

توسعه الگوریتم اندازه‌گیری پروفیل عمودی سرعت صدا در پهنه‌های آبی با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی

اشکان فرخ‌نیا*	رضا حسین‌زاده اصل	علیرضا اسکندری	مسعود بحرینی مطلق
پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.	گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران.	شرکت دانش‌بنیان توسعه دانش هوادریای آسیا، تهران. تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران.	پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران.
a.farokhnia@kgut.ac.ir	hosseinzadeh.reza@ut.ac.ir	eskandari.a1991@gmail.com	m.bahreini@wri.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک الگوریتم برای استخراج پروفیل عمودی سرعت صدا در پهنه‌های آبی، مبتنی بر فناوری تیکه‌نگاری صوتی، توسعه داده شد. برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم، از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی در سد لتیان استفاده گردید. الگوریتم تولید اطلاعات پیوسته زمانی پروفیل سرعت صدا در عمق پهنه‌های آبی بر اساس تلفیق روش‌های رهگیری پرتو و حل مسئله معکوس بر اساس روش تنظیم‌شده تیخونوف توسعه داده شد. داده‌های تیکه‌نگاری صوتی در مخزن سد لتیان به مدت تقریباً ۲۴ ساعت برداشت شد و سرعت صدا در ۵ لایه عمقی مجزا با ضخامت ۷ متر محاسبه گردید. برای ارزیابی دقت، اختلاف سرعت صدای برآورد شده با استفاده از تیکه‌نگاری صوتی با مقادیر حاصل از اطلاعات CTD مورد بررسی قرار گرفت که کمترین اختلاف در لایه پایینی مخزن (۰/۸۸ متر بر ثانیه) و بیشترین آن در لایه سطحی (۶/۴۱ متر بر ثانیه) مشاهده شد. نتایج تحقیق نشان داد، فناوری تیکه‌نگاری صوتی با بکارگیری الگوریتم توسعه داده شده قادر است پروفیل سرعت صدا در عمق را در پهنه‌های آبی عمیق با دقت قابل قبول برای کاربردهای عملیاتی در آوصوتیات برآورد نماید.

واژگان کلیدی: تیکه‌نگاری صوتی، سرعت صدا در آب، حل مساله معکوس، روش تنظیم شده تیخونوف، مخزن سد لتیان.

۱. مقدمه

پهنه‌های آبی، از اقیانوس‌ها و دریاها گرفته تا دریاچه‌ها و مخازن سدها، نقش حیاتی در حفظ کارکردهای زیستی، تأمین منابع آبی و تنظیم شرایط اقلیمی ایفا می‌کنند. مدیریت پایدار این منابع مستلزم درکی عمیق

از ویژگی‌های فیزیکی و تغییرات زمانی و مکانی آن‌هاست [۱]. در این میان، سدها به‌عنوان محیط‌های آبی کنترل‌شده و انسان‌ساخت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از این رو، شناخت دقیق ساختار لایه‌ای و تغییرات عمقی در این گونه محیط‌ها می‌تواند به

بهینه‌سازی بهره‌برداری، کاهش رسوب‌گذاری و بهبود پیش‌بینی رفتار حرارتی-هیدرودینامیکی آن‌ها کمک کند [۱].

یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعه محیط‌های آبی، سرعت صدا در آب است که به عواملی همچون دما، شوری و فشار (عمق) وابسته است [۲]. تغییرات این مولفه‌ها موجب تغییر در سرعت انتشار صدا در آب می‌شود و روابط تجربی نظیر معادله‌های مدوین، مکنزی، چن و میلرو و دل گروسو، این ارتباط را در قالب فرمول‌های ریاضی توصیف می‌کنند [۲]. داده‌های دقیق لایه‌ای سرعت صدا در پهنه‌های آبی در حوزه‌های مهندسی و نظامی دارای کاربرد حیاتی است. برای نمونه، در استخراج لایه‌بندی حرارتی، سامانه‌های سونار و ناوبری زیرسطحی، گرادیان سرعت صدا می‌تواند موجب انحراف مسیر امواج شده و خطا در تعیین موقعیت یا برآورد فاصله ایجاد کند. بنابراین، برآورد دقیق سرعت صدا در اعماق مختلف پهنه‌های آبی، برای بهبود عملکرد سامانه‌های صوتی زیرآبی ضروری است. سرعت صدا در محیط‌های آبی به‌عنوان یک شاخص حساس و کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در درک پویایی‌های هیدروفیزیکی ایفا می‌کند. وابستگی زیاد سرعت صدا به پارامترهای مهمی نظیر دما، شوری و فشار، آن را به اطلاعات مهمی برای پایش شرایط لایه‌بندی ستون آب، ردیابی جریان‌ها و تحلیل فرآیندهای ایجاد اختلاط تبدیل کرده است. این اطلاعات، پایه مدل‌سازی دقیق هیدرودینامیک مخازن، ارزیابی کیفیت آب و پخش آلاینده‌ها را تشکیل می‌دهد. بنابراین، توسعه روش‌های نوین پایش سرعت صدا نه تنها درک بنیادی از محیط‌های آبی را عمیق‌تر می‌سازد، بلکه گامی مؤثر در راستای مدیریت علمی،

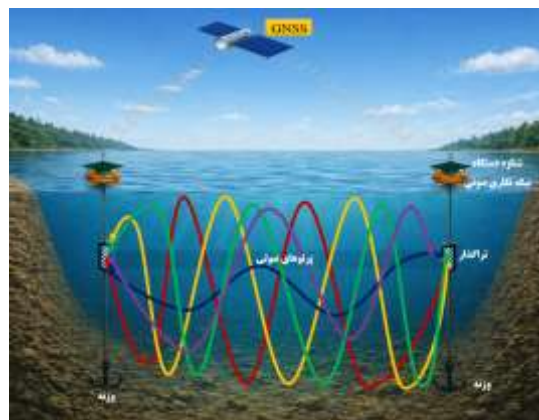
پایدار و ایمن این اکوسیستم‌های باارزش محسوب می‌شود [۲].

روش متداول برای ثبت اطلاعات سرعت صدا در محیط‌های آبی، شامل استفاده از سامانه‌های CTD^۱ و SVP^۲ است [۲]. CTD به‌طور همزمان کمیت‌های هدایت الکتریکی، دما و فشار را در اعماق مختلف اندازه‌گیری کرده و سپس سرعت صدا را بر پایه روابط تجربی محاسبه می‌کند. در سیستم‌های SVP، سرعت صدا مستقیماً با ارسال امواج صوتی کوتاه و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پرتوی صوتی، محاسبه می‌شود. این روش‌ها در حالی که دقت قابل قبولی دارند، عمدتاً محدود به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای یا تک‌محوری هستند و تصویر یکپارچه و با وضوح بالا از ساختار لایه‌ای محیط در مقیاس وسیع ارائه نمی‌دهند. محدودیت‌های اصلی این روش‌ها شامل پوشش مکانی محدود، کاهش دقت در شرایط محیطی نامساعد، وابستگی به حضور فیزیکی، هزینه‌های عملیاتی بالا و همچنین خطاهای ناشی از تقریب‌های تجربی در محاسبات است. این محدودیت‌ها به‌ویژه در مخازن سد، که تغییر وضعیت لایه‌بندی عمقی آب در مقیاس زمانی و مکانی کوچک رخ می‌دهد، مانع از دستیابی به داده‌های نمایانگر ساختار محیط با تفکیک مکانی و زمانی مناسب می‌شود [۲].

