

## ارزیابی میزان تغییر سرعت صوت نسبت به زاویه تابش به علت تغییر جریان در دریای عمان

مریم محمدی<sup>۱</sup>، مهدی محمدمهدیزاده<sup>۲\*</sup>، افشین محسنی آراسته<sup>۳</sup>

mohammadi\_m1972@yahoo.com

mehdizadeh@hormozgan.ac.ir

a\_mohseni@iau-tnb.ac.ir

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

<sup>۳</sup> دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۱

### چکیده

مطالعه انتشار صوت و عوامل مؤثر در اختلال آن، به علت کاربردهای روزافزون صوت در علوم مختلف ضروری به نظر می‌رسد. یکی از عوامل محیطی مؤثر بر تغییر سرعت صوت، تغییر سرعت و جهت جریان است. تقریباً در تمام طول سال جریان ترموهالاین از روی بستر کم عمق خلیج فارس وارد دریای عمان می‌شود و به مناطق عمیق‌تر نفوذ می‌کند و باعث نوساناتی در دما و شوری (چگالی) و در نتیجه وارونگی سرعت صوت می‌شود. بنابراین تغییرات متفاوتی در مشخصه‌های صوتی در دریای عمان از تنگه هرمز تا نزدیک اقیانوس هند ایجاد می‌شود. در این تحقیق به منظور ارزیابی اثر تغییر سرعت و جهت جریان بر انتشار صوت از یک مدل ریاضی استفاده شده است. با ترکیب اثرات مکانیکی حرکت پیچک‌ها و انتشار صوت، یک رابطه ریاضی جدید برای انحراف سرعت صوت نسبت به زاویه در داخل پیچک به دست آمده است. با این رابطه میزان انحراف مسیر پرتوهای صوتی پس از عبور از پیچک میان مقیاس محاسبه شده است. برای سهولت، از دیگر عوامل محیطی مؤثر بر انتشار صوت از جمله امواج داخلی چشم‌پوشی شده است. نتیجه محاسبات نشان می‌دهد که برحسب مکان ورود صوت به محدوده پیچک، مقدار انحراف با توجه به سرعت زاویه‌ای پیچک متفاوت است. همچنین در این تحقیق مقدار تغییرات اندازه سرعت صوت نسبت به زاویه انحراف برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: تغییر سرعت جریان، دما، شوری، سرعت صوت، دریای عمان

### ۱. مقدمه

تلاطم‌های کوچک مقیاس، لایه‌بندی افقی، جریان‌های نفوذی، افت‌وخیزهای دما و شوری در راستای قائم و

پدیده‌های دریایی همچون جریان‌ها، امواج داخلی و

دهند. در حالی که پیچک با مرکز سرد می‌تواند ناحیه همگرایی پیشرونده ایجاد کند و پهنای ناحیه همگرایی را کاهش دهد. این اثرات کاهشی و افزایشی کاملاً تحت تأثیر شدت و قدرت پیچک قرار دارند [۵].

در مورد انتشار صوت از میان پیچک با هسته گرم در جنوب غربی دریای چین جنوبی در دانشگاه چین تحقیقاتی انجام شد و دریافتند که پیچک موجب می‌شود زاویه تابش پرتوی صوتی به شدت کاهش یابد. همچنین تغییر مکان پیچک نسبت به چشمه موجب تغییرات در اتلاف انتقال به اندازه ۱۸ دسی‌بل می‌شود [۶].

مشخصه‌های صوتی یک پیچک با مرکز سرد زیرسطحی، در زیر لایه اختلاط بین عمق‌های ۵۰ و ۳۰۰ متر با قطر حدود ۲۰۰ کیلومتر و افت دمای ۵ درجه سانتی‌گراد در خلیج بنگال مورد بررسی قرار گرفته و انرژی پتانسیل انتقالی با این پیچک گزارش شده است. نتایج حاکی از آن است که انرژی یادشده چندین برابر انرژی پتانسیل انتقالی حاصل از گردش کلی اقیانوس است. این انرژی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده به وسیله CTD در طول فصل مونسون جنوب غربی،  $10^2 \times 1/31$  است [۷].

در تحقیقی در جنوب غربی دریای چین از یک مدل تحلیلی برای توزیع سرعت صوت استفاده کردند و اثرات تغییرات سرعت صوت ناشی از یک پیچک غیر چرخشی و یک میدان پیچک (شامل ۳ پیچک چرخشی) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که پخش دما و پرندهای سرعت صوت در پیچک‌ها موجب نشت انرژی صوتی می‌شود و بیشترین اتلاف انتقال مربوط به عمق ۱۵۰۰ متر به میزان ۴۰ دسی‌بل گزارش شده است [۸].

بررسی اثر امواج داخلی و پیچک‌های میان‌مقیاس بر انتشار صوت در زیر آب انجام شده و روشی برای پیش‌بینی تغییرات سیگنال صوتی دریافتی به صورت تابعی از آشفتگی‌ها (امواج داخلی و پیچک‌های میان‌مقیاس) با استفاده از روش تئوری پرتو ارائه شده است. نتایج گواه این حقیقت هستند که اثر

پیچک‌ها، هر کدام با خصوصیات منحصر به فرد، به صورتی بر انتشار امواج صوتی مؤثر هستند. پیچک‌ها از پدیده‌های مهم اقیانوسی هستند که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در انتقال سیال در اقیانوس نقش دارند [۱].

