

بررسی اثر جریان نفوذی روی افت‌وخیزهای سیگنال آکوستیکی در آزمایشگاه

محمد اکبری‌نسب^{۱*}، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲، مسعود صدری‌نسب^۳، وحید چگینی^۴ و محمدهمدهی مهدی‌زاده^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

^۴ استادیار، موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، تهران، ایران

^۵ استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان، ایران

(دریافت: ۹۱/۲/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۱/۷/۱۸)

چکیده

از دیدگاه آکوستیکی، اقیانوس به‌طور گسترده متغیر است. وجود جریان نفوذی (برای مثال، خروجی خلیج فارس)، امواج داخلی و تلاطم ریزمقیاس، مشخصه افقی لایه‌بندی سرعت صوت آشفته می‌کند و باعث افت‌وخیزهای زمانی و مکانی انتشار صوت می‌شود. در این تحقیق علاوه بر شبیه‌سازی جریان نفوذی شوری در آزمایشگاه، نحوه افت‌وخیزهای سیگنال آکوستیکی که با ۱۰ عدد بسته موج سینوسی در بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز ایجاد شده را با جابه‌جایی منبع در بالا، پایین و داخل جریان نفوذی، مورد اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که چنانچه منبع و گیرنده در داخل لایه جریان نفوذی نصب شود، دامنه سیگنال در لحظات گوناگون ورود پلوم آب نمک، کاهش می‌یابد ولی چنانچه منبع در بالا و پایین این لایه جریان نفوذی نصب شده باشد، دامنه سیگنال افزایش می‌یابد (قانون اسنل). با اعمال فناوری trace envelop روی سیگنال‌های آکوستیکی ضبط شده، مشخص شد که شکل و فاز سیگنال با گذشت زمان تغییر می‌کند. این تحقیق نشان داد که جریان نفوذی، پدیده مهمی است که روی افت‌وخیزهای سیگنال‌های آکوستیکی تاثیر می‌گذارد. براساس محاسبات باور و همکاران، پهنای جریان خروجی (نفوذی) تنگه هرمز کمتر از ۱۰ کیلومتر است، در نتیجه می‌توان نتایج این شبیه‌سازی آزمایشگاهی را بر طبق رابطه مقیاس‌سازی آکوستیکی متناسب در نظر گرفت. $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sae} a_{sea}$ (ضخامت پدیده و k عدد موج) با آزمون میدانی در محدوده جریان نفوذی تنگه هرمز در بسامد ۱۵ هرتز

واژه‌های کلیدی: جریان نفوذی، افت‌وخیزهای سیگنال آکوستیکی، پوش دینامیکی، آزمایشگاه، بسته موج

Investigation of the effect of outflow intrusion on acoustical signal fluctuations in laboratory

Aakbarinasab, M.¹, AliakbariBidokhti, A. A.², Sadrinasab, M.³, Chegini, V.⁴ and Mehdizadh, M.M.⁵

¹Ph. D. Student of Physical Oceanography Khoramshahr Marine science and Technology University, Iran

²Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Associate Professor, Khoramshahr Marine science and Technology University, Khoramshahr, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Iranian National Center for Oceanography, Tehran, Iran

⁵Assistant Professor, Physical Oceanography Hormozgan University, Iran

(Received: 01 May 2012, Accepted: 09 Oct 2012)

Summary

From the acoustical oceanography point of view the ocean is a sophisticated environment. Existence of outflow intrusion (for instance, outflow of the Persian Gulf), internal waves, and small-scale turbulence perturb the horizontally stratified character of the sound

velocity and cause spatial and temporal fluctuations of the sound propagation. In this experimental study, we have investigated signals fluctuations over time (was powered by a 20 MHz/Arbitrary Waveform Generator Model DG 1022 set to generate a 10 cycle sinusoid burst at frequency of 120 kHz with amplitude of 20 volts peak-to-peak) in a pre-stratification environment outside of the intrusion of turbulent plume. All experiments were carried out in a glass tank 2.19 m long, 1.27 m wide and 0.8 m deep. Before the experiments, four transducers (of which three of them are transmitters and the rest of them as receiver) are mounted opposite to each other with a separation of 1.65 m on two iron bars inside the tank. The distance between each transducer is 0.14 m. These holders are facing each other at a distance 0.3m from the tank wall. Prior to the beginning of the experiments with stratification, the acoustic measurements were executed in fresh water. All received signals were sampled at 5 MHz in all experiments. A fourth-order Butterworth band-pass filter was applied to the received voltage time series, with cutoff frequencies at 110 and 130 kHz for the 120-kHz data. In case where a "filling box" stratification (Baines and Turner, 1969) is used, the tank was initially filled with fresh water to a depth of 0.48 m. The water was then stratified using a plume of dense salt solution falling from the end of small tube (a nozzle of 3 mm diameter) placed at 0.47 m from the base with a buoyancy flux of $F=g' \times V_0=5 \times 10^{-7} \text{ m}^4/\text{s}^3$. After the set-up of the "filling box" stratification in the tank (Fig 1), acoustic signals and hydrophysical data were measured simultaneously. Then to produce the outflow intrusions, a source of dyed salt solution with a density less than the previous case ("filling box") with volume flux of $2.1 \times 10^{-7} \text{ m}^4/\text{s}^3$ was entered into stratified environment. At the start of the experiment with plume intrusion the speed of the nose of the outflow increased with time. The intrusion is also thickened, and eventually split to generate a new tongue of dyed plume water growing beneath the first layer. The dye tracer in the outflow water was slowly advected upward to replace water entrained into the plume at shallower depths, and eventually reached to the source level. The outflow intrusion is produced at the start of the experiment at the location of the transmitter in the middle of the tank (at the depth of 0.22 m). The dyed outflow water is wedged-shaped with a sloping interface beneath. In different time intervals the acoustic and hydrophysics data are measured simultaneously, and then these signals in different times, based on the place of the plume outflow, are processed. After investigating the output signals, these results are found: when the transmitter and receiver is positioned into the outflow intrusion (dyed outflow) location, the signal amplitude is decreased at different moments of plume intrusion, but if the transmitter is positioned in the upper and lower part of the outflow intrusion, it causes the signal amplitude to increase (Snell's law). By applying trace envelope techniques on the received signals, shape of signal change was found with time. Thereby, results indicate that outflow intrusion could be important on acoustical signal fluctuations. Results indicate that outflow intrusion could be important in shapes of the received signals. Also we have observed the occurrence of major signal fluctuations over time is accordance with the sound speed vertical structure changes. It is noticed that this phenomenon is also taken place at the outflow of the Persian of Gulf to the Oman sea. The result of such simulation could be used with attention to the acoustic scale rule $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sae} a_{sea}$, (k is the wave number.) where a lab by thickness of this current at outflow of the Persian Gulf which is about <10 km.

