

شبیه‌سازی انتشار صوت در محیط ساختار انگشت نمک در شرق تنگه هرمز

مصطفی سلگی^۱، مهدی محمد مهدی زاده^{۲*}، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳ و اسماعیل حسن زاده^۴

^۱ دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ گروه علوم غیر زیستی جو و اقیانوس، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
^۳ دانشیار، گروه علوم غیر زیستی جو و اقیانوس، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
^۴ استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۵ استاد، گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱)

چکیده

محیط‌های آبی هدایت کننده مناسبی برای انتشار امواج صوتی هستند و تغییر در پارامترهای فیزیکی آب بر سرعت و انتشار صوت مؤثر است. یکی از تغییرات قائم در ستون آب، ساختار انگشت نمک (Salt-fingering) است که به دلیل گرادیان‌های قائم دما و شوری با ضرایب پخش متفاوت، با لایه‌بندی آب گرم و شور بر روی آب سرد و کم شور رخ می‌دهد و مناطقی مانند تنگه هرمز با تبادل ترموهالینی میان حوضه شور (خلیج فارس) و آب‌های آزاد کم شور (دریای عمان و اقیانوس هند)، مستعد شکل‌گیری انگشتان نمک هستند. با افزایش جریان گرم ورودی از دریای عمان به خلیج فارس و افزایش تبخیر در اواخر بهار، شکل‌گیری انگشتان نمک در تنگه هرمز تقویت می‌شود. بررسی گرادیان‌های قائم دما و شوری در بخش شرقی تنگه هرمز نشان می‌دهد که یک لایه سطحی گرم و شور (34°C و 39 psu) بر روی یک لایه سرد و کم شور (29°C و 37.5 psu) قرار دارد که منجر به ریزش انگشتان نمک از سطح تا عمق 40 m – 70 m و آمیختگی در ستون آب می‌شود. به طوری که سرعت صوت در طول کانال یکنواخت نبوده و از سطح تا عمق ریزش انگشتان نمک به بیشترین مقدار (1557 m/s) خود می‌رسد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پرتوهای صوتی با زاویه انتشار کمتر، با عبور از محل انگشتان نمک در سطح پراکنده می‌شوند و با افزایش عمق فرستنده صوتی، اثر اتلافی ساختار نمکی در انرژی و انتقال سیگنال صوتی کاهش می‌یابد اما انحراف از محل ساختارهای نمکی قوی (با ریزش قوی و غلظت بیشتر) مشاهده می‌شود. انتشار سیگنال صوتی با تابعیت از مرزبندی ساختار نمکی همراه بوده و پرتوهای صوتی با انحراف قابل توجه و 85 dB – 80 dB اتلاف در انتشار، (15 dB – 10 dB) افزایش در اتلاف منتقل می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: ساختار پخش دوگانه، انگشت نمک، تنگه هرمز، خلیج فارس، سیگنال صوتی، اتلاف انتشار سیگنال صوتی

۱ مقدمه

محیط آب به عنوان یک هدایت کننده مناسب برای امواج صوتی به شمار می آید و استفاده از امواج صوتی در آب برای دست یابی به اطلاعات محیطی یکی از موارد کاربرد صوت در دریا و اقیانوس ها است. تعیین عمق و توپوگرافی کف دریا به کمک اندازه گیری زمان رفت و برگشت صوت؛ ایجاد ارتباط در زیر آب؛ ردیابی شناورهای سطحی و زیرسطحی کوچک و بزرگ، مسیریابی حرکت آبریان و موارد مشابه از جمله کاربردهای دانش آکوستیک است. با این وجود، انتشار صوت در دریا در فواصل طولانی و برد زیاد، زمانی میسر است که کانال صوتی ایجاد شود و این تابع لایه بندی آب و تغییرات مناسب سرعت صوت در آب است. سرعت صوت در دریا از مهمترین پارامترهای اقیانوس شناسی است که بسیاری از خصوصیات انتشار صوت در اقیانوس را تعیین می کند (لو و همکاران، ۲۰۰۴) و در اکثر فعالیت های میدانی مستلزم شناخت و درک صحیح از تغییرات سرعت صوت است و می تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه ساختار اقیانوس و ویژگی های آب دریا ارائه دهد (کریر و همکاران، ۲۰۰۹). تغییرات سرعت صوت در دریا تعیین کننده ویژگی های مربوط به انتشار صوت در محیط مربوطه می باشد و این تغییرات به ویژگی های فیزیکی نواحی مختلف دریا بستگی دارد.

سرعت صوت در آب دریا بیشتر تابع تغییرات دما، شوری و فشار آب است و تأثیر پارامترهای دیگر بسیار کم است (یوسف ۱۹۷۹؛ یوریک، ۲۰۱۱). به طور کلی تغییرات قائم سرعت صوت در اقیانوس ها بسیار بیشتر از تغییرات افقی آن است (رادهاکریشان، ۱۹۹۵). تغییر در ساختارهای افقی و قائم پارامترهای فیزیکی، ناپایداری و آمیختگی ناشی از آن می تواند اثر قابل توجهی در سرعت و انتشار صوت در آب های کم عمق و عمیق داشته باشد. یکی از ساختارهای قائم و قابل توجه که به دلیل گرادیان قائم دما و شوری میان دو لایه آب و ضرایب پخش متفاوت

دما و شوری (به ترتیب $k_T = 1.04 \times 10^{-7} m^2 / s$ ، $k_S = 1.04 \times 10^{-9} m^2 / s$) شکل می گیرد، فرآیند پخش دوگانه (Double Diffusion) است.

در سیستم های دارای گرادیان قائم منفی چگالی، اگر چگالی (ρ) با دو مخلفه دما (T) و شوری (S) که با میزان مختلف پخش می شوند کنترل شود، فرآیند پخش دوگانه (DD)، در شرایط و شکل های متفاوت ایجاد می شود و موجب می شود تا آمیختگی رخ دهد (استرن، ۱۹۶۰) در حالی که شاره به طور استاتیکی، پایدار است و چگالی آن با افزایش عمق افزایش می یابد. به همین دلیل بسیاری از مناطق اقیانوسی به طور بالقوه مستعد ناپایداری پخش دوگانه (Double-Diffusive instability) هستند (رادکو، ۲۰۱۳). دو نوع ساختار پخش دوگانه اقیانوسی وجود دارد؛ ساختار انگشت نمک (Salt-fingering) و همرفت پخشی (Diffusive Convection). انگشت نمک (SF)، زمانی اتفاق می افتد که لایه آب گرم و شور بر روی لایه سرد و کم شور قرار گیرد و دما و شوری به سمت بالا افزایش یابد. از طرف دیگر همرفت پخشی زمانی رخ می دهد که آب کم شور و سرد بر روی آب شور و گرم قرار گیرد.

از آنجا که شرایط لازم برای انگشت نمک شایع تر است، بنابراین در بررسی شکل گیری و اثرات پخش دوگانه، به ویژه در عرض های پائین، بر شکل گیری انگشت نمک تأکید می شود. شکل گیری انگشت نمک به طور گسترده در مناطق مختلفی از جمله نواحی نیمه گرمسیری اقیانوس اطلس (اشمیت، ۱۹۸۱)، شرق جزیره باربادوس (Barbados) در اقیانوس اطلس غربی (مازیکا، ۱۹۷۴؛ بوید و پرکینز، ۱۹۸۷)، اقیانوس اطلس شرقی و زیر جریان شور خروجی از دریای مدیترانه (هو و تایت، ۱۹۷۰؛ لیوت و همکاران، ۱۹۷۴)، در دریای مدیترانه (ویلیامز، ۱۹۷۴)، در دریای تیرنی (Tyrrhenian Sea) در شمال دریای مدیترانه (جانسن و لی، ۱۹۷۴؛ زودیاتیس و گاسپارینی، ۱۹۹۶)، در

دما حدود ۲۶ درجه سانتی‌گراد در مهرماه و حداقل دما ۱۹ درجه سانتی‌گراد در اسفند_ فروردین ماه است (پوز و همکاران، ۲۰۰۴). شوری در تنگه از دی تا خرداد افزایش می‌یابد و حداکثر آن در خرداد ماه تقریباً ۳۹ psu تا عمق ۴۰ متر است. در شرق تنگه، توده آب کم شور دریای عمان از شهریور تا دی با شوری ۳۶٫۵ psu گسترش می‌یابد. با شروع بهار افزایش شوری به قسمت جنوبی محدود می‌شود و به ۳۸ psu می‌رسد. در اسفند ماه، توده آب کم شور در شمال تنگه هرمز گسترش می‌یابد و بخش بزرگی از شمال تنگه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (تاپی و هوگان، ۲۰۰۹).

با توجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی خلیج فارس و اهمیت ارتباطی آن از طریق تنگه هرمز با آب‌های آزاد؛ بهره‌برداری علمی، اقتصادی، سیاسی و نظامی از آن وابسته به شناسایی و آگاهی از ویژگی‌های جغرافیایی و اقیانوس‌شناسی آن است. این امر موجب شده است تا در زمینه‌های مختلف اقیانوس‌شناسی مانند خواص فیزیکی، امواج و جزر و مد، گردش و تبادل ترموهالینی، فرآیندهای اقیانوسی و انتشار امواج صوتی و عوامل مؤثر بر آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. به‌طوری‌که در سال‌های اخیر، شکل‌گیری پخش دوگانه در تنگه هرمز نیز مورد توجه بوده و مطالعاتی در این زمینه انجام گرفته است (عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۷؛ انصاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ ارشادی و همکاران، ۱۳۹۲؛ اکبری نسب و همکاران، ۱۳۹۳؛ ناظمیه و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین با توجه به شکل‌گیری پخش دوگانه و اهمیت کاربرد ابزارهای آکوستیکی و کنترل انتشار امواج صوتی در منطقه تنگه هرمز؛ بررسی اثر فرآیندهای پخش دوگانه بر نحوه انتشار امواج صوتی در تنگه هرمز امری مهم و کاربردی است. هدف اصلی از این پژوهش، تعیین محل و زمان تشکیل انگشت نمک در منطقه تنگه هرمز و نحوه اثرگذاری انگشت نمک بر انتشار صوت در تنگه هرمز با استفاده از تئوری پرتو است. در این مطالعه ابتدا تغییرات قائم دما، شوری و فرکانس شناوری با تغییرات

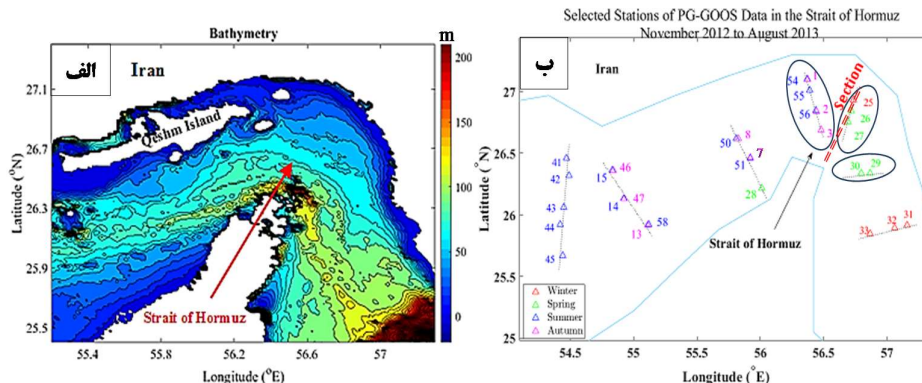
دریای ودل (فوستر و کارماک، ۱۹۷۶)، در دریای سرخ (مگنل، ۱۹۷۶) و در اقیانوس هند (یو، ۲۰۰۲)، در نزدیکی جریان کوروشیو (شی و وی، ۲۰۰۷)، پراکندگی صوتی ناشی از پخش دوگانه (لاوری و راس، ۲۰۰۷)، در غرب اقیانوس آرام (لی و همکاران، ۲۰۱۴) و به‌طور پراکنده در تنگه هرمز و خلیج فارس (عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۷؛ انصاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ ارشادی و همکاران، ۱۳۹۲؛ اکبری نسب و همکاران، ۱۳۹۳؛ ناظمیه و همکاران، ۱۳۹۷) و در حاشیه جریان خروجی خلیج فارس به دریای عمان (بیدختی و عظام، ۲۰۰۹) مطالعه شده است.

