

مطالعه جریان نفوذی از خلیج فارس به دریای عمان و اثر آن بر روی نحوه انتشار صوت

محمد اکبری نسب^{۱*}، مسعود صدری نسب^۲، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳، وحید چگینی^۴

- ۱- دانشگاه مازندران، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، گروه فیزیک دریا، بابلسر، پست الکترونیکی: m.akbarinasab@umz.ac.ir
۲- دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، گروه فیزیک دریا، خرمشهر، پست الکترونیکی: masoud.sadri@gmail.com
۳- دانشگاه تهران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، پست الکترونیکی: bidokhti@ut.ac.ir
۴- پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، پست الکترونیکی: vahid.chegini@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۰

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۹

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

جریان‌های نفوذی از نوع دسته جریان‌های گرانی هستند که در نیمرخ‌های شوری، دما و چگالی، به صورت یک زبانه نشان داده می‌شوند. در محیط‌های چینه‌بندی شده از نظر چگالی، وقتی جریان سومی با چگالی متوسط به محیط نفوذ می‌کند، به صورت یک جریان نفوذی در آمده که مشابه جریان گرانی است. این نوع جریان در خروجی خلیج فارس به دریای عمان مشاهده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی به روش پرتو در فرکانس‌های بالا در حضور جریان نفوذی با استفاده از چشمه‌های آکوستیکی در اعماق مختلف، اثر این جریان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با وجود جریان نفوذی، کانال صوتی سطحی ایجاد می‌شود و در غیاب این جریان، این کانال محو می‌گردد.

کلمات کلیدی: جریان نفوذی، دریای عمان، انتشار صوت، چشمه‌های آکوستیکی.

۱. مقدمه

نیمرخ‌های شوری، دما و چگالی، به صورت یک زبانه نشان داده می‌شوند) در محیط‌های چینه‌بندی شده از نظر چگالی، وقتی جریان سومی با چگالی متوسط به محیط نفوذ می‌کند، به صورت یک جریان نفوذی در آمده که مشابه جریان گرانی است. البته فرایند پخش دوگانه در مناطق جبهه‌ای، ساختار نفوذی لایه‌ای را تولید می‌کند. این نوع جریان در خلیج عمان به صورت وارونگی دما و شوری به دلیل آب شور و گرم خلیج فارس مشاهده می‌شود. این وارونگی باعث ایجاد وارونگی در سرعت صوت می‌شود (شکل ۲) (Akbarinasab et al., 2012)، تلاطم‌های کوچک-مقیاس، لایه‌بندی افقی، جریان‌های نفوذی، افت و خیزهای دما و

فناوری ارسال سیگنال صوتی از میان لایه‌های مختلف آب در سامانه‌های مخابرات زیر آب کاربرد فراوانی دارد. سیگنال‌های صوتی هنگامی که از میان لایه‌های آب عبور کنند، در زمان‌های مختلف، دچار تغییراتی بر روی شکل و فاز می‌شوند. اقیانوس محیط پویا و دائما در حال تغییر است و هر کدام از پدیده‌های اقیانوسی دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند. برای مثال پدیده‌های همچون جریان‌ها، امواج داخلی، جریان نفوذی (جریان‌های نفوذی از نوع دسته جریان‌های گرانی هستند که در

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2(x)} p = -\delta(x - x_s) \quad (2)$$

که در آن $x = (x, y, z)$ مختصات مکانی نقطه مورد نظر، $c(x)$ سرعت صوت، ω فرکانس زاویه‌ای چشمه صوتی، x_s مختصه افقی چشمه صوتی و P فشار صوتی در نقطه مورد نظر است. برای به دست آوردن معادلات پرتو، حلی از معادله هلمهولتز به صورت معادله ۳ جستجو می‌شود:

$$p(x) = e^{i\omega\tau(x)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(x)}{(i\omega)^j} \quad (3)$$

چنین جوابی را سری‌های پرتو می‌نامند.