Keywords: Stratified intrusions, Sound propagation, Trace envelope, Signals fluctuations-burst

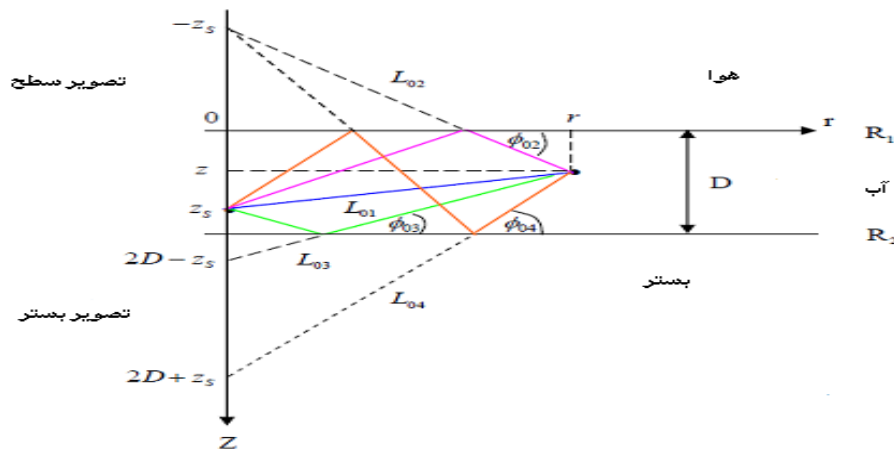
۱ مقدمه

(بیدختی، ۲۰۰۵). مقیاس عمودی این وارونگی‌ها حدود ۱۰-۱۰۰ متر و در مقیاس افقی در حدود ۱-۱۰۰ کیلومتر است (رادیک و هابرت، ۱۹۸۸ و استومل و فدروف، ۱۹۶۷). در این تحقیق سعی می‌شود که نحوه افت‌وخیزهای سیگنال‌های آکوستیکی در بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز در زمان‌های متفاوت ورود جریان نفوذی شوری به یک محیط از پیش چینه‌بندی شده را در محیط آزمایشگاه بررسی کرد.

۱-۲ نظریه انتشار در کانال

در این بخش با استفاده از فرمول‌هایی که بیان خواهد شد و نیز براساس فواصل حس‌گرها از یکدیگر و از دیواره‌ها، یک سیگنال را در آب تمیز مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهیم داد. اولین سیگنال دریافتی در صفحه اسکوپ، مربوط به سیگنال مستقیم است و سیگنال‌های بعدی که در صفحه اسکوپ مشاهده می‌شوند به‌خاطر پراکندگی‌های است که از بستر، سطح، دیواره‌ها و مانند آن مشاهده می‌شود؛ همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

فناوری ارسال سیگنال صوتی از میان لایه‌های متفاوت آب، در سامانه‌های مخابرات زیر آب کاربرد فراوانی دارد. سیگنال‌های آکوستیکی هنگامی که از میان لایه‌های آب عبور کنند، در زمان‌های متفاوت، دچار تغییراتی روی شکل و فاز می‌شوند. اقیانوس محیط پویا و دائماً در حال تغییر است، و هر کدام از پدیده‌های اقیانوسی دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند، که هر کدام به‌نحوی روی انتشار صوت اثر دارند. برای مثال پدیده‌هایی همچون جریانات، امواج داخلی و تلاطم‌های کوچک مقیاس، لایه‌بندی افقی، جریانات نفوذی و افت‌وخیزهای دما و شوری در راستای قائم باعث ایجاد تغییرات روی سیگنال آکوستیکی می‌شوند. هر کدام از این پدیده‌ها باعث ایجاد پژواک‌های روی سیگنال خروجی می‌شوند (برخووسیخ و لزانوف، ۱۹۸۲). جریان‌های نفوذی ترموهالین اغلب در نیم‌رخ‌های دما و شوری در اقیانوس مشاهده می‌شود. این جریانات نفوذی در نیم‌رخ‌ها دما و شوری به‌صورت افت‌وخیزهای بزرگ و یا وارونگی و یا الگوهای زیگزاگ مشاهده می‌شوند. این نوع جریان نفوذی در خروجی خلیج فارس به دریای عمان مشاهده می‌شود



شکل ۱. نحوه انتشار موج آکوستیکی در محیط کم‌عمق با نظریه پرتو.

که A : دامنه سیگنال صوتی، \hat{R}_1 ضریب بازتاب سطح، \hat{R}_2 ضریب بازتاب بستر k عدد موج، Φ_{M2} ، Φ_{M1} ، Φ_{M4} و Φ_{M3} زوایای بازتاب چهار شعاع ویژه و L_{m2} ، L_{m3} ، L_{m1} به ترتیب طول بردارهای جابه‌جایی مربوط به شعاع‌های ویژه DP (Direct Path)، RSR (Refracted RBR) (Refracted Bottom)، $RSRBR$ (Refracted Surface Refracted) و $Bottom$ Refracted در مرتبه $m+1$ از مرحله تولید منابع مجازی است و طول هر کدام از این مسیرها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} L_{01} &= \sqrt{r^2 + (z_s - z)^2} \\ L_{02} &= \sqrt{r^2 + (z_s + z)^2} \\ L_{03} &= \sqrt{r^2 + (2D - z_s - z)^2} \\ L_{04} &= \sqrt{r^2 + (2D + z_s - z)^2} \end{aligned} \quad (۲)$$

میدان کل در گیرنده در حالت کلی به صورت رابطه بیان می‌شود.

$$p(r, z, \omega) \cong A(\omega) \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\hat{R}_1^m(\varphi_{m1}, \omega) \hat{R}_2^m(\varphi_{m1}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m1}}}{L_{m1}} + \\ &\hat{R}_1^{m+1}(\varphi_{m2}, \omega) \hat{R}_2^m(\varphi_{m2}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m2}}}{L_{m2}} + \\ &\hat{R}_1^m(\varphi_{m2}, \omega) \hat{R}_2^{m+1}(\varphi_{m3}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m3}}}{L_{m3}} + \\ &\hat{R}_1^{m+1}(\varphi_{m2}, \omega) \hat{R}_2^{m+1}(\varphi_{m4}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m4}}}{L_{m4}} \end{aligned} \right\} \quad (۳)$$

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

$$\begin{aligned} L_{m1} &= \sqrt{r^2 + (2Dm - z_s + z)^2} \\ L_{m2} &= \sqrt{r^2 + (2Dm + z_s + z)^2} \\ L_{m3} &= \sqrt{r^2 + (2D(m+1) - z_s - z)^2} \\ L_{m4} &= \sqrt{r^2 + (2D(m+1) + z_s - z)^2} \end{aligned} \quad (۴)$$

که D عمق کل کانال است.

در شبیه‌سازی کانال، تعداد پرتوها منتشر شده از منبع متغیر و مضربی از چهار است. شکل ۱ مسیر انتشار چهار شعاع ویژه را نشان می‌دهد. در این شکل منبع در عمق $(0, z_s)$ قرار دارد و چهار مورد از مسیر پرتوهای استخراج شده از این منبع رسم شده است و گیرنده در عمق (r, z_s) در عمق z و به فاصله r از فرستنده، 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 و چون در روش تصویر، سطح و کف به صورت آینه کامل در نظر گرفته می‌شود، 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 است و در هر تکرار پس از بازتاب‌های متوالی چهار تصویر جدید ایجاد می‌شود. در روش تصویر، کف و سطح دریا در حکم آینه در نظر گرفته می‌شود. اولین پرتو در مسیر مستقیم (L_{01}) به گیرنده می‌رسد. پرتو بعدی در این شکل ابتدا به سطح برخورد می‌کند و سپس به گیرنده می‌رسد (L_{02}) . پرتو سومی ابتدا به بستر و سپس به گیرنده می‌رسد (L_{03}) و پرتو چهارمی ابتدا به سطح و سپس به بستر می‌رسد و در انتها در گیرنده دریافت خواهد شد. میدان آکوستیکی کل در گیرنده مجموع میدان هر کدام از این چهار پرتو تولید شده در فرستنده است.

$$p(r, z, \omega) \cong A(\omega) \left\{ \begin{aligned} &\frac{e^{-jkL_{01}}}{L_{01}} + \hat{R}_1(\varphi_{02}, \omega) \frac{e^{-jkL_{02}}}{L_{02}} \\ &+ \hat{R}_1(\varphi_{03}, \omega) \frac{e^{-jkL_{03}}}{L_{03}} \\ &+ \hat{R}_1(\varphi_{04}, \omega) \frac{e^{-jkL_{04}}}{L_{04}} \end{aligned} \right\} \quad (۱)$$

$$\hat{R}_i(\varphi, \omega) = \hat{R}_i\left(\frac{\pi}{2} - \varphi, \omega\right) = \hat{R}_i(\theta, \omega), \quad i=1, 2, .$$