در مقابل رویکردهای سنتی برآورد سرعت صدا در آب، فناوری تیکه‌نگاری صوتی با بهره‌گیری از انتشار امواج صوتی در اعماق مختلف بین ایستگاه‌های صوتی، امکان بازسازی توزیع سرعت صدا در مقیاس وسیع را فراهم می‌نماید [۳] (شکل ۱).

را داراست. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تیکه‌نگاری صوتی قادر است نیمرخ‌های عمودی سرعت صدا را با دقت مناسب بازسازی کرده و با داده‌های مستقیم ابزارهایی مانند CTD و SVP مطابقت داشته باشد [۱۰].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی از تیکه‌نگاری صوتی برای بازسازی نیمرخ‌های عمودی سرعت صدا استفاده کرده‌اند و نتایج را با اندازه‌گیری به روش‌های مرسوم مورد ارزیابی قرار داده‌اند. به عنوان نمونه، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) یک آزمایش اندازه‌گیری سرعت صدا با دو ایستگاه CAT به فاصله ۱۴۰ متر که در عمق ۱۰ متر از سطح آب قرار داده شده‌اند، در دریاچه هزار جزیره^۸ هانگژو^۹ چین، با بسامد ۵۰ کیلوهرتز انجام دادند. پنجره‌های زمانی، که توسط شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه تعیین می‌شوند، برای شناسایی اوج‌های رسیدن چند مسیری و بدست آوردن زمان‌های پیمایش پرتو صوتی مربوطه استفاده شد. نیمرخ سرعت صدا به چهار لایه تقسیم شد و با حل معکوس تنظیم شده محاسبه شدند. نتایج سازگاری خوبی با اندازه‌گیری‌های CTD نشان داد [۱۱]. زو و همکاران (۲۰۲۱) به پایش سرعت صدای میانگین لایه‌ای در دریاچه هوانگ کای چانگشا هوان^{۱۰} چین در امتداد دو برش عمودی، توسط تیکه‌نگاری صوتی سه ایستگاهی با تمرکز بر عملکرد روش لایه‌بندی معکوس پرداختند. بسامد تراگذارها^{۱۱} ۵۰ کیلوهرتز، به فاصله ۲۷۰ و ۲۲۴ متر از هم که در عمق ۲۰، ۲۰ و ۱۶/۹ متر از سطح آب قرار داده شده بودند. اطلاعات پیمایش صوتی چند مسیر از طریق ردیابی پرتو با استفاده از داده‌های توپوگرافی با دقت بالای بدست آمده از طریق ADCP^{۱۲} سوار بر کشتی در طول



شکل ۱. شماتیک نحوه ارسال امواج بین دو ایستگاه

تیکه‌نگاری صوتی و اجزای آن (تهیه‌شده توسط نگارندگان)

تیکه‌نگاری صوتی با توجه به محیط آبی به سه دسته اقیانوسی (OAT^۳)، ساحلی (CAT^۴) و رودخانه‌ای (FAT^۵) تقسیم می‌شود. تنها تفاوت سه نوع دستگاه OAT، CAT و FAT در بسامد امواجی است که ارسال می‌کند [۲]. فناوری تیکه‌نگاری صوتی به‌منظور پایش اقیانوس‌ها از امواج صوتی با بسامدهای ۵۷ هرتز [۴] تا ۸۰۰ هرتز [۵]، به‌منظور پایش جریان‌های دریایی از بسامدهای ۵ کیلوهرتز [۶] و ۱۰ کیلوهرتز [۷] و به‌منظور پایش رودخانه‌ها از بسامدهای ۳۰ کیلوهرتز [۸] و ۵۰ کیلوهرتز [۹] استفاده می‌کند. بنابراین، در مقایسه با سایر ابزارهای صوتی نظیر ADCP^۶ و AVM^۷ (با بسامدهای ۳۵ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز)، قابلیت انتشار امواج در فواصل طولانی‌تری را دارد. همچنین بر خلاف دستگاه‌های ADCP و AVM که الگوی انتشار امواج صوتی در راستای یک خط مستقیم انجام می‌شود، در این روش امواج صوتی در کل مقطع محیط آب انتشار می‌یابد و نیازی به پس‌پردازش‌های پیچیده نیست.

فناوری تیکه‌نگاری صوتی، مزایای کلیدی از جمله پوشش مکانی گسترده، تولید داده‌های یکپارچه عمودی-افقی و عملکرد خودکار و بدون نیاز به اپراتور

آزمایش شناسایی شد. در این مطالعه برش‌های عمودی بین ایستگاه‌های صوتی به لایه‌های مختلفی تقسیم شدند (۲، ۳ و ۵ لایه) تا روش‌های معکوس تقسیم لایه‌ها در انواع مختلف از پیش تعیین شده بررسی شود [۱۲]. زو و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از رویکرد «شبکه میانگین» و روش «ناحیه اعتماد»، توانستند دقت بالایی در پایش تغییرات سرعت صدا به‌دست آورند. آن‌ها یک آزمایش میدانی در مخزن هوانگکای در شهر چانگشا^{۱۳} (چین) طی بازه ۲۸ فوریه تا ۷ مارس ۲۰۲۲ اجرا کردند که شامل پنج ایستگاه تیکه‌نگاری با بسامد ۵۰ کیلوهرتز بود. چهار ایستگاه در یک مقطع با عمق‌های متفاوت نصب شدند و ایستگاه پنجم در فاصله حدود ۶۵۰ متری مستقر گردید. تحلیل داده‌های این آزمایش نشان داد که بازسازی سرعت صدا با روش ناحیه اعتماد، تطابق مناسبی با داده‌های حسگر سرعت صدا دارد و از نظر صحت و قابلیت اطمینان تأیید می‌شود [۱۳].

در ایران، نخستین مطالعات میدانی در زمینه تیکه‌نگاری صوتی توسط بحرینی مطلق و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد [۱۴]. آن‌ها با معرفی این فناوری به عنوان روشی نوین برای پایش پیوسته سرعت متوسط جریان و دمای آب، یک آزمایش در کانال آب کوثر دانشگاه مالک‌اشتر طراحی و اجرا کردند. در پژوهش دیگری توسط بحرینی مطلق و همکاران (۱۳۹۸)، علاوه بر آزمون قابلیت‌های سامانه تیکه‌نگاری صوتی، به بررسی الگوی انتشار صوتی زیر آب بر پایه تئوری پرتو نیز پرداخته شد که نتایج آن نشان‌دهنده کارایی و امکان‌پذیری این فناوری در شرایط رودخانه‌ای بود [۱۵]. بحرینی مطلق و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه مروری به بررسی سه فناوری اصلی صوتی برای پایش

جریان در رودخانه‌ها شامل روش داپلر (ADCP)، روش زمان طی شده و روش تیکه‌نگاری صوتی پرداخته و مزایا و معایب هر یک را مقایسه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که روش تیکه‌نگاری صوتی با انتشار امواج در کل عمق آب، قادر به اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی بدون نیاز به محاسبات پیچیده و واسنجی است، هرچند مانند روش زمان طی شده به نقشه‌برداری بستر رودخانه نیاز دارد [۱۶].

