ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیر آب (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

چکیدہ

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، شوری و امواج درونی عوامل (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 ۵٫۰ میلی ثانیه بود. صحتسنجی شبیهسازی با استفاده از دو دستگاه تراکذار افرای و دریافت دو طرف رودخانه به فاصلهی ۲۹٫۷۲ متر از یکدیگر نصب شده بودند و امواج صوتی در ای با بسامد مرکزی ۲۰۰ کیلوهرتز ارسال و دریافت رمانی بین زمان ورود دو گروه ۱٫۵ میلی ثانیه بود. صحتسنجی شبیه ازی با استفاده از دو دستگاه تراگذار افرای تی اس (ستصر) که در می کردند، انجام شد. نهایتاً، اندازه گیریهای انجام شده توسط افاری تی آس (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 به طور گسترده در محیط خارج از آب به کار میروند، اما محیط آبی برای امواجی به غیر از امواج صوتی، محیطی مات محسوب میشود و این نوع امواج به سرعت درون آب تضعیف می گردند. در حالی که 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 یواچ اف^۱ و با طول موج ۳٫۰ متر ضریب جذبی^۲ معادل محین طول موج برای یک موج صوتی ۵ کیلوهر تزی ضریب

¹ UHF

جذب کمتر از ^۲-۱۰×۳ دسی بل بر متر می باشد [۱]. جذب امواج صوتی در آب دریا تابعی از شوری، دمای آب، اسیدیته، فشار (عمق) و بسامد موج صوتی است در حالی که جذب امواج صوتی در آب شیرین نظیر رودخانهها تابعی از اتلاف انرژی صوت و بسامد موج صوتی میاشد [۲]. رفتار امواج صوتی در آبهای عمیق نظیر اقیانوسها، آبهای کمعمق نظیر دریاها و یا رودخانه های آب شیرین متفاوت است. امروزه رفتار امواج صوتی در آبهای كمعمق مورد توجه محققان قرار گرفته است. تعاريف 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 ($H \leq 10\lambda$) [π]. براساس این تعریف برای امواج صوتی با بسامد ۲۵۰ هرتز، عمـق آب کـمتـر از ۶۰ متـر کـمعمـق محسوب می گردد و برای امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز، عمق آب کمتر از ۰٫۵ متر، کمعمق محسوب می گردد.

^{*} نویسنده پاسخگو: m.bahreini@wri.ac.ir

² Absorption coefficient

کاربرد								
	كمعمق	آبهای ً		آبهای عمیق				نهع الگه
بسامد پایین		بسامد بالا		بسامد پایین		بسامد بالا		, ,
RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD	
0	0	•		\bullet	\bullet			Ray theory
	Ο		Ο		\bullet	Ο	0	Normal mode
0	0	\bullet	•	\bullet	\bullet		•	Multipath expansion
	Ο		Ο			Ο	Ο	Fast field
•		0	0	\mathbf{O}		•	\bullet	Parabolic equation
آب کمعمق < ۲۰۰ متر				RI: مستقل از مسافت				بسامد پایین $\leq 2 \cdot \cdot 5$ هرتز
آب عميق < ٢٠٠ متر				RD: وابسته به مسافت				بسامد بالا $\leq 2 \cdot \cdot 5$ هرتز
. قابل استفاده به صورت عملی و محاسباتی.								
• دارای محدودیت در دقت یا طولانیبودن محاسبات.								
O: غیرقابل استفاده بهصورت عملی و محاسباتی.								

حدول (مقابسهي الگوهاي مختلف انتشار امواج صوتي در آب [۵].

نظریههای گوناگونی برای الگوسازی انتشار امواج صوتی در آب ارائه شده است [۴]. بسیاری از الگوها در کتابخانهی صوتيات اقيانوس در وبسايت مربوط ه در دسترس محققان قرار داده شده است. جـدول ۱ پـنج نـوع نظريـه یرکاربرد انتشار امواج صوتی در آب را با یک دیگر مقایس ه کرده است [۵]. در این جدول منظور از آب کمعمق، عمقی کمتر از ۲۰۰ متر است.

تکهنگاری یا برشنگاری صوتی درون آب^۳ شاخهای از دانش آوصوتیات است که با اندازهگیری زمان طیشدهی^۴ امواج صوتی در آب قادر است سرعت جریان آب [۶]، دبی جريان [۷]، دمای آب [۸]، شوری [۹]، رسوبات معلق [۱۰]، جهت جريان آب [۱۱]، سرعت جزرومد [۱۲]، سرعت امواج درونی [۱۳] و جریان های جانبی^۵ [۱۴] در لایههای مختلف عمق آب در رودخانهها، دریاچهها، دریاها و اقیانوسها را اندازه گیری کند. روش تکهنگاری صوتی درون آب در سه سطح اقیانوسی اُایتیاس⁸ [۱۵– ۱۶]، دریایی سیایتیاس [۱۷–۱۸] و رودخانهای افایتیاس (ستصر) (ستصر) [19 – ۲۰] مورد استفاده قرار می گیرد.