تنگه‌ها و محل تبادل ترموهالینی (Thermohaline Exchange) حوضه‌های شور با آب‌های آزاد و یا مناطق با اختلاف دمای بالا میان لایه سطحی و عمیق از جمله نواحی مستعد شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه هستند. مناطقی مانند تنگه هرمز که تبادل عمده و اصلی در آن از طریق جریان ترموهالین است، مستعد ساختارهای پخش دوگانه بوده و بررسی آن‌ها به‌عنوان یک اثر محیطی در منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنگه هرمز یک گذرگاه طبیعی است که در موقعیت جغرافیایی ۲۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است (الحجری، ۱۹۹۰). از نظر عمق‌سنجی؛ هیچ برآمدگی و یا تپه دریایی در بستر تنگه هرمز وجود ندارد و عمق خلیج فارس در این ناحیه به بیش از ۱۱۱ متر نیز می‌رسد (رینولدز، ۱۹۹۳). عمق تنگه هرمز در نواحی جنوبی بیشتر از قسمت شمالی است (شکل ۱. الف). کف دریا در تنگه هرمز شیب نسبتاً تندی در جهت شمالی - جنوبی دارد. به‌طوری‌که عمق آن در نزدیکی جزیره لارک در حدود ۳۶ متر و در ساحل جنوبی نزدیک شبه‌جزیره المسندم ۱۸۰ متر است و دارای میانگین عمقی در حدود ۱۰۰ متر است.

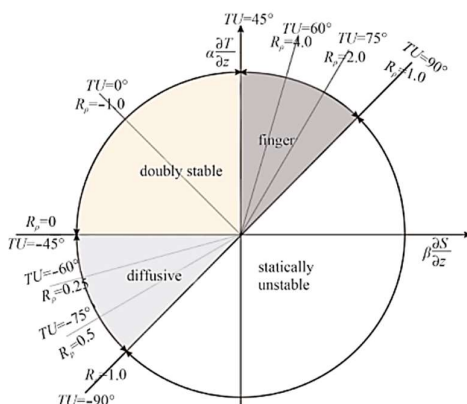
حداکثر دما در تنگه در لایه سطحی ۳۱ درجه سانتی‌گراد در خرداد_ تیر ماه و حداقل دما در حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد در آذر_ دی ماه است. در لایه زیرین، حداکثر

زاویه ترنر (Turner angle) در طول مقطع تعیین شده در تنگه هرمز مشخص شده است. در ادامه، اثرات SF بر انتشار سیگنال صوتی بررسی شده است.

زاویه ترنر ایستگاه‌های انتخاب شده در شکل ۱ ب، مقایسه و هیستوگرام زاویه ترنر برای ساختارهای پخش دوگانه در هر ایستگاه تعیین شده است. سپس ساختار SF بر اساس متغیرهای فیزیکی، لایه‌بندی توده آب و با استفاده از مقادیر



شکل ۱. الف) نقشه زمین‌شناختی و عمق سنجی تنگه هرمز؛ استخراج شده از Etopo2 (ب) ایستگاه‌های انتخاب شده (حلقه‌های مشکی) در تنگه هرمز از داده‌های (PG-GOOS) جمع‌آوری شده توسط سازمان ملی اقیانوس‌شناسی و محل مقطع عرضی انتخاب شده (نقطه‌چین قرمز) با استفاده از داده‌های هایکام.



شکل ۲. دیاگرام نسبت چگالی و زاویه ترنر مطابق با شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه (یو، ۲۰۰۲).

(شکل ۱. ب، Section) استفاده شده است. این داده‌ها با میانگین شش روزه از ۵ ژانویه ۲۰۱۵، بخشی از خروجی یک آزمایش جهانی ۱/۱۲ درجه با مدل اقیانوسی مختصات هیبریدی هایکام (HYCOM: Hybrid Coordinated Ocean Model) است. همچنین، عمق سنجی و توپوگرافی منطقه از داده‌های Etopo-2 استخراج شده است. با استفاده از داده‌های گردآوری شده؛ تغییرات قائم دما،

۲ داده‌ها و روش مطالعه

در این تحلیل، از داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از CTD (PG-GOOS، نوامبر ۲۰۱۲ تا اوت ۲۰۱۳) و گردآوری شده توسط موسسه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ایران (شکل ۱. ب)، برای استخراج پروفایل قائم متغیرهای فیزیکی و از داده‌های HYCOM برای تحلیل دو بعدی متغیرها و زاویه ترنر در طول مقطع انتخاب شده

و ساختار انگشت نمک به ازای مقادیر $90 < Tu(SF) < 45$ شکل می‌گیرد. میان این دو محدوده ($45 < Tu(SF) < 45$) حالت پایدار است (شکل ۲) و به ازای مقادیر خارج از محدوده پخش دوگانه، ناپایداری و تلاطم رخ می‌دهد (رودیک، ۱۹۸۳، علی اکبری بیدختی، ۱۳۹۸).

در هر دو نوع از ساختار پخش دوگانه، نوع ساختار به ازای مقادیر بیشینه تقویت می‌شود به طوری که در یک دسته بندی؛ انگشت نمک ضعیف و قوی به ترتیب به ازای مقادیر زاویه ترنر $67.5 < Tu(SF) < 45$ و $90 < Tu(SF) < 67.5$ و همرفت پخش ضعیف و قوی به ترتیب به ازای مقادیر $45 < Tu(DC) < 67.5$ و $67.5 < Tu(DC) < 90$ تشکیل می‌شوند (روبرتسون و همکاران، ۱۹۹۵).

با استفاده از تئوری زاویه ترنر (معادله ۲) می‌توان تغییرات زاویه ترنر و شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه را در تنگه هرمز بررسی کرد. جریان ترموهالین مبادله شده از تنگه هرمز با ورود آب گرم و کم شور سطحی از دریای عمان همراه با تبخیر زیاد در بهار و تابستان (حسینی بالام و همکاران، ۲۰۱۱)، شرایط اولیه در شکل‌گیری انگشت نمک را فراهم می‌کند. به طوری که چندین ساختار SF در عمق‌های بین ۸۵-۲۰ متری و SF قوی در عمق ۹۰-۸۵ متر در شرق و شمال تنگه هرمز رخ می‌دهد. به دلیل تبخیر زیاد، SF در نزدیکی سطح در لایه آمیخته سطحی تشکیل می‌شود (عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به داده‌های موجود و پس از تعیین محل و عمق شکل‌گیری انگشتان نمک در تنگه هرمز، می‌توان با محاسبه مقادیر سرعت صوت در عمق‌های مختلف، اثر ساختارهای نمکی را بر سرعت و انتشار سیگنال صوتی، به ویژه در محل شکل‌گیری ساختارهای قوی نمکی، بررسی نمود. باید توجه داشت که تعیین سرعت صوت فرآیندی تجربی است که بر اساس پارامترهای اصلی آب دریا در نواحی مختلف صورت می‌گیرد (ویلسون، ۱۹۶۰). بسیاری از روابط تجربی برای محاسبه سرعت صوت استخراج شده‌اند و هر معادله

شوری، چگالی و فرکانس شناوری ترسیم و بررسی می‌شوند و سپس ساختارهای پخش دوگانه در منطقه استخراج می‌شوند و مورد بررسی قرار می‌گیرند. دوروش کلی برای بررسی و تحلیل پخش دوگانه ارائه شده است؛ روش نسبت چگالی (R_p) و زاویه ترنر (TU). استرن (۱۹۶۰) و ترنر (۱۹۶۵) بیان کردند که شکل‌گیری و شدت همرفت پخش (DC) و انگشت نمک (SF) با استفاده از کمیتی به نام نسبت چگالی R_p ، کنترل می‌شود:

$$R_p = \frac{\alpha T_z}{\beta S_z}, \quad (1)$$

که S_z و T_z به ترتیب گرادیان قائم دما و شوری و $\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{S,P}$ و $\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_{T,P}$ به ترتیب ضریب انبساط گرمایی و شوری هستند (کاپلان، ۲۰۰۸). پخش دوگانه (DD) به ازای مقادیر مثبت نسبت چگالی $R_p > 0$ تعریف می‌شود. با افزایش R_p ، شارش همرفتی کاهش می‌یابد و به ازای $R_p \approx 1$ شرایط برای انگشت نمک تقویت می‌شود و انگشت نمک به ازای $R_p > 1$ رخ می‌دهد (اونکن و برامبلا، ۲۰۰۳). معمولاً از روش نسبت چگالی R_p برای بررسی ساختارهای پخش دوگانه استفاده می‌شود؛ اما یک نقص ذاتی این مدل‌ها این است که وضوح قائم نسبتاً ضعیف است (اونکن و برامبلا، ۲۰۰۳؛ عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین در بسیاری از موارد استفاده از مقادیر زاویه TU برای تخمین DD ترجیح داده می‌شود. نسبت چگالی R_p می‌تواند به صورت زیر بر حسب زاویه ترنر Tu تعریف شود (رودیک، ۱۹۸۳):

$$R_p = -\tan(Tu + 45), \quad (2)$$

طبق رابطه فوق و مقادیر نسبت چگالی، مقادیر زاویه ترنر برای شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه در بازه $90 < Tu(DD) < -90$ تعریف می‌شود (شکل ۲). به طوری که ساختار همرفت پخش به ازای مقادیر $45 < Tu(DC) < 90$

ریزش شوری در توده گرم همراه است و موجب می‌شود تا شرایط برای شکل‌گیری انگشت نمک و تناوب آن مناسب باشد. تغییرات قائم نسبت چگالی و زاویه ترنر متناسب با تغییرات دما و شوری در تنگه هرگز نمایش داده شده است (شکل ۳. الف و ب). به طوری که در هر ایستگاه سه نمودار به ترتیب دما (نقطه چین قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی) ارائه شده است.

با توجه به نمودارها مشخص است که شکل‌گیری پخش دوگانه در این منطقه قابل توجه است و به طور میانگین از شرق به غرب و شمال به جنوب تنگه افزایش می‌یابد. به طوری که بیشینه انگشت نمک در روزهای گرم و در ایستگاه‌های ۵۵، ۵۶، ۲۷ و ۲۹ مشاهده می‌شود؛ اما با کاهش دما، شرایط برای انگشت نمک تعدیل می‌شود. دمای سطح آب به دلیل ظرفیت گرمایی آب در اواخر تابستان و پائیز افزایش می‌یابد. همچنین جریان ورودی به تنگه در پائیز و زمستان حداقل مقدار را دارد و همین امر موجب می‌شود تا شوری در لایه سطحی افزایش یابد به طوری که در ایستگاه‌های ۱ و ۲، لایه سطحی گرم تر و شورتر است و دما و شوری از سطح تا عمق ۵ متر در ایستگاه ۱ و تا عمق ۳۰ متر در ایستگاه ۲ کاهش می‌یابند. بنابراین، به طور میانگین چگالی با عمق افزایش می‌یابد و لایه بندی چگالی آب در حالت پایداری استاتیکی قرار دارد؛ اما فرکانس شناوری (St1) در عمق ۱٫۵-۲٫۵ متر حداقل مقدار را دارد و جابه‌جایی قائم بسته آب گرم و شور به ازای حداقل شناوری شرایط شکل‌گیری محدود و پراکنده انگشت نمک در این عمق را فراهم می‌کند (کادر مستطیلی در نمودار زاویه ترنر). به طوری که انگشت نمک قوی در محدوده ۶۷٫۵-۹۰ درجه به ازای کمینه فرکانس شناوری و در محدوده دمای ۱۲، ۲۸-۲۸٫۱۸ و شوری ۳۶٫۷۲-۳۶٫۷۸ رخ می‌دهد. از شمال به جنوب تنگه به دلیل افزایش تأثیر جریان

