

## مطالعه اثر جریان خروجی یک پلوم در محیط چینه‌بندی شده بر روی پراکندگی صوت در آزمایشگاه

محمد احمدنژاد<sup>۱</sup>، امیر اشتری لرکی<sup>۲</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۳</sup>، مجید آقابابایی<sup>۴</sup>

ahmadnejad.amin@gmail.com

۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۲- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۳- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده علوم دریایی دانشگاه مازندران

۴- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

### چکیده

در این مقاله، نحوه پراکندگی صوت در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز در داخل محیط از پیش چینه‌بندی شده در هنگام نفوذ پلوم متلاطم (جریان نفوذی) در آزمایشگاه مطالعه می‌شود. این نوع پدیده فیزیکی معمولاً در محل ورود رودخانه‌ها به دریا و یا حوزه‌های کوچک همچون خروجی خلیج فارس به دریای عمان مشاهده می‌شود و باعث ایجاد موج داخلی در محیط می‌شود. در این مطالعه به کمک پردازش سیگنال‌های آکوستیکی خروجی زمانی، تغییرات پیک تا پیک سیگنال‌ها، تغییرات شکل سیگنال، زمان دریافت و قدرت توان سیگنال را در لحظات مختلف ورود پلوم به این محیط چینه‌بندی شده، با یکدیگر بررسی و مقایسه شده است. همچنین به روش فناوری پردازش سیگنال پالس فشرده، در زمان‌های نفوذ جریان، ضخامت‌های که این سیگنال تحت تأثیر قرار می‌دهد بررسی می‌شود. پس از اینکه سیگنال‌های خروجی توسط گیرنده‌ها در مکان‌ها و زمان‌های مختلف ثبت شد، ابتدا نوفه‌های موجود در داده‌ها را با استفاده از فیلتر باتروث مرتبه حذف کردیم. سپس فقط داده‌های که قبل از پوش اولی (۱٫۶ میلی‌ثانیه) از داده‌های ضبط شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده دادیم و دریافتیم همانطوریکه که دماغه جریان نفوذی به محیط وارد می‌شود (در سیگنال‌های قبل از ۱٫۶ میلی‌ثانیه) باعث پراکندگی سیگنال صوتی در محیط خواهد شد.

واژگان کلیدی: جریان نفوذی، پراکندگی، پالس فشرده، معکوس آکوستیکی، چینه بندی آب، امواج آکوستیکی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۱۰/۲۹

## ۱- مقدمه

اقیانوس محیط پویا و دائماً در حال تغییر می‌باشد و هرکدام از پدیده‌های اقیانوسی دارای خصوصیات منحصر به فردی می‌باشند که هرکدام به نوعی روی انتشار صوت اثرگذارند. مثلاً جریانات، امواج داخلی و تلاطم‌های کوچک مقیاس، لایه بندی افقی و نیز پدیده‌های دیگر در تغییرات افقی و قائم سرعت صوت اثر دارند [۲]. طبق تئوری DeSanto نیم‌رخ قائم سرعت صوت در اقیانوس به سه مؤلفه تقسیم می‌شود [۳].

$$C(r, t) = C_0(z) + \delta C_1(r) + \delta C_2(r, t) \quad (1)$$

که  $r$  معرف برد،  $t$  معرف زمان و  $z$  معرف عمق اقیانوس است.  $C_0(z)$  معرف میانگین سرعت صوت محیط است و  $\delta C_1(r)$  معرف تغییرات ریزمقیاس است که شامل ادی و جبهه‌های موجود در منطقه است و این تغییرات دارای مقیاس آکوستیکی از مرتبه  $\delta C_1/C_0 \approx 10^{-2}$  هست و  $\delta C_2(r, t)$  مؤلفه آماری است که ناشی از افت و خیزهای ریزمقیاس توسط امواج داخلی می‌باشد و این مؤلفه دارای مقیاس آکوستیکی از مرتبه  $\delta C_2/C_0 \approx 10^{-4}$  می‌باشد. لایه‌های افقی چینه‌بندی شده در اقیانوس دائماً تحت تأثیر گرادیان‌های بزرگ و کوچک به خصوص در حضور جبهه‌ها و جریان‌های نفوذی<sup>۱</sup> هستند و این گرادیان‌ها موجب تغییر ساختار ریز در نیم‌رخ‌های قائم دما و شوری می‌شوند [۴]. در نواحی با گرادیان‌های قائم دما و شوری قوی، ورود پلوم‌های با چگالی بیشتر منجر به فعالیت پخش همرفت دوگانه می‌شود [۵]. بسیاری از مشاهدات اقیانوسی نشان می‌دهد که فرایندهای نفوذی فعالیت پخش همرفت دوگانه در تعیین میزان اختلاط افقی بین توده‌های آب اهمیت دارد. ساختارهای جریان نفوذی، همچون وارونگی دما در زمان و مکان‌های مختلف (قائم/ افقی) در نواحی جبهه اقیانوسی ظاهر می‌شود. فرایند نفوذی انتقال‌های عرضی و جانبی گرم و شوری در جبهه‌های اقیانوسی مهم هستند. از جمله ساختارهای نفوذی، توده‌های نفوذی آب مدیترانه به اقیانوس اطلس و خروجی آب‌های گرم و شور خلیج فارس به دریای عمان (در اعماق ۵۰ تا ۳۰۰ متری) و دریای سرخ به این اقیانوس را می‌توان نام برد که همراه با حضور عدسی‌ها با شوری بالا در این محیط‌ها می‌باشد. مطالعات بسیاری در زمینه پراکندگی امواج آکوستیکی فرکانس بالا

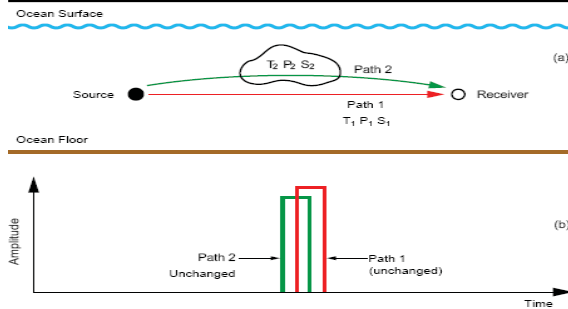
توسط همرفت پخش دوگانه انجام شده است. یک مطالعه به صورت تئوری در مورد اثر ساختار ترموهالاین بر روی انتشار صوت با روش تئوری پرتو انجام شده ولی اندازه‌گیری آکوستیکی در این مورد انجام نشده است [۶ و ۷]. در مقابل در مورد ساختار ریز همرفت پخش دوگانه بر روی پراکندگی امواج آکوستیکی [۸، ۹، ۱۰]، اندازه‌گیری میدانی محدود [۱۱، ۱۲، ۱۳] و نیز اندازه‌گیری آزمایشگاهی ساختار ریز تلاطمی دما [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷] مطالعات متعددی انجام شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌های میدانی بسیار هزینه‌بر می‌باشد، استفاده از کار آزمایشگاهی بسیار مقرون به صرفه است. با توجه به قانون مقیاس آکوستیکی می‌توان از نتایج سیگنال‌های آزمایشگاهی در محیط واقعی نیز استفاده کرد (مثلاً  $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sae} a_{sea}$ ) که  $K$  معرف عدد موج در آزمایشگاه و یا در دریا است و  $a$  ضخامت پدیده ایجاد شده در آزمایشگاه و یا در دریا است. در مورد پراکندگی صوت توسط جریان همرفت نفوذی در یک محیط چینه‌بندی تاکنون اندازه‌گیری آزمایشگاهی انجام نشده است. در این مقاله سعی می‌شود اثر نفوذ جریان خروجی از یک پلوم در یک محیط چینه‌بندی شده بر روی انتشار صوت بررسی شود.