یاماگوچی و همکاران ساختار جریانهای جزرومدی در تنگهی کانمون ژاین را با استفاده از سے ای تے اس اندازه گرفتند. در این مطالعه، انتشار امواج صوتی با استفاده از روش رهگیری پرتو¹ صورت گرفت. نتایج نشان داد امواج صوتی به دو صورت انتشار می یابند. گروه اول امواج صوتی به سطح دریا برخورد کرده و بازتاب آنها بدون برخورد به بستر دریا به ایستگاه مقابل می سد. 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 سیای تی اس جزرومدهای درونی را در خلیج هیروشـیما ژاپـن از ۱۷ تـا ۲۸ سـپتامر ۲۰۰۳ اندازه گرفتند. در تاریخ ۲۱ سپتامبر با وقوع طوفانی در اطراف خلیج هیروشیما تغییرات جریانهای دریایی با استفاده از سیایتی اس به خوبی پایش گردید. انتشار امواج صوتی نیز با استفادہ از روش رھگیری پرتو قبل و بعد از وقوع طوفان انجام شد. نتایج شبیهسازی نشان داد که الگوی انتشار امواج به صورت الگوهای محدب به سمت بالادست است و اکثر امواج پس از برخوردهای متعدد با بستر دریا و پس از بازتابهای متعدد به ایستگاه مقابل مىرسند (شكل ٢- الف).

Downloaded from joasi.ir on 2025-07-01

¹ Ocean acoustics library

² http://oalib.hlsresearch.com

⁹ 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

⁹ Ray Tracing

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ سال ششم/ شماره ۲/ پاییز و زمستان ۱۳۹۷



هم چنین تعداد بسیار کمی از امواج بالاتر از ۵ متر سطحی آب نفوذ کرده و به سطح آب برخورد میکنند. همان طور که انتظار می فت انتشار امواج صوتی در دریا زمانی که لایهبندی^۱ وجود دارد بدین صورت خواهد بود. اما پس از وقوع طوفان امواج صوتی در بالای ۱۲ متری سطح آب انتشار یافته و الگوی آنها به صورت محدب به سمت 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 همگن بودن اقیانوس ها^۲ اتفاق می افتد [۱۷].

آدیتیاوارمان و همکاران سرعت و دمای متوسط دریای ستو^۳ ژاپن را با استفاده از سیای تی اس اندازه گیری نمودند. فاصلهی تراگذارها (مبدلها)^۴ ۲۰٫۲ 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 شبیه سازی موج مستقل از مسافت انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که به دلیل اینکه در مارچ کم ترین سرعت امواج نشان داد که به دلیل اینکه در مارچ کم ترین 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 کم ترین سرعت امواج موتی در عمق ۱۰ متری از سطح، امواج صوتی در







¹ Stratified sea

² Homogenized ocean

³ Seto Inland Sea

⁴ Transducer





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 سیای تی اس اندازه گرفتند. فاصلهی دو تراگذار (مبدل) صوتی ۶،۲ 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 اُاِی ای که در جنوب غربی تایوان به فاصلهی ۴۸ کیلومتری از یک دیگر نصب شده بودند، یکی از جریانهای مرزی غربی اقیانوسی را با نام جریان کورشیو^۲ 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 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 اُاِی تی 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 کیونگژو⁷ چین با استفاده از سیایتی اِس 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 مترى سطح آب نصب گرديدند. نحوهى انتشار امواج صوتى 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 سیایتی اس (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 اندازه گیری شده با استفاده از سیای تی اس مطابقت داشت [۲۴].

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

³ Qiongzhou strait

¹Western boundary currents

² Kuroshio current



شکل ۴ الگوی انتشار امواج بین دو تراگذار سیاِیتیاِس.

استفاده از الگوی شبیه سازی 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 می سند. 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 سیای تی اس اندازه گرفتند. نتایج شبیه سازی 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 حالی که گروه دوم پس از برخورد با سطح آب و پس از ۲٬۹۲ ثانیه به ایستگاه مقابل رسیدهاند. داده های شبیه سازی شده در انجام محاسبات اندازه گیری دما و سرعت جریان با استفاده از سیای تی اس مورد استفاده قرار گرفت [۱۳].