محدودیت دامنه و خطای خود را دارد. با توجه به افزایش دقت محاسبات در کنار کاهش خطای ناشی از ضرایب، معادلات مدوین یا مکنزی (مکنزی، ۱۹۸۱)، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادله مکنزی در بازه دمایی ۳۰ °C - ۰، شوری ۴۰ - ۳۰ psu و عمق ۸۰۰۰ - ۰ متر، معتبر است. در این پژوهش برای استخراج سرعت صوت از معادله مدوین استفاده شده است (مدوین، ۱۹۷۵):

$$C=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.00029T^3+(1.39-0.012T)(S-35)+0.017D, \quad (3)$$

به طوری که؛ D عمق (m)، S شوری (psu)، T دما (°C) و C سرعت صوت (m/s) در آب است. خواص فیزیکی آب مانند دما، شوری و فشار از جمله عوامل مؤثر در سرعت صوت و لایه بندی چگالی به عنوان عامل اصلی در شکل‌گیری کانال صوتی و انتشار صوت هستند. روش‌های گوناگونی در بررسی انتشار امواج صوتی معرفی شده‌اند. مزیت یا محدودیت استفاده از این روش‌ها بر اساس عمق (کمتر یا بیشتر از ۲۰۰ متر) و فرکانس صوتی (کمتر یا بیشتر از ۵۰۰ Hz) مشخص می‌شود (اتر، ۲۰۱۲). یکی از روش‌های تحلیل امواج صوتی تئوری پرتو (Ray theory) است که برای تحلیل انتشار امواج صوتی در فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به طوری که C سرعت صوت و h عمق آب است. در این مطالعه، انتشار سیگنال صوت در فرکانس‌های بالای ۵۰۰ هرتز (۶۰۰ Hz و kHz) با استفاده از تئوری پرتو و مدل بلهاپ (Bellhop model) شبیه‌سازی شده و اثر ساختار انگشت نمک بر انتشار صوت در تنگه هرگز بررسی شده است.

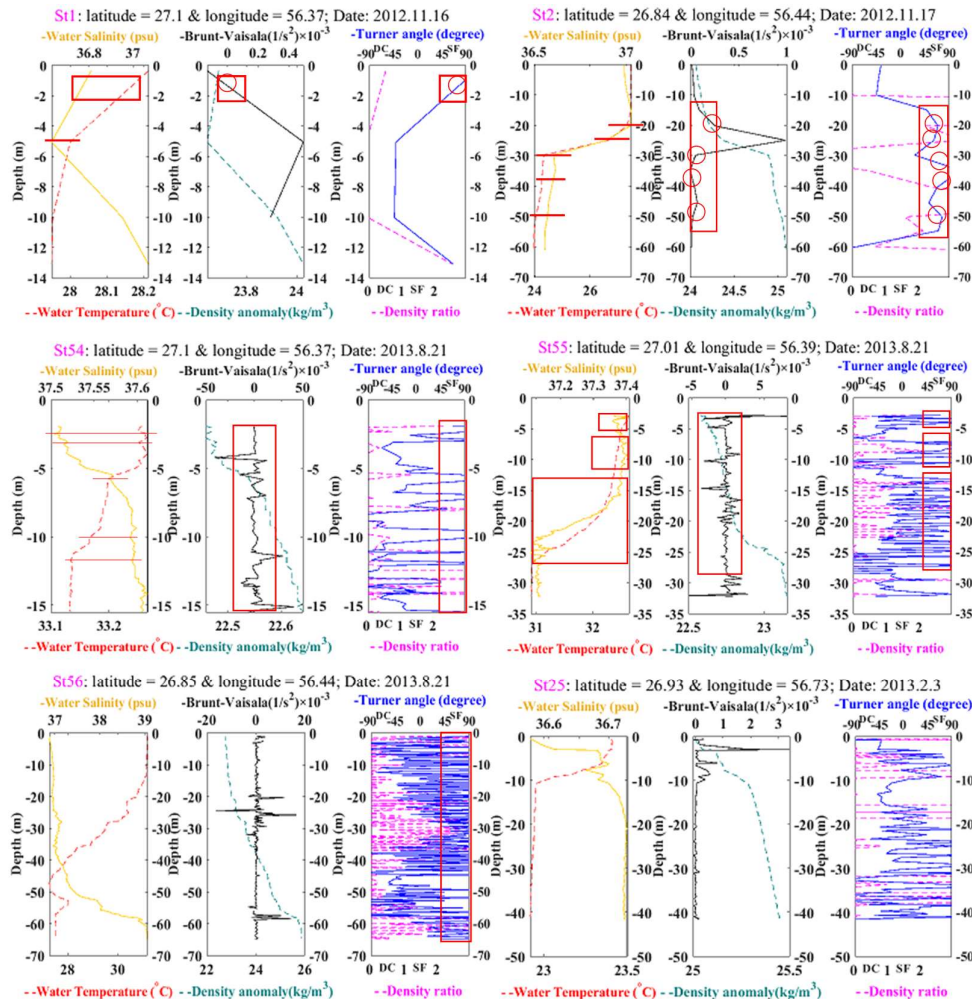
۳ نتایج و بحث

۳-۱ تغییرات قائم و هیستوگرام زاویه ترنر

افزایش شوری موجب افزایش چگالی می‌شود اما جریان گرم سطحی موجب می‌شود تا چگالی لایه تعدیل شده و لایه سطحی پایداری خود را حفظ کند اما این پایداری با

شناوری حول مقدار کمینه صفر نوسان می‌کند، ریزش نمکی در تمام ایستگاه‌های شرقی و میانی تنگه رخ می‌دهد و نقش قابل توجهی در آمیختگی قائم در ستون آب دارد. در نواحی شمالی تنگه و تحت تأثیر حجم جریان آب ورودی و آمیختگی ناشی از آن، ساختار انگشت نمک در عمق رشد بیشتری دارد (St26, St27, St54 and St55) در حالی که در ایستگاه‌های جنوبی (St29, St30 and St56)

ترموهالینی و لایه بندی گرم بر جریان سرد خروجی از تنگه (St2)، انگشتان نمک تقویت شده و چندین انگشت نمک در عمق ۱۵-۵۰ متر در ستون آب تشکیل شده و انگشت نمک قوی به ازای حداقل فرکانس شناوری در عمق‌های ۲۰، ۳۵، ۴۲ و ۵۰ متر رخ می‌دهد؛ اما با افزایش جریان گرم ورودی از دریای عمان در فصل بهار و تابستان و افزایش نرخ تبخیر در اواخر بهار، شکل‌گیری و رشد انگشتان نمک به‌طور قابل توجهی تقویت شده و در حالی که فرکانس

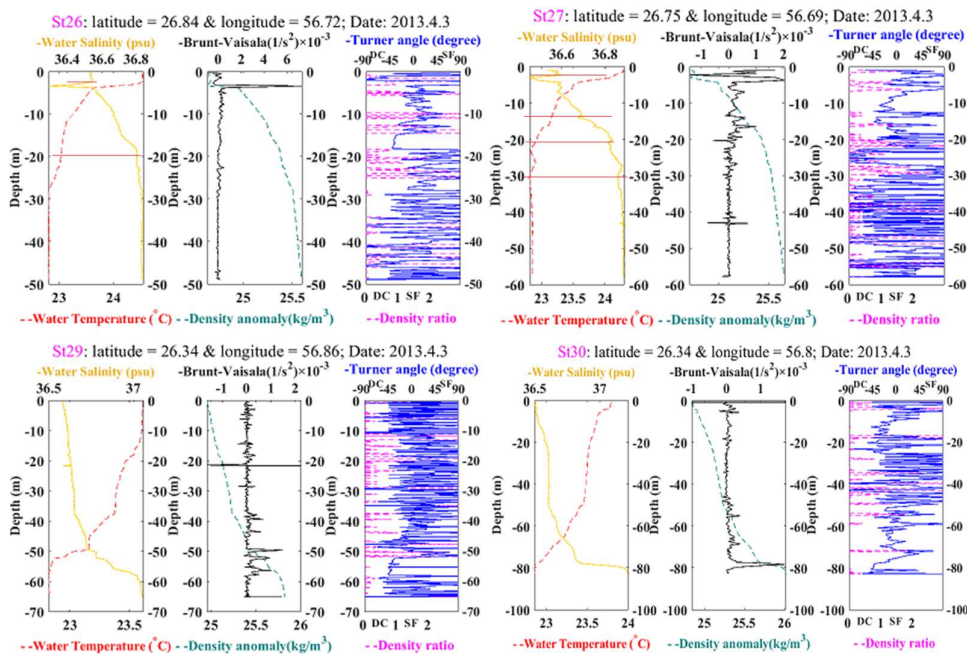


شکل ۳. الف. پروفایل قائم دما (خط قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی)؛ در ایستگاه‌های انتخاب شده در مقطع شرقی تنگه هرمز.

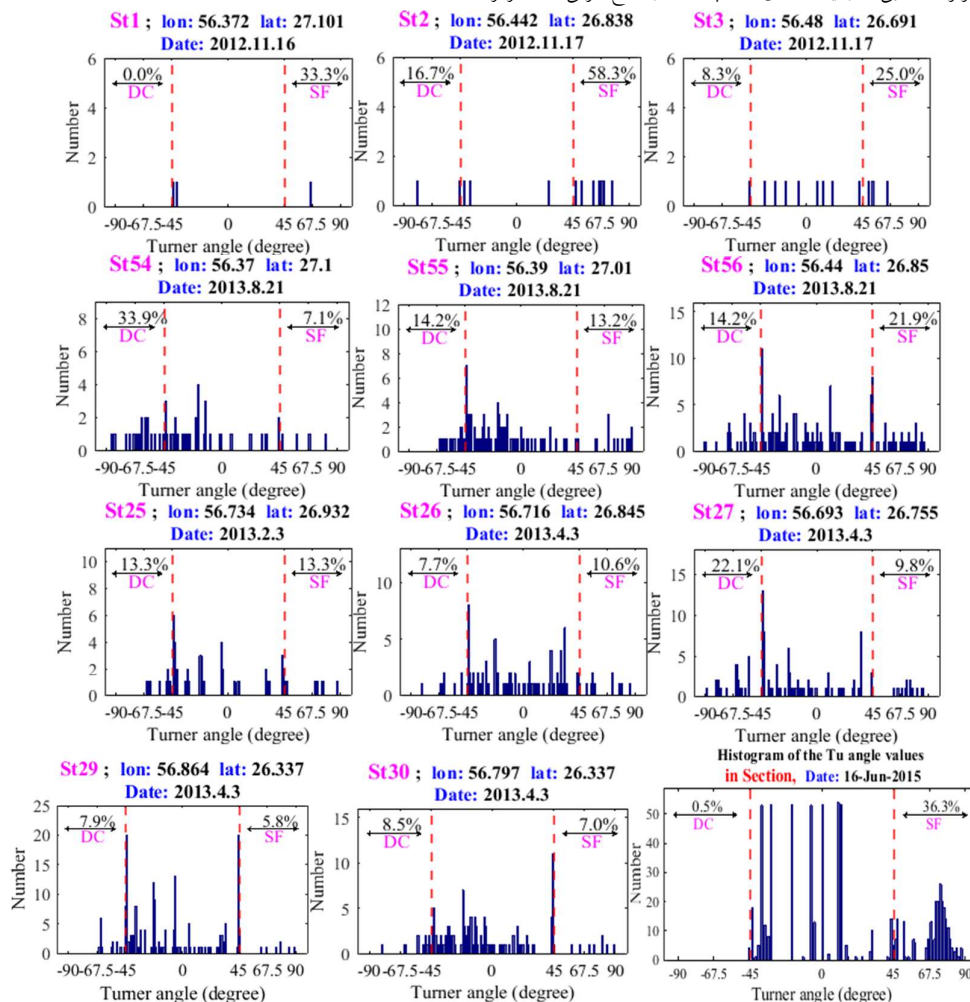
پخش دو گانه فراهم است و ستون آب می تواند در حالت پایدار استاتیکی، ناپایدار و یا شامل آمیختگی ناشی از انگشت نمک و همرفت پخش باشد. فراوانی انگشت نمک در ایستگاه‌های ۲ و ۵۶ و ۲۶ در جنوب و شرق تنگه بیشتر از ساختار همرفت پخش است با این وجود حالت پایدار و همرفت پخش نیز در این دو ایستگاه تأثیر قابل توجهی بر ستون آب دارند. در ایستگاه‌های ۱ و ۲ انگشت نمک ساختار غالب در ستون آب است و در ایستگاه‌های ۲۹ و ۳۰، با وجود درصد رشد قابل توجه همرفت پخش نسبت به انگشت نمک اما ساختارهای همرفت در محدوده (۴۵- Tu 67.5) با ساختاری ضعیف و انگشتان نمک در محدوده (۴۵ Tu 67.5) با ساختار انگشت قوی تشکیل شده‌اند. در ایستگاه‌های میانی تنگه انگشت نمک نسبت به سایر حالت‌ها اثر غالبی دارد. وارونگی دما در ایستگاه ۵۴ و آمیختگی ناشی از جریان کم شور ورودی و سرد خروجی در فصل بهار در ایستگاه ۲۷، موجب می‌شود تا شرایط برای

