Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 10, No. 2, 2023

(Research Article)
Underwater acoustic modeling in the Gulf of Oman

M. Khalilabadi, H. Shahmirzaei, S. DaneshMehr*

Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology

Received: 2022/11/08, Accepted: 2023/01/21

Abstract

Technologies related to underwater acoustics are used for underwater communication, determining the location and discovering unknown targets under the sea, depth finding, seabed mapping, shipping, navigation, etc. Estimating the effectiveness and efficiency of underwater acoustic equipment requires underwater acoustic modeling. In this research, in order to implement different scenarios of acoustic wave propagation modeling in the waters of the Gulf of Oman, different methods of solving acoustic equations and, accordingly, several acoustic models have been used. In the following, the results of these scenarios are examined and compared. The results show that the acoustic pressure obtained from the acoustic models are related to water depth, independent issues with frequency (low and high) and dependent on range (short or long).

Keywords: Gulf of Oman, Underwater acoustic, Sound propagation, Acoustic pressure.

pp. 21-34 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: daneshmehr@mut.ac.ir

مقاله پژوهشی

مجله انجمن مهندسی صوتیّات ایران
سال ۱۴۰۱، دوره: ۱۰، شماره: ۲، صفحات: ۲۱-۳۴

الگوسازی امواج صوتی زیرآب در خلیج عمان

محمدرضا خلیل‌آبادی، حسین شاه‌میرزایی، سعید دانش‌مهر*
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوا دریا
دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

چکیده

فن‌اوری‌های مرتبط با صوتیات زیرآب، به منظور ارتباطات زیرآب، تعیین موقعیت و کشف هدف‌های ناشناخته زیر دریا، عمق‌یابی، نقشه‌برداری بستر دریا، کشتیرانی، ناوبری و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. برآورد کارایی و بازده تجهیزات امواج صوتی زیرآب مستلزم الگوسازی امواج صوتی زیرآب است. در این پژوهش، به منظور اجرای سناریوهای مختلف الگوسازی انتشار امواج صوتی در آب‌های خلیج عمان، از روش‌های مختلف حل معادلات امواج صوتی و به تبع آن از الگوهای صوتی متعدد استفاده شده است. در ادامه نتایج این سناریوها بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که الگوسازی فشار امواج صوتی و تلفات انتقال حاصل‌شده از الگوهای امواج صوتی به عمق آب، مسائل مستقل با بسامد (پایین و بالا) و وابسته به برد (کوتاه یا بلند) مرتبط هستند.

کلیدواژه‌ها: خلیج عمان، امواج صوتی زیرآب، انتشار امواج صوتی، فشار صوتی.

۱. مقدمه

الگوسازی نحوه انتشار امواج صوتی در محیط زیر دریا، از مباحث بسیار مهم و پایه‌ای در مبحث امواج صوتی زیرآب می‌باشد. شبیه‌سازی محیط دریا و نحوه انتشار موج، امروزه در سونارهای هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد تا کیفیت کارکرد سونار را در شرایط آزمایشگاهی، الگوسازی کنند. الگوسازی اجازه می‌دهد که به‌صورت شبه‌سنجه‌ای، کیفیت طراحی نظری سونارهای هوشمند، با شرایط مختلف محیطی بررسی شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای الگوسازی آوصوتیات، این است که امکان پیش‌بینی نحوه عملکرد سونارها را در مناطق، زمان‌ها و شرایط دریایی متفاوت پیش‌یابی می‌کند [۱].

الگوهای صوتی معرفی‌شده در این پژوهش، هرکدام دارای مشخصات خاص و دامنه کاربرد تعریف‌شده هستند. قطعا هر الگو برای همه مناطق و برای همه اهداف شبیه‌سازی قابل استفاده نخواهد بود. روش الگوسازی و انتخاب نوع الگوی آوصوتی با توجه به خصوصیات هیدروفیزیکی منطقه مورد مطالعه و اهداف پژوهش باید انتخاب شود [۲]. بنابراین قبل از انجام الگوسازی باید نسبت به انتخاب بهترین الگو اقدام کرد و این کار با شناخت و اطلاعات کافی از محیط دریا و منطقه مورد نظر امکان‌پذیر است. بدیهی است که تمامی الگوهای در دسترس نمی‌توانند نتایج قابل‌قبول و معتبری را به‌دست آورند. اکتاپ (رابط کاربری جعبه ابزار صوتی و پردازنده (اِی‌سی‌تی‌یوپی))[1]، یک منبع عالی است که پیشینه نظری همه کدهای انتشار مورد استفاده را پوشش می‌دهد [۳].

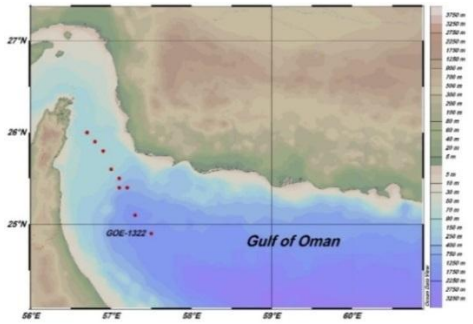
انتشار امواج صوتی در اقیانوس و دریاها به‌صورت ریاضی با معادله موج بیان می‌شود. شبه‌سنجه‌ها و شرایط مرزی باید مطابق با مشخصات محیطی منطقه آبی مورد مطالعه انتخاب شوند [۴-۵]. الگوسازی انتشار امواج صوتی زیرآب، به دو روش کلی انجام می‌گیرد. روش اول، نظریه موج نام دارد که در آن، حل معادله موج به شکل کامل انجام می‌شود، و روش دیگر، نظریه پرتو نام دارد که در آن، حل معادله موج با تقریب بسامدهای بالا انجام می‌شود [۶-۷].

* نویسنده پاسخگو: daneshmehr@mut.ac.ir

[1] AcTUP; Acoustic Toolbox User interface and Processor

۲. مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش خلیج عمان می‌باشد. خلیج عمان یا دریای مکران، یک پهنه آبی است که از غرب به خلیج فارس، از شمال به ایران، از شرق به اقیانوس هند و از جنوب به کشور عمان محدود شده است. این خلیج، ۵۴۵ کیلومتر طول و ۱۸۱ هزار کیلومترمربع وسعت دارد. خلیج عمان در ارتباط مستقیم و گسترده با دریای عرب و اقیانوس هند است و جزء دریاهای عمیق محسوب می‌شود. میانگین شوری این دریا ۳۷ پی‌اِس‌یو و بیشینه دمای سطح آب این حوضه آبی در مردادماه به ۳۶ و کمینه دمای سطح آب در دی‌ماه به حدود ۱۹ درجه سلسیوس می‌رسد [۸]. این پژوهش در محدوده طول جغرافیایی ۵۷/۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۴/۹ درجه شمالی خلیج عمان انجام شده است. داده‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از پایگاه نمودار کلی گرماسنجی اقیانوس‌ها[1] استخراج شده‌اند. برای محاسبه نیم‌رخ سرعت امواج صوتی و اعمال آن به الگو، داده‌های دما و شوری لایه‌های مختلف لازم است. این داده‌ها برای سال ۲۰۲۱ از پایگاه داده‌های هیدروفیزیکی الگوی هیبریدی مختصات اقیانوسی[2] استخراج شده‌اند. در این پژوهش، با طراحی و اجرای سناریوهای مختلف، نحوهٔ انتشار امواج صوتی و تغییرات علامت‌های صوتی با استفاده از چشمه‌های صوتی مختلف بررسی شده است [۹]. روش انتخاب‌شده برای الگوسازی صوتی، برای هر سناریو با توجه به شرایط سناریو متفاوت است. در ابتدا باید به شناسایی و بیان کامل مسئله توجه نمود. اطلاعات شبه‌سنج‌های هیدروفیزیکی آب دریا یکی از مهم‌ترین مسائل برای محقق‌شدن شبیه‌سازی مورد نظر این پژوهش می‌باشند. از جمله این شبه‌سنج‌ها می‌توان به دما و شوری و چگالی و سرعت امواج صوتی اشاره کرد [۱۰]. این اطلاعات توسط ایستگاه‌های مستقر در دریا اندازه‌گیری‌شده و با دسترسی به این اطلاعات و تهیه عملکرد و دستورات لازم در کدهای موردنظر می‌توان شبیه‌سازی روش مذکور را در محیط برنامه‌نویسی متلب انجام داد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از اندازه‌گیری‌های دما و شوری در دریای عمان و به کمک نرم‌افزار متلب و نمای داده‌های اقیانوس[3] تغییرات شبه‌سنج‌های هیدروفیزیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۱]. سپس با استفاده از فرمول مکنزی سرعت امواج صوتی در این مقاطع محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به کمک الگوهای موجود ابتدا تغییرات فشار بررسی شده و سپس از این خروجی برای محاسبه میزان علامت برگشتی از یک هدف فرضی زیرآبی استفاده خواهد شد [۱۲-۱۳].