سری فوق عموماً یک سری واگراست، اما در بعضی از حالات می‌توان نشان داد که سری فوق به حل کامل معادله هلمهولتز همگرا خواهد شد. با مشتق‌گیری مرتبه اول و دوم از معادله ۳ نسبت به x نتیجه می‌شود:

$$p_x = e^{i\omega\tau} \left(i\omega\tau_x \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{j,x}}{(i\omega)^j} \right) \quad (4)$$

$$p_{xx} = e^{i\omega\tau} \left\{ \begin{aligned} &[-\omega^2(\tau_x)^2 + i\omega\tau_{xx}] \sum_{g=0}^{\infty} \frac{A_g}{(i\omega)^g} + \\ &2i\omega\tau_x \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{j,x}}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{j,xx}}{(i\omega)^j} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

بنابراین می‌توان $\nabla^2 p$ را به فرم معادله ۶ نوشت:

$$\nabla^2 p = e^{i\omega\tau} \left\{ \begin{aligned} &[-\omega^2|\nabla\tau|^2 + i\omega\nabla^2\tau] \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + \\ &2i\omega\nabla\tau \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla A_j}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla^2 A_j}{(i\omega)^j} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

با قرار دادن معادلات ۶ و ۳ در معادله ۲ و برابر قرار دادن جملاتی که توان مساوی از ω دارند، تعداد نامتناهی از معادلات به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$O(\omega^2): |\nabla\tau|^2 = c^{-2}(x) \quad (7)$$

$$O(\omega): 2\nabla\tau \cdot \nabla A_0 + (\nabla^2\tau)A_0 = 0 \quad (8)$$

$$O(\omega^{1-j}): 2\nabla\tau \cdot \nabla A_j + (\nabla^2\tau)A_j = -\nabla^2 A_{j-1}, \quad j=1,2,\dots \quad (9)$$

شوری در راستای قائم باعث ایجاد تغییرات بر روی سیگنال صوتی می‌شوند. هر کدام از این پدیده‌ها باعث ایجاد اکو بر روی سیگنال خروجی می‌شوند. وارونگی‌های دما و شوری باعث ایجاد ساختار لایه‌ای در خلیج عمان می‌شوند (Bidokhti, 20005) و این لایه‌های ایجاد شده سبب پخش مواد آلی و همچنین اکسیژن موجود درون آب می‌شوند که از نظر زیست‌محیطی دارای اهمیت زیادی هستند. همچنین این وارونگی‌ها روی ضرایب پخش پیچکی تاثیر می‌گذارند و برای مدل‌سازی یا محاسبه ضرایب مهم هستند. اخیراً روش‌های آکوستیکی برای مخابرات زیر آبی و مشاهدات از راه دور دریاها و اقیانوس‌ها به کار برده می‌شوند (Salon et al., 2003). تنها خصوصیت فیزیکی اقیانوس که بر انتشار امواج صوتی تاثیر می‌گذارد، سرعت صوت است که دارای مقدار عمومی 1500 m/s در اقیانوس‌های استوایی و معتدل است. شایان ذکر است که تغییرات چگالی نیز بر انتشار این امواج مؤثر هستند، اما این تغییرات روی تمام ستون آب اقیانوسی قابل چشم پوشی هستند، ولی در لایه‌های رسوبی در کف اقیانوس به عنوان عامل مهمی در محاسبات در نظر گرفته می‌شوند. سرعت صوت در اقیانوس تابعی از سه متغیر است: دما، شوری و فشار (یا عمق). این تابع، تابعی افزایشی از هر سه متغیر است. عبارتی ساده و تجربی برای سرعت صوت (m/s) برگرفته از مطالعه مکزی (Mackenzie, 1981) به صورت رابطه ۱ ارائه شده است (Jensen et al., 2011):

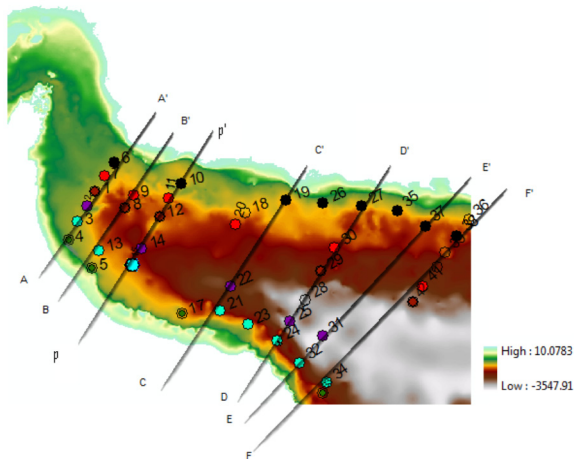
$$C = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^{-3} + 1.340(S - 35) + 1.63 \times 10^{-2} D + 1.675 \times 10^{-7} D^2 - 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} D^3 \quad (1)$$

