ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیرآب (نظریه پرتو) در یک رودخانه با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری صوتی رودالی

مسود بحرینی مطلق*، رضا روزبهانی، مرتضی افتخاری، محمدجواد زارعیان، اشکان فرخ‌نیا

پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

چکیده

صوتیّات زیرآب در کاربردهای بسیاری از جمله اقیانوس‌شناختی، زیست‌شناختی بحری، آونگاری، ماهی‌گیری و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوهای متنوعی برای شبیه‌سازی انتشار زیرآب امواج صوتی در اقیانوس‌ها و دریاها ارائه شده‌اند. در این مطالعه، شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی در رودخانه‌ی آب‌شیرین با عمق کم‌تر از ۳ متر به اسم رودخانه گونو واقع در غرب ژاپن با استفاده از الگوی نظریه پرتو ارائه شده است. نیم‌رخ‌های عمودی سرعت صدا با استفاده از دستگاه سی‌تی‌دی در پنج نقطه اندازه‌گیری شدند و در شبیه‌سازی به‌عنوان ورودی‌های الگو به کار برده شدند. نتایج این مطالعه نشان دادند بر خلاف دریا و اقیانوس که گرادیان دما، شوری و امواج درونی عوامل اصلی انتشار امواج صوتی در چند مسیر مختلف هستند، در رودخانه‌ی مورد مطالعه که گرادیان دما و شوری وجود ندارد، جانگاری (توپوگرافی) بستر رودخانه و سرعت جریان آب عوامل اصلی انتشار دو گروه اصلی امواج صوتی در چند مسیر مختلف می‌باشند. تأخیر زمانی بین زمان ورود دو گروه ۰٫۵ میلی‌ثانیه بود. صحت‌سنجی شبیه‌سازی با استفاده از دو دستگاه تراگذار اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) که در دو طرف رودخانه به فاصله‌ی ۲۹۴٫۶۲۹ متر از یکدیگر نصب شده بودند و امواج صوتی را با بسامد مرکزی ۳۰ کیلوهرتز ارسال و دریافت می‌کردند، انجام شد. نهایتاً، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) نتایج الگو را تأیید نمودند.

کلیدواژه‌ها: انتشار زیرآب امواج صوتی، نظریه پرتو، رودخانه کم‌عمق- آب‌شیرین، اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر).

۱. مقدمه *

دانش سنجش از دور با استفاده از امواج الکترومغناطیسی، مغناطیسی، الکتریکی، نوری و صوتی نقش بسیار مهمی در شناخت و پایش عوامل محیطی دارند. اگرچه امواج ذکرشده به‌طور گسترده در محیط خارج از آب به‌کار می‌روند، اما محیط آبی برای امواجی به غیر از امواج صوتی، محیطی مات محسوب می‌شود و این نوع امواج به سرعت درون آب تضعیف می‌گردند. در حالی‌که آب محیطی شفاف برای امواج صوتی بوده و این نوع امواج قادرند هزاران کیلومتر را در آب بپیمایند. به عنوان مثال در محیط دریا، یک موج راداری ۱ گیگاهرتز در باند یواچاِف[1] و با طول‌موج ۰٫۳ متر ضریب جذبی[2] معادل ۱۴۰۰ دسی‌بل بر متر خواهد داشت، در صورتی‌که با همین طول‌موج برای یک موج صوتی ۵ کیلوهرتزی ضریب جذب کم‌تر از ۳×۱۰^{-۴} دسی‌بل بر متر می‌باشد [۱]. جذب امواج صوتی در آب دریا تابعی از شوری، دمای آب، اسیدیته، فشار (عمق) و بسامد موج صوتی است در حالی‌که جذب امواج صوتی در آب شیرین نظیر رودخانه‌ها تابعی از اتلاف انرژی صوت و بسامد موج صوتی می‌باشد [۲]. رفتار امواج صوتی در آب‌های عمیق نظیر اقیانوس‌ها، آب‌های کم‌عمق نظیر دریاها و یا رودخانه‌های آب‌شیرین متفاوت است. امروزه رفتار امواج صوتی در آب‌های کم‌عمق مورد توجه محققان قرار گرفته است. تعاریف متعددی برای امواج صوتی در آب‌های کم‌عمق وجود دارد. طبق یکی از تعاریف، صوت آب‌های کم‌عمق، صوتی است که عمق آب کم‌تر از ۱۰ برابر طول‌موج صوتی باشد ($H \leq ۱۰\lambda$) [۳]. براساس این تعریف برای امواج صوتی با بسامد ۲۵۰ هرتز، عمق آب کم‌تر از ۶۰ متر کم‌عمق محسوب می‌گردد و برای امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز، عمق آب کم‌تر از ۰٫۵ متر، کم‌عمق محسوب می‌گردد.

* نویسنده پاسخگو: m.bahreini@wri.ac.ir

[1] UHF

[2] Absorption coefficient

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]

جدول ۱ مقایسه‌ی الگوهای مختلف انتشار امواج صوتی در آب [۵].

نوع الگو	کاربرد							
	آب‌های عمیق				آب‌های کم‌عمق			
	بسامد بالا		بسامد پایین		بسامد بالا		بسامد پایین	
	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI
Ray theory	●	●	◐	◐	●	◐	◐	○
Normal mode	○	◐	◐	●	◐	●	◐	●
Multipath expansion	◐	●	◐	◐	◐	◐	○	○
Fast field	◐	◐	◐	●	◐	●	◐	●
Parabolic equation	◐	◐	●	○	○	●	◐	◐

بسامد پایین ≤ ۵۰۰ هرتز — RI: مستقل از مسافت — آب کم‌عمق ≤ ۲۰۰ متر

بسامد بالا ≥ ۵۰۰ هرتز — RD: وابسته به مسافت — آب عمیق ≥ ۲۰۰ متر

●: قابل استفاده به صورت عملی و محاسباتی.

◐: دارای محدودیت در دقت یا طولانی‌بودن محاسبات.

○: غیرقابل استفاده به‌صورت عملی و محاسباتی.