## ۲- رفتار موج آکوستیکی در لایه‌ها

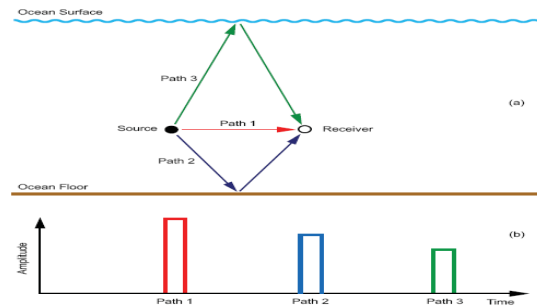
۲-۱- انعکاس<sup>۲</sup>

انتشار صوت در سطح دریا، کف دریا، اشیاء غرق شده و تغییرات خصوصیات فیزیکی آب باعث می‌شوند که سیگنال‌های اضافی با طول پالس‌های متفاوت در گیرنده مشاهده گردد. همان طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود همیشه اولین سیگنال مربوط به سیگنال مستقیمی است که به گیرنده می‌رسد (مسیر یک)، سیگنال بعدی که کمی دیرتر از سیگنال مستقیم می‌رسد به خاطر انعکاس از بستر است (مسیر دوم) و مسیر سوم که دیرتر از سیگنال بستر می‌رسد به خاطر بازتاب از سطح می‌باشد. به خاطر اینکه هرکدام دارای طول مسیرهای متفاوتی دارند، در گیرنده در زمان‌های متفاوتی دریافت می‌شوند. به علت جذب، گسترش هندسی، تفاوت در زمان رسیدن، میزان بازتاب از سطوح مختلف، پالس‌های دریافتی شبیه به هم نیستند [۱].

<sup>2</sup> Reflection<sup>1</sup> Intrusions



شکل (۲) نحوه انتشار صوت با تغییر پارامترهای فیزیکی.



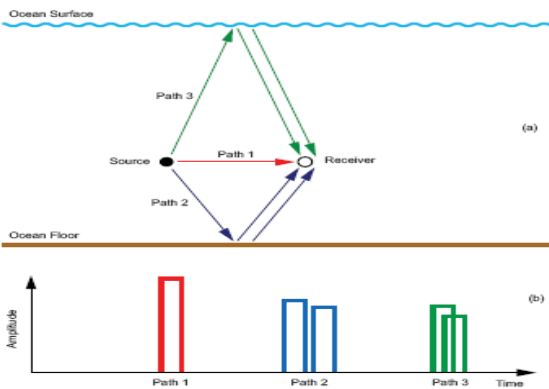
شکل (۱) نحوه انتشار صوت در یک محیط کم عمق.

## ۲-۲- شکست<sup>۱</sup>

هنگامی که سیگنال‌ها در یک محیط که سرعت صوت تغییر نکنند حرکت کند سیگنال در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند ولی هنگامی که محیط تغییر نماید (عمق، دما و شوری) مسیر انتشار در یک مسیر منحنی شکل حرکت می‌کند (مطابق شکل (۲)) بنابراین پالس‌های متفاوتی در سیگنال مشاهده خواهد نمود. در این مثال فرض می‌شود که سرعت صوت با عمق کاهش یابد هنگامی که این نوع نیم‌رخ ایجاد شود پرتوهای صوتی به طرف پایین خم می‌شوند اما پرتوها در منطقه‌ای که سرعت صوت سریع‌تر از سرعت صوت در مسیر مستقیم است، حرکت می‌کند بنابراین سیگنالی که در مسیر منحنی شکل حرکت می‌کند به گیرنده قبل از اینکه سیگنال مستقیم دریافت شود، مشاهده می‌شود اما به خاطر طول مسیر برای مسیر منحنی شکل که بیشتر از مسیر مستقیم است و تلفات صوت (تضعیف) که بستگی به طول مسیر دارد این پرتو تلفات بیشتری دارد بنابراین این سیگنال در اسکوپ سریع‌تر ولی با دامنه کمتری مشاهده می‌شود. تغییر مسیر موج صوتی با تغییر در سرعت صوت می‌تواند مسیرهای صوتی پیچیده‌ای تولید نماید. این نیم‌رخ‌ها باعث می‌شود که در اقیانوس مناطقی را ایجاد گردد که پرتو در آن نفوذ نکند و منطقه تاریک کانال‌های صوتی بوجود آیند که موج صوتی در آن کانال به تله بیفتد و اجازه دهد که سیگنال تا کیلومترها با اتلاف انرژی کم سیر کند [۱].

## ۲-۳- پراکندگی<sup>۲</sup>

اگر مرزهای اقیانوس صاف نباشند و دارای ناهمواری‌هایی باشند پیچیدگی‌های اضافی در شکل اضافه خواهد گردید.



شکل (۳) انعکاس موج آکوستیکی از سطح ناصاف.

همانطوریکه در شکل (۳) مشاهده می‌کنید هنگامی که این چنین باشد پراکندگی یا مسیرهای چندگانه با اختلاف کوچک در زمان و دامنه در گیرنده دریافت خواهد شد. پراکندگی به واسطه سطح دریا و به خاطر حرکت امواج بوده و نسبتاً دارای پیچیدگی بیشتری (تغییر با زمان) است [۱].

## ۳- شیوه انجام آزمایش‌ها

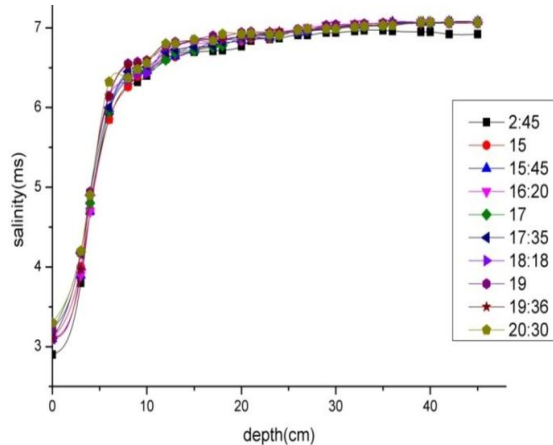
### ۳-۱- معرفی کلی

آزمایش‌ها در یک تانک شیشه‌ای به طول ۲۱۹ سانتی‌متر و عرض ۱۲۷ سانتی‌متر و عمق ۸۰ سانتی‌متر انجام شده است. قبل از اینکه شبیه‌سازی در این تانک انجام شود، ابتدا ۳ حسگر آکوستیکی هم‌نوع، بر روی یک پایه به طور جداگانه (فواصل بین حسگرها بر روی پایه‌ها ۱۴ سانتی‌متر است) نصب شده، تانک را تا عمق ۴۸ سانتی‌متر از آب تمیز پر کرده و سپس سیگنال‌های آکوستیکی در اعماق مختلف ثبت شدند. سپس این محیط را با روش "پر کردن جعبه"<sup>۳</sup> [۲۱] با آب نمک به مدت ۲ روز پر کرده و داده برداری و اندازه‌گیری آکوستیکی در اعماق مختلف انجام گردید.

