

Propagation of ultrasonic radiation in the presence of seabed topography in the North Indian Ocean

Mohammad Reza Khalilabadi ^{1*}, Hossein Shahmirzaee ², Saeed Daneshmehr ³

1. Assistant Professor, Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran

3. M.Sc., Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2022/12/30

Revised: 2023/09/10

Accepted: 2023/05/31

Keywords:

Indian ocean

Ultrasonic rays

topography

Acoustic pressure

*Corresponding author:

[✉khalilabadi@mut.ac.ir](mailto:khalilabadi@mut.ac.ir)

orcid: 0000-0002-7000-1848

doi: [10.52547/joc.14.54.7](https://doi.org/10.52547/joc.14.54.7)

dor20,1001,1,15621057.1402,14,54,7,3

ABSTRACT

Background and Objectives: Due to the good propagation of sound waves in the ocean, sound energy is used to reveal the subsurface of the sea. In order to take advantage of the different characteristics of the environment in which sound is emitted, modeling and simulation of sound waves should be used. For this purpose, the environmental factors should be investigated and the sound rays' propagation and the efficiency of sonar should be simulated in different conditions and at different times and places. This research is designed with the aim of investigating the effects of topographical shape on the propagation of ultrasound rays.

Methods: In this research, firstly, the environmental data of the study area, which includes salinity, temperature, and depth data in the northern Indian Ocean, which is a combination of international databases, such as the topography data of the study area from the base of the Gebco (General Bathymetric Chart of the Oceans) and Hycom (Hybrid Coordinate Ocean Model) coordinates have been extracted. Then, using the beam method, the propagation of ultrasonic waves in the presence of roughness of the seabed has been simulated.

Findings: First, changes in hydrophysical parameters were analyzed using temperature and salinity data in the Indian Ocean and with the help of graphic models. Then, using Mackenzie's formula, the speed of sound in these sections was calculated and analyzed. With the help of the existing acoustic model, pressure changes were first checked and then this output was used to calculate the amount of return signal from a hypothetical underwater target.

Conclusion: The results of different simulation scenarios of ultrasonic beam propagation show that when the source is placed under the thermocline layer, the acoustic beams are deflected downwards. As the frequency increases, the transmission loss increases, and the intensity of the acoustic pressure decreases as the amount of absorption of sound waves increases with increasing frequency.



NUMBER OF TABLES

1



NUMBER OF FIGURES

14



NUMBER OF REFERENCES

34

انتشار پرتوهای فراصوت در حضور توپوگرافی بستر دریا در اقیانوس هند شمالی

محمد رضا خلیل آبادی^{۱*}، حسین شاهمیرزایی^۲، سعید دانش مهر^۳

۱. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوادریا، ایران

۲. دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوادریا، ایران

۳. کارشناس ارشد الکتروآکوستیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوادریا، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۹

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۲/۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۰

واژگان کلیدی:

اقیانوس هند

پرتوهای فراصوت

توپوگرافی

فشار آکوستیکی

*نویسنده مسئول

✉ khalilabadi@mut.ac.ir

orcid: 0000-0002-7000-1848

doi: 10.52547/joc.14.54.7

dor20,1001,1,15621057.1402,14,54,7,3

پیشینه و اهداف: به دلیل انتشار خوب امواج صوتی در اقیانوس، از انرژی صوتی برای آشکارسازی زیرسطح

دریا استفاده می‌شود. برای بهره‌برداری از خصوصیات محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود، باید از مدل‌سازی و شبیه‌سازی امواج صوتی استفاده شود. بدین منظور، باید عوامل محیطی بررسی و نحوه انتشار پرتوهای صوتی و کارایی سونار در شرایط و زمان‌ها و مکان‌های متفاوت شبیه‌سازی شود. پژوهش حاضر، با هدف بررسی تأثیرات شکل توپوگرافی بر انتشار پرتوهای فراصوت طراحی شده است.

روش‌ها: در پژوهش حاضر، ابتدا داده‌های محیطی منطقه مورد مطالعه که شامل داده‌های شوری، دما و عمق در شمال اقیانوس هند است به صورت ترکیبی از پایگاه‌های داده‌های بین‌المللی، نظیر داده‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از پایگاه نمودار کلی عمق‌سنجی اقیانوس‌ها و پایگاه داده‌های هیدروفیزیکی مدل هیبریدی مختصات اقیانوسی، استخراج شده‌اند. سپس، با استفاده از روش پرتو، انتشار امواج فراصوتی در حضور ناهمواری بستر دریا شبیه‌سازی شده است.**یافته‌ها:** ابتدا، با استفاده از داده‌های دما و شوری در اقیانوس هند و به کمک مدل‌های گرافیکی، تغییرات پارامترهای هیدروفیزیکی تحلیل شد. سپس، با استفاده از فرمول مکزی، سرعت صوت در این مقاطع محاسبه و تحلیل شد. به کمک مدل آکوستیکی موجود، ابتدا تغییرات فشار بررسی و سپس از این خروجی برای محاسبه میزان سیگنال برگشتی از یک هدف فرضی زیر آبی استفاده شد.**نتیجه‌گیری:** نتایج سناریوهای شبیه‌سازی انتشار پرتوهای فراصوت نشان می‌دهد که وقتی منبع زیر لایه ترموکلاین قرار داده شود پرتوها آکوستیکی به سمت پایین منحرف می‌شوند. با افزایش فرکانس، تلفات انتقال افزایش و شدت فشار آکوستیکی کاهش می‌یابد زیرا مقدار جذب امواج صوتی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

مقدمه

۲. فرکانس آستانه ۵۰۰ هرتز تا حدی اختیاری است اما این حقیقت را منعکس می‌کند که بالاتر از ۵۰۰ هرتز تعداد زیادی از مدل‌های نظری موج، از نظر محاسباتی، متمرکز می‌شوند. زیر ۵۰۰ هرتز نیز، فیزیک بعضی از مدل‌های نظریه پرتو، به علت فرض‌های محدودکننده، قابل تردید است.

۳. دایره کاملاً توپر به روش مدل‌سازی اشاره دارد که به طور محاسباتی و فیزیکی کاربرد دارد.

۴. دایره نیمه‌پر نشان‌دهنده روش مدل‌سازی است که محدودیت‌هایی در دقت یا سرعت اجرا دارد.

۵. دایره توخالی یعنی روش مدل‌سازی قابلیت کاربرد محاسباتی و فیزیکی ندارد.

جدول ۱ محاسبه انتشار صوت زیر آبی، فرکانس پایین ($<500\text{ Hz}$)، فرکانس بالا ($>500\text{ Hz}$)، RI: مستقل از برد، RD: وابسته به برد را نشان می‌دهد.