نظریه‌های گوناگونی برای الگوسازی انتشار امواج صوتی در آب ارائه شده است [۴]. بسیاری از الگوها در کتابخانه‌ی صوتیات اقیانوس[1] در وب‌سایت مربوطه[2] در دسترس محققان قرار داده شده است. جدول ۱ پنج نوع نظریه پرکاربرد انتشار امواج صوتی در آب را با یکدیگر مقایسه کرده است [۵]. در این جدول منظور از آب کم‌عمق، عمقی کم‌تر از ۲۰۰ متر است.

تکه‌نگاری یا برش‌نگاری صوتی درون آب[3] شاخه‌ای از دانش آوصوتیات است که با اندازه‌گیری زمان طی‌شده‌ی[4] امواج صوتی در آب قادر است سرعت جریان آب [۶]، دبی جریان [۷]، دمای آب [۸]، شوری [۹]، رسوبات معلق [۱۰]، جهت جریان آب [۱۱]، سرعت جزرومد [۱۲]، سرعت امواج درونی [۱۳] و جریان‌های جانبی[5] [۱۴] در لایه‌های مختلف عمق آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها را اندازه‌گیری کند. روش تکه‌نگاری صوتی درون آب در سه سطح اقیانوسی اُاِی‌تی‌اِس[6] [۱۵- ۱۶]، دریایی سی‌اِی‌تی‌اِس[7] [۱۷-۱۸] و رودخانه‌ای اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر)[8] [۱۹ -۲۰] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1] Ocean acoustics library
[2] http://oalib.hlsresearch.com
[3] Underwater acoustic tomography
[4] Travel time
[5] Residual currents
[6] OATS; Ocean Acoustic Tomography System
[7] CATS; Coastal Acoustic Tomography System
[8] FATS; Fluvial Acoustic Tomography System

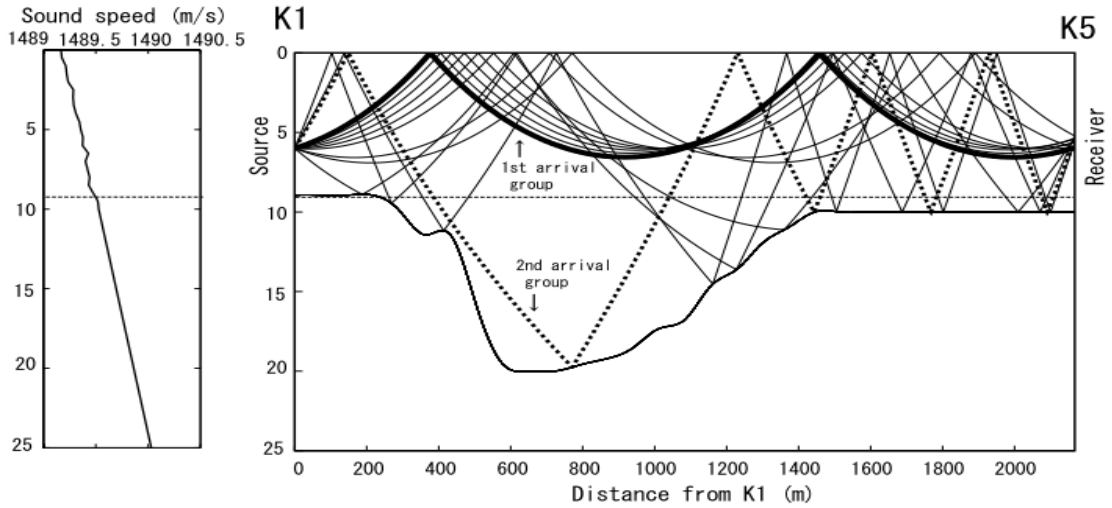
یاماگوچی و همکاران ساختار جریان‌های جزرومدی در تنگه‌ی کانمون ژاپن را با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس اندازه گرفتند. در این مطالعه، انتشار امواج صوتی با استفاده از روش رهگیری پرتو[9] صورت گرفت. نتایج نشان داد امواج صوتی به دو صورت انتشار می‌یابند. گروه اول امواج صوتی به سطح دریا برخورد کرده و بازتاب آن‌ها بدون برخورد به بستر دریا به ایستگاه مقابل می‌رسد. گروه دوم امواج صوتی با برخوردهای متعدد به سطح و بستر دریا، با اختلاف زمانی نسبت به گروه اول به ایستگاه مقابل می‌رسد (شکل ۱) [۲۱].

انگوین و همکاران با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس جزرومدهای درونی را در خلیج هیروشیما ژاپن از ۱۷ تا ۲۸ سپتامبر ۲۰۰۳ اندازه گرفتند. در تاریخ ۲۱ سپتامبر با وقوع طوفانی در اطراف خلیج هیروشیما تغییرات جریان‌های دریایی با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس به خوبی پایش گردید. انتشار امواج صوتی نیز با استفاده از روش رهگیری پرتو قبل و بعد از وقوع طوفان انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوی انتشار امواج به‌صورت الگوهای محدب به سمت بالادست است و اکثر امواج پس از برخوردهای متعدد با بستر دریا و پس از بازتاب‌های متعدد به ایستگاه مقابل می‌رسند (شکل ۲- الف).

[9] Ray Tracing

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]

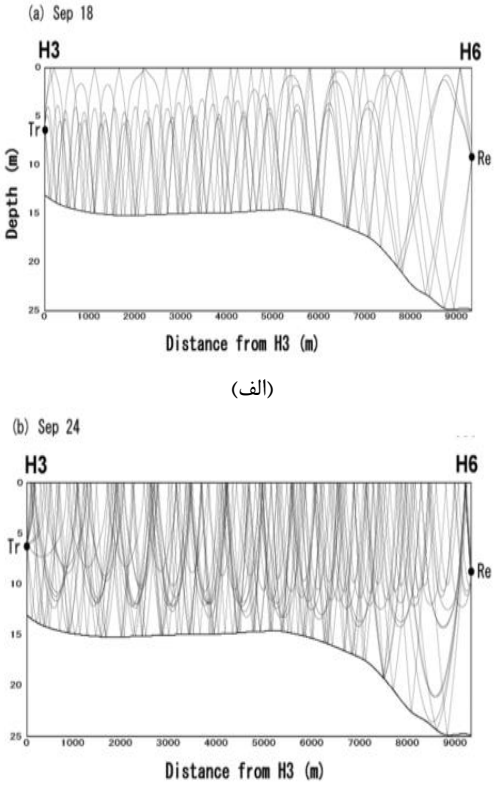
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]



شکل ۱ شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی با استفاده از روش رهگیری پرتو بین دو دستگاه سی‌ای‌تی‌اِس.