انگشتان نمک از سطح تا عمق ۶۵ متری ستون آب گسترش یافته‌اند. با توجه به نمودارهای شکل ۳ ساختارهای پخش دو گانه به دلیل اختلاف دما و شوری کوچک (از مرتبه $^{\circ}C$ ۰٫۱-۰٫۱ و psu ۰٫۱-۰٫۱) میان دو لایه آب رخ می‌دهند. در تمام ایستگاه‌ها ستون آب از نظر استاتیکی پایدار است و آمیختگی قائم آب به‌طور غالب ناشی از ساختارهای پخش دو گانه و به ویژه انگشت نمک است. تعدادی ساختار همرفت پخش نیز در عمق تشکیل می‌شود اما با وجود فراوانی قابل توجه، بیشتر در محدوده همرفت پخش ضعیف قرار دارند.

درصد نسبی فرآیندهای پخش دو گانه و اثر آنها در ستون آب را می‌توان با استفاده از هیستوگرام زاویه ترنر در محدوده هر دو نوع ساختار پخش تعیین نمود؛ بنابراین هیستوگرام زاویه ترنر در ایستگاه‌ها و مقطع انتخاب شده در تنگه هرمز استخراج و در شکل ۴ ارائه شده است. در طول سال و به‌طور پراکنده شرایط برای شکل‌گیری ساختارهای



شکل ۳. ب. پروفایل قائم دما (خط قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی)؛ در ایستگاه‌های انتخاب شده در مقطع شرقی تنگه هرمز.



شکل ۴. هیستوگرام زاویه ترنر برای استخراج درصد فراوانی انگشت نمک، پایداری استاتیکی و همرفت پخش در ایستگاه‌ها و مقطع انتخاب شده در تنگه هرمز.

زاویه ترنر در مقطع تعیین شده (شکل ۴، هیستوگرام آخر) نشان می‌دهد که انگشت نمک با حدود ۳۶٫۳ درصد فراوانی در ستون آب و فراوانی ساختار آن در محدوده انگشتان قوی، نقش قابل توجهی در مقایسه با حالت پایدار و همرفت پخش دارد و برای بررسی ساختار انگشت نمک و اثر آن بر سیگنال صوتی می‌تواند مناسب باشد.

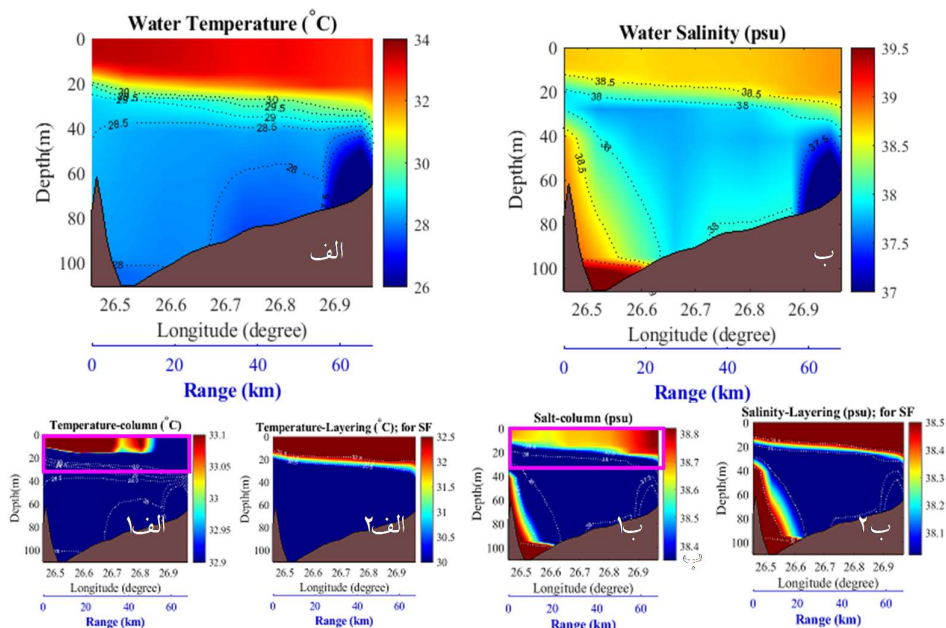
۲-۳ ساختار انگشت نمک در مقطع شرقی تنگه

شکل گیری ساختار انگشت نمک و نوسانات قائم دمایی و

تشکیل همرفت پخش فراهم باشد؛ اما با افزایش دما و جریان سطحی از تنگه، نقش ساختار انگشت نمک نسبت به ماه‌های سرد، برجسته‌تر می‌شود و ستون آب را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اثر جریان عبوری از تنگه و اثر تبخیر در شکل گیری انگشت نمک، مقطع شرقی تنگه هرمز (شکل ۱. ب، نقطه چین قرمز) در زمان شکل گیری انگشتان قوی، برای بررسی محل، عمق و ساختار شکل گیری انگشت نمک انتخاب شده است. هیستوگرام

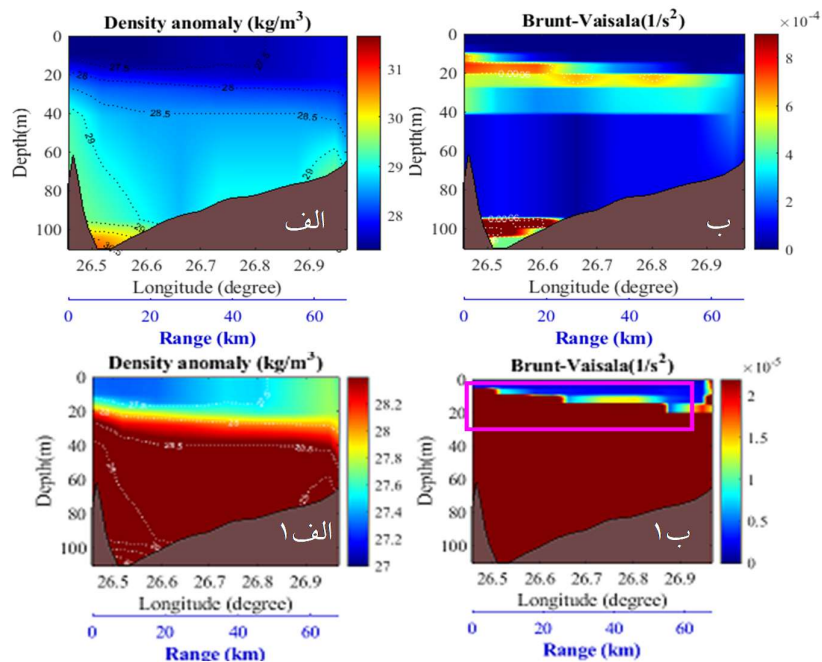
شوری ناشی از آن موجب تغییر در لایه بندی و عمق لایه مرزی می‌شود. با وجود آن که لایه بندی از نظر چگالی پایدار است اما تغییرات مرزی می‌تواند به دلیل اختلاف دما و شوری خیلی کوچک میان دو لایه رخ دهد. اغلب اختلاف دما و شوری میان دو منطقه به ازای مقادیر بزرگتر مشهود نیست و با محدود کردن دامنه تغییرات می‌توان لایه بندی و تغییر عمق لایه مرزی در شکل‌گیری پخش دوگانه را آشکار کرد. با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی هایکام، تغییرات دو بعدی کمیت‌ها در طول مقطع انتخاب شده و در زمان شکل-گیری انگشت نمک در تنگه هرمز، ترسیم شده است (شکل های ۵، ۶ و ۷). بر اساس شکل ۵، دما با عمق کاهش می‌یابد و بیشینه دما در سطح 34°C است (شکل ۵، الف) که یک توده گرم تا عمق ۱۵ متر را تشکیل می‌دهد (شکل ۵، الف ۱). بیشترین شیب دمایی در عمق ۲۰ متر مشاهده می‌شود که نشان دهنده یک لایه مرزی انتقال گرمایی میان دو لایه گرم بالایی و سرد پائین است و شرایط دمایی انگشت نمک را فراهم می‌کند؛ اما بیشترین اختلاف دمایی میان دو لایه در مختصات E

$26,9^{\circ}$ با اختلاف دمایی در حدود 5°C ، مشاهده می‌شود که می‌تواند موجب گسترش انگشتان نمک و عمیق‌تر شدن لایه مرزی در این ناحیه شود. به طوری که عمق لایه به دلیل آمیختگی ناشی از انگشت نمک تا ۳۰ متر در طول مقطع افزایش یافته است. این لایه مرزی به ازای دامنه مقادیر کوچک با اختلاف دمای کمتر از $0,5^{\circ}\text{C}$ در شکل ۵، الف ۲، مشخص شده است. به طور مشابه در شکل ۵، ب، لایه سطحی، شوری (۳۹ psu) بیشتری دارد و شوری از سطح تا عمق کاهش می‌یابد و در بخشی از جنوب تنگه به دلیل جریان خروجی از تنگه شوری تا ۳۹,۵ psu افزایش می‌یابد. قرارگیری لایه سطحی شور بر لایه کم شور زیر با اختلاف شوری ۰,۵ psu، شرایط ریزش نمکی را فراهم می‌کند و به طور مشابه با نمودار دما، بیشترین اختلاف شوری میان دو لایه در مختصات E $26,9^{\circ}$ (در حدود ۲ psu)، مشاهده می‌شود به طوری که توده نمکی در عمق ۱۰ متر تا عمق ۳۰ متر با شوری ۳۸,۸ psu در طول مقطع گسترش یافته است (شکل ۵، ب ۱) و موجب آمیختگی و تغییر در عمق لایه مرزی در حدود ۳۰-۱۰ متر شده است (شکل ۵، ب ۲).



شکل ۵. مقطع عرضی (الف) دما و (ب) شوری آب در مقطع شرقی تنگه هرمز، در ۱۵ ژوئن ۲۰۱۵، با استفاده از داده‌های هایکام. شکل‌های کوچک به ترتیب (الف)

(۱) توده آب گرم (الف) لایه بندی دمای آب (ب) توده آب شور (ب) لایه بندی شوری آب متناسب با ریزش انگشت نمک را نمایش می‌دهند.