مطالعه مروری بحرینی مطلق و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی مبانی نظری روش تیکه‌نگاری صوتی و پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه پرداخته و کارایی این فناوری را در پایش دما و جریان‌های اقیانوسی در مقیاس‌های وسیع (تا ده‌ها هزار کیلومتر) نشان داده است. در این مقاله تأکید شده که با انتقال فناوری تیکه‌نگاری صوتی به ایران، به‌کارگیری این روش در شمال اقیانوس هند و تنگه هرمز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای پژوهشگران و تصمیم‌سازان فراهم آورد [۱۷]. حسین زاده اصل و همکاران (۱۴۰۲)، در مطالعه‌ای به پایش سرعت جریان در عمق مخزن سد لتیان با فاصله دو ایستگاه ۱۶۱۷ متر و بسامد ۳۰ و ۱۰ کیلوهرتز پرداختند [۱]. حسین زاده اصل و همکاران (۱۴۰۴)، در مطالعه دیگری به شناسایی پرتوهای ویژه با روش تئوری پرتو در مخزن سد لتیان به کمک سامانه تیکه‌نگاری صوتی پرداختند. در این مطالعه فاصله بین دو ایستگاه صوتی ۱۶۱۷ متر و بسامد دستگاه‌های صوتی ۳۰ و ۱۰ کیلوهرتز بود [۱۸].

همچنین در ایران، خلیل‌آبادی (۲۰۲۲) به مدل‌سازی عددی دوبعدی انتشار امواج صوتی در محیط آب‌های کم‌عمق با استفاده از روش مشخصه‌ها (MOC) پرداخته است. در این پژوهش، معادلات وابسته به زمان

اولر در شرایط آدیاباتیک درون یک موج بر آب کم عمق متشکل از یک لایه همگن آب بر روی بستر صلب حل شده و پایداری و دقت روش MOC در کنار روش نیمه-لاگرانژ برای انتشار موج صوتی در موج بر نشان داده شده است [۱۹]. مطالعه خلیل آبادی و همکاران (۲۰۲۳) به الگوسازی انتشار امواج صوتی زیر آب در خلیج عمان با استفاده از روش‌های مختلف حل معادلات صوتی (از جمله نظریه پرتو، میدان سریع و معادله سهموی) پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش بسامد و عمق، زمان محاسبه به سرعت افزایش می‌یابد و الگوهای صوتی در بسامدهای بالا (به جز بل هوپ) قابل اجرا نیستند [۲۰]. مطالعه خلیل آبادی و دانش مهر (۱۴۰۲) با استفاده از داده‌های دما و شوری طی یک دوره آماری ۲۰ ساله در اقیانوس هند، به محاسبه نیم‌رخ سرعت صدا با فرمول مکنزی و تحلیل تغییرات فصلی آن پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داد که آب دریا دارای چینه‌بندی چگالی و شیب‌های دمایی فصلی و دائمی بوده که در نتیجه آن، کانال‌های صوتی فصلی و دائمی در اعماق اقیانوس تشکیل می‌گردند [۲۱].

گام نخست در به کارگیری فناوری تیکه‌نگاری صوتی برای استخراج لایه‌بندی حرارتی و پایش دمایی مخزن سد، رهگیری پرتوها^{۱۴} و شناسایی پرتوهای ویژه است. در این مرحله، با استفاده از شبیه‌سازی، مسیر انتشار امواج صوتی بین ایستگاه‌ها تعیین می‌شود تا پرتوهای انتقال یافته (پرتوهای ویژه) که برای شناسایی نقاط اوج و حل مسئله معکوس ارزشمند هستند، مشخص گردند [۲].

پس از انتخاب پرتوها، نوبت به حل مسئله معکوس^{۱۵} می‌رسد که یکی از بخش‌های اساسی

تیکه‌نگاری مقطعی محسوب می‌شود. در حقیقت، هدف اصلی در تیکه‌نگاری، وارون‌سازی زمان‌های پیمایش برداشت‌شده برای تعیین میدان یک پارامتر (اینجا سرعت صدا در لایه‌های مختلف) است. بدین منظور، دامنه محاسباتی (صفحه قائم) به چندین لایه تقسیم‌بندی شده و با استفاده از زمان‌های پیمایش ثبت‌شده برای پرتوهای متعددی که از اعماق گوناگون عبور کرده‌اند، سرعت صدا در هر لایه برآورد می‌شود [۲].

در مطالعه حاضر، امکان‌سنجی و روش به کارگیری تیکه‌نگاری صوتی برای اندازه‌گیری‌های لایه‌ای سرعت صدا در محیط آبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تمرکز پژوهش حاضر بر توسعه چارچوبی است که با ترکیب رویکردهای رهگیری پرتو و حل معکوس به روش‌های پایدار، امکان بازسازی سرعت صدا در لایه‌های مختلف عمق آب را فراهم کند. این چارچوب ضمن کاهش عدم قطعیت، قابلیت انطباق با شرایط هندسی و صوتی خاص مخازن سد را نیز خواهد داشت. لذا نوآوری اصلی این تحقیق شامل توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم مناسب برای بازیابی نیم‌رخ عمقی سرعت صدا از داده‌های تیکه‌نگاری صوتی در پهنه‌های آبی و ارزیابی آن در شرایط عملیاتی است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی روش تیکه‌نگاری صوتی در اندازه‌گیری سرعت صدا در پروفیل عمودی آب، مطالعه میدانی در مخزن سد لتیان واقع بر رودخانه جاجرود انجام شد. سد لتیان در فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری شمال شرقی شهر تهران قرار دارد



شکل ۲. موقعیت مکانی محل نصب ایستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در مخزن سد لتیان

۲.۲. شبیه‌سازی پرتوهای صوتی (حل مسئله

پیش‌ران - رهگیری پرتو)

در تحلیل مسائل تیکه‌نگاری صوتی، دو رویکرد اساسی وجود دارد: مسائل پیش‌ران که به شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی (رهگیری پرتو) در محیط می‌پردازند و مسائل معکوس که هدفشان استخراج پارامترهای فیزیکی محیط از داده‌های صوتی اندازه‌گیری شده است. اهمیت حل مسئله پیش‌ران، استفاده از آن در حل مسئله معکوس است که معمولاً از طریق شبیه‌سازی (رهگیری) پرتو انجام می‌گیرد. تغییرات جزئی در فراسنجه‌های آب نظیر دما، شوری، فشار (عمق)، و بسامد موج صوتی، تغییر زیادی در سرعت و در نتیجه نحوه انتشار صدا ایجاد می‌کند.