جدول ۱ دامنه کارایی مدل‌های انتشاری [۶]

نوع مدل	کاربردها								
	آب کم عمق				آب عمیق				
	فرکانس پایین		فرکانس بالا		فرکانس پایین		فرکانس بالا		
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD	
نظریه پرتو									
مد نرمال	○	○	○	○	○	○	○	○	○
بسط چند راهه	○	○	○	○	○	○	○	○	○
میدان سریع	○	○	○	○	○	○	○	○	○
معادله سهموی	○	○	○	○	○	○	○	○	○

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

اقیانوس هند سومین اقیانوس بزرگ جهان است که ۲۰ درصد از سطح کره زمین را پوشانده است. همچنین گرم‌ترین حوزه اقیانوسی جهان به‌شمار می‌آید. از مهم‌ترین تأثیرات این اقیانوس بادهای موسمی است که در سرتاسر جنوب شبه‌قاره هند و آسیای جنوب شرقی باعث ایجاد باران‌های فصلی و همچنین جریان‌های آب گرم استوایی می‌شود. ۳۷ کشور در کرانه و ۱۷ کشور از آبراهه‌های

از آنجا که محیط اقیانوس محیط ناهمگن است، مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده در نحوه انتشار امواج صوتی در اقیانوس پروفایل سرعت صوت (یعنی منحنی تغییرات سرعت صوت نسبت به عمق اقیانوس) است. سرعت انتشار صوت به سه پارامتر شوری، دما و عمق اقیانوس وابسته است [۱]. به تغییرات پروفایل سرعت صوت در زمان‌ها و مکان‌های متفاوت در آب‌های کم‌عمق بایستی توجهی ویژه بشود. تأثیر پارامترهای محیطی دیگر، از جمله جنس بستر دریا و تضعیف ناشی از آن، مخصوصاً در آب‌های کم‌عمق، مانند خلیج فارس، بسیار اهمیت دارد زیرا مسیرهای انتشار امواج صوت معمولاً شامل چندین برخورد به بستر دریا هستند [۲].

۱. مدل‌های انتشاری

روش‌هایی برای حل معادله موج طراحی شده‌اند که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: ۱. نظریه پرتویی، ۲. مد نرمال، ۳. بسط چندمسیره، ۴. میدان سریع (انتگرال عدد موج) و ۵. معادله سهموی. روش دیگری نیز بر اساس مشخصات محیطی وجود دارد که مدل‌ها را به دو دسته مستقل از برد (مدل یک‌بعدی یا فقط وابسته به عمق) و وابسته به برد (دو بعدی (عمق و برد) یا سه‌بعدی (عمق، برد و زاویه) جدا می‌کند [۳].

۲. مقایسه روش‌های عددی

مدل‌ها در دسته‌هایی مرتب می‌شوند تا تکنیک‌های مدل‌سازی پایه (روش‌های نام‌برده) به‌کار گرفته شوند و توانایی مدل را برای به‌کارگیری در محیط‌های وابسته به برد منعکس کنند. چنین عواملی آنچه را که حوزه‌های کاربرد نامیده می‌شود تعیین می‌کنند. گاهی اوقات، مدل‌های هیبرید طبقه‌بندی صریحی را در بر می‌گیرند [۴]. برای مثال، در مسائل عملکرد و طراحی سونار، معمولاً تحلیلگر با یک ماتریس تصمیم‌گیری، شامل عمق آب (عمیق در مقابل کم‌عمق)، فرکانس (بالا در مقابل پایین) و وابسته به برد (محیط‌های اقیانوسی مستقل از برد در مقابل وابسته به برد)، مواجه می‌شود. این طرح طبقه‌بندی بسیار مفیدی را برای بهینه‌سازی این منطق ریاضی تصمیم‌گیری در مقابل روش‌های مدل‌سازی قابل‌دسترس و حوزه‌های قابل‌کاربردشان ارائه داد. شرایط و فرض‌های زیر بر ساختار جدول ۱ حاکم است [۵]:

۱. آب کم‌عمق آبی است که برای آن صوت با بستر دریا به‌طور درخور توجهی اثر متقابل دارد.

پرتو برای فرکانس‌های بالاتر از ۱ کیلوهرتز، مشکلات آب‌های عمیق و زمانی که می‌توان کف اقیانوس را کاملاً سفت و سخت مدل‌سازی کرد و همچنین زمانی که تغییرات عمق‌سنجی اهمیت دارند مناسب‌تر هستند. نمونه‌هایی از برنامه‌های مبتنی بر این مدل عبارت‌اند از: BELLHOP که معیار این دسته محسوب می‌شود [۴].

در رویکرد پرتو، دامنه سیگنال با در نظر گرفتن تغییرات در ناحیه مشخص شده توسط پرتوهای مجاور تعیین می‌شود اما این منجر به پیش‌بینی دامنه بی‌نهایت در هنگام عبور پرتوها (یعنی در مناطق خورنده) و دامنه صفر در مناطقی می‌شود که هیچ پرتویی در آن نفوذ نمی‌کند (مناطق سایه).

از سوی دیگر، رویکرد پرتو هر پرتو را مرکز یک پرتو با نیمرخ شدت گاوسی (معمولی) در نظر می‌گیرد و سیگنال را با جمع کردن مشارکت همه پرتوها با دامنه درخور توجه در محل گیرنده محاسبه می‌کند. کدهای پرتو مشکلات مربوط به خورنده‌ها و مناطق سایه را کاهش می‌دهند و در فرکانس‌های پایین‌تر از کدهای پرتو کاربرد دارند. باین‌حال، آنها همچنان ذاتاً کدهای فرکانس بالا هستند [۹].

۴. بله‌اپ

بله‌اپ یک کد پرتو از این نوع (ردیابی پرتو) است که می‌توان آن را با استفاده از پرتوهایی با مشخصات گاوسی یا پرتوهای دارای مشخصات مثلی که یک کد پرتوی استاندارد را شبیه‌سازی می‌کنند اجرا کرد. بله‌اپ همچنین می‌تواند در یک فایل عمق‌سنجی که عمق آب را به‌مثابه تابعی از محدوده مشخص می‌کند بخواند و به آن اجازه دهد برخی از وابستگی به محدوده را کنترل کند.

۵. مراحل اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی

۵-۱. فرکانس کار چشمه صوت در شبیه‌سازی انتشار صوت

مدل‌سازی مبتنی بر روش پرتو با کاربردهای فرکانس متوسط و بالا سازگاری دارد. قانون ساده‌ای که برای کنترل بالا بودن فرکانس می‌تواند استفاده شود به‌صورت زیر است.

$$f > \frac{10C}{h} \quad (1)$$

که در آن، f مقدار فرکانس منبع صوتی (برحسب هرتز)، C سرعت انتشار صوت (برحسب متر بر ثانیه) و H عمق دریا (برحسب متر) است. کمترین عمق دریا را می‌توان در محیط و ناحیه مورد بررسی در متغیر h قرار داد. همچنین می‌توان متوسط سرعت صوت

کوچک‌تر به این اقیانوس راه دارند. راه ورود به هفت دریای مهم جهانی و چهار تنگه راهبردی جهان، یعنی تنگه هرمز، باب‌المندب، مالاکا و کانال سوئز، از این اقیانوس می‌گذرد [۷].

