

تعیین فاصله بین فرستنده و گیرنده صوتی در محیط چینه‌بندی شده با روش معکوس آکوستیکی در آزمایشگاه

محمد احمدنژاد^۱، امیر اشتری^۲، محمد اکبری نسب^۳، مجید آقابابایی^۴

ahmadnejad.amin@gmail.com

- ۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا- دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
- ۲- استادیار دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
- ۳- استادیار دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران
- ۴- استادیار دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

چکیده

به منظور تخمین فاصله فرارگیری بین فرستنده تا گیرنده از ارسال صوت (با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز) در داخل یک محیط لایه‌بندی شده (سه لایه با چگالی‌های متفاوت) در شرایط آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش اندازه‌گیری معکوس آکوستیکی در اثر پراکندگی ناشی از عبور صوت در اثر تغییر چگالی در لایه‌های مختلف استفاده شده است. آزمایش‌ها در یک مخزن شیشه‌ای به طول ۳۰۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰۰ سانتی‌متر انجام شده است. زمانی که مخزن آزمایشگاه با استفاده از روش دوسطلی لایه‌بندی شد یک سیگنال آکوستیکی را با در نظر گرفتن شرایط محیط در مخزن ارسال و بازتاب‌های متنوعی را که در نتیجه انعکاس از سطح، بستر، دیواره‌های مخزن و همچنین عبور موج از بین لایه‌های آب بوده است، ضبط و نوفه‌های موجود در داده‌ها را با استفاده از فیلتر باتروث حذف می‌کنیم. صوت عبوری از هر لایه را به دلیل وجود تغییرات سرعت صوت ناشی از وجود اختلاف چگالی بین لایه‌ها با یک تأخیر زمانی در گیرنده دریافت می‌شود. با مقایسه این اختلاف‌زمانی به وجود آمده ناشی از تغییرات سرعت صوت هنگام عبور از یک محیط لایه‌بندی شده و یک محیط همگن (مخزن پر از آب شیرین) و تغییرات پیک تا پیک سیگنال‌ها، زمان دریافت و توان سیگنال در لحظات عبور صوت به کمک تکنیک‌های پالس فشرده، فاصله بین سنسورها محاسبه شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که می‌توان با این روش فاصله بین گیرنده و فرستنده را با اختلاف ناچیزی که می‌تواند ناشی از تأثیر لایه اختلاط باشد، اندازه‌گیری نمود.

واژگان کلیدی: پراکندگی ، پالس فشرده، روش معکوس آکوستیکی، لایه‌بندی آب، امواج آکوستیکی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۱۲/۲۵

۱- مقدمه

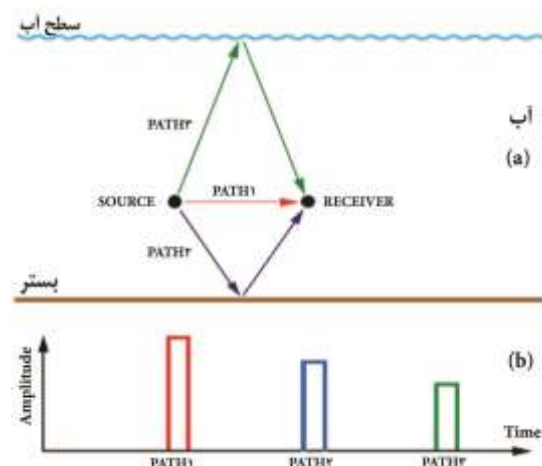
برای جاهایی که استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری متداول پروفایل اقیانوس‌شناسی ممکن نباشد، تکنیک‌های پراکندگی آکوستیک این امکان را می‌دهد که بتوان ساختار اقیانوسی را با دقت و سرعت بالا مشخص کرد. تکنیک پراکندگی صوتی با وضوح بالا، حتی بدون شناخت دقیق از فیزیک پراکندگی، تصاویر سینوپتیک فرآیندهای فیزیکی درون اقیانوس را ارائه کرده‌اند مثل امواج داخلی، جهش‌های هیدرولیک و ترموهالین.

با توسعه و درک عمیق‌تر از فرآیندهای اساسی پراکندگی، توانمندی بدست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد ساختارهای اقیانوسی و ریزساختار افزایش می‌یابد هرچند لازم است اثرات مخدوش‌کننده با توجه به عوامل دیگر پراکندگی، مانند زئوپلانکتون در نظر گرفته شود. این در حالی است که در فرکانس‌های بالا، اتلاف انرژی ناشی از انتشار صوت در محیط بسیار زیاد است.

۲- بررسی رفتار موج آکوستیکی درون مخزن

۱-۲- تأثیر انعکاس^۱

انعکاس صوت در سطح مخزن باعث می‌شوند، که سیگنال‌های اضافی با طول پالس‌های متفاوت در گیرنده مشاهده گردد. همان‌طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود اولین و قوی‌ترین سیگنال مربوط به سیگنال مستقیمی است که پس از برخورد به دیواره به گیرنده می‌رسد [۱].



شکل (۱) نحوه انتشار صوت در یک محیط کم‌عمق - به همراه سیگنال دریافتی در گیرنده.

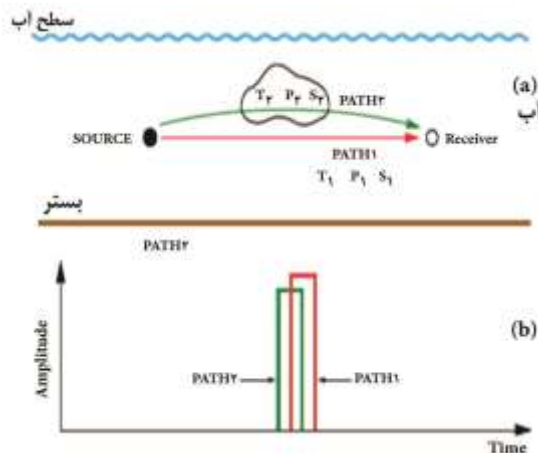
۲-۲- شکست^۲

هنگامی که سیگنال‌ها در یک مخزن که سرعت صوت تغییر نکنند حرکت کند سیگنال در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند ولی هنگامی که محیط تغییر نماید مسیر انتشار در یک مسیر منحنی شکل حرکت می‌کند بنابراین پالس‌های متفاوتی در سیگنال مشاهده خواهید نمود [۱].

۲-۳- پراکندگی^۳

در این آزمایش پراکندگی در اثر برخورد امواج صوتی به مرزها لایه‌ها، سطح آب، دیواره‌ها و کف مخزن به وجود آمده و باعث ایجاد پیچیدگی‌های بیشتری در سیگنال‌های دریافتی خواهد شد. همان‌طوری که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در این شرایط، پراکندگی یا مسیرهای چندگانه با اختلاف کوچک در زمان و دامنه در گیرنده دریافت خواهد شد [۱].

