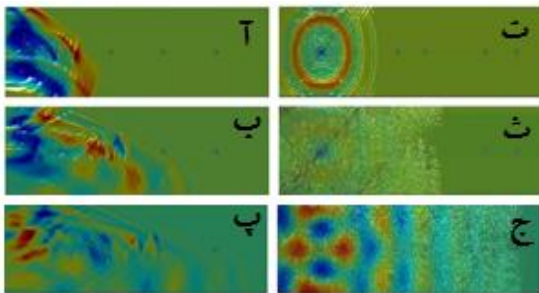
#### ۳-۸-۳. سناریوی پ

داده‌های به‌دست‌آمده از تغییرات سرعت انتشار صوت در آب لایه‌بندی شده با بررسی زاویه فرستنده در شکل‌های ۱۱

### ۳-۱۰. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در

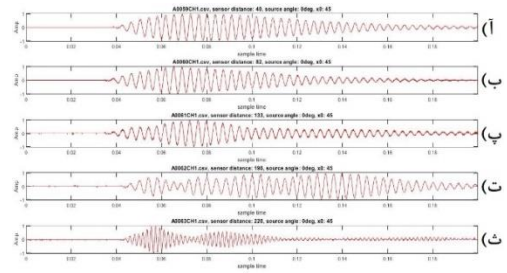
#### دو حالت لایه‌بندی و آب همگن با سطح آزاد

شبیه‌سازی‌هایی برای آب همگن و لایه‌بندی شده با شرایط مرزی یکسان صورت گرفته است که می‌توان نتایج را در شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده نمود. در شکل ۱۵ (آ)، (ب) و (پ) که نتایج شبیه‌سازی مربوط به آب همگن را نمایش می‌دهند، الگوهای شدتی متقارن ایجاد شده و انتشار می‌یابد. در حالی که در ۱۵ (ت)، (ث) و (ج) که نتایج شبیه‌سازی مربوط به آب لایه‌بندی شده را نمایش می‌دهند، موج به سمت سطح خمیده شده است. این اختلاف به دلیل تفاوت در چگالی شدت صوت در نقاط مختلف حاصل می‌شود. از آنجاکه به دلیل اختلاف سرعت صوت در لایه‌های مختلف، نمودار شدت به سمت بالا تمایل پیدا می‌کند، نقاطی تلاقی پرتوها یعنی نقاطی که در آن شدت بیشینه است، دورتر یا نزدیک‌تر می‌شوند. در شکل ۱۶ دو شبیه‌سازی مربوط به شدت صوت منتشر شده در آب همگن و لایه‌بندی شده بدون پوشش سطحی نشان داده شده‌اند. با دقت در الگوی شدت می‌توان دید نقاط هم فاز در آب لایه‌بندی شده به جای قرار گرفتن در شعاع‌های در حال گسترش، به صورت منحنی‌های در حال گسترش با انحنا به سمت بالا قرار دارند. بنابراین با دور شدن از منبع صوت، نقاطی که الگوی تداخلی یکسانی دارند در آب معمولی و لایه‌بندی شده از یکدیگر فاصله می‌گیرند.

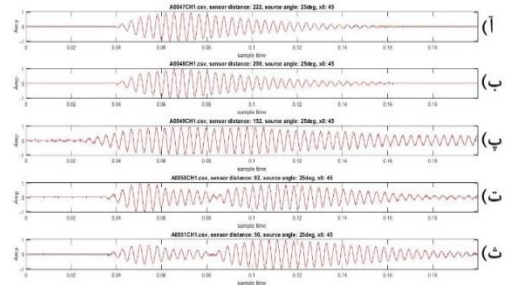


شکل ۱۵. مراحل شبیه‌سازی شده حرکت جبهه موج صوتی در (آ)، (ب) و (پ) آب بدون لایه‌بندی با سرعت ثابت ۱۴۲۰ متر بر ثانیه و آب لایه‌بندی شده با سه لایه با سرعت‌های اغراق شده (ت) ۱۴۰۰، (ث) ۱۴۷۰ و (ج) ۱۵۵۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۷ رابطه نقاط هم‌فاز و موج‌های مشابه در فواصل مختلف برای آب لایه‌بندی شده و آب همگن نشان داده شده



شکل ۱۳. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی ت با زاویه ۰ درجه و فاصله (آ) ۴۰، (ب) ۸۲، (پ) ۱۳۳، (ت) ۱۹۰ و (ث) ۲۲۰ سانتی‌متر