۲ روش کار

۱-۲ معرفی کلی آزمایش‌ها و لایه‌بندی محیط با

محلول آب نمک

آزمایش‌ها در یک تانک شیشه‌ای به طول ۲۱۹ سانتی‌متر و عرض ۱۲۷ سانتی‌متر و عمق ۸۰ سانتی‌متر صورت گرفته است. قبل از اینکه شبیه‌سازی در این تانک عملی شود، ابتدا ۳ حس‌گر آکوستیکی در حکم فرستنده روی یک پایه آهنی با فاصله ۱۴ سانتی‌متر از یکدیگر در فاصله ۰/۳ متری از دیواره تانک قرار گرفته است و در طرف مقابل پایه، یک هیدروفون B&K مدل ۸۱۰۵ در عمق ۲۲ سانتی‌متر از کف تانک نصب شده است. تانک را تا عمق ۴۸ سانتی‌متر از آب شیر پر کردیم و سپس سیگنال‌های آکوستیکی در عمق‌های متفاوت در این آب را جمع‌آوری کردیم. طرح‌آوری از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این آزمایش را در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌کنید. برای لایه‌بندی کردن این محیط با آب نمک، از روش جعبه در حال پر شدن (Filling box) استفاده شده است (تونر، ۱۹۶۹). بدین صورت که ابتدا در ظرف جداگانه ۳۰ لیتر محلول آب نمکی را با چگالی $1160 \frac{kg}{m^3}$ با پمپ شیشه‌سوی ماشین و از راه شیلنگی با قطر 3mm به مدت دو روز با دبی $5 \times 10^{-7} m^3/s$ از سمت فرستنده‌ها وارد این تانک کردیم. پس از ایجاد Filling box (نیم‌رخ تغییرات شوری در سمت چپ شکل ۳ در لحظات تشکیل Filling box را نشان می‌دهد)، با قطع پمپ سیگنال‌های آکوستیکی در عمق‌های متفاوت اندازه‌گیری و ضبط شدند. در ضمن با استفاده از دستگاه EC متر، داده‌های شوری و دما با فواصل ۳ سانتی‌متر در هر عمق از سطح تا کف در فاصله ۷۰ سانتی‌متری از محل ریزش پلوم اندازه‌گیری شد (شکل ۳). در روز سوم که محیط چینه‌بندی شده بود، محلول آب نمکی را که با پودر رنگی پرمنگنات مخلوط کرده بودیم، با چگالی

$1020 \frac{kg}{m^3}$ و نیز دبی کمتر از روز قبل ($2.1 \times 10^{-7} m^3/s$)

در این محیط چینه‌بندی شده از محل فرستنده‌ها وارد کردیم. این پلوم باعث ایجاد موج داخلی در این محیط چینه‌بندی می‌شود (بیدختی، ۲۰۰۵). این پلوم رنگی به صورت آرام در عمق ۲۲ سانتی‌متر از سطح آب قرار می‌گرفت. با گذشت زمان این پلوم رنگی (جریان نفوذی) به صورت گوه‌ای به سمت هیدروفون حرکت می‌کرد. در لحظه‌های متفاوت حرکت پلوم به سمت هیدروفون، داده‌های آکوستیکی و هیدروفیزیکی هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شد. سپس این سیگنال‌ها در لحظه‌های متفاوت براساس محل قرارگیری پلوم (عکسبرداری)، با یکدیگر مقایسه و بررسی شدند.

۲-۲ محاسبه پارامترهای بی‌بُعد جریان نفوذی

پارامترهای بی‌بُعد حاکم بر جریان نفوذی پلوم عبارت‌اند از عدد پرانتل $Pr = \frac{v}{k_T}$ که v معرف وکشسانی جنبشی و k_T معرف ضریب پخش شوری است، شیب نسبت‌های $\frac{H}{L}$ و $\frac{H}{W}$ (که L, H, W به ترتیب عمق، طول و پهنای تانک هستند) است و شار شناوری بی‌بُعد پلوم عبارت است از:

$$F_p = \frac{F'}{H^4 N_0^3} \quad (5)$$

که در اینجا $F' = Qg' = Q \Delta \rho / \rho g$ شار شناوری و Q دبی حجمی شارش منبع و N_0 بسامد شناوری محیط است که از رابطه زیر هنگامی که D برابر H باشد، محاسبه می‌شود (جعبه در حال پر شدن، بینز و ترنر، ۱۹۶۹):

$$N = F^{1/3} \times (2E)^{(-2/3)} \pi^{(-1/3)} D^{(-1/3)} [2.18(z/D)^{(-5/3)} + 0.279(z/D)^{(-7/3)} + 0.083(z/D)^{1/3} \dots]^{1/2} \quad (6)$$

F شار شناوری پلوم چینه‌بندی کننده و Z راستای قائم است. علاوه بر اینها نسبت اندازه پخش فرارفتی به

مولکولی با عدد Peclet

$$Pe = F^{1/3} H^{2/3} \quad (7)$$

و همانند عدد رینولدز محاسبه می شود.

سرعت جریان خروجی پلوم با رابطه زیر محاسبه می شود.

$$U = 1.37 \times E^{1/3} \times F^{1/3} H^{1/6} W^{1/2} \quad (8)$$

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

با توجه به اینکه چگالی پلوم در هنگام ایجاد جریان نفوذی برابر ۱۰۲۰ کیلوگرم بر متر معکب و نیز دبی 2.1×10^7 بود، می توان شار شناوری پلوم نفوذی را از رابطه (۹) محاسبه کرد

$$F = Qg' = Q \frac{\Delta\rho}{\rho} g = \quad (9)$$

$$2.1 \times 10^7 \times \frac{20}{1000} \times 10 = 4.4 \times 10^{-8} \frac{m^4}{s^3}$$

و بسامد شناوری در محل سطح آب برابر،
 $N_0(z=H) = 6.6 \times 10^{-5} s^{-1}$ می شود؛ شار شناوری بی بُعد پلوم نفوذی برابر است با:

$$F_p = \frac{F'}{H^4 N_0^3} = 0.0342 \quad (10)$$

در این آزمایش با توجه به اینکه عمق پلوم ۴۶ سانتی متر، شار شناوری $4.4 \times 10^{-8} m^4/s^3$ و پهنای تانک برابر ۱۲۷

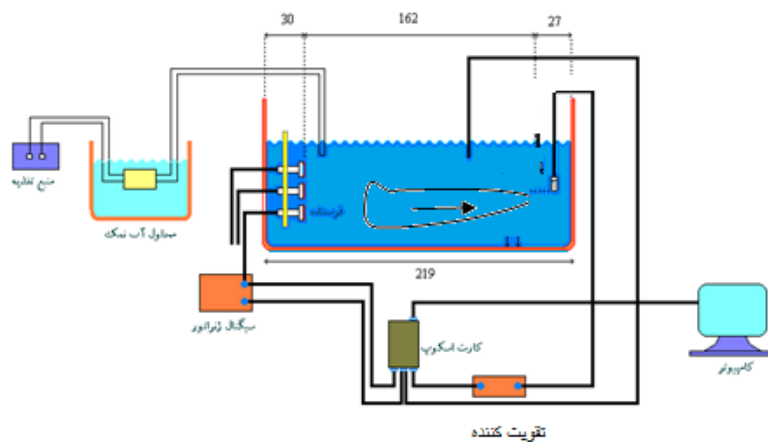
سانتی متر است می توان سرعت جریان خروجی را محاسبه کرد (بیدختی، ۲۰۰۵).