تحت تأثیر پارامترهای بیان‌شده و با استفاده از فرمول‌هایی که بیان خواهد شد، یک سیگنال در آب تمیز مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. اولین سیگنالی دریافتی در صفحه اسیلوسکوپ مربوط به سیگنال مستقیم بوده و سیگنال‌های بعدی که در صفحه اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود ناشی از پراکندگی‌های بستر، سطح، دیواره‌ها و... می‌باشد (مطابق شکل (۳)) [۱]. در شبیه‌سازی کانال صوتی، تعداد پرتوها منتشرشده از منبع متغیر بوده و مضربی از چهار است.



شکل (۲) نحوه انتشار صوت در یک محیط کم‌عمق و نیز سیگنال دریافتی در گیرنده.

³ Scattering

¹ Reflection

² Refraction

$$L_{m1} = \sqrt{r^2 + (2Dm - z_s + z)^2}$$

$$L_{m2} = \sqrt{r^2 + (2Dm + z_s + z)^2}$$

$$L_{m3} = \sqrt{r^2 + (2D(m+1) - z_s - z)^2}$$

$$L_{m4} = \sqrt{r^2 + (2D(m+1) + z_s - z)^2}$$

که در آن D عمق کل کانال است [۱].

۳- زوایای افقی

زاویه‌ای که هر پرتو با مرزهای جانبی به صورت افقی می‌سازد به عنوان زاویه افقی تعریف می‌شود. این زاویه بسیار مهم است، زیرا در ضرایب بازتاب سطح و بستر تأثیر دارد. با رابطه ساده ریاضی، زاویه افقی برای هر چهار مسیر را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱].

$$\begin{aligned} \Phi_{m1} &= \tan^{-1} \left(\frac{(2Dm) - z_s + z}{r} \right) \\ \Phi_{m2} &= \tan^{-1} \left(\frac{(2Dm) + z_s + z}{r} \right) \\ \Phi_{m3} &= \tan^{-1} \left(\frac{2D(m+1) - z_s - z}{r} \right) \\ \Phi_{m4} &= \tan^{-1} \left(\frac{2D(m+1) + z_s - z}{r} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $\Phi_{M1}, \Phi_{M2}, \Phi_{M3}$ و Φ_{M4} زوایای افقی هر شعاع ویژه هستند.

۴- فواصل زمانی

گام زمانی هر پرتو، مدت زمانی است که آن پرتو به گیرنده می‌رسد. گام زمانی هر پرتو با استفاده از طول و سرعت هر پرتو به راحتی محاسبه می‌شود. از روابط قبلی ما می‌توانیم طول هر پرتو را محاسبه نموده و با استفاده از تغییرات سرعت صوت (با استفاده از پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده) می‌توان به صورت زیر این زمان‌ها را محاسبه نمود [۱].

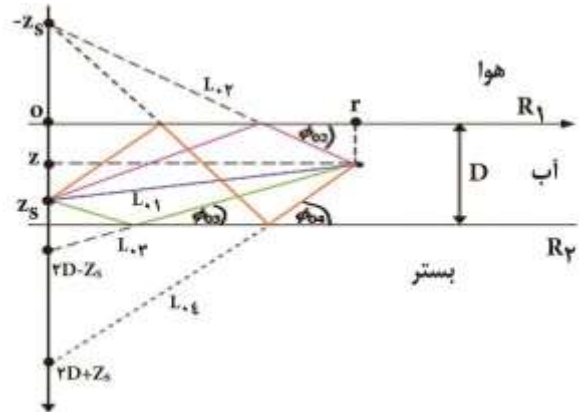
$$\begin{aligned} T_{M1} &= L_{M4}/C & T_{M2} &= L_{M4}/C \\ T_{M3} &= L_{M3}/C & T_{M4} &= L_{M4}/C \end{aligned} \quad (3)$$

۵- اتلاف انتقال برای هر پرتو

در این آزمایش، اتلاف ناشی از انتقال با استفاده از روش همپوشانی سیگنال در محیط همگن و لایه‌بندی شده، حذف می‌گردد [۱].

۶- انتشار در لایه‌ها

یک اقیانوس لایه‌بندی شده به صورت افقی را در نظر بگیرید



شکل (۳) شبیه‌سازی کانال صوتی در آب همگن با استفاده از نظریه پرتو.

شکل (۳) مسیر انتشار چهار شعاع ویژه را نشان می‌دهد. در این شکل فرستنده در عمق $(0, z_s)$ قرار دارد چهار مورد از مسیر پرتوهای استخراج شده از این فرستنده ترسیم شده است و گیرنده در عمق (r, z) نصب شده است.

به کمک روش تصویر، برای کانالی به عمق D (سطح آب $z=0$ و کف آب $Z=D$)، اولین تصویر فرستنده در مختصات $(0, z_s)$ تشکیل می‌شود. در روش تصویر، سطح و کف به صورت آینه کامل در نظر گرفته می‌شوند بنابراین دومین و سومین تصویر در مختصات $(0, 2D+z_s)$ و $(0, 2D-z_s)$ تشکیل می‌شوند. در حالت کلی تعداد منابع مجازی بی‌نهایت بوده و در هر تکرار پس از انعکاس‌های متوالی چهار تصویر جدید ایجاد می‌شود.

اولین پرتو در مسیر مستقیم L_{01} به گیرنده می‌رسد. پرتو بعدی در این شکل ابتدا به سطح برخورد کرده و سپس به گیرنده می‌رسد L_{02} پرتو سومی ابتدا به بستر سپس به گیرنده می‌رسد L_{03} و پرتو چهارمی ابتدا به سطح سپس به بستر و در انتها در گیرنده دریافت خواهد شد. طول هر کدام از این مسیرها به صورت ذیل محاسبه می‌شود [۱].

$$\begin{aligned} L_{01} &= \sqrt{r^2 + (z_s - z)^2} \\ L_{02} &= \sqrt{r^2 + (z_s + z)^2} \\ L_{03} &= \sqrt{r^2 + (2D - z_s - z)^2} \\ L_{04} &= \sqrt{r^2 + (2D + z_s - z)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

با توجه به روابط هندسی مثلثاتی بین تصاویر مجازی و فرستنده در مرحله m ، طول بردارهای جابجایی مسیرهای انتشار از رابطه زیر بدست می‌آید:

¹ Direct Path

۷-۱- مرحله اول

قبل از انجام شبیه‌سازی فیزیکی، اندازه‌گیری صوتی در آب همگن انجام می‌گیرد. به همین منظور ابتدا مخزن از آب شیرین پر و پارامترهای فیزیکی آب (دما و شوری)، اندازه‌گیری گردید.

این مرحله صرفاً به منظور تعیین نوفه‌های درون مخزن آزمایشگاهی (از قبیل بازتاب‌های متنوعی که ممکن است در نتیجه انعکاس از سطح، بستر، دیواره‌ها) و همچنین تعیین نوفه‌های محیطی خارج از مخزن آزمایشگاه (که ممکن است به درون مخزن نفوذ نماید) صورت می‌پذیرد.