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه دریای عمان ایستگاه جی‌اُایی*- ۱۳۲۲ در سال ۲۰۲۱).

*GOE

بررسی نیم‌رخ (پروفیل) سرعت امواج صوتی در دریای عمان با استفاده از الگوسازی شبه‌سنج‌های فیزیکی انجام می‌گیرد. برای الگوسازی شبه‌سنج‌های فیزیکی آب دریا نیاز به شناسایی الگوهای اقیانوسی و بررسی آن‌ها می‌باشد. لذا در این پروژه نیاز است که ابتدا الگوهای عددی اقیانوسی مورد بررسی قرار گیرند و از بین آن‌ها الگوی مناسب منطقه دریای عمان برای شبه‌سنج‌های فیزیکی انتخاب شده و پس از بومی‌سازی شدن با استفاده از آن نیم‌رخ سرعت امواج صوتی الگو شود و در صورتی‌که الگوهای موجود اهداف مطالعه حاضر را در منطقه برآورده نسازد با استفاده از معادلات حاکم و شرایط مرزی موجود در منطقه الگوی مناسب با خلیج فارس طراحی خواهد شد. عبارتی ساده و تجربی برای امواج صوتی (متر بر ثانیه) برگرفته از مطالعه مکنزی به‌صورت زیر ارائه شده است [۶]:

[1] GeBCO; General Bathymetric Chart of the Oceans
[2] HYCO; Hybrid Coordinate Ocean Model
[3] ODV; Ocean Data View

$$C = ۱۴۴۸٫۹۶ + ۴٫۵۹۱T - ۵٫۳۰۴\times۱۰^{-۲}T^{۲} + ۲٫۳۷۴\times۱۰^{-۴}T^{-۳} + ۱٫۳۴۰(S-۳۵) + ۱٫۶۳\times۱۰^{-۲}D + ۱٫۶۷۵\times۱۰^{-۷}D^{۲} - ۱٫۰۲۵\times۱۰^{-۲}T(S-۳۵) - ۷٫۱۳۹\times۱۰^{-۱۳}D^{۳} \quad (۱)$$

C سرعت امواج صوتی برحسب متر بر ثانیه، D عمق برحسب متر، S شوری بر حسب واحد در هزار (پی‌پی‌تی)[1] در محدوده $۴۰\geq S\geq۳۰$ و T دما برحسب درجه سلسیوس $۳۰\geq T\geq۰$ می‌باشند. یک بررسی معمولی، نشان می‌دهد که سرعت امواج صوتی حدود ۴٫۶ متر بر ثانیه به ازای ۱ درجه سلسیوس تغییر دما، ۱٫۶ متر بر ثانیه به ازای افزایش صد متر عمق و ۱٫۳ متر بر ثانیه برای افزایش ۱ پی‌پی‌تی افزایش می‌یابد [۱، ۶].

تاکنون روش‌های متعددی برای حل معادله موج ارائه شده است. شاخص‌ترین روش‌های حل معادله موج عبارتند از:

۱. روش نظریه پرتو[2]

۲. روش مُد بهنجارشده[3]

۳. روش بسط چندمسیره[4]

۴. روش میدان سریع (انتگرال عدد موج)[5]

۵. روش معادله سهموی[6].

روش‌های دیگری نیز براساس مشخصات محیطی بیان شده‌اند که الگوها را به دو دسته تقسیم می‌کنند [۴]:

۱. روش مستقل از بُرد: الگوی یک- بعدی یا فقط وابسته به عمق.

۲. روش وابسته به بُرد: دو- بعدی (عمق و بُرد) و یا سه بعدی (عمق، برد و زاویه).

در این پژوهش، با بررسی پیشینه الگوسازی امواج صوتی زیرآب، معتبرترین و پرکاربردترین الگوهای آوصوتیات استخراج شده و برای هر یک سناریوهای الگوسازی تعریف و اجرا شده است. این الگوها در حقیقت، ابزار صوتی پشتیبانی شده‌ای هستند که برای الگوسازی انتشار امواج صوتی استفاده می‌شوند. در ادامه، مشخصات هر الگو ارائه می‌شود [۳، ۱۴].

نظریه پرتو دارای کاستی‌های شناخته شده‌ای است که ناشی از تقریب بسامد بالا می‌باشد. این کاستی‌ها ذاتی است و به دلیل نوع تقریب‌هایی می‌باشد که در استخراج مبانی نظریه پرتو درنظر گرفته شده است. اساساً، نظریه پرتو، هر جا که یک انتقال در میدان وجود داشته باشد، به‌طور ناگهانی در نتیجه پرتو رخ می‌دهد در حالی‌که یک راه‌حل کامل موج صحیح تغییر تدریجی را در مقیاس طول موج نشان می‌دهد [۱۵].

الگوی بونس[7] ضرایب بازتاب را در آب‌های کم‌عمق محاسبه می‌کند. این ضرایب برای الگوکردن مسیر پرتوهای صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اکتاپ می‌توان الگوی بونس را به‌صورت مستقل یا پشت سر هم با بلهوپ[8] اجرا کرد که از خروجی ضریب بازتاب برای الگو کردن مسیرهای پرتو/اشعه تابشی[9]، دامنه و تأخیر ورود به نقاط میدان مشخص‌شده یا از دست دادن انتقال منسجم، نیمه‌منسجم یا نامنسجم استفاده نمود. الگوی بلهوپ یک برنامه ردیابی پرتو است که می‌تواند شامل عمق‌سنجی وابسته به برد باشد. در این روش، مسیر پرتوهای با عرض محدود را به جای پرتوهای با عرض بینهایت کوچک ردیابی می‌کنند. این امر مشکلات ناشی از مصنوعات نظریه‌ی پرتو مانند مناطق سایه را کاهش می‌دهد [۱۶]. الگوی بلهوپ می‌تواند از پرتوهایی با نیم‌رخ گاوسی یا پرتوهای هندسی استفاده کند که نتیجه‌ای مشابه یک ردیابی پرتو استاندارد ایجاد می‌کنند. بلهوپ ذاتاً یک کد با محدوده کاربرد بسامد بالا است. اگر چه محدوده بسامدی مفید این الگو، کم‌تر از برنامه‌های ردیابی پرتو استاندارد است، در مواقعی که عمق آب یا اندازه هر ویژگی قابل‌توجهی در مشخصات سرعت صوتی، کم‌تر از ۲۰ طول موج است، باید با احتیاط شدید استفاده شود [۱۷-۱۸].

برای حل امواج صوتی به روش مد بهنجارشده، الگوی کراکن[10] پیشنهاد شده است. این الگو در آب‌های کم‌عمق و بسامدهای پایین قابل اجرا می‌باشد. الگوی کراکن به‌طور

[1] PPT
[2] Ray theory
[3] Normal mode
[4] Multipath expansion
[5] Fast field
[6] Parabolic equation

[7] Bounce
[8] Bellhop
[9] Ray
[10] Kraken

مشترک توسط مرکز سامانه‌های اقیانوس[1] و آزمایشگاه تحقیقات دریایی[2] ایالات متحده که هر دو متعلق به ایالات متحده آمریکا هستند طراحی و تدوین شده است. این الگو با استفاده از روش تفاضل محدود برای حل معادله موج بهنجارشده توسعه داده شده است. این الگو برای الگوسازی آوصوتی آب‌های کم‌عمق و بسامد پایین (کم‌تر از ۵۰۰ هرتز) و هم‌چنین محاسبه میدان دور تحت شرایط محیط دریایی یکنواخت افقی (مستقل از فاصله) مناسب است و ساختار بستر دریا باید در محاسبه اعمال گردد [۱۹].

