J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 45, 2025. (93-104)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Laboratory investigation of the effect of salt fingers on sound signal propagation in water

Mostafa Solgi[1, 2*], Abbasali Aliakbari Bidokhti[1], Mahdi Mohammad Mahdizadeh[2], Smaeyl Hassanzadeh[3], Hamed Deldar[4]

[1] *Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran, *msolgi.ir@gmail.com, bidokhti@ut.ac.ir*
[2] *Department of Non-Biologic Atmospheric and Oceanographic Science, Faculty of Marine Science and Technologies, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, mehdizadeh@hormozgan.ac.ir*
[3] *Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, shz@sci.ui.ac.ir*
[4] *National Institute of Oceanography and Atmospheric Sciences, Tehran, Iran, h.deldar@inio.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 3 Mar 2024
Last modification: 4 May 2025
Accepted: 6 May 2025
Available online: 15 May 2025

Article type:
Research paper

Keywords:
Laboratory modeling
Sound Signal propagation
Salt fingering
Sound signal transmission loss

ABSTRACT

The speed of sound is a function of temperature, salinity and water pressure, and processes caused by vertical gradients of temperature and salinity, such as salt-fingering structures, can affect sound speed and propagation. In this research, the effect of Salt Fingers on the sound signal has been investigated in a laboratory environment and in a homogeneous water tank. In the presence of salt-fingering, the amplitude of direct and reflected signals from the surface is reduced, and the signals are received by the receiver with a time delay and with a slight decrease (5-10 dB) in sound power. By increasing the depth of the sound source, the scattering and deflection of the rays and the change in the amplitude of the sound signal are reduced. In the absence of salt fingers, the sound signal is propagated with the least energy loss and the sound rays are deflected towards the surface. But in the presence of SF and with the increase of salinity on the surface, the scattering and loss of the sound signal increases (up to 85 dB) and the sound rays are deflected towards the bottom of the tank. This effect is greater on the rays that propagate with a smaller angle.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.21.45.93

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۵، ۱۴۰۴، (۱۰۴-۹۳)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر انگشتان نمکی بر انتشار سیگنال صوتی در آب

مصطفی سلگی[۱و۲*]، عباسعلی علی اکبری بیدختی[۱]، مهدی محمد مهدی زاده[۲]، اسماعیل حسن زاده[۳]، حامد دلدار[۴]

[۱] گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، *msolgi.ir@gmail.com, bidokhti@ut.ac.ir

[۲] گروه علوم غیر زیستی جو و اقیانوس، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، mehdizadeh@hormozgan.ac.ir

[۳] گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان ، ایران، shz@sci.ui.ac.ir

[۴] پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران، h.deldar@inio.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

مدل‌سازی آزمایشگاهی

انتشار سیگنال صوتی

انگشتان نمکی

اتلاف سیگنال صوتی

چکیده

سرعت صوت تابع دما، شوری و فشار آب است و فرآیندهای ناشی از گرادیان قائم دما و شوری مانند انگشت نمکی (Salt-Fingering)، می‌توانند بر سرعت و انتشار صوت موثر باشند. در این پژوهش اثر انگشتان نمکی بر سیگنال صوتی در محیط آزمایشگاهی و در مخزن آب همگن بررسی شده است. تحت تاثیر ساختار نمکی، دامنه سیگنال‌های مستقیم و بازتابی از سطح کاهش یافته و سیگنال‌ها با تاخیر زمانی و افت اندکی (۱۰-۵ dB) در توان صوتی، توسط گیرنده دریافت می‌شوند. با افزایش عمق فرستنده صوتی، انحراف و پراکندگی پرتوها کمتر می‌شود و افت دامنه کمتری هم رخ می‌دهد. سیگنال صوتی در غیاب انگشتان نمکی با کمترین اتلاف منتشر می‌شود و پرتوهای صوتی به سمت سطح منحرف می‌شوند، اما در حضور انگشتان نمکی، اتلاف و پراکندگی سیگنال صوتی افزایش یافته (تا ۸۵ dB) و پرتوهای صوتی به سمت کف مخزن منحرف می‌شوند. این اثر بر پرتوهای با زاویه انتشار کوچکتر بیشتر است.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.21.45.93

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

۱ - مقدمه

استفاده از امواج صوتی در آب برای دست‌یابی به اطلاعات محیطی، یکی از موارد کاربرد صوت در دریاها و اقیانوس‌ها است. ناوبری و مهندسی دریایی، تعیین عمق و توپوگرافی کف دریا به کمک اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت صوت، کنترل از راه دور، ایجاد ارتباط در زیرآب، ردیابی شناورهای سطحی و زیرسطحی کوچک و بزرگ، مسیریابی حرکت آبزیان تا شناسایی و صید صنعتی ماهی، اکتشاف معادن نفت و گاز در زیر دریا و حفاظت محیط زیست و موارد مشابه از جمله کاربردهای دانش آکوستیک است. علاوه بر آن، مدل‌سازی و شبیه سازی نحوه انتشار امواج صوتی در محیط دریایی، از مباحث بسیار مهم و پایه‌ای در مبحث سونار است. بنابراین دانستن شرایط محیطی انتشار امواج صوتی برای تست و کالیبراسیون سونارهای ساخته شده در محیط مورد نظر بسیار حائز اهمیت است.

شکل‌گیری کانال صوتی و انتشار صوت در آن تابع لایه بندی آب و تغییرات مناسب سرعت صوت در آب است. سرعت صوت بسیاری از خصوصیات انتشار صوت در اقیانوس را تعیین می‌کند [۹]. سرعت صوت در آب دریا بیشتر به تغییرات دما، شوری و فشار وابسته است و تأثیر پارامترهای دیگر بسیار کم است [۱۵]. بنابراین ساختارهای افقی و قائم ناشی از این کمیت‌های فیزیکی و تغییر شناوری، ناپایداری و آمیختگی ناشی از آنها می‌تواند اثر قابل توجهی در سرعت و انتشار صوت در آبهای کم عمق و عمیق داشته باشد. یکی از فرآیندهای قائم و قابل توجه که در اثر گرادیان قائم دما و شوری (با ضرایب پخش متفاوت) میان دو لایه آب شکل می‌گیرد، ساختار نمکی یا انگشت نمکی (Salt-fingering: SF) است که اثرات ناشی از آن موجب شکل‌گیری ساختارهای لایه‌ای در دریا می‌شود که ممکن است بر ضرایب پخش قائم گرما، جرم و تکانه مؤثر باشند. انگشت نمکی زمانی اتفاق می‌افتد که لایه آب گرم و شور بر روی لایه سرد وکم شور قرار گیرد و دما و شوری به سمت بالا افزایش یابد. اگر یک اغتشاش موجی در مرز میان این دو لایه ایجاد شود (مثلا به دلیل تبادل جریان و یا امواج گرانشی داخلی) قسمتی از آب گرم و شور به طرف پایین حرکت می‌کند. اما چون دمای آن بیشتر از محیط است، شناور شده و به سمت بالا بر می‌گردد بطوریکه قبل از بالا رفتن، با محیط اطرافش به تعادل گرمایی می‌رسد، درحالیکه همچنان شورتر می‌شود و تحت نیروی جاذبه ریزش می‌کند و ریزش‌های نمکی به نام رژیم انگشت نمکی (SF) را ایجاد می‌کند [۱۸].