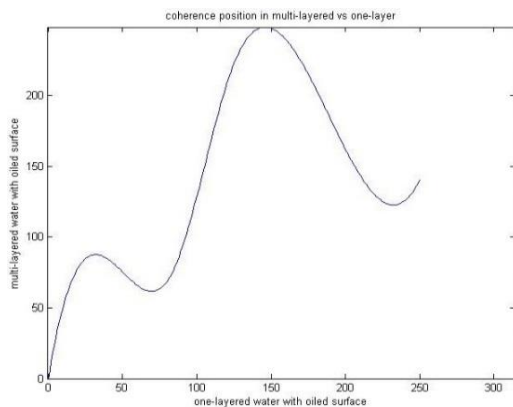
شکل ۱۴. تغییرات سرعت انتشار صوت در سناریوی ت با زاویه ۲۵ درجه و فاصله (آ) ۲۲۲، (ب) ۲۰۰، (پ) ۱۵۲، (ت) ۹۲ و (ث) ۵۰ سانتی‌متر

### ۳-۹. تحلیل نتایج

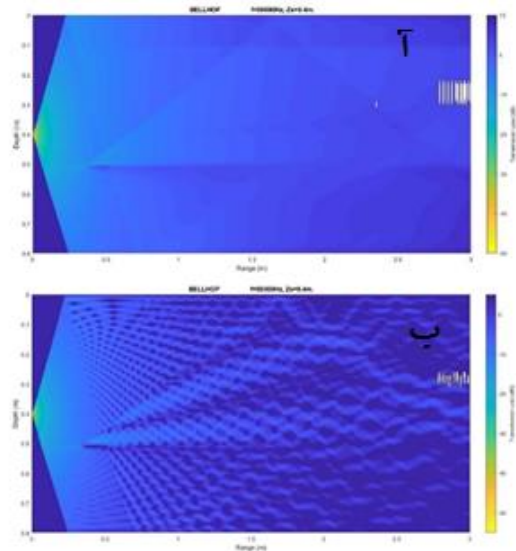
سیگنال‌های صوتی در گیرنده در پنج فاصله از فرستنده در آب با لایه‌بندی و بدون لایه‌بندی برای سطح آزاد و پوشش روغن اندازه‌گیری شده‌اند. تمام سیگنال‌های ثبت شده را برای تحلیل راحت‌تر، در دامنه مثبت قرار داده و با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال، نقاط اکستریم سیگنال‌ها مشخص شده است. این نقاط که شامل بیشینه‌ها<sup>۲۱</sup> و کمینه‌های<sup>۲۱</sup> سیگنال دریافتی می‌باشد، اطلاعاتی از پوشش‌های سازنده و مخرب را فراهم می‌آورند که می‌توان با استفاده از آن نحوه حرکت صوت در آب را مورد بررسی قرار داد. با توجه به اینکه تغییر در ساختار منتقل‌کننده صوت باعث تغییر در سیگنال‌های دریافتی در گیرنده می‌شود، می‌توان انتظار داشت که سیگنال‌های هم‌فاز و پوش‌های یکسان در شرایط محیطی مختلف و نسبت به فاصله فرستنده دچار تغییر موقعیتی شوند. این ایده اصلی برای مقایسه سیگنال‌های ثبت شده در آزمایش‌های صورت گرفته می‌باشد.

۳-۱۰-۱. مقایسه آب همگن و لایه‌بندی با پوشش آزاد و روغن در سطح

در شکل ۱۸ نمودار نسبت فواصل هم‌فاز در آب لایه‌بندی شده و آب معمولی در حضور پوشش روغن دیده می‌شود. همان‌گونه که دیده می‌شود در نسبت  $90/30$  اولین بیشینه و سپس در نسبت  $250/150$  دومین بیشینه نسبت تغییر برای آب معمولی به آب لایه‌بندی شده دیده می‌شود. از این اختلاف می‌توان نوع پوشش سطحی را تعیین کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله حسگرها، این نسبت دچار نوسان می‌گردد. با توجه به اینکه پوشش سطحی نیز می‌تواند در الگوهای ثبت شده در گیرنده‌ها تغییراتی ایجاد نماید، داده‌ها و آزمایش‌های مربوط به آب لایه‌بندی شده و آب همگن به صورت جداگانه برای آب با سطح آزاد و پوشش روغن بررسی می‌شود.



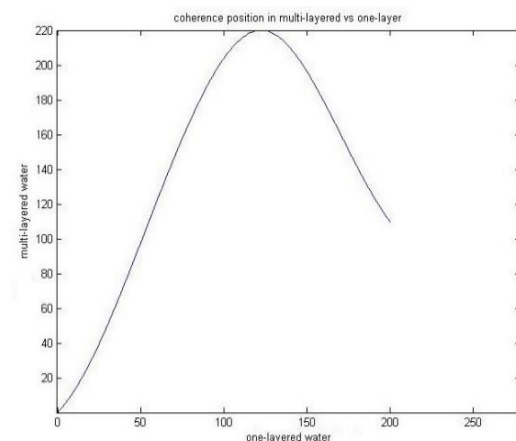
است. این نمودار را می‌توان مرجعی برای تصحیح و انتقال سیگنال‌های هم پوش در نظر گرفت. برای مثال در شکل ۱۷ سیگنالی که به حسگر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از منبع صوت در آب ساده می‌رسد، با سیگنالی که در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از منبع صوت در آب لایه‌بندی شده می‌رسد، هم‌فاز است و پوش ایجاد شده در این دو حسگر یکسان دیده می‌شود. دلیل این امر، تغییر سرعت در لایه‌های مختلف در آب لایه‌بندی شده است که باعث ایجاد انحنای در حرکت پرتوها می‌شود.