الگوی کراکن مدهای بهنجارشده محیط انتشار الگو را با استفاده از محاسبات واقعی پیدا می‌کند و تضعیف را با فنّ تلاطمی تخمین می‌زند. این روش برای بسترهای سیال لایه‌ای به خوبی کار می‌کند و می‌تواند یک نیمه‌فضای پایین کشسان (یعنی نیمه‌فضا با سرعت برشی قابل‌توجه) را مدیریت کند. نمی‌تواند با لایه‌های میانی کشسان مقابله کند. مدهای بهنجارشده، تنها انرژی محبوس‌شده در موج‌بر را در نظر می‌گیرند، بنابراین این روش در محدوده کوتاهی که اثر انرژی محبوس‌نشده قابل توجه است، دقیق نمی‌باشد [۲۰].

الگوی کراکن‌سی[3] مدهای بهنجارشده را در صفحه عدد موج پیچیده پیدا می‌کند که به آن اجازه می‌دهد با لایه‌های کشسان بستر دریا مواجه شود و اثرات حالت‌های نشتی را نیز شامل شود. حالت‌های نشتی، بخشی از انرژی به دام نیافتاده را تشکیل می‌دهند. این قابلیت در الگوی کراکن‌سی باعث می‌شود که دقت آن در فاصله کوتاه بیش‌تر از کراکن باشد. با این حال، یافتن حالت‌ها در صفحه پیچیده بسیار دشوارتر از یافتن آن‌ها در محور واقعی است که باعث می‌شود کراکن مستعد از دست دادن برخی از حالت‌ها باشد که منجر به نتایج نادرست می‌شود. لذا سفارش شده است در استفاده از این الگو دقت شود.

الگوی فیلد[4] از مدهای بهنجارشده محاسبه‌شده توسط هر یک از این برنامه‌ها برای تعیین افت تراگسیل در نقاط میدان مشخص شده استفاده می‌کند. در معادله موج صوتی، عدد موج با معادله زیر تعریف شود:

$$K(r) = \frac{\omega}{C(r)} \qquad (۲)$$

در این رابطه، $K(r)$ عدد موج، ω بسامد زاویه ای و C سرعت صوتی است. الگوی کراکن‌سی مدهای بهنجارشده و توابع حالت را با جستجوی مقادیر واقعی K_r پیدا می‌کند، در حالی‌که کراکن مقادیر مورد نیاز K_r را در صفحه مختلط جستجو می‌کند.

در روش حل صوتی میدان سریع، ابتدا تابع گرین وابسته به عمق برای محیط الگو محاسبه می‌شود، سپس نتایج تابع گرین حاصل، ادغام می‌شود. در این روش، تلفات انتقال با استفاده از تبدیل فوریه محاسبه می‌شود. این روش محاسبه افت تراگسیل تمام انرژی امواج صوتی را، خواه به دام افتاده یا نه، محاسبه می‌کند و به فرآیند کم‌تر از ۱۰۰ درصد قابل‌اعتماد برای یافتن مدهای بهنجارشده متکی نیست. هم‌چنین می‌تواند به خوبی با بسترهای کشسان لایه‌بندی‌شده کنار بیاید و حتی امواج مرزی را الگوسازی کند. بنابراین هم دقیق‌تر و هم قابل اعتمادتر از روش مد بهنجارشده است و در میدان دور و نزدیک، روش برتر برای مسائل مستقل با بسامد پایین و برد کوتاه است. با این‌حال، از نظر محاسباتی بسیار فشرده‌تر از مدهای بهنجارشده برای مشکلات دوربرد است و بار محاسباتی با افزایش بسامد به سرعت افزایش می‌یابد [۲۱].

اسکوتر تابع گرین وابسته به عمق را برای محیط الگو محاسبه می‌کند. میدان‌ها (میدان‌های صوتی وابسته به عمق) نتایج تابع گرین حاصل را (در فایل‌های .جی‌آرِن[5]) ادغام می‌کنند تا با استفاده از اِف‌اِف‌تی افت تراگسیل را تعیین کنند. این فنّ میدان سریع است [۲۲].

همان‌طور که گفته شد، الگوی اسکوتر از فنّ‌آوری تبدیل سریع فوریه (اِف‌اِف‌تی)[6] برای حل معادله موج استفاده می‌کند. این الگو، محدود به شرایط یک محیط همگن لایه افقی است. این الگو برای محاسبات در محدوده بسامد پایین (زیر ۵۰۰ هرتز) مناسب است. روش‌های تابع گرین تلاش می‌کنند تا خطاهای میدان نزدیک ناشی از

[1] NOSC; Naval Ocean Systems Center
[2] NRL; Naval Research Laboratory
[3] Kraken
[4] Field
[5] .grn
[6] FFT

محاسبات مد بهنجارشده را با محاسبه مستقیم انتگرال در معادله ریاضی که انتشار امواج صوتی را تعریف می‌کند، حل کنند.

الگوی صوتی وابسته به برد (آرای‌ام)[1] یک کد معادله سهموی (پی‌ایی)[2] است که از الگوریتم پاد اِسلیت-اِستِپ[3] برای دستیابی به راندمان بالا و توانایی الگوسازی انتشار در زوایای بزرگ از افقی (محدودیت معمول کدهای پی‌ایی) استفاده می‌کند. بین محدوده زاویه‌ای و سرعت محاسبات یک مبادله وجود دارد که توسط تعداد عبارت‌هایی که کاربر برای تقریب پاد مشخص می‌کند کنترل می‌شود، هر چه عبارت بیش‌تر باشد، زاویه بازتر است، اما کد کندتر اجرا می‌شود.

الگوی آرای‌ام قادر به الگوسازی انتشار بسامد پایین در محیط‌های کاملاً وابسته به برد (یعنی عمق‌سنجی و سرعت صدای وابسته به برد) است و این قابلیت کاملاً توسط اکتاپ پشتیبانی می‌شود و به فرآیند کم‌تر از ۱۰۰ درصد قابل‌اعتماد برای یافتن مدهای بهنجارشده متکی نیست.

در ادامه، دو نسخه اصلاح‌شده الگوی صوتی وابسته به برد (آرای‌ام) که در چارچوب اَکت‌یوآی[4] ادغام شده‌اند معرفی می‌شوند:

۲-۱. آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ (وی۱/۵سی۰۰.۰۳)[5]

الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ یک راه‌حل تقریبی از معادله موج زاویه باریک با در نظرگرفتن اثر جفت پراش صوتی و امواج بهنجارشده اعداد مختلف است. این روش برای محاسبه زوایای باریک مناسب است. سرعت محاسبه برای بسامدهای پایین (کم‌تر از ۵۰۰ هرتز) و دریای کم‌عمق بسیار سریع است. هنگامی‌که بسامد و عمق افزایش می‌یابند، زمان محاسبه به سرعت افزایش می‌یابد، بنابراین، این الگو قابل اجرا نیست [۲۳].

این یک نسخه مرکز علوم و فن‌اوری دریایی (سی‌ام‌اِس‌تی)[6] براساس نسخه آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ(۱/۵) مایک کالینز است [۲۴]. این برای خروجی داده‌های پیچیده از افت تراگسیل و هم‌چنین فایل‌های با اندازه استاندارد اصلاح شده است.

۲-۲. آرای‌ام‌اِس‌جی‌ایی‌اُ (وی۰/۵سی۰۱.۰۱.۰۱)[7]

برای الگوسازی موقعیت‌هایی که انتشار موج برشی در بستر دریا مهم است، سی‌ام‌اِس‌تی یک نسخه اصلاح‌شده از آرای‌ام را توسعه داد که از همان روش مشخص‌سازی لایه بستر دریا مانند آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ استفاده می‌کند. این به‌عنوان آرای‌ام‌اِس‌جی‌ایی‌اُ شناخته می‌شود.

الگوی آرای‌ام‌اِس‌جی‌ایی‌اُ نیاز به تغییرات قابل‌توجهی برای ایجاد کد اصلی دارد و اگرچه روی تعدادی از مسائل استاندارد با موفقیت آزمایش شده، اما باید با احتیاط خاصی استفاده شود و آن به خاطر انتشار موج برشی می‌باشد. این یک نسخه سی‌ام‌اِس‌تی براساس نسخه آرای‌ام(۰/۵) مایک کالینز و نسخه آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ است.

لایه کشسان مایک کالینز نسخه آرای‌ام به گونه‌ای اصلاح شده است که از همان الگوی مشخصات نیم‌رخ (پروفیل) زیرلایه‌ای (داده عمق‌سنجی) مانند آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ استفاده می‌کند [۲۵]. در جدول ۱ با استفاده از اکتاپ و اجرای کد انتشاری می‌توان پسوند فایل خروجی همه کدهای صوتی ذکرشده را مشاهده نمود، هم‌چنین فرمت هر کدام از کدهای انتشاری و مشخصات آن‌ها قابل مشاهده است.

