



Determining the layered flow velocity in the Latyan reservoir using acoustic tomography technology

Reza Hosseinzadeh Asl¹ | Mehdi Yasi² | Masoud Bahreini Motlagh³

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hosseinzadeh.reza@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.yasi@ut.ac.ir

3. Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: m.bahreini@wri.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 30, 2023

Revised: June. 26, 2023

Accepted: July. 12, 2022

Published online: Aug. 23, 2023

Keywords:

Acoustic Tomography,
Latian Dam,
Regularization,
Inverse Problem,
Stratified Flow Velocity.

ABSTRACT

Acoustic tomography technology is an advanced method of remote sensing, which has been used and verified by many researchers in recent years to measure flow velocity and temperature in different water environments. The purpose of this research is the feasibility of using this technology in reservoirs of dams to measure the flow velocity in different layers. The basis of this method is to calculate and record the travel time of acoustic rays in the water environment, including the reservoir of the dam. In the first step, the propagation of sound rays from the first station to the second station was simulated. Then, according to the propagated rays and the obtained travel times and solving the inverse problem with the regularization method, the average flow velocity, and layered flow velocity were calculated. In this research, two acoustic stations with mutual transmission with a frequency of 10 kHz were placed in the reservoir of Latian Dam on October 23, 2020. Five layers with a distance of ten meters in depth were selected. The results of solving the adjusted inverse problem showed that the maximum velocity of 0.0006m/s occurs in the first layer (0 to 10 m depth). For the flow velocity of layers, two to five, 0.0003, 0.0001, 0.0002, 0.0001 m/s were calculated respectively, which according to the close to zero flow velocity of the dam reservoir at the time of data collection, the velocity of the flow was obtained with a relatively good approximation. It is suggested that in future studies, data collection should be done when the water discharge valves are open so that the results can be compared with the results of this research.

Cite this article: Hosseinzadeh Asl. R., Yasi. M., & Bahreini Motlagh. M. (2023). Determining the layered flow velocity in the Latyan reservoir using acoustic tomography technology. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (6), 859-875.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358568.669491>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358568.669491>



تعیین سرعت جریان آب در لایه‌های مخزن سد لتیان به کمک فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی

رضا حسین‌زاده اصل^۱ | مهدی یاسی^۲ | مسعود بحرینی مطلق^۳۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Hosseinzadeh.reza@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.yasi@ut.ac.ir۳. پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: m.bahreini@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۶/۱

واژه‌های کلیدی:

پرتونگاری مقطعی صوتی،

ساختار لایه‌ای سرعت جریان،

سد لتیان،

مسئله معکوس.

فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی یک روش پیشرفته از شاخه‌های دانش سنجش از دور است که در سال‌های اخیر توسط محققان متعددی برای اندازه‌گیری سرعت جریان و دما در محیط‌های آبی مختلف مورد استفاده و تأیید قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از این فناوری در مخازن سدها، برای اندازه‌گیری سرعت جریان در لایه‌های مختلف است. اساس این روش بر محاسبه و ثبت زمان پیمایش پرتوهای صوتی در محیط آبی از جمله مخزن سد است. در گام اول انتشار امواج صوتی از ایستگاه اول به ایستگاه دوم شبیه‌سازی شد. سپس با توجه به پرتوهای رهگیری شده، زمان‌های پیمایش به‌دست آمده و حل مسئله معکوس با روش تنظیم‌شده، سرعت جریان میانگین و سرعت جریان لایه‌ای محاسبه شد. در این پژوهش دو ایستگاه صوتی با انتقال دوسویه با بسامد ۱۰ کیلوهرتز در مخزن سد لتیان در اول آبان ۱۳۹۹ قرار داده شد. ۵ لایه در عمق با فاصله ده متر انتخاب شد. نتایج حل مسئله معکوس تنظیم‌شده نشان داد که حداکثر سرعت 0.0006 متر بر ثانیه در لایه اول (عمق ۰ تا ۱۰ متر) رخ می‌دهد. برای سرعت لایه‌های ۲ تا ۵، به ترتیب سرعت‌های 0.0003 ، 0.0001 ، 0.0002 ، 0.0001 بر ثانیه محاسبه شد که با توجه به سرعت نزدیک به صفر مخزن سد در لحظه داده‌برداری با تقریب خوبی سرعت جریان به‌دست آمد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده داده‌برداری در زمان باز بودن دریچه‌های تخلیه آب انجام گیرد تا بتوان نتیجه را با نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه کرد.