در ابتدا استرن [۲۰] تشخیص داد که انگشتان نمکی می‌توانند به‌طور طبیعی در نتیجه تفاوت در پخش دما و شوری و دامنه موثر هدایت گرمایی در اقیانوس تولید شوند. اما، انگشت نمکی در آزمایشگاه توسط ترنر و استومل [۲۱] تولید شد و افزایش درک و شناخت از این پدیده با مطالعات آزمایشگاهی تا اواخر دهه ۱۹۶۰، سبب شد تا مطالعات اقیانوسی اساسی در این زمینه افزایش یابد. به‌طوریکه انگشتان نمکی[1]، به‌طور گسترده از نظر تئوری و تجربی در دریای مدیترانه [۳۱]، در دریای تیرنی[2] در شمال دریای مدیترانه [۸ و ۱۷]، در دریای ودل[3] [۶]، در غرب اقیانوس اطلس شمالی [۴ و ۱۲] و در اقیانوس هند [۱۶]، و به‌طور پراکنده در تنگه هرمز و خلیج فارس [۱، ۲، ۳ و ۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. با وجود مطالعات گسترده در زمینه پخش دوگانه در مناطق متفاوت از جمله خلیج فارس و دریای عمان، هیچ مطالعه منسجمی در زمینه اثرات پخش دوگانه و به ویژه SF بر سرعت و جهت انتشار سیگنال انجام نگرفته است. در این مطالعه برای بررسی اثر ساختار پخش دوگانه و به ویژه انگشت نمکی[4] بر انتشار سیگنال صوتی، از روش آزمایشگاهی و ایجاد شرایط لایه‌بندی پخش دوگانه میان دو سنسور صوتی در مخزن ۳ متری آب همگن (بدون چینه‌بندی) استفاده شده است. در روش آزمایشگاهی کاربر با مدل‌سازی در محیط آزمایشگاهی تلاش می‌کند تا حد امکان شرایط آزمایشگاهی را منطبق با شرایط طبیعی اقیانوسی مدل‌سازی کند. در این شرایط، اندازه‌گیری و مشاهده مستقیم آزمایشگاهی نتایج مناسبی از تغییرات را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که می‌تواند با استناد بر آنها یک یا چند فرآیند محیطی و اثرات ناشی از آن را به خوبی تحلیل کند.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مدل سازی آزمایشگاهی

برای بررسی اثر ساختار نمکی باید شرایط لازم برای شکل‌گیری انگشتان نمکی را در مراحل مختلف فراهم کنیم. برای ایجاد شرایط انگشتان نمکی، به دو لایه بندی قائم با دما و شوری متفاوت نیاز داریم (لایه گرم و شور بر روی سرد و کم شور). این شرایط می‌تواند با غالب بودن یک مولفه و تغییر گام به گام مولفه دوم برای رخداد فرآیند SF انجام شود. محلول نمکی که به آهستگی سطح جریان می‌یابد، یک ستون لایه‌ای تشکیل می‌دهد که به آرامی و بدون مخلوط شدن بالا می‌رود یا ریزش می‌کند. زمان و شدت جابه‌جایی به گرادیان دما و شوری و اثرات تلاطمی یا آمیختگی در مرز دو لایه بستگی دارد. در سیستم آزمایشگاهی به دلیل پخش سریع دما و اتلاف آن در محیط و دیواره مخزن، کنترل دما و بررسی شکل‌گیری انگشت نمکی با مولفه دما - شوری کار دشواری است. به دنبال برخی مطالعات انجام شده [۱۹]، بسیاری از کارهای

[1] SF: Salt Fingering
[2] Tyrrhenian Sea
[3] Weddell Sea
[4] SF: Salt Fingering

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

آزمایشگاهی با استفاده از دو ماده با ضریب پخش مولکولی متفاوت انجام شده است. بنابراین برای شکل‌گیری فرآیند پخش می‌توان از دو محلول متفاوت استفاده نمود. در بسیاری از مدل‌سازی های آزمایشگاهی از مولفه‌ای مانند شکر به جای مولفه دما استفاده می‌شود. در واقع استفاده از نمک و شکر به جای خواص اقیانوسی شوری و دما آسانتر است و مشکلات عایق‌بندی آزمایش و انجام اندازه‌گیری‌های بسیار سریع قبل از تعدیل سیستم دما - شوری را بر طرف می‌کند [۱۸]. از طرف دیگر تفاوت پخش مولکولی بین شکر و نمک بسیار کمتر از دما و شوری است، بنابراین جابه‌جایی ناشی از انگشت نمک شدیدتر است. به‌طوری که در پخش دوگانه شکر- نمک، شکر به‌عنوان مولفه پایدار کننده موجب شناوری توده شور به سمت بالا و ریزش انگشتان نمکی به سمت پائین می‌شود. این ساختار دو مولفه‌ای با وجود آنکه با ساختار طبیعی پخش دوگانه در محیط‌های اقیانوسی متفاوت است، اما به‌عنون یک ساختار پخش دو مولفه‌ای مناسب، با استفاده از روش دو مخزنی با آمیختگی دو مولفه، مورد استفاده قرار گرفته است.

در روش دو مخزنی، محلول شکر و نمک با هم مخلوط شده و سپس مخلوط آنها در یک محل در انتهای مخزن شیشه‌ای تزریق می‌شود، درحالیکه توسط یک توزیع کننده سطحی[1] به‌صورت یک جریان سطحی به طرف دیگر مخزن شارش یافته و یک گرادیان چگالی در طول مخزن ایجاد می‌کند. این گرادیان چگالی در طول زمان تقویت شده و عمیق‌تر می‌شود. با تقویت چینه‌بندی و شناوری توده شور به وسیله پله‌های شکر، ریزش‌های نمکی در مرز دو لایه شروع می‌شود و در طول زمان ریزش‌های نمکی تقویت می‌شوند. از طرف دیگر سرعت صوت تابع دما، شوری و فشار است و شکر نقش پایدارکننده چگالی و شناورکننده شوری تا ریزش نمکی را ایفا می‌کند که پس از ریزش نمکی در سطح توزیع می‌شود.