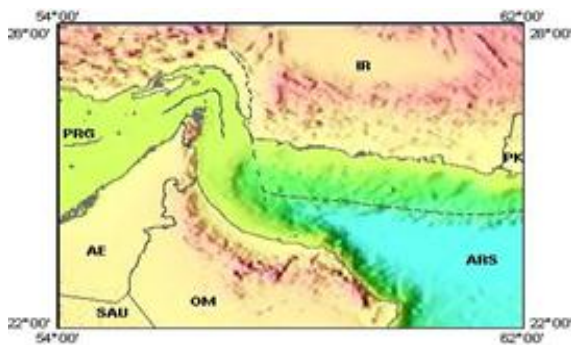
پیچک‌ها حلقه‌هایی هستند که در حاشیه جریان اصلی در اثر ناپایداری شکل می‌گیرند. از عوامل ایجاد پیچک‌ها، ناپایداری باروکلینیک - بارو تروپیک (کژ فشار - فشارورد) ناشی از جبهه‌ها و جریان‌ها، برهم‌کنش با توپوگرافی بستر و نیروی جوی است. نمونه بارز پیچک‌ها را می‌توان در گلف استریم مشاهده نمود که در اثر اختلاف چگالی (ناشی از اختلاف دما و شوری) به وجود آمده‌اند [۲].

در دریای عمان نیز جریان ترموهالاین ورودی از خلیج فارس موجب تغییر چگالی می‌شود. این پدیده در تمام طول سال اتفاق می‌افتد. بنابراین تغییر چگالی ناشی از تغییر جریان موجب ایجاد پیچک‌ها در دریای عمان می‌شود. تحقیقات بیانگر این واقعیت است که آب‌های با شوری زیاد خلیج فارس از طریق تنگه هرمز به دریای عمان جاری می‌شوند و در آنجا تحت تأثیر پیچک‌های میان‌مقیاس پرنرژی گسترش می‌یابند. نتایج نشان دادند که یک پیچک غیر چرخشی در دهانه دریای عمان، دو پیچک پرنرژی در طول ساحل جنوبی عمان در دریای عربی و یک پیچک میان‌مقیاس قوی غیر چرخشی در قسمت غربی دریای عمان وجود دارد. دیگر مشخصه این مشاهدات، پیچک‌های میان‌مقیاس دو قطبی قوی در جهت رأس الاحد و رأس الحمرا است [۳، ۴].

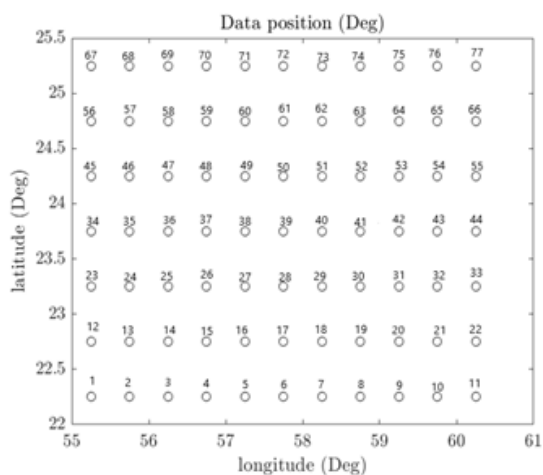
گروه تحقیقاتی دانشگاه چین به مدل‌سازی پیچک‌های میان‌مقیاس اقیانوسی و کاربرد آن‌ها در انتشار صوت، بر اساس داده‌های هیدروگرافی در محل پیچک‌های میان‌مقیاس، پرداختند. شبیه‌سازی انتشار صوت در شرایط مختلف، یعنی پیچک‌های میان‌مقیاس با اندازه، شدت و موقعیت مختلف و چشمه‌های صوتی با بسامدها و عمق‌های مختلف انجام داده و دریافتند که پیچک‌های با مرکز گرم موجب می‌شوند پرتوهای صوتی قبل از رسیدن به سطح دریا یا برخورد با بستر منعکس شوند و ناحیه همگرایی را افزایش

برای بررسی رابطه موردنظر مورد استفاده قرار گرفته است و تمام نمودارها با استفاده از نرم افزار متلب رسم شده است.

در این تحقیق، از تلفیق مدل دینامیکی و مدل انتشار صوت استفاده شده است و برای ارزیابی تأثیر پیچک‌ها در انتشار صوت، اثر دینامیکی آن‌ها در پارامترهای مؤثر در انتشار صوت مورد بررسی قرار گرفته است. سپس رابطه مناسب برای سرعت صوت انتخاب و تأثیر دینامیکی پیچک‌ها در پارامترهای مؤثر بر سرعت انتشار صوت لحاظ شده است. همچنین رابطه مربوط به میزان تغییر سرعت صوت با زاویه تابش حاصل شده است. سپس با استفاده از نرم افزار متلب نمودارهای لازم در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) رسم و تحلیل شده است که در ادامه به تفصیل شرح داده خواهد شد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه دریای عمان



شکل ۲. ایستگاه‌های اندازه‌گیری

### ۳. تئوری و محاسبات

برای محاسبه میزان اثر تغییر جریان از مدل دینامیکی سیالات استفاده شده است. بسیاری از مسائل دینامیکی اقیانوس‌ها با

پیچک‌های میان‌مقیاس در انتشار کوتاه برد<sup>۱</sup> امواج صوتی بسیار حائز اهمیت هستند [۹].

بررسی تغییرات پارامترهای هیدروفیزیکی و هیدروآکوستیکی خلیج عمان نشان می‌دهد، ورود جریان نفوذی ترموهالاین خلیج فارس به خلیج عمان موجب وارونگی شوری و دما و در نتیجه تغییر سرعت صوت می‌شود. همچنین مطالعه مشخصه‌های انتشار آکوستیکی در بالا، پایین و داخل لایه جریان نفوذی نشان می‌دهد که در همه حالت‌ها مشخصه‌های تلفات انتقال سناریوهای وابسته به برد نسبت به حالت مستقل از برد به‌طور قابل توجهی بیشتر تغییر می‌کند [۱۰].