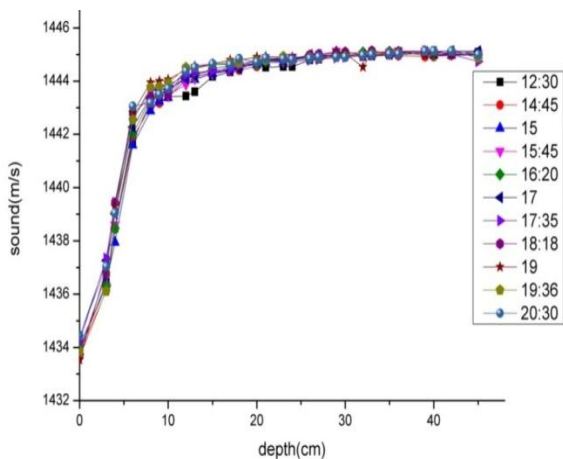
<sup>1</sup> Refraction

<sup>2</sup> Scattering

<sup>3</sup> Filling box



شکل (۴) تغییرات شوری در زمان‌های مختلف به هنگام آماده‌سازی به روش "Filling box".



شکل (۵) روند تغییرات سرعت صوت در زمان‌ها مختلف به هنگام پر کردن تانک.

همانطوری که شکل‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهند نیم‌رخ تغییرات شوری و سرعت صوت در این تانک همانند یکدیگر هستند. برای بررسی این همانندی، ضریب همبستگی بین شوری و سرعت صوت ۰٫۹۹ را نشان می‌دهد. تغییرات سرعت صوت در این تانک توسط شوری کنترل می‌شود (با توجه به اینکه تانک با آب شور چینه‌بندی شده است).

### ۳-۳- محاسبه پارامترهای بی‌بعد جریان نفوذی

پارامترهای بی‌بعد حاکم بر جریان نفوذی پلوم عبارتند از عدد پرانتل Prandtl  $Pr = \nu/k_T$  که  $\nu$  معرف ویسکوزیته جنبشی و  $k_T$  معرف ضریب پخش شوری است و متناسب با  $H/L$  و  $H/W$  (که  $H$ ،  $L$  و  $W$  به ترتیب عمق، طول و پهنای تانک می‌باشند) است. شار شناوری بی‌بعد پلوم که عبارت است از:

همچنین در برخی از فواصل این تانک داده‌برداری پارامترهای فیزیکی (دما و شوری) هم‌زمان با داده‌برداری آکوستیکی انجام شد. در روز سوم که محیط چینه‌بندی گردیده بود، پلومی با چگالی و دبی کمتر از روز قبلی را از انتها وارد محیط کرده تا یک جریان نفوذی در قسمت‌های میانی عمق آن تشکیل شود و در لحظه‌های مختلف، داده‌های آکوستیکی و هیدروفیزیکی هم‌زمان اندازه‌گیری شدند سپس این سیگنال‌ها در لحظه‌های مختلف بر اساس محل قرارگیری پلوم، پردازش شدند.

### ۳-۲- چینه‌بندی محیط و شبیه‌سازی جریان نفوذی

۳۵ لیتر محلول آب‌نمک با چگالی ۱۱۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب توسط لوله‌ای با قطر ۳ میلی‌متر که در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از دیواره قائم تانک در عمق ۴۶ سانتی‌متر از کف (دو سانتی‌متر زیر سطح آب) نصب شده بود، با دبی  $5 \times 10^{-7} m^3/s$  وارد تانک کردیم. این پلوم به مدت دو شبانه‌روز وارد این محیط می‌شد درحالی‌که اندازه‌گیری داده‌های دما و شوری در اعماق مختلف این تانک انجام می‌شد این داده‌ها برحسب عمق آب رسم می‌شدند. درنهایت از روند تغییرات شوری این نتیجه حاصل شد که این محیط از محلول آب‌نمک پر شده است و نیم‌رخ شوری حالت "پر کردن جعبه" پیدا کرده است (شکل (۱)). برای شبیه‌سازی جریان خروجی (جریان نفوذی)، در روز سوم در ساعت ۱۳:۲۰، ۱۰ لیتر محلول آب‌نمک را با چگالی ۱۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و با دبی  $2.1 \times 10^{-7} m^3/s$  را آرام‌آرام وارد محیط تانک (چینه‌بندی شده) کردیم و جریان نفوذی این پلوم در ابتدای آزمایش در وسط تانک (در عمق ۲۲ سانتی‌متر) قرار گرفت.

### ۳-۳- محاسبه سرعت صوت

تغییرات سرعت صوت، تنها عاملی است، که باعث تغییرات سیگنال‌های آکوستیکی دریافتی می‌شود. در این تحقیق برای محاسبه سرعت صوت از فرمولی که توسط [۱۹] ارائه شده، استفاده گردید. اشکال (۴) و (۵) روند تغییرات شوری و سرعت صوت در زمان‌های مختلف که در فاصله ۷۰ سانتی‌متر از محل ورود پلوم در هنگام شبیه‌سازی جریان نفوذی، اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همانطوری‌که این نمودارها نشان می‌دهد پلوم ورودی در عمق تقریباً ۲۲ سانتی از کف در لحظات اول قرار گرفته است.

## ۴- چیدمان سیستم‌های آکوستیکی

چون این آزمایش در یک محیط کوچک انجام می‌شود، بنابراین بایستی از ترانسدیوسرهای غیر جهتی استفاده شود با توجه به اینکه لایه‌هایی که با جریان نفوذی در آزمایشگاه تشکیل می‌شوند 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 ۳ حسگر آکوستیکی ساخت شرکت Furuno با فرکانس مرکزی ۲۰۰ کیلوهرتز و شعاع ۳٫۵ سانتی‌متر استفاده شد. چون این حسگرها نسبت به زاویه انتشار بسیار حساس می‌باشند و نیز برای اینکه از به هم ریختن لایه‌ها جلوگیری شود، بنابراین آن‌ها را بر روی یک پایه فلزی (فواصل بین حسگرها ۱۴ سانتی‌متر قرار داده شده است) نصب می‌شوند. نمای شماتیکی از این چیدمانی در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

در طول آزمایش، به منظور تعیین اثر پلوم بر پراکندگی صوت، اندازه‌گیری سیگنال‌های آکوستیکی در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز در سناریوهای مختلف به شرح ذیل صورت می‌پذیرد:

- الف- فرستنده در عمق ۸ سانتی‌متر و گیرنده در اعماق ۲۲ و ۳۶ سانتی‌متری قرار دارد.  
 ب- فرستنده در عمق ۲۲ سانتی‌متر و گیرنده در اعماق ۸ و ۳۶ سانتی‌متری قرار دارد.  
 ج- فرستنده در عمق ۳۶ و گیرنده در اعماق ۸ و ۲۲ سانتی‌متری قرار دارد.