شکل ۱۶. (آ) شبیه‌سازی برای آب معمولی بدون پوشش سطحی و (ب) شبیه‌سازی برای آب لایه‌بندی شده بدون پوشش سطحی

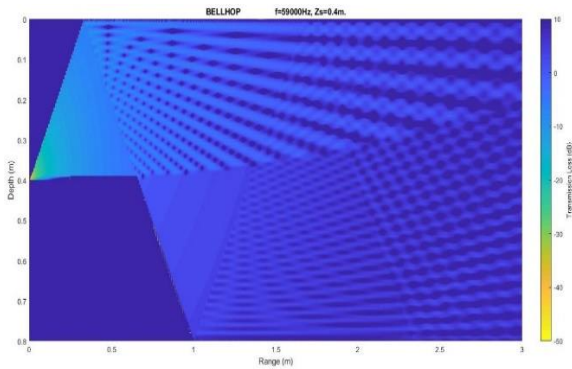
شکل ۱۸. رابطه بین فواصل گیرنده فرستنده برای سیگنال‌های مشابه در دو نوع آب معمولی و لایه‌بندی شده با پوشش روغن

۳-۱۰-۲. بررسی تأثیر زاویه فرستنده در رفتار سیگنال صوتی زاویه فرستنده می‌تواند در تغییر رفتار سیگنال ورودی به گیرنده تفاوت‌هایی ایجاد نماید. با مقایسه شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ که مربوط به آب لایه‌بندی شده با سطح آزاد هستند، می‌توان دید که خط افت شدت رو به بالا حرکت می‌کند. با توجه به اینکه عمق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ثابت است و حسگرها تنها در فاصله‌های مختلف قرار دارند، این امر به معنی تغییرات واضح شدت در گیرنده‌ها برای زوایای مختلف فرستنده است.

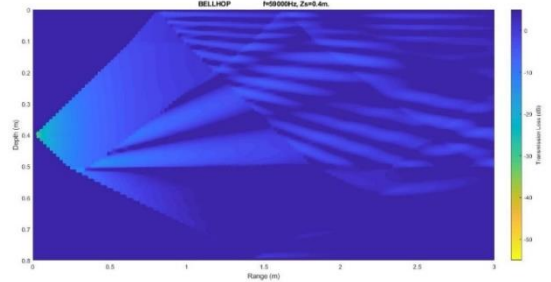


شکل ۱۷. رابطه بین فواصل گیرنده فرستنده برای سیگنال‌های مشابه در دو نوع آب معمولی و لایه‌بندی شده با سطح آزاد

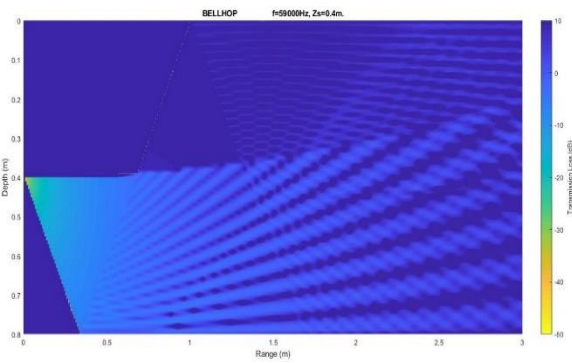
پراکندگی و اتلاف انرژی صوت در مسیر است.



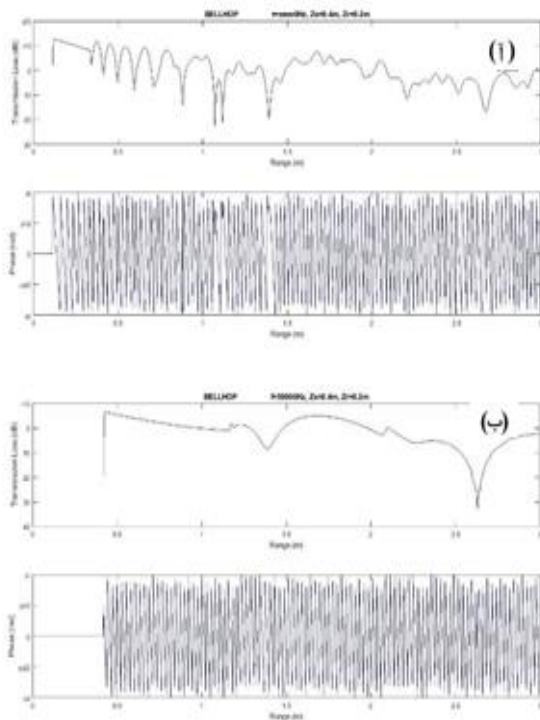
شکل ۱۹. الگوی شبیه‌سازی شدت صوت منتشر شده در زاویه افقی



شکل ۲۰. الگوی شدت صوت انتشار داده شده در زاویه  $-25^\circ$



شکل ۲۱. الگوی شدت صوت انتشار داده شده در زاویه  $+25^\circ$



شکل ۲۲. تغییرات شدت سیگنال برحسب فاصله در عمق ۲۰ سانتی‌متری مخزن با زاویه (آ) صفر درجه و (ب)  $25^\circ$  درجه.