۳. نتایج

نیم‌رخ (پروفیل) سرعت صوتی در مقطع مورد مطالعه در شکل ۲ رسم شده است. این نیم‌رخ به همراه توپوگرافی مقطع، به‌عنوان ورودی هر یک از الگوهای آوصوتی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه خروجی هر یک از این سناریوهای الگوسازی که با الگوهای مختلف اجرا شده، ارائه می‌شود.

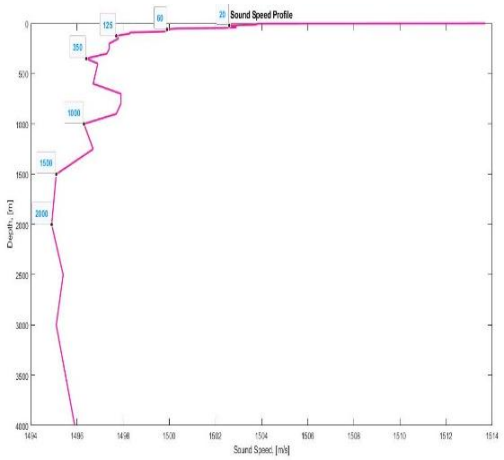
[1] RAM; Range-dependent Acoustic Model
[2] PE
[3] Padé split-step
[4] ActUI
[5] RAMSGeo (v1.5C00.03)

[6] CMST; Centre for Marine Science and Technology
[7] RAMSGeo (v0.5C01.01.01)

جدول ۱ مشخصات خروجی کدها [۲۶].

کد انتشاری	فرمت	مشخصات	پسوند فایل خروجی
بلهوپ	باینری[1]	داده‌های دامنه و زمان اجرا و هم‌چنین سایر شبه‌سنج‌های پرتو برای ورود به نقطه میدان	.اِی‌آرآر[3]
بونس	اِی‌سی	ضریب بازتاب پایین به‌عنوان تابعی از زاویه برخورد	.بی‌آرسی[4]
اِسکوتر	باینری[2]	روش تابع گرین وابسته به عمق	.جی‌آران
کراکن کراکن‌سی	باینری	روش مد بهنجارشده	.اِم‌اُدی[5]
بلهوپ		خروجی ردیابی پرتو	.آرای‌وای[6]
بلهوپ فیلد فیلدز اِی‌سی‌تی‌یوپی	باینری	از دست دادن انتقال پیچیده به‌عنوان تابعی از عمق و برد	.اِس‌اِچ‌دی[7]

[1] ascii
[2] binary
[3] .arr
[4] .brc
[5] .mod
[6] .ray
[7] .shd



شکل ۲ نیم‌رخ سرعت صوتی نسبت به عمق در ایستگاه جی‌اُیی- ۱۳۲۲.

۳-۱. خروجی الگوسازی آوصوتی با روش مد بهنجارشده

برای حل صوتی به روش مد بهنجارشده، الگوی کراکن پیشنهاد شده است. این الگو در آب‌های کم‌عمق و بسامدهای پایین قابل اجرا می‌باشد.

در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با این الگو ارائه شده است. در سناریوی شبیه‌سازی صوتی، از:

۱. بسامد کاری چشمهٔ صوتی: ۱۰ و ۱۰۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

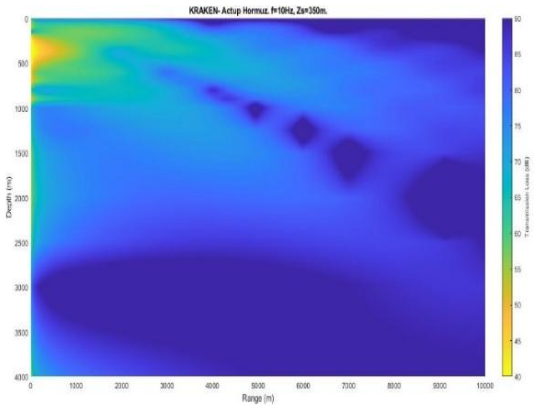
۵. سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

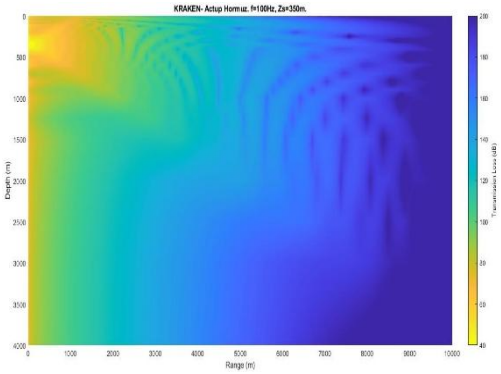
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

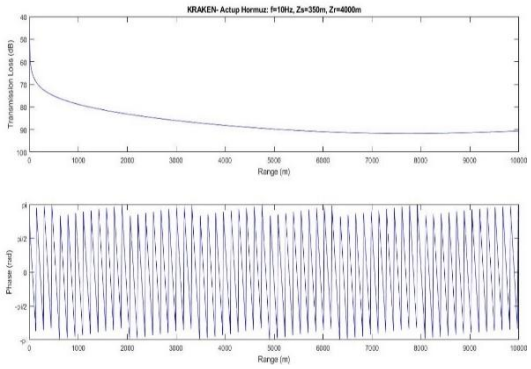
۹. سطح نوفه‌ای محیطی: ۴۲ دسی‌بل



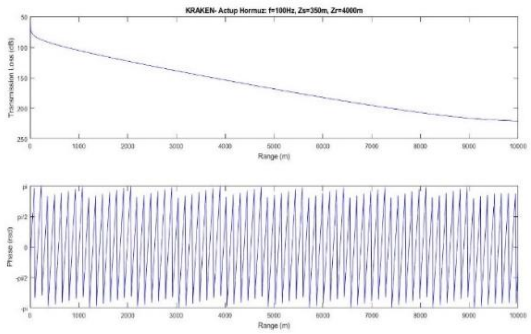
شکل ۳ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی کراکن.



شکل ۴ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی کراکن.



شکل ۵ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز- الگوی کراکن.



شکل ۶ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰۰ هرتز- الگوی کراکن.

در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با الگوی کراکن‌سی ارائه شده است. سناریوی شبیه‌سازی صوتی، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بسامد کاری چشمهٔ صوتی: ۱۰ و ۱۰۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

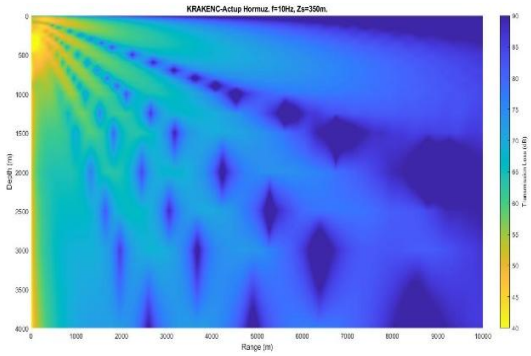
۵. سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

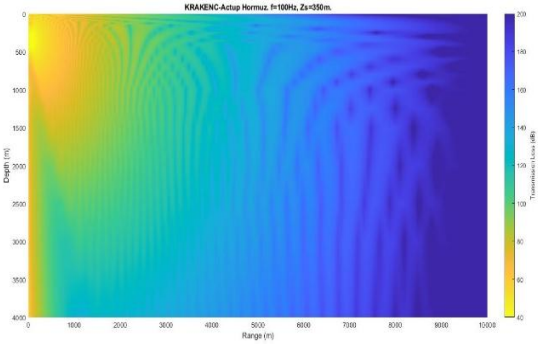
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

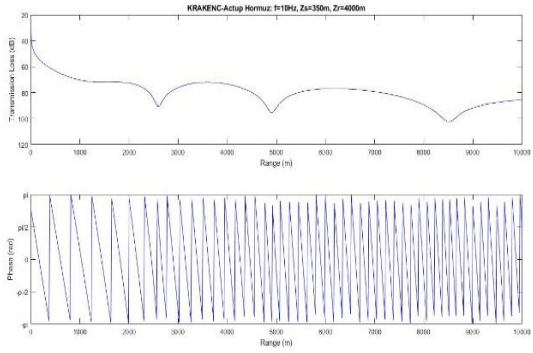
۹. سطح نوفه‌ای محیطی: ۴۲ دسی‌بل



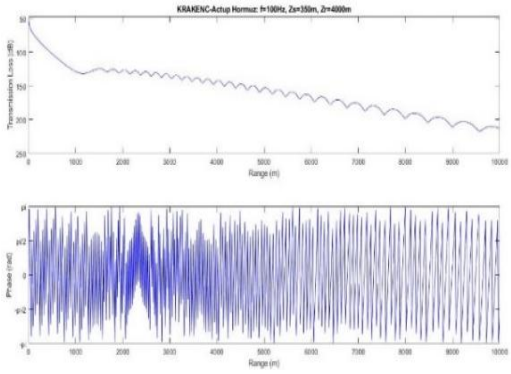
شکل ۷ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی کراکن‌سی.