معادله موج، نظریه حاکم بر تمام مدل‌های ریاضی انتشار صدا است که روش‌های حل متفاوتی برای توصیف چگونگی انتشار امواج صوتی در زیر آب با اعمال شرایط مرزی و محدودیت‌های انتشار، برای این معادله وجود دارد. به علت سادگی و سرعت در محاسبات، متداول‌ترین مدل برای شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج صوتی، روش نظریه پرتو است. در این روش امواج صوتی

و یکی از مهم‌ترین مخازن تأمین آب شرب و تنظیم جریان رودخانه‌های شرق پایتخت به شمار می‌رود. جهت برداشت داده‌های مورد نیاز، دو ایستگاه تیکه‌نگاری صوتی (S1 و S2) در نقاط مشخصی از مخزن مستقر گردیدند تا امکان تبادل امواج صوتی در امتداد مقطع عرضی مخزن فراهم شود (شکل ۲). ایستگاه اول (S1) در عمق ۱/۵ متری از سطح آب و ایستگاه دوم (S2) در فاصله‌ای حدود ۲۴۴ متری ایستگاه اول و نزدیک بدنه سد در عمق ۴/۵ متری مستقر گردید. فاصله و ارتفاع نصب ایستگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که پرتوهای صوتی با عبور از لایه‌های مختلف آب، مسیرهای شکست‌یافته و مستقیم را طی کنند تا امکان تحلیل دقیق نیمرخ سرعت صدا فراهم شود. در فرآیند داده‌برداری، سیگنال‌های صوتی به صورت متقابل و هم‌زمان بین دو ایستگاه با بازه‌های زمانی ۶۰ ثانیه‌ای ارسال و دریافت شدند. نیمرخ تراز کف مخزن بین دو نقطه مورد اشاره از نقشه بسیمتری مخزن سد لتیان استخراج گردید. همچنین برای ارزیابی الگوریتم، نیمرخ دمایی ستون آب هم‌زمان با برداشت اطلاعات تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از دستگاه CTD در عمق مخزن اندازه‌گیری گردید. برداشت میدانی اطلاعات مورد اشاره در روزهای اول و دوم مرداد ماه ۱۴۰۴ (معادل ۲۳ و ۲۴ ژوئیه ۲۰۲۵ میلادی) انجام گرفت. لازم به ذکر است که در زمان برداشت اطلاعات، تمامی دریچه‌های سد بسته بودند و هیچ جریان خروجی از مخزن وجود نداشت؛ شرایطی که موجب پایداری هیدرودینامیکی محیط و فراهم‌شدن بستر مناسب برای انجام اندازه‌گیری‌های دقیق و بدون اغتشاش است.

به صورت پرتوهای صدا با استفاده از قانون اسنل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نظریه پرتو بر مفهوم جبهه موج استوار است.

شبیه‌سازی پرتو، پرتوهای انتقال یافته (پرتوهای ویژه) را مشخص می‌کند که برای شناسایی نقاط اوج و حل مسئله معکوس تنظیم شده ارزشمند هستند. برای این کار ابتدا داده‌های عمق‌سنجی را با در فواصل مشخصی درون‌یابی و رسم می‌گردد. سپس داده‌های CTD، شامل عمق، دما و شوری را در همان فواصل درون‌یابی می‌شود. پس از به‌دست آوردن عمق، دما و شوری در هر عمق، با استفاده از رابطه مدوین سرعت صدای مرجع میانگین عمق به‌دست می‌آید [۲۲]:

$$C(T, Sa, D) = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(Sa - 35) + 0.017D \quad (1)$$

در رابطه (۱)، C سرعت صدا بر حسب متر بر ثانیه، D عمق بر حسب متر (برای بازه ۰ تا ۸۰۰۰ متر)، Sa شوری بر حسب واحد در هزار (PPT) (برای بازه ۰ تا ۴۰ واحد در هزار) و T دما بر حسب درجه سانتی‌گراد (برای بازه ۲ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) است.

شبیه‌سازی (مدل‌سازی) انتشار امواج صوتی تک‌بسامد در محیط‌های غیرهمگن و دارای جریان با معادله هلمهولتز^{۱۶} حل می‌گردد. طبق این روش، شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج صوتی با استفاده از نظریه پرتو با حل معادلات دیفرانسیل زیر انجام می‌شود:

$$\frac{dx}{dt} = \{C(x, z) + u \cdot n\} \cos \theta \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = C(x, z) \sin \theta \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial C(x, z)}{\partial z} \cos \theta \quad (4)$$

که در آن u و C به ترتیب سرعت جریان و سرعت صدا در یک صفحه (x, z) هستند و θ زاویه موج اندازه‌گیری

شده نسبت به خط افقی است دیفرانسیل عادی کوپل شده مرتبه اول (رابطه (۲) تا (۴)) به صورت عددی با روش تفاضل محدود مانند روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم^{۱۷} با در نظر گرفتن شرایط اولیه در موقعیت منبع صوتی ($x = 0, z = z_0, \theta = \theta_0$) حل می‌شود. شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه، با استفاده از داده‌های هدایت الکتریکی-دما-عمق روی خط انتقال انجام می‌شود [۲].

۳.۲. حل مسئله معکوس عمودی (لایه‌ای)

در تیکه‌نگاری صوتی، حل مسئله معکوس عمودی به منظور بازسازی نیمرخ سرعت صدا در لایه‌های مختلف آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، ابتدا می‌بایست پرتوهای صوتی ویژه با زمان‌های عبور متفاوت که از اعماق گوناگون در محدوده مورد مطالعه گذر می‌کنند، شناسایی شوند. پس از تشخیص این پرتوها، محیط محاسباتی در صفحه قائم به لایه‌های متعددی تقسیم‌بندی می‌شود [۲]. آزمایش میدانی تیکه‌نگاری صوتی با انتقال دوسویه صدا بین ایستگاه‌های چندگانه صوتی انجام می‌شود.

انتقال صدای دوسویه در یک برش عمودی، محدود شده بین نقاط بالا و پایین بین دو ایستگاه S_1 و S_2 است که در آن t_1 و t_2 به ترتیب زمان پیمایش صدا از ایستگاه S_1 به S_2 و از S_2 به S_1 است. در صورتی که M پرتو صوتی از N لایه مختلف عبور کنند، زمان پیمایش پرتو i-ام را می‌توان بر اساس رابطه (۵) محاسبه نمود.

$$\sum_{j=1}^N \frac{l_{ij}}{C_{0j} + \delta C_j} = t_{0i} + \delta t_i \quad (5)$$

در رابطه (۵)، δC_j تغییرات سرعت صدا در لایه j، t_{0i} برابر زمان پیمایش مرجع پرتو i، l_{ij} برابر طولی که پرتو

i در لایه j طی می‌کند و C_{0j} برابر سرعت صدای مرجع در لایه j است.

با توجه به سرعت ناچیز جریان در مقایسه با سرعت مرجع صدا (تقریباً ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) در بسیاری از پهنه‌های آبی، از اثر سرعت جریان آب در محاسبات صرف نظر می‌شود. در مرحله بعد، با در نظر گرفتن بسط تیلور^{۱۸} تحت $\delta C \gg C_0$ و نادیده گرفتن ترم‌های مرتبه دوم و بالاتر و همچنین نادیده گرفتن حاصل ضرب $\delta C_1 \delta C_2$ به علت ناچیز بودن حاصل، ماتریس جواب به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید. برای این کار، δC_1 ها به عنوان ماتریس مجهول به صورت ضرب یک ماتریس یک ستونی با تعداد سطر برابر با تعداد لایه‌های مورد نظر برای بازسازی سرعت صوت (در اینجا به عنوان نمونه ۵ لایه)، در یک ستون نوشته می‌شود. $\frac{l_{ij}}{C_{0j}^2}$ ها نیز به عنوان ماتریس معلوم جدا می‌شوند.