که c سرعت صوت بر حسب m/s و D عمق بر حسب متر و S شوری بر حسب واحد در هزار (PPT) در محدوده $30 \leq S \leq 40$ ، T دما بر حسب درجه سلسیوس $0 \leq T \leq 30$ است. یک بررسی معمولی نشان می‌دهد که سرعت صوت حدود 4 m/s به ازای یک درجه تغییر دما، $1/5 \text{ m/s}$ به ازای افزایش صد متر عمق و 1 m/s به ازای افزایش PPT ۱ افزایش می‌یابد.

۱-۱. روش مورد استفاده (مدل ریاضی معادلات پرتو)

نقطه شروع کلیه مدل‌های انتشار موج از جمله مدل پرتو، معادله هلمهولتز در مختصات دکارتی است که به صورت معادله ۲ نوشته می‌شود:

می‌شود (شکل ۱). در ضمن تمام ورودی‌ها اجرای مدل، از بانک اطلاعاتی جمع آوری شده در محیط GIS، استخراج شده است (کمیجانی و چگینی، ۱۳۹۱; Akbarinasab et al., 2012).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق با استفاده از چشمه‌های آکوستیکی در اعماق مختلف جریان نفوذی (ناشی از آب گرم و شور خلیج فارس)، اثر این پدیده را بر روی انتشار صوت در فرکانس‌های بالا مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۳. نتایج

در این بخش، سناریو انتشار صوت با تغییر چشمه‌های صوتی در حضور و غیاب جریان نفوذی برای فصل بهار در سال ۱۹۹۶ در دو منطقه‌ای به طول جغرافیایی ۵۸/۸۲ و عرض جغرافیایی ۲۳/۷۵ و منطقه‌ی دیگری به طول جغرافیایی ۵۹/۶۳۵ و عرض جغرافیایی ۲۳/۸۵۶ در دریای عمان بررسی می‌شود. شایان ذکر است که جریان نفوذی در نیمرخ سرعت صوت مشاهده می‌شود (Bower et al., 2000). در ضمن تمام ورودی‌های اجرای مدل، از بانک اطلاعاتی جمع آوری شده در محیط GIS استفاده شده است.

۳-۱. مشخصات سناریو شبیه‌سازی انتشار صوت

مشخصات شبیه‌سازی انتشار صوت در ایستگاه‌های اشاره شده

به صورت زیر است:

رابطه ۷ به‌عنوان معادله آیکونال^۱ شناخته شده است. با حل معادله آیکونال قسمت فازی $\tau(x)$ از پاسخ ۳ به‌دست می‌آید. معادلات ۸ و ۹ که برای به دست آوردن $A_j(x)$ است را معادلات انتقال^۲ می‌نامند. تا این مرحله به نظر می‌رسد که حل معادله هلمهولتز شکل بسیار پیچیده‌تری به خود گرفته است، چرا که یک معادله با مشتقات جزئی (PDE) (معادله هلمهولتز به معادله غیر خطی آیکونال به علاوه یک سری نامتناهی از معادلات PDE خطی (معادلات انتقال) تبدیل شده است) اما فرضی که در روش نظریه پرتو جهت ساده سازی حل معادله هلمهولتز انجام می‌شود آن است که از تمامی جملات سری پرتو ۲ به جز اول صرف نظر می‌شود. این فرض همان تقریب فرکانس بالاست که در مقدمه مطرح گردید. با این فرض و ساده سازی، تنها نیاز به حل معادله آیکونال و معادله اول انتقال باقی می‌ماند (Jensen et al., 2011).

به‌طور خلاصه، می‌توان این روش را برای سونارهای فعال بالاتر از ۲ کیلوهرتز مورد استفاده قرار داد. بنابراین، برای مثال، اگر متوسط سرعت صوت را در دریای عمان ۱۵۱۰ متر بر ثانیه، و حداقل عمق دریا در سناریو مورد نظر برابر ۲۴۰۰ متر باشد، آنگاه برای فرکانس‌های مساوی و یا بالاتر از مقدار آستانه زیر می‌توان از این روش استفاده نمود.

$$f > \frac{10 \times 1510}{2400} = 6.29 \text{ Hz}$$

بنابراین برای بررسی اثر جریان نفوذی بر روی انتشار صوت در دریای عمان، تمام سناریوها در فرکانس ۱۰۰ هرتز شبیه‌سازی می‌شوند.