هم‌چنین تعداد بسیار کمی از امواج بالاتر از ۵ متر سطحی آب نفوذ کرده و به سطح آب برخورد می‌کنند. همان‌طورکه انتظار می‌رفت انتشار امواج صوتی در دریا زمانی که لایه‌بندی[1] وجود دارد بدین صورت خواهد بود. اما پس از وقوع طوفان امواج صوتی در بالای ۱۲ متری سطح آب انتشار یافته و الگوی آن‌ها به‌صورت محدب به‌سمت پایین تغییر کرد و پس از برخوردهای متعدد با سطح آب و بازتاب فراوان به ایستگاه مقابل رسید (شکل ۲- ب). این نوع انتشار نیز در زمان همگن‌بودن اقیانوس-ها[2] اتفاق می‌افتد [۱۷].

آدیتیاوارمان و همکاران سرعت و دمای متوسط دریای ستو[3] ژاپن را با استفاده از سی‌ای‌تی‌اِس اندازه‌گیری نمودند. فاصله‌ی تراگذارها (مبدل‌ها)[4] ۳۰٫۲ کیلومتر بود و در عمق ۸ متری از سطح آب نصب گردیدند. انتشار امواج صوتی در دو ماه مارس و مه با استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج مستقل از مسافت انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که به دلیل اینکه در مارچ کم‌ترین سرعت امواج صوتی در عمق ۲ متری از سطح اتفاق افتاده است، امواج صوتی عموما در بالای ۲۰ متری از سطح دریا انتشار یافته‌اند. در ماه مه نیز به دلیل وجود کم‌ترین سرعت امواج صوتی در عمق ۱۰ متری از سطح، امواج صوتی در فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۵ متری از سطح دریا انتشار یافته‌اند [۲۲].

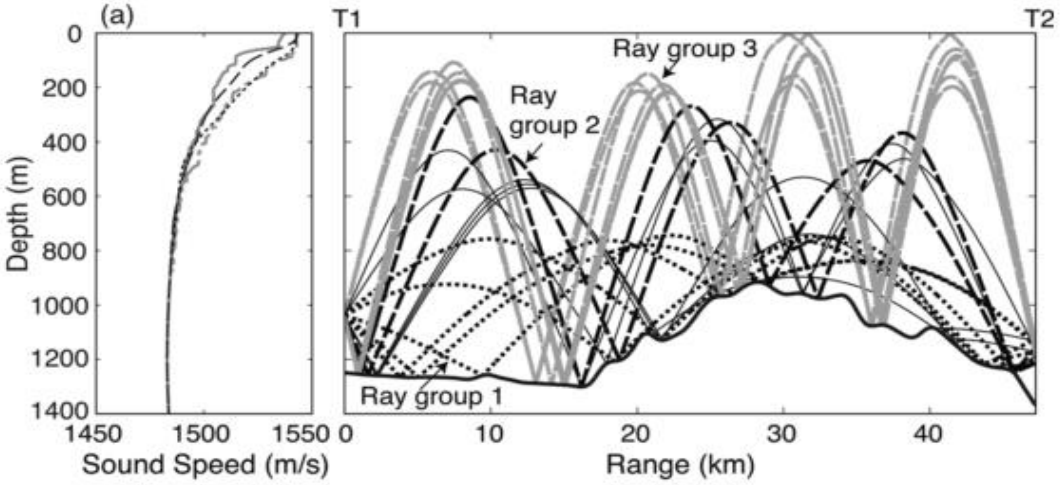


شکل ۲ الف) الگوی انتشار امواج قبل از وقوع طوفان ب) الگوی انتشار امواج پس از وقوع طوفان.

[1] Stratified sea
[2] Homogenized ocean
[3] Seto Inland Sea
[4] Transducer

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]



شکل ۳ شبیه‌سازی انتشار امواج بین تراگذارهای اُاِی‌تی و مشاهده‌ی سه گروه مختلف امواج صوتی.

آدیتیاوارمان و همکاران جریان‌های جزرومدی را در تنگه‌ی کوروشیمای ژاپن با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس اندازه گرفتند. فاصله‌ی دو تراگذار (مبدل) صوتی ۶٫۳ کیلومتر، حداکثر عمق دریا در راستای ارسال امواج ۶۰ متر و تراگذارها در عمق ۵ متری از سطح آب قرار گرفتند. نحوه‌ی انتشار امواج صوتی با استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج مستقل از مسافت انجام پذیرفت و نتایج نشان داد که گروهی از امواج در بالای ۵ متر از سطح دریا انتشار یافته و گروهی دیگر تا حداکثر ۴۰ متری عمق آب نفود کرده و پس از بازتاب از کف دریا و سطح آب به تراگذار (مبدل) مقابل رسیده‌اند [۲۳].

تانیگوچی و همکاران با استفاده از اُاِی‌تی که در جنوب غربی تایوان به فاصله‌ی ۴۸ کیلومتری از یکدیگر نصب شده بودند، یکی از جریان‌های مرزی غربی اقیانوسی[1] را با نام جریان کورشیو[2] اندازه گرفتند. حداکثر عمق آب در راستای ارسال امواج صوتی ۱۴۰۰ متر بوده و تراگذارها در عمق ۱۰۰۰ متری از سطح آب نصب گردیدند. نحوه‌ی انتشار امواج صوتی با استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج انجام شده و نتایج نشان داد که سه گروه از امواج صوتی در اعماق مختلف نزدیک بستر اقیانوس، نزدیک سطح آب و مابین بستر و سطح آب انتشار می‌یابند (شکل ۳). نتایج الگوسازی برای تجزیه و تحلیل داده‌های اُاِی‌تی به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در لایه‌های مختلف آب مورد استفاده قرار گرفت [۱۶].