$$-\begin{bmatrix} \frac{l_{11}}{C_{01}^2} & \frac{l_{12}}{C_{02}^2} & \frac{l_{13}}{C_{03}^2} & \frac{l_{14}}{C_{04}^2} & \frac{l_{15}}{C_{05}^2} \\ \frac{l_{21}}{C_{01}^2} & \frac{l_{22}}{C_{02}^2} & \frac{l_{23}}{C_{03}^2} & \frac{l_{24}}{C_{04}^2} & \frac{l_{25}}{C_{05}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta C_1 \\ \delta C_2 \\ \delta C_3 \\ \delta C_4 \\ \delta C_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta t_1 \\ \delta t_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

رابطه (۶) را نیز می‌توان به فرم رابطه (۷) نوشت:

$$y = Ex + n \quad (7)$$

که در آن $y = \{\delta t_i\}$ برای $x = \{\delta C_j\}$ ماتریس مجهول و $E = \left\{ -\frac{l_{ij}}{C_{0j}^2} \right\}$ ماتریس معلوم بوده و شامل بردار خطای زمان پیمایش (n) باشد. توجه شود که تعداد سطرهای ماتریس معلومات (E) معادل تعداد مسیرهای پرتو بین دو ایستگاه و تعداد ستون‌ها برابر تعداد لایه‌های تقسیم‌بندی شده می‌باشد.

حل مسائل معکوس نیازمند به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ای است که بتوانند عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در اندازه‌گیری‌های صوتی و

پیچیدگی‌های محیط انتشار را مدیریت کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش حل حداقل مربعات^{۱۹}، روش حل حداقل مربعات میرا^{۲۰} و روش تنظیم شده تیخونوف^{۲۱} اشاره کرد که هر کدام با رویکردهای متفاوتی به کمینه‌سازی خطای مدل در تابع هدف می‌پردازند [۲۳]. در پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت خطی مسئله که به صورت رابطه‌ای بین زمان پیمایش و سرعت صدا نوشته شد، روش تنظیم‌شده تیخونوف به عنوان چارچوب اصلی حل مسئله معکوس انتخاب شد [۲۴]. این روش با افزودن قیدی هموارساز به تابع هدف، ضمن کنترل ناپایداری ذاتی مسائل بدوضع^{۲۲}، پاسخی پایدار و از نظر فیزیکی پذیرفتنی ارائه می‌دهد. رابطه (۸) تابع هدف مورد نظر در روش تنظیم شده تیخونوف و رابطه (۹) حل آن را نشان می‌دهد:

$$J = (y - Ex)^T (y - Ex) + \lambda x^T H^T x \quad (8)$$

$$\hat{x} = (E^T E + \lambda H^T H)^{-1} E^T y \quad (9)$$

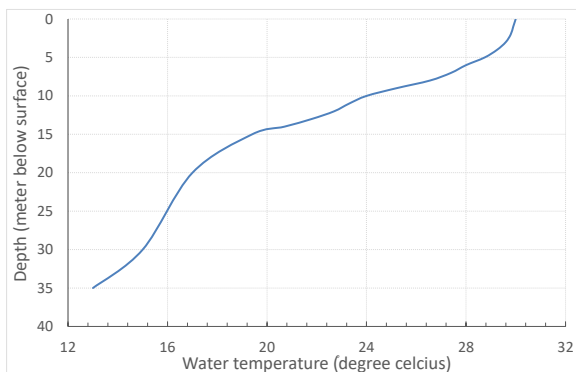
که در آن λ ضریب لاگرانژ^{۲۳}، بالانویس T نشان‌دهنده ترانزپوز ماتریس^{۲۴} و H ماتریس تنظیم^{۲۵} است که از عملگر مشتق دوم $\frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$ برای هموار کردن^{۲۶} حل از طریق اعمال میانگین متحرک^{۲۷} بر سه لایه متوالی بدست می‌آید.

۳. نتایج و بحث

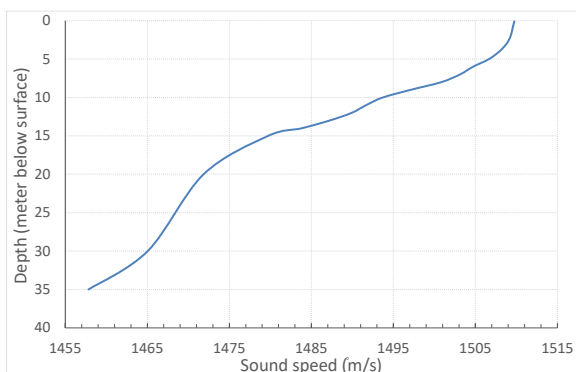
۱.۳. نتایج شبیه‌سازی پرتوهای صوتی

مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در محیط‌های آبی نظیر مخازن سدها یکی از مراحل اساسی در تحلیل داده‌های تیکه‌نگاری صوتی است و در این پژوهش با استفاده از رویکرد رهگیری پرتو انجام گرفته است. با توجه به ویژگی‌های هیدرودینامیکی مخزن سد لتیان و تقریباً

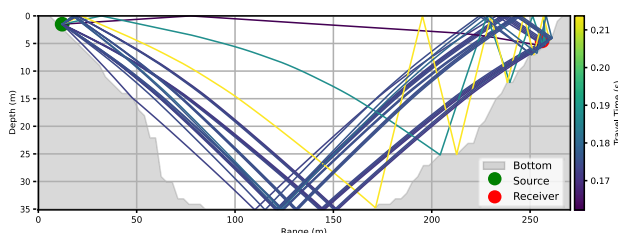
که در مراحل بعدی، اوج‌های اول و دوم مسیره‌های پرتوها شناسایی شوند. تمامی مراحل شبیه‌سازی پرتوهای صوتی در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی پایتون و کتابخانه‌های مرتبط با محاسبات عددی و انتشار امواج، انجام شده است.



شکل ۳. دما در عمق مخزن سد لتیان در ساعت ۱۴ روز اول مرداد ۱۴۰۴ (اطلاعات CTD)



شکل ۴. سرعت صوت محاسبه شده در عمق مخزن سد لتیان در ساعت ۱۴ روز اول مرداد ۱۴۰۴ (بر اساس اطلاعات CTD و رابطه ۱)



شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی رهگیری پرتو در مخزن سد لتیان

شوری نزدیک به صفر، تأثیر مؤلفه شوری در معادله فوق ناچیز در نظر گرفته شد و تغییرات سرعت صدا عمدتاً تابعی از نیمرخ دمایی عمق بود. بر اساس داده‌های برداشت شده توسط دستگاه CTD (شکل ۳)، نیمرخ سرعت صدا در محیط با استفاده از رابطه (۱) استخراج گردید (شکل ۴). بدین ترتیب، سرعت صدا در لایه‌های سطحی در حدود ۱۵۱۰ متر بر ثانیه و در لایه‌های عمیق‌تر حدود ۱۴۶۰ متر بر ثانیه برآورد شد که نشان‌دهنده‌ی گرادیان منفی سرعت صدا با افزایش عمق به دلیل کاهش دمای آب است.