۲. مواد و روش‌ها

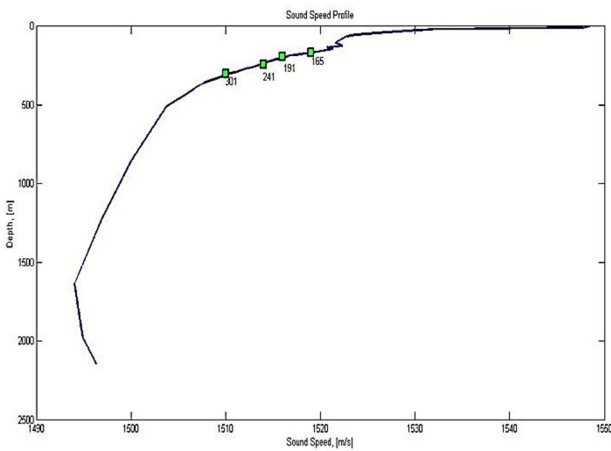
برای مطالعه اثر جریان نفوذی بر روی انتشار صوت با استفاده از مدل‌سازی بر اساس روش پرتو، از اندازه‌گیری‌های دما و شوری در دریای عمان توسط پروژه بین‌المللی (JGOFS)^۳، برای فصل بهار ۱۹۹۶ میلادی در دو منطقه، به طول جغرافیایی ۵۸/۸۲ و عرض جغرافیایی ۲۳/۷۵ (جریان نفوذی در نیمرخ سرعت صوت مشاهده می‌شود) و منطقه‌ی دیگری به طول جغرافیایی ۵۹/۶۳۵ و عرض جغرافیایی ۲۳/۸۵۶ در دریای عمان بررسی

^۱ Eikonal Equation

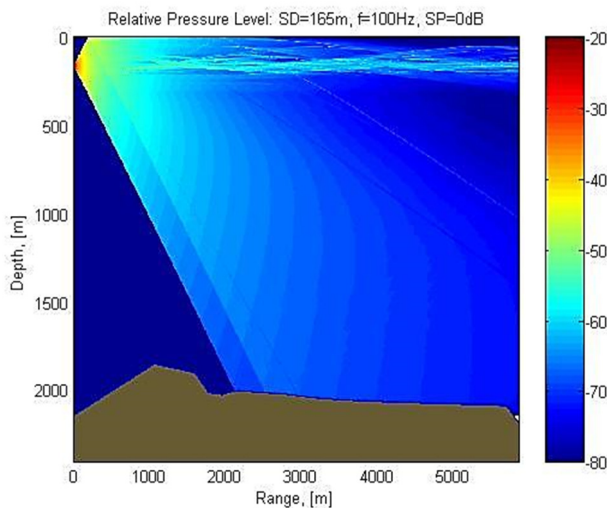
^۲ Transport Equation

^۳ joint global ocean flux study

منتشر شده از منبع صوتی را در تمام محیط مورد بررسی به صورت یک تصویر رنگی نشان می‌دهد. مقدار شدت انرژی صوتی در هر نقطه از دریا با شدت رنگ نشان داده شده است. میله رنگی سمت راست شکل‌ها، نشان دهنده‌ی میزان شدت توان سرخ‌تر و گرم نشان داده شده‌اند. به تدریج که در اثر اتلاف انتشار و جذب از شدت انرژی صوتی کاسته می‌شود که از رنگ‌های سرد و متمایل آبی استفاده شده است. در ضمن توپوگرافی منطقه به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است.



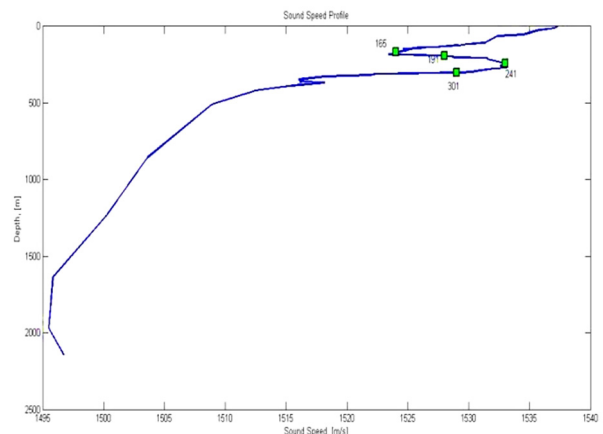
شکل ۳: نحوه تغییرات سرعت صوت در غیاب جریان نفوذی (طول جغرافیایی ۵۹/۶۳۵ و عرض جغرافیایی ۲۳/۸۵۶)



شکل ۴: نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع بالای جریان نفوذی (در عمق ۱۶۵ متری) نصب شده است.