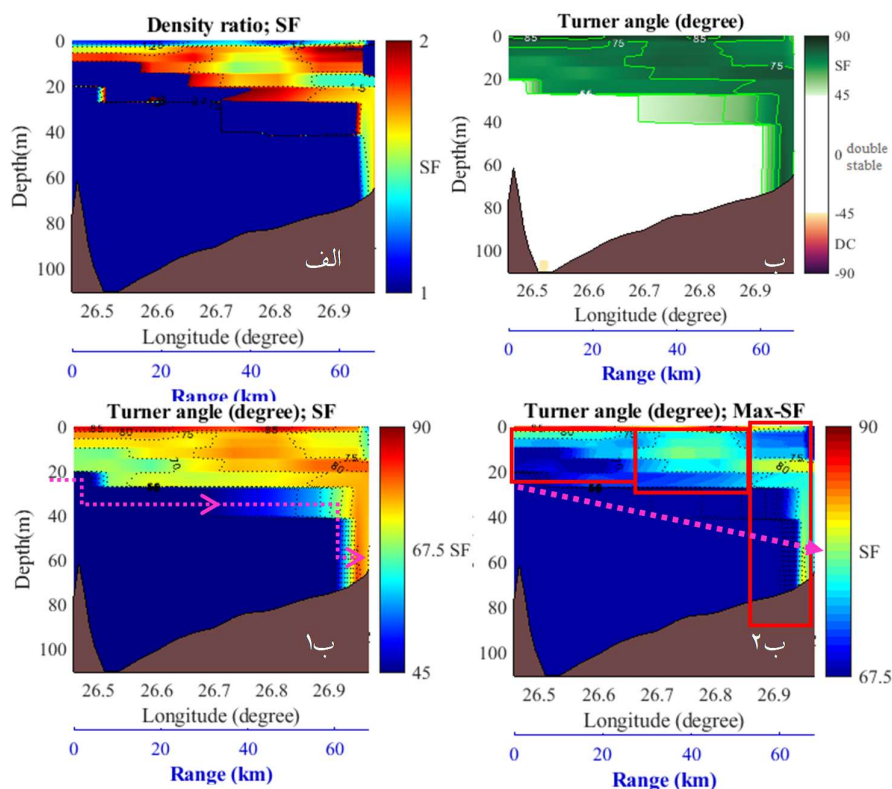
شکل ۶. مقطع عرضی (الف) چگالی و (ب) فرکانس شناوری آب در مقطع شرقی تنگه هرمز، در ۱۵ ژوئن ۲۰۱۵، با استفاده از داده‌های هایپاکام. شکل‌های کوچک به ترتیب (الف) لایه بندی چگالی و (ب) محدوده حداقل شناوری متناسب با ریزش انگشت نمک را نمایش می‌دهند.

شود (شکل ۶. ب). به طوری که توده گرم و شور در سطح گسترده شده و از سطح تا عمق ۴۰-۷۰ متر به صورت انگشت نمک ریزش می‌کند و موجب آشفته‌گی در مرز دو لایه می‌شود (شکل ۷). مقادیر زاویه ترنر ترکیبی از حالت‌های پایدار و همرفت در کنار انگشت نمک را نشان می‌دهد (شکل ۷. ب). تغییرات نسبت چگالی (شکل ۷. الف) و زاویه ترنر در محدوده شکل‌گیری انگشت نمک (شکل ۷. ب ۱)، با هم مطابقت دارند و زاویه ترنر، ساختار شکل‌گیری انگشت نمک به ویژه در ناحیه انگشت قوی (شکل ۷. ب ۲، کادر مستطیل) را با دقت بیشتری نمایش می‌دهد.

بر اساس شکل ۷. ب ۱، ساختار انگشت نمک با ساختاری قوی در سطح گسترده شده و به دلیل بیشترین اختلاف دما و شوری در ناحیه $26.9^{\circ}E$ تا عمق ۷۰ متر

تغییرات دما و شوری در عمق ۲۰ متر، به ازای اختلاف مقادیری کمتر از ۰.۵، میان دو لایه ایجاد می‌شود و گرم بودن لایه سطحی موجب می‌شود تا چگالی سطحی کمتر از لایه پائین باشد (شکل ۶. الف)؛ بنابراین ستون آب در حالت پایداری استاتیکی بوده و لایه بندی چگالی آب حفظ می‌شود. با این وجود آمیختگی ناشی از نوسانات قائم بسته گرم و شور موجب تغییر عمق لایه مرزی چگالی تا عمق ۳۰ متر شده است (شکل ۶. الف ۱).

اما جابه‌جایی در لایه مرزی و اختلاف اندک شوری، شرایط لازم را برای افزایش شوری بسته آب گرم سطحی و ریزش نمک به سمت مرز دو لایه فراهم می‌کند. سپس، با ایجاد شناوری منفی و تعدیل شناوری کل به سمت مقدار کمینه صفر (شکل ۶. ب)، بر شناوری آب غلبه می‌کند و موجب می‌شود تا فرکانس شناوری تا عمق ۲۰ متر تعدیل



شکل ۷. الف) مقطع عرضی نسبت چگالی (Rp) در محدوده انگشت نمک و مقطع عرضی زاویه ترنر (Tu) به ترتیب در محدوده (ب) ساختارهای پخش دوگانه، (ب) ۱) انگشت نمک و (ب) ۲) انگشت نمک قوی؛ در مقطع شرقی تنگه هرمز، ۱۵ ژوئن ۲۰۱۵. با استفاده از داده‌های هایکام.

ریزش انگشت نمک، می‌توان تغییرات سرعت و انتشار سیگنال صوتی در محل انگشت نمک را مورد بررسی قرار داد.

۳-۳ سرعت و انتشار سیگنال صوتی

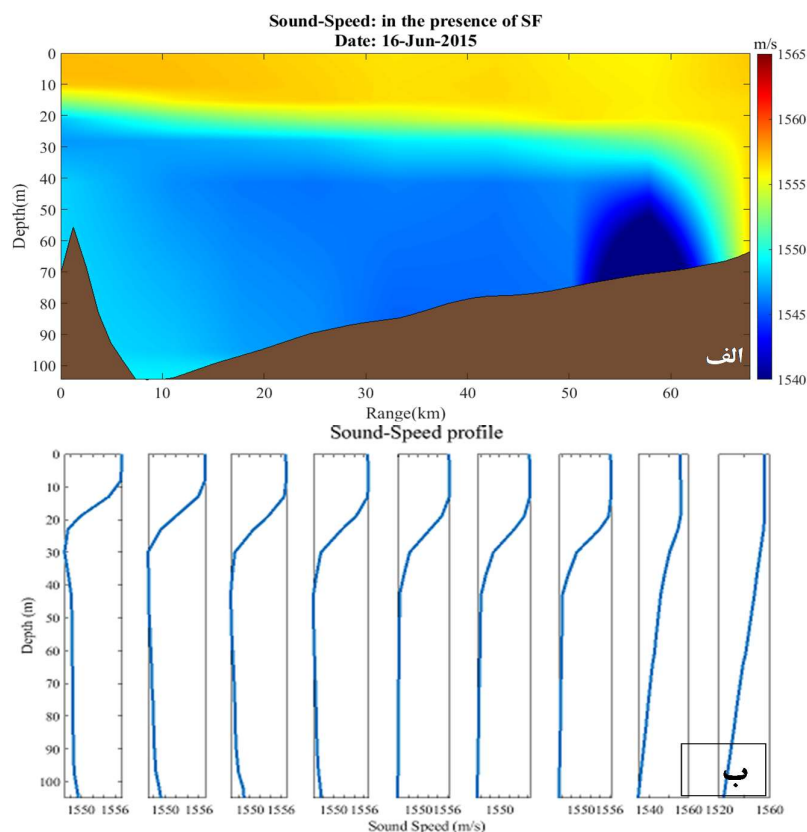
بر اساس شکل ۸ الف، سرعت صوت در عمق کانال یکنواخت نیست و در هر لایه متناسب با دما و شوری تغییر می‌کند. در لایه سطحی و محل شکل‌گیری انگشت نمک، سرعت صوت افزایش و به‌طور میانگین در عمق ۲۵-۹۰ متر کاهش می‌یابد؛ که این کاهش به دلیل تعدیل اثر پخش دوگانه و لایه بندی آب سرد و کم شور در عمق پائین است. سرعت صوت در لایه گرم و شور سطحی بیشترین مقدار را دارد، به‌طوری‌که به ازای سرعت ۱۵۵۷ متر بر ثانیه از سطح تا عمق ۱۰ متر در ابتدای کانال و تحت تأثیر جابه‌جایی بسته

۸۰ ریزش کرده است که متأثر از شناوری آب، عمق لایه مرزی تا ۳۰ متر متغیر بوده و شوری تحت تأثیر توده کم شور در عمق ۴۰- متر تعدیل می‌شود؛ اما قوی‌ترین انگشت نمک با زاویه ترنر ۸۵ درجه در عمق ۲ متر مشاهده می‌شود که مطابق با شکل ۷ ب. ۲، هسته اصلی این ریزش قوی در سطح در دو بخش ۲۰-۵۰ کیلومتر و ۴۰-۵۰ کیلومتر شکل گرفته است که محل توده گرم و ریزش سطحی توده شور است. مناطق شکل‌گیری ساختارهای قوی انگشت نمک و ریزش نمکی قوی می‌توانند تغییرات قابل توجهی در انتشار سیگنال صوتی ایجاد کنند. تغییر عمق مقطعی ساختار انگشت نمک و شیب ریزش عمیق آن با پیکان‌های رنگی در شکل‌های ۷ ب ۱ و ۲ مشخص شده است. با توجه به مشخص شدن محل شکل‌گیری، گستردگی و عمق

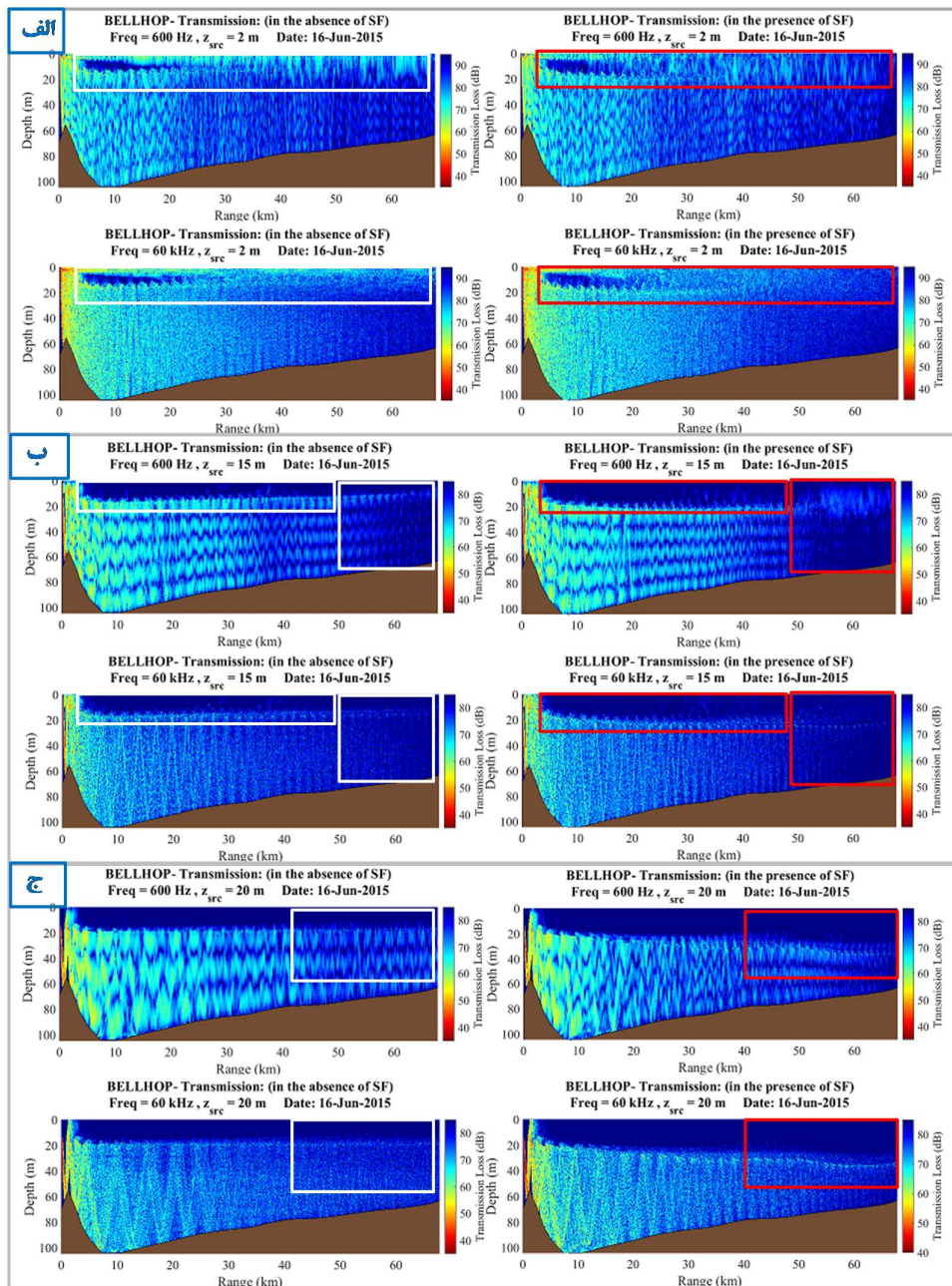
صوت، منتشر می‌شوند به طوری که از ناحیه‌ای که سرعت صوت در آن بیشتر است به سمت ناحیه با سرعت کمتر خمیده می‌شوند و در هر لایه یک کانال صوتی را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین تغییرات افقی و قائم در مقادیر سرعت صوت بر جهت انتشار پرتوها و اتلاف انرژی صوتی تأثیر دارند.