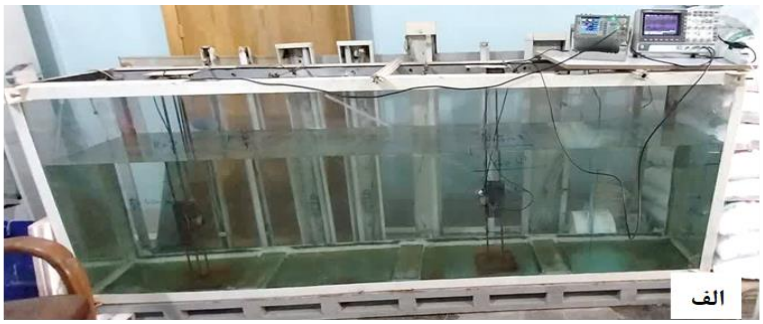
۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این مطالعه با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی شامل مخزن آب ۳ متری (مخزن آب همگن؛ شکل۱، الف) فرستنده، گیرنده صوتی و دستگاه‌های تولید سیگنال (سیگنال ژنراتور[2] MFG-2205P 5MHz؛ شکل ۱، ب، شماره۲) و ثبت سیگنال صوتی (اسیلوسکوپ[3] GDS1074B-70MHZ ؛ شکل ۱، ب، شماره۱) سیگنال صوتی در غیاب و در حضور ساختار انگشتان نمکی در عمق و مراحل مختلف ثبت شده است. در این مرحله ابتدا سنسور‌های گیرنده و فرستنده صوتی آزمایشگاهی با محدوده فرکانسی ۱ هرتز تا ۵۰۰ کیلو هرتز و شدت صوت ۸۰dB ± روی پایه‌های فلزی متصل شدند و در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متر از یکدیگر به ترتیب در فاصله ۷۰ سانتی‌متر از ابتدا و ۱۳۰ سانتی‌متر از انتهای مخزن ۳ متری، قرار گرفتند. سپس مخزن تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر از آب شیرین پر شد (جدول۱). پس از پر شدن آب مخزن، دما و شوری آب به ترتیب با مقدار ^{o}C ۲۴/۶ و ppt ۰/۰۲ (هدایت الکتریکی ms ۰/۳۵۵) ثبت شد. درحالیکه برای ثبت پارامترهای دما و شوری پس از شکل‌گیری ساختار نمکی، نقاطی در عمق و فاصله معین مطابق جدول۲، در نظر گرفته شد تا دما و شوری در این نقاط برای ترسیم نمودار و شبیه سازی سیگنال، اندازه‌گیری شوند. پس از اتصال فرستنده صوتی به سیگنال ژنراتور و گیرنده صوتی به اسیلوسکوپ، در ابتدا اسیلوسکوب به وسیله کابل پراب[4] و تنظیم اولیه دامنه و مختصات موجی، کالیبره شده تا نویزهای موجود ناشی از خطای ابزار و امواج محیطی تا حد امکان حذف شوند. سپس فرستنده و گیرنده در عمق ۵ سانتی‌متر در مقابل یکدیگر تنظیم شده و با اتصال فرستنده صوتی به سیگنال ژنراتور، سیگنال اولیه سینوسی ارسال و پس از تنظیمات فرکانس و مشاهده سیگنال خروجی در اسیلوسکوپ، حالت بسته موج Burst در تولید کننده انتخاب و برای تولید بسته موج مناسب در خروجی، بر اساس فاصله سنسورها و محدوده دیواره مخزن با تغییر محدوده فرکانس و تعداد سیکل‌های بسته موج، فرکانس ۶۹ کیلوهرتز و ۵ سیکل در هر بسته موج به ازای ولتاژ بیشینه ۲۰ ولت در نظر گرفته شد. در این مرحله برای مقایسه سیگنال‌های قبل و بعد از ساختار نمکی، ارسال و دریافت سیگنال صوتی در غیاب ساختار نمکی در دو عمق مختلف (۵ و ۴۰ سانتی‌متر) با فاصله زمانی یک تا دو دقیقه پس از هر جابه‌جایی انجام شد (جابه‌جایی قائم سنسورها به وسیله ریل‌هایی که سنسورها روی آن نصب شده‌اند انجام می‌شود) و نتایج ذخیره شدند. سپس برای ایجاد شرایط اولیه شکل‌گیری ساختار نمکی (جدول۱)، با استفاده از روش دو مخزنی، ۱۸۰ سی‌سی محلول شکر- نمک (شامل مقادیر یکسان ۲ گرم در کیلوگرم نمک و شکر) در سطح آب و در مجاورت دیواره جانبی مخزن میان دو سنسور صوتی بر روی یک توزیع‌کننده سطحی، تزریق شد تا بخش زیادی از شکر- نمک در سطح توزیع شود. همراه با توزیع سطحی بخشی از محلول، شکر حل شده مانند دما موجب شناور شدن شوری به سمت بالا و سپس تشکیل یک لایه شور همراه با ریزش‌های نمکی در فاصله دو سنسور صوتی می‌شود. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در حضور و در غیاب ساختار نمکی به ترتیب در شکل‌های۲ و ۳ مقایسه شده‌اند.

علاوه بر این، پس از پایان ثبت سیگنال، دما و شوری در نقاط از پیش تعیین شده در عمق و فاصله معین اندازه‌گیری و نمودار تغییر پارامترها و همچنین انتشار سیگنال در طول مخزن شبیه‌سازی شده‌اند (جدول۲ و شکل‌های ۶ تا ۸).

[1] Diffuser
[2] Signal generator
[3] Oscilloscope
[4] probe

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]



شکل ۱- الف) سنسورهای ارسال و دریافت سیگنال صوتی در مخزن آب شیرین و ب) دستگاه تولید و ثبت سیگنال صوتی

جدول۱. مشخصات مخزن‌های مورد استفاده در آزمایش، عمق و فاصله سنسورهای صوتی، مقدار و محل تزریق محلول

نوع مخزن آزمایشگاهی	ابعاد مخزن (ارتفاع*عرض*طول) (cm)	ارتفاع آب (cm)	فاصله سنسورهای صوتی (cm)	محل تزریق شکر- نمک (عمق، فاصله از گیرنده) (cm)	شوری محلول تزریق شده (g/kg)	مقدار محلول تزریق شده (cc)	مراحل متناسب با عمق سنسورها (Z_S,Z_T:cm)
مخزن آب شیرین	۱۰۰ × ۵۰ × ۳۰۰	۸۰	۱۰۰	سطح، ۲۰	۲	۱۸۰	(۵,۵) (۴۰, ۴۰)

۳-۲- تئوری پرتو (Ray theory) و مدل بلهاپ (Bellhop)