شکل‌گیری امواج داخلی به‌واسطه جزر و مد داخلی در حضور برآمدگی در دریای عمان با استفاده از مدل MITgcm به صورت دوبعدی، در شرایط غیر هیدرواستاتیک و کاملاً غیرخطی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که حضور جزر و مد داخلی موجب فشردگی و بازشدگی پرتوهای صوتی در محیط و افزایش برد امواج آکوستیکی در منطقه در برخی زمان‌های کشندی می‌شود [۱۱].

در این تحقیق با استفاده از روابط حاکم بر دینامیک سیالات و پارامترهای فیزیکی پیچک از جمله سرعت آن رابطه‌ای برای تعیین میزان انحراف پرتوهای صوتی به دست آورده شده و با استفاده از داده‌های موجود، میزان انحراف پرتو صوتی با تغییر سرعت جریان در دریای عمان بررسی شده و با نتایج و مستندات موجود مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برآوردهای حاصل از رابطه به دست آمده در این تحقیق مطابقت خوبی با یافته‌های موجود دارد [۱۲].

### ۲. مواد و روش‌ها

منطقه جغرافیایی موردنظر برای این مطالعه دریای عمان محصور بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ تا ۶۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۲۵ درجه شمالی و مسیر انتشار صوت از سمت تنگه هرمز به سمت اقیانوس هند است. داده‌های مربوط به اوایل فصل زمستان و بهار سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰

مدل انتشار صوت: معادله موج از معادلات اساسی حالت، پیوستگی و حرکت به دست می آید. فرمول بندی مدل های انتشار صوت اغلب با معادله موج سه بعدی وابسته به زمان آغاز می شود. در بسیاری از کاربردها این معادله به صورت رابطه (۳) نشان داده می شود [۱۴].

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c^2} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right) \quad (3)$$

$\varphi$  تابع پتانسیل،  $\nabla^2$  عملگر لاپلاسین،  $t$  زمان (ثانیه) و  $C$  سرعت صوت (متر بر ثانیه) است. برای ساده سازی معادله موج (۳)، یک جواب هماهنگ برای آن فرض و معادله موج به معادله هلمهولتز (۴) تبدیل می شود.

$$\nabla^2 \varphi + K^2 \varphi = 0 \quad (4)$$

$K$  عدد موج است. شیوه های مختلف برای حل معادله موج به کار برده می شود که در تمام روش ها، تابع پتانسیل  $\varphi$  بیان گر میدان فشار صوت است.

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.005T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016Z \quad (5)$$

$$0 < Z(m) < 1000$$

$$22 < S(Psu) < 45$$

$$0 < T(^{\circ}C) < 32$$

حال با مشتق گیری از رابطه سرعت صوت (رابطه ۵) نسبت به زاویه تابش، تغییرات سرعت صوت در حضور پیچک های میان مقیاس اقیانوسی، رابطه (۶)، به دست می آید.

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = 4.6 \frac{\partial T}{\partial \theta} - 0.11T \frac{\partial T}{\partial \theta} - 0.00087T^2 \frac{\partial T}{\partial \theta} - 0.01S \frac{\partial T}{\partial \theta} + 0.35 \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (6)$$

با توجه به روابط تغییرات چگالی رابطه (۷) و تغییرات سرعت جریان (۸) و جایگذاری در رابطه سرعت صوت (۶)، تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش در حضور پیچک های میان مقیاس رابطه (۹) به دست خواهد آمد. رابطه

این دو فرض که اقیانوس ها محیطی همگن و تراکم ناپذیر هستند، قابل حل است. اما در برخی مسائل مانند مسئله انتشار صوت نه تنها تغییرات چگالی بلکه چگونگی توزیع چگالی نیز حائز اهمیت است. بدین منظور از یک مدل ساده حالت سیال [۱۳] استفاده شده است.

$$\rho - \rho_0 = \bar{a}(T - T_0) + \bar{b}(S - S_0) + \bar{K}P \quad (1)$$

علامت بار، روی حروف در معادله بالا به معنای مقدار متوسط است. در رابطه مذکور  $\rho$  چگالی سیال و یکای آن کیلوگرم بر متر مکعب،  $T$  دمای سیال و یکای آن درجه سلسیوس و  $P$  فشار سیال و یکای آن پاسکال است. با جایگزینی مقادیر  $\rho_0$ ،  $T_0$  و  $S_0$  مقادیر ضرایب میانگین  $a$ ،  $b$  و  $k$  حاصل می شوند [۱۳].

$$T_0 = 10^{\circ}C$$

$$P_0 = 35Psu$$

$$\rho_0 = 1027 kg/m^3$$

ضرایب میانگین عبارت اند از:

$$\bar{a} = 0.15 kg/m^3$$

به ازای یک درجه سلسیوس

$$\bar{b} = 0.78 kg/m^3$$

به ازای یک Psu

$$\bar{k} = 0.045 kg/m^3$$

به ازای یک دسی بار

معادله برنولی که نشانگر بقای انرژی در سیالات است به صورت زیر نمایش داده می شود:

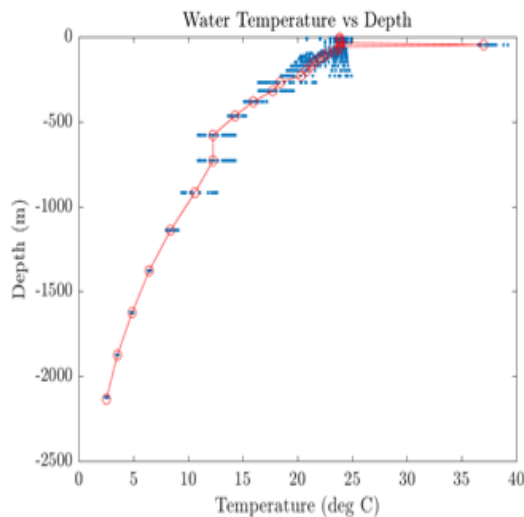
$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = b \quad (2)$$