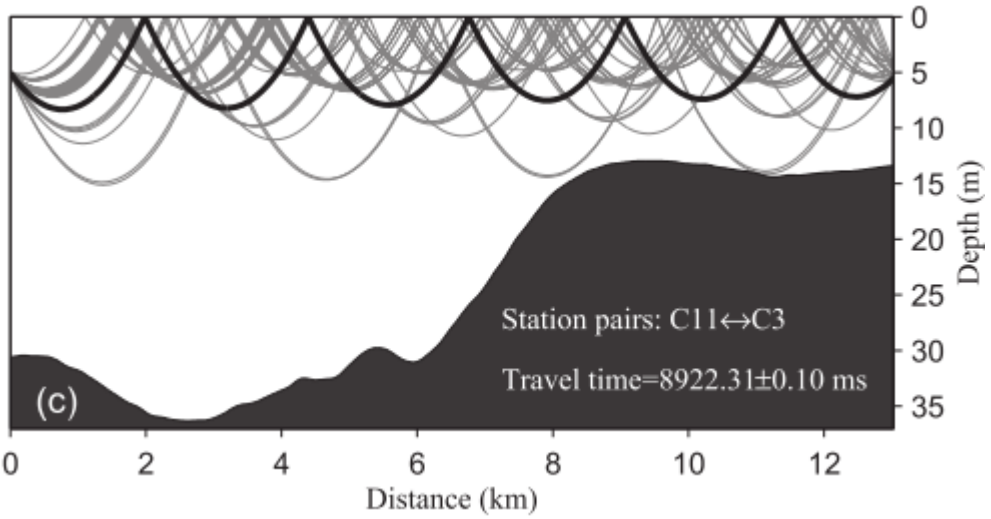
سو و همکاران جریان‌های جزرومدی، جریان‌های جانبی و حجم آب عبوری را در تنگه‌ی کیونگژو[3] چین با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس اندازه گرفتند. فاصله‌ی دو تراگذار (مبدل) ۱۸ کیلومتر و حداکثر عمق دریا در راستای ارسال امواج صوتی حدود ۱۰۰ متر بود. تراگذارها (مبدل‌ها) در ۵ متری سطح آب نصب گردیدند. نحوه‌ی انتشار امواج صوتی با استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که تمامی امواج در بالاتر از ۳۰ متر از سطح دریا انتشاریافته و هیچکدام به بستر دریا برخورد نکردند [۱۴].

ژانگ و همکاران با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس (فاصله‌ی دو تراگذار ۱۳٫۷۶۹ کیلومتر و حداکثر عمق دریا در راستای امواج صوتی ۶۰ متر) حجم آب عبوری در دریای ستو ژاپن را اندازه گرفتند. نحوه‌ی انتشار امواج صوتی نیز با استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج مستقل از مسافت در چهار ماه شبیه‌سازی شد. در این آزمایش نیز نتایج شبیه‌سازی با زمان رسیدن امواج اندازه‌گیری شده با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس مطابقت داشت [۲۴].

ژانگ و همکاران توزیع جریان‌های جزرومدی و جریان‌های جانبی در خلیج دالیان چین را با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس اندازه گرفتند. همچنین الگوی امواج صوتی انتشاریافته بین تراگذارهای (مبدل‌های) صوتی دستگاه سی‌اِی‌تی‌اِس که به فاصله‌ی ۱۳ کیلومتر از یکدیگر قرار گرفته بودند، با

[1] Western boundary currents
[2] Kuroshio current
[3] Qiongzhou strait

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]



شکل ۴ الگوی انتشار امواج بین دو تراگذار سی‌اِی‌تی‌اِس.

استفاده از الگوی شبیه‌سازی موج مستقل از مسافت بررسی گردید. نتایج نشان داد که به دلیل قرار گرفتن تراگذارها در ۵ متری زیر سطح دریا، همه‌ی امواج در ۱۵ متری سطح انتشاریافته و پس از برخورد با سطح، بازتاب شده و به تراگذار (مبدل) مقابل می‌رسند. با توجه به اینکه حداکثر عمق دریا بین دو تراگذار (مبدل) ۳۵ متر بود هیچکدام از امواج صوتی به کف دریا برخورد نکردند (شکل ۴) [۲۵].

سیامسودین و همکاران سرعت جریان‌های جزرومدی و دمای جریان را در تنگه‌ی بالی اندونزی با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس اندازه گرفتند. نتایج شبیه‌سازی دو گروه از امواج صوتی نشان داد که گروه اول با کف دریا برخورد کرده و پس از بازتاب و با گذشت ۲٫۹۱۸۶ ثانیه به ایستگاه مقابل رسیده‌اند، در حالی‌که گروه دوم پس از برخورد با سطح آب و پس از ۲٫۹۲ ثانیه به ایستگاه مقابل رسیده‌اند. داده‌های شبیه‌سازی‌شده در انجام محاسبات اندازه‌گیری دما و سرعت جریان با استفاده از سی‌اِی‌تی‌اِس مورد استفاده قرار گرفت [۱۳].

در مطالعات انجام‌شده، عمدتاً انتشار امواج صوتی در دریا و اقیانوس بررسی شده است. مطابق جدول ۱، الگوی نظریه پرتو برای آب‌های کم‌عمق و امواج صوتی با بسامد بالا مناسب است. اما با توجه به مطالعات گذشته منظور از آب کم‌عمق، آب‌های شور دریا کم‌تر از ۲۰۰ متر و منظور از بسامد بالا، بسامدهای بالاتر از ۵۰۰ هرتز است. هدف از این مطالعه ارزیابی الگوی نظریه پرتو با استفاده از روش رهگیری پرتو برای شبیه‌سازی نحوه‌ی انتشار امواج صوتی در رودخانه‌ی آب شیرین بسیار کم‌عمق (کم‌تر از ۲٫۵ متر) است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از دستگاه اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) که بسامد ۳۰ کیلوهرتز را ارسال و دریافت می‌کند، مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق

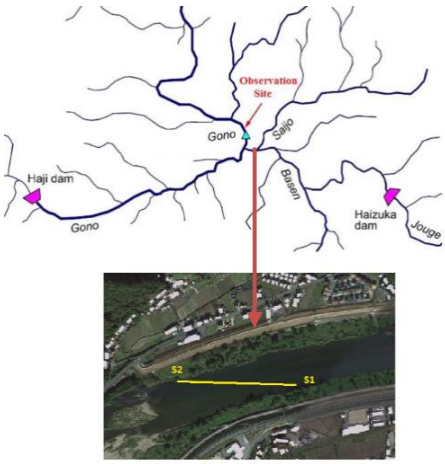
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، ارزیابی انتشار امواج صوتی در رودخانه‌ی آب شیرین گونو[1] ژاپن که رودخانه‌ای کوهستانی و کم‌عمق است، انجام شد (شکل ۵- الف). دو دستگاه اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) در تاریخ ۱۹ الی ۲۰ ژانویه ۲۰۱۶ به‌صورت مورب در بازه‌ای از رودخانه‌ی گونو نصب گردیده و زمان رسیدن امواج صوتی را اندازه گرفتند. فاصله‌ی دو تراگذار صوتی ۲۹۴٫۶۲۹ متر و بسامد ارسالی ۳۰ کیلوهرتز تنظیم شد، که در هر ۳۰ ثانیه اقدام به ارسال امواج صوتی به یکدیگر کردند. هر دو دستگاه به‌طور هم‌زمان امواج صوتی را ارسال نموده و زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه مقابل توسط دستگاه‌ها ثبت و ضبط گردید. نیم‌رخ عمودی سرعت صوت در بین دو تراگذار با استفاده از دستگاه سی‌تی‌دی[2] Sontek Cast- Away در ۵ نقطه در تاریخ ۱۹ ژانویه (ساعت ۵ صبح به وقت محلی) برای به‌کارگیری در

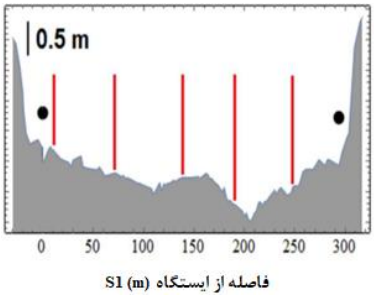
[1] Gono river
[2] CTD

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]

شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی در آب اندازه‌گیری شد (شکل ۵- ب).



(الف)



(ب)

شکل ۵ الف) منطقه مورد مطالعه و محل نصب تراگذارهای اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) با نام T۱ و T۲، ب) اندازه‌گیری نیم‌رخ عمودی سرعت صوت با استفاده از سی‌تی‌دی (خطوط قرمز) بین دو تراگذار T۱ و T۲ (نقاط مشکی).

۲-۲. شبیه سازی امواج با استفاده از روش رهگیری پرتو

شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی با استفاده از روش رهگیری پرتو با حل معادلات دیفرانسیل زیر انجام شد:

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{\partial c}{\partial r}\tan\varphi - \frac{\partial c}{\partial z}\frac{1}{c} \quad (۱)$$

$$\frac{dz}{dr} = \tan\varphi \quad (۲)$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{\sec\varphi}{c} \quad (۳)$$

که φ زاویه‌ی موج اندازه‌گیری‌شده نسبت به افق r، z محور عمودی و t زمان است. حل معادلات فوق با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متمتیکا[1] انجام شده است که کدنویسی آن در پیوست ۱ ارائه گردیده است. معمولاً گام انتگرال‌گیری در اقیانوس‌ها را ۴ کیلومتر تعیین می‌کنند، درحالی‌که در این مطالعه گام انتگرال‌گیری ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تعداد شلیک پرتوهای صوتی[2] ۳۰۰ و با افزایش زاویه ۰٫۰۲ درجه تعیین شد.

۳. نتایج

۳-۱. نتایج شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی با استفاده از نظریه پرتو

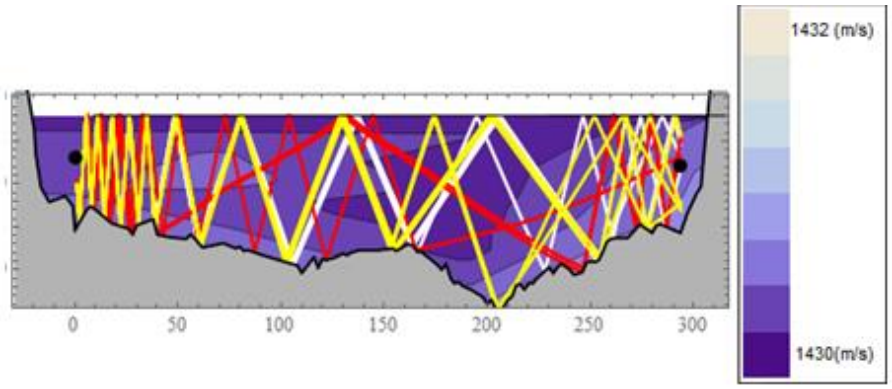
انتشار امواج صوتی از ایستگاه اول (تراگذار سمت چپ T۱) به سمت ایستگاه دوم (تراگذار سمت راست T۲) شبیه‌سازی شد. در این مطالعه برای ارضای شرایط مرزی و انتشار، فرض شد که یک لایه‌ی همگن آب از بالا در z=h=۲٫۳m توسط سطح آب و از پایین در z=۰ توسط بستر سخت رودخانه محدود شده است. تعداد گام‌های انتگرال‌گیری ۷۰۰ بار و مقدار افزایش گام‌ها dx=۰٫۵m در نظر گرفته شد. زاویه‌ی ابتدایی انتشار موج صوتی نسبت به افق th۰۱= ۲۰° و افزایش زاویه نیز dth=۰٫۰۲° تعیین شد.