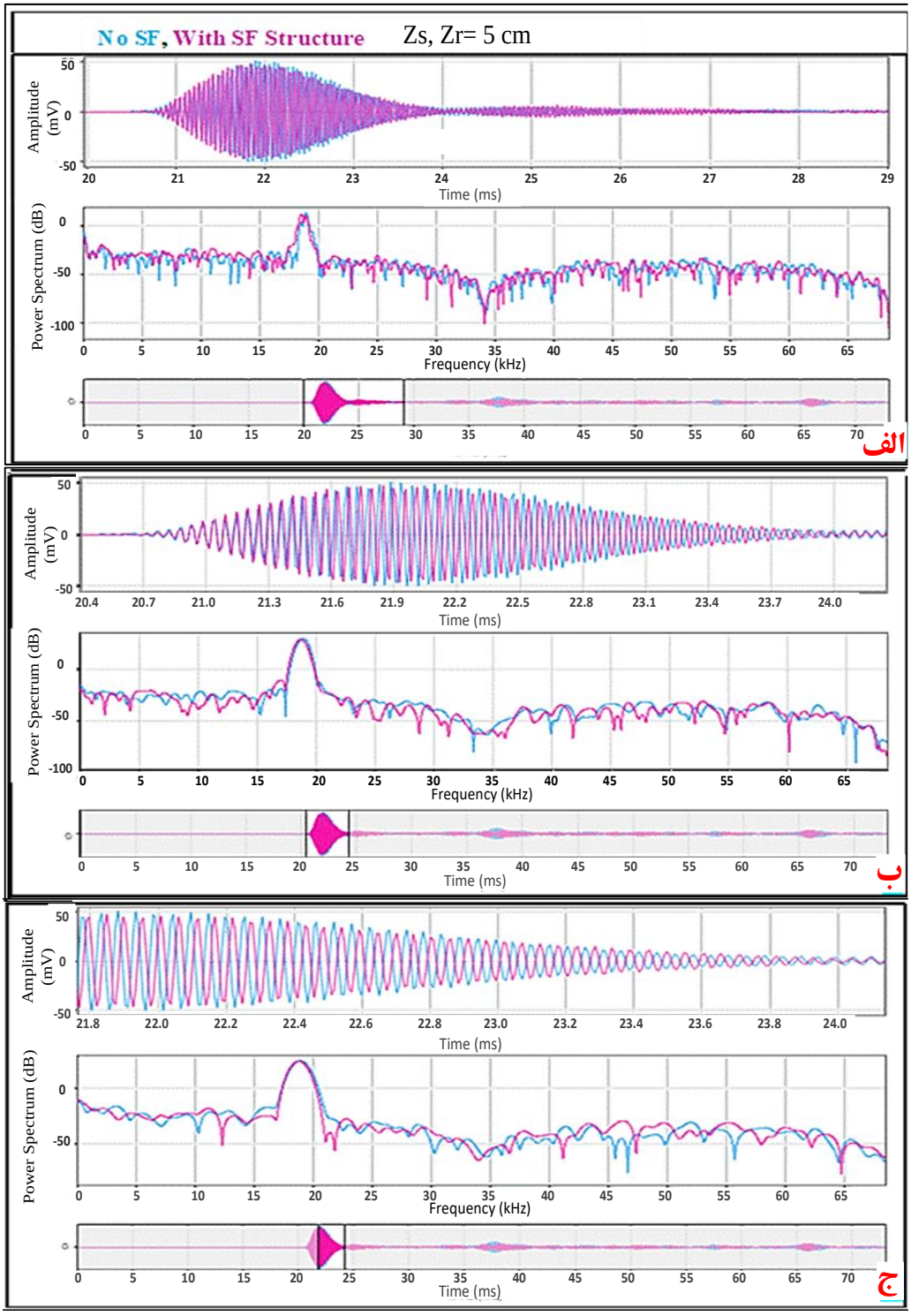
تعیین سرعت صوت فرآیندی تجربی است که محاسبه آن بر اساس پارامترهای اصلی آب دریا در نواحی مختلف صورت می‌گیرد [۱۴]. روابط تجربی بسیاری برای محاسبه سرعت صوت استخراج شده‌اند، اما با توجه به افزایش دقت محاسبات همراه با کاهش خطای ناشی از ضرایب، معادله مدوین $C=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.00029T^3+(1.39-0.012T)(S-35)+0.017D$، که در آن D عمق (m)، S شوری (psu)، T دما (°C) و C سرعت صوت (m/s) در آب است) با گستره دمایی ۰-۳۵ °C، شوری ۰-۴۵ psu و عمق ۰-۱۰۰۰m، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. همچنین روش‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی معرفی شده‌اند، اما تئوری پرتو یکی از روش‌های پرکاربرد است و برای تحلیل انتشار امواج صوتی در فرکانس‌های بالا ($f > 10\frac{c}{h}$، که در آن c سرعت صوت و h عمق آب است) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. به‌طوری‌که، بر پایه تئوری پرتو می‌توان پرتوهای صوتی را با استفاده از یک مدل رهگیری صوتی مانند مدل بلهاپ[1] شبیه سازی کرد. در این پژوهش از معادله مدوین برای محاسبه سرعت صوت و از تئوری پرتو و مدل بلهاپ در فرکانس‌های بالای ۵۰۰ هرتز (۶۹ کیلو هرتز) برای شبیه‌سازی و تحلیل اثر ساختارهای پخش دوگانه بر سیگنال‌های صوتی در یک مخزن آزمایشگاهی همگن استفاده شده است.

۳- یافته‌ها

سیگنال ثبت شده در عمق‌های ۵ و ۴۰ سانتی‌متر، در غیاب و در حضور ساختار SF در شکل‌های ۲ تا ۳ ارائه شده است. سیگنالی که در عمق ۵ سانتی‌متر منتشر می‌شود با دو بسته موج کوتاه مدت ثبت می‌شود (شکل۲). بیشینه اول بیانگر سیگنال مستقیمی است که اول به گیرنده می‌رسد و پوش‌های بعدی به ترتیب بازتاب از سطح، کف و دیواره هاست. تکرار بیشینه بعدی، سیگنالی است که پس از بازتاب از دیواره‌های مقابل سنسورها به گیرنده می‌رسند.

[1] Bellhop model

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]



شکل۲- الف) تغییر دامنه سیگنال‌های دریافتی مستقیم و بازتابی و توان طیفی سیگنال صوتی، ب) تغییر دامنه و توان بیشینه اول، ج) تغییر فاز و تاخیر در سیگنال مستقیم، در عمق ۵ سانتی متر. در غیاب (آبی) و در حضور انگشتان نمکی (صورتی).

تغییرات در این بازتاب‌ها نیز قابل مشاهده است اما هدف اصلی ما بررسی سیگنال‌های مستقیم و بازتابی از سطح آب است. بنابراین بطور کلی سه پوش اصلی اول مورد بررسی قرار می‌گیرند. با مقایسه دو سیگنال، مشخص است که دامنه سیگنالی که مستقیم به گیرنده می‌رسد کاهش یافته است (شکل۲). اما با بررسی پوش دوم مشاهده می‌شود که سیگنال عبوری از ساختار نمکی در سطح نسبت به سیگنال اولیه با تاخیر منتشر شده است (شکل۲، الف) که نشان‌دهنده پراکندگی سیگنال از ساختار سطحی است. علاوه بر آن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