به علاوه، در منطقه‌ی دیگری در نزدیکی اقیانوس هند که جریان نفوذی از بین رفته است، دوباره سناریو بالا اجرا شده است که نتایج نحوه انتشار صوت در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

فرکانس منبع: ۱۰۰ هرتز ۲- عمق منبع: ۱۶۵، ۱۹۱، ۲۴۱ و ۳۰۱ متری ۳- نوع منبع: نقطه‌ای ۴- زاویه پرتو بر حسب درجه: (۴۰، -۴۰) ۵- سرعت موج تراکمی در بستر $1496/80$ m/s، سرعت موج برشی 0 m/s، ضریب تضعیف موج تراکمی 0.2 dB/m/Hz، ضریب تضعیف موج تراکمی 0 dB/m/Hz و چگالی بستر 1.5 g/cm³، ۶- توپوگرافی منطقه، ۷- نیمرخ تغییرات سرعت صوت در حضور و غیاب جریان نفوذی. شکل ۲ نیمرخ تغییرات سرعت صوت را در فصل بهار در ایستگاهی به طول جغرافیایی $58/822926$ و عرض جغرافیایی $23/758333$ نشان می‌دهد. در ضمن محل چشمه‌های صوتی که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، این نیمرخ به صورت مربع توپر نشان داده شده است. همان طوری که در این شکل مشخص است، در اعماق بین ۱۶۵ تا ۲۴۱ متری، وارونگی سرعت صوت ناشی از وارونگی جریان گرم‌شور (ترموهالین) مشاهده می‌شود.

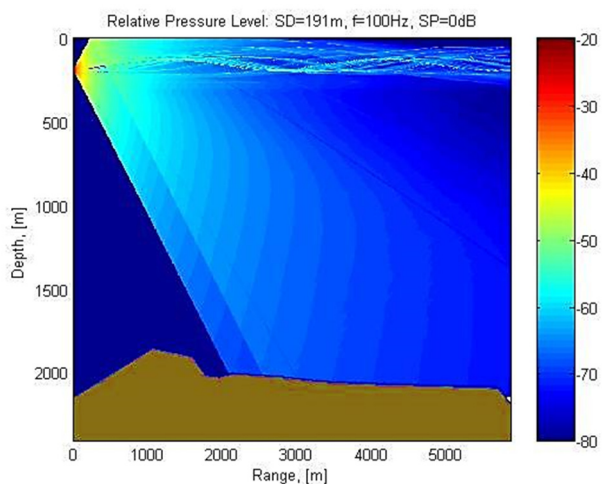


شکل ۲: نحوه تغییرات سرعت صوت با وجود جریان نفوذی (طول جغرافیایی $58/822926$ و عرض جغرافیایی $23/758333$)

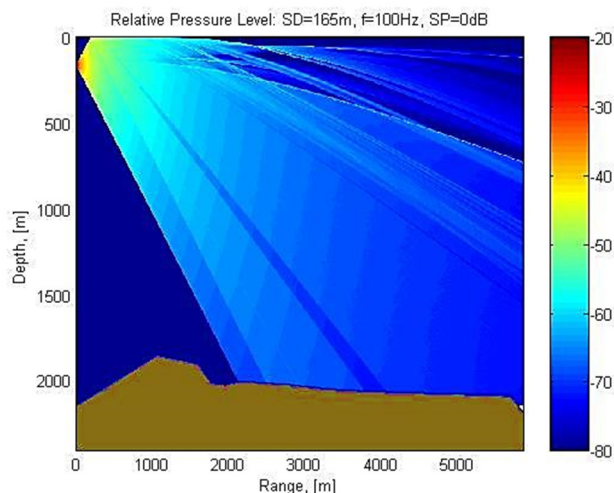
شکل ۳ نیمرخ تغییرات سرعت صوت را در فصل بهار در ایستگاهی به طول جغرافیایی $59/635$ و عرض جغرافیایی $23/856$ در غیاب جریان نفوذی نشان می‌دهد. در ضمن محل چشمه‌های صوتی که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این شکل به صورت مربع توپر نشان داده شده است.