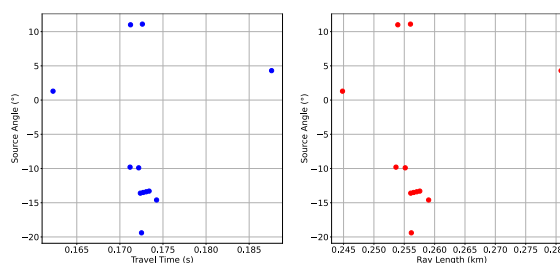
برای محاسبه سرعت صدا در نیمرخ عمقی مخزن با استفاده از داده‌های تیکه‌نگاری صوتی، عمق مخزن مورد مطالعه به پنج لایه مجزا با ضخامت ۷ متر (بین سطح تا عمق ۳۵ متری) تقسیم‌بندی شد. در ادامه، برای رهگیری پرتوها، تعداد ۴۰۰ پرتو از زاویه منفی ۲۰ درجه تا زاویه مثبت ۲۰ درجه رهگیری شدند. مسیره‌های پرتوهای صوتی را که در این فرآیند ثبت شده‌اند، به‌طور واضح نمایش می‌دهد. از میان ۴۰۰ پرتو رهگیری شده، تنها ۳۵ پرتو به ایستگاه دوم رسیدند (شکل ۵).

همچنین در شکل ۶، نموداری که زمان پیمایش و طول مسیر پرتوها را نسبت به زاویه پرتاب به نمایش می‌گذارد، بیانگر این است که بیشترین تعداد پرتوها، مسافتی در حدود ۲۵۰ متر تا ۳۰۰ متر را طی کرده‌اند. پرتوهایی که با زاویه‌های بین منفی ۵ تا مثبت ۵ درجه پرتاب شدند، کمترین تعداد را به خود اختصاص داده‌اند. این نکته اهمیت زاویه پرتاب را در تعیین مسافت پیمایش پرتوها نشان می‌دهد. در نهایت، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر و انتخاب پرتوهای ویژه، لازم است

نمونه‌برداری مربوط به هر اوج استخراج گردید و سرعت متوسط صوت محاسبه شد (شکل ۸).

۳.۳. برآورد سرعت صدا

پس از رهگیری پرتو، انتخاب پرتو ویژه، محاسبه طول آن در هر لایه و با توجه به انتخاب اوج‌های اول و دوم و اختلاف زمان رسیدن داده‌های صوتی همزمان ارسال‌شده از ایستگاه یک به دو و دو به یک، برآورد سرعت صدا در لایه‌های مختلف با استفاده از حل مسئله معکوس بر اساس به کارگیری روش تنظیم‌شده تیخونف انجام شد که نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است. روند کاهشی سرعت صدا با افزایش عمق با نیم‌مرخ سرعت صدای اندازه‌گیری شده توسط CTD همخوانی دارد. درونیابی سرعت صوت در عمق مخزن سد لتیان در طول دوره برداشت اطلاعات تیکه‌نگاری صوتی نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است که نشان دهنده ثبات نسبی شرایط در طول حدود ۲۴ ساعت اندازه‌گیری صورت گرفته می‌باشد. دلیل این امر به عدم تغییر شرایط دمایی آب در این مدت و جریان بسیار ناچیز ورودی و خروجی مخزن و در نتیجه عدم تغییر تراز آب در این بازه زمانی مرتبط است. **Error! Reference source not found.**جدول ۱، مقایسه بین سرعت صدای متوسط هر لایه که از داده‌های CTD به دست آمده با سرعت صدای متوسط هر لایه حاصل از تیکه‌نگاری صوتی ارائه می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر، در جدول ۲ اختلاف بین نتایج دو روش را نشان می‌دهد. همچنین، به منظور بررسی تأثیر زمان بر سرعت صدا، اختلاف نتایج در مقاطع زمانی ۲۳/۶، ۲۴/۰ و ۲۴/۶ درج شده است. کمترین اختلاف بین دو روش اندازه‌گیری مربوط به لایه‌های پنجم و چهارم



شکل ۶. زمان پیمایش (چپ) و طول مسیر پرتو (راست) نسبت به زاویه پرتاب پرتو صدا

۲.۳. انتخاب اوج‌های اول و دوم

شکل ۷ نمایانگر پشته‌های هم‌بستگی با نسبت سیگنال به نویز (SNR) مربوط به مسیرهای انتشار از ایستگاه اول به دوم و برعکس می‌باشند. در این شکل، نقاط قرمز رنگ مربوط به اوج‌های اول و نقاط سبز رنگ مربوط به اوج‌های دوم تشخیص داده‌شده در سیگنال‌ها هستند. برای داده‌های مخزن سد لتیان، سرعت صدا در محدوده کف مخزن ۱۴۶۰ متر بر ثانیه و در سطح آب به ۱۵۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد. با در نظر گرفتن سرعت متوسط صدا حدود ۱۴۸۰ متر بر ثانیه و فاصله ۲۴۴ متری بین دو ایستگاه، زمان رسیدن پرتوهای صوتی در محدوده ۱۶۵ میلی‌ثانیه قرار می‌گیرد. لذا در تحلیل حاضر، پرتوهایی با زمان رسیدن بیش از ۱۶۵ میلی‌ثانیه به عنوان پرتوهای ویژه انتخاب می‌شوند. پرتو رهگیری شده با زاویه پرتاب ۱۵/۳ درجه و زمان رسیدن ۱۷۵ میلی‌ثانیه به عنوان پرتو ویژه انتخاب شد. همچنین، با توجه به نتایج مربوط به اوج اول و دوم در شکل ۷، این محدوده زمانی تأیید می‌شود که با حداکثر اختلاف زمانی یک میلی‌ثانیه بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های صوتی گردآوری‌شده با سامانه تیکه‌نگاری صوتی، قابل قبول است. پس از شناسایی اوج‌های اول و دوم در سیگنال‌های دریافتی، مقادیر زمان پیمایش و زمان

محیط‌های آبی است. همچنین مقایسه سرعت صدا در پنج لایه مختلف آب توسط CTD و تیکه‌نگاری صوتی شکل ۱۱ راست آمده است.

جدول ۱. سرعت متوسط صدا هر لایه حاصل از اطلاعات CTD

و تیکه‌نگاری صوتی (CAT)

Layer number (from surface)	Sound velocity (m/s)	
	CTD	CAT (t=23.6)*
1	1507.49	1513.90
2	1493.82	1500.70
3	1476.26	1481.08
4	1469.60	1472.08
5	1463.62	1464.50

* منظور از ۲۳.۶، روز ۲۳ ژوئیه ۲۰۲۵، ساعت ۱۴:۲۴ است.