۴-۱- تئوری راستاوری<sup>۱</sup>

ارسال و دریافت انرژی آکوستیکی مؤثر از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک در فضا تحت یک زاویه فضای معین صورت می‌گیرد. اندازه این زاویه با عنوان پهنای پرتو معرفی می‌شود. با توجه به فضایی بودن پهنای تابش پرتو، ممکن است این پهنای در جهت‌های افقی و عمودی باهم برابر نباشد. هر چه پهنای تابش پرتو صوتی بیشتر باشد انرژی آکوستیکی در سطح وسیع‌تر ولی برد کمتر منتشر می‌شود. پهنای تابش پرتو در یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک به سه عامل عمده ابعاد، فرکانس و فاصله تا گیرنده بستگی دارد.

$$F_p = \frac{F'}{H^4 N_0^3} \quad (2)$$

که در اینجا  $F' = Qg' = Q\Delta\rho/\rho^g$  شار شناوری و  $Q$  دبی حجمی شارش منبع و  $N_0$  فرکانس شناوری محیط است که از رابطه ذیل هنگامی که  $D$  برابر  $H$  باشد، محاسبه می‌شود:

$$N = F^{1/3} \times (2E)^{(-2/3)} \pi^{(-1/3)} D^{(-4/3)} [2.18(z/D)^{(-5/3)} + 0.279(z/D)^{(-2/3)} + 0.083(z/D)^{(1/3)} \dots \dots]^{(1/2)} \quad (3)$$

که  $F$  شار شناوری پلوم چینه‌بندی کننده و  $z$  راستای قائم است. علاوه بر این‌ها نسبت اندازه پخش فرارفتی به مولکولی با عدد Peclet محاسبه می‌شود:

$$Pe = F'^{1/3} H^{2/3} \quad (4)$$

سرعت جریان خروجی پلوم با رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$U = 1.37 \times E^{1/3} \times F^{1/3} H^{1/6} W^{1/2} \quad (5)$$

که  $F$  شار شناوری پلوم،  $E$  ضریب درون آمیختگی،  $H$  عمق پلوم منبع و  $W$  پهنای (عرض) تانک می‌باشد. معمولاً ضریب درون آمیختگی برابر ۰٫۱ می‌باشد.

با توجه به اینکه چگالی پلوم در هنگام ایجاد جریان نفوذی برابر ۱۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نیز دبی  $2.1 \times 10^{-7}$  بود، می‌توان شار شناوری پلوم نفوذی را توسط رابطه زیر محاسبه نمود.

$$F = Qg' = Q \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) g = 2.1 \times 10^{-7} \times \frac{20}{1000} \times 10 = 4.4 \times 10^{-8} m^4/s^3 \quad (6)$$

و فرکانس شناوری در محل سطح آب برابر است با:

$$N_0(z=H) = 6.6 \times 10^{-5} s^{-1} \quad (7)$$

شار شناوری بی‌بعد پلوم نفوذی به صورت زیر است.

$$F_p = \frac{F'}{H^4 N_0^3} = 0.0342 \quad (8)$$

در این آزمایش با توجه به اینکه عمق پلوم ۴۶ سانتی‌متر، شار شناوری  $4.4 \times 10^{-8} m^4/s^3$  و پهنای تانک برابر ۱۲۷ سانتی‌متر است می‌توان سرعت جریان خروجی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$U = 1.37 \times E^{1/3} \times F^{1/3} H^{1/6} W^{1/2} = 1.37 \times 0.1^{1/3} \times \quad (9)$$

$$(4.4 \times 10^{-8})^{(1/3)} 0.46^{1/6} 1.27^{1/2} = 0.0022 m/s$$

<sup>1</sup> Directivity

بنابراین در این فرکانس، این حسگر ۹,۵ سانتی متر پرتو نسبت به خط افق بالا و ۹,۵ سانتی متر نسبت به خط افق پایین مورد تأثیر قرار می دهد.

#### ۵- مشخصات سیگنال تولید شده

برای تولید سیگنال ابتدا از یک تولیدکننده سیگنال که در این آزمایش Function 20 MHz / Model DG 1022 می باشد، استفاده کرده و سیگنالی با مشخصات ذیل در تانک ارسال شد:

فرکانس: ۲۰۰ 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

این سیگنال الکترونیکی توسط فرستنده به سیگنال آکوستیکی تبدیل می شود و گیرنده آن را دریافت می کند.

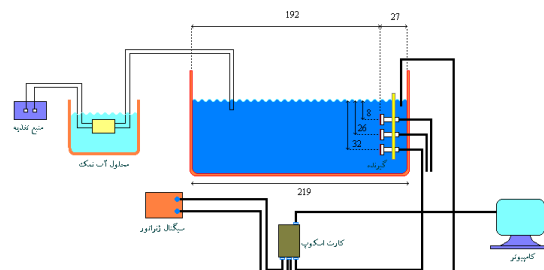
#### ۶- بررسی نحوه انتشار سیگنال آکوستیکی در تانک

هنگامی که سیگنالی در این محیط ارسال شود، تحت تأثیر دیوارها و کف ... قرار می گیرد. بنابراین بایستی قبل از اینکه شبیه سازی فیزیکی برای حالت با پلوم در این تانک انجام شود، بایستی اندازه گیری آکوستیکی در آب همگن انجام دهیم. در این بخش ابتدای تئوری پرتو و معادلات آن بررسی می شود و در بخش بعدی بر اساس این تئوری، محاسبات لازم در این تانک انجام می شود.

#### ۶-۱- بررسی نظری انتشار صوت در محیط کم عمق به

##### روش پرتو

همانطوریکه در بخش شرح کلی آزمایش بیان شد، در ابتدای آزمایش که هنوز هیچ پلومی وارد محیط نشده بود سیگنال های آکوستیکی در محیط آب همگن (تمیز) داده برداری شد. چون هیچ املاحی در محیط وجود ندارد که باعث تغییر مسیر سیگنال شود، بنابراین اولین سیگنالی که در گیرنده دریافت می شود مربوط به سیگنال مستقیم است. سیگنال های بعدی که در صفحه اسکوپ مشاهده می شود به خاطر پراکندگی های از بستر، سطح، دیوارها و ... است.



شکل (۶) نمای شماتیکی از چیدمانی تجهیزات آزمایشگاهی جهت اندازه گیری پراکندگی صوت به واسطه جریان نفوذی.

#### ۴-۲- محاسبه راستاوری حسگرهای آکوستیکی

با توجه به طراحی های مختلف ترانسدیوسرهای پیزو الکتریک و متفاوت بودن راستاوری آن ها، فرمول های مختلفی ارائه شده است [۲۱]. در این آزمایش ها ترانسدیوسرهای دایره ای به شعاع ۳,۵ سانتی متر بکار رفته اند و راستاوری این نوع ترانسدیوسر در جهت افقی و عمودی به دلیل متقارن بودن سطح ارسال امواج یکسان بوده و عبارت است:

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

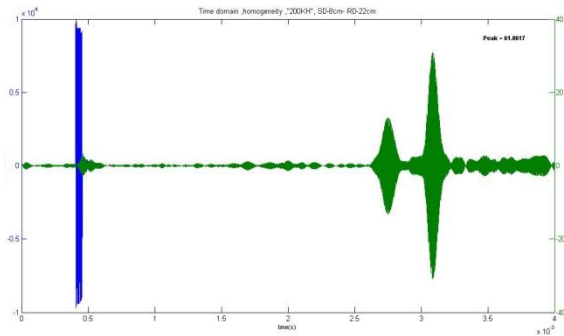
که در آن  $r_j$  تابع بسل نوع اول و  $k$  عدد موج مربوط به فرکانس کار ترانسدیوسر بوده و برابر است با:

$$k = 2\pi f / c \quad (11)$$

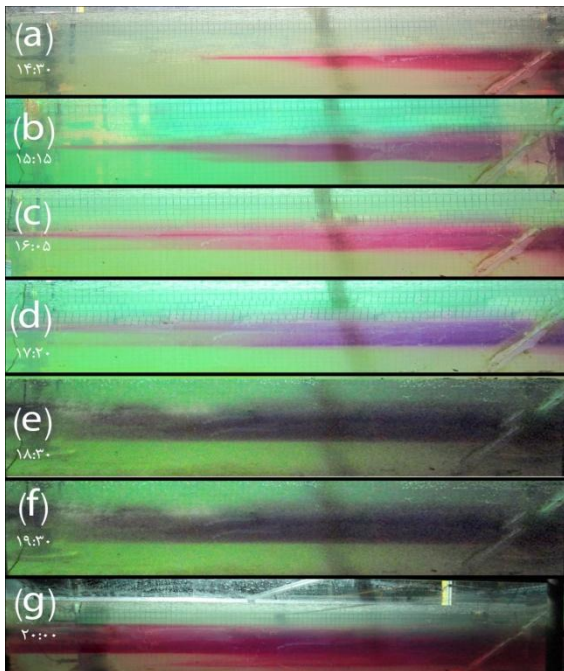
راستاوری این ترانسدیوسر در فرکانس ۲۰۰ کیلو هرتز و با توجه به اینکه شعاع حسگر ۳,۵ سانتی متر است، بیم پرتو محاسبه شد و خروجی این بیم در جدول (۱) نشان داده شده است. در این فرکانس، راستاوری ترانسدیوسر ۶,۶ درجه است. (در زاویه ۳,۳+ و ۳,۳- نسبت به محور آکوستیکی شدت 3db کاهش یافته است) با استفاده از این زاویه می توان مشخص نمود که در این زاویه چه ضخامتی از عمق آب را مورد تأثیر قرار خواهد داد.

جدول (۱) راستاوری ترانسدیوسر در فرکانس.

فرکانس کار	۵۰	۱۲۰	۲۰۰
طول موج سانتی متر	۳	۱	۰,۷
میدان دور	۴	۱۲,۲۵	۱۷,۵
شعاع فرنل (سانتی متر)	۱۸,۹۷	۱۰,۹۵	۹,۱۶
پهنای زاویه در -3db	۱۳	۱۰,۸	۶,۶
پهنای پالس u	۱۹۰	۸۰	۵۰



شکل (۷) سیگنال ضبط شده در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز در زمان پراکندگی.



شکل (۸) مشاهدات خروجی پلوم در زمان‌ها مختلف.

پس از آن نوبه‌های موجود در داده‌ها را با استفاده از فیلتر باتروث مرتبه چهارم در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز باند پهن بین ۱۹۰ و ۲۲۰ کیلوهرتز حذف کردیم. سپس فقط داده‌های که قبل از پوش اولی (۱,۶ میلی‌ثانیه) از داده‌های ضبط شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده می‌شود.

نتایج به دست آمده در شکل‌های (۹) تا (۱۴) به نمایش در آمده است. همانطوری که دماغه جریان نفوذی به محیط وارد می‌شود (در سیگنال‌های قبل از ۱,۶ میلی‌ثانیه) ملاحظه می‌کنید که باعث پراکندگی سیگنال صوتی در محیط می‌شود. در این اشکال سیگنال‌های خروجی، نرمالیزه شده است (مدت زمان طول داده‌ها را تا ۰,۸ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است).

## ۶-۲- اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از ابعاد تانک و کارت اسکوپ

در این حالت فرستنده و گیرنده در یک طرف وجود دارند. فرض کنید که فرستنده در عمق ۸ سانتی‌متری و گیرنده دقیقاً زیر فرستنده و در عمق ۲۲ سانتی‌متری قرار دارد. کل مسافت طی شده برای سیگنال مستقیم برابر است با

$$x = 1.92 + 1.92 = 3.84 \quad (12)$$

$$t_1 = \frac{x}{c} = \frac{3.84}{1500} = 2.56 \text{ms} \quad (13)$$

شکل (۷) پوش شماره یک مربوط به سیگنال مستقیم حاصل از سطح و بستر را نشان می‌دهد و پوش دومی با توجه به اینکه این حسگرها همه جهته نیستند بنابراین سیگنالی که به بدنه سمت حسگرها برخورد می‌کند (به دلیل اینکه این حسگرها از سمت عقب خود نمی‌توانند سیگنالی را دریافت کنند) دومرتبه برمی‌گردد و به بدنه روبروی حسگرها برخورد می‌کند. به این ترتیب کل مسیر که سیگنال بعدی طی خواهد کرد برابر است با

$$x = 1.92 + 1.92 + 0.27 + 0.27 + 1.92 + 1.92 = 8.22$$

$$t_1 = \frac{x}{c} = \frac{8.22}{1500} = 5.48 \text{ms} \quad (14)$$

بنابراین نتیجه می‌شود که در این آزمایش آثار ناهمگونی محیطی باید قبل از پوش اول مطالعه شود و برای کاهش اثر پراکندگی از محیط مدت زمان طول داده‌برداری را تا ۰,۸ میلی‌ثانیه (از محل حسگرها حدود ۱,۲ متر) برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفت.

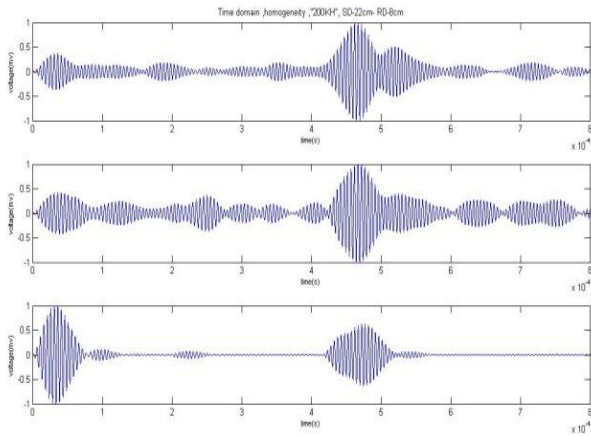
## ۷- داده برداری آکوستیکی و داده هیدروفیزیکی

همزمان با داده‌برداری آکوستیکی، داده‌های هیدروفیزیکی (دما و شوری) اندازه‌گیری می‌شوند. برای اینکه بتوان به صورت چشمی محل نفوذ و قرارگیری پلوم را دنبال کنیم در لحظات مختلف ورود پلوم (جریان نفوذی) از آن عکس گرفته شد و یک نمونه از دماغه نفوذ جبهه این جریان در لحظات مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است.

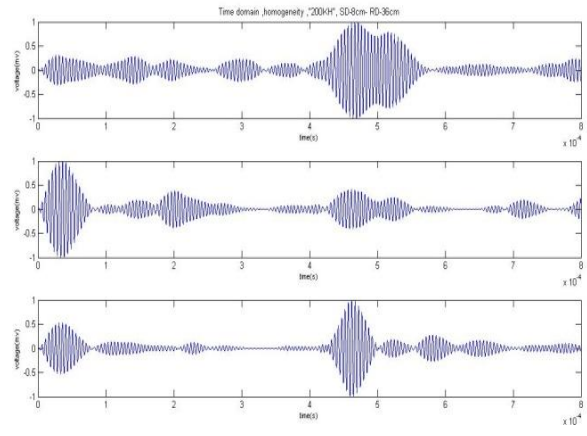
## ۸- داده‌های آکوستیکی و آنالیز داده‌ها

ابتدا سیگنال‌های خروجی توسط گیرنده‌ها در مکان‌ها و زمان‌های مختلف، ثبت شدند.