شکل۸ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی کراکن‌سی.



شکل ۹ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز- الگوی کراکن‌سی.



شکل ۱۰ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰۰ هرتز- الگوی کراکن‌سی.

۳-۲. الگوسازی آوصوتی با روش الگوی معادله سهموی

برای روش حل معادله سهموی (پی‌ایی)، الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ پیشنهاد شده است.

در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با این الگو ارائه شده است. سناریوی شبیه‌سازی صوتی، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بسامد کاری چشمهٔ صوتی: ۱۰ و ۵۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

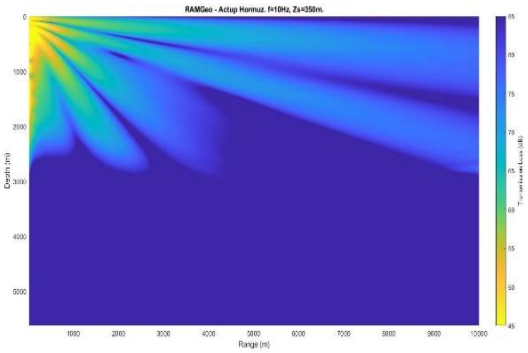
۵. سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

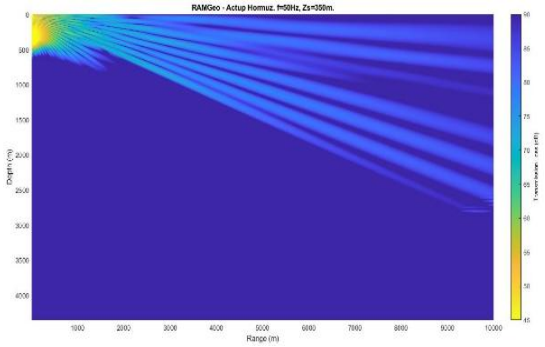
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

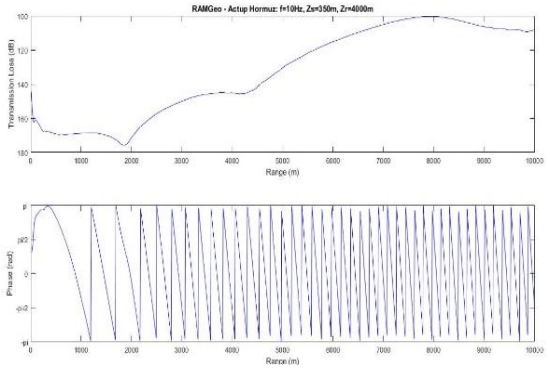
۹. سطح نوفه محیطی: ۴۲ دسی‌بل



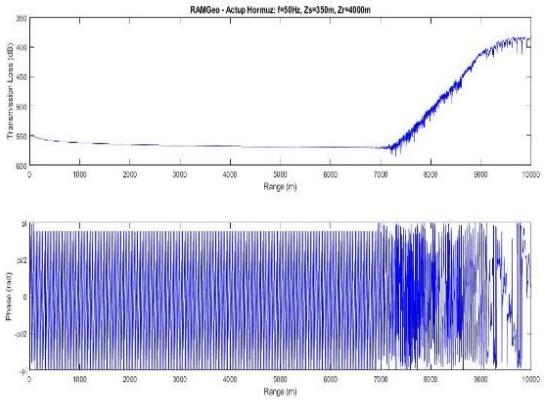
شکل ۱۱ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۲ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۵۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۳ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز- الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۴ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۵۰ هرتز- الگوی آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ.

برای الگوسازی موقعیت‌هایی که انتشار موج برشی در بستر دریا مهم است، سی‌ام‌اس‌تی یک نسخه اصلاح‌شده از آرای‌ام‌اس را توسعه داده است که از همان روش مشخص‌سازی لایه بستر دریا مانند آرای‌ام‌جی‌ایی‌اُ استفاده می‌کند. این نسخه به‌عنوان آرای‌ام‌اس‌جی‌ایی‌اُ شناخته می‌شود.

در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با این الگو ارائه شده است. سناریوی شبیه‌سازی صوتی، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بسامدکاری چشمهٔ صوتی: ۱۰ و ۵۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

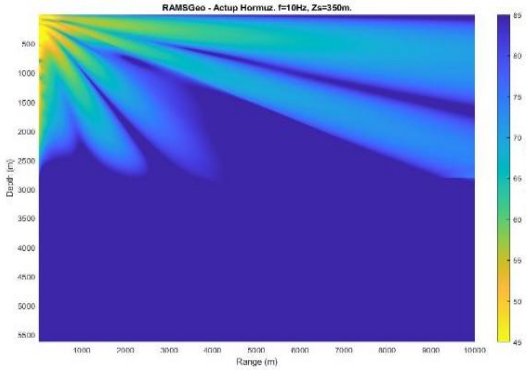
۵. سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

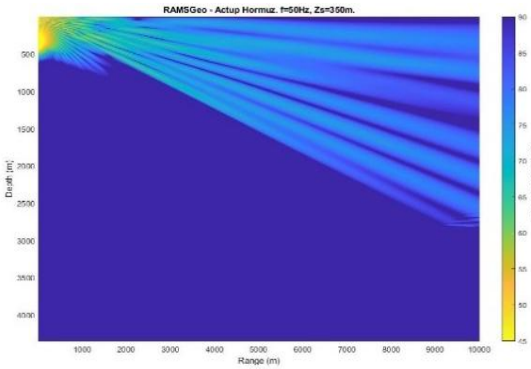
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

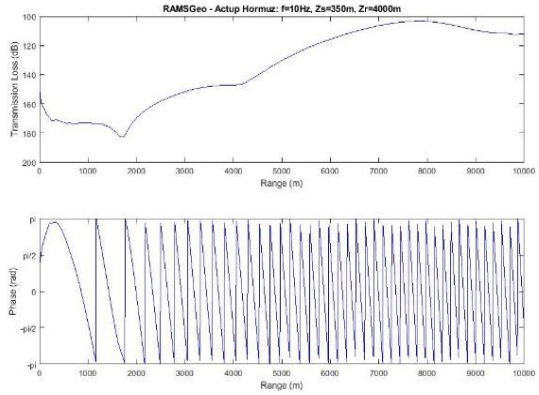
۹. سطح نوفه‌ای محیطی: ۴۲ دسی‌بل



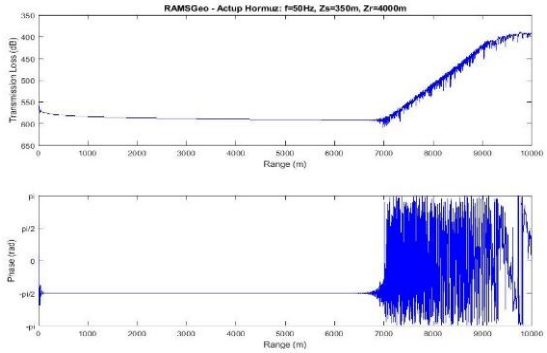
شکل ۱۵ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی آرای‌ام‌اس‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۶ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۵۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی آرای‌ام‌اس‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۷ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز- الگوی آرای‌ام‌اس‌جی‌ایی‌اُ.



شکل ۱۸ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۵۰ هرتز- الگوی آرای‌ام‌اس‌جی‌ایی‌اُ.