۷-۲- مرحله دوم

به منظور تنظیم شوری آب در لایه‌ها، از دو منبع ۱۰۰۰ لیتری که درون یکی از آن‌ها آب شیرین و دیگری آب شور قرار دارد، استفاده می‌شود. دو منبع با استفاده از یک شلنگ به یکدیگر متصل‌اند. منبع آب شور (شماره ۱) با استفاده از یک شلنگ که انتهای آن درون مخزن شیشه‌ای و روی اسفنجی قرار دارد آب را به درون ظرف هدایت می‌کند (شکل (۵)). به مرور زمان آب منبع دوم نیز (به منظور لایه‌بندی) به این ظرف هدایت می‌شود و با استفاده از یک همزن الکتریکی به خوبی مخلوط می‌شود.



شکل (۴) مخزن آب شیرین - ارتفاع آب ۸۰cm.

جدول (۱) مشخصات پارامترهای محیط و سیگنال ارسالی.

پارامترهای محیط آب شیرین		
واحد	اندازه	نوع
میکروزیمنس	۹۱۴	هدایت الکتریکی
درجه سانتی‌گراد	۱۵,۶°C	دما

جدول (۲) مشخصات سیگنال ارسالی در محیط آب شیرین.

Frkns	۵۰	kHz
ارتفاع موج	۲۰	V (ولت)
Ncycle	۵۰	cycle
Rate	۱۰	HZ

که سرعت صوت فقط به عمق بستگی داشته $[c=c(z)]$ و سطح و کف اقیانوس، صفحاتی افقی هستند. حتی با چنین مفروضات ساده‌سازی، فقط می‌توان پاسخ دقیق معادله:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (۴)$$

را در موارد استثنایی پیدا کرد. بنابراین، تقریب آکوستیک پرتویی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

شرط لازم (و نه کافی) برای به کار بردن این تقریب، این است که ضرب گرادیان نسبی سرعت صوت و طول موج باید کوچک باشد:

$$\frac{\lambda}{c} \left| \frac{dc}{dz} \right| \ll 1 \quad (۵)$$

به علاوه، نقطه مرجع نباید در ناحیه سایه یا نزدیک مرزهای آن باشد. در تقریب نظریه پرتو، می‌توان فاز موج صوتی یا زمان طی مسیر پالس صوتی در راستای یک پرتو مشخص را تعریف کرد.

اکنون نشان می‌دهیم که در یک محیط لایه‌بندی شده افقی، در هر z ، پرتویی باید رابطه زیر (قانون اسنل) را ارضا کند،

$$\frac{\cos \chi(z)}{c(z)} = \text{const} \quad (۶)$$

که $X(Z)$ زاویه ورودی است که یک پرتو با صفحه $z=\text{const}$ می‌سازد. به این منظور تصور می‌کنیم که محیط توسط صفحات افقی به یک مجموعه از لایه‌های همگن نازک بسیار زیاد تقسیم شود و فرض می‌کنیم، پرتو در مرزهای این لایه‌ها بازتاب نمی‌کند و فقط می‌شکند. لایه‌ها را با ۱، ۲،، n مشخص می‌کنیم. طبق قانون شکست، در مرز لایه‌های n و $n+1$ با سرعت‌های c_n و c_{n+1} داریم [۱]:

$$\frac{\cos \chi_{n+1}}{c_{n+1}} = \frac{\cos \chi_n}{c_n} \quad (۷)$$

به‌طور مشابه در مرز لایه‌های n و $n+1$:

$$\frac{\cos \chi_n}{c_n} = \frac{\cos \chi_{n-1}}{c_{n-1}} \quad (۸)$$

۷- تئوری آزمایش

به منظور تخمین فاصله قرارگیری بین فرستنده و گیرنده از ارسال صوت (با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز) در داخل یک محیط لایه‌بندی شده (سه لایه با چگالی‌های متفاوت) و تحلیل پراکندگی ناشی از عبور صوت در لایه‌های مختلف با استفاده از اندازه‌گیری معکوس آکوستیکی استفاده گردیده است. برنامه‌ریزی انجام آزمایش در دو مرحله در نظر گرفته شد:

۸- محاسبه سرعت صوت

تغییرات سرعت صوت، تنها عاملی است، که باعث تغییرات سیگنال‌های آکوستیکی دریافتی می‌شود. در این تحقیق برای محاسبه سرعت صوت از فرمول زیر استفاده گردید.

$$C = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^{-3} + 1.340(S - 35) + 1.63 \times 10^{-2} D + 1.675 \times 10^{-7} D^2 - 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} D^3$$

برای اندازه‌گیری پارامترهای شوری و دما از ابزار کالیبره شده و دقیق استفاده گردید (شکل (۸)) [۱۱]. شکل‌های (۹) و (۱۰) روند تغییرات سرعت صوت برحسب عمق آب را در مخزن آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطوریکه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود، نیم‌رخ تغییرات شوری و سرعت صوت در مخزن شیشه‌ای با یکدیگر متناسب بوده و ضریب همبستگی بین این همانندی (شوری و سرعت صوت) ۰/۹۹ می‌باشد. با توجه به اینکه تانک با آب‌شور چینه‌بندی شده است تغییرات سرعت صوت در این تانک توسط شوری کنترل می‌شود.



شکل (۸) دستگاه اندازه‌گیری شوری و درجه حرارت.



شکل (۹) تغییرات شوری در زمان‌های مختلف به هنگام آماده‌سازی به روش "دو سطلی".

به این طریق چینه‌بندی خطی در ظرف آزمایشگاهی با مشخصات مندرج در جدول (۳) و با درجه حرارت ثابت 15.6°C ایجاد می‌شود (شکل (۶)) [۴]. مراحل فوق را برای ایجاد لایه دوم به رنگ زرد و لایه سوم به رنگ آبی تکرار می‌نماییم. در نهایت از روند تغییرات شوری این نتیجه حاصل شد که این محیط چینه‌بندی شده است و نیم‌رخ شوری حالت "دو سطلی" را پیدا کرده است که در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.



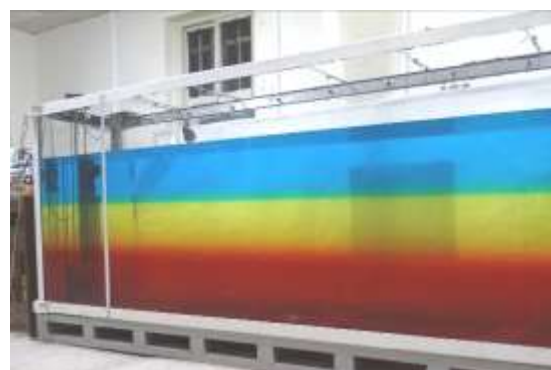
شکل (۵) دو مخزن ۱۰۰۰ لیتری.