در شکل‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نمودار برشی توزیع شدت به صورت برش مرکزی در عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. عمق فرستنده در همه شبیه‌سازی‌ها برابر ۴۰ سانتی‌متر است. به نمودارهای شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ طیف سیگنال گفته می‌شود. در شکل (۲۲-آ) زاویه فرستنده برابر صفر درجه (افقی) و عمق گیرنده برابر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. الگوی نمایی عمومی اتلاف به‌سادگی قابل مشاهده است اما با فاصله گرفتن از مبدأ سیگنال، دیده می‌شود که الگوهای تداخلی به صورت قله‌ها و قعرها بروز می‌کنند. قله‌ها تداخل سازنده و قعرها تداخل مخرب را در مسیر نشان می‌دهد.

به‌طور مشابه برای زاویه  $25^\circ$  درجه الگوی عمومی کاهش شدت، مشاهده می‌شود؛ اما با این تفاوت که میزان کاهش شدت در واحد طول، نسبت به زاویه صفر درجه کمتر است.

همچنین با توجه به جهت رو به بالای محور انتشار صوت، تداخل‌ها در فاصله‌ای طولانی‌تر شروع شده و به دلیل بازتاب نزدیک از سطح، فاز پرتوهای متداخل، به آرامی و به صورت پیوسته تغییر می‌کند که این امر تغییرات آهسته را در نمودار شدت برشی ایجاد می‌کند.

شکل ۲۲-ب الگوی تغییر شدت برشی برای عمق ۶۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در این شکل رنج طولانی حدود ۲ متری در  $25^\circ$  درجه (ب زاویه  $25^\circ$  درجه) است.

با توجه به اینکه پرتوها قبل از رسیدن به گیرنده باید تا بالای سطح حرکت کنند و سپس رو به سمت پایین بازتاب شوند، لذا تغییر شدت ناشی از تداخل تا رنج بیش از ۲ متر مشاهده نمی‌شود و تنها افت شدت ناشی از مسافت طی شده و

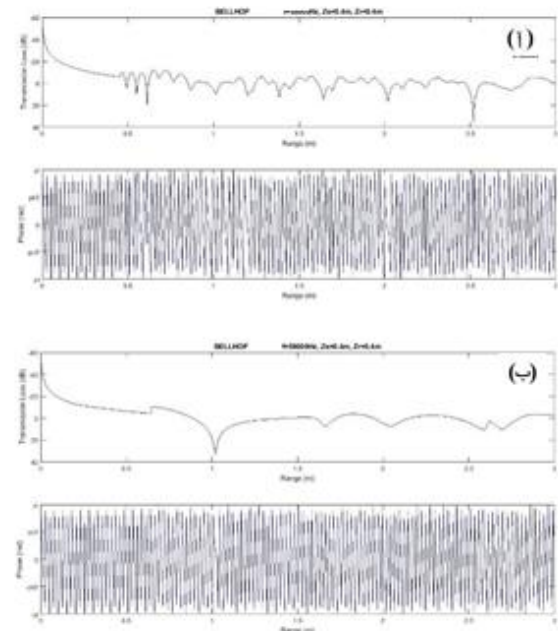
این زاویه در دو شکل قبل متفاوت است. همان گونه که در طیف سیگنال در عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی متری واضح است، نقاطی به صورت گره دیده می‌شود. این نقاط قله و قعر مناطق شدت و سایه سیگنال هستند. در مورد طیف سیگنال فرستنده با زاویه صفر درجه، تعداد و دامنه تغییرات این قله‌ها و قعرها بیشتر است. علت این امر را می‌توان در طیف تجمعی نیز مشاهده کرد.

از آنجایی که بازتاب‌های نا هم جهت در سیگنال افقی بیشتر است، لذا به علت برهم‌نهی دو موج در یک نقطه، تغییرات دامنه بسامد بالاتری دارد. در مورد پرتوهای هم جهت این برهم‌نهی به دلیل تغییر فاز ناچیز موج‌هایی که در یک نقطه دچار برهم‌نهی می‌شوند، دامنه و بسامد کمتری دارد.