در معادله برنولی،  $v$  سرعت سیال (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه)،  $h$  ارتفاع از نقطه ای دلخواه در جهت گرانش زمین (متر)،  $P$  فشار در سیال (پاسکال)،  $\rho$  چگالی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $b$  عددی ثابت معروف به «ثابت برنولی» است. معادله بالا به شرطی درست است که جریان پایا، تراکم ناپذیر و از اصطکاک صرف نظر شود. همچنین در مسیر حرکت سیال مبادله گرما یا کار وجود نداشته باشد که در این تحقیق برای سهولت این فرض ها در نظر گرفته شده است.

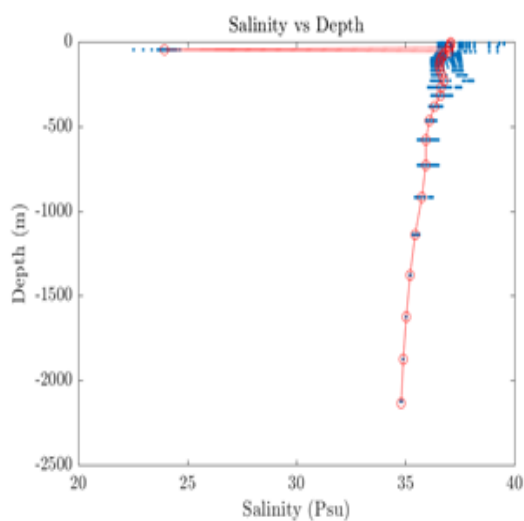
رسم شده است. نمودارهای مربوط به فصل بهار و زمستان سال‌های یادشده فقط برای عمق ۵ متر برای نمونه در این مقاله نمایش داده شده است، نمودارهای (۱ تا ۳۰).

با دقت در نمودارهای نیم رخ دما، شوری و سرعت صوت (نمودارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۲۸) همبستگی بین آن‌ها کاملاً مشهود است، هرگونه وارونگی در نیم‌رخ‌های دما و شوری تأثیر مستقیم در نیم‌رخ سرعت صوت خواهد داشت که در سطح و در عمق حدود ۵۰۰ متر این تغییرات در نمودارها مشاهده می‌شود. (به عنوان مثال نمودارهای شماره ۱، ۲ و ۳ مربوط به فصل بهار و نمودارهای ۷، ۸ و ۹ مربوط به فصل زمستان).

### نمودارهای مربوط به فصل بهار سال ۲۰۱۰



نمودار ۱. نیم‌رخ دما در فصل بهار سال ۲۰۱۰



نمودار ۲. نیم‌رخ شوری در فصل بهار سال ۲۰۱۰

(۹) نشان می‌دهد که عوامل مؤثر بر انحراف مسیر پرتوی صوت در حضور پیچک‌های اقیانوسی، دما، شوری، چگالی، فشار و سرعت جریان است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = 0.15 \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = -\frac{P}{v\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = [-32.97 + 0.73T + 0.0058T^2 + 0.066S] \quad (9)$$

حال با استفاده از داده‌های مربوط به دما، شوری و سرعت (NOAA<sup>۲</sup>) در منطقه دریای عمان در دو فصل زمستان و بهار از سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار متلب کد نویسی لازم انجام شده و میزان تغییر سرعت صوت نسبت به زاویه تابش از رابطه (۹) به دست آمده است. با استفاده از این تغییر به راحتی می‌توان میزان انحراف مسیر پرتو صوتی را نیز به دست آورده و رسم نمود. بر اساس قانون اسنل (۱۰) داریم:

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) با معلوم بودن زاویه تابش اولیه که در این تحقیق ۱۵ درجه فرض شده و سرعت اولیه صوت (C<sub>1</sub>)، که با توجه به داده‌ها ۱۵۳۱/۹۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است، زاویه ثانویه پس از انحراف توسط پیچک از رابطه (۱۱) به دست آمده (C<sub>2</sub>) و سپس تغییرات زاویه نیز از رابطه (۱۲) حاصل می‌شود.

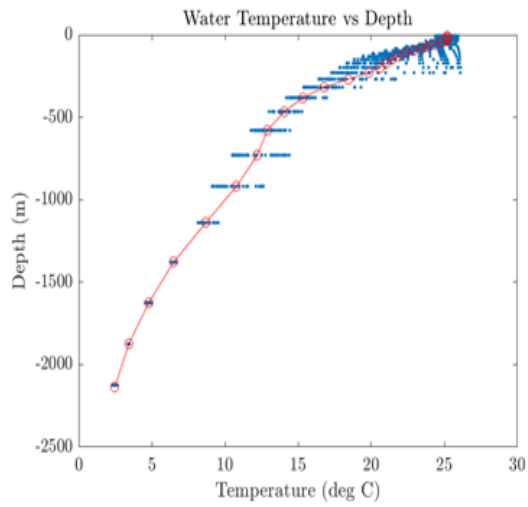
$$C_2 = C_1 + \frac{\partial C}{\partial \theta} \quad (11)$$