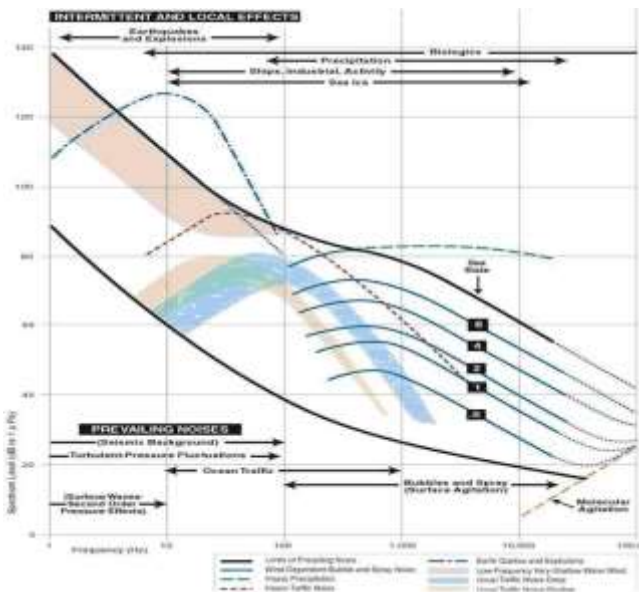
۲. روش کار

ابتدا، باید به شناسایی و بیان کامل مسئله توجه کرد بدین‌صورت که دانستن پارامترهای فیزیکی آب دریا از مهم‌ترین مسائل برای محقق شدن مدل‌سازی امواج فراصوت در منطقه مورد نظر است. از جمله این پارامترها دما، شوری، چگالی و سرعت صوت است. این اطلاعات توسط پایگاه‌های داده‌های بین‌المللی، از جمله پایگاه نمودار کلی گرماسنجی اقیانوس‌ها و پایگاه داده‌های هیدروفیزیکی مدل هیبریدی مختصات اقیانوسی، اندازه‌گیری شد و با دسترسی به این اطلاعات و استخراج داده‌ها، وارد کردن ورودی داده‌ها به کد نوشته‌شده در متلب، تهیه عملکرد و دستورهای لازم در مدل و کدهای انتشاری صوت مورد نظر پردازش مدل‌سازی روش مذکور انجام گرفت.

ابتدا، با استفاده از اندازه‌گیری‌های دما و شوری در اقیانوس هند و به کمک مدل‌های گرافیکی، تغییرات پارامترهای هیدروفیزیکی تحلیل شد. سپس، با استفاده از فرمول مکنزی، سرعت صوت در این مقاطع محاسبه و تحلیل شد. به کمک مدل آکوستیکی موجود، ابتدا تغییرات فشار بررسی و سپس از این خروجی برای محاسبه میزان سیگنال برگشتی از یک هدف فرضی زیر آبی استفاده شد [۸].

۳. ردیابی پرتو

روش‌های ردیابی پرتو معمولاً سریع اجرا می‌شوند (تا چند ده دقیقه برای موارد پیچیده و در مقیاس بزرگ). مستقیماً، نتایج گرافیکی بصری، با استفاده از قانون اسنل (قانون اسنل، به بیانی ساده، رابطه‌ای ریاضی است که ضریب شکست دو محیط را به‌واسطه دو زاویه برخورد (تابش) نور و زاویه شکست به یکدیگر مربوط می‌سازد، برای ردیابی پرتوهای منفرد در محیط ارائه می‌شوند، اگرچه آنها به یک رسانه محدودند. تکثیر اجرای آنها، از نظر محاسباتی، آسان است و به‌طور ذاتی ویژگی‌های متغیر محیط و عمق‌سنجی را امکان‌پذیر می‌کند. باین‌حال، ساده‌سازی‌های زیربنایی از تأثیرات پراش مهم در کف اقیانوس و شکست در آن محیط و همچنین شکستن در مناطق خورنده یا مناطق کانونی غفلت می‌کنند. تئوری پرتوهای بنیادی به تقریب فرکانس بالا برای استخراج فرمول آن نیاز دارد که آن را برای تحلیل دستگاه‌ها در آب‌های کم‌عمق و باندهای فرکانسی مهم مؤثر بر جانوران دریایی نامناسب می‌سازد. در مجموع، مدل‌های ردیابی



شکل ۱ منحنی ونز [۴].

ونز نویز آشفتگی (اغتشاش) را به‌مثابه یک منبع نویز در دریا توضیح داده است. آشفتگی در آب به‌صورت تصادفی باعث ایجاد نویز در محیط می‌شود.

$$NL_{turbu} = 30 \mp 30 \cdot \log f \text{ dB re } 1\mu Pa \quad (5)$$

در سال ۱۹۵۲، مِلن نشان داد که نویز گرمایی ناشی از مولکول‌های دریا محدودیتی برای حساسیت هیدروفون است که این محدودیت در فرکانس‌های بالا مؤثر است. سطح طیف نویز معادل برای دماهای معمولی به‌صورت رابطه ۵ است.

$$NL_{threm} = -15 + 20 \log f \text{ dB re } 1\mu Pa \quad (6)$$

که در آن، f فرکانس برحسب کیلو هرتز است.

نویز سطح دریا تابعی از سرعت باد v_w برحسب Kn و فرکانس f برحسب کیلوهرتز به‌صورت رابطه زیر است:

$$NL_{SS}(f, v_w) = 40 + 10 \cdot \log \left(\frac{v_w^2}{1+f^{5/3}} \right) \text{ dB re } 1\mu Pa \quad (7)$$

جمع کل سطح نویز را می‌توان توسط رابطه ذیل محاسبه کرد:

$$NL_{SS}(f, v_s, S, v_w) = 10 \cdot \log (10^{0.1NL_{traffic}} + 10^{0.1NL_{turboc}} + 10^{0.1N_{SS}} + 10^{0.1NL_{threm}}) \quad (8)$$

را در متغیر C قرار داد. به‌طور خلاصه، این روش برای سونارهای فعال بالاتر از ۲ کیلو هرتز کاربرد دارد [۱۰، ۱۱].

۲-۵. محاسبه سطح منبع (SL)

با مشخص بودن حساسیت فرستندگی منبع می‌توان رابطه فشار آکوستیکی در فاصله یک‌متری را به‌زای ولتاژهای مختلف محاسبه کرد و بر اساس آن مقدار قدرت منبع را برای این ولتاژ به دست آورد [۴]:

$$SL = 10 \log \frac{I_r}{I_i} | r = 1 \quad (2)$$

که در این رابطه، SL قدرت هدف تعریف می‌شود؛ I_r شدت امواج آکوستیکی بازتاب‌شده از سطح هدف در فاصله یک‌متری از آن و I_i شدت امواج آکوستیکی تابیده‌شده به هدف است.

۳-۵. محاسبه قدرت هدف (TS)

برای کره‌ای به شعاع a در فرکانس f ، قدرت هدف به‌گونه زیر قابل محاسبه است [۴]:

$$ka = \frac{2a\pi}{c} a \quad (3)$$

$$TS = 10 \log \frac{a^2}{4}$$

۴-۵. نویز محیطی

منابع گوناگون نویز در دریا وجود دارد که از آن جمله می‌توان به باد عبور و مرور شناورها اشاره کرد. یکی از پارامترهای هواشناسی که باعث ایجاد نویز محیطی می‌شود باد منطقه است که می‌توان با استفاده از منحنی ونز، با داشتن سرعت باد منطقه، نویز حاصل از باد را پیش‌بینی کرد (شکل ۱).

از آنجا که نویز حرارتی در فرکانس‌های بالاتر از ۵۰ kHz اهمیت دارد، در بازه فرکانسی مورد نظر ما، در مقایسه با انواع دیگر نویز، قابل صرف‌نظر کردن است [۱۲، ۱۳].

در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی کانال مخابراتی، مدل نویز ترکیبی از نویز رفت‌وآمد کشتی، حرارتی، تلاطم و وضعیت دریا در نظر گرفته شده است. نویز حاصل از ترافیک کشتیرانی (۱۰-۳۰۰ Hz) به‌صورت:

$$NL_{traffic} = 10 \cdot \log \left(\frac{3 \cdot 10^8}{(1 + 10^4 \cdot f)} \right) \text{ dB re } 1\mu \quad (4)$$

و مدل سازی با استخراج داده ها در این ایستگاه انجام خواهد شد. با توجه به مطالب ارائه شده، با استفاده از تئوری پرتو و کد بلهپاد در حالت سه بعدی، چندین سناریو را برای انتشار فراصوت مدل سازی کرده ایم [۲۵-۲۷].