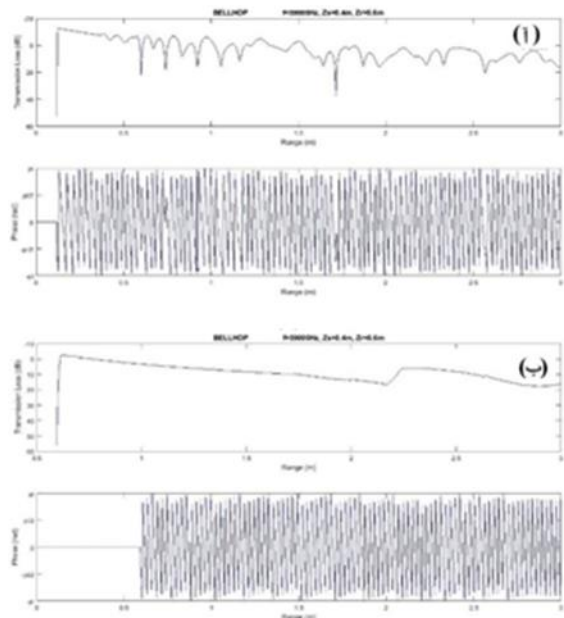
این امر بسیار بدیهی و ساده به نظر می‌رسد، اما اثر آن می‌تواند با اهمیت باشد. با توجه به کاهش دامنه بسامدی موج‌های برهم‌نهی شده در مواردی که فرستنده زاویه بیشتری نسبت به افق دارد، می‌توان انتظار داشت که در مورد سیگنال‌های دریافتی از فرستنده با زاویه غیر صفر، سیگنال دچار کشیدگی شود.

در شکل ۲۵ کشیدگی سیگنال به سادگی مشاهده می‌شود. در شکل ۲۵ سیگنال از فرستنده در عمق ۴۰ سانتی متری و با دو زاویه ۰ و ۲۵ درجه در آب معمولی با سطح آزاد، برای فواصل مختلف فرستنده-گیرنده، نشان داده شده است. با توجه به اینکه نمودارها نرمال شده‌اند، شدت رنگ قرمز در نمودارها نشان‌دهنده میزان دامنه قبل از نرمال شدن است.

همان گونه که دیده می‌شود در سیگنال‌هایی که با زاویه افقی به گیرنده در عمق ۴۰ سانتی متری رسیده‌اند، دامنه سیگنال بزرگ‌تر است و تغییرات بیشتری دارد. حال آنکه در مورد فرستنده با زاویه ۲۵ درجه، دامنه عمومی سیگنال کمتر و تغییرات آهسته‌تر و نمودار پهن‌تر است. با در نظر گرفتن عامل اخیر در کنار دو عامل نحوه لایه‌بندی و پوشش سطحی، می‌توان مدلی عمومی با تصحیحات مربوط به زاویه فرستنده-گیرنده و لایه‌بندی آب را در نظر گرفت. در واقع برای این منظور کافی است برای آب همگن و زاویه ۰ درجه



شکل ۲۳. تغییرات شدت سیگنال برحسب فاصله در عمق ۴۰ سانتی متری مخزن با زاویه (آ) صفر درجه و (ب) ۲۵ درجه.



شکل ۲۴. تغییرات شدت سیگنال برحسب فاصله در عمق ۶۰ سانتی متری مخزن با زاویه (آ) صفر درجه و (ب) ۲۵ درجه.

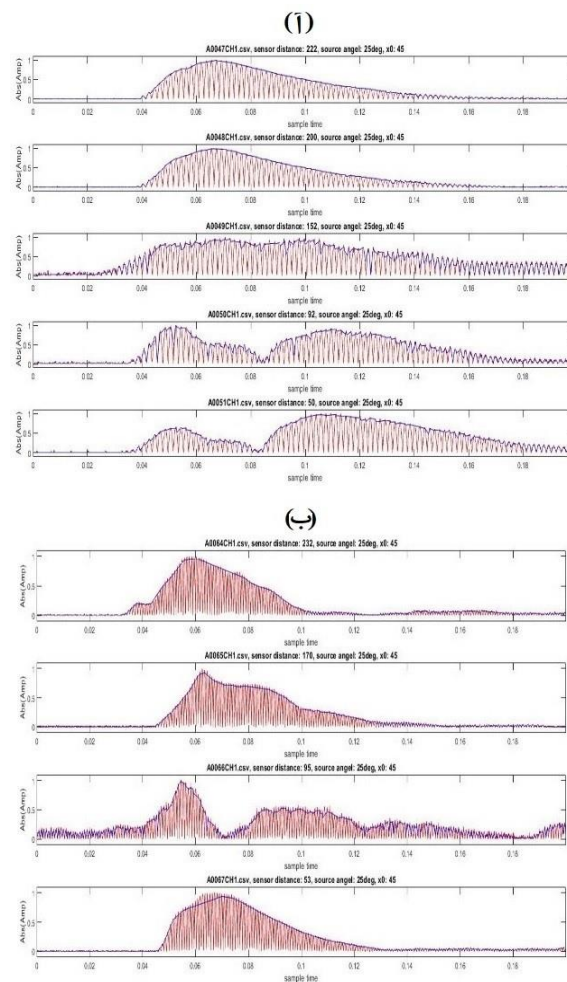
همچنین در شکل ۲۳ الگوی مشابهی مشاهده می‌شود. در این مورد عمق فرستنده و گیرنده یکسان و برابر ۴۰ سانتی متر بوده و همان گونه که در شکل ۲۴ (شکل آ، زاویه صفر درجه) دیده می‌شود، الگوی کاهشی به دو شکل قبل شباهت فراوان دارد. این در حالی است که برای شکل ۲۳ (شکل ب، زاویه ۲۵ درجه) الگوی تغییر شدت با الگوهای تغییر شدت برای

چیزی تشکیل شده است.