$$\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (12)$$

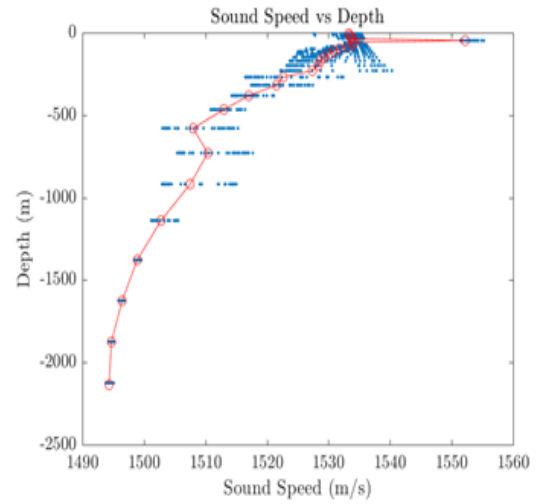
### ۴. یافته‌ها

داده‌های (دما، شوری، سرعت) مربوط به سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ در دو فصل بهار و زمستان برای عمق‌های مختلف از سطح (عمق ۵ متر) تا عمق ۲۱۲۵ متر به کار برده شده است. نمودارهای سرعت صوت و تغییرات آن نسبت به زاویه تابش در حالی که چشمه صوت در عمق‌های مختلف قرار دارد،

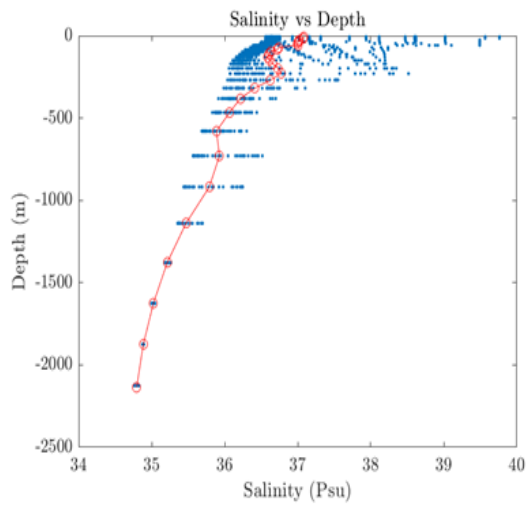
نمودارهای مربوط به فصل زمستان ۲۰۱۰



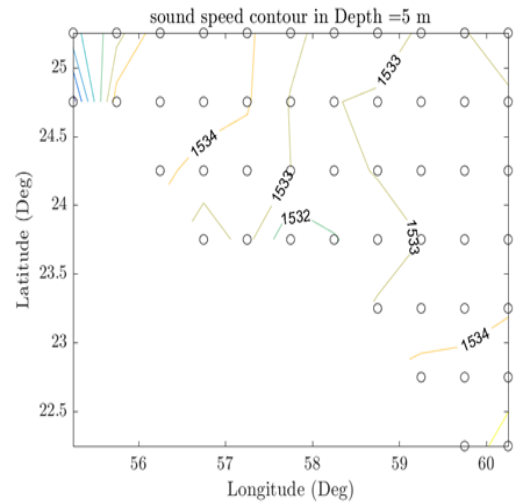
نمودار ۶: نیم‌رخ دما در فصل زمستان سال ۲۰۱۰



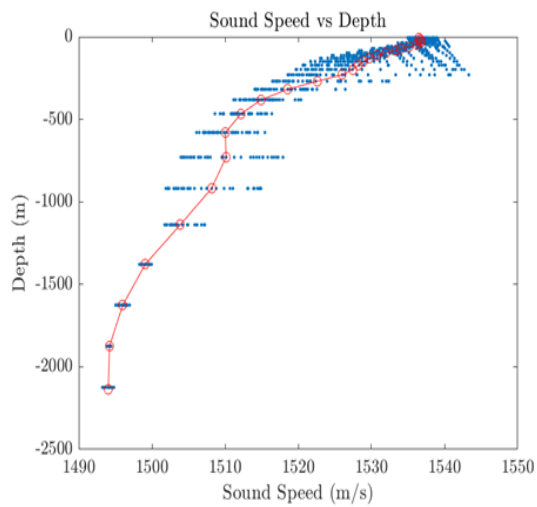
نمودار ۳: نیم‌رخ سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل بهار سال ۲۰۱۰



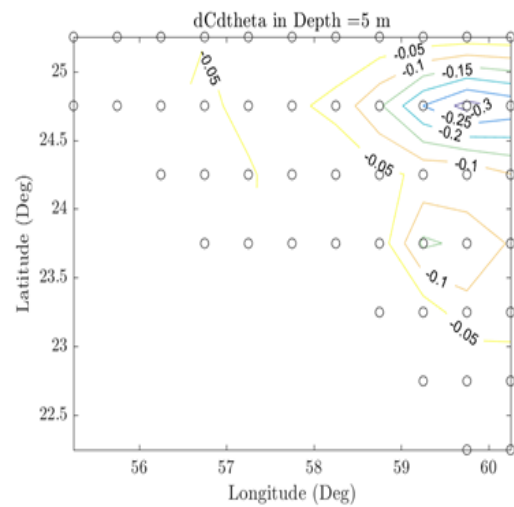
نمودار ۷: نیم‌رخ شوری در فصل زمستان سال ۲۰۱۰



نمودار ۴: پربندهای سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل بهار سال ۲۰۱۰



نمودار ۸: نیم‌رخ سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل زمستان سال ۲۰۱۰



نمودار ۵: پربندهای تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش در فصل بهار سال ۲۰۱۰