۳-۳. خروجی سناریوی الگوسازی صوتی با روش الگوی میدان سریع

برای الگوی میدان سریع (الگوی اِف‌اِف‌پی[1])، الگوی اِسکوتر[2] برای تحقیق انتخاب شد. در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با این الگو ارائه شده است. سناریوی شبیه‌سازی صوتی، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بسامد کاری چشمهٔ صوتی: ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

[1] FFP
[2] Scooter

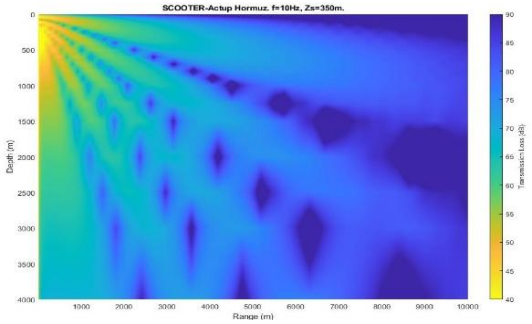
۵. سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

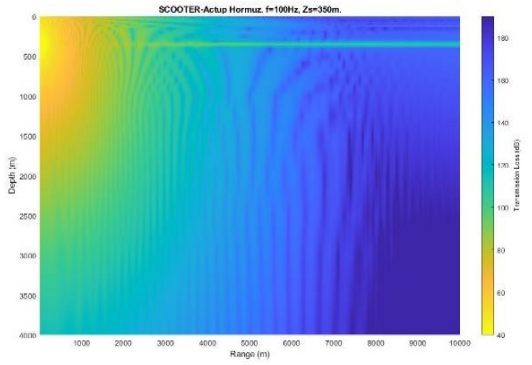
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

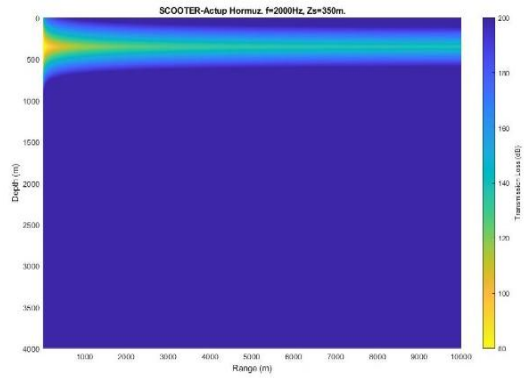
۹. سطح نوفه‌ای محیطی: ۴۲ دسی‌بل



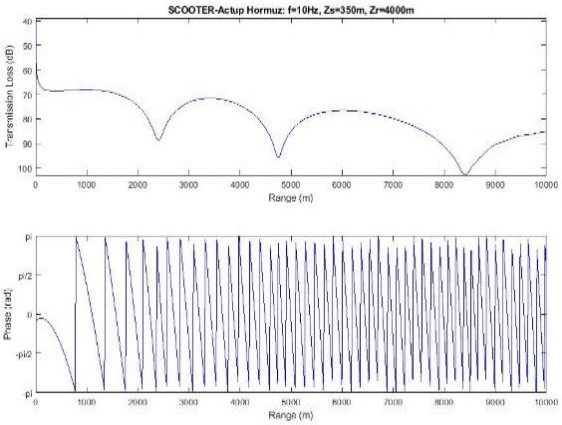
شکل ۱۹ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی اِسکوتر.



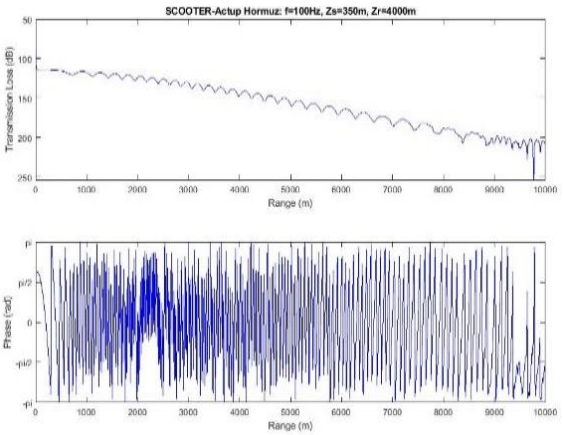
شکل ۲۰ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی اِسکوتر.



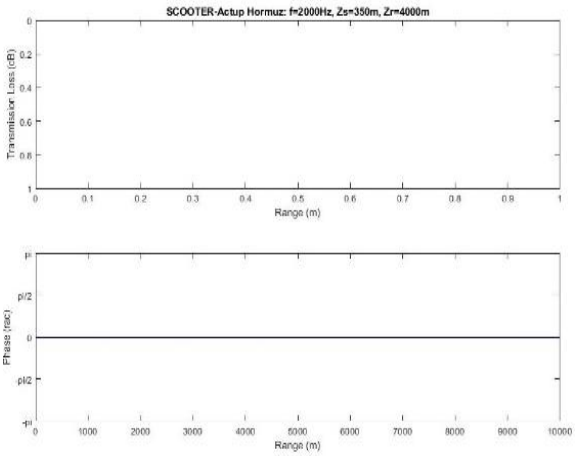
شکل ۲۱ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۲۰۰۰ هرتز و منبع در عمق ۳۵۰ متری- الگوی اِسکوتر.



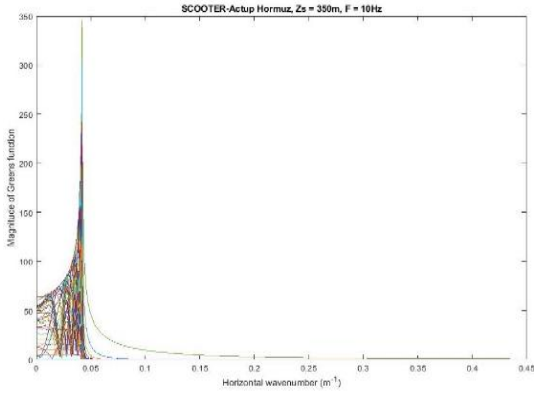
شکل ۲۲ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز- الگوی اِسکوتر.



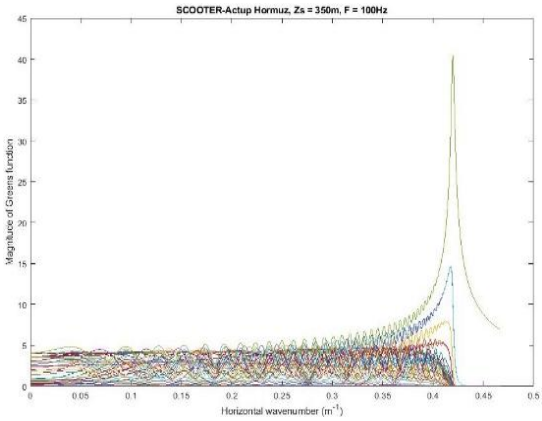
شکل ۲۳ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰۰ هرتز- الگوی اِسکوتر.



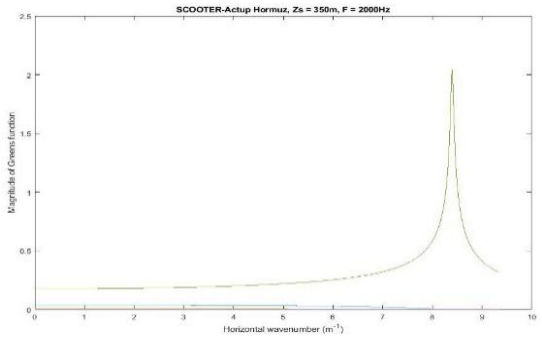
شکل ۲۴ میزان افت تراگسیل در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۲۰۰۰ هرتز- الگوی اِسکوتر.



شکل ۲۵ تابع گرین در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰ هرتز.



شکل ۲۶ تابع گرین در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۱۰۰ هرتز.



شکل ۲۷ تابع گرین در عمق ۳۵۰ متری در بسامد ۲۰۰۰ هرتز.

۳-۴. خروجی سناریوی الگوسازی صوتی با استفاده از روش اشعه تابشی

الگوهای اشعه تابشی دارای کاستی‌های شناخته شده‌ای هستند که ناشی از تقریب بسامد بالا است. این کاستی‌ها ذاتی بوده و به دلیل نوع تقریب‌هایی می‌باشد که در استخراج مبانی نظریه پرتو درنظر گرفته شده است [۲۷]. اساساً این الگو هرجا که یک انتقال در میدان وجود داشته باشد، به‌طور ناگهانی در نتیجه اشعه تابشی رخ می‌دهد، در حالی‌که یک راه‌حل کامل موج صحیح تغییر تدریجی را در مقیاس طول‌موج نشان می‌دهد [۲۸].

در ادامه، خروجی سناریوی الگوسازی با این الگو ارائه شده است. سناریوی شبیه‌سازی صوتی، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بسامد کاری چشمهٔ صوتی: ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز

۲. اعماق نصب چشمهٔ صوتی: در این سناریو چشمه‌های صوتی در اعماق ۳۵۰ متری نصب شده‌اند.