$$U = 1.37 \times E^{1/3} \times F^{1/3} H^{1/6} W^{1/2} = \quad (11)$$

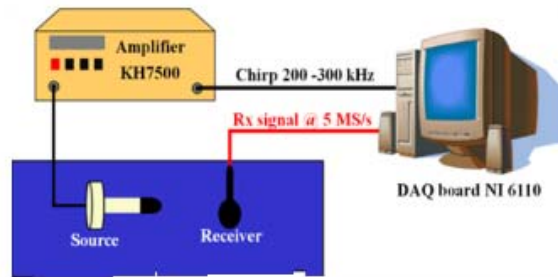
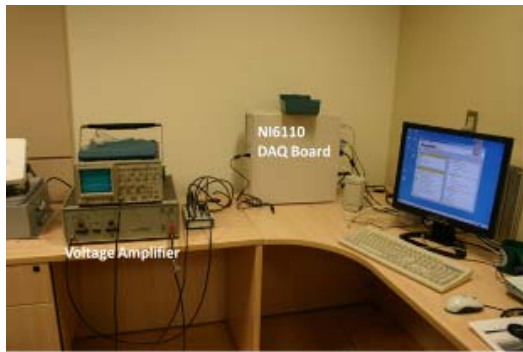
$$1.37 \times 0.1^{1/3} \times (4.4 \times 10^{-8})^{1/3} \times 0.46^{1/6} \times 1.27^{1/2} = 0.0022 m/s$$

۳-۲ چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی

چون این آزمایش در یک محیط کوچک صورت می گیرد، بنابراین بایستی از گیرنده های غیرجهتی حس گر استفاده شود. با توجه به اینکه لایه هایی که با جریان نفوذی در آزمایشگاه تشکیل می شوند مقیاسی از مرتبه سانتی متر دارند، سیگنال صوتی بایستی در بسامدهای زیاد داده برداری شوند، که بتوان تاثیر این لایه ها را روی انتشار صوت مورد بررسی قرار داد. در این آزمایش از ۳ چشمه آکوستیکی (فرستنده) ساخت شرکت Furuno با بسامد مرکزی ۱۲۰ کیلوهرتز و شعاع ۳،۵ سانتی متر و از هیدروفون B&K مدل ۸۱۰۵ در عمق ۲۲ سانتی متر به عنوان گیرنده استفاده شد. طرحواری از این چیدمانی و تجهیزات مورد استفاده و نوع اتصالات در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. چیدمانی حسگرها برای اندازه گیری پراکنندگی در حالت هیدروفون B&K مدل ۸۱۰۵



شکل ۳. تجهیزات مورد نیاز برای ثبت داده‌های آکوستیکی.

۲-۵ محاسبه سرعت صوت

تغییرات سرعت صوت، در اثر تغییرات دما و شوری در محیط‌های آبی، تنها عاملی است که باعث تغییرات سیگنال‌های آکوستیکی دریافتی می‌شود. در این تحقیق برای محاسبه سرعت صوت از فرمولی که چن و میلرو (۱۹۷۷) عرضه کرده، استفاده شده است. شکل ۴ روند تغییرات شوری و سرعت صوت در زمان‌های متفاوت که در فاصله ۷۰ سانتی‌متر از محل ورود پلوم در هنگام شبیه‌سازی جریان نفوذی، اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهد، پلوم ورودی در عمق تقریباً ۲۲ سانتی از کف در لحظات اول قرار گرفته است.

۲-۶ بررسی راست‌آوری فرستنده (چشمه) در بسامد

۱۲۰ کیلوهرتز

برای اینکه از تعداد بازتاب‌های دیواره و کف تانک در آنالیز داده‌های آکوستیکی کاسته شود، بایستی از فرستنده‌ها غیرهم‌جهت استفاده شود. در این آزمایش‌ها چشمه‌های غیرهم‌جهت دایره‌ای به شعاع ۳/۵ سانتی‌متر در حکم فرستنده استفاده شد. راست‌آوری این نوع چشمه در جهت افقی و عمودی به دلیل متقارن بودن سطح ارسال امواج یکسان و عبارت است از:

۲-۴ مشخصات سیگنال تولید شده در آزمون آزمایشگاهی

برای تولید سیگنال ابتدا از یک تولیدکننده سیگنال که در این آزمایش یک Function 20 MHz/Arbitray Waveform Generator Model DG 1022 استفاده شد که سیگنالی را با مشخصات زیر به کانال ۱ اسیلو اسکوپ دیجیتال (دوگانه) ارسال می‌کرد: بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز، پیک تا پیک ولتاژ ورودی: ۲۰ ولت، تعداد دور: ۱۰ عدد، تاخیر تپ (پالس): ۱۰۰ میلی‌ثانیه، نوع تپ: بسته موج (Burst) و نوع سیگنال ارسالی: سینوسی. سپس این سیگنال روی هر کدام از گیرنده‌ها به صورت جداگانه ارسال می‌شود. سیگنال این گیرنده‌ها به سیگنال آکوستیکی تبدیل می‌شود و این سیگنال با هیدروفون B&K مدل ۸۱۰۵ در طرف مقابل دریافت می‌شود. قبل از اینکه این سیگنال در کارت اسکوپ وارد شود، با استفاده از پری آمپلی‌فایر با مشخصات الف- پهنای باند 30kHz-800kHz ب- بهره ۵۰ db تقویت شده و سپس خروجی این پری آمپلی‌فایر به اسکوپ دیجیتال ارسال می‌شد و در نهایت سیگنال‌ها از کارت اسکوپ به رایانه وارد و در فایل‌های جداگانه ذخیره می‌شدند. در ضمن در کل آزمایش‌ها، همه تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در این آزمایش برای حذف نوفه برق شهر به زمین متصل شده بودند.

با توجه به اینکه فاصله گیرنده و فرستنده ۱/۶۵ متر و با فرض اینکه سرعت صوت برابر ۱۳۷۵ متر بر ثانیه است، بنابراین $t_1 = \frac{x_0}{c} = 1.65/1375 = 1.2ms$ که در آن، t_1 فاصله بین ابتدای سیگنال ورودی تا ابتدای سیگنال دریافتی است. بنابراین تا زمان ۱/۲ ms در شکل ۷، تپ مستقیم ارسالی است که گیرنده دریافت می کند.

امواج پس از ارسال از فرستنده به هیدروفون می رسند سپس به دیواره پشت هیدروفون برخورد می کنند و بازتاب می یابند. پس از آن با توجه به اینکه هیدروفون، همه جهته است، بنابراین سیگنال بعدی در اسیلو اسکوپ با دیواره مقابل فرستنده ها بازتاب می یابد.