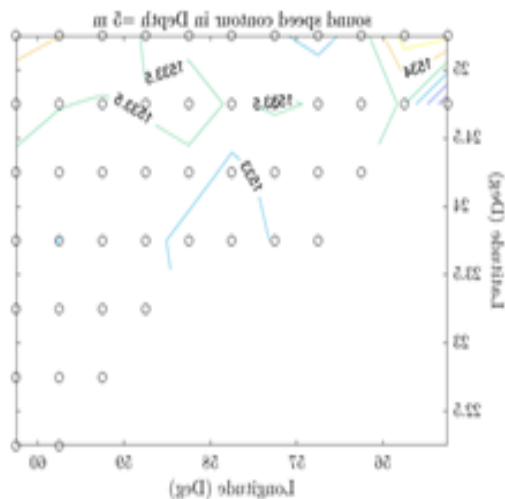




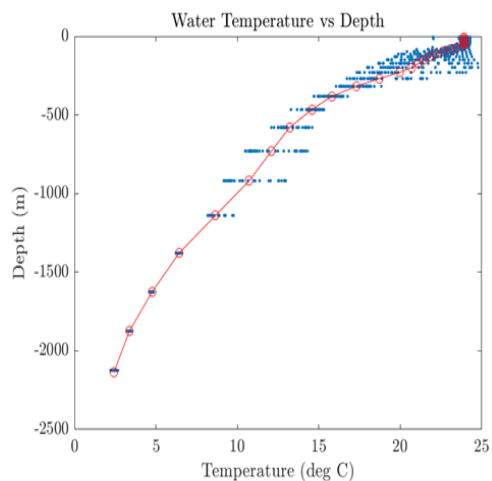




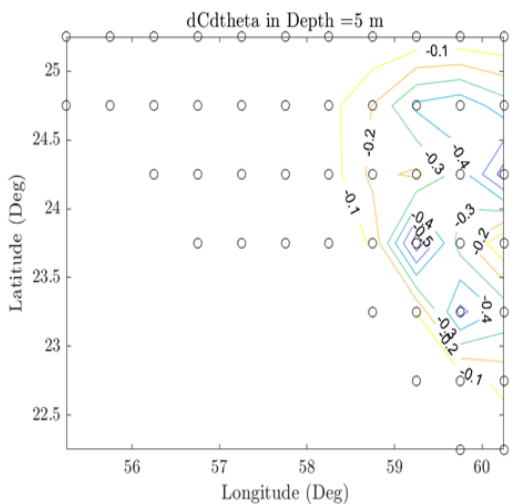
نمودارهای فصل بهار سال ۲۰۰۸



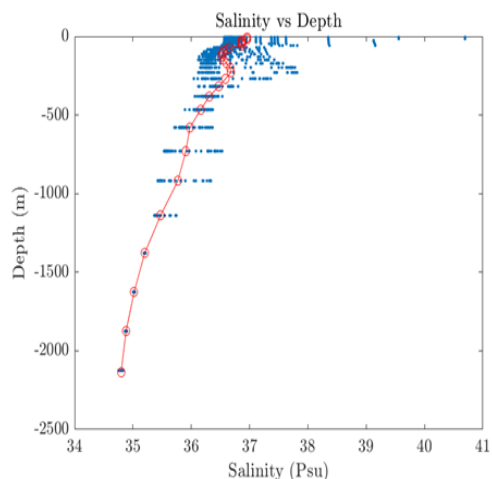
نمودار ۲۴. پربندهای سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل بهار سال ۲۰۰۸



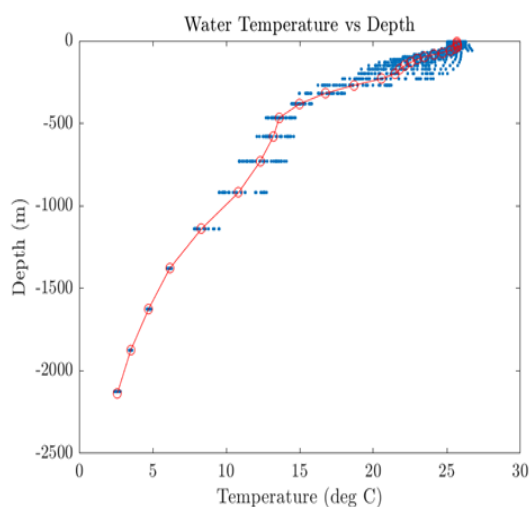
نمودار ۲۱. نیم‌رخ دما در فصل بهار سال ۲۰۰۸



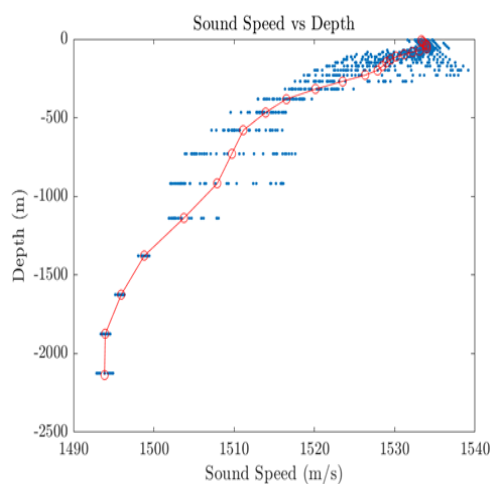
نمودار ۲۵. پربندهای تغییرات سرعت صوت (متر بر ثانیه) نسبت به زاویه تابش در فصل بهار سال ۲۰۰۸



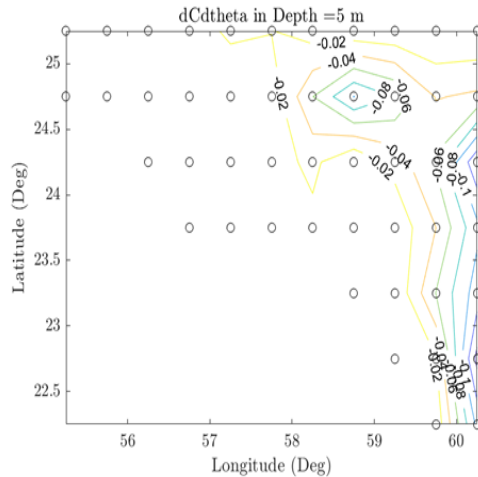
نمودار ۲۲. نیم‌رخ شوری در فصل بهار سال ۲۰۰۸