۳. نوع چشمهٔ صوتی: نقطه‌ای

۴. زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی: در تمام سناریوها زاویهٔ ارسالی پرتو از چشمهٔ صوتی ۲۵ تا ۲۵- درجه انتخاب شده است.

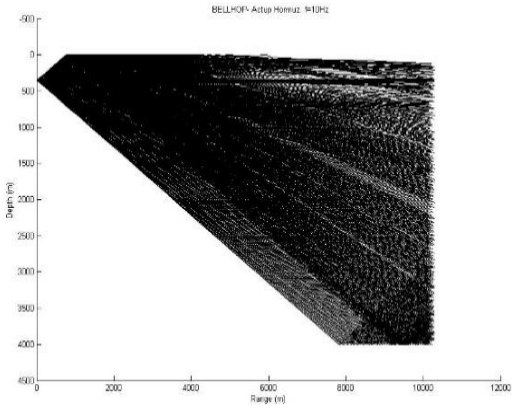
۵.سطح دریا: خلاء

۶. بیشینه عمق: ۴۰۰۰ متر

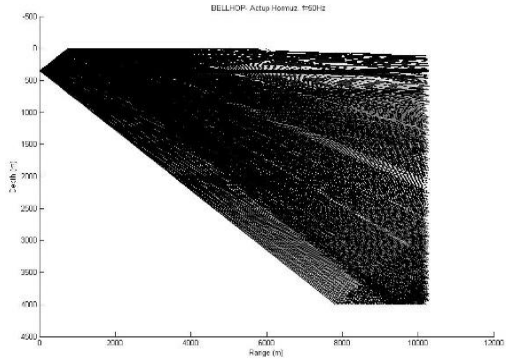
۷. برد انتشار: ۱۰ کیلومتر

۸. مقدار شدت توان صوتی منبع: ۲۴۷ دسی‌بل

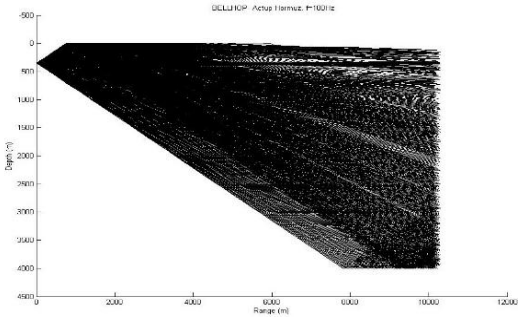
۹. سطح نوفه‌ای محیطی: ۴۲ دسی‌بل



شکل ۲۸ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰ هرتز (منبع در عمق ۳۵۰ متری).



شکل ۲۹ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۵۰ هرتز (منبع در عمق ۳۵۰ متری).



شکل ۳۰ تغییرات فشار صوتی در مجرای صوتی با بسامد ۱۰۰ هرتز (منبع در عمق ۳۵۰ متری).

۴. بحث

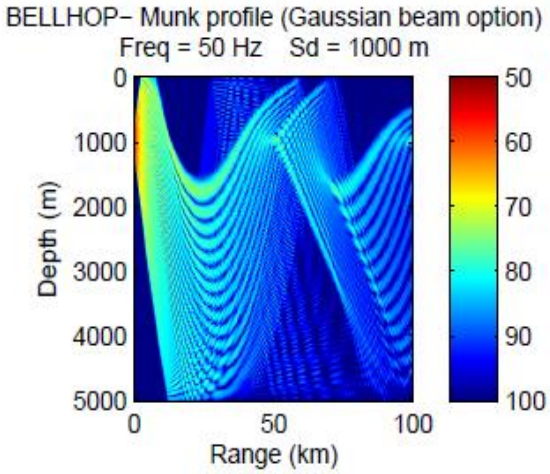
در این پژوهش تلاش شده تا تمام کدهای انتشاری موردنظر در یک منطقه عملیاتی الگوسازی و مقایسه شوند. طبق الگوسازی انجام‌شده فشار صوتی در عمق ۳۵۰ متری که در نیم‌رخ (پروفیل) سرعت صوتی (شکل ۲) نشان داده شده، یک مجرای صوتی ایجاد گردیده است، زمانی‌که منبع در عمق ۳۵۰ متری می‌باشد، نتایج تغییرات فشار صوتی نشان می‌دهد که هنگامی منبع زیر لایه ترموکلاین مستقر شده باشد، پرتوهای صوتی به سمت پایین خمیده می‌شوند.

در سناریوی الگوی کراکن مشاهده می‌شود، در بسامدهای ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به ترتیب فشار صوتی در برد ۱ و ۲ کیلومتری (شکل ۳ و ۴)، ۴۰ و ۶۰ دسی‌بل می‌باشد و میزان افت تراگسیل (شکل ۵ و ۶) ۷۰ و ۸۰ دسی‌بل در محدوده فشار صوتی است. این الگو در بسامدهای بالا و عمق زیاد قابل اجرا نمی‌باشد. در سناریو الگوی کراکن‌سی مشاهده می‌شود در بسامدهای ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به ترتیب فشار صوتی در برد ۲ و ۴ کیلومتری (شکل ۷ و ۸)، ۵۰ و ۷۰ دسی‌بل می‌باشد و میزان افت تراگسیل ۷۰ و ۱۵۰ دسی‌بل در محدوده فشار صوتی (شکل ۹ و۱۰) است. این الگو در بسامدهای بالا و عمق زیاد قابل اجرا نمی‌باشد. در سناریوی الگوی کراکن این روش در محدوده کوتاهی که اثر انرژی محبوس‌نشده قابل توجه است، دقیق نیست. این قابلیت در الگوی کراکن‌سی باعث می‌شود که دقت آن در فاصله کوتاه بیش‌تر از کراکن باشد.

در سناریو آرای‌اِم‌جی‌ایی‌اُ مشاهده می‌شود در بسامدهای ۱۰ و ۵۰ هرتز به ترتیب فشار صوتی در برد ۱۰۰۰ و ۵۰۰ متری (شکل ۱۱ و ۱۲)، ۵۰ و ۴۰ دسی‌بل می‌باشند. هم‌چنین میزان افت تراگسیل در بسامدهای ۱۰ و ۵۰ هرتز به ترتیب ۱۶۵ و ۵۵۰ دسی‌بل (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) می‌باشند که بعد از برد ۷۰۰۰ متری افت تراگسیل ۴۰۰ دسی‌بل در محدوده فشار صوتی است. این الگو در بسامدهای بالا و عمق زیاد قابل اجرا نمی‌باشد و هم‌چنین دارای نقاط بسیار کور و غیرقابل آشکارش است. در سناریوی آرای‌اِم‌اِس‌جی‌ایی‌اُ مشاهده می‌شود، در بسامدهای ۱۰ و ۵۰ هرتز به ترتیب فشار صوتی در برد ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری (شکل ۱۵ و ۱۶)، ۴۰ و ۵۰ دسی‌بل می‌باشد و میزان افت تراگسیل در بسامدهای ۱۰ و ۵۰ هرتز ۱۶۵ و ۵۵۰ دسی‌بل (شکل‌های ۱۷ و ۱۸) می‌باشند که بعد از برد ۷۰۰۰ متری افت تراگسیل ۴۰۰ دسی‌بل در محدوده فشار صوتی است. این الگو در بسامدهای بالا و عمق زیاد قابل اجرا نمی‌باشد و هم‌چنین دارای نقاط بسیار کور و غیرقابل آشکارش است. در سناریوی الگو اِسکوتر مشاهده می‌شود، در بسامدهای ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز به ترتیب فشار صوتی در برد ۱، ۲ و ۱۰ کیلومتری (شکل‌های ۱۹ الی ۲۱)، ۴۰، ۵۰ و ۸۰ دسی‌بل می‌باشند و میزان افت تراگسیل در بسامدهای ۱۰ و ۱۰۰ هرتز، ۶۰ و ۴۰۰ دسی‌بل است (شکل‌های ۲۲ و ۲۳) و در بسامد ۲۰۰۰ هرتز (شکل۲۴) افت تراگسیلی قابل مشاهده نیست. هنگامی که بسامد افزایش پیدا می‌کند، افت تراگسیل نیز افزایش یافته و از شدت فشار صوتی کاهش می‌یابد. برای اینکه مقدار جذب امواج صوتی با افزایش بسامد، افزایش می‌یابد.