برای افزایش دقت، دو مسئله اهمیت دارد. ابتدا وضوح داده برداری آزمایشگاهی برای ساخت سری سیگنال مرجع برای عمقها و فاصلههای مختلف فرستنده و گیرنده که در این مقاله عمق ثابت در نظر گرفته شده است. مسئله دوم آزمایشهای متعدد و استاندارد آزمایشگاهی برای افزایش دقت منحنیهای فاصلههای هم فاز می باشد که از آنها برای تصحیح لایه بندی و زاویه استفاده می شود. هر چه دقت نمودارهای فاصلههای هم فاز بیشتر باشد، قابلیت استفاده از آنها برای تصحیح اثر لایه بندی و زاویه ارسال سیگنال افزایش خواهد یافت.

در این آزمایش با توجه به جدول ۵ و شکل سرعت صوت در این محیط تحت تأثیر شوری است. با بررسی شکل های ۹ و ۱۰ می توان نتیجه گرفت که پرتوهایی که در طول سیال حرکت کرده اند تقریباً به سمت بالا دارند و تراکم پرتوهای بازتابی در مجموع قبل از عمق ۵۰ سانتی متر بیشتر است؛ بنابراین اگر گیرنده در عمق کمتر از ۵۰ متر قرار گیرد می تواند شدت مناسبی از سیگنال های دریافتی را ثبت کند. همچنین در آب لایه بندی شده، لایه ها باعث افزایش اثر بازتاب سطحی و کاهش اثر بازتاب کف می شوند. با بررسی شبیه سازی آب معمولی و لایه بندی شده می توان نتیجه گرفت که در آب لایه بندی شده موج به سمت سطح خمیده شده است و در آب همگن الگوهای شدتی متقارن ایجاد شده و انتشار می یابد. نقاط هم فاز محیط لایه بندی و همگن در فاصله متفاوت از یکدیگر هستند. با بررسی سیگنال صوتی در سناریوهای (الف) تا (ت) می توان نتیجه گرفت که فاصله گیرنده از منبع و زاویه فرستنده تأثیر زیادی در سیگنال دریافتی دارد. در آب همگن زمانی که زاویه فرستنده صفر درجه است، رفتار سیگنال در دو سناریوی (الف) و (ب) به جز زمانی که سطح آزاد و فاصله گیرنده و فرستنده کم است، یکسان است. در آب همگن زمانی که زاویه فرستنده بیشتر می شود، سیگنال صوتی در پوشش سطحی متفاوت رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. زمانی که فرستنده زاویه ۲۵ درجه دارد سیگنال صوتی در آب لایه بندی شده در هر

با پوشش های مختلف، داده های دقیق تر با وضوح بالاتری ثبت شود. با استفاده از این داده ها به عنوان مرجع و با حذف اثرات ناشی از زاویه و لایه بندی در سیگنال ضبط شده در آب لایه بندی شده با پوشش های مختلف و زاویه های مختلف فرستنده، می توان به الگوی مشابهی در لایه سطح دست یافت.



شکل ۲۵. سیگنال دریافتی با فرستنده دارای زاویه (آ) صفر درجه و (ب) ۲۵ درجه.

#### ۴. بحث

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش ها و شبیه سازی ها، می توان نتیجه گرفت که این ایده که بتوان با استفاده از سیگنال صوتی جنس لایه سطحی را مشخص کرد، قابل اجراست. در این زمینه با توجه به اثرات نوع سیال و لایه بندی درونی آن، مشخصات و موقعیت فرستنده سیگنال و موقعیت گیرنده آن، می توان با تطابق الگوهای به دست آمده بر حسب نمودارهای فواصل هم فاز مرجع، مشخص کرد که لایه سطحی از چه

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از دانشگاه مازندران بابت در اختیار قرار دادن آزمایشگاه و تجهیزات آن تشکر نمایند.