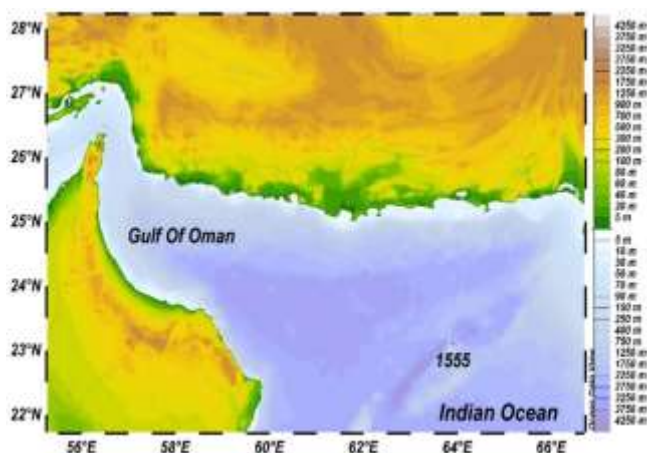
برای بررسی نحوه انتشار فراصوت در این ایستگاه، مراحل ذیل اجرا شد:

۱. محاسبه سرعت صوت در ایستگاه ۱۵۵۵: با توجه به فرمول سرعت صوت محاسبه شد و خروجی آن در فایل جداگانه ذخیره و به مثابه ورودی گام بعدی استفاده شد (شکل ۳).

۲. محاسبه شدت فشار آکوستیکی: برای محاسبه فشار آکوستیکی، با توجه به انتخاب فرکانس (فرکانس بالا) از مدل های حل موج آکوستیکی، روش پرتو انتخاب شد. نتایج این بخش در فایلی به فرمت باینری ذخیره شد تا در مرحله بعدی از این خروجی ها برای محاسبات فرمول سونار فعال استفاده شود.

۳. محاسبه تلفات انتقال: با توجه به اینکه هدف بررسی انتشار فراصوت است، سیگنال ارسالی در دو مسیر دچار تلفات انتقال خواهد شد. با استفاده از خروجی گام دوم، با توجه به فرمول، تلفات انتقال محاسبه و عدد محاسبه شده در ۲ ضرب شد [۲۰].

این داده ها در مدت یک سال در سال ۲۰۲۱ توسط Hycom و توپوگرافی آن توسط Gebco اندازه گیری و استخراج شده اند. در تحقیق حاضر، ابتدا نحوه پخش پارامترهای هیدروفیزیکی با استفاده از این داده ها بررسی می شود و، در ادامه، با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری در محیط متلب، نحوه انتشار صوت و تغییرات سیگنال های آکوستیکی با استفاده از چشمه های آکوستیکی بررسی می شود [۲۱-۲۴].



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه شمال اقیانوس هند (ایستگاه ۱۵۵۵ در سال ۲۰۲۱)

قیانوس هند از جمله دریاهای طوفانی و متلاطم است و امواج بزرگ، هم در قسمت شمالی و هم در قسمت های جنوبی آن، بسیار درخور توجه هستند [۱۴]. با استفاده از منحنی وزن (۱)، می توان فرض کرد که فرکانس منبع ۸ کیلوهرتز است و نیز بیشتر امواج دارای متوسطی در حدود ۲ متر هستند. در این شبیه سازی، با توجه به اینکه فقط سرعت باد مؤثرتر و در دسترس بود، نویز محیطی نویز ناشی از باد و برابر ۴۲ دسی بل لحاظ می شود [۱۵].

۶. محاسبه سرعت صوت، با استفاده از دما و شوری

پروفایل سرعت صوت در اقیانوس هند با استفاده از مدل سازی پارامترهای فیزیکی بررسی می شود. برای مدل سازی پارامترهای فیزیکی آب دریا، نیاز به شناسایی مدل های اقیانوسی و بررسی آنهاست. لذا، در این پژوهش، می بایست ابتدا مدل های عددی اقیانوسی بررسی شوند و از بین آنها مدلی مناسب منطقه اقیانوس هند برای پارامترهای فیزیکی انتخاب شود و، پس از بومی سازی شدن، با استفاده از آن پروفایل سرعت صوت مدل شود. در صورتی که مدل های موجود اهداف ما را در منطقه برآورده ن سازند، با استفاده از معادلات حاکم و شرایط مرزی موجود در منطقه، مدلی مناسب با خلیج فارس طراحی خواهد شد. عبارتی ساده و تجربی برای سرعت صوت (m/s) برگرفته از مطالعه Mackenzie به صورت زیر ارائه شده است [۱۶]:

(۹)

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

که c سرعت صوت بر حسب m/s ، D عمق بر حسب متر، S شوری بر حسب واحد در هزار (PPT) در محدوده $30 \leq S \leq 40$ و T دما بر حسب درجه سلسیوس $0 \leq T \leq 30$ است. بررسی ای معمولی نشان می دهد که سرعت صوت حدود $4/6 m/s$ به ازای یک درجه تغییر دما، $1/6 m/s$ به ازای افزایش صد متر عمق و $1/3 m/s$ برای افزایش ۱ PPT افزایش می یابد [۱۷].

نتایج و بحث

برای بررسی انتشار پرتوهای فراصوت یک ایستگاه را در نظر می گیریم (شکل ۲). ایستگاه ۱۵۵۵ به طول جغرافیایی $63,94$ درجه شرقی و عرض جغرافیایی $23,04$ درجه شمالی اقیانوس هند است

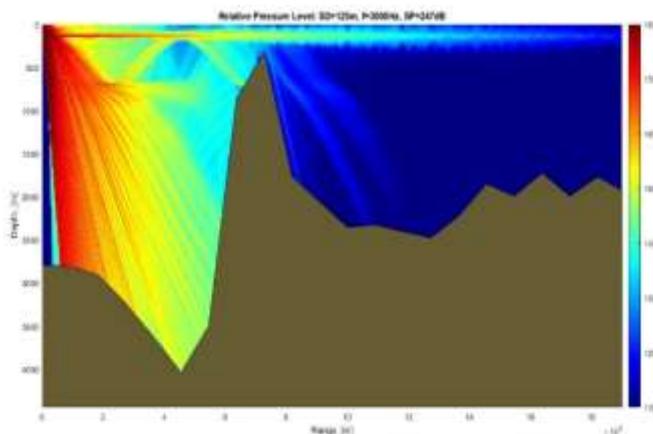
جدید نیز سروکار داریم: ۱. عمق هدف (یا جسم منعکس‌کننده)، ۲. فاصله هدف از پروژکتور صوتی، ۳. میزان ضریب انعکاس صدا از هدف (یا قدرت نسبی سیگنال برگشتی از هدف برحسب دسی‌بل) [۳۰].

در این بخش، سناریوی شبیه‌سازی انتشار آکوستیکی در ایستگاه با حضور جریان نفوذی در حالت وابسته به برد، با استفاده از روش تئوری، بررسی می‌شود.