در این بررسی مکان فرستنده صوتی نسبت به گیرنده در عمق‌های مختلف و انتشار پرتو صوتی در فرکانس و زوایای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت تا اثر انگشت نمک به خوبی مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج برای چشمه صوتی در عمق ۲ متر (در لایه گرم و شور)، ۱۵ متر و ۲۰ متر (در مرز دو لایه) و ۳۰ متر (در لایه سرد و کم شور) و

گرم و شور و ریزش نمک تا عمق ۷۰ متر در امتداد کانال گسترش یافته است. بر اساس پروفایل‌های سرعت صوت (شکل ۸. ب) و در طول کانال، عمق لایه با سرعت بیشینه و یکنواخت تحت تأثیر ساختار پخش دوگانه افزایش می‌یابد. در طول کانال، سرعت به طور میانگین با شیب یکسانی با عمق کاهش می‌یابد اما در دو نمودار آخر، کاهش سرعت با شیب تند تری همراه است که این ناشی از توده سرد و کم شور در فاصله ۶۵-۵۰ کیلومتر و اختلاف دما و شوری بالا میان لایه سطحی و لایه پائین در این ناحیه است. افزایش در مقدار سرعت در عمق ۱۰۰-۴۰ متر در ابتدای کانال ناشی از جریان شور خروجی از جنوب تنگه است. پرتوهای صوتی بر اساس لایه بندی آب و تغییرات سرعت



شکل ۸. الف) مقطع عرضی سرعت صوت در زمان شکل‌گیری ساختار انگشت نمک در سطح و ب) پروفایل‌های قائم سرعت صوت؛ در مقطع شرقی تنگه هرمز،



شکل ۹. انتشار صوت در غیاب انگشت نمک (چپ) و در حضور انگشت نمک (راست) از منبع صوتی به ترتیب در عمق‌های (الف) ۲ متر و (ب) ۱۵ متر و (ج) ۲۰ متر، به ازای فرکانس‌های 600 Hz و 60 kHz. محل و نوع اثرگذاری انگشت نمک با کادر مستطیل رنگی مشخص شده‌اند.

محل شکل‌گیری انگشت نمک و تغییر در سیگنال صوتی با کادر مستطیلی و پیکان‌های رنگی در هر دو حالت مشخص شده است. با توجه به اینکه پرتوهای صوتی به

با دو فرکانس صوتی 600 Hz و 60 kHz، استخراج و در دو حالت؛ در غیاب انگشت نمک (چپ) و در حضور انگشت نمک (راست) در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند.

صوتی نسبت به فرکانس پائین، کمتر بوده اما انحراف از ساختار پخش در هر عمق بیشتر می‌شود.

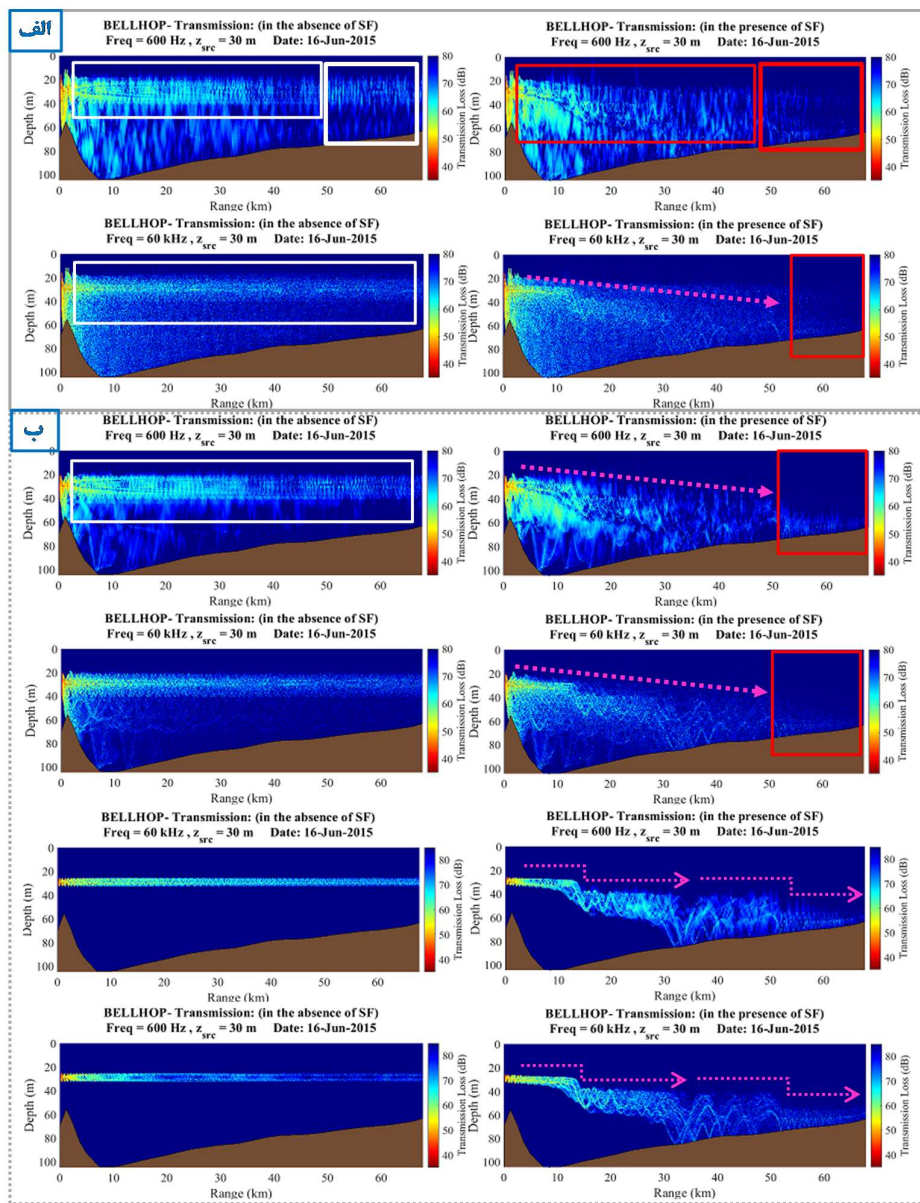
افزایش عمق چشمه صوتی تأثیری مشابه با افزایش فرکانس صوتی دارد به طوری که در عمق ۲۰ متر و مطابق با شکل ۹. ج، اثر اتلافی ساختار انگشت نمک کمتر بوده و تا حد امکان سبب انحراف سیگنال صوتی از محل ریزش ساختار پخش می‌شود. با انتشار صوت از فرستنده ای در عمق ۳۰ متر و پایین تر از لایه گرم و شور (شکل ۱۰. الف)، انتشار در غیاب ساختار نمکی به طور منظم در طول کانال صوتی عمیق رخ می‌دهد و به ویژه در فرکانس ۶۰ kHz اتلاف در انتقال سیگنال صوتی حداکثر تا ۷۰ dB است؛ اما در حضور انگشت نمک (شکل ۱۰. الف، راست)، انتشار با انحراف مشخص از ساختار پله ای انگشت نمک (پیکان های رنگی) رخ می‌دهد و انتقال آن در راستای چشمه صوتی به ویژه در ناحیه ریزش انگشتان نمکی قوی (کادر مستطیلی)، تضعیف شده به طوری که اتلاف در انتقال تا ۸۰ dB افزایش می‌یابد.

پرتوهای با زاویه انتشار کوچک تر بیشتر تحت تأثیر ساختارهای پخش دوگانه و تغییرات دما و شوری قرار دارند و به ازای زاویه انتشار کمتر از ۵ درجه با دامنه انتشار محدود، اتلاف در انتقال و انحراف سیگنال های صوتی مشخص تری را نمایش می‌دهند (شکل ۱۰. ب). با انتشار سیگنال از چشمه صوتی در عمق ۳۰ متر و با زاویه انتشار کمتر از ۵ درجه، پرتوهای صوتی با تابعیت از شیب ساختار نمکی (پیکان رنگی) و با پراکندگی و اتلاف اندک در طول کانال منتشر می‌شوند که با افزایش فرکانس صوتی تابعیت از ساختار پله ای انگشت نمک (پیکان های پله ای رنگی) بیشتر شده و به ازای زاویه انتشار کمتر، مرز انتقال و تأثیر قابل توجه ساختار انگشت نمک در انحراف و اتلاف سیگنال صوتی کاملاً مشهود می‌شود. تغییر در انتشار پرتوهای صوتی، پراکندگی یا انحراف و تغییر در فاز انتشار آن‌ها، در شکل ۱۱ به خوبی مشخص است. در عمق های

سمت لایه با سرعت کمتر منحرف می‌شوند بنابراین سیگنال صوتی در کانال شرقی تنگه هرمز (به ویژه با افزایش زاویه انتشار)، به سمت لایه پایین تر نفوذ می‌کند.

به طوری که سیگنال هایی که از فرستنده ای در عمق ۲ متر منتشر می‌شوند (شکل ۹. الف)، در لایه سطحی تا عمق ۱۰ متر یک کانال سطحی را تشکیل می‌دهند و بخشی از سیگنال تا عمق ۱۰۰ متر نفوذ کرده و در کانال عمیق تر منتشر می‌شود. سیگنال های سطحی به شدت تحت تأثیر تغییرات دمایی و شوری در سطح قرار دارند و با عبور از محل ساختار انگشتان نمک و به ویژه انگشتان قوی در سطح (شکل ۹. الف، راست)، به طور قابل توجهی پراکنده شده و اتلاف در انرژی و آشفتگی سیگنال صوتی افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس صوتی تا ۶۰ kHz، اتلاف انرژی صوتی نسبت به فرکانس آشکارتر می‌شود و اتلاف در انتقال انرژی از ۷۰ dB در ۸۰ dB در فاصله ۲۰-۶۰ کیلومتر که محل ریزش انگشت نمک است رخ می‌دهد. همچنین اثر ساختار انگشت نمک بر پرتوهایی که با زاویه بزرگتری در لایه عمیق تر منتشر می‌شوند نیز قابل توجه است، به طوری که موجب انحراف پرتوها از محل شکل گیری انگشتان نمک می‌شود. با این وجود اثر ساختار پخش دوگانه بر پرتوهایی که با زاویه کوچک تر منتشر می‌شوند بیشتر است و با افزایش زاویه اثر اتلاف کمتر می‌شود.