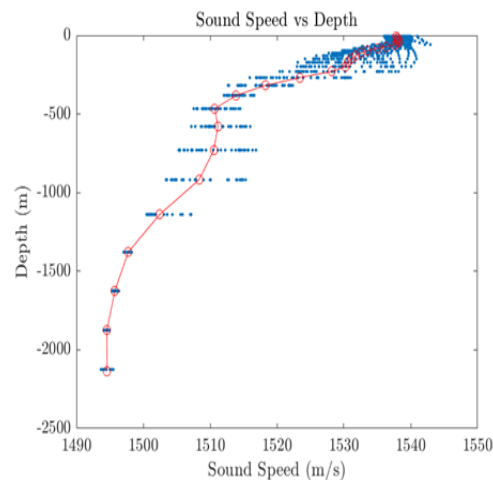
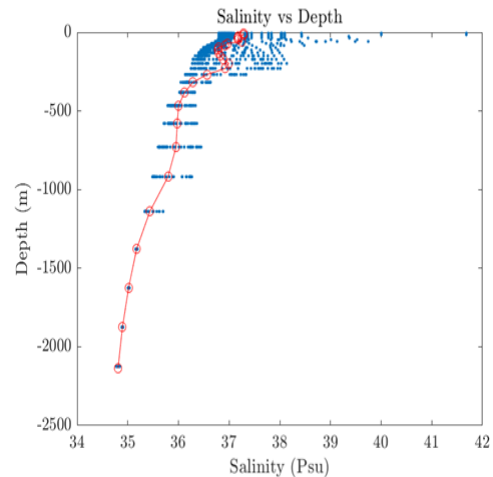
نمودار ۲۶. نیم‌رخ دما در فصل زمستان سال ۲۰۰۸



نمودار ۲۳. نیم‌رخ سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل بهار سال ۲۰۰۸



نمودار ۲۷. نیم‌رخ شوری در فصل زمستان سال ۲۰۰۸  
نمودار ۳۰. پربندهای تغییرات سرعت صوت (متر بر ثانیه) نسبت به زاویه تابش در فصل زمستان سال ۲۰۰۸

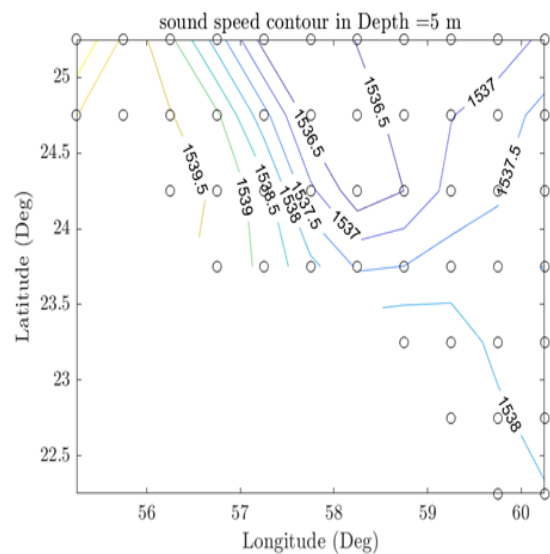


با توجه به نمودارهای بالا مشاهده می‌شود وارونگی شوری و دمای مشهودی در فصل زمستان و بهار وجود ندارد. گرچه در عمق‌های حدود ۲۵۰ و ۷۰۰ متر وارونگی بسیار ناچیز شوری ملاحظه می‌شود.

با توجه به نیم‌رخ‌های سرعت صوت، بیشترین مقدار سرعت صوت مربوط به عمق ۵ متر و کمینه سرعت صوت، در عمق ۲۱۲۵ متر مشاهده می‌شود. سرعت صوت رابطه مستقیم با پارامتر شوری دارد و هر تغییر در آن می‌تواند موجب تغییر در سرعت صوت شود؛ بنابراین در نیم‌رخ سرعت صوت تغییرات ناچیز سرعت صوت در عمق‌های ۲۵۰ و ۷۰۰ متری قابل رؤیت است که نتیجه وارونگی شوری در عمق‌های یادشده در فصل زمستان است.

نمودارهای هم سرعت صوت (پربندهای سرعت) و پربندهای تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش در اعماق مختلف از عمق ۵ تا ۲۱۲۵ متر نشان می‌دهد که در اعماق کمتر، پربندهای گفته شده بیشتر در غرب دریای عمان مشاهده می‌شوند، به عبارت دیگر تراکم نقاط هم سرعت با اندازه سرعت صوت بزرگ به سمت تنگه هرمز بیشتر است و هر چه به اعماق می‌رویم تراکم نقاط هم سرعت به سمت اقیانوس هند بیشتر است و مقدار سرعت صوت نیز کاهش می‌یابد تراکم پربندهای تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش نیز رفتاری مشابه تراکم نقاط هم سرعت، دارند.

نمودار ۲۸. نیم‌رخ سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل زمستان سال ۲۰۰۸



نمودار ۲۹. پربندهای سرعت صوت (متر بر ثانیه) در فصل زمستان سال ۲۰۰۸

با به کارگیری معادله به دست آمده (۹) به راحتی می توان از طریق داده های موجود میزان انحراف پرتو صوت را در حوزه های مختلف اقیانوسی محاسبه کرد که نتایج آن در بخش های مختلف پژوهشی و کاربردی از جمله وسایل نظامی مانند زیردریایی ها و سونارها حائز اهمیت خواهد بود و می تواند موضوع پژوهش و تحقیق در آینده باشد. به خصوص در کشورهایی مانند ایران که حوزه های دریایی شمال و جنوب دارای موقعیت استراتژیک خاص سیاسی و نظامی هستند.