در مطالعات انجامشده، عمدتاً انتشار امواج صوتی در دریا و اقیانوس بررسی شده است. مطابق جدول ۱، الگوی نظریـه پرتو برای آبهای کمعمق و امـواج صـوتی بـا بسـامد بـالا مناسب است. اما با توجه به مطالعات گذشته منظور از آب کمعمق، آبهای شور دریا کمتـر از ۲۰۰ متـر و منظـور از بسامد بالا، بسامدهای بالاتر از ۵۰۰ هرتـز اسـت. هـدف 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 افایتیاس (ستصر) که بسامد ۳۰ کیلوهرتز را ارسال و دریافت می کند، مورد ارزیابی و صحتسنجی قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، ارزیابی انتشار امواج صوتی در رودخانه ی آب شیرین گونو^۱ ژاپن که رودخانه ای کوهستانی و کم عمق است، انجام شد (شکل ۵– الف). دو دستگاه افای تی اِس (ستصر) در تاریخ ۱۹ الی ۲۰ ژانویه ۲۰۱۶ به صورت مورب در بازه ای از رودخانه ی گونو نصب گردیده و زمان رسیدن امواج صوتی را اندازه گرفتند. فاصله ی دو تراگذار صوتی ۲۹۴/۶۲۹ متر و بسامد ارسالی ۳۰ کیلوهر تز تنظیم شد، که در هر ۳۰ ثانیه اقدام به ارسال امواج صوتی به یکدیگر کردند. هر دو دستگاه به طور همزمان امواج صوتی را ارسال نموده و زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه مقابل توسط دستگاهها ثبت و ضبط گردید. نیم رخ عمودی سرعت صوت در بین دو تراگذار با استفاده از دستگاه سی تی دی^۲ Sontek Cast- Away (تاریخ ۱۹

¹ Gono river ² CTD

شبیه سازی انتشار امواج صوتی در آب اندازه گیری شد (شکل ۵- 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 پر تو شبیهسازی انتشار امواج صوتی با استفاده از روش رهگیری پرتو با حل معادلات دیفرانسیل زیر انجام شد:

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

$$\frac{dz}{dr} = \tan\varphi \tag{(1)}$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{\sec \varphi}{c} \tag{(7)}$$

که φ زاویهی موج اندازه گیریشده نسبت به افق z ،r محور عمودی و t زمان است. حل معادلات فوق با استفاده از زبان برنامهنویسی متمتیکا^۱ انجام شده است که کدنویسی آن در پیوست ۱ ارائه گردیده است. معمولاً گام

انتگرال گیری در اقیانوس ها را ۴ کیلومتر تعیین می کنند، درحالی که در این مطالعه گام انتگرال گیری ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. تعداد شلیک پرتوهای صوتی^۲ ۳۰۰ و با افزایش زاویه ۰٬۰۲ درجه تعیین شد.

۳. نتايج

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

انتشار امواج صوتی از ایستگاه اول (تراگذار سمت چپ T۱) ب. ه س. مت ایس. تگاه دوم (تراگ ذار س. مت راس. T) شبیه سازی شد. در این مطالعه برای ارضای شرایط مرزی و انتشار، فرض شد که یک لایه ی همگن آب از بالا در z=h=۲/۳m رودخانه محدود شده است. تعداد گامهای مهار افزایش گامها dx=۰/۵m در نظر گرفته شد. زاویه ی ابتدایی انتشار موج صوتی نسبت به افق ۲۰۰ = th۰۱ و افزایش زاویه نیز ۲۰٬۰

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. همان طور که در شکل (۶- الف) مشاهده می شود گروه اول (قرمز) با چندین بازتاب از بستر رودخانه و سطح آب به ایستگاه مقابل میرسند، در حالی که 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، فاصله یبیشتری را نسبت به علامت های 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 رسیدن های مختلف می گردد. اما در این مطالعه که در روخانه ی کمعمق آب شیرین انجام پذیرفت، گرادیان دما که با استفاده از سی تی دی اندازه گیری شد بسیار ناچیز و تفاوت سرعت

¹ Mathematica

² Number of firing sound ray

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ سال ششم/ شماره ۲/ پاییز و زمستان ۱۳۹۷



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

انتظار می فت گروه دوم که مسیر طولانی تری را پیموده است با اختلاف زمانی حدود ۰٫۵ میلی ثانیه به ایستگاه مقابل رسیدهاند.