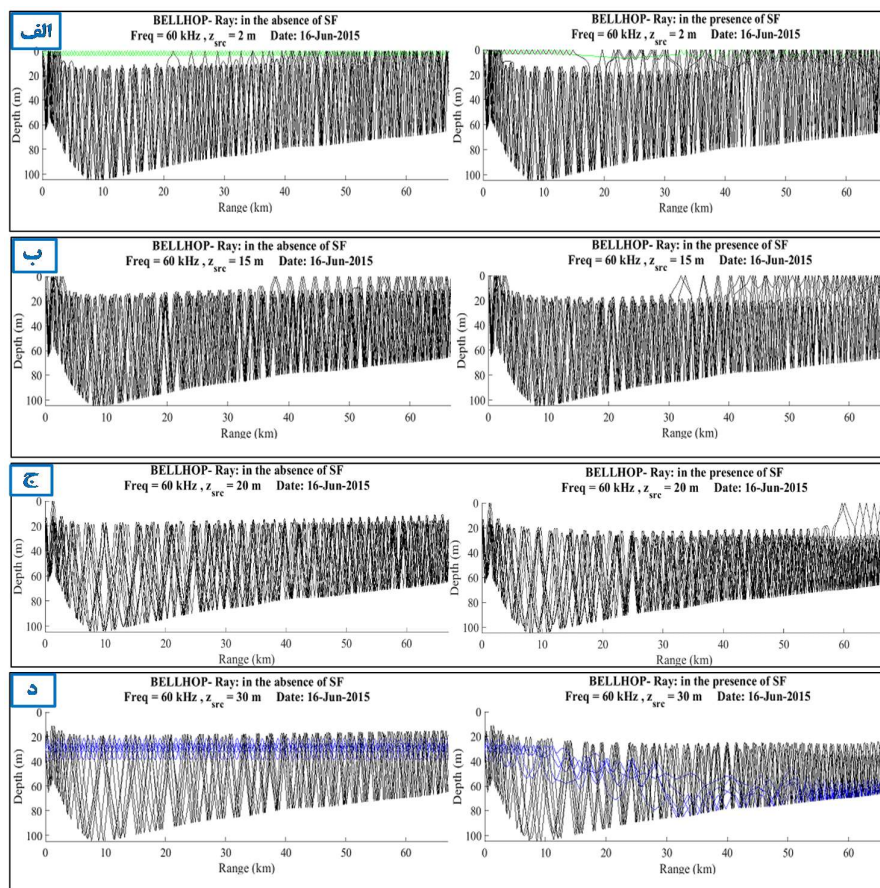
سیگنال های منتشر شده با فرکانس ۶۰۰ Hz از منبع صوتی در عمق ۱۵ متر و پایین تر از لایه گرمایی، از لایه سطحی منحرف شده و در لایه عمیق تر منتشر می‌شوند (شکل ۹. ب)؛ اما این سیگنال ها در حضور انگشت نمک (شکل ۹. ب، راست) و تغییرات لایه ای ناشی از آن عمیق تر شده و با عبور از محل ریزش انگشت نمک در فاصله ۶۵ - ۵۵ کیلومتر، با اتلاف انتقال تا ۸۵ dB کاملاً تضعیف می‌شوند و بخشی از سیگنال به سمت ناحیه با ساختار نمکی ضعیف تر در عمق کمتر از ۲۰ متر منحرف و پراکنده می‌شود. با افزایش فرکانس سیگنال صوتی اتلاف انرژی



شکل ۱۰. (الف) انتشار صوت در غیاب انگشت نمک (چپ) و در حضور انگشت نمک (راست) در عمق ۳۰ متر به ازای فرکانس‌های 600 Hz و 60 kHz. (ب) انتشار صوت با زاویه کمتر از ۵ درجه و در عمق ۳۰ متر برای وضوح بیشتر اثرگذاری ساختار انگشت نمک بر صوت. محل و نوع اثرگذاری انگشت نمک با کادر مستطیل و پیکان رنگی مشخص شده است.

در لایه سطحی با عبور پرتوها از محل ساختار انگشت نمک در سطح به ویژه در فاصله ۴۰ - ۱۵ کیلومتر، مشاهده می شود (شکل ۱۱. الف). با افزایش عمق چشمه صوتی (شکل ۱۱. ب و ج) انحراف از مرز تغییر یافته دو لایه بیشتر

۲ متر و ۳۰ متر، کانال های صوتی مناسب برای انتشار پرتوهای با زاویه انتشار کمتر از ۵ درجه ایجاد می شوند (پرتوهای سبز و آبی در شکل ۱۱)، اما انتشار این پرتوها در حضور انگشتان نمک تضعیف می شود. بیشترین پراکندگی



شکل ۱۱. انتشار پرتو صوتی با فرکانس 60 kHz از فرستنده به ترتیب در عمق (الف) ۲ متر، (ب) ۱۵ متر، (پ) ۲۰ متر و (ت) ۳۰ متر در غیاب ساختار انگشت نمک (سمت چپ) و در حضور انگشت نمک (سمت راست). انتشار پرتوهای با زاویه انتشار کمتر از ۵ درجه در کانال‌های صوتی در عمق‌های ۲ متر و ۳۰ متر به ترتیب با رنگ‌های سبز و آبی مشخص شده است.

۴ نتیجه‌گیری

- گردش ترموهالینی در تنگه هرمز با ایجاد گرادیان‌های دما و شوری در تنگه موجب می‌شود تا این منطقه در طول سال همواره مستعد شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه باشد و ترکیبی از فرآیندهای پخش در ستون آب و در عمق‌های مختلف در تنگه هرمز رخ دهد که در تغییرات قائم در ستون آب نقش دارند.
- شکل‌گیری انگشت نمک در تنگه متأثر از جریان ورودی و شوری حاصل از شرایط آب و هوایی است. به طوری که پیشینه انگشت نمک به ازای حداقل فرکانس شناوری در

می‌شود اما در محل ریزش انگشت نمک در فاصله ۵۰ – ۶۰ کیلومتر، با عبور پرتوها از ساختار نمکی قوی، پراکندگی پرتوهای صوتی و انحراف آن‌ها به سمت ساختار ضعیف تر افزایش می‌یابد. از میان پرتوهایی که در عمق بیشتری منتشر می‌شوند (شکل ۱۱. د)، پرتوهای با زاویه انتشار بزرگتر با انحراف کمتری از ساختار انگشت قوی انتقال می‌یابند اما پرتوهای با زاویه انتشار کوچکتر، با شدت بیشتری از لایه بندی ساختار نمک و هر دو ساختار نمکی ضعیف و قوی منحرف می‌شوند، به طوری که ساختار موجی پرتوها به طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

با عمق کاهش می‌یابد اما در انتهای کانال، به دلیل اختلاف بالا در دما و شوری میان دو لایه، کاهش سرعت با شیب تند تری رخ می‌دهد.

• سرعت صوت در سطح تا عمق ریزش انگشتان نمک بیشترین مقدار (۱۵۵۷ متر بر ثانیه) را دارد و با افزایش عمق و خارج از محدوده شکل گیری انگشتان نمک سرعت صوت تا ۱۵۴۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. همچنین، عمق لایه بندی صوتی در طول کانال متأثر از ساختار نمکی، غیر یکنواخت بوده و در محل ریزش نمکی قوی، لایه با بیشینه مقدار سرعت صوت تا عمق ۷۰ متر امتداد می‌یابد.

• مقایسه انتشار سیگنال های صوتی در عمق های ۲، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ متر و با فرکانس های ۶۰۰ هرتز و ۶۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد که سیگنال هایی که از فرستنده ۱- در عمق ۲ متر منتشر می‌شوند به شدت تحت تأثیر تغییرات دمایی و شوری در سطح قرار دارند و با عبور از محل ساختار انگشتان نمک و به ویژه انگشتان قوی در سطح، به طور قابل ملاحظه ای پراکنده شده و اتلاف در انرژی و آشفته گی سیگنال صوتی افزایش می‌یابد.

• با افزایش فرکانس صوتی تا ۶۰ kHz، اتلاف انرژی صوتی نسبت به فرکانس آشکارتر می‌شود و اتلاف در انتقال انرژی از ۷۰ dB به ۸۰ dB در محل ریزش انگشت نمک افزایش می‌یابد.

• سیگنال های منتشر شده از منبع صوتی در عمق ۱۵ متر و پایین تر از لایه گرمایی، از لایه سطحی منحرف شده و در لایه عمیق تر منتشر می‌شوند؛ اما پس از عبور از محل ریزش انگشت نمک قوی، با اتلاف انتقال تا ۸۵ dB کاملاً تضعیف می‌شوند.

• افزایش عمق چشمه صوتی تأثیری مشابه با افزایش فرکانس صوتی دارد و اثر اتلافی ساختار انگشت نمک کمتر بوده و تا حد امکان سبب انحراف سیگنال صوتی از محل ریزش ساختار نمکی می‌شود.

• با انتشار صوت از فرستنده ای در عمق ۳۰ متر، سیگنال

روزهای گرم در تنگه مشاهده می‌شود و با کاهش دما و جریان ورودی از تنگه، شرایط برای انگشت نمک تعدیل می‌شود.

• در ایستگاه های میانی و جنوبی تنگه، انگشت نمک قوی از سطح تا عمق ۶۵-۴۰ متر تشکیل می‌شود و در شرق و نواحی شمالی تنگه، ساختار پخش بیشتر تحت تأثیر آمیختگی و جریان و ورودی از دریای عمان قرار دارد و در عمق بیشتری در ستون آب رخ می‌دهد.

• فراوانی انگشت نمک در جنوب و شرق تنگه بیشتر از ساختار همرفت پخش است و هیستوگرام زاویه ترنر در مقطع شرقی تنگه هرمز در خرداد ماه نشان می‌دهد که انگشت نمک با حدود ۳۶/۳ درصد فراوانی در ستون آب، نقش قابل توجهی در تغییرات قائم آب در مقایسه با همرفت پخش و یا حالت پایدار دارد.

• تغییرات دمایی و شوری در مقطع شرقی تنگه هرمز در خرداد ماه نشان می‌دهد که یک لایه گرم (۳۴ °C) و شور (۳۹ psu) در سطح تا عمق ۲۰ متر بر لایه سرد و کم شور تشکیل می‌شود و در شرایط پایداری استاتیکی، شرایط اولیه برای شکل گیری ساختار انگشت نمک را فراهم می‌کند.

• انگشتان نمکی تحت تأثیر آب گرم و تبخیر سطحی در سطح گسترش می‌یابند و در نهایت، در ناحیه با بیشترین شیب دما و شوری و حداقل شناوری، به صورت ساختار قوی انگشت نمکی ریزش می‌کنند به طوری که این ساختار نمکی در نواحی شمالی مقطع تا عمق ۷۰ متری امتداد می‌یابد.

• نوسان توده آب گرم و شور و ریزش نمکی از سطح تا عمق ۶۰-۳۰ متر موجب آمیختگی در مرز دو لایه و تغییر عمق لایه مرزی از ۲۰ متر تا ۴۰ متر در طول مقطع می‌شود.

• نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که انگشتان نمکی اثر قابل توجهی در سرعت و لایه بندی کانال صوتی دارند. در طول کانال، سرعت صوت به طور میانگین با شیب یکسانی

انصاری، ن.، حسن زاده، ا.، رضایی لطیفی، ع.، و نوحه گر، ا.، ۱۳۹۰، بررسی همرفت پخش دوگانه در تنگه هرمز با استفاده از مدل سه بعدی کوهرنس، سیزدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش.

ارشادی، م.، و حسن زاده، ا.، ۱۳۹۲، توزیع قائم سرعت صوت و تأثیر دما و شوری بر روی آن در فصول مختلف در خلیج فارس و تنگه هرمز، پانزدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش.

اکبری نسب، م.، صدری نسب، م.، علی اکبری بیدختی، ع.، چگینی، و.، ۱۳۹۳، مطالعه ساختار لایه ای خلیج فارس به خلیج عمان و تأثیر آن بر روی انتشار صوت با چشمه های آکوستیکی نزدیک جریان نفوذی در فصل بهار. مجله علوم و فنون دریا. ۱۱۰-۱۲۰: ۱۲(۴).