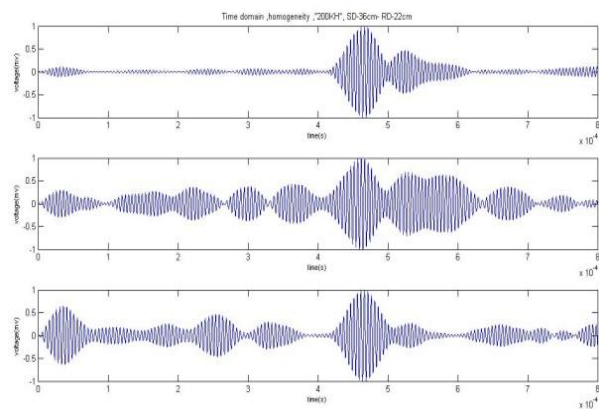




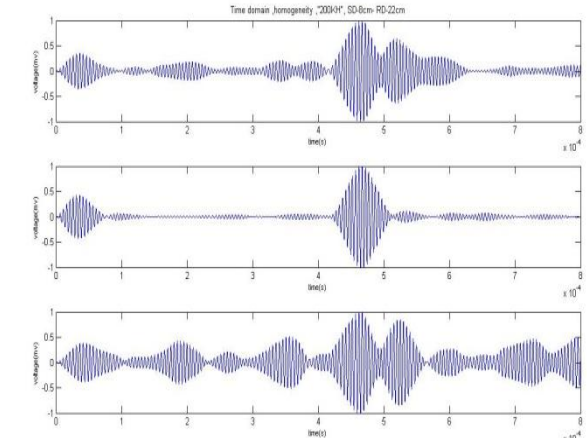
شکل (۱۲) منبع در عمق ۲۲ سانتی متری و گیرنده در ۸ سانتی متری - از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰



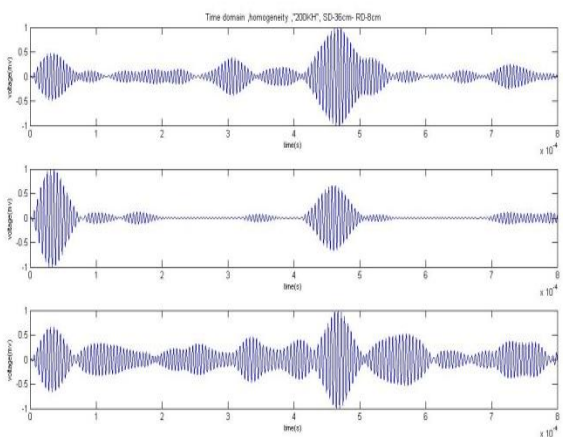
شکل (۹) منبع در عمق ۸ سانتی متری و گیرنده در ۳۶ سانتی متری از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰



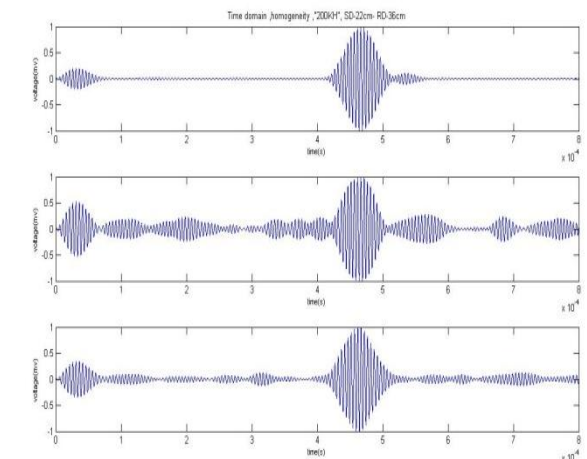
شکل (۱۳) منبع در عمق ۳۶ سانتی متری و گیرنده در ۲۲ سانتی متری - از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰



شکل (۱۰) منبع در عمق ۸ سانتی متری و گیرنده در ۲۲ سانتی متری از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰

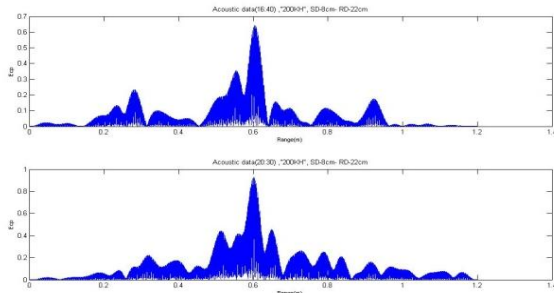


شکل (۱۴) منبع در عمق ۳۶ سانتی متری و گیرنده در ۸ سانتی متری از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰

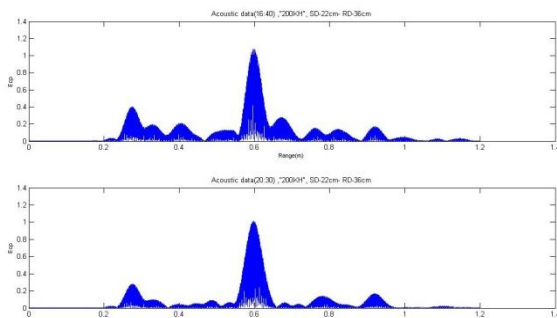


شکل (۱۱) منبع در عمق ۲۲ سانتی متری و گیرنده در ۳۶ سانتی متری از بالا به پایین در آب همگن، جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و جریان نفوذی در ساعت ۲۰:۳۰

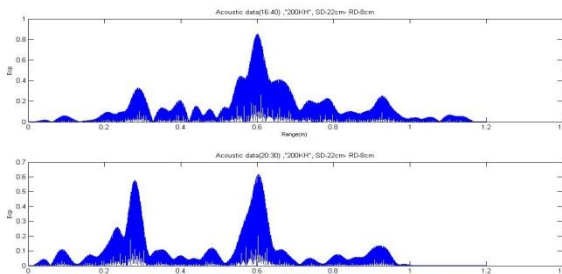




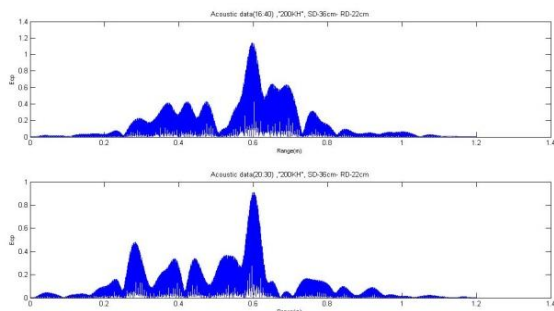
شکل (۱۶) منبع در عمق ۸ سانتی متری و گیرنده در ۲۲ سانتی متری در آب همگن - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.



شکل (۱۷) منبع در عمق ۲۲ سانتی متری و گیرنده در ۳۶ سانتی متری - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.



شکل (۱۸) منبع در عمق ۲۲ سانتی متری و گیرنده در ۸ سانتی متری در آب همگن - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.



شکل (۱۹) منبع در عمق ۳۶ سانتی متری و گیرنده در ۲۲ سانتی متری در آب همگن - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.