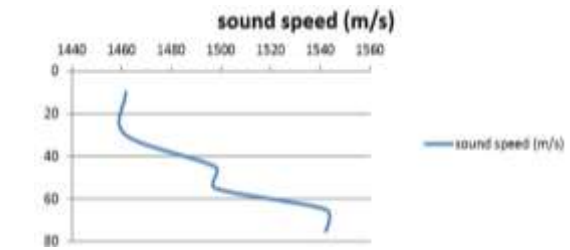
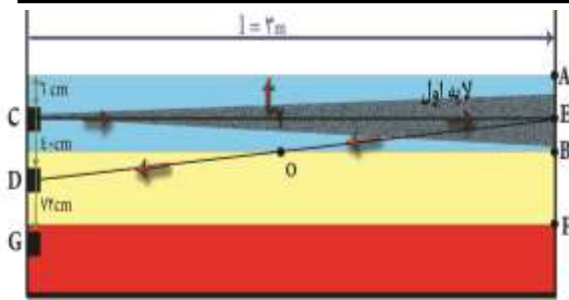
شکل (۶) مخزن در حال لایه‌بندی به روش "دو سطلی".

جدول (۳) مشخصات پارامترهای فیزیکی محیط لایه‌بندی

لایه آب	رنگ	شوری	واحد
لایه اول	آبی	۵۳۲	میکرو زیمنس
لایه دوم	زرد	۳۴,۴	میلی زیمنس
لایه سوم	قرمز	۷۴,۴	میلی زیمنس



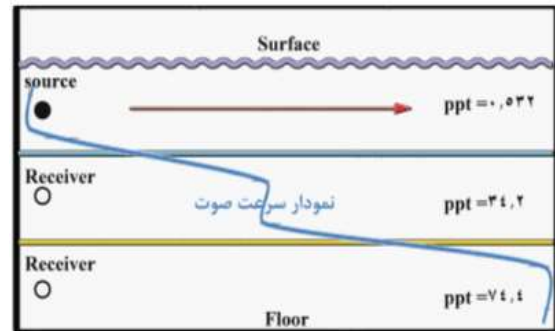
شکل (۷) مخزن لایه‌بندی شده به روش "دو سطلی".



شکل (۱۰) روند تغییرات سرعت صوت در زمان‌های مختلف به هنگام پر کردن تانک.



شکل (۱۳) نمای شماتیکی از چیدمانی تجهیزات آزمایشگاهی.



شکل (۱۱) نحوه انتشار صوت با تغییر شوری.

۱۰- مشخصات سیگنال تولیدشده

در این آزمایش، برای تولید سیگنال از یک تولیدکننده مدل FUNCTION MEGATEK 20MHz DG1022 استفاده شده که قابلیت تولید سیگنال‌هایی تا ۲۰ مگاهرتز به صورت شکل‌های مربعی، دنده‌ای، سینوسی و پله‌ای، بسته موج^۲ و چندین سیگنال در باندهای فرکانسی مختلف^۳ را دارد (شکل (۱۴)).

۱۱- مشخصات کارت داده‌برداری

در این آزمایش از اسیلوسکوپ دیجیتال دو کاناله Oscilloscope GW-INSTEK 1052 U با آهنگ داده‌برداری 80Msps استفاده شده است.



شکل (۱۴) دستگاه سیگنال ژنراتور

۹- چیدمان دستگاه‌های آکوستیکی

چون این آزمایش در یک محیط کوچک انجام می‌شود، بنابراین بایستی از ترانسدیوسرهای جهتی استفاده شود همچنین با توجه به اینکه محیط لایه‌بندی شده مقیاسی از مرتبه سانتی‌متر دارند سیگنال صوتی بایستی در فرکانس‌های بالا داده‌برداری شوند که بتوان تأثیر این لایه‌ها را بر روی انتشار صوت مورد مطالعه قرار داد. در این آزمایش از حسگرهای آکوستیکی ساخت شرکت B&K^۱ با فرکانس مرکزی ۵۰ kHz استفاده شد. این حسگرها نسبت به زاویه انتشار بسیار حساس بوده بنابراین روی یک پایه فلزی و به‌طور ثابت قرار داده شدند (شکل (۱۲)).



شکل (۱۲) حسگرهای آکوستیکی ساخت شرکت B&K با فرکانس مرکزی ۵۰ کیلوهرتز.

^۳ chirp

^۱ Bruel & Kjaer

^۲ Burst

جدول (۴) راستاوری ترانسدیوسر در فرکانس.

۵۰	فرکانس کار (kHz)
۳	طول موج (سانتی متر)
۴	میدان دور D^2/λ
۱۸,۹۷	شعاع فرنل (سانتی متر)
۱۳	پهنای زاویه در -3db
۱۹۰	پهنای پالس u

با استفاده از معادله (۱۰) در محیط برنامه نویسی Matlab، راستاوری در این فرکانس محاسبه شد. در این فرکانس، راستاوری این ترانسدیوسر ۶,۶ درجه می باشد. (در زاویه $+3,3$ و $-3,3$ نسبت به محور آکوستیکی شدت 3db کاهش یافته است) با استفاده از این زاویه می توان مشخص نمود که در این زاویه چه ضخامتی از عمق آب را مورد تأثیر قرار خواهد داد.

۱۳- انجام آزمایش

قبل از انجام آزمایش، رعایت موارد زیر ضروری است:

۱- فاصله بین گیرنده و فرستنده (r) باید در رابطه زیر صدق کند:

$$t_{\min} \ll (r/c_{\max}) \quad (12)$$

طول پالس باید حداقل ۱۰ برابر طول موج باشد.

۲- سیگنال ورودی باید به حالت پایا رسیده و نتیجه آن به عنوان سیگنال نهایی در گیرنده و از طریق طیف نگار نمایش داده شود.

۳- ابعاد پدیده فیزیکی باید حداقل دو برابر طول موج ارسالی باشد.

۴- برای جلوگیری از تداخل سیگنال ارسالی باید فواصل بین سیگنالی ارسالی بسته موج به حد کافی زیاد باشد.

۵- باید به این نکته توجه نمود که پهنای سیگنال منتشره به اندازه انتخاب شود تا تأثیر بدنه مخزن آب در سیگنال دریافتی به طور مستقیم صفر شود از طرفی تواتر ارسال سیگنال به گونه ای باشد که اکوهای سیکل قبلی در سیکل بعدی اثر نگذارد [۱].

پس از رعایت موارد فوق، یک سیگنال آکوستیکی (با مشخصات مندرج در جدول (۴)) در آب همگن و شرایطی که فرستنده در عمق 6 cm و گیرنده در عمق 40cm قرار دارد ارسال و داده های آن دریافت و ثبت گردید. در گام بعد، یک

یک کانال به عنوان ورودی سیگنال از تولیدکننده و دیگری دریافت خروجی سیگنال از گیرنده است. برای حذف نویزهای الکترونیکی تمام تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش به زمین متصل شده اند (شکل (۱۵)).