نتایج شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی در این مطالعه نشان داد که امواج صوتی در چند مسیر متفاوت و در دو گروه اصلی انتشار یافته‌اند و به ایستگاه مقابل می‌رسند. همان‌طور که در شکل (۶- الف) مشاهده می‌شود گروه اول (قرمز) با چندین بازتاب از بستر رودخانه و سطح آب به ایستگاه مقابل می‌رسند، درحالی‌که گروه دوم (زرد) بازتاب‌های بیش‌تری نسبت به گروه اول داشته و بنابراین مسیر بیش‌تری را طی کرده‌اند. این گروه با بازتاب‌های بیش‌تر و به‌خصوص با گذر از قسمتی از بستر رودخانه در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از ایستگاه اول، فاصله‌ی بیش‌تری را نسبت به علامت‌های گروه اول طی کرده‌اند. از این‌رو انتظار می‌رود که گروه دوم از امواج صوتی با یک اختلاف زمانی نسبت به گروه اول به ایستگاه مقابل برسند. براساس مطالعات گذشته، در اقیانوس‌ها و دریاها عوامل زیادی از جمله امواج درونی، گرادیان دما و شوری موجب ایجاد امواج صوتی چندمسیری با زمان رسیدن‌های مختلف می‌گردد. اما در این مطالعه که در روخانه‌ی کم‌عمق آب شیرین انجام پذیرفت، گرادیان دما که با استفاده از سی‌تی‌دی اندازه‌گیری شد بسیار ناچیز و تفاوت سرعت

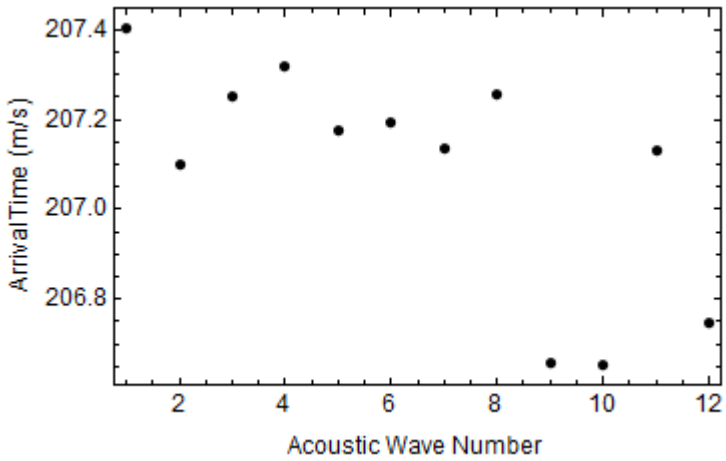
[1] Mathematica

[2] Number of firing sound ray

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]



(الف)



(ب)

شکل ۶ الف) نحوه‌ی انتشار امواج صوتی در گروه اول (قرمز) و گروه دوم (زرد)، ب) زمان رسیدن امواج صوتی انتشاریافته از ایستگاه اول به ایستگاه دوم.

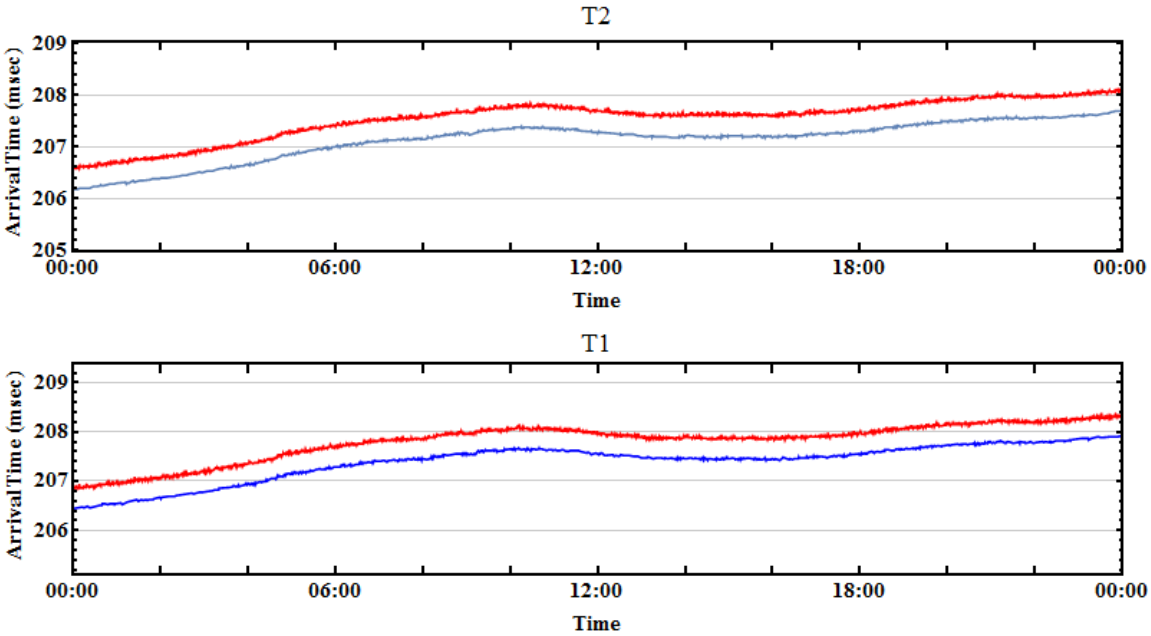
صوت در کل مقطع رودخانه کم‌تر از ۱ متر بر ثانیه بود (شکل ۶-الف). بنابراین وجود مسیرهای مختلف انتشار امواج صوتی در رودخانه‌های آب شیرین و کم‌عمق براساس تغییرات عمودی دما و یا وجود جبه‌ی آب شور نیست. الگوی نظریه پرتو علاوه بر شبیه‌سازی نحوه‌ی انتشار امواج صوتی قادر است که زمان رسیدن امواج را نیز محاسبه نماید. همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود امواج صوتی در زمان‌های مختلفی به ایستگاه مقابل رسیده‌اند. در این شکل، ۱۲ موج وجود دارد که اکثر آن‌ها در دو گروه اصلی قرار می‌گیرند. گروه اول که در شکل (۶-الف) با رنگ قرمز نشان داده شد شامل سه موج شماره ۹، ۱۰ و ۱۲ است که در زمان ۲۰۶/۷ میلی‌ثانیه به ایستگاه مقابل رسیده است. گروه دوم نیز شامل موج‌های دوم تا هشتم و موج یازدهم است که در زمان تقریبی ۲۰۷/۲ میلی‌ثانیه به ایستگاه دوم رسیده است. همانطورکه انتظار می‌رفت گروه دوم که مسیر طولانی‌تری را پیموده است با اختلاف زمانی حدود ۰/۵ میلی‌ثانیه به ایستگاه مقابل رسیده‌اند.