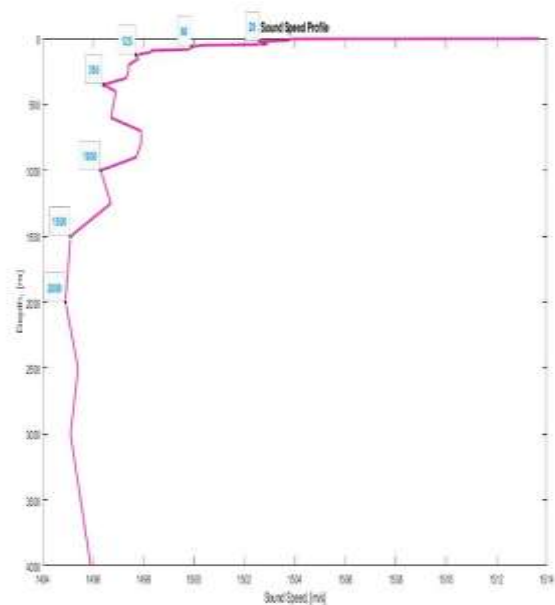
۴. مقایسه انتشار شدت فشار آکوستیکی در ایستگاه ۱۵۵۵

داده‌های ورودی در سناریوی شبیه‌سازی مقایسه انتشار شدت فشار آکوستیکی عبارت‌اند از:

۱. فرکانس فرستنده: ۳ KHz
۲. اعماق نصب چشمه آکوستیکی: در این سناری، چشمه‌های آکوستیکی در اعماق ۱۲۵ و ۳۵۰ و ۱۰۰۰ متری نصب شده‌اند.
۳. نوع چشمه آکوستیکی: نقطه‌ای
۴. زاویه ارسالی پرتو از چشمه آکوستیکی: ۲۵ تا -۲۵ درجه انتخاب شده است.
۵. سطح دریا: خلا
۶. حداکثر عمق: ۴۰۰۰ متر
۷. برد انتشار: ۱۹۰ کیلومتر
۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ dB
۹. سطح نویز محیطی: ۴۲ dB
- ۱۰.



شکل ۴. روند تغییرات طولی پروفایل‌های هیدروفیزیکی در عمق ۱۲۵ متری



شکل ۳. پروفایل سرعت صوت نسبت به عمق در ایستگاه ۱۵۵۵

۲. مشاهده سطح فشار صوتی در تمام نقاط دریا

بعد از اجرای مدل‌سازی انتشار موج، می‌توان میزان توان سیگنال صوتی منتشرشده از منبع صوتی را در تمام محیط مورد بررسی به صورت تصویر رنگی مشاهده کرد. مقدار شدت انرژی در هر نقطه از دریا با شدت رنگ نشان داده شده است. میله رنگی سمت راست شکل‌ها معرف میزان شدت توان متناظر به هر رنگ است. شدت توان صوتی بیشتر با رنگ‌های سرخ‌تر و گرم نشان داده شده است. به تدریج که اثر تلفات انتشار و جذب از شدت انرژی کاسته می‌شود، از رنگ‌های سرد و متمایل به آبی استفاده شده است [۲۸].

۲. مشاهده تلفات انتقال برحسب فاصله (در عمق معین)

با اجرای این سناریو، می‌توان اتلاف عبوری حاصل از انتشار امواج آکوستیکی را در یک عمق مشخص به صورت تابعی از برد مشاهده کرد. منحنی رسم‌شده منحنی‌ای دوبعدی است [۲۹].

۳. مشاهده سیگنال انعکاسی از هدف (سونار فعال)

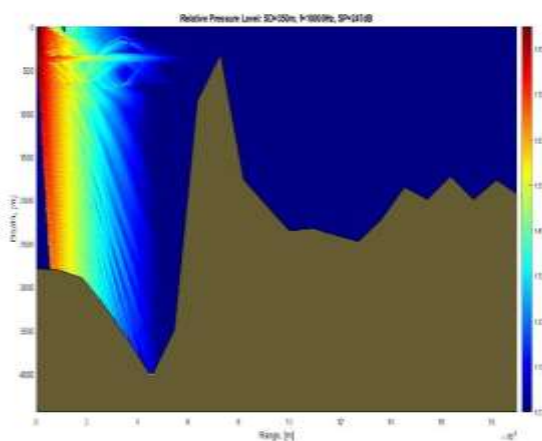
توجه کنید که قبلاً بایستی مدل‌سازی انتشار موج در مسیر رفت (از منبع مولد صوت یا پروژکتور به سمت هدف) و سپس مدل‌سازی انتشار در مسیر برگشت (مدل‌سازی صدای انعکاسی از هدف) انجام شده باشد. با اجرای این سناریو، می‌توان نتایج مدل‌سازی انتشار را در حالت سونار فعال مشاهده کرد. تفاوت کار با حالت سونار غیرفعال این است که در اینجا با سه پارامتر

همان طور که در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می کنید، هنگامی که منبع در عمق ۱۲۵ و ۳۵۰ متری نصب شود، کانال صوتی سطحی در این عمق ایجاد می شود. برخی از پرتوها به سمت بالا و برخی به سمت پایین خم می شوند. وقتی منبع در عمق ۱۰۰۰ متری است (شکل ۶) شدت فشار آکوستیکی کمتر است. در ضمن، همان طور که در سطوح بالای عمق نقاط کور مشاهده می شوند، به دلیل وجود کوه زیر آب، هیچ پرتو صوتی به این مناطق نفوذ نکرده است.

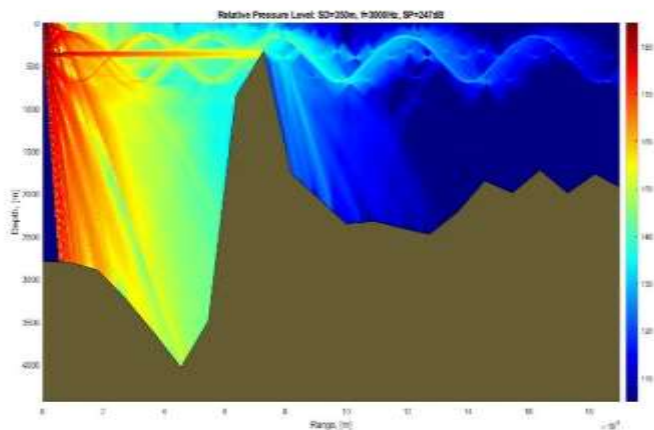
۵. تأثیر فرکانس بر انتقال صوت در کانال صوتی در ایستگاه ۱۵۵۵

در این بخش، هدف تأثیر فرکانس بر فشار آکوستیکی در عمق ثابت است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می کنید، در اقیانوس هند، در عمق ۳۵۰ متر، یک کانال صوتی مشاهده می شود. اکنون، با تغییر فرکانس، به بررسی انتقال صوت در این کانال صوتی می پردازیم. مشخصات شبیه سازی انتشار صوت در ایستگاه اشاره شده به صورت زیر است:

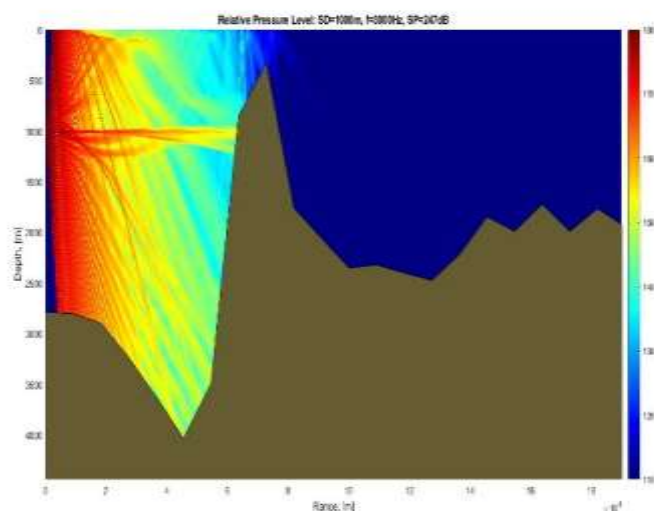
۱. فرکانس های فرستنده: ۵ KHz و ۱۰ و ۱۵
۲. عمق نصب چشمه آکوستیکی: در این سناریو، چشمه آکوستیکی در عمق ۳۵۰ متری نصب شده است.
۳. نوع چشمه آکوستیکی: نقطه ای
۴. زاویه ارسالی پرتو از چشمه آکوستیکی: ۲۵ تا -۲۵ درجه انتخاب شده است.
۵. سطح دریا: خلا
۶. حداکثر عمق: ۴۰۰۰ متر
۷. برد انتشار: ۱۹۰ کیلومتر
۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ dB
۹. سطح نویز محیطی: ۴۲ dB



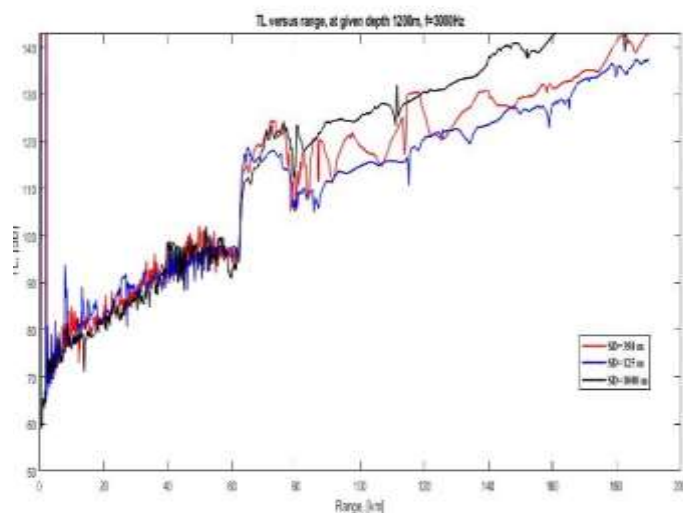
شکل ۸ تغییرات فشار آکوستیک در کانال صوتی با فرکانس ۵ KHz (منبع در عمق ۳۵۰ متری).



شکل ۵. روند تغییرات طولی پروفایل های هیدروفیزیکی در عمق ۳۵۰ متری



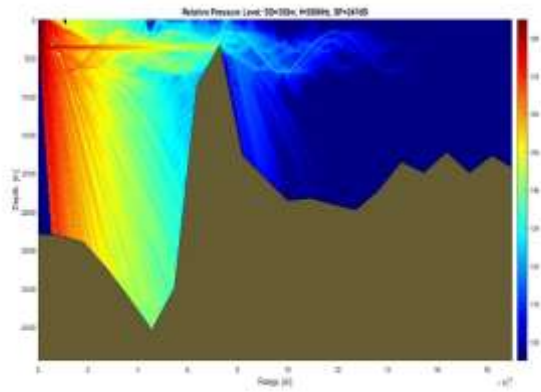
شکل ۶. روند تغییرات طولی پروفایل های هیدروفیزیکی در عمق ۱۰۰۰ متری



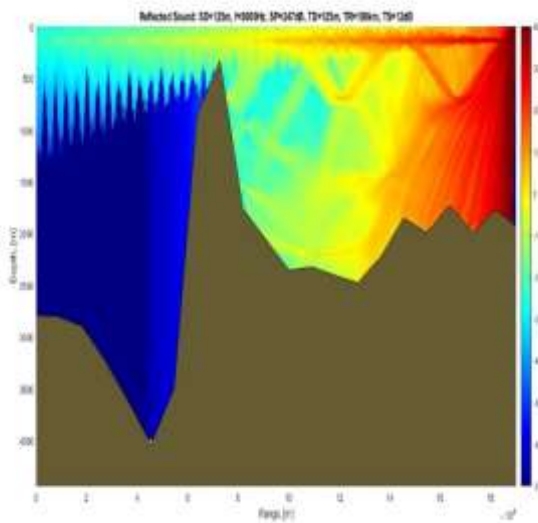
شکل ۷. میزان تلفات انتقال بر حسب فاصله در عمق ۱۲۰۰ متر در ایستگاه

۱۵۵۵

۳. عمق هدف: ۱۲۵ و ۳۵۰ و ۱۰۰۰ متر
۴. نوع چشمه آکوستیکی: نقطه‌ای
۵. زاویه ارسالی پرتو از چشمه آکوستیکی: ۲۵ تا -۲۵ درجه انتخاب شده است.
۶. تداد پرتو: ۶۰۰
۷. سطح دریا: خلا
۸. حداکثر عمق: ۴۰۰۰ متر
۹. برد انتشار: ۱۹۰ کیلومتر
۱۰. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ dB
۱۱. قدرت هدف: ۱۲ dB
۱۲. سطح نویز محیطی: ۴۲ dB

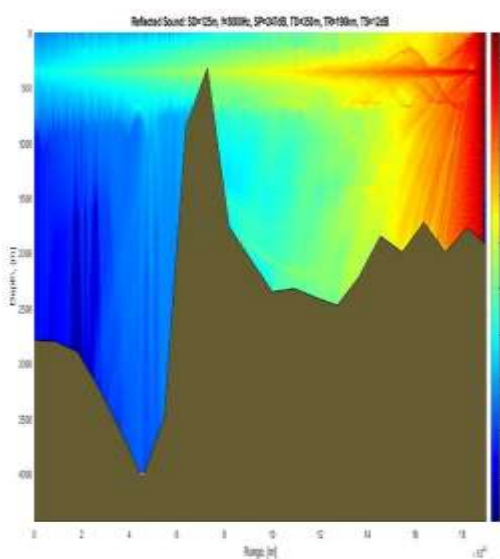


شکل ۹ تغییرات فشار آکوستیک در کانال صوتی با فرکانس ۱۰ KHz (منبع در عمق ۳۵۰ متری).



شکل ۱۰ تغییرات فشار آکوستیک در کانال صوتی با فرکانس ۱۵ KHz (منبع در عمق ۳۵۰ متری).

شکل ۱۱ سیگنال برگشتی از هدف در عمق ۱۲۵، منبع در عمق ۱۲۵ متر.



شکل ۱۲ سیگنال برگشتی از هدف در عمق ۳۵۰، منبع در عمق ۱۲۵ متر.

همان طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌کنید، هنگامی که منبع در عمق ۳۵۰ متری نصب شود، کانال صوتی سطحی در این عمق ایجاد می‌شود. برخی از پرتوها به سمت بالا و برخی به سمت پایین خم می‌شوند. وقتی که فرکانس را افزایش می‌دهیم، شدت فشار آکوستیکی کمتر می‌شود. در ضمن، همان‌طور که در سطوح بالای عمق نقاط کور مشاهده می‌شود، هرچه فرکانس افزایش یابد این نقاط بیشتر خواهند شد.