۱۲- محاسبه راستاوری حسگرهای آکوستیکی

ابعاد ترانسدیوسر و فرکانس کار آن، دارای نسبت معکوس به پهنای پرتو است، به طوری که هر چه ابعاد ترانسدیوسر کوچک تر باشد، پهنای پرتو بیشتر است و این پهنای با افزایش ابعاد ترانسدیوسر کاهش می یابد. هر چه فرکانس کار ترانسدیوسر نیز پایین تر باشد، پهنای پرتو ترانسدیوسر بیشتر است و با افزایش فرکانس، این پهنای کاهش می یابد. محدود کردن پهنای پرتو، ارسال و دریافت امواج صوتی ترانسدیوسر، قرار دادن پرتو صوتی در یک زاویه خاص نسبت به محور صوتی، آرایه بدون حرکت مکانیکی آن و چرخش پرتوهای صوتی تحت زوایای مختلف در یک محدوده زمانی معین بدون چرخش مکانیکی آرایه و هرگونه ایجاد تغییر در الگوی راستاوری و پهنای پرتو ترانسدیوسر تحت عنوان شکل دهی پرتو^۱ مطرح می باشد. با توجه به طراحی های مختلف ترانسدیوسرهای پیزو الکتریک و متفاوت بودن راستاوری آن ها فرمول های مختلفی ارائه شده است. راستاوری این نوع ترانسدیوسر در جهت افقی و عمودی به دلیل متقارن بودن سطح ارسال امواج یکسان بوده و عبارت است از:

$$B(\theta) = \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \quad (10)$$

که در آن J_1 تابع بسل نوع اول، a شعاع مؤثر پراکندگی و k عدد موج مربوط به فرکانس کار ترانسدیوسر بوده و برابر است با:

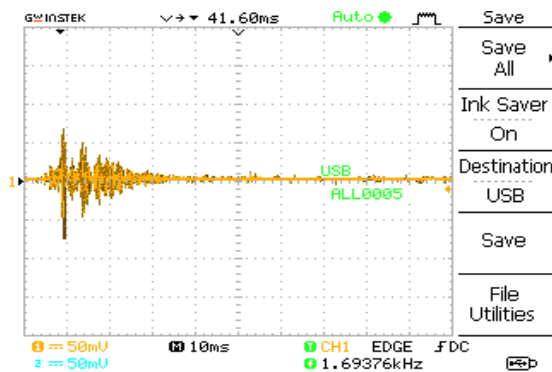
$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (11)$$



شکل (۱۵) دستگاه اسیلوسکوپ.

¹ Beam Forming

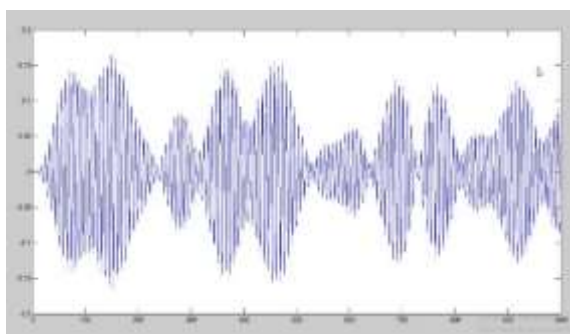
که $V_{CAL}^R(t)$ سیگنال دریافت شده در آب همگن، $V^R(t)$ سیگنال برگشتی حاصل از محیط لایه‌بندی شده است.



شکل (۱۶) سیگنال دریافت شده در محیط لایه‌بندی شده در موقعیت فرستنده در 6cm و گیرنده در عمق 40cm و 72cm از سطح.

جدول (۴) مشخصات سیگنال منتشر شده در مخزن.

فرکانس	۵۰	کیلوهرتز
پیک تا پیک ولتاژ ورودی	۲۰	ولت
تعداد سایکل	۱۰	عدد
تأخیر پالس	۱۰۰	میلی ثانیه
نوع پالس	بسته موج	Burst
شکل سیگنال ارسالی	سینوسی	



شکل (۱۸) سیگنال دریافت شده در محیط لایه‌بندی شده در موقعیت فرستنده در 6cm و گیرنده در عمق 40cm از سطح.

سیگنال آکوستیکی با شرایط مشابه آب همگن، در محیط لایه‌بندی شده به‌گونه‌ای که فرستنده در لایه اول (در عمق 6 cm) و گیرنده در لایه دوم (در عمق 40cm) قرار دارد، ارسال و دریافت می‌گردد.

پس از ثبت سیگنال‌ها در دو محیط فوق، اولین سیگنالی که در گیرنده دریافت می‌شود (همچنان که در بخش ۲ توضیح داده شد) مربوط به سیگنالی است که به‌صورت مستقیم منتشر و پس از برخورد به دیواره مقابل و بازگشت آن، در گیرنده دریافت و در اسیلوسکوپ نمایش داده‌های آن ثبت شده است. سیگنال‌های بعدی که در صفحه اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود به خاطر پراکندگی‌هایی است که از بستر، سطح، دیواره‌ها و... بوده است.

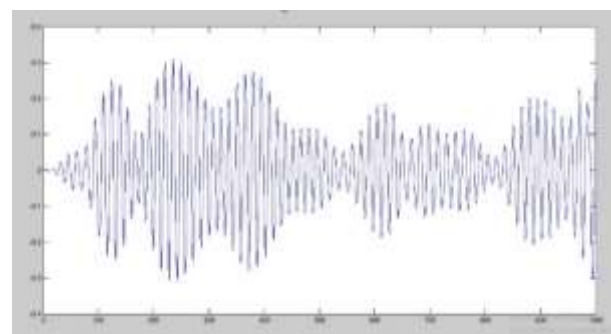
۱۴- آنالیز داده‌های دریافت شده

به‌منظور آنالیز داده‌ها، از فن پردازش سیگنال به روش compress puls (cp) برای بررسی میزان شدت پراکندگی صوت استفاده می‌شود [۲].

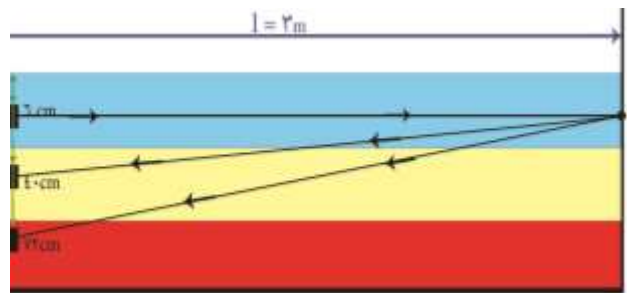
۱۵- همپوشانی سیگنال دریافتی

در این روش همپوشانی سیگنال دریافتی از پراکندگی لایه‌ها با سیگنال دریافتی محاسبه می‌شود.