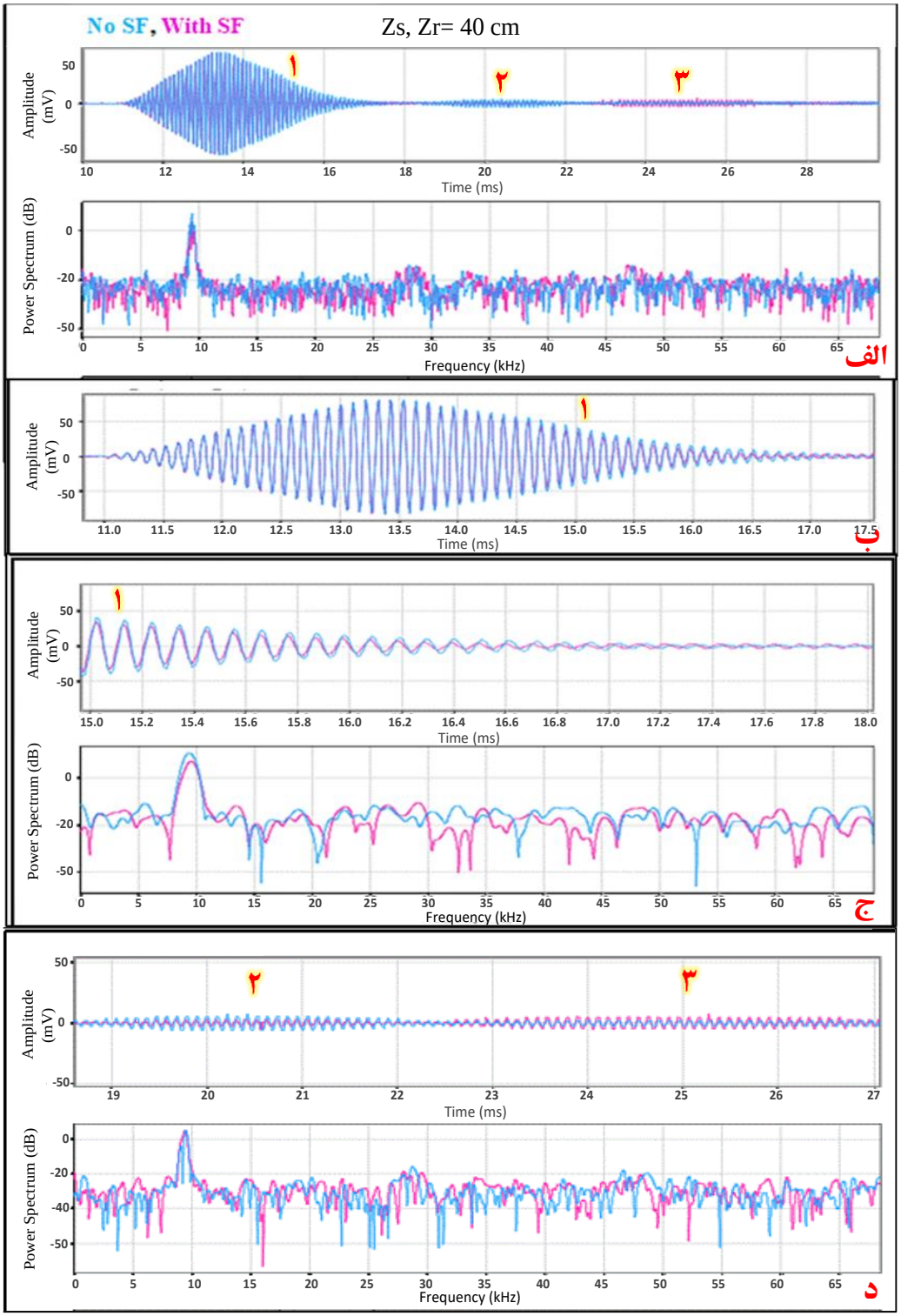
همراه با کاهش دامنه در سیگنالی که مستقیم دریافت می‌شود (شکل۲، ب و ج) یک تاخیر زمانی در نیمه دوم پوش سیگنال مشاهده می‌شود به‌طوری‌که فاز سیگنال ۹۰ درجه تغییر کرده است (شکل۲، ج). این تغییرات در طیف توان سیگنال نیز قابل مشاهده است. بیشینه توان سیگنال صوتی در هر دو حالت در محدوده فرکانسی ۲۰-۱۸ کیلوهرتز منطبق هستند اما به ازای بسته فرکانسی بالاتر، تفاوت در توان سیگنال افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در بازه فرکانسی ۷۰-۶۰ کیلوهرتز و ۴۵-۳۰ کیلوهرتز، مقادیر مشابه توان صوتی، در فرکانس‌های بالاتری رخ می‌دهند (شکل۲، ب و ج). با افزایش عمق فرستنده و گیرنده صوتی (۴۰ سانتی‌متر)، تغییر قابل ملاحظه‌ای در دامنه و تعداد بسته‌های موجی مشاهده می‌شود. اما در حضور ساختار SF و با عبور سیگنال از ساختار عمیق، کاهش دامنه سیگنال و تاخیر در انتشار سیگنال رخ می‌دهد. با مقایسه همه سیگنال‌های ثبت شده در این عمق (شکل۳، الف)، دامنه سیگنال مستقیم (پوش۱) و سیگنال بازتابی از سطح (پوش۲) کاهش یافته است، درحالیکه سیگنال بازتابی از کف (پوش۳) با دامنه بزرگتری ثبت شده است. با مقایسه طیف توان سیگنال‌ها مشاهده می‌شود که طیف توان در هر دو حالت به‌طور مشابه تغییر می‌کند (شکل۳، الف) اما در حضور انگشتان نمکی، مقادیر توان صوتی به ازای فرکانس‌های بالاتری رخ می‌دهند و علاوه بر آن تغییری در حدود dB ۱۰ - ۵ در مقادیر توان سیگنال رخ می‌دهد (شکل۳، ج). با توجه به نمودار دامنه - زمان، در سیگنال مستقیم (شکل۳، ب و ج) و سیگنال بازتابی از سطح (شکل۳، د، پوش ۱) یک افت دامنه وجود دارد که در این عمق می‌تواند ناشی از پراکندگی سیگنال از SF و افت دامنه و همچنین انحراف پرتوهای صوتی از ساختار نمکی به سمت عمق باشد، به‌طوری‌که با کاهش شدت و توان سیگنال صوتی موجب کاهش دامنه پوش صوتی در این دو ناحیه شده است و این کاهش دامنه در سیگنال‌های بازتابی از سطح بیشتر از سیگنال‌های مستقیم است (شکل۳، ج و شکل۳، د. پوش۲). با این وجود، افت دامنه در این عمق نسبت به سیگنال‌هایی که در عمق ۵ سانتی‌متری ثبت شده‌اند کمتر است. در واقع در عمق۴۰ سانتی‌متری، سیگنال‌ها فاصله مناسبی از ساختار نمکی دارند و بنابراین پرتوهای کمتری از ساختار پراکنده و یا منحرف می‌شوند و افت دامنه کمتری هم رخ می‌دهد. از طرف دیگر، با انتقال پرتوها به سمت کف مخزن، شدت پرتوهای بازتابی از کف بیشتر شده و بنابراین دامنه بسته موج بازتابی از کف مخزن افزایش می‌یابد (شکل۴، د. پوش۳). از طرف دیگر در این عمق تاخیر قابل توجهی در سیگنال مستقیم و سطحی رخ نمی‌دهد و بعبارتی پراکندگی سیگنال صوتی با افزایش عمق فرستنده و گیرنده صوتی، کاهش می‌یابد. در پایان اندازه‌گیری‌ها (حدود یک ساعت و نیم بعد از شکل‌گیری انگشتان نمکی، ثبت سیگنال و اندازه‌گیری شوری در حضور انگشتان نمکی) برای نمایش محل رشد انگشتان نمکی از رنگ غیرفعال مشکی استفاده شد (شکل۴). به‌طوری‌که با تزریق چند سی‌سی رنگ مشکی (با استفاده از پیپت) در محل تزریق محلول نمکی، توده نمکی و انگشتان نمکی حاصل از آن قابل مشاهده شده است. به دلیل همگن بودن آب شیرین، ساختار نمکی عمیق‌تر می‌شود و در حداکثر عمق نفوذ خود، بر اساس ضریب پخش شوری در راستای افقی توزیع و ضعیف می‌شود. در تصاویر ارائه شده توده شور تا حد امکان با تامین شوری از سطح، عمیق شده است اما در عمیق‌ترین ریزش آن متناسب با شناوری آب، انگشتان نمکی تشکیل شده‌اند. بنابراین درحالیکه شوری در لایه سطحی بیشینه است اما جریان شور در نهایت در عمق مشخصی متوقف و در راستای افقی گسترش می‌یابد.