## مراجع

- [1] Brown MG. Application of the WKBJ Green's function to acoustic propagation in horizontally stratified oceans. The Journal of the Acoustical Society of America. 1982 Jun;71(6):1427-32.
- [2] Officer CB. Introduction to the theory of sound transmission. Reflectivity. 1958.
- [3] Deschamps GA, Rippin JF, Mast PE. Beam tracing and applications. Department of Electrical Engineering, Engineering Experiment Station, University of Illinois; 1964 Jun 8.
- [4] Munk WH. Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR. The Journal of the Acoustical Society of America. 1974 Feb;55(2):220-6.
- [5] Bucker HP, Porter MB. Gaussian beams and 3-D bottom interacting acoustic systems. In Ocean Seismo-Acoustics 1986 (pp. 87-101). Springer, Boston, MA.
- [6] Ramo S, Whinnery JR, Van Duzer T. Fields and waves in communication electronics. John Wiley & Sons; 1994.
- [7] Lurton X. An introduction to underwater acoustics.
- [8] Karlsson J, Petrich C, Eicken H. Oil entrainment and migration in laboratory-grown saltwater ice. In Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions 2011 (No. POAC11-186).
- [9] Colosi JA. Sound propagation through the stochastic ocean. Cambridge University Press; 2016 Jun 20.
- [10] Zhang Y, Chen H, Xu W, Yang TC, Huang J. Spatiotemporal tracking of ocean current field with distributed acoustic sensor network. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2016 Oct 5;42(3):681-96.
- [11] Real G, Cristol X, Habault D, Sessarego JP, Fattaccioli D. RAFAL: Random Faced Acoustic Lens used to model internal waves effects on underwater acoustic propagation. In UACE2015 3rd Underwater Acoustics Conference & Exhibition 2015 Jun 22.
- [12] Parnum IM, MacLeod R, Duncan AJ, Gavrilo AN. The effect of internal waves on underwater sound propagation. IN: Proceedings of

دو حالت (سطح آزاد و روغن) با دامنه بیشتری نسبت به آب همگن منتشر می‌شود. در آب همگن زمانی که روغن در سطح قرار دارد و زاویه فرستنده ۲۵ درجه است، سیگنال در زمان دیرتری به بیشینه دامنه می‌رسد. در آب لایه‌بندی زمانی که فرستنده در ۲۵ درجه قرار دارد با فاصله گرفتن از منبع سیگنال پهن‌تر می‌شود. زمانی که زاویه فرستنده صفر است در آب همگن با پوشش روغن پهنای سیگنال بیشتر است و همچنین در آب لایه‌بندی پهنای سیگنال بیشتر از آب همگن است.

در نمودارهای پوشش روغن و سطح آزاد در محیط لایه‌بندی، وجود پوش‌های با قله‌های بزرگ و تند بسیار بارز است. با توجه به شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ تأثیر زاویه فرستنده بر سیگنال صوتی بررسی شده است. نتایج نشان داد که در زاویه صفر افت انتقال صوت بیشتر از زاویه ۲۵ درجه است و همچنین افت انتقال زمانی که فرستنده در ۶۰ سانتی‌متری باشد کمتر از عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری است.

## ۵. نتیجه‌گیری

این مقاله تأثیر نوع لایه سطحی را بر انتشار سیگنال‌های آکوستیک در زیر آب بررسی می‌کند. سیگنال‌های آکوستیک برای کاربردهایی مانند نقشه‌برداری از بستر دریا، ارتباطات زیر آب، تشخیص نشت نفت و سایر انواع آلودگی‌ها در دریاها و اقیانوس‌ها و روش‌های تشخیص اشیاء در زیر آب مانند سونار استفاده می‌شود. در این مقاله هم از آزمایش‌های عملی و هم شبیه‌سازی برای مقایسه و تأیید نتایج نهایی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تجمع پرتوها در اعماق بالای ۵۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. استفاده از نظریه پرتو و تأیید نتایج تجربی نشان می‌دهد که مواد لایه سطحی و نحوه حرکت سیگنال صوتی در آب با در نظر گرفتن تفاوت‌های زمانی که ناشی از لایه‌های سطحی و لایه‌بندی متفاوت است و در الگوهای مختلف ظاهر می‌شود، قابل‌شناسایی است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با تنظیم زاویه فرستنده روی ۲۵ درجه، می‌توان به انتشار صدای بهتری دست یافت.