۳-۱- چشمه صوتی بالای جریان نفوذی: عمق ۱۶۵ متری

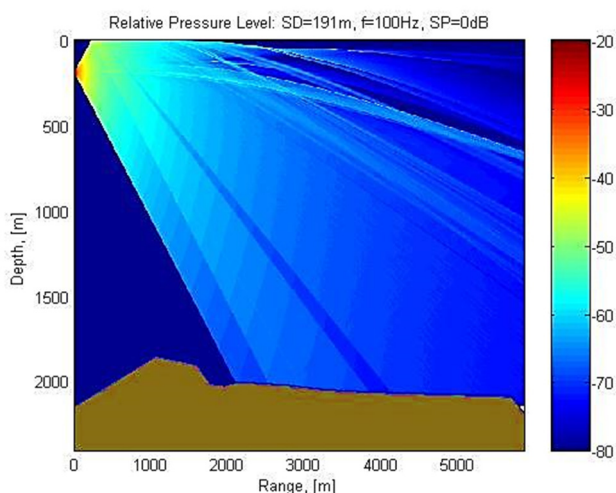
در این سناریو با نصب پروژکتور (منبع) در عمق ۱۶۵ متری و در فاصله ۷ کیلومتری از منبع، مدل پرتو، با استفاده از برنامه Matlab اجرا شده است. شکل ۴ میزان توان سیگنال صوتی



شکل ۶: نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع داخل جریان نفوذی (در عمق ۱۹۱ متری) نصب شده است.



شکل ۵: نحوه انتشار صوت بدون حضور جریان نفوذی (منبع در عمق ۱۶۵ متری) نصب شده است.



شکل ۷: نحوه انتشار صوت در غیاب جریان نفوذی (عمق منبع ۱۹۱ متری)

همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود هنگامی که منبع در بالای جریان نفوذی نصب شود، کانال صوتی سطحی در این عمق ایجاد می‌شود. از سوی دیگر در غیاب این جریان شکل ۵، این کانال محو می‌شود. همچنین، در غیاب جریان نفوذی، پرتوها به سمت پایین خم می‌شوند. در صورتی که در حضور جریان نفوذی برخی از پرتوها به سمت بالا و برخی به سمت پایین خم می‌شوند. در ضمن همان‌طور که در شکل ۵ (در غیاب جریان نفوذی) مشاهده می‌شود، در سطوح بالای عمق، نقاط کور مشاهده می‌شوند، در حالی که در جریان نفوذی این نقاط کور، محو می‌شوند.

۳-۱-۳. چشمه صوتی داخل جریان نفوذی: عمق ۱۹۱ متری

در این سناریو، با نصب پروژکتور در عمق ۱۹۱ متری و در فاصله ۷ کیلومتری از منبع، مدل پرتو دوباره اجرا گردیده است.

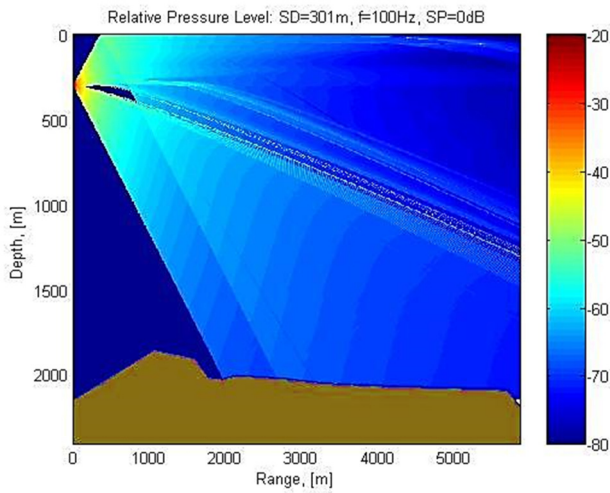
در این سناریو، نحوه انتشار صوت در غیاب جریان نفوذی (شکل ۷)، تغییرات چندانی را در مقایسه با شکل ۵ نشان نمی‌دهد. فقط وجود این جریان شکل ۶، موجب ایجاد کانال صوتی با ضخامت بیشتری از سناریو شبیه‌سازی حالت قبلی شکل ۴ خواهد شد.