در نتیجه، $x = 1.65 + 0.27 = 1.92m$ ، $t_1 = \frac{x}{c} = 1.92/1375 = 1.4ms$ پس از برخورد به دیواره پشت هیدروفون، دوباره به دیواره مقابل طرف هیدروفون (سمت فرستنده) برخورد می کند و با بازتاب مجدد به سمت هیدروفون می رسد. بنابراین کل مسافت طی شده برابر است با: $x = 1.65 + 0.27 + 0.27 + 1.65 + 0.3 + 0.3 + 1.62 = 6.6m$ بنابراین، $t_1 = \frac{x}{c} = 6.6/1375 = 4.8ms$ در این تحقیق بایستی برای بررسی اثر ورود پلوم به این محیط تا زمان 1.5ms در تجزیه و تحلیل سیگنال استفاده شود.

$$B(\theta) = \left[\frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right]^2 \quad (7)$$

که در آن، z_1 تابع بسل نوع اول و k عدد موج مربوط به بسامد کار چشمه و برابر است با: $k = \frac{2\pi f}{c}$ در این بسامد است. راستآوری این چشمه ۱۰/۸ درجه است. در زاویه $+5/4$ و $-5/4$ نسبت به محور آکوستیکی شدت 3db کاهش یافته است، بنابراین در این بسامد، این حس گر ۱۵ سانتی متر پرتو را نسبت به خط افق بالا و ۱۵ سانتی متر نسبت به خط افق پایین مورد تاثیر قرار می دهد (شکل ۵).

$$x = \arctan(10.8) \times 1.65 = 15$$

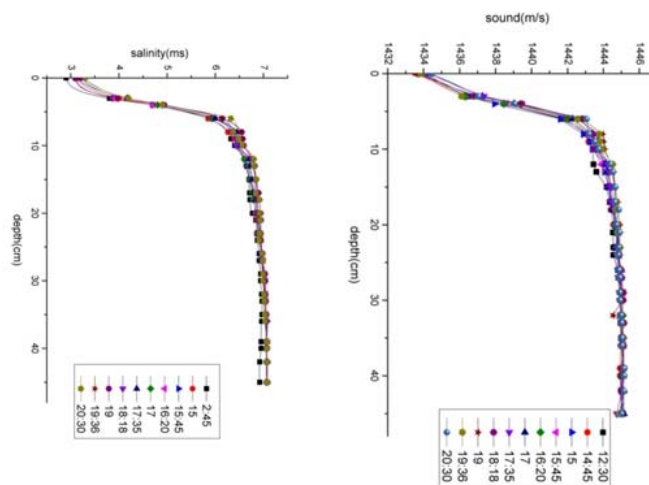
۳ نتایج

۳-۱ تجزیه و تحلیل سیگنال های آکوستیکی در بسامد

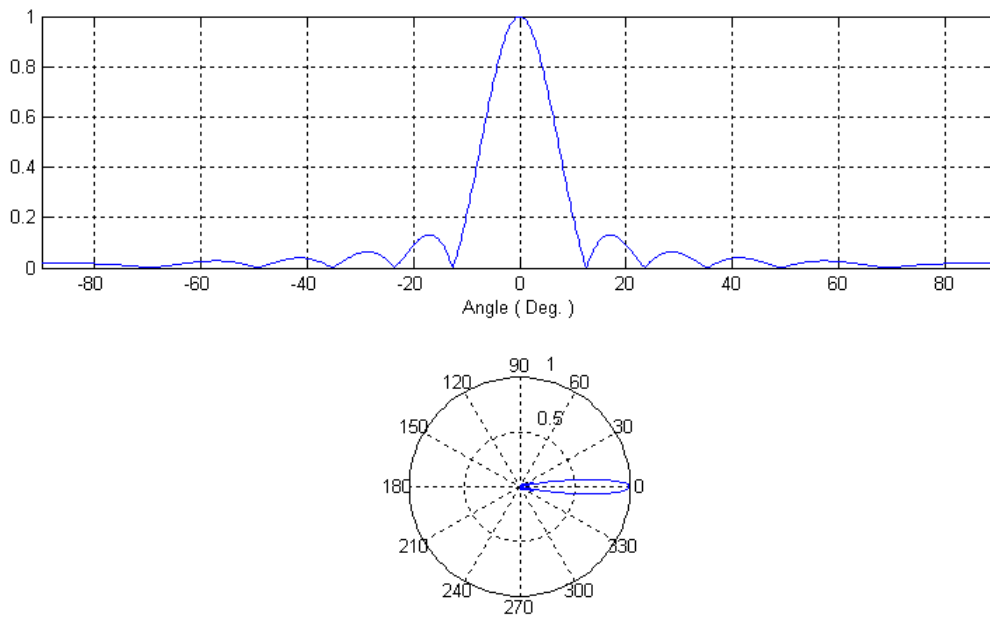
۱۲۰ کیلوهرتز

الف- بررسی سیگنال های با اندازه گیری مستقیم مشخصات تانک

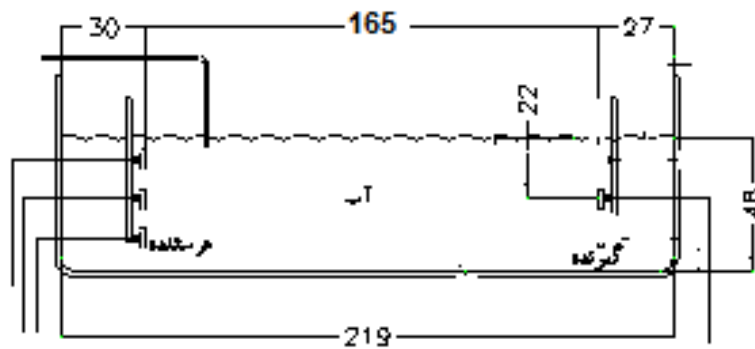
در این تحقیق برای متمایز کردن پژواک های سیگنال های آکوستیکی، ابتدا داده آکوستیکی در آب تمیز (همگن)، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده می شود. شکل ۶ فواصل بین فرستنده ها و گیرنده را نشان می دهد.



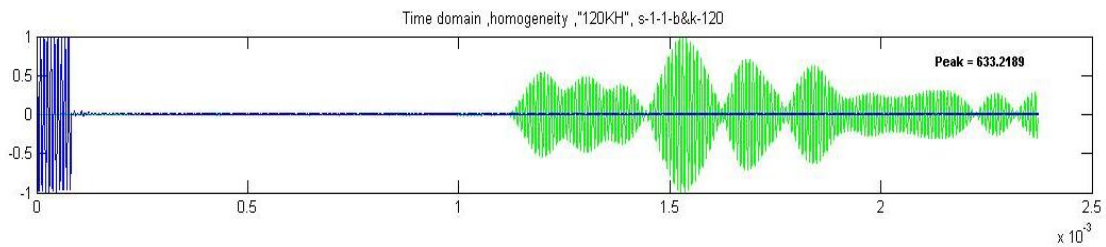
شکل ۴. تغییرات نیم رخ شوری (سمت چپ) و تغییرات نیم رخ سرعت صوت (سمت راست) در هنگام Filling box.



شکل ۵. الگوی تابش چشمه به ابعاد ۷ سانتی‌متر در بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز.



شکل ۶. فواصل بین فرستنده‌ها و هیدروفون در سناریو اندازه‌گیری سیگنال آکوستیکی.



شکل ۷. سیگنال دریافتی اسیلو اسکوپ منبع ۸ سانتی‌متر و هیدروفون ۲۲ سانتی‌متر.