## ۹- بررسی تغییرات لایه‌ها با استفاده از سیگنال آکوستیکی در حوزه زمان

در این مطالعه از فن پردازش سیگنال به روش compress puls (cp) برای بررسی میزان شدت پراکندگی صوت استفاده می‌شود [۲۱]. در این روش اتوکورلوشن سیگنال دریافتی از پراکندگی لایه‌ها با سیگنال دریافتی در غیاب این جریان نفوذی محاسبه می‌شود.

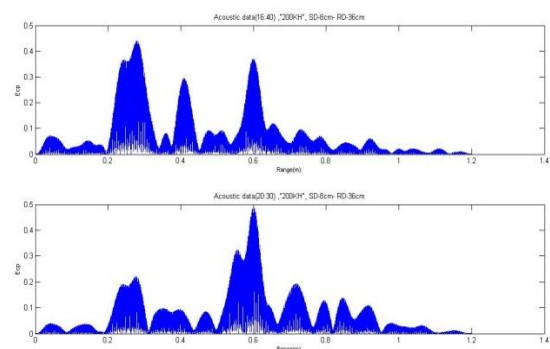
$$CP(t) = k_{CP}^{-1} v_{cal}^R(t) * v_{cal}^R(t) \quad (15)$$

که  $v_{cal}^R(t)$  سیگنال خروجی در آب همگن  $v^R(t)$  سیگنال برگشتی حاصل از پدیده جریان نفوذی و  $k_{CP}$  اتوکوریلوشن سیگنال آب همگن می‌باشد. با اعمال این فن به سیگنال‌های دریافتی در لحظه‌های نفوذ جریان می‌توان ضخامت لایه‌هایی را که این سیگنال تحت تأثیر قرار داده، محاسبه نمود.

ضخامت لایه‌ها به صورت فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

منطبق بر دو پیک در  $E_{CP}$  و  $\bar{c}$  سرعت صوت میانگین در بین دو لایه است. از همه لوب‌های کوچک‌تر از تابع اتوکوریلوشن  $v_{cal}^R$  و یا کوچک‌تر از ۲۵٪ در خروجی  $E_{CP}$  چشم‌پوشی می‌شوند.

در اشکال (۱۵) تا (۲۰) فواصل بین پیک‌ها معرف، ضخامت لایه‌ها است که سیگنال تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ملاحظه می‌نماید که باگذشت زمان، بانفوذ جریان به محیط چینه‌بندی شده تعداد لایه‌ها کمتر می‌شود و ضخامت لایه‌ها بیشتر می‌شود.



شکل (۱۵) فرستنده در ۸ سانتی متری و گیرنده در عمق ۳۶ سانتی متری در آب همگن - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.

## ۱۱- تفسیر خروجی شکل‌های سیگنال در لحظات ورود جریان به محیط چینه‌بندی شده در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز

۱- فرستنده در عمق ۸ سانتی‌متری (بالای محل قرارگیری پلوم)

الف- گیرنده در عمق ۲۲ سانتی‌متری: در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال کاهش پیدا کرده است.

ب- گیرنده در عمق ۳۶ سانتی‌متری (در مقابل جبهه جریان نفوذی) در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال کاهش پیدا کرده است.

ج- گیرنده در عمق ۳۶ سانتی‌متری (پایین جبهه جریان نفوذی) در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال کاهش پیدا کرده است.

۲- فرستنده در عمق ۲۲ سانتی‌متری (محل قرارگیری پلوم)

الف- گیرنده در عمق ۸ سانتی‌متری: در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال افزایش پیدا کرده است.

ب- گیرنده در عمق ۲۲ سانتی‌متری در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال کاهش پیدا کرده است.

ج- گیرنده در عمق ۳۶ سانتی‌متری در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال افزایش پیدا کرده است.

۳- فرستنده در عمق ۳۶ سانتی‌متری و مقداری داخل لایه است در این صورت:

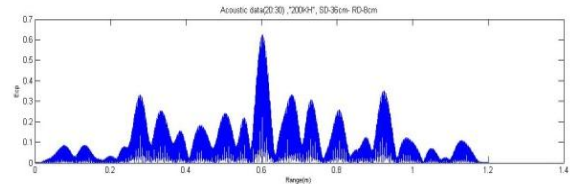
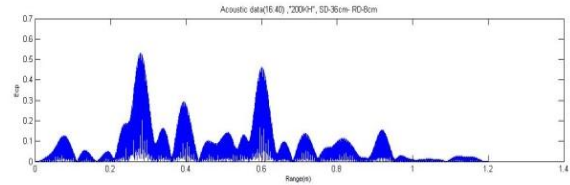
الف- گیرنده در عمق ۸ سانتی‌متری: در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال افزایش پیدا کرده است.

ب- گیرنده در عمق ۲۲ سانتی‌متری: در این حالت لحظه‌به‌لحظه پیک سیگنال کاهش پیدا کرده است.

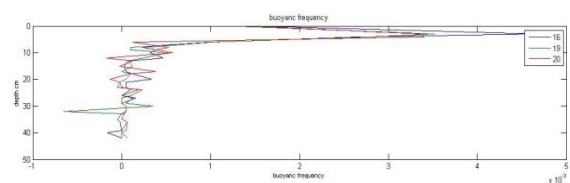
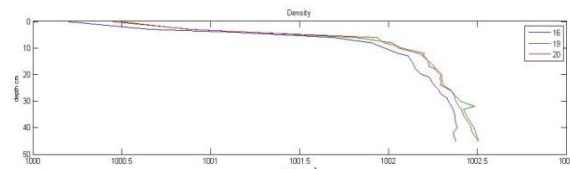
ج- گیرنده در عمق ۳۶ سانتی‌متری: در این حالت لحظه به لحظه پیک سیگنال چندان تغییر نکرده است و در ساعت ۲۰ ملاحظه می‌نمایید کاهش یافته است به خاطر این است که جبهه در عمق‌های پایین‌تر از ساعت ۱۹ تشکیل شده و به سمت جلو حرکت می‌کند و در ساعت ۲۰ گیرنده سوم در مقابل جبهه پایینی قرار داشت و بنابراین چنانچه گیرنده در مقابل جبهه باشد، پیک تا پیک سیگنال کاهش می‌یابد.

## ۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج همانندسازی جریان نفوذی در آزمایشگاه و اثر آن بر روی افت و خیزهای سیگنال آکوستیکی به شرح زیر است:



شکل (۲۰) منبع در عمق ۳۶ سانتی‌متری و گیرنده در ۸ سانتی‌متری در آب همگن - از بالا به پایین جریان نفوذی در ساعت ۱۶:۲۰ و ساعت ۲۰:۳۰.



شکل (۲۱) بررسی روند تغییرات ضخامت لایه‌ها با استفاده از داده‌های دما و شوری.

## ۱۰- محاسبه پراکندگی

به‌عنوان یک نتیجه نامشخص به پراکندگی وابستگی فاصله می‌توان از رابطه ذیل نسبت پراکندگی در حالت جریان نفوذی را به محیط همگن محاسبه نمود:

$$\frac{P_{sca}}{P_{inc}} = \frac{v_{scat}}{v_{cal}} \frac{r_{scat}}{r_{cal}} \quad (16)$$

که  $v_{cal}$  ولتاژ خروجی در آب همگن  $r_{cal}$  فاصله از هدف در آب همگن،  $r_{scat}$  فاصله از جریان نفوذی و  $v_{scat}$  ولتاژ خروجی حاصل از جریان نفوذی می‌باشد.