- [23] Červený V. Synthetic body wave seismograms for laterally varying layered structures by the Gaussian beam method. *Geophysical Journal International*. 1983 May 1;73(2):389-426.
- [24] Červený V. Synthetic body wave seismograms for laterally varying layered structures by the Gaussian beam method. *Geophysical Journal International*. 1983 May 1;73(2):389-426.
- [25] Westwood EK, Vidmar PJ. Eigenray finding and time series simulation in a layered-bottom ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1987 Apr;81(4):912-24.
- [26] Sridevi B, Murty TR, Sadharam Y, Rao MM, Maneesha K, Kumar SS, Prasanna PL. Impact of internal waves on sound propagation off Bhimilipatnam, east coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2010 Jun 20;88(2):249-59.
- [27] Kumar PV, Radhakrishnan KG. Transmission Loss Variability Associated with Upwelling and Downwelling Off the Southwest Coast of India. *Defence science journal*. 2010 Sep 1;60(5).
- [28] Guan S, Brookens T, Vignola J. Use of underwater acoustics in marine conservation and policy: Previous advances, current status, and future needs. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021 Feb 9;9(2):173.
- [29] Petrov PS, Ehrhardt M, Tyshchenko AG, Petrov PN. Wide-angle mode parabolic equations for the modelling of horizontal refraction in underwater acoustics and their numerical solution on unbounded domains. *Journal of Sound and Vibration*. 2020 Oct 13;484:115526.
- [30] Tu H, Wang Y, Liu W, Ma X, Xiao W, Lan Q. A Chebyshev spectral method for normal mode and parabolic equation models in underwater acoustics. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020 May 20;2020.
- [31] Kaya YB, Ranjbar M. A Review on Methods and Approaches in Underwater Acoustics. *Computational Research Progress in Applied Science and Engineering*. 2020;6(3):220-7.
- [32] Polichetti M, Baron V, Mars JI, Nicolas B. Multiplane deconvolution in underwater acoustics: Simultaneous estimations of source level and position. *JASA Express Letters*. 2021 Jul 8;1(7):076001.
- [33] Bjørnø L, Neighbors T, Bradley D. *Applied underwater acoustics*. Amsterdam: Elsevier; 2017.
- [34] Thode A. An overview of research in underwater acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016 Apr;139(4):2004-.
- ACOUSTICS 2017. ACOUSTICS; 2017 November 19-22; Perth, Australia
- [13] Murthy PG, Murthy GR. A case study on the influence of internal waves on sound propagation in the sea. *Journal of sound and vibration*. 1986 Aug 8;108(3):447-54.
- [14] Gazioglu C, Müftüoğlu AE, Demir V, Aksu A, Okutan V. Connection between ocean acidification and sound propagation. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2015;2(2):16-26.
- [15] Kim SH, Kim BN, Kim E, Choi BK, Kim DS. Effects of water temperature inversion layer on underwater sound propagation in the East China Sea. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2017 Jun 27;56(7S1):07JG05.
- [16] Kosheleva AV, Lazaryuk AY, Yaroshchuk IO. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. In *Proceedings of Meetings on Acoustics PRUAC2015* 2015 Sep 23 (Vol. 24, No. 1, p. 005001). Acoustical Society of America.
- [17] Bahrami N, Khamis NH, Baharom A, Yahya A. Underwater channel characterization to design wireless sensor network by bellhop. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2016 Mar 1;14(1):110-8.
- [18] Mellberg LE, Johannessen OM. Layered oceanic microstructure—its effect on sound propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1973 Feb;53(2):571-80.
- [19] Makar A. Simplified Method of Determination of the Sound Speed in Water on the Basis of Temperature Measurements and Salinity Prediction for Shallow Water Bathymetry. *Remote Sensing*. 2022 Jan 28;14(3):636.
- [20] Tindle CT, Deane GB. Shallow water sound propagation with surface waves. *The journal of the acoustical society of America*. 2005 May;117(5):2783-94.
- [21] Rubenstein D, Brill MH. Acoustic variability due to internal waves and surface waves in shallow water. In *Ocean Variability & Acoustic Propagation 1991* (pp. 215-228). Springer, Dordrecht.
- [22] Xu J, Lermusiaux PF, Haley Jr PJ, Leslie WG, Logutov OG. Spatial and temporal variations in acoustic propagation during the PLUSNet'07 exercise in Dabob Bay. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 155ASA*; 2008 Jun 29. Acoustical Society of America;2008:4(1).p. 070001.

- Experiments in fluids. 2009 Mar;46(3):453-66.
- [37]Stewart KD, Shakespeare CJ, Dossman Y, Hogg AM. A simple technique for developing and visualising stratified fluid dynamics: the hot double-bucket. Experiments in Fluids. 2021 May;62(5):103.
- [38]Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB, Schmidt H, Tolstoy A. Computational ocean acoustics. New York: Springer; 2011 Jun 10.
- [35]Hassantabar Bozroudi SH, Ciani D, Mohammad Mahdizadeh M, Akbarinasab M, Aguiar AC, Peliz A, Chapron B, Fablet R, Carton X. Effect of Subsurface Mediterranean Water Eddies on Sound Propagation Using ROMS Output and the Bellhop Model. Water. 2021 Dec 16;13(24):3617.
- [36]Economidou M, Hunt GR. Density stratified environments: the double-tank method.

## پی نوشت‌ها

1. Frontal
2. Echo
3. Hybrid Methods
4. Acoustic ToolBox
5. Forcing term
6. Helmholtz equation
7. Directional transducer
8. Oscilloscope
9. Function generator
10. Double-bucket
11. Square
12. Pulse
13. Sine
14. Ramp
15. Burst
16. chirp
17. Noise
18. Bluetooth
19. Meters per second
20. Maximum
21. Minimum