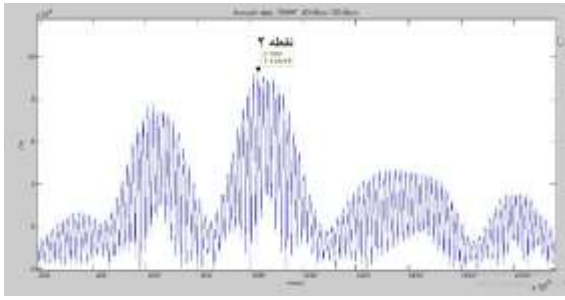
$$CP(t) = k_{CP}^{-1} v^R(t) * v_{cal}^R(t), \quad (13)$$



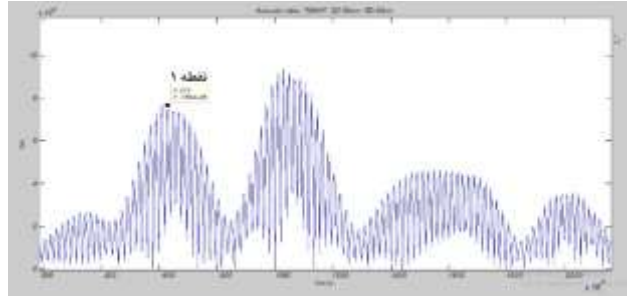
شکل (۱۷) سیگنال دریافت شده در آب شیرین همگن.



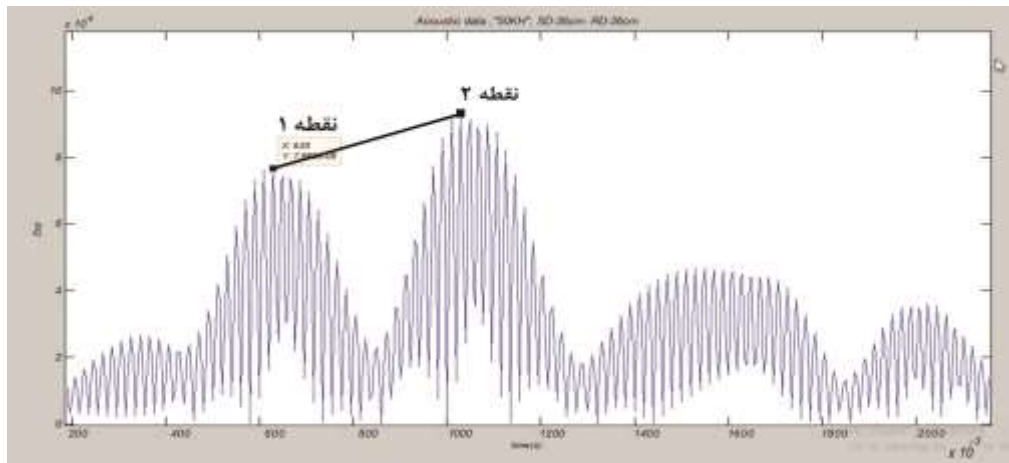
شکل (۱۹) منبع در عمق ۶ سانتی‌متری و گیرنده در ۴۰ سانتی‌متری از سطح آب.



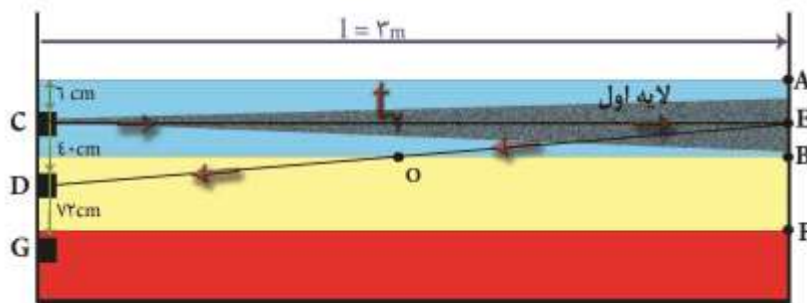
شکل (۲۱) همپوشانی سیگنال در محیط همگن و لایه‌بندی شده در نقطه ۲ و فرستنده در عمق 6cm و گیرنده در عمق 40 cm.



شکل (۲۰) همپوشانی سیگنال در محیط همگن و لایه‌بندی شده در نقطه ۱ و فرستنده در عمق 6cm و گیرنده در عمق 40 cm.



شکل (۲۲) اختلاف زمانی ناشی از همپوشانی سیگنال در محیط همگن و لایه‌بندی شده (اختلاف نقاط ۱ و ۲).



شکل (۲۳) انتخاب فرستنده و فرکانس مناسب به منظور انتشار در حد فاصل مرز لایه.

فرستنده اول و دوم تا مرز لایه اول و دوم را به ترتیب با h و h_1 نمایش داده‌ایم. با فرض اینکه داشته باشیم:

C_0 سرعت صوت در لایه اول (آب شیرین)

C_1 سرعت صوت در لایه دوم (آب غلیظ ۱)

C_2 سرعت صوت در لایه سوم (آب غلیظ ۲)

t_1 زمان رفت و برگشت صوت در لایه آب شیرین

t_2 زمان رفت در آب شیرین و برگشت تا گیرنده اول

t_{21} زمان برگشت صوت از مسیر L_1

t_{22} زمان برگشت صوت از مسیر L_2

K_{CP} همپوشانی سیگنال آب همگن با استفاده از معادله همپوشانی زیر بوده که به کمک نرم‌افزار متلب محاسبه می‌گردد. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب سیگنال دریافت شده در آب همگن و لایه‌بندی شده را نشان می‌دهد [۲].

$$V_{CAL}^R(t) \otimes V^R(t) = \int V^R(t) \times V_{CAL}^R(t-\tau) dt \quad (14)$$

۱۶- محاسبه فاصله بین دو فرستنده

به‌منظور محاسبه، همان‌گونه که در شکل (۲۳) مشخص گردیده است فاصله بین فرستنده اول و دوم را با H و فاصله

مقدار A را در معادله (۱۸) جاگذاری می‌نماییم و خواهیم داشت:

$$\frac{X_1}{C_1} = \frac{X_2}{C_0} = A \cos \theta \quad (30)$$

$$\frac{X_1}{C_1} = \frac{X_2}{C_1} = \frac{3}{C_1} \quad (31)$$

$$\frac{X_1}{C_0} = \frac{X_2}{C_0} = \frac{3}{C_0} \quad (32)$$

از تلفیق رابطه های (۱۷)، (۳۰)، (۳۱) و (۳۲) مقادیر X_1 و X_2 محاسبه شده و در نتیجه فاصله بین سنسورها از رابطه زیر برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} h &= x_1 \operatorname{tg} \theta \\ h &= x_2 \operatorname{tg} \theta \end{aligned} \quad (33)$$

در شکل‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) فاصله بین دو قله سیگنال مشابه در نقاط ۱ و ۲ اتفاق افتاده است که تفاوت ۲ میلی ثانیه را نشان می‌دهد. چنانچه در رابطه (۲۲) بجای Δt مقدار ۲ میلی ثانیه قرار دهیم و از رابطه (۲) مقادیر سرعت را برای شوری‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۲ سرعت صوت در لایه‌های اول و دوم را جایگذاری نماییم مقدار $X_2 = 2/6 \text{ m}$ به دست می‌آید. با استفاده از شبیه‌سازی صورت پذیرفته در محیط مطلب، زمان تأخیر سیگنال‌های دریافتی در لایه آب شیرین و لایه‌های بعدی را محاسبه و سپس توانستیم فواصل موردنظر این تحقیق به دست آوریم همچنین دقت محاسبات را می‌توان با افزایش دقت در اندازه‌گیری‌های همپوشانی بهبود داد.