به‌علاوه، شدت فشار صوتی در فاصله ۷ کیلومتر در سطوح بالا، بیشتر به گیرنده‌ها می‌رسد.

۳-۱-۴. چشمه صوتی در زبانه جبهه جریان نفوذی: عمق ۲۴۱ متری

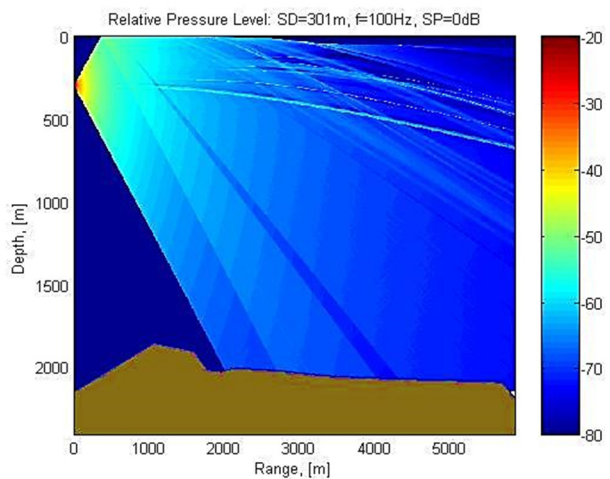
در این سناریو با نصب پروژکتور در عمق ۲۴۱ متری و در فاصله ۷ کیلومتری از منبع، مدل پرتو دوباره اجرا گردیده است.

شکل ۸ نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع در زبانه جریان نفوذی (در عمق ۲۴۱ متری) نصب شده باشد را نشان می‌دهد. در این حالت، پرتوها به سمت بالا و به سمت سطح دریا، خم می‌شوند و کانال صوتی را در سطح تشکیل می‌دهند. البته همان‌طور که در این شکل مشخص است، در فاصله بین ۲ تا ۵ کیلومتری، مناطق کور تشکیل می‌شوند که هیچ پرتو صوتی به این مناطق نفوذ نکرده است.



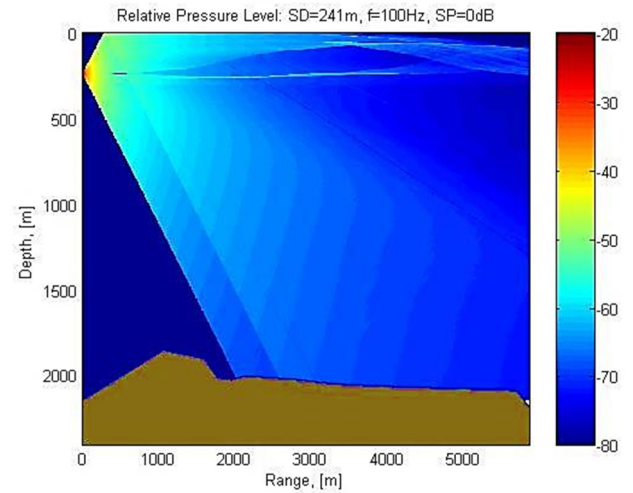
شکل ۱۰: نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع در پایین جریان نفوذی (در عمق ۳۰۱ متری) نصب شده است.

شکل ۱۰ نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع در پایین جریان نفوذی (در عمق ۳۰۱ متری) نصب شده باشد را نشان می‌دهد. در این حالت مناطق کور بیشتری در محیط ایجاد می‌شوند، به طوری که در فاصله‌ی یک کیلومتری از منبع، هیچ پرتو صوتی در عمق ۳۰۰ متری، نفوذ نکرده است.