۲-۳ تجزیه تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی در چیدمان‌های گوناگون

در این آزمایش، سناریو اندازه‌گیری سیگنال‌های آکوستیکی در سه حالت صورت گرفت: الف- فرستنده در عمق ۸ سانتی‌متر و هیدروفون در عمق ۲۲ سانتی‌متری. ب- فرستنده در عمق ۲۲ سانتی‌متر و هیدروفون در عمق ۲۲ سانتی‌متری. ج- فرستنده در عمق ۳۶ و هیدروفون در عمق ۲۲ سانتی‌متری. پس از اینکه سیگنال‌های خروجی در گیرنده‌ها در مکان‌های و زمان‌های متفاوت ثبت شدند، ابتدا نوفه‌های موجود در داده‌ها را با استفاده از فیلتر باتروت مرتبه چهارم در بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز باند پهن بین ۱۱۰ و ۱۳۰ کیلوهرتز حذف کردیم. سپس با توجه به نتایجی که در بخش قبلی حاصل شد می‌بایستی فقط داد‌های که تا زمان 1.4ms ضبط شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شود. تغییرات پیک تا پیک سیگنال در لحظه‌های متفاوت ورود پلوم به محیط چینه‌بندی شده و آب همگن، در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول یک مشاهده می‌شود، هنگامی که فرستنده در عمق ۲۲ سانتی‌متری یعنی در محل قرارگیری پلوم رنگی (جریان نفوذی) است با گذشت زمان دامنه سیگنال دریافتی لحظه‌به‌لحظه در حال کاهش است. ولی هنگامی که منبع در بالا (۸ سانتی‌متری)، پایین (۳۶ سانتی‌متری) جریان خروجی (جریان رنگی) نصب شود، ولی گیرنده در مکان قبلی (۲۲ سانتی‌متری) نصب

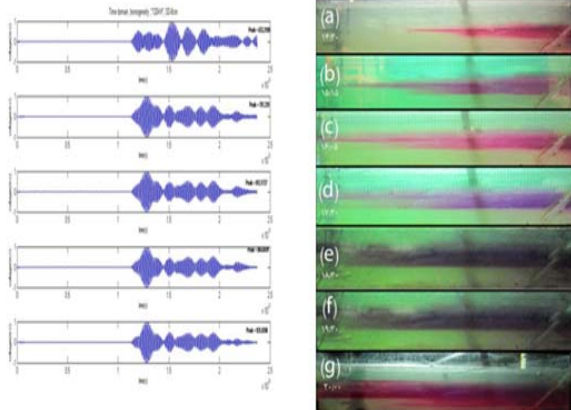
شود، دامنه سیگنال خروجی لحظه‌به‌لحظه با نفوذ پلوم در حال افزایش است. همه سیگنال‌های دریافتی پس از اعمال فیلتر به‌صورت نرمال شده در شکل‌های ۶، ۷ و ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، شکل سیگنال در آب همگن با آب ناهمگن بسیار متفاوت است و این به سبب وجود تغییرات اضافی توزیع شوری و در نتیجه تغییر سرعت صوت در آب ناهمگن است.

الف- منبع در عمق ۸ سانتی‌متری

در این آزمایش، سیگنال‌های دریافتی را در آب همگن- در حالت جعبه در حال پر شدن و نیز در لحظات متفاوت ورود پلوم به محیط چینه‌بندی شده در شکل ۸ نشان داده شده است. در سمت راست شکل ۸، تصویر جریان نفوذی رنگی در لحظات متفاوت مشاهده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها و در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان و ورود جریان نفوذی، دامنه سیگنال دریافتی لحظه‌به‌لحظه در حال افزایش است. در این سناریو چون در محل فرستنده سرعت صوت از محل گیرنده کمتر است، بنابراین پرتوها تمایل دارند که به سمت سطح بیشتر خم شوند و در نتیجه در گیرنده شدت دامنه بیشتر خواهد شد. در این شکل روند تغییرات شکل سیگنال به‌واسطه ورود پلوم رنگی بیشتر در زمان ۱/۳ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد.

جدول ۱. تغییرات پیک تا پیک سیگنال در لحظه‌های متفاوت ورود پلوم به محیط چینه‌بندی شده.

| عمق فرستنده- عمق گیرنده (cm) | دامنه سیگنال خروجی در آب همگن mv | دامنه سیگنال خروجی mv در ساعت ۱۵:۳۰ | دامنه سیگنال خروجی mv ساعت ۱۶:۲۰ | دامنه سیگنال خروجی mv ساعت ۱۸:۳۰ | دامنه سیگنال خروجی mv ساعت ۲۰:۳۰ |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| ۸- ۲۲ | ۶۳۳ | ۷۹۷ | ۸۱۲ | ۸۶۴ | ۹۲۵ |
| ۲۲- ۲۲ | ۹۲۷ | ۸۷۰ | ۸۴۴ | ۸۱۹ | ۷۴۰ |
| ۳۶- ۲۲ | ۵۳۳ | ۷۴۰ | ۷۴۲ | ۷۸۶ | ۸۱۱ |

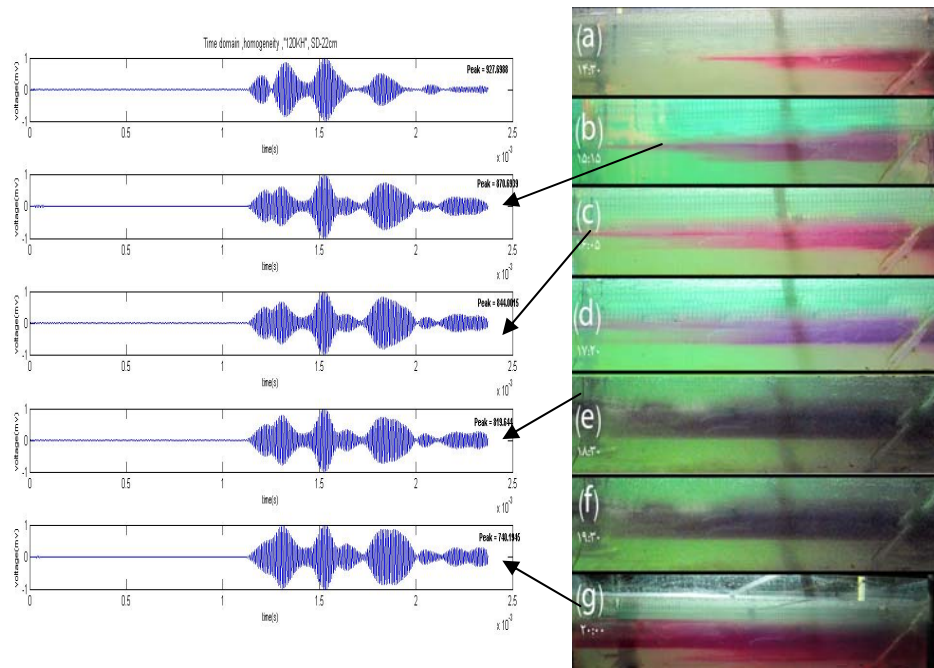


شکل ۸. سیگنال‌های دریافتی از بالا به پایین آب همگن، جعبه در حال پُر شدن، ساعت ۱۵:۳۰، ساعت ۱۶:۲۰، ساعت ۱۸:۳۰، منبع عمق ۸ سانتی متری و گیرنده در ۲۴ سانتی متری.