علی اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۹۸، مبانی دینامیک شاره ها (سیالات)، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

ناظمیه، ن.، محسنی آراسته، ا.، سهیلی فر، م.، ۱۳۹۷، مدل عددی دو بعدی انتشار امواج صوتی در آب های تنگه هرمز به روش تفاضل محدود. پژوهش های علوم و فنون دریایی. ۳۹-۵۱: ۱۳(۲).

Al-Hajri, K., 1990, The Circulation of the Arabian (Persian) Gulf: A Model Study of its Dynamics. The Catholic University of America, Washington, DC. Ph.D. Dissertation (also available through UMI Dissertation Information Service, Order Number 9106378).

Azizpour, J., Chegini, V., Siadatmousavi, S. M., 2017, Seasonal variation of the double diffusion processes at the Strait of Hormuz. Acta Oceanologica Sinica, 36(1): 26-34, doi: 10.1007/s13131-017-0990-6.

Bidokhti, A. A. and Ezam, M., 2009, The structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations, Ocean Sci., 5, 1-12, <https://doi.org/10.5194/os>.

Boyd, J. D., and Perkins, H., 1987, Characteristics of thermohaline steps off the northwest coast of South America. Deep-Sea Res., 34, 337-364.

صوتی با انحراف قابل توجه از ساختار پله ای انگشت نمک منتشر می شود و انتقال آن در راستای چشمه صوتی به ویژه در ناحیه ریزش انگشتان نمکی قوی، تضعیف شده و اتلاف در انتقال تا ۸۰ dB افزایش می یابد.

• در عمق های ۲ متر و ۳۰ متر، کانال های صوتی مناسب برای انتشار پرتوهای با زاویه انتشار کمتر از ۵ درجه ایجاد می شوند، اما انتشار این پرتوها در حضور انگشتان نمک تضعیف می شود. بیشترین پراکندگی در لایه سطحی با عبور پرتوها از محل ساختار انگشت نمکی مشاهده می شود.

• اثر ساختار پخش دوگانه بر پرتوهایی که با زاویه کوچکتر منتشر می شوند بیشتر است و با افزایش زاویه انتشار، اثر اتلاف و پراکندگی کمتر می شود.

• با افزایش عمق چشمه صوتی پرتوهای با زاویه انتشار بزرگتر با انحراف کمتری از ساختار انگشت قوی انتقال می یابند اما پرتوهای با زاویه انتشار کوچکتر، با شدت بیشتری از لایه بندی ساختار نمک (هر دو ساختار نمکی ضعیف و قوی) منحرف می شوند و ساختار موجی پرتوها به طور قابل توجهی تغییر می کند.

• با توجه به نتایج به دست آمده، انتشار صوت در غیاب ساختار نمکی به طور منظم در طول کانال صوتی رخ می دهد و اتلاف در انتقال سیگنال صوتی حداکثر تا ۷۰ dB است؛ اما در حضور انگشت نمک، سیگنال صوتی با انحراف مشخص از ساختار نمکی منتشر می شود و به طور میانگین اتلاف در انرژی و انتقال سیگنال صوتی ۱۵ dB - ۱۰ بیشتر می شود؛ بنابراین ساختار انگشت نمکی تأثیر قابل توجهی در سرعت و انتقال سیگنال صوتی داشته و موجب انحراف و تغییر در انتشار پرتوهای صوتی می شود. شناخت اینگونه رفتارهای انتشار صوت در این منطقه پرتردد کشتی ها می تواند به انتقال اطلاعات مفید درون آب در این محدوده کمک کند.

- Caplan, S., 2008, Microstructure signatures of equilibrium double-diffusive convection. Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Carriere, O., Hermand, J., Le Gac, J., and M. Rixen., 2009, Full-field tomography and Kalman tracking of the range-dependent sound speed field in a coastal water environment. *J. Mar. Syst.*, 78: S382-S392.
- Elliott, A.J., Howe, M.R., and Tait, R.I., 1974, The lateral coherence of a system of thermohaline layers in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, 21, 95-107.
- Etter, P.C., 2012, Advanced applications for underwater acoustic modeling, *Advances in Acoustics and Vibration*, vol. 2012 .
- Foster, T. D., and Carmack, E. C., 1976, Frontal zone mixing and Antarctic Bottom Water formation in the southern Weddell Sea, *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, 23, 301–317.
- Hosseinibalam, F., Hassanzadeh, S., and Rezaei Latifi, A., 2011, Three-dimensional numerical modeling of thermohaline and wind-driven circulations in the Persian Gulf, *Appl. Math. Model.*, 35(12), 5884–5902, doi: 10.1016/j.apm.2011.05.040 .
- Howe, M.R., and Tait, R.I., 1970, Further observations of thermohaline stratification in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, 17, 963-972 .
- Johannessen, O.M., and O.S. Lee., 1974, A deep stepped thermohaline structure in the Mediterranean. *Deep-Sea Res.*, 21, 629-639 .
- Lavery, A., and Ross, T., 2007, Acoustic scattering from double-diffusive microstructure, *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 1449–1462.
- Lee, C., Chang, K. I., Lee, J. H., and Richards, K. J., 2014, Vertical mixing due to double diffusion in the tropical western Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7964–7970, doi:10.1002/ 2014GL061698.
- Lu L.G., Chen H.X., Yuan Y.L., 2004, Spatial and Temporal Variations of Sound Speed at the PN Section, *Journal of Oceanography*, 60: 673-679 .
- Lu L.G., Chen H.X., Yuan Y.L., 2004, Spatial and Temporal Variations of Sound Speed at the PN Section, *Journal of Oceanography*, 60: 673-679 .
- Mackenzie, K.V., 1981, Nine-term equation for sound speed in the oceans, *J Acous Soc Am*, 70 (807-808). 281. 2685–2697.
- Magnell, B., 1976, Salt fingers observed in the Mediterranean outflow region (34°N, 11°W) using a towed sensor. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 511-523.
- Mazeika, P.A., 1974, Subsurface mixed layers in the northwestern tropical Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 4, 446-453.
- Medwin. H., 1975, Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *Acoustical Society of America*. 6. 58. doi: 10.1121/1.380790 .
- Onken, R., Brambilla, E., 2003, Double diffusion in the Mediterranean Sea: observation and parameterization of salt finger convection. *J. Geophys. Res.* 108(C9), 8124–8136. doi: 10.1029/2002JC001349.
- Pous S P., Carton X., Lazure, P., 2004. Hydrology and circulation in the Strait of Hormuz and the Gulf of Oman results from the GOGP99 experiment: 1. Strait of Hormuz. *J Geophys Res Oceans*, 109(C12): C12038.
- Radhakrishnan, K.G., 1995, Thermocline variability in the Arabian Sea and its effect on the Acoustic propagation. Ph.D. Dissertation. Cochin University of science and technology. India.
- Radko, T., 2013, *Double-Diffusive Convection*. Cambridge University Press, 342 pp.
- Reynolds. R. M, 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hurmoz, and the Gulf of Oman, results from the Mt.Mitchell expedition? *Mar. Pollut. Bull*, Vol. 27, pp. 35-59.
- Robertson, R., Padman, L., and Levine, M. D., 1995, Fine structure, microstructure, and vertical mixing processes in the upper ocean in the western Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, 100, 18517–18535.
- Ruddick, B., 1983, A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep Sea Res A Oceanogr Res Pap*, 30(10): 1105–1107. doi:10.1016/0198-0149(83)90063-8.

- Schmitt, R. W., 1981, Form of the temperature-salinity relationship in the Central Water: evidence for double-diffusive mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 1015–1026 .
- Shi, J., Wei. H., 2007, Evidence of double diffusion in the East China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*. 67(3-4): 272-281
- Stern, M. E., 1960, The “salt-fountain” and thermohaline convection. *Tellus*, 12,172–175.
- Thoppil, P. G., Hogan, P. J., 2009, On the mechanisms of episodic salinity outflow events in the Strait of Hormuz. *J Phys Oceanogr*, 39(6): 1340–1360.
- Turner, J. S., 1965, The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8, 759–767, doi:10.1016/0017-9310(65)90022-0.
- Urick, R. J., 1983, *Principles of Underwater sound*, McGraw-Hill, USA.
- Williams, A. J., 1974, Salt Fingers observed in Mediterranean outflow. *Science*, 185, 941 943.
- Wilson, W.D., 1960. Equation for the speed of sound in seawater, *The Journal of the Acoustical Society of American*, V 32, N 10: 876-892.
- You, Y., 2002, A global ocean climatological atlas of the Turner angle: Implications for double-diffusion and water mass structure. *Deep-Sea Res.*, 49, 2075-2093 .
- Yusop, S.M., Abu Bakar, N., Abdullah, K., 2011, Kuala Besar, Kelantan: A sound speed analysis, *IEEE colloquium on humanities, Science and Engineering Research*, Dec 5-6: 610-663.

Simulation of sound propagation in the environment of the salt-fingering structure in the east of the Strait of Hormuz

Mostafa Solgi^{1,2}, Mahdi Mohammad-Mahdizadeh^{3*}, Abbas-Ali Ali Akbari-Bidokhti⁴ and Smaeyl Hassanzadeh⁵

¹ Ph.D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Non-biological Atmospheric and Ocean Sciences, Faculty of Marine Science and Technologies, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

³ Associate Professor, Department of Non-Biological Atmospheric and Ocean Sciences, Faculty of Marine Science and Technologies, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

⁴ Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

⁵ Professor, Department of Physics, University of Isfahan, Iran

(Received: 09 October 2022, Accepted: 11 January 2023)

Summary

The water environment is considered as a suitable conductor for sound waves propagation and the changes in the horizontal and vertical structures of physical parameters are effective on the speed and propagation of sound. One of the effective vertical processes in the water column is the double diffusion process with two structures of salt-fingering and diffusive convection, which are created due to the vertical gradient of temperature and salinity with different diffusion coefficients. Salt-fingering occurs when a layer of warm and salty water is located above cold and fresh water. In areas such as the Strait of Hormuz, with thermohaline exchange between the salty basin (Persian Gulf) and the open sea (Oman Sea), the conditions for the formation of salt fingers and their growth are significant. To determine double diffusion structures, the Turner angle (Tu) method is used in terms of density ratio ($R\rho$). Turner angle values (in degree) for the formation of double diffusion structures are defined in the range of $-90 < Tu < 90$. So that the diffusive convection structure is formed for the values of $-90 < Tu < -45$ and the salt finger structure is formed for the values of $45 < Tu < 90$. With the increase of the warm water inflow entering from the Oman Sea into the Persian Gulf, in spring and summer and the increase of evaporation in late spring, the conditions for the formation of salt fingers are strengthened and salt fall occurs in all the eastern and middle stations of the Strait Hormuz. Also, in the southern stations, salt fingers extend from the surface to a depth of 65 m. The vertical gradients of temperature and salinity in the eastern cross-section of the Strait of Hormuz form a warm and salty surface layer (34 °C and 39 psu) over a cold and fresh water layer (29 °C and 37.5 psu) so that the warm and Salty water mass spreads on the surface and falls from the surface to a depth of 40-70 m as salt fingers. The fall of salt fingers causes the speed of sound waves to be not uniform along the channel so from the surface to the depth of salt finger fall, it has the highest value (1557 m/s). In this study, sound signal propagation at frequencies above 500 Hz (600 Hz and 60 kHz) is simulated using Ray theory and the Bellhop model. The results show that sound rays with a small propagation angle are scattered on the surface after passing through the salt fingers. But by increasing the depth of the sound source, the dissipative effect of the salt structure decreases while the deviation from the location of the strong structure is observed. In general, the propagation and transmission of the sound signal along the channel depend on the stratification leading to the salt finger structure, and the sound rays are propagated with significant deviation and 80-85 dB loss in transmission (10-15 dB increase in loss), while these salt fingers exist in water.

Keywords: Double-diffusion, salt-fingering, srait of Hormuz, Persian gulf, sound signal, transmission loss

*Corresponding author:

mehdizadeh@hormozgan.ac.ir