برای مشاهده اثر این انگشتان نمکی بر پرتوهای صوتی، تغییرات نسبی شوری در چند نقطه معین در طول مخزن اندازه‌گیری شده (جدول۲) و سرعت صوت در مخزن آزمایشگاهی قبل (با دما و شوری ثابت) و بعد از شکل‌گیری ساختار SF محاسبه و سپس انتشار پرتوهای صوتی و اتلاف سیگنال صوتی در مخزن آب با استفاده از مدل بلهاپ شبیه سازی شده است. در غیاب ساختار نمکی، سرعت صوت در مخزن آب شیرین با توجه به یکنواخت بودن شوری و دمای آب، تنها با تابعیت از عمق ناچیز مخزن، تغییر می‌کند. اما در حضور ساختار نمکی، با توجه به لایه بندی جدید و تغییر در شوری سطحی و اثر ریزش نمکی، شوری در عمق و سطح تغییر می‌کند (شکل۶، الف) و سرعت صوت متاثر از شوری، افزایش می‌یابد (شکل۶، ب). اثر غلظت شوری در سطح موجب افزایش سرعت سطحی می‌شود، اما با نوسان و تغییر عمق نمک، افزایش سرعت صوت تا عمق ریزش نمک امتداد دارد و با کاهش ریزش نمکی در مقابل شناوری و توقف آن، تغییرات سرعت صوت نیز محدود می‌شود (شکل۶، ب). با توجه به انحراف سیگنال صوتی به سمت سرعت کم، در ابتدا در غیاب شکل‌گیری SF، سیگنال صوتی با کمترین اتلاف (تنها اتلاف ناشی از برد و بازتاب) منتشر و پرتوهای صوتی به سمت سطح منحرف می‌شوند (شکل۷، الف). اما در حضور ساختار نمکی و افزایش شوری سطح، اتلاف و پراکندگی سیگنال صوتی (تا dB ۸۵) افزایش یافته (شکل۷، ب۱) و پرتوهای صوتی به سمت کف مخزن منحرف می‌شوند (شکل۷، ب). اما این اثر اتلافی و انحراف از ساختار نمکی با افزایش عمق فرستنده صوتی کاهش می‌یابد (شکل۷، شماره‌های ۱ تا ۳). از طرف دیگر، ساختار نمکی و ریزش متغیر شوری، تغییر لایه‌ای در سرعت صوت ایجاد کرده و به همین دلیل پرتوهای بازاویه انتشار مختلف در عمق‌های متفاوتی از توده شور نفوذ می‌کنند به‌طوری‌که یک انتشار پله‌ای با عمق انتشار متفاوت رخ می‌دهد. این اثر بر پرتوهای با زاویه انتشار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

کوچکتر بیشتر است (شکل۸، ب. پرتوهای مشخص شده با رنگ آبی). همچنین مشاهده می‌شود که تراکم پرتوهای عمیق بیشتر شده و شدت پرتوهای سطحی کاهش می‌یابد. با افزایش عمق، انحراف پرتوهای با زاویه انتشار بزرگتر کاهش می یابد اما پرتوهای با زاویه انتشار کوچکتر تحت تاثیر ساختار نمکی پراکنده می‌شوند.



شکل۳- الف) مقایسه بسته موج و توان طیفی سیگنال صوتی در غیاب انگشتان نمکی (آبی) و در حضور انگشتان نمکی (صورتی) با فرستنده و گیرنده صوتی در عمق ۴۰ سانتی‌متر. ب و ج) دامنه و طیف توان سیگنال مستقیم د) دامنه و طیف توان سیگنال‌های بازتابی از سطح و کف. شماره های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب سیگنال‌های مستقیم (پوش اول)، سیگنال بازتابی از سطح (پوش دوم) و سیگنال بازتابی از کف (پوش سوم) را نشان می دهند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

شکل۴- شکل‌گیری انگشت نمک در مخزن آب شیرین

جدول۲- شوری اندازه‌گیری شده (در نقاط تعیین شده) در مخزن آب شیرین پس از شکل‌گیری انگشتان نمکی.

(ردیف اول جدول بیانگر نقاط اندازه‌گیری داده‌ها در فاصله دو سنسور و ستون اول بیانگر عمق اندازه‌گیری داده‌ها در آب مخزن است)

Range (cm)	0	20	40	60	80	100
Depth(cm)	Salinity (ppt)					
0	0.02	0.1	0.27	0.38	0.43	0.37
10	0.02	0.07	0.21	0.33	0.38	0.32
20	0.02	0.05	0.15	0.27	0.33	0.26
30	0.02	0.02	0.08	0.19	0.26	0.07
40	0.02	0.02	0.04	0.13	0.19	0.03
50	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	0.02
60	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
70	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
80	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