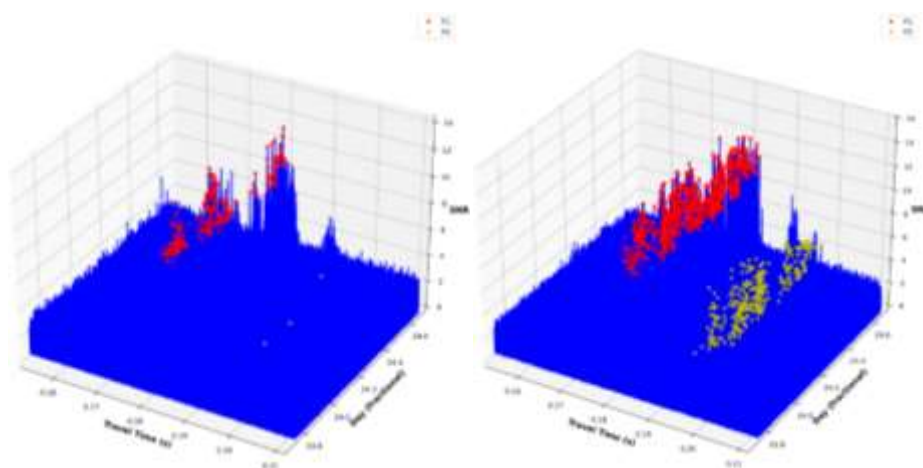
جدول ۲. اختلاف بین سرعت صدای متوسط CAT و CTD

در لایه‌های مختلف آب

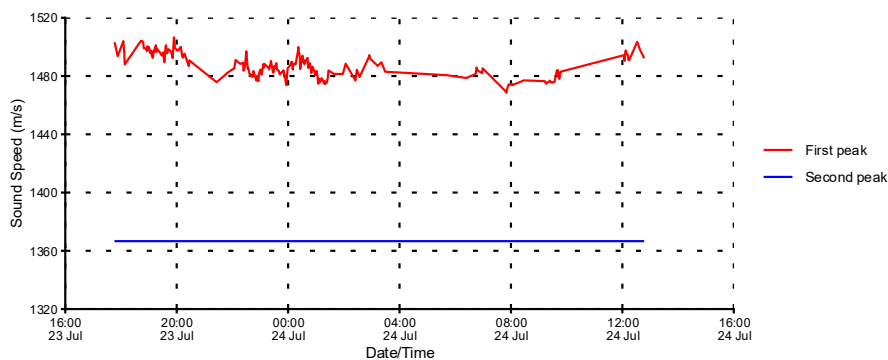
Layer number (from surface)	Sound velocity difference (m/s)		
	t=23.6	t=24.0	t=24.6
1	6.41	6.42	6.42
2	6.88	6.89	6.89
3	4.26	4.26	4.27
4	2.48	2.47	2.48
5	0.88	0.86	0.89

است که نشان‌دهنده دقت بالای تیکه‌نگاری صوتی در این عمق‌ها است. در مقابل، بیشترین اختلاف در لایه اول مشاهده شده است. این مسئله را می‌توان با الگوی پرتوهای صوتی توجیه کرد. همان‌طور که در شکل ۵ مشهود است، پرتوهای رهگیری شده عمدتاً در نزدیکی کف مخزن متمرکز شده‌اند و با نزدیک شدن به سطح آب، تراکم پرتوها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، پرتوهای صوتی در لایه‌های اول و دوم مسیر کمتری را طی می‌کنند که این امر منجر به کاهش دقت در تخمین سرعت صدا در این لایه‌ها می‌شود. در مقابل، در لایه‌های عمقی‌تر، طول پیمایش پرتوها افزایش یافته و دقت اندازه‌گیری بهبود می‌یابد.

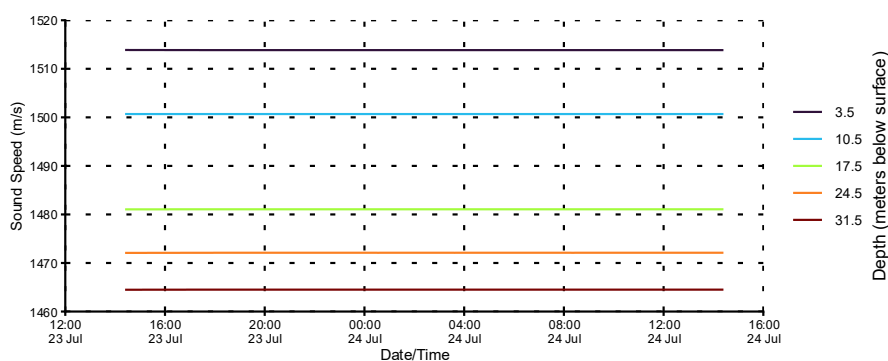
شکل ۱۱ چپ، نمودار مقایسه بین سرعت صدای متوسط لایه‌های مختلف آب بر اساس اطلاعات CTD و تیکه‌نگاری صوتی را نشان می‌دهد. همبستگی بیش از ۰/۹۹ بین سرعت‌های برآورد شده برای صدا در لایه‌های مختلف آب از دو روش مؤید قابلیت اعتماد روش تیکه‌نگاری صوتی در برآورد سرعت صدا در



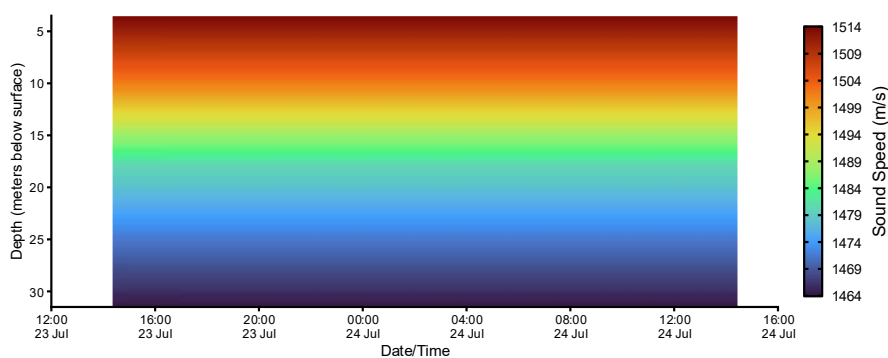
شکل ۷. مقادیر سیگنال به نویز و زمان پیمایش همه امواج صوتی به همراه اوج‌های اول (نقاط قرمز) و دوم (نقاط سبز) از ایستگاه یک به دو (راست) و از ایستگاه دو به یک (چپ) در طول دوره برداشت اطلاعات تیکه‌نگاری صوتی



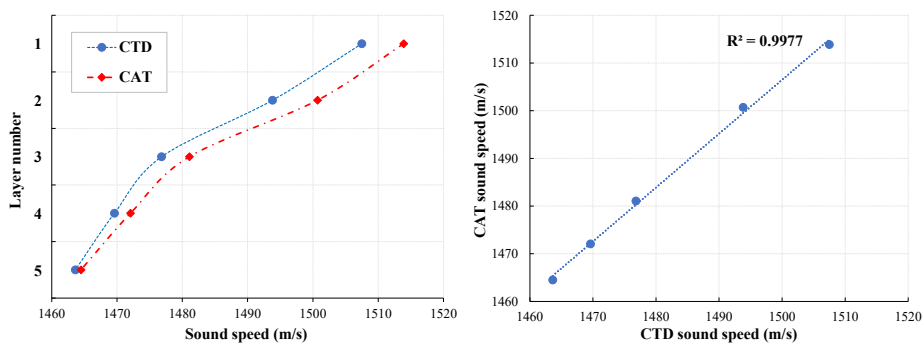
شکل ۸. سرعت متوسط صدا محاسبه شده از اوج‌های اول و دوم مشترک در انتقال پرتوی صدا از ایستگاه یک به دو و برعکس



شکل ۹. سرعت متوسط صدا در هر یک از لایه‌های مخزن سد لتیان (تفکیک ۷ متری) در طول دوره ثبت اطلاعات تیکه‌نگاری صوتی



شکل ۱۰. پروفیل عمقی سرعت صدا در مخزن سد لتیان در طول دوره ثبت اطلاعات تیکه‌نگاری صوتی



شکل ۱۱. مقایسه سرعت متوسط صدای هر لایه آب برآورد شده CTD و تیکه‌نگاری صوتی (CAT) (راست) و مقادیر آن‌ها در لایه‌های مختلف عمقی آب (چپ)

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی روش تیکه‌نگاری صوتی برای بازسازی نیم‌رخ عمودی سرعت صدا در محیط‌های آبی کم‌عمق مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، الگوریتمی برای پردازش داده‌های صوتی شامل رهگیری پرتو، شناسایی پرتوهای ویژه، تعیین نقاط اوج و محاسبه اختلاف زمان رسیدن، توسعه داده شد. مطالعه میدانی در مخزن سد لتیان با استقرار دو ایستگاه صوتی در ۵ لایه عمقی (با ضخامت ۷ متر) انجام گرفت و سرعت متوسط صدا در هر لایه با حل مسئله معکوس به روش تنظیم‌شده تیخونف برآورد گردید.