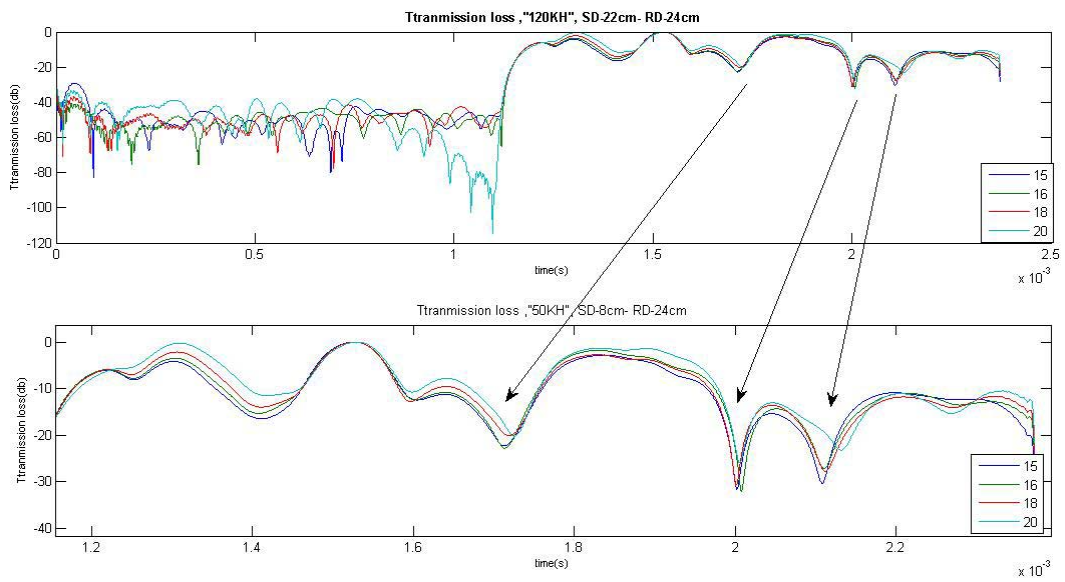
سمت راست جابه‌جا شده است و نیز ملاحظه می‌شود که در زمان $1/4$ میلی‌ثانیه به اندازه -5db بین لحظات متفاوت ورود پلوم اختلاف دارد و علت این جابه‌جایی زمانی و اختلاف، تلفات انتقال و ایجاد موج داخلی است. بنابراین ایجاد موج داخلی (در اثر جریان نفوذی) به محیط باعث افزایش سطح جعبه با زمان می‌شود.

ج- منبع در عمق ۳۶ سانتی متری در این آزمایش، سیگنال‌های دریافتی را در آب همگن- در حالت جعبه در حال پُر شدن و نیز در لحظات متفاوت ورود پلوم به محیط چینه‌بندی شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱ سمت راست، تصویر جریان نفوذی رنگی را در لحظه‌های متفاوت مشاهده نشان داده است. در این حالت در لحظه‌های متفاوت ورود پلوم در بخش اوایل سیگنال (تا $1/4$ میلی‌ثانیه) تغییراتی در شکل سیگنال مشاهده نمی‌شود فقط هنگامی که سیگنال به دیواره پشت هیدروفون (گیرنده) برخورد می‌کند، به‌خاطر تداخل با سیگنال‌های محیط، باعث تغییراتی در شکل سیگنال می‌شود. در این شکل در ردیف بالا ملاحظه می‌شود که شکل سیگنال با بقیه سیگنال‌ها بسیار متفاوت است، این تفاوت به‌خاطر تغییرات سرعت صوت در آب همگن (تمیز) و غیرهمگن است.

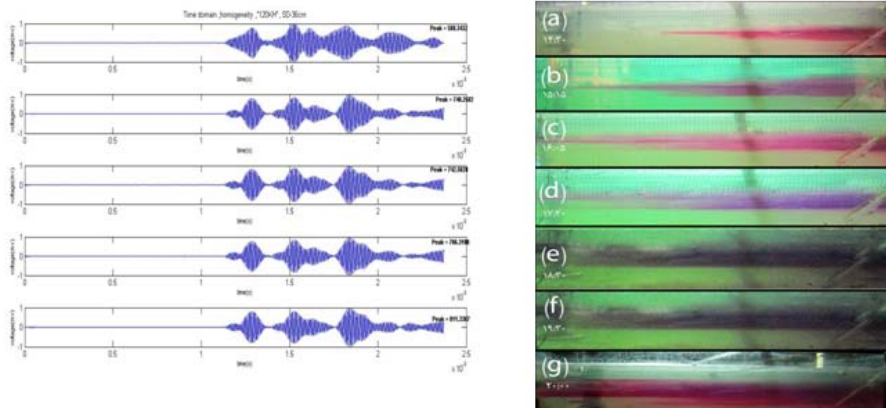
ب- منبع در عمق ۲۲ سانتی متری در این آزمایش، سیگنال‌های دریافتی در آب همگن در حالت جعبه در حال پُر شدن و نیز در لحظات متفاوت ورود پلوم به محیط چینه‌بندی شده در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل ۹ سمت راست، تصویر جریان نفوذی رنگی در لحظات متفاوت مشاهده، نشان داده شده است. هنگامی که منبع در داخل لایه جریان نفوذی (عمق ۲۲ سانتی متری) نصب شده باشد تا زمان $1/4$ میلی‌ثانیه دو مُد متمایز را در لحظات اولیه پلوم مشاهده می‌کنیم ولی با گذشت زمان و ورود پلوم رنگی، فقط یک مد در سیگنال خروجی مشاهده می‌شود. بنابراین این جریان باعث تغییرات در دامنه و فاز سیگنال خروجی می‌شود. ولی هنگامی که منبع در عمق ۸ سانتی متر نصب شده باشد، در لحظات اولیه سیگنال (در حدود $1/29$ میلی‌ثانیه) تغییرات خیلی محسوسی در شکل سیگنال ملاحظه می‌شود. برای بررسی روند تغییرات پوش سیگنال در لحظات ورود پلوم، از فناوری trace envelop و تبدیل هیبرت استفاده شده است (پای، ۲۰۰۱). نتایج اعمال این فناوری روی داده‌های آکوستیکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، سیگنال زمانی دریافت شده با گذشت زمان به اندازه ۲۴ میکروثانیه به



شکل ۹. سمت چپ: سیگنال‌های دریافتی از بالا به پایین آب همگن، جعبه در حال پر شدن، ساعت ۱۵:۳۰، ساعت ۱۶:۲۰- ساعت ۱۸:۳۰، ساعت ۲۰:۳۰، سمت راست: تصاویر گرفته شده در لحظات متفاوت ورود پلوم رنگی منبع عمق ۲۲ سانتی متری و گیرنده در ۲۴ سانتی متری.



شکل ۱۰. مسیر دینامیکی سیگنال خروجی در لحظه‌های متفاوت ورود پلوم رنگی، منبع ۲۲ سانتی متر، گیرنده: ۲۲ سانتی متری.



شکل ۱۱. سیگنال‌های دریافتی از بالا به پایین، آب همگن، جعبه در حال پُر شدن، ساعت ۱۵:۳۰، ساعت ۱۶:۲۰، ساعت ۱۸:۳۰، منبع عمق ۳۶ سانتی‌متری و گیرنده در ۲۴ سانتی‌متری.

متری مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳ داده‌های مشاهده‌ای شوری و دما برخی ایستگاه نمایش‌ها داده شده است. در این شکل نیز تغییرات سرعت صوت محاسبه شده با این داده‌ها در این ایستگاه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در این نیم‌رخ‌ها مشاهده می‌کنید، علاوه بر اینکه جریان نفوذی در نیم‌رخ دما و شوری مشاهده می‌شود در نیم‌رخ سرعت صوت نیز این تغییرات دیده می‌شود.

برای همانندسازی آکوستیکی بین محیط دریا و تانک در آزمایشگاه از یک رابطه عمومی $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sea} a_{sea}$ استفاده می‌شود (برون، ۱۹۹۳). k عدد موج و برابر $\frac{w}{c}$ (که، $w=2\pi \times c$ و c سرعت صوت در آب است.) و a شعاع موثر پراکندگی است. در آزمایش شبیه‌سازی انتشار صوت در تانک آب با بسامد ۱۲۰ کیلو هرتز، پهنای جریان برابر ۱۰ سانتی‌متر شد (برطبق تصاویر گرفته شده از جریان نفوذی). در نتیجه برطبق تناسب $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sea} a_{sea}$ می‌توان این آزمایش را با توجه به اینکه پهنای جریان نفوذی تنگه هرمز مطابق جدول ۲ برابر ۸ کیلومتر است را با بسامد ۱,۵ هرتز در تنگه هرمز، همانندسازی کرد و همین نتایج را می‌توان در تنگه هرمز و یا مکان‌های مشابه دریایی استفاده کرد.