۴- نتیجه‌گیری

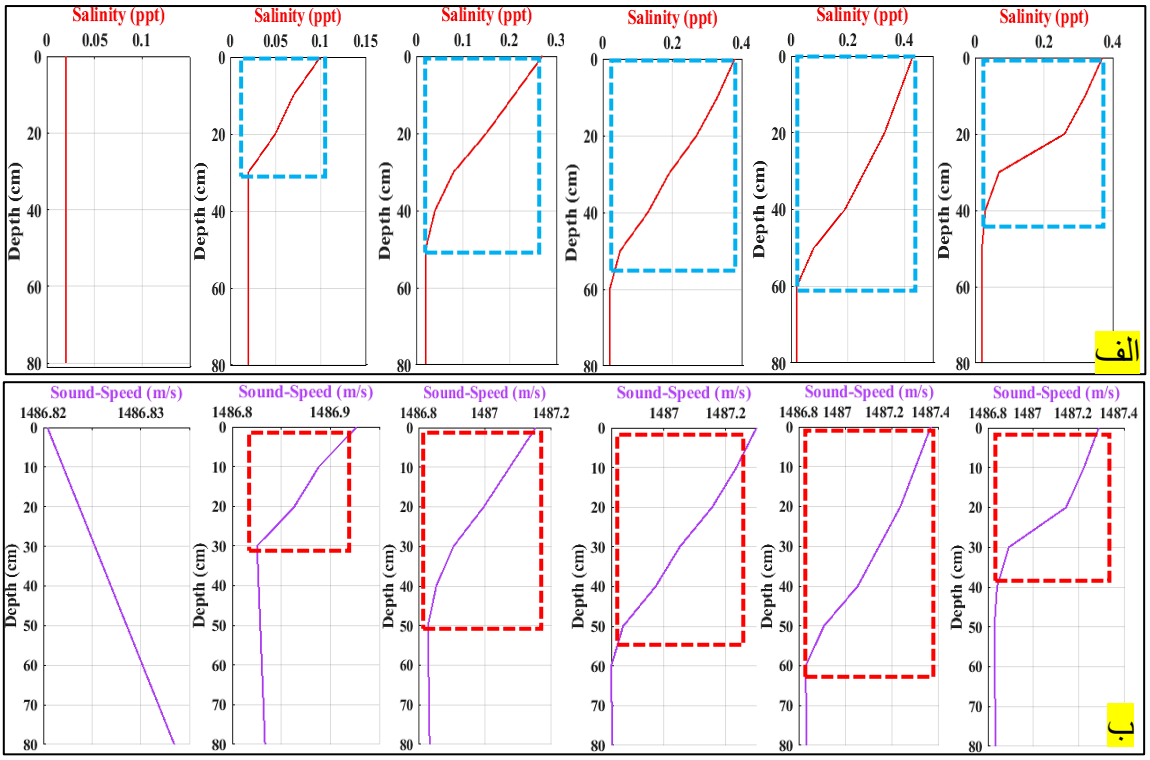
با بررسی آزمایشگاهی اثر انگشتان نمکی بر انتشار صوت در مخزن آب شیرین و در عمق ۵ سانتی‌متر، مشاهده می‌شود که تحت تاثیر ساختار SF تغییراتی در بسته موج صوتی هم در دامنه و هم گام زمانی رخ می‌دهد، چنان‌که هم دامنه سیگنالی که مستقیم به گیرنده می‌رسد کاهش می‌یابد و هم سیگنال عبوری از ساختار نمکی در سطح، نسبت به سیگنال اولیه با تاخیر دریافت می‌شود.

- در حضور انگشتان نمکی، مقادیر توان صوتی به ازای فرکانس‌های بالاتری رخ می‌دهند و علاوه بر آن یک تغییر در حدود ۵- ۱۰ dB در مقادیر توان سیگنال رخ می‌دهد. افت دامنه سیگنال در عمق ۴۰ سانتی‌متر نسبت به سیگنال‌هایی که در عمق ۵ سانتی‌متری ثبت شده‌اند کمتر است. در واقع با افزایش عمق فرستنده صوتی، پرتوهای کمتری از ساختار پراکنده و یا منحرف می‌شوند و افت دامنه کمتری هم رخ می‌دهد.
- سیگنال صوتی در غیاب انگشتان نمکی با کمترین اتلاف منتشر و پرتوهای صوتی به سمت سطح منحرف می‌شوند، اما در حضور ساختار نمکی و افزایش شوری در سطح، اتلاف و پراکندگی سیگنال صوتی تا ۸۵ dB افزایش می یابد.
- اثر غلظت شوری در سطح موجب افزایش سرعت سطحی می‌شود اما با نوسان و تغییر عمق شوری، افزایش سرعت صوت تا عمق ریزش نمک امتداد دارد و پرتوهای صوتی با انحراف به سمت سطح آب، منتشر می‌شوند. اما ریزش ساختار نمکی و تغییرات لایه‌ای شوری موجب پراکندگی و انحراف پلکانی سیگنال‌های صوتی می‌شود. به‌طوری‌که با کاهش زاویه انتشار و یا افزایش عمق فرستنده صوتی، این پراکندگی کمتر شده و انحراف از ساختار نمکی افزایش می‌یابد.
- نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ساختار انگشتان نمکی (SF) بر سرعت و انتشار سیگنال صوتی تأثیر بسزایی دارند و

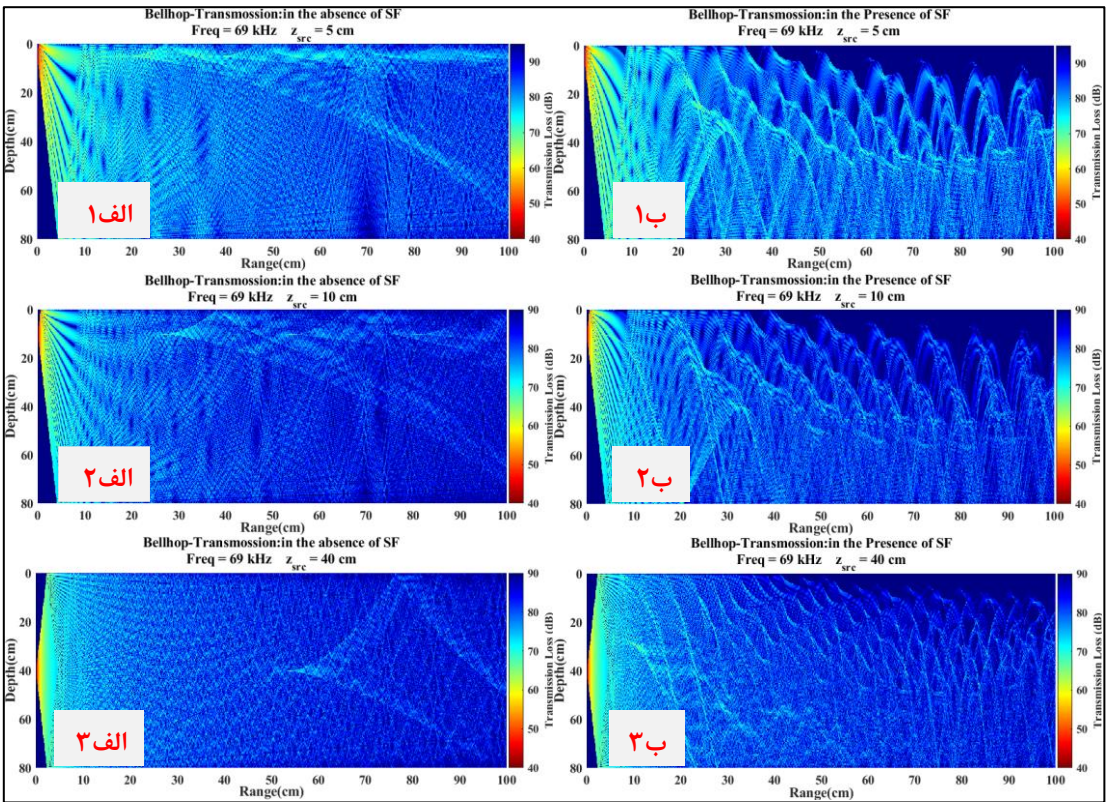
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

باعث انحراف، اتلاف انرژی و تغییر در انتشار پرتوهای صوتی می‌شوند. بنابراین اعمال اثر این ساختارها در هنگام تحلیل داده‌های صوتی و کالیبراسیون ابزارهای آکوستیکی، می‌تواند به انتقال اطلاعات مفید در پژوهش‌ها و حوزه‌های مختلف دریایی کمک کند.