۴. بحث

۴-۱. ارزیابی روش رهگیری پرتو با استفاده از داده‌های مشاهداتی اِفِ‌ای‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر)

نتایج شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی با استفاده از اِفِ‌ای‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) و با اندازه‌گیری دقیق زمان رسیدن امواج مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۷ زمان اندازه‌گیری‌شده با استفاده از اِفِ‌ای‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) را در هر دو ایستگاه نشان می‌دهد. اِفِ‌ای‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) زمان رسیدن امواج صوتی را با دقت میکروثانیه اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین در این مطالعه که زمان رسیدن امواج صوتی گروه اول و دوم به ترتیب ۲۰۶/۷ و ۲۰۷/۲

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]



شکل ۷ اندازه‌گیری زمان رسیدن امواج صوتی ارسال‌شده از اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) به ایستگاه مقابل، ایستگاه دوم (T۲) و اول (T۱)، گروه اول (رنگ آبی) و گروه دوم (رنگ قرمز).

میلی‌ثانیه است و اختلاف آن‌ها ۰/۵ میلی ثانیه بود، با استفاده از اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) قابل ارزیابی دقیق خواهد بود.

در این آزمایش هر دو ایستگاه اِف‌اِی‌تی‌اِس در یک زمان واحد با دقت نانوثانیه و در هر ۳۰ ثانیه اقدام به ارسال امواج صوتی کرده‌اند و زمان رسیدن امواج صوتی را نیز با دقت میکروثانیه ثبت کردند. اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) نیز مانند نتایج شبیه‌سازی، زمان رسیدن دو گروه از امواج را برای هریک از ایستگاه‌ها ثبت نمودند (شکل ۷).

با مقایسه‌ی زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه دوم (T۲) مشاهده شد که در ساعت ۵ صبح که سرعت صوت با استفاده از دستگاه سی‌تی‌دی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی انتشار امواج انجام شد، اولین گروه صوتی انتشاریافته توسط اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) که با رنگ آبی نشان داده شده، دقیقا در زمان ۲۰۶/۸ میلی‌ثانیه به ایستگاه دوم رسیده‌اند. دومین گروه نیز که با رنگ قرمز نشان داده شده، دقیقا در زمان ۲۰۷/۴ میلی‌ثانیه به ایستگاه دوم می‌رسد. بنابراین اختلاف زمان رسیدن دو گروه از امواج صوتی ثبت توسط اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) در ایستگاه دوم ۰/۶ میلی‌ثانیه می‌باشد.

نتایج نشان داد که در این آزمایش روش رهگیری پرتو مسیرهای متفاوت انتشار امواج صوتی در آب‌های کم‌عمق رودخانه‌ای را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده و با خطای ۰/۱ میلی‌ثانیه نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط اِف‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر)، زمان رسیدن امواج را تخمین زده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش رهگیری پرتو علاوه بر دریا و اقیانوس، برای رودخانه‌های بسیار کم‌عمق آب شیرین و برای بسامدهای صوتی تا ۳۰ کیلوهرتز نیز روشی مناسب و قابل اعتماد است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول (T۱) به‌ترتیب پس از گذشت ۲۰۷/۱ و ۲۰۷/۷ میلی‌ثانیه می‌باشد. اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول و دوم به‌دلیل جهت حرکت جریان آب است که سبب می‌شود امواج صوتی به ایستگاه دوم که در پایین دست جریان آب قرار دارد زودتر برسد و برعکس، ایستگاه اول که در خلاف جهت جریان آب قرار دارد، امواج صوتی در مدت زمان بیش‌تری به آن ایستگاه می‌رسند.

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه الگوی نظریه پرتو[1] برای رودخانه‌ای کم‌عمق و دارای آب شیرین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این الگو به‌خوبی مسیرهای متفاوت انتشار امواج صوتی در آب و زمان رسیدن امواج صوتی را شبیه‌سازی می‌کند. برای ارزیابی الگوی فوق، امواج صوتی با استفاده از دو دستگاه اِفِ‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) به سمت یکدیگر ارسال شدند و زمان رسیدن آن‌ها نیز با دقت میکروثانیه ثبت شد و مشاهده گردید که دو گروه از امواج با اختلاف زمانی ۰٫۶ میلی‌ثانیه به ایستگاه مقابل می‌رسد. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که اِفِ‌اِی‌تی‌اِس (س‌ت‌ص‌ر) یکی از بهترین ابزارها برای پایش پیوسته و لحظه‌ای سرعت امواج صوتی در آب است. در حالی‌که ابزارهایی نظیر سی‌تی‌دی و یا الگوهای انتشار امواج صوتی، توانایی اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی به صورت پیوسته را ندارند.

۶. فهرست منابع

[1] L. Bjorno, M.J. Buckingham, "General Characteristics of the Underwater Environment," In Applied Underwater Acoustics, Elsevier Press, Netherlands, 2017.

[2] T.H. Neighbors, "Absorption of Sound in Seawater," Applied Underwater Acoustics," In Applied Underwater Acoustics, Elsevier Press, Netherlands, 2017.

[3] J.F. Lynch, A.E. Newhall, "Shallow-Water Acoustics," In: Applied Underwater Acoustics, Elsevier Press, 2017.

[4] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt, "Computational Ocean Acoustics," Springer Press, 2000.

[5] P.C. Etter, "Advanced applications for underwater acoustic modeling," Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2012, 2012.

[6] M. Razaz, K. Kawanisi, I. Nistor, S. Sharifi, "An acoustic travel time method for continuous velocity monitoring in shallow tidal streams," Water Resources Research vol. 49, no. 8, pp. 4885-4899, 2013.

[7] K. Kawanisi, M. BahrainiMotlagh, M. AlSawaf, M. Razaz, "High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography," Hydrological Processes, vol. 30, no. 13, pp. 2247-2254, 2016.

[8] C. Zhang, A. Kaneko, X.H. Zhu, N. Gohda, "Tomographicmapping of a coastal upwelling and the associated diurnal internal tides in Hiroshima Bay," Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 120, no. 6, pp. 4288-4305, 2015.

[9] K. Kawanisi, M. Razaz, A. Kaneko, S. Watanabe, "Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system," Journal of Hydrology, vol. 380, no. 1-2, pp. 74-81, 2010.

[10] K. Kawanisi, X. Zhu, X. Fan, I. Nistor, "Monitoring tidal bores using acoustic tomography system," Journal of Coastal Research, vol. 33, no. 1, pp. 96-104, 2016.