۶. محاسبه فشار آکوستیکی برگشتی از هدف فرضی در ایستگاه ۱۵۵۵

در این بخش، با نصب گره‌ای فرضی به قطر ۰٫۷ متر در عمق، به بررسی شدت فشار آکوستیکی از هدف می‌پردازیم. مشخصات شبیه سازی انتشار صوت در ایستگاه اشاره شده به صورت زیر است:

۱. فرکانس فرستنده: ۳ KHz
۲. عمق نصب چشمه آکوستیکی: در این سناریو، چشمه آکوستیکی در عمق ۱۲۵ متری نصب شده است.

نتایج شبیه‌سازی سیگنال برگشتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. هنگامی که هدف در عمق ۱۲۵ متری باشد و توان ارسالی ۲۴۷dB، میزان سیگنال برگشتی به سمت گیرنده در عمق ۱۲۵ متری حدود ۷۰dB- است. در حالی که هدف در شکل ۱۲ در عمق ۳۵۰ متری باشد، باز هم تقریباً ۷۰dB- است. در هر دو حوزه، شدت فشار صوتی دریافتی بالا می‌رود ولی، زمانی که هدف در شکل ۱۳ در عمق ۱۰۰۰ متری باشد، صوت پس از برخورد به هدف فشار صوتی کاهش پیدا می‌کند [۳۲، ۳۰].

۱. پروفایل سرعت صوت نشان داد که در زمان‌های متفاوت روند تغییرات سرعت صوت از دما تبعیت می‌کند و، در نتیجه، می‌توان به کمک تغییرات دما نحوه تغییرات پرتوهای آکوستیکی را پیش‌بینی کرد.

۲. در ایستگاه ۱۵۵۵، ترموکلاین فصلی دارای ضخامت بیشتری است و باعث ایجاد کانالی صوتی در عمق حدود ۱۲۵ و ۳۵۰ متر می‌شود که این کانال صوتی، به خاطر نازک‌تر بودن لایه ترموکلاین آن، در اقیانوس هند تشکیل نمی‌شود.

۳. نتایج مدل‌سازی فشار آکوستیکی، هنگامی که منبع در اعماق متفاوت نصب شده باشد، نشان داد که هنگامی که منبع زیر لایه ترموکلاین نصب شده باشد پرتوها آکوستیکی به سمت پایین خمیده می‌شوند.

۴. با افزایش فرکانس تلفات انتقال افزایش و شدت فشار آکوستیکی کاهش می‌یابد زیرا مقدار جذب امواج صوتی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

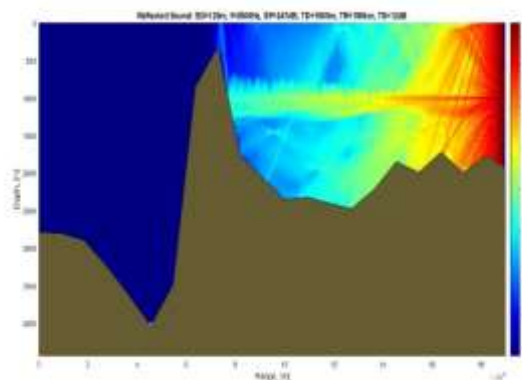
۵. به دلیل نبودن سیگنال برگشتی، نقاط کور بسیاری مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳) که این به دلیل وجود کوه زیر آب در ایستگاه مورد نظر است و این نقاط کور می‌تواند جایی برای استتار زیر دریایی یا هدف‌های دیگر باشد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش مقاله حاضر، نویسندگان سهمی یکسان داشتند.

تعارض منافع

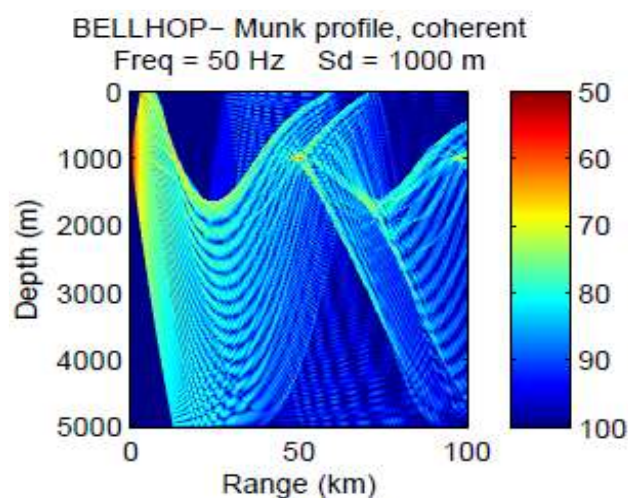
«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»



شکل ۱۳ سیگنال برگشتی از هدف در عمق ۱۰۰۰، منبع در عمق ۱۲۵ متر.

۷. اعتبارسنجی

این تحقیق را می‌توان با مرجع عالی که دکتر پورتر در دانشگاه کالیفرنیا آمریکا تهیه کرده است مقایسه کرد. طبق داده‌های ورودی در شکل ۲، مشاهده می‌شود که در کد انتشاری صوت (بله‌پ) در منطقه مورد مطالعه این تحقیق و نمونه مدل‌سازی شده پروفسور پورتر بسیار با هم مطابقت دارند [۱۸].



شکل ۲ تغییرات فشار آکوستیکی در کانال صوتی با فرکانس ۵۰ هرتز (منبع در عمق ۱۰۰۰ متری) [۱۸].