۳-۳ قیاس‌سازی نتایج آزمایشگاهی با محیط واقعی در جریان خروجی خلیج فارس

جریان نفوذی از نوع جریان‌های گرانی درونی است که در نیم‌رخ‌های شوری، دما و چگالی، به صورت یک دماغه خود را نشان می‌دهد. در محیط‌های چینه‌بندی شده از نظر چگالی، وقتی جریان سومی با چگالی متوسط به محیط نفوذ می‌کند، به صورت یک جریان نفوذی در می‌آید که مشابه جریان گرانی است. این نوع جریان در خروجی خلیج فارس نیز مشاهده شده است. باور و همکاران (۲۰۰۰) وجود این وارونگی را با کمک داده‌های اقیانوس‌شناسی نشان دادند و مشخصات پارامترهای جریان خروجی تنگه هرمز را به صورت جدول ۲ عرضه کردند.

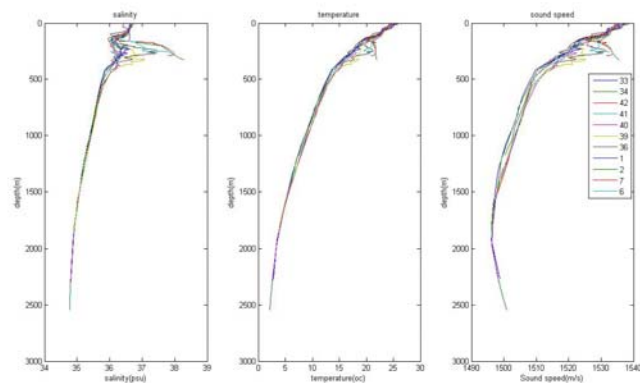
در این تحقیق همان‌طور که باور و همکاران (۲۰۰۰) مشخصات این جریان را مشخص کردند، با استفاده از اندازه‌گیری‌های پروژه بین‌المللی Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) سال ۱۹۹۶ در دریای عمان (TSPP) (۱۹۹۶)، پارامترهای هیدروفیزیکی این جهان مورد بررسی قرار داده شد. با رسم نیم‌رخ‌های پارامترهای هیدروفیزیکی مشاهده شد (شکل ۱۳) که تقریباً در همه ایستگاه‌ها وارونگی دما و شوری بین اعماق ۱۲۰ تا ۲۷۶

جدول ۲. مشخصات پارامترهای خروجی جریان خروجی تنگه هرمز (باور و همکاران، ۲۰۰۰).

| مقدار | پارامتر | مقدار | پارامتر |
|-------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| ۸۰ | عمق تپه تنگه هرمز (متر) | ۳۰ کیلومتر | پهنای |
| ۲۰۰-۴۰۰ | عمق جریان نفوذی (متر) | ۰،۱۷ (زمستان و تابستان) | سرعت جریان خروجی تنگه هرمز |
| ۲۰۰ (زمستان) ۳۲۰ (تابستان) | ارتفاعی از مکانی که پلوم نسبت به جریان نفوذی واریز کمی شود (متر) | ۴۵ (تابستان و زمستان) | ضخامت جریان خروجی (متر) |
| کمتر از ۱۰ | پهنای جریان نفوذی (کیلومتر) | ۰،۰۳۲ (زمستان) ۰،۰۱۹۴ (تابستان) | شتاب کاهش یافته (متر بر مجذور ثانیه) |
| ۰،۰۰۵ | بسامد شناوری جریان نفوذی (s^{-1}) | ۷۳۴۴ (زمستان) و ۴۴۵۲ (تابستان) | شار شناوری $m^4 s^{-3}$ |



شکل ۱۲. ایستگاه‌های داده‌برداری شده در فصل بهار ۱۹۹۶ در دریای عمان.



شکل ۱۳. پارامترهای هیدروفیزیکی خلیج عمان در فصل بهار.

۴ نتیجه گیری

مراجع

- Baines, W. D. and Turner, J. S., 1969, Turbulent buoyant convection from a source in a confined region, *J. Fluid. Mech.*, **37**, 51-80.
- Bidokhti, A. A., 2005, Shear-induced spitting of a plume outflow in a stratified enclosed basin, *Journal of Marine Science*, **34**(2), 192-211.
- Bower, A. S., Hunt, H. D., and Price, J. F., 2000, Character and dynamics of the Red Sea and Presian Gulf outflows, *J. Geophys. Res.* **105**, 6387-6414.
- Brekhovskikh, L. M. and Lysanov, Yu. P., 1982, *Fundamentals of ocean acoustics*, Springer, 279 pages.
- Chen, C. T. and Millero, F. J., 1977, Speed of sound in seawater at high pressures, *J. Acoust. Soc. Am.* **62**(5), 1129-1135.
- Clarence, S. Clay and Herman M., 1977, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, New York, distributors for the U.S. and Canada, Elsevier North-Holland.
- Pei, S. C., and Wang, P. H., 2001, Closed-form design of maximally flat FIR Hilbert transformers, differentiators, and fractional delayers by power series expansion, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, **48**(4), 389-398.
- Ruddick, B. and Hebert, D., 1988, The mixing of Meddy "Sharon". In: Nihoul, J.C.J., Jamart, B.M. (Eds.), *Small-Scale Turbulence and Mixing in the Ocean*, Elsevier, Amsterdam, 249-262.
- Stephen G., B., 1993, Forward scattering of a pulsed continuous wave signal through laminar and turbulent thermal plumes, National Technical Information Service.
- Stommel, H. and Fedorov, K. N., 1967, Small scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao, *Tellus*, **21**, 306-325.
- <http://www.nodc.noaa.gov/GTSPP/document/reports/gtspp/wash96/wash96.htm#annex2>.
- در این آزمایش ضمن شبیه سازی جریان نفوذی شوری در آزمایشگاه، نحوه انتشار سیگنال آکوستیکی در این محیط را بررسی کردیم. با بررسی افت و خیز سیگنال در عمقها و زمانهای متفاوت در حین ورود پلوم آب نمک به یک محیط از پیش چینه بندی شده مشخص شد که محل قرارگیری چشمه صوتی در تانک آب در لحظه های متفاوت، باعث تغییرات در شکل و زمان (فاز) سیگنالها در گیرنده می شود. همانطور که در متن بیان شد، پلوم دومی که با چگالی کمتری وارد این محیط از پیش چینه بندی شده، وارد می شود، باعث ایجاد وارونگی شوری (وارونگی سرعت صوت) خواهد شد و در نتیجه بر طبق قانون اسنل باعث شکست مسیر پرتوها خواهد شد. هنگامی که فرستنده در عمق ۲۲ سانتی متری قرار دارد، یعنی در محل قرارگیری پلوم رنگی (جریان نفوذی) با گذشت زمان دامنه سیگنال دریافتی لحظه به لحظه در حال کاهش است. ولی هنگامی که منبع در بالا (۸ سانتی متری) و پایین (۳۶ سانتی متری) جریان خروجی (جریان رنگی) نصب شود ولی گیرنده در مکان قبلی (۲۲ سانتی متری) نصب شود، دامنه سیگنال خروجی لحظه به لحظه با نفوذ پلوم در حال افزایش است. در ضمن بر طبق رابطه $k_{lab} a_{lab} \approx k_{sac} a_{sea}$ نتایج این آزمایش (بسامد ۱۲۰ کیلو هرتز و ضخامت جریان نفوذی ۱۰ سانتی متر) را با توجه به اینکه پهنای جریان نفوذی در تنگه هرمز ۸ کیلومتر است می توان با بسامد ۱/۵ هرتز همانند سازی آکوستیکی را در نظر گرفت.