[11] M. Razaz, K. Kawanisi, A. Kaneko, I. Nistor, "Application of acoustic tomography to reconstruct the horizontal flow velocity field in a shallow river," Water Resources Research, vol. 51, no. 12, pp. 9665-9678, 2015.

[12] Z.N. Zhu, X.H. Zhu, X. Guo, "Coastal tomographic mapping of nonlinear tidal currents and residual currents," Continental Shelf Research, vol. 143, pp. 219-227, 2017.

[13] F. Syamsudin, M. Chen, A. Kaneko, Y. Adityawarman, H. Zheng, H. Mutsuda, A.D. Hanifa, C. Zhang, G. Auger, J.C. Wells, X. Zhu, "Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission," Acoustical Science and Technology, vol. 38, no. 5, pp.246-253, 2017.

[14] X. Zhu, Z. Zhu, Y. Ma, X. Fan, Y. Long, "Measuring tidal and residual currents and volume transport through a wide strait by use of the coastal acoustic tomography system," EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria, 2015.

[15] X. Zhao, D. Wang, "Ocean acoustic tomography from different receiver geometries using the adjoint method," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 138, no. 6, pp. 3733-3741, 2015.

[16] N. Taniguchi, C.F. Huang, A. Kaneko, C.T. Liu, B.M. Howe, Y.H. Wang, Y. Yang, J. Lin, X.H. Zhu, N. Gohda, "Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 134, no. 4, pp. 3272-3281, 2013.

[17] H.Q. Nguyen, A. Kaneko, J. Lin, K. Yamaguchi, N. Gohda, Y. Takasugi,

[1] Ray Theory

[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]

"Acoustic measurement of multisubtidal internal modes generated in Hiroshima Bay, Japan," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 34, no. 2, pp. 103–112. 2009.

[18] G. Li, D. Ingram, A. Kaneko, N. Gohda, N. Polydorides, "The application of coastal acoustic tomography to a large experimental wave/current basin," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 140, no. 4, pp. 3183-3183, 2016.

[19] M. Bahreinimotlagh, K. Kawanisi, M.M. Danial, M.B. Al Sawaf, J. Kagami, "Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge," Flow Measurement and Instrumentation, vol. 51, pp.30-39, 2016.

[20] M.B. Al Sawaf, K. Kawanisi, J. Kagami, M. BahrainiMotlagh, "Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 484, pp. 11-20, 2017.

[21] K. Yamaguchi, J. Lin, A. Kaneko, T. Yayamoto, N. Gohda, H.Q. Nguyen, H Zheng, "A continuous mapping of tidal current structures in the Kanmon Strait," Journal of Oceanography, vol. 61, no. 2, pp. 283-294, 2005.

[22] Y. Adityawarman, A. Kaneko, K. Nakano, N. Taniguchi, K. Komai, X. Guo, N. Gohda, "Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan," Journal of Oceanography, vol. 67, no. 2, pp. 173-182, 2011.

[23] Y. Adityawarman, A. Kaneko, N. Taniguchi, H. Mutsuda, K. Komai, X. Guo, N. Gohda, "Tidal current measurement in the Kurushima Strait by the reciprocal sound transmission method, Acoust," Acoustical Science and Technology, vol. 33, no. 1, pp. 45-51, 2012.

[24] C. Zhang, A. Kaneko, X.-H. Zhu, B.M. Howe, N. Gohda, "Acoustic measurement of the net transport through the Seto Inland Sea," Acoustical Science and Technology, vol. 37, no. 1, pp.10-20, 2016.

[25] Z. Chuanzheng, X.H. Zhu, Z.N. Zhu, W. Liu, Z. Zhang, X. Fan, Z. Ruixiang, D. Menghong, M. Wang, "High-precision measurement of tidal current structures using coastal acoustic tomography," Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 193, pp.12-24, 2017

پیوست ۱

کدنویسی برای الگوسازی انتشار امواج صوتی در رودخانه با استفاده از روش رهگیری پرتو در نرم افزار متمتیکا انجام شده است. با نوشتن خطوط پررنگ (Bold) در نرم افزار متمتیکا، می‌توان شبیه‌سازی را دوباره انجام داد. طبق مرور منابع صورت گرفته در این مطالعه، این روش برای شبیه‌سازی نحوه‌ی انتشار امواج در دریاها مثل دریای خزر و یا خلیج فارس نیز بسیار کارآمد است.

"dx = integral increments (m), h = water level (m), n = integral number of steps, z01 = left bank transducer height (vertical coordinate), t01 = wave firing time, npath = number of firing sound ray, x01 = left bank the horizontal coordinate of the transducer, x1 = right bank horizontal coordinate of the transducer, z1 = right bank transducer height (vertical coordinate), th0 1 = initial angle from the horizontal of the sound ray, dth = angle increments"

```
Input=
$Line = 1; dx = 0.5; n = 700; t01 = 0.0; npath = 300; th01 = -20.0; dth = 0.02;

Input=
Do[ x0=x01; z0=z01;th0=(th01+ dth*j)Degree; t0=t01; nbtm[j]=0;
Do[
res[j,i]=NDSolve[{th'[x]==c1 Tan[th[x]]-c2,z'[x]==Tan[th[x]],t'[x]==Sec[th[x]]/cfunc[x,z[x]],th[ x0 ]==th0,z[x0]==z0,t[x0]==t0},{th,z,t},{x,x0,x0+dx}];
xw=x0+dx;
z0=res[j,i][[1,2,2]][xw];
isrf=False; ibtm=False;

Which[isrf=z0>h,xw=x/.FindRoot[res[j,i][[1,2,2]][x]==h,{x,xw}];
z0=res[j,i][[1,2,2]][xw];,ibtm=z0<bfunc[xw],If[xw<x1,nbtm[j]++];xw=x/.FindRoot[res[j,i][[1,2,2]][x]==bfunc[x],{x,xw}]; z0=res[j,i][[1,2,2]][xw];
th0=res[j,i][[1,1,2]][xw]; t0=res[j,i][[1,3,2]][xw];
Which[isrf,th0=-th0,ibtm,xx=xw;th0=-th0+2tbfunc];
x0=xw,
{i,n}],
.{j,npath}]
```


[Downloaded from joasi.ir on 2025-12-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.4.7]