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، از اندازه‌گیری‌های پارامترهای هیدروفیزیکی در اقیانوس هند استفاده شد که Ocean و AcTUP، Gebco و Hycom، در سال ۲۰۲۱ میلادی، با استفاده از روش پرتو، میزان فشار آکوستیکی را در اقیانوس هند شمالی شبیه‌سازی کردند. سپس، با استفاده از معادلات سونار فعال و نصب یک سیگنال برگشتی بررسی و تحلیل شد [۳۳، ۳۴]. خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- [9] P Alamdarloo, MR Khalilabadi,(2020) "Modeling marine currents in the gulf of Oman using the Mike3D model," (JESS)5(1):2404-2412(8 pages)
<https://civilica.com/doc/811416>
- [10] M. Khalilabadi,(2015). "Internal wave generation in the gulf of Oman (Outflow of Persian Gulf)," NISCAIR-CSIR,India,
https://www.researchgate.net/publication/303306620_Internal_Wave_Generation_in_the_Gulf_of_Oman_Outflow_of_Persian_Gulf
- [11] Hatami Bavarsad, N., Mansouri, V., Khalilabadi, M. R. (2016) monitoring atmospheric low pressures and their effect on the water level of the Caspian Sea, Hydro physics Journal, Volume 3, Number 1, 51-65.
https://www.hydrophysics.ir/article_31961.html
- [12] Serebryany, A.N., Furduev, A.V., Aredov, A.A. et I. (2022). Generation of Underwater Noise by the Rip Zone of a Large-Amplitude Internal Wave in the Ocean. Acoust. Phys. 68,272281(9pages).
<https://doi.org/10.1134/S1063771022030125>
- [13] Khalilabadi, M. R., Shojaezadeh, S. A., & Deghani Ashkzari, G. (2020). Estimation of Flow Velocity Using Entropy Theory and Verification by Experimental Flume and Natural Rivers Data. Hydrophysics, 6(1), 21-34.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.24767131.1399.6.1.3.7>
- [14] Khalilabadi, M. R., & Mansouri, D. (2013). Effect of super cyclone "GONU" on sea level variation along Iranian coastlines.
<https://nopr.nisepn.res.in/bitstream/123456789/20906/1/IJMS%2042%284%29%20470-475.pdf>
- [15] akbarinasab M, Shafiee Sarvestani R; arimi L. (2022). Acoustic propagation analysis in the front of saline water mass in the Gulf of Aden. joc; 13 (50) :45-58(13pages)
<http://joc.inio.ac.ir/article-1-1615-en.html>
- [16] Kenneth V.Mackenzie,(1981). Nine-term equation for sound speed in the oceans The Journal of the Acoustical Society of America 70,807-812(5 pages)
<https://doi.org/10.1121/1.386920>
- [17] Ghorbani, A., & Khalilabadi, M. R. (2020). Positioning using classification and regression: case study
- [1] R. Jvidan,(2007) Principles of designing sonar systems and their application, Malek Ashtar University of Technology, (648 pages)
- [2] Hatami Bavarsad, N., Mansoury, D., Khalilabadi, M.R., Malekilonbar, M. (2021) The impact of the inlet cyclones to the Caspian Sea on the sea level fluctuations, IJCOE, 5(1), 15-28. <https://civilica.com/doc/1172300/>
- [3] Paul C. Etter,(2003). Underwater Acoustic Modeling 3th,(384pages)
https://books.google.com/books?id=3g544anfztoC&pg=PA8&dq=Underwater+Acoustic+Modeling+3+th&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjzmOGQorr7AhVDh_0HHYuMCbcQ6AF6BAgJEAI#v=onepage&q&f=false
- [4] L. E. Kinsler,(2000). Fundamentals of Acoustics 4th ed, Wiley,(560 pages)
https://books.google.com/books?id=FecSEAAAQBAJ&dq=Fundamentals+of+Acoustics&source=gb_snavlinks_suhi
- [5] M. Jabarzadeh and F. BakhtiariNejad,(1386). "Method Ray Tracing for propagating acoustic waves with different sound speed profilesin the sea," in The 9th Nour Marine Industry Conference, Nour, (15 pages)
<https://civilica.com/doc/30997/>
- [6] R. Urick,(1983). Principles of underwater sound 3rd ., McGrawHill,(423 pages)
https://books.google.com/books/about/Principles_of_Underwater_Sound.html?id=hfxQAAAAMAAJ
- [7] A. Nohdani, S. Kavandi, A. Katb (2009). Geopolitics of the Indian Ocean and the Cooperation Organization of its Border Countries with an emphasis on the role of the Persian Gulf. In the publication: "Political-Economic Information":136-147(12 pages)
<http://noo.rs/pLe9r>
- [8] MR Khalilabadi, SH Hosseini, M Akbarinasab,(2018). "Numerical simulation of the effect internal tide on the propagation sound in the Oman Sea," Journal of the Earth and Space Physics,44(1):215-225(10 pages)
<https://www.sid.ir/paper/80597/en>

- [26] M. R. Khalilabadi,(2022)."Underwater Terrain and Gravity aided inertial navigation based on Kalman filter," International Journal of Coastal and Offshore Engineering,5(3):15-21(7pages)
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.25382667.2020.5.3.2.1>
- [27] Mansoury, D. (2018) An investigation of sediments grain size in the coastal area of Nour: Research in Marine Sciences,3(1):259-268.
- [28] M. R. Khalilabadi,(2022)."2D Modeling of Wave Propagation in Shallow Water by the Method of Characteristics," Archives of Acoustics,47(3):407–412(5pages) <http://dx.doi.org/10.24425%2Faoa.2022.14204>
- [29] MR Khalilabadi, M Peimani, N Kharestani,(2022) "Simulation of the effect of the holey-sock drogue on the drifter performance," Journal of Oceanography,13(50):107-116(9pages) <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1668-en.html>
- [30] Zereshkian, S., Mansoury, D. (2021) A study on the feasibility of using solar radiation energy and ocean thermal energy conversion to supply electricity for offshore oil and gas fields in the Caspian Sea, Renewable Energy,163,66-77.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.111>
- [31] Fallah, F., Mansoury, D. (2022) Coastal upwelling by wind-driven forcing in the Caspian Sea: A numerical analysis, Oceanology,64(2),363-375,
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.003>
- [32] Zarashkian, Sajjad, & Mansouri, Dariush. (2017). Evaluation of offshore wind energy to supply electrical energy to offshore oil and gas platforms in the Caspian Sea. Hydro physics, 4(1), 57-68
https://www.hydrophysics.ir/article_35059.html
- [33] Vahedi, A.A., Mansouri, D. (1401) The vertical structure and double diffusion convection of the water column of the sea coast of Mazandaran, Oceanography, Volume 13, Number 49, 15-27. <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1645-fa.html>
- [34] Khalilabadi, M. R. (2016). Tide–surge interaction in the Persian Gulf, Strait of Hormuz and the Gulf of Oman. Weather, 71(10), 256-261.
<https://doi.org/10.1002/wea.2773>
- of Oman Sea. International Journal of Coastal and Offshore Engineering, 5(3), 35-41.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.25382667.2020.5.3.4.3>
- [18] M.B Porter,(2011) "The Bellhop manual and user's guide Preliminary Draft: Heat, Light, and Sound Research, Inc. La Jolla, CA, USA, Available:
<http://oalib.hlsresearch.com/Rays/HLS-2010-1.pdf>
- [19] MR Khalilabadi,O Mahpeykar,(2021)."Numerical modelling the effect of wind on Water Level and Evaporation Rate in the Persian Gulf," International Journal of coastal and offshore engineering,5(1):47-53(6pages)
https://www.ijcoe.org/article_149358.html
- [20] Mollaesmaeilpour, S., Mohammad Mahdizadeh, M., Hasanzade, E., & Khalilabadi, M. R. (2019). The study of hydrophysical properties of the northern Arabian Sea during monsoon: A numerical study. Hydrophysics, 5(1), 47-59.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.24767131.1398.5.1.5.2>
- [21] Khalilabadi, M. R. (2016). The effect of meteorological events on sea surface height variations along the northwestern Persian Gulf. Current Science (00113891), 110(11).
- [22] Hassanzadeh, Afshin and AkbariNasab, Mohammad, (2016), Modeling the performance of acoustic equipment in the Caspian Sea in spring.
<https://civilica.com/doc/886918>
- [23] M Heidari, MR Khalilabadi, A Bidokhti,(2012)."Monthly sea level variations in the northern part of Persian Gulf," Journal of Aquatic Ecology,1(3):10-20(10pages)
<https://www.sid.ir/paper/242890/en>
- [24] Amos L Maggi & Alec J Duncan,(2005) Centre for Marine Science,Curtin University
<https://www.acoustics.asn.au/journal/Vol41No1.pdf>
- [25] M.R. Khalilabadi,(2014)."Study of static stability and double diffusion in the Oman Sea," Iranian Journal of Marine Science and Technology, 18(71):11-19(8 pages)
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.17355346.1393.18.71.2.3>

Khalilabadi, M.R., Assistant Professor, Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran

✉ halilabadi@mut.ac.ir

 0000-0002-7000-1848

Shahmirzaee, H., Associate Professor, Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran

✉ hshahmirzaee@mut.ac.ir



Daneshmehr, S., M.Sc., Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

✉ daneshmehr@mut.ac.ir



این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:



HOW TO CITE THIS ARTICLE

 [http://doi.org/ 10.52547/joc.14.54.7](http://doi.org/10.52547/joc.14.54.7)

 [http://joc.inio.ac.ir/ article-1-1745-fa.html](http://joc.inio.ac.ir/article-1-1745-fa.html)

 <https://orcid.org/0000-0002-7000-1848>

COPYRIGHTS



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