## مراجع

- [1] Ivanov AY, Ginzburg AI. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images. *Journal of Earth System Science*. 2002 Sep 1;111(3):281.
- [2] Ginzburg AI. Nonstationary eddy motions in the ocean. *OCEANOLOGY C/C OF OKEANOLOGIJA*. 1992;32(6):689-94.
- [3] L'Hégaret P, Lacour L, Carton X, Rouillet G, Baraille R, Corréard S. A seasonal dipolar eddy near Ras Al Hamra (Sea of Oman). *Ocean Dynamics*. 2013 Jun 1;63(6):633-59.
- [4] L'Hégaret P, Carton X, Louazel S, Boutin G. Mesoscale eddies and submesoscale structures of Persian Gulf Water off the Omani coast in spring 2011. *Ocean Science*. 2016 Jan 1;12(3):687-701.
- [5] Jia-xun LI, Ren Zhang, Chen-zhao Liu, Hong-jun Fan. Modeling of ocean mesoscale eddy and its application in the underwater acoustic propagation. *Marine Science*. 2012;1(14):1-14.
- [6] Ji Li, Lin M. Modeling of Acoustic Propagation Across a Warm-Core Eddy in South China Sea. *International Society of Offshore and Polar Engineers*. 2012; June (329):1-12.
- [7] Murty TV, Rao MM, Sathuram Y, Sridevi B, Maneesha K, Kumar SS, Prasanna PL, Murthy KS. Objective mapping of observed sub-surface mesoscale cold core eddy in the Bay of Bengal by stochastic inverse technique with tomographically simulated travel times. *Geo-Marine Sciences*. 2011; 40(3): 307-24.
- [8] Jian YJ, Zhang J, Liu QS, Wang YF. Effect of mesoscale eddies on underwater sound propagation. *Applied acoustics*. 2009 Mar 1;70(3):432-40.
- [9] Wojcik SE. Effect of internal waves and turbulent fluctuations on underwater acoustic propagation [master's thesis]. USA: Worcester Polytechnic Institute; 2006.

پیشینه تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش، مربوط به فصل زمستان است.

## ۵. نتیجه گیری

رابطه (۹) نشان می دهد که انحراف سرعت صوت نسبت به زاویه، در حضور پیچک های اقیانوسی به دما و شوری بستگی دارد.

روند تغییرات دما و شوری همان طور که به طور مستقیم بر سرعت صوت مؤثر است تأثیر آن ها بر میزان تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه تابش کاملاً مشهود است. هر چند رابطه گویای این واقعیت است که تغییرات دما سهم بیشتری در میزان انحراف سرعت صوت در حضور پیچک ها دارد. البته کمیت چگالی با توان ۲ نیز نه تنها نشان دهنده اهمیت این کمیت است، بلکه تصدیقی دیگر بر صحت رابطه به دست آمده است. رابطه به دست آمده، تأثیر وارون فشار با تغییرات سرعت صوت نسبت به زاویه را نشان می دهد که کاملاً با واقعیت و تجربه تطابق دارد. کمیت مؤثر انکارناپذیر در این انحراف سرعت جریان و پیچک است که پرواضح است نه تنها سرعت بلکه شدت و اندازه پیچک ها نقش و تأثیر بسزایی در تغییر سرعت صوت و انحراف آن و در نهایت انحراف مسیر پرتوی صوتی دارد. نتایج حاصل از به کار گیری داده ها در دریای عمان صحت مطالب گفته شده را تأیید می نماید.

نتایج حاصل از محاسبات و نمودارها نشان می دهد که از سمت تنگه هرمز در دریای عمان به سمت اقیانوس هند و دریای عربی سرعت صوت در حال کاهش بوده و تراکم پرندهای سرعت صوت به سمت عمق های بیشتر است. با توجه به حضور پیچک چرخشی در محل رأس الحمرا و دیگر نقاطی که قطعاً و همواره وجود دارد، سرعت صوت تغییر یافته و مسیر پرتو منحرف می شود. این انحراف بسیار ناچیز و از مرتبه هزارم است ولی به هر روی نشان می دهد که پیچک ها موجب انحراف مسیر پرتو می شوند. این انحراف در نمودار مسیر پرتو کاملاً مشخص است.

- [12] Munk WH. Horizontal deflection of acoustic paths by mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*. 1980 Apr;10(4):596-604.
- [13] Knauss JA. Introduction to physical oceanography. Waveland Press; 1997.
- [14] Medwin H, Clay CS. Fundamentals of acoustical oceanography. Academic press; 1997 Nov 5. p. 84-5.

### پی‌نوشت‌ها

1. Short Range Propagation
2. National Oceanic and Atmospheric Administration

[۱۰] اکبری نسب محمد، صدری نسب مسعود، علی اکبری بیدختی عباس علی، چگینی وحید. مطالعه ساختار لایه‌ای خلیج فارس به خلیج عمان و تأثیر آن بر روی انتشار صوت با چشمه‌های آکوستیکی نزدیک جریان نفوذی در فصل بهار. علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۲؛ ۱۲: ۱۱۰-۱۲۰.

[۱۱] حسینی سید حبیب‌اله، اکبری نسب محمد، خلیل‌آبادی محمدرضا. شبیه‌سازی عددی اثر امواج درونی ناشی از جزر و مد بر روی انتشار صوت در دریای عمان. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۷؛ ۴۴(۱): ۲۱۵-۲۲۵.