۴. بحث

۴-۱. ارزیابی روش رهگیری پرتو با استفاده از دادههـای مشاهداتی اِفاِیتیاِس (ستصر)

نتایج شبیهسازی انتشار امواج صوتی با استفاده از اف ای تی اس (ستصر) و با اندازه گیری دقیق زمان رسیدن امواج مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۷ زمان اندازه گیری شده با استفاده از اف ای تی اس (ستصر) را در هر دو ایستگاه نشان می دهد. اف ای تی اس (ستصر) زمان رسیدن امواج صوتی را با دقت میکروثانیه اندازه گیری می کند. بنابراین در این مطالعه که زمان رسیدن امواج صوتی گروه اول و دوم به ترتیب ۲۰۶/۷ و ۲۰۶/۲ 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. همان طور 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 مقابل رسیدهاند. در این شکل، ۱۲ موج وجود دارد که اکثر مقابل میدهاند. در این شکل، ۲۰ موج وجود دارد که اکثر شماره ۹، ۱۰ و ۱۲ است که در زمان ۲۰۶/۲ میلی ثانیه به نماره ۹، ۱۰ و ۱۲ است که در زمان ۲۰۶/۲ میلی ثانیه به دوم تا هشتم و موج یازدهم است که در زمان تقریبی





شکل ۷ اندازه گیری زمان رسیدن امواج صوتی ارسال شده از اِفَاِی تیاِس (ستصر) به ایستگاه مقابل، ایستگاه دوم (T۲) و اول (T۱)، گروه اول (رنگ آبی) و گروه دوم (رنگ قرمز).

میلی ثانیه است و اختلاف آن ها ۰٫۵ میلی ثانیه بود، با استفاده از اِفاِی تی اِس (ستصر) قابل ارزیابی دقیق خواهد بود.

در این آزمایش هر دو ایستگاه افای تی اس 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. افای تی اس (ستصر) نیز مانند نتایج شبیه سازی، زمان رسیدن دو گروه از امواج را برای هریک از ایستگاهها ثبت نمودند (شکل ۷).

با مقایسه یزمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه دوم با مقایسه یزمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه دوم (TT) مشاهده شد که در ساعت ۵ صبح که سرعت صوت با استفاده از دستگاه سیتی دی اندازه گیری و شبیه سازی انتشار امواج انجام شد، اولین گروه صوتی انتشاریافته توسط اف ی تی اس (ستصر) که با رنگ آبی نشان داده شده، دقیقا در زمان ۲۰۶/۸ میلی ثانیه به ایستگاه دوم شده، دقیقا در زمان ۴/۲۰ میلی ثانیه به ایستگاه دوم می رسد. بنابراین اختلاف زمان رسیدن دو گروه از امواج صوتی ثبت توسط اف ی تی اس (ستصر) در ایستگاه دوم

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 میلی ثانیه نسبت به دادههای اندازه گیری شده توسط إفاى تى إس (ستصر)، زمان رسيدن امواج را تخمين 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 کیلوهر تز نیز روشی مناسب و قابل اعتماد است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول (۲۱) بهترتیب پس از گذشت ۲۰۷٬۱ و ۲۰۷٬۷ میلی ثانیه می باشد. اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول و دوم بهدلیل جهت حرکت جریان آب است که سبب می شود امواج صوتی به ایستگاه دوم که در یاپین 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 مىرسند.

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,

۵. نتیجهگیری

در این مطالعه الگوی نظریه پرتو^۱ 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 میکند. برای ارزیابی الگوی فوق، امواج صوتی با استفاده از دو دستگاه افای تی اِس (ستصر) به سمت یک دیگر ارسال شدند و زمان رسیدن آنها نیز با دقت میکروثانیه ثبت شد و مشاهده گردید که دو گروه از امواج با اختلاف زمانی ۶/۰ میلی ثانیه به ایستگاه مقابل می رسد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که اِفای تی اِس (ستصر) یکی از بهترین ابزارها برای پایش پیوسته و لحظهای سرعت امواج صوتی در آب است. در حالی که ابزارهایی نظیر سی تی دی و یا الگوهای انتشار امواج صوتی، توانایی اندازه گیری 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,"

¹ Ray Theory

پيوست 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;

 $\begin{array}{l} Do[\\ res[j,i]=NDSolve[{th'[x]==c1} Tan[th[x]]-c2,z'[x]==Tan[th[x]],t'[x]==Sec[th[x]]/cfunc[x,z[x]], th[x0]==t0,z[x0]==z0,t[x0]==t0, {th,z,t}, {x,x0,x0+dx} \end{array}$

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}],

"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

^{.{}j,npath}]