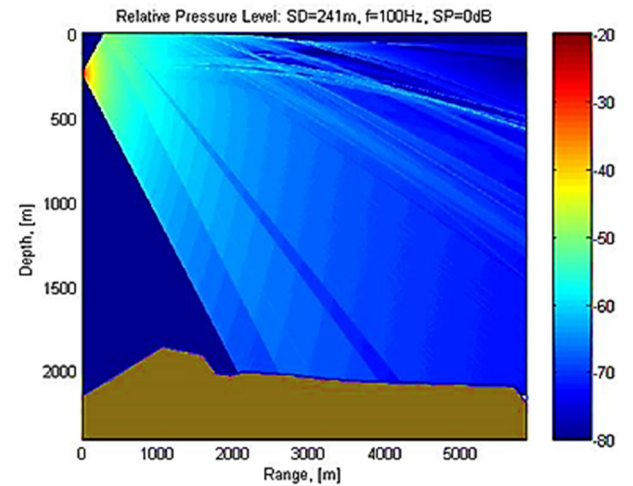
شکل ۱۱: نحوه انتشار صوت در غیاب جریان نفوذی (عمق منبع ۳۰۱ متری)

شکل ۱۱ نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع در عمق ۳۰۱ متری نصب شده باشد را نشان می‌دهد. این حالت تقریباً مشابه شکل‌های قبلی (در غیاب جریان نفوذی) است. البته در برخی اعماق (۳۰۰ و ۵۰۰ متری) در فاصله ۷ کیلومتر، شدت فشار صوتی بیشتر به گیرنده‌ها می‌رسد.



شکل ۸: نحوه انتشار صوت هنگامی که منبع در دماغه جریان نفوذی (در عمق ۲۴۱ متری) نصب شده است.

شکل ۹ نحوه انتشار صوت در غیاب جریان نفوذی (عمق منبع ۲۴۱ متری) را نشان می‌دهد. در این حالت نیز تغییرات فشار صوتی، شبیه به سناریوهای قبلی (در غیاب جریان نفوذی) است.



شکل ۹: نحوه انتشار صوت در غیاب جریان نفوذی (عمق منبع ۲۴۱ متری)

۳-۱-۵. چشمه صوتی در پایین جریان نفوذی: عمق ۳۰۱ متری

در این سناریو با نصب پروژکتور در عمق ۳۰۱ متری و در فاصله ۷ کیلومتری از منبع، مدل پرتو دوباره اجرا گردیده است. در این سناریو منبع صوتی در پایین ایجاد لایه‌ی صوتی نصب شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

- M., 2012. A simulation study of multipath characteristics of acoustic propagation in the Strait of Hormuz. *Journal of the Persian Gulf*, 3(9): 43-51.
- Bidokhti, A., 2005. Shear-induced splitting of a plume outflow in a stratified enclosed basin. *Indian Journal of Marine Sciences*, 34(2): 192-211.
- Bower, A.S.; Hunt, H.D.; Price, J.F., 2000. Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 105(C3), 6387-6414.
- Jensen, F.B.; Kuperman, W.A.; Porter, M.B.; Schmidt, H., 2011. *Computational ocean acoustics*: Springer. 813 p.
- Mackenzie, K.V., 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *Journal Acoustic Society America*, 70 (807-808).
- Salon, S.; Crise, A.; Picco, P.; Marinis, E.; Gasparini, O., 2003. Sound speed in the Mediterranean Sea: An analysis from a climatological data set. *Ann. Geophys*, 21: 833-846.

نتایج بررسی نحوه انتشار صوت با وجود جریان نفوذی و در غیاب آن عبارتند از:

الف- اگرچه در حضور جریان نفوذی اکثر سناریوها، در سطوح بالای جریان نفوذی، کانال صوتی مشاهده می‌شود ولی در غیاب این جریان، کانال‌های صوتی محو می‌شوند.

ب- پرتوهای صوتی در غیاب جریان نفوذی، به سمت پایین خم می‌شوند که این گونه نحوه انتشار با تغییرات نیمرخ سرعت صوت که با افزایش عمق، سرعت صوت کاهش می‌یابد، مطابقت دارند.

ج- جریان خروجی از خلیج فارس به دریای عمان باعث ایجاد وارونگی سرعت صوت در اعماق بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ متری می‌شود.

منابع

- کميجانی، ف؛ چگینی، و، ۱۳۹۱. تحلیل فضایی و میدانی کمیت‌های فیزیکی آب خایج چابهار در مونسون زمستانه سال ۱۳۸۶-۱۳۸۵. نشریه اقیانوس‌شناسی، شماره ۹، بهار ۱۳۹۱، صفحات ۶۹ - ۷۷.
- Akbarinasab, M.; Chegini, V.; Bidokhti, A.; Sadrinassab,