زمانی‌که مقدار تابع گرین در بسامد ۱۰ هرتز، ۶۰ باشد (شکل ۲۵) عدد موج افقی ۰/۰۵ است و مقدار تابع گرین در بسامد ۱۰۰ هرتز، ۴ (شکل ۲۶) و عدد موج افقی ۰/۴ هستند، مقدار تابع گرین در بسامد ۲۰۰۰ هرتز (شکل ۲۷) عدد موج افقی قابل مشاهده نیست. این الگو در بسامدهای بالا و عمق زیاد قابل اجرا نمی‌باشد و هم‌چنین دارای نقاط بسیار کور و غیرقابل آشکارش است. در سناریوی الگوهای اشعه تابشی مشاهده می‌شود در بسامدهای ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز (شکل‌های ۲۸، ۲۹ و ۳۰) مشاهده می‌شود هر چه بسامد افزایش یابد نقاط انتشاری امواج صوتی تیره‌تر خواهند شد. در روش حل صوتی میدان سریع ابتدا تابع گرین وابسته به عمق برای محیط

الگو محاسبه شده، سپس نتایج تابع گرین حاصل، ادغام می‌شوند. در این روش افت تراگسیل با استفاده از تبدیل فوریه محاسبه می‌شود، هم‌چنین می‌تواند به خوبی با بسترهای کشسان لایه‌بندی‌شده کنار بیاید و حتی امواج مرزی را الگوسازی کند. بنابراین هم دقیق‌تر و هم قابل اعتمادتر از روش مد بهنجارشده است [۲۹]. این پژوهش را می‌توان با یک منبع عالی که توسط پروفسور پورتر در دانشگاه کالیفرنیا آمریکا تهیه شده است مقایسه نمود، طبق داده‌های ورودی (دما، عمق و شوری) مشاهده می‌شود که کدهای انتشاری صوتی در منطقه مورد مطالعه این پژوهش و نمونه الگوسازی‌شده توسط پروفسور پورتر بسیار با هم مطابقت دارند [۳۰].



شکل ۳۱ تغییرات فشار صوتی در کانال صوتی با بسامد ۵۰ هرتز (منبع در عمق ۱۰۰۰ متری) [۳۰].

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، الگوسازی آوصوتی انتشار امواج صوتی در خلیج عمان، با استفاده از داده‌های هیدروفیزیکی شوری، دما و عمق مربوط به سال ۲۰۲۱ میلادی در این منطقه انجام شده است. برای این منظور از روش‌های مختلف حل معادلات آوصوتیات و به تبع آن از الگوهای آوصوتی متعدد استفاده شده است. مهم‌ترین نتیجه به‌دست‌آمده از این پژوهش را می‌توان گفت هنگامی که بسامد و عمق افزایش می‌یابد، زمان محاسبه به سرعت افزایش می‌یابد، بنابراین، الگوهای صوتی تعریف‌شده در خلیج عمان در بسامد بالای ۱ کیلوهرتز (به جز بلهاپ) قابل اجرا نیستند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی مالک اشتر (مجتمع دانشگاهی هوا دریا) پشتیبانی گردیده شده است.

تضاد منافع

هیچ‌گونه تضاد منافعی توسط نویسندگان بیان نشده است.

فهرست منابع

[1] R. Jvidan, “Principles of Designing Sonar Systems and their Application,” Malek Ashtar University of Technology, 1386.

[2] N. Hatami Bavarsad, V. Mansouri, M.R. Khalilabadi, “Rmonitoring atmospheric low pressures and their effect on the water level of the Caspian Sea,” Hydrophysics Journal, vol. 3, pp. 51-65, 2016.

[3] A.L. Maggi, A. J Duncan, “Centre for Marine Science and Technology,” Curtin University, 2005.

[4] P.C. Etter, “Underwater Acoustic Modeling and Simulation,” CRC Press, 2003.

[5] M.R. Khalilabadi, O. Mahpeykar, “Numerical modelling the effect of wind on Water Level and Evaporation Rate in the Persian Gulf,” International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 5, no. 1, pp. 47-53, 2021.

[6] R.J. Urick, “Principles of Underwater Sound,” Mcgraw Hill, 1983.

[7] L.E. Kinsler, “Fundamentals of Acoustics,” Wiley, 2000.

[8] M.R. Khalilabadi, M. Sadrinassab, V. Chegini, M. Akbarinassab, “Internal Wave Generation in the Gulf of Oman (Outflow of Persian Gulf),” NISCAIR-CSIR, India, 2015.

[9] A. Ghorbani, M.R. Khalilabadi, “Positioning using classification and regression: Case study of Oman Sea,” International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 35-41, 2020.

[10] M.R. Khalilabadi, “2D modeling of wave propagation in shallow water by the method of characteristics,” Archives of Acoustics, vol. 47, no. 3, pp. 407-412, 2022.

[11] S. Mollaesmaeilpour, M. Mahdizadeh, E. Hasanzade, M.R. Khalilabadi, “The study of hydrophysical properties of the Northern Arabian Sea during monsoon: A numerical study,” Hydrophysics, vol. 5, no. 1, pp. 47-59, 2019.

[12] K.V. Mackenzie, “Nine-term eguation for sound speed in the ocean,” Acoustical Society of America Journal, 1981.

[13] F. Fallah, D. Mansoury, "Coastal upwelling by wind-driven forcing in the Caspian Sea: A numerical analysis," Oceanology, vol. 64, no. 2, pp. 363-375, 2022.

[14] S. Zarashkian, D. Mansouri, "Evaluation of offshore wind energy to supply electrical energy to offshore oil and gas platforms in the Caspian Sea," Hydrophysics, vol. 4, no. 1, pp. 57-68, 2017.

[15] M. Jabarzadeh, F. Bakhtiarinejad, "Method Ray Tracing for propagating acoustic waves with different sound speed profilesin the sea," in The 9th Nour Marine Industry Conference, 1386.

[16] M.R. Khalilabadi, S.H. Hosseini, M. Akbarinasab, "Numerical simulation of the effect internal tide on the propagation sound in the Oman Sea," Journal of the Earth and Space Physics, vol. 44, no. 1, pp. 215-225, 2018.

[17] M.B. Porter, "The Bellhop manual and user's guide [online]," Available: http://oalib.hlsresearch.com.

[18] M.R. Khalilabadi, P. Alamdarloo, G. Dehghani Ashkezari, "Modeling marine currents in the gulf of Oman using the Mike3D model," Journal of Environmental Science Studies, vol. 5, no. 1, pp. 2404-2412, 2020.

[19] M.B. Porter, "The Kraken Normal Mode Program," Saclant Undersea Research Center, 2001.

[20] M.R. Khalilabadi, "Underwater Terrain and Gravity aided inertial navigation based on Kalman filter," International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 15-21, 2022.

[21] S. Zereshkian , D. Mansoury, "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," RenewableEnergy, vol. 163, pp. 66-77, 2021.

[22] W.T. Thomson, "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium," Journal of Applied Physics, vol. 21, no. 2, pp. 89-93, 1950.

[23] M. Porter, L. Edward, "A numerical method for ocean-acoustic normal modes," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 76, no. 0, pp. 244-252, 1984.

[24] M.D. Collins, "A split-step Padé solution for the parabolic equation method," Journal of Acoustics Society America, vol. 93, pp. 1736-1742, 1993.

[25] A.A. Vahedi, D. Mansouri, "The vertical structure and double diffusion convection of the water column of the sea coast of Mazandaran," Oceanography, vol. 13, no. 49, pp. 15-27, 2022.

[26] "Bellhop gaussian beam code, Available in the Acoustics Toolbox."

[27] M.R. Khalilabadi, M. Akbari Nasab, "Study of static stability and double diffusion in the Oman Sea," Iranian Journal of Marine Science and Technology, vol. 18, no. 71, pp. 11-19, 2014.

[28] M. Heidari, M.R. Khalilabadi, A. Bidokhti, "Monthly sea level variations in the northern part of Persian Gulf," Journal of Aqustic Ecology, vol. 1, no. 3, pp. 10-20, 2012.

[29] M.R. Khalilabadi, "Tide–surge interaction in the Persian Gulf, Strait of Hormuz and the Gulf of Oman," Weather, vol. 71, pp. 256-261, 2016.

[30] M.B. Porter, "The BELLHOP Manual and User's Guide: Preliminary Draft," Heat, Light, and Sound Research, Inc. La Jolla, CA, USA, 2011.