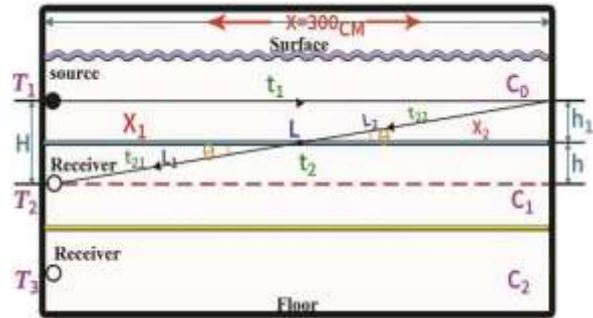
۱۷- نتایج

پس از انجام آزمایش، نتایج زیر بدست آمد:

۱- با بکارگیری از روش معکوس آکوستیکی، ضخامت لایه‌ها بدست آمد. این روش، با استفاده از الگوریتم‌های پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای و ترکیب آن با مدل‌سازی‌های انتشار موج می‌تواند در عملیات موقعیت‌یابی و یا تخمین مشخصات محیطی بکار رود.

۲- پس از انتشار اولین سیگنال در محیط، اکثر سیگنال‌های دریافتی که ناشی از بازتاب‌های محیطی هست، ساختار طیفی منظمی را نشان نمی‌دهد. این سیگنال‌ها می‌تواند حاصل بازتاب‌های متنوعی باشد که در نتیجه انعکاس از سطح، بستر، دیواره‌ها و همچنین عبور موج از بین لایه‌های آب ایجاد شده باشد.

۳- به سطح آب، کف مخزن و... باشد در گیرنده دریافت می‌شود. با این حال، شمار قابل توجهی از همین انعکاس‌ها که



شکل (۲۳) محاسبه انتشار صوت از منبع در لایه اول تا گیرنده‌ها در لایه دوم و سوم.

همچنین می‌توان نوشت:

t_2 : زمان لازم برای ارسال سیگنال از نقطه C به E و برگشت آن به نقطه D می‌باشد.

فاصله بین فرستنده و گیرنده به روش زیر محاسبه گردید:

$$l_1 = t_{21} \times c_1 \quad (15)$$

$$l_2 = t_{22} \times c_0 \quad (16)$$

$$t_{21} + t_{22} = t_2 - t_1/2 \quad (17)$$

$$x_1 + x_2 = 3 \text{ m} \quad (18)$$

$$\frac{x_1}{L_1} = \frac{x_2}{L_2} = \cos \theta \quad (19)$$

$$\frac{L_1}{C_1} = \frac{L_2}{C_0} = t_2 - \frac{t_1}{2} \quad (19)$$

با جایگذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۶) داریم:

$$\frac{X_1}{C_1 \cos \theta} = \frac{X_2}{C_0 \cos \theta} = t_2 - \frac{t_1}{2} \quad (20)$$

با جایگذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۲۰) داریم:

$$\frac{X_1}{C_1} = \frac{X_2}{C_0} = \left(t_2 - \frac{t_1}{2} \right) \cos \theta \quad (21)$$

همچنین از جایگذاری معادله (۱۸) در معادله (۱۷) داریم:

$$X_1 + X_2 = L_1 \cos \theta + L_2 \cos \theta = (L_1 + L_2) \cos \theta = 3 \quad (22)$$

$$h_1 = L_1 \sin \theta \quad (23)$$

$$\sin \theta = h_1 / L_1 \quad (24)$$

$$h = L_2 \sin \theta \quad (25)$$

$$\sin \theta = h / L_2 \quad (26)$$

$$h_1 + h = (L_1 + L_2) \sin \theta \quad (27)$$

$$(L_1 + L_2)^2 = H_2 + X_2 \quad (28)$$

$$H + h_1 = l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \quad (29)$$

$$= (l_1 + l_2) \sin \theta = 0.14$$

اندازه زاویه θ از روابط فوق به دست آمده و برابر است با:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{0.14}{3} \rightarrow \theta = 0.466_{\text{rad}} \quad (28)$$

$$A = t_2 - \frac{t_1}{2} \quad (29)$$

۸- ضخامت لایه‌ها در طول مدت آزمایش و ثبت داده‌ها یکنواخت بود و این یکنواختی تا ۵ روز پس از انجام آزمایش نیز ادامه یافت و بعد از آن لایه‌های با یکدیگر در مدت تقریباً ۲۵ روز ادغام شدند. در طول آزمایش درجه حرارت محیط نسبتاً ثابت نگه‌داشته شد.

۹- در حد واسط بین دولایه، لایه‌ای ایجاد گردید که با بررسی شرایط فیزیکی آن، پارامترهایی حد وسط لایه فوقانی و تحتانی داشته که می‌توان به‌عنوان لایه اختلاط در نظر گرفت. ضخامت این لایه با توجه به غلظت لایه‌های فوقانی و تحتانی متفاوت بوده و از حدود ۲ سانتیمتر الی ۴ سانتیمتر ضخامت اندازه‌گیری شد.

۱۰- پس از اعمال همبستگی یک محیط لایه‌بندی شده با یک محیط همگن، حداقل به تعداد لایه‌های محیط، پیک موج (قله) وجود دارد. در یک محیط سه لایه حداقل دو قله موج در همبستگی بین محیط لایه‌بندی شده و محیط همگن بوجود می‌آید.

۱۱- اختلاف زمانی ایجاد شده در پرتوهای دولایه (به علت تفاوت غلظت در لایه‌های آب شیرین و آب شور و همچنین تغییرات طولی و پراکندگی در مسیر پرتوهای بازگشتی در مشخصات سیگنال تولید شده) را می‌توان با همبستگی سیگنال‌ها خنثی و سپس موقعیت دقیق گیرنده‌های صوتی را نسبت به لایه‌ها مشخص نمود.

۱۲- روش‌های مختلفی برای ایجاد چینه‌بندی وجود دارد از قبیل روش دو سطلی، سیستم تانک واژگون و روش تزریق از روزنه که از روش دو سطلی با توجه به نوع چینه‌بندی خطی مورد نیاز بکار گرفته شد.

۱۳- چنانچه آزمایشی در فرکانس‌های بالاتر یا مساوی این فرکانس (۲۹kHz) انجام شود، مخزن آب به‌عنوان محیط عمیق محسوب می‌شود. با توجه به مقیاس آکوستیکی بین محیط دریا و تانک در آزمایشگاه که عبارت است از:

$$k_{lab} a_{lab} \approx k_{sae} a_{sea}$$

k عدد موج و برابر w/c و $w=2*\Pi*f$ و c سرعت صوت در آب) و a شعاع مؤثر پراکندگی است. می‌توان نتایج این شبیه‌سازی را به دریا نسبت داد.