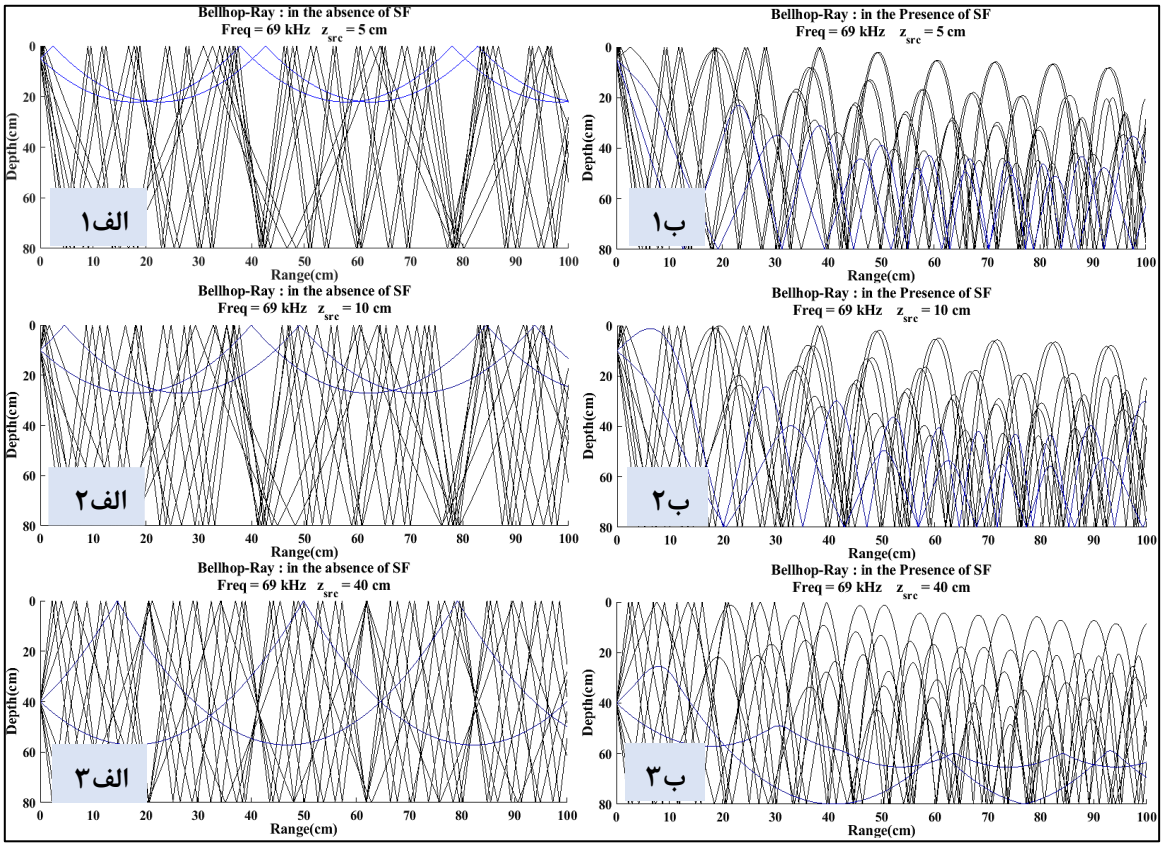
شکل۶- پروفایل‌های الف) شوری و ب) سرعت صوت در طول مخزن آب شیرین در حضور انگشتان نمکی. کادرهای آبی و قرمز به ترتیب تغییر شوری سطحی و تغییر سرعت صوت با تابعیت از شوری در طول کانال را نشان می‌دهند.



شکل۷- انتشار و اتلاف سیگنال صوتی با فرکانس ۶۹ کیلوهرتز با استفاده از مدل بلهاپ (با زاویه انتشار کمتر از ۱۰ درجه) در طول مخزن. الف) در غیاب ساختار SF و ب) در حضور ساختار SF و به ترتیب در عمق‌های (۱) ۵ سانتی‌متر، (۲) ۱۰ سانتی‌متر و (۳) ۴۰ سانتی‌متر.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]



شکل۸- شبیه‌سازی پرتوهای صوتی با فرکانس ۶۹ کیلوهرتز با استفاده از مدل بلهاپ. الف) در غیاب ساختار SF، ب) در حضور ساختار SF ، به ترتیب در عمق‌های (۱) ۵ سانتی‌متر، (۲) ۱۰ سانتی‌متر و (۳) ۴۰ سانتی‌متر. پرتوهای با کوچکترین زاویه انتشار با رنگ آبی مشخص شده‌اند.

۵- مراجع

1- Arasteh, A. M., Nazimiyeh, N., Soheilifar, M., 2017, two-dimensional numerical model of sound wave propagation in the waters of Strait of Hormuz by finite difference method. Marine science and technology research. 39-51: (2)13. [In Persian]

2- 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.

3- 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 .

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

5- Etter P.C., 2003. Underwater acoustic modeling and simulation, 3rd edition, Spon Press, 185p.

6- 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.

7- Ghazi, E., Bidokhti, A. A., Ezam, M., Azad, M. T., 2016, Physical Properties of Persian Gulf Outflow Thermohaline Intrusion in the Oman Sea. Open Jour Mar Sci. 7:169–190.

8- Hoare, R. A., 1966. Problem of heat transfer in Lake Vanda, a density stratified Antarctic Lake. Nature, London, 10, 787–789.

9- 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.

10- Medwin. H., 1975. Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. Acoustical Society of America. 6. 58. https://doi.org/10.1121/1.380790.

11- Etter, P.C., 2012. "Advanced applications for underwater acoustic modeling," Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2012.

12- 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.

13- Williams, A. J., 1974, Salt Fingers observed in Mediterranean outflow. Science, 185, 941 943.

14- 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.

15- Yusop, S.M., Abu Bakar, N., Abdullah, K., 2011, Kuala Besar, Kelantan: A sound speed analysis, IEEE

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]

colloquium on humanities, Science and Engineering Research, Dec 5-6: 610-663.
16- 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.
17- Zodiatis, G., and Gasparini, G.P., 1996: Thermohaline staircase formations in the Tyrrhenian Sea. Deep-Sea Res., 43, 655-678.
18- Radko, T., 2013, Double-Diffusive Convection. Cambridge University Press, 342 pp.
19- Spear, D. J., and R. E. Thomson., 2012: Thermohaline staircases in a British Colombia Fjord. Atmos.-Ocean, 50, 127–133.
20- Stern, M. E., 1960: The “salt-fountain” and thermohaline convection. Tellus, 12,172–175.
21- Turner, J. S., and Stommel, H., 1964: A new case of convection in the presence of combined vertical salinity and temperature gradients. Proc. Natl. Acad. Sci., 52, 49–53.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.93]