مقایسه نتایج حاصل از تیکه‌نگاری صوتی با داده‌های مرجع CTD نشان‌دهنده تطابق قابل‌قبول این دو روش بود؛ به‌گونه‌ای که کمترین اختلاف در لایه کف (۸۸/۰ متر بر ثانیه) و بیشترین آن در لایه سطحی (۴۱/۶ متر بر ثانیه) مشاهده شد. این نتایج گویای قابلیت اطمینان فناوری تیکه‌نگاری صوتی در پایش پیوسته و لایه‌ای سرعت صدا در مخازن سدهاست. همچنین دقت مناسب این روش در شرایط لایه‌بندی حرارتی قابل‌توجه ستون آب، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن برای کاربرد در مطالعات هیدرودینامیکی و مدیریت کیفی منابع آبی است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، این روش در مقیاس‌های بزرگتر و با آرایه‌های گیرنده/فرستنده گسترده‌تر مورد آزمایش قرار گیرد تا قابلیت‌های آن در محیط‌های پیچیده‌تر آبی نیز ارزیابی شود.

۵. ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

۱.۵. مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله تقریباً به شکل زیر بوده است:

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، برداشت اطلاعات میدانی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
نویسندگان دوم و چهارم: مفهوم‌سازی، برداشت اطلاعات میدانی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده سوم: مشاوره، بازبینی و تکمیل متن مقاله، تحلیل‌های آماری

۲.۵. تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

۳.۵. حامی مالی

تحقیق حاضر حاصل انجام طرح پژوهشی در راستای حمایت از توسعه فناوری توسط صندوق نوآوری و شکوفایی ریاست جمهوری به شماره ۱۱۸۷/ح.ق/۱۴۰۳ است. همچنین مولفین از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته به واسطه حمایت‌های صورت گرفته برای انجام تحقیق تشکر می‌نمایند.

۴.۵. سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

۶. منابع

- [۱] حسین‌زاده‌اصل، رضا، مهدی یاسی، و مسعود بحرینی مطلق. «تعیین سرعت جریان آب در لایه‌های مخزن سد لتیان به کمک فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی». *تحقیقات آب و خاک / ایران* ۵۴، ش. ۶ (۱۴۰۲): ۸۵۹-۸۷۵. doi: 10.22034/ceej.2023.56789.1835.
- [2] Kaneko, A., X. H. Zhu, and J. Lin. *Coastal Acoustic Tomography*. Elsevier, 2020. doi.org/10.1016/C2018-0-04180-8.
- [3] Munk, W., P. Worcester, C. Wunsch, and J. F. Lynch. "Ocean Acoustic Tomography." *The Journal of the Acoustical Society of America* 99, no. 6 (1996): 3275-3276. doi.org/10.1121/1.414903.
- [4] Baggeroer, A., and W. Munk. "The Heard Island Feasibility Test." *Physics Today* 45 (1992): 22-30. doi.org/10.1063/1.881317.
- [5] Taniguchi, N., A. Kaneko, Y. Yuan, N. Gohda, H. Chen, G. Liao, et al. "Long-term Acoustic Tomography Measurement of Ocean Currents at the Northern Part of the Luzon Strait." *Geophysical Research Letters* 37 (2010): L07605. doi.org/10.1029/2009GL042327.
- [6] Chen, M., F. Syamsudin, A. Kaneko, N. Gohda, B. M. Howe, H. Mutsuda, A. H. Dinan, et al. "Real-Time Offshore Coastal Acoustic Tomography Enabled With Mirror-Transpond Functionality." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (2018): 1-11. doi.org/10.1109/JOE.2018.2878260.
- [7] Syamsudin, F., N. Taniguchi, C. Zhang, A. D. Hanifa, G. Li, M. Chen, H. Mutsuda, et al. "Observing Internal Solitary Waves in the Lombok Strait by Coastal Acoustic Tomography." *Geophysical Research Letters* 46 (2019): 10475-10483. doi.org/10.1029/2019GL084595.
- [8] Al Sawaf, M. B., K. Kawanisi, J. Kagami, M. Bahreinimotlagh, and M. M. Danial. "Scaling Characteristics of Mountainous River Flow Fluctuations Determined Using a Shallow-Water Acoustic Tomography System." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 484 (2017): 11-20. doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.168.
- [9] Bahreinimotlagh, M., K. Kawanisi, M. M. Danial, M. B. Al Sawaf, and J. Kagami. "Application of Shallow-Water Acoustic Tomography to Measure Flow Direction and River Discharge." *Flow Measurement and Instrumentation* 51 (2016): 30-39. doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.08.010.
- [10] Barth, J. A., B. M. Howe, J. A. Mercer, and D. R. Watts. "Measuring Flow in the Coastal Ocean with Acoustic Tomography." *Oceanography* 24, no. 4 (2011): 118-127. doi.org/10.5670/oceanog.2011.95.
- [11] Huang, H., Y. Guo, G. Li, K. Arata, X. Xie, and P. Xu. "Short-range Water Temperature Profiling in a Lake with Coastal Acoustic Tomography." *Sensors* 20, no. 16 (2020): 4448. doi.org/10.3390/s20164498.
- [12] Xu, S., Z. Xue, X. Xie, H. Huang, and G. Li. "Layer-averaged Water Temperature Sensing in a Lake by Acoustic Tomography with a Focus on the Inversion Stratification Mechanism." *Sensors* 21, no. 22 (2021): 7448. doi.org/10.3390/s21227448.
- [13] Xu, S., G. Li, R. Feng, Z. Hu, P. Xu, and H. Huang. "Tomographic Mapping of Water Temperature and Current in a Reservoir by Trust-Region Method Based on CAT." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 60 (2022): 1-14. doi.org/10.1109/TGRS.2022.3220648.

-
- 6 Acoustic Doppler Current Profiler
 - 7 Acoustic velocity meters
 - 8 Thausand Island
 - 9 Hangzhou
 - 10 Huangca, Changsha, Hunan
 - 11 Transducer frequency
 - 12 Acoustic Doppler Current Profiler
 - 13 Huangca, Changsha, Hunan
 - 14 ray tracing
 - 15 inverse problem
 - 16 Helmholtz equation
 - 17 Fourth-Order Runge-Kutta Method
 - 18 Taylor expansion
 - 19 Least Squares
 - 20 Damped Least Squares
 - 21 Tikhonov's Regularization
 - 22 Cauchy Problems
 - 23 Lagrange Multiplier
 - 24 Transpose of the Matrix
 - 25 Regularization Matrix
 - 26 Smooth the Solution
 - 27 Moving Average