چنانچه مشخصه Surface Roughness جریان نفوذی در مقایسه با طول موج خیلی کوچک باشد در نتیجه فشار پراکندگی یک‌فاصله  $1/2r_{scat}$  وابسته است و در نتیجه نسبت  $P_{sca}/P_{inc}$  مستقل از فاصله می‌باشد.

پراکندگی است.) می‌توان نتایج این شبیه سازی را به دریا نسبت داد.

### ۱۳- مراجع

- [1] Bidokhti, A., "Shear-induced Spitting of Plume Outflow in a Stratified Enclosed Basin", *Journal of Marine Science*, 2005.
- [2] Brekhovskikh L. M., *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 1982.
- [3] DeSanto, J. A., *Theoretical Methods in Ocean Acoustics*, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 8, Chapter 2, pp.7-77, 1979.
- [4] Fedorov, F. N., "The Thermohaline Finestructure of the Ocean", Translated by D.A. Brown. Vol. 2, Pergamon Marine Series, 1978.
- [5] Ruddick, B. R. and Turner, J. S., *The vertical Length Scale of Double Diffusive Intrusions*, 26A, pp. 903-913. 1979.
- [6] Mellberg, L. E., and Johannessen, O. M., "Layered Oceanic Microstructure-it's effect on sound propagation", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 53, No. 2, pp. 571-580, 1973.
- [7] Mellberg, L. E., Johannessen, O. M., and Lee, O. S., "Acoustic Effect Caused by a Deep Thermohaline Stepped Structure in the Mediterranean Sea," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 55, pp. 1081-1083, 1974.
- [8] Goodman, L., "Acoustic Scattering from Oceanic Microstructure," *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, pp. 11557-11573, 1990.
- [9] Lavery, A. C., Schmitt, R. W. "High-frequency Acoustic Scattering from Turbulent Oceanic Microstructure: the Importance of Density Fluctuations," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 114, pp. 2685-2697, 2003.
- [10] Seim, H. E., "Acoustic Backscatter from Salinity Microstructure," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 16, pp. 1491-1498. 1999.
- [11] Seim, H. E., Gregg, M. C., and Miyamoto, R. T. "Acoustic Backscatter from Turbulent Microstructure", *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 12, pp. 367-380, 1995.
- [12] Ross, "Sound Scattering from Oceanic Turbulence", *Geophys. Res. Lett.* 30, 1344.
- [13] Warren, J. D., Stanton, T. K., Wiebe, P. H., "Inference of Biological and Physical Parameters in an Internal Wave using Multiple Frequency Acoustic Scattering Data," *ICES J. Mar. Sci.*, Vol. 60, pp. 1033-1046, 2003.
- [14] Goodman Oeschger, J., "Ocean Acoustics Turbulence Study: Acoustic Scattering from an Axisymmetric Plume," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 91, pp. 3212-3227. 1992.
- [15] Stanton Wiebe, Chu, D., "Acoustic Characterization and Discrimination of Marine Zooplankton and Turbulence," *ICES J. Mar. Sci.*, Vol. 51, pp. 469-479, 1994.

الف- در یک روند ارسال و دریافت امواج ارسالی به هدف، طیف توزیع انرژی صوت دریافتی به واسطه بازتاب از جریان نفوذی دچار تغییرات خواهد شد و در نتیجه این موضوع در ردیابها اختلال ایجاد می‌کند.

ب- در هنگام ریزش پلوم محلول آب نمک رنگی به محیط از پیش چینه بندی شده، چون در محل ریزش، پلوم دارای تکانه و سرعت است، بنابراین نیروی جاذبه زیاد می‌شود. در نتیجه می‌توان به اعماق پایین نفوذ می‌نمائید و با توجه به آنکه به مرور زمان اثر نیروی شناوری افزایش می‌یابد، بنابراین پلوم رنگی در اعماق میانی قرار می‌گیرد و به صورت دماغه (سرخود) با سرعت  $0.22/0$  متر بر ثانیه به سمت جلو حرکت می‌کند همچنین هر چه سمت گیرنده نزدیک تر می‌شود، این دماغه به طرف اعماق بالاتر گسترده می‌شود. نتایج این آزمایش با آزمایش‌های بیدختی ۲۰۰۵ مطابقت داشتند. در ضمن پارامترهای بی بعد، همانندسازی پلوم آب نمک با جریان خروجی از خلیج فارس به دریای عمان مقایسه گردید.

ت- هنگامی که منبع صوتی در لایه جریان نفوذی نصب شده باشد، و گیرنده‌ها در بالا و پایین این جریان نصب شده باشند، با ورود پلوم رنگی، لحظه به لحظه پیک تا پیک سیگنال بیشتر می‌شود یعنی سیگنال در گیرندگی تقویت می‌شود. ولی هنگامی که منبع صوتی در لایه رنگی نصب شده باشد، با ورود پلوم، پیک تا پیک سیگنال، لحظه به لحظه کاهش می‌یابد.

ث- انتشار صوت در آب توسط عوامل اثرات پخش و میرایی از انرژی آن می‌کاهد. اتلاف میرایی، جذب، نشت به بیرون کانال، پراکندگی و شکست را در بر می‌گیرد. اتلاف با افزایش فرکانس، زیاد می‌شود، چرا که جذب بالا می‌رود. گرادیان‌های سرعت صوت، اثرات شکستی را نشان می‌دهند که ممکن است به کانونی شدن و یا واگرایی انرژی صوتی بینجامد.

ج- در همانندسازی جریان نفوذی در آزمایشگاه، طبق فرمول عمومی در آکوستیک، چنانچه در فرکانس‌های بالاتر یا مساوی این فرکانس، آزمایش شود، مخزن آب به عنوان محیط عمیق محسوب می‌شود. با توجه به مقیاس آکوستیکی بین محیط دریا و تانک در آزمایشگاه ( $k$  عدد موج و برابر  $c$  و  $c$  سرعت صوت در آب است.) و  $a$  شعاع موثر

- [16]-Oeschger, and Goodman, L., "Acoustic Scattering from a Thermally Driven Buoyant Plume," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 100, pp. 1451-1462, 2003.
- [17] Stephen Gerard Bowen, "Forward Scattering of a Pulsed Continuous Wave Signal Through Laminar and Thermal Plumes", United States Naval Academy, 1986.
- [18] Chen, C. T., "Speed of Sound in Seawater at High Pressures", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 62, No. 5, pp 1129-1135, 1977.
- [19] Bidokhti, A. A., and Griffiths, R. W., "The Role of Internal Waves in the Layering of Outflows from Semi-Enclosed Seas", 14<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, 2011.
- [20] Urick, R. J., Principles of Underwater sound, McGraw-Hill, USA, 1983.
- [21] Kalangi Pullarao Prasanth, "Modelling and Simulation of an Underwater Acoustic Communication Channel", Hochschule Bremen University of Applied Sciences, 2005.
- [22] Taner, M. T., Koehler, Complex seismic analysis: Geophysics", Vol. 44, pp. 1041-63, 2005.
- [23] Cohen, L., Time Frequency Analysis: Prentice Hall. 1995.
- [24] Wang P. H., "Closed-form Design of Maximally Flat FIR Hilbert Transformers, Differentiators, and Fractional Delayers by Power Series Expansion", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 389-398. 2001.
- [25] William, J., "Data Analysis Methods in Physical Oceanography", Underwater Sound and the Marine Mammal Acoustic Environment Guide to Fundamental Principles by David L. Bradley PHD. Richard Stern, 2008.