۱۴- با توجه به تأخیر انتشار امواج دریافتی در لایه‌های مختلف و با استفاده از روابط همپوشانی می‌توان موقعیت سنسورهای گیرنده را تخمین زد که خود روشی مناسب جهت ردیاب شنوهای خودی و یا دشمن می‌باشد.

از محیط دریافتی در عین بی‌نظمی، به‌صورت تکرارپذیری در آزمایش مشابه در محیط همگن مشاهده گردیدند.

۴- پس از انتشار اولین بسته موج در مخزن آزمایشگاهی، تعداد زیادی سیگنال در فرستنده دریافت شد که بررسی سیگنال هدف را با مشکل مواجه نمود. اکثر سیگنال‌های دریافتی شامل نویزهای محیطی (نویزهای خارج از مخزن آزمایشگاهی)، انعکاس، شکست و پراکندگی بوده، که پس از همپوشانی سیگنال‌ها در دو محیط همگن و لایه بندی شده، پیک (قله واضح) ناشی از پراکندگی ایجاد شده توسط مرز لایه آب در خروجی مشخص گردید.

۵- پس تجزیه و تحلیل سیگنال‌های دریافت شده در شرایط ارسال و دریافت یکنواخت (فاصله یکسان فرستنده و گیرنده تا سطح آب) در دو محیط آب همگن و آب لایه‌بندی شده، به روش همپوشانی، حداقل دو پیک (قله واضح) در خروجی برنامه متلب مشاهده گردید. در صورت افزایش دقت زمانی در همپوشانی، انعکاس‌هایی که در دامنه فرکانس نسبتاً ظریف ظاهر می‌شوند، گاهی اوقات به‌صورت قله‌های جداگانه در خروجی ظاهر می‌شود.

۶- مشخصات فرستنده بسیار بااهمیت بوده و تحت تأثیر ابعاد مخزن و ارتفاع لایه‌های آب انتخاب می‌شود.

فرستنده‌های مورد استفاده در این مطالعه قادر است یک بسته موج سینوسی با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و ولتاژ پیک تا پیک ۲۰ ولت ارسال کند. انتخاب فرکانس ۵۰ کیلوهرتز به‌گونه‌ای انتخاب شده است (پهنای سیگنال ارسال شده از فرستنده نسبت عکس با افزایش فرکانس دارد) که بتواند طول مخزن آزمایش را تا لحظه برخورد به دیواره مقابل به‌گونه‌ای طی نماید که به مرز لایه‌های آب برخورد و یا از آن عبور نکند.

۷- در این آزمایش، کمترین مقدار سرعت صوت در شوری ۵۳۲ میکرو زیمنس بوده و مقدار آن برابر است با ۷۴/۴ m/s و بیشترین مقدار سرعت صوت در شوری ۱۴۶۴/۷۳۴ میلی زیمنس بوده و مقدار آن برابر است با ۱۵۴۱/۳۹۵ m/s به‌دست آمده است. بین سرعت صوت و شوری همبستگی بسیار بالایی وجود دارد (۰/۹۹) که نشان می‌دهد روند تغییرات سرعت صوت دقیقاً در این محیط از شوری تبعیت می‌کند. با استفاده از همین روش، با محاسبه ضریب همبستگی بین دما و سرعت صوت مشخص شد که این دو از ضریب همبستگی پایینی برخوردار هستند. بنابراین در این مخزن، شوری عامل تغییر سرعت صوت است.

- [8] Lavery, A.C., Schmitt, R.W. "High-Frequency Acoustic Scattering from Turbulent Oceanic Microstructure: the Importance of Density Fluctuations," J. Acoust. Soc. Am., Vol.114, pp.2685 - 2697, 2003.
- [9] Bidokhti, A.A. and Griffiths, R.W. "The Role of Internal Waves in the Layering of Outflows from Semi-Enclosed Seas", 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2011.
- [10] Kalangi P.P., "Modelling and Simulation of an Underwater Acoustic Communication Channel" Hochschule Bremen University of Applied sciences, 2005.
- [11] Lavery, A.C., Schmitt, R.W. "High-Frequency Acoustic Scattering from Turbulent Oceanic Microstructure: the Importance of Density Fluctuations," J. Acoust. Soc. Am. Vol.114, pp. 2685-2697.

۱۸- پیشنهاد برای کارهای آتی

مدل سازی و شبیه سازی عملکرد سامانه های سونارها، و همچنین مدل سازی انتشار امواج صوتی در دریا، جزء موضوعات تحقیقاتی روز دنیا است که هنوز بسیاری از مسائل و جزئیات به صورت حل نشده باقی مانده و پژوهشگران در سراسر دنیا در حال تحقیق در زمینه ارائه روش ها و مدل های بهتر، رفع اشکالات مدل های موجود، و شناسایی بهتر پدیده ها و اثرات محیط دریا بر عملکرد سونارها هستند. در کشور عزیزمان ایران هنوز در بخش اثر پدیده های فیزیکی بر روی این سیگنال ها کار خاصی انجام نشده است. بنابراین پیشنهاد می گردد برای تکمیل این تحقیق آزمایش تخمین چگالی محیط (تشخیص جنس محیط از قبیل نفت، یخ، روغن و ...) و ضخامت لایه های موجود انجام پذیرد.

۱۹- تقدیر و تشکر

با تشکر فراوان از سازمان جهاد و خودکفایی سپاه که در انجام آزمایش همکاری شایانی نمودند.

۲۰- مراجع

- [۱] اکبری نسب، محمد، اثر ناهمگونی های افقی و قائم بر روی انتشار امواج آکوستیک در دریای عمان، مجله علوم و فنون دریایی (دانشگاه خرمشهر)، ۱۳۹۱.
- [2] Andone C. Lavery, and Ted Maksym. "Broadband Acoustic Backscatter from Crude Oil under Laboratory-Grown Sea Ice," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.140, 2016.
- [3] Lavery, C. Maksym, A., and Wilkinson, T., "Laboratory Measurements of High-frequency, Acoustic Broadband Backscattering from Sea Ice and Crude Oil," Journal of Acoustical Society of America Express Letters 137: EL32 -EL38, doi: 10.1121/1.490242 , Nov. 3, 2014.
- [4] National Research Council, Responding to Oil Spills in the U.S. Arctic Marine Environment National Academies Press, Washington, DC, 2014.
- [5] Karlsson, J., Petrich, C. and Eicken, H. "Oil Entrainment and Migration in Laboratory-Grown Saltwater ice," the 21st Conference on Port Ocean Engineering under Arctic Conditions, Montreal, Canada 2011.
- [6] Andone, C. Lavery, D.C., and James N. Moun. "Measurements of Acoustic Scattering from Zooplankton and Oceanic Microstructure using a Broadband Echosounder," ICES Journal of Marine Science, Vol.67, 2010.
- [7] Lavery, A.C., "Determining Dominant Scatterers of S in Mixed Zooplankton Populations". 2007.