استناد: حسین‌زاده اصل، رضا؛ یاسی، مهدی؛ و بحرینی مطلق، مسعود (۱۴۰۲). تعیین سرعت جریان آب در لایه‌های مخزن سد لتیان به کمک فناوری پرتونگاری مقطعی

صوتی،، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۶)، ۷۸۵-۸۵۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358568.669491>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358568.669491>

مقدمه

احداث سد با هدف تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب و همچنین برای تولید انرژی و یا تفریحات آبی همواره مورد تأکید بوده است. اندازه‌گیری سرعت جریان در لایه‌های مختلف مخزن سد برای پایش وضعیت ته‌نشینی رسوباتی که تحت تأثیر رژیم جریان قرار دارند و همچنین برای پایش موقعیت مناسب آبیگری و یا خروجی آب مصرفی در نیروگاه‌های کنار ساحل، جریان غلیظ رسوب در بدنه های آبی، نفوذ شوری در مخازن سدها و تخلیه آب شور از مجراهای عمقی سدها ضروری است (فقیهی راد و همکاران، ۱۳۹۹). برای پایش متغیرهای محیط آبی، از انواع امواج الکترومغناطیسی^۱ (رادپویی)، نوری و صوتی در دانش سنجش از دور استفاده می‌شود؛ ولی محیط زیر آب^۲ برای امواجی به غیر از امواج صوتی^۳، محیطی مات محسوب می‌شود و این نوع امواج در آب به سرعت تضعیف می‌شوند (Bjørnø & Buckingham, 2017; بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷ ب). در مقابل، برای امواج صوتی، آب محیطی شفاف بوده که اجازه طی هزاران کیلومتر را در خود می‌دهد.

به‌عنوان یکی از شاخه‌های سنجش از دور، فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی^۴ ابزاری قدرتمند جهت پایش ویژگی‌های منابع آب، مانند دمای آب (Zhang et al., 2015) و سرعت جریان آب (Razaz et al., 2013) در لایه‌های مختلف عمق آب (در محیط آبی گوناگونی مانند اقیانوس، دریا، رودخانه و مخزن سد) است (Munk et al., 1996). این فناوری بدون هرگونه دخالتی در ویژگی‌های یک ناحیه با هدف به‌دست آوردن اطلاعات آن ناحیه موردنظر، به کار گرفته می‌شود (Barth & Raabe, 2011). پرتونگاری مقطعی صوتی با توجه به محیط آبی به سه دسته اقیانوسی (اِی تی^۵)، ساحلی (سی‌ای تی^۶) و رودخانه‌ای (اف‌ای تی^۷) تقسیم می‌شود. تنها تفاوت سه نوع دستگاه اِی تی، اف‌ای تی و سی‌ای تی در بسامد امواجی است که ارسال می‌کند، به طوری که بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی کم‌تر از یک کیلوهرتز و در فواصل چند هزار کیلومتری، بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی ساحلی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز در فواصل کم‌تر از ۱۰۰ کیلومتر و بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی رودخانه‌ای ۱۰ تا ۶۰ کیلوهرتز و در فواصل ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر است (بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۸). در سامانه‌های پرتونگاری مقطعی صوتی با حداقل دو دستگاه، امواج از طریق بخش تراگذار^۸ در دو طرف محیط آبی ارسال می‌شوند. به دلیل وجود دو مرز مهم کف بستر و سطح آب این امواج در کل عمق آب منتشر می‌شوند. بخش گیرنده هر دو تراگذار، امواج رسیده را دریافت کرده و زمان پیمایش امواج را در بخش پردازنده ذخیره می‌کند. با استفاده از محاسبه زمان‌های پیمایش هر پرتو صوتی ارسال شده به ایستگاه مقابل، سرعت صوت متوسط برای هر یک از مسیرها محاسبه می‌شود. این محاسبات در شناخت روند تغییرات دما و سرعت جریان به‌عنوان تابعی از عمق آب در یک محیط آبی مانند مخزن سد کاربرد دارند (Kawanisi et al., 2013; Munk & Worcester, 1988).

حل مسائل پرتونگاری مقطعی صوتی به دو صورت مسائل پیش‌ران^۹ و مسائل معکوس^{۱۰} انجام می‌شود. با معرفی سامانه فیزیکی، هندسه، خواص فیزیکی، شرایط اولیه و مرزی معلوم، مسئله پیش‌ران حل می‌شود. اهمیت حل مسئله پیش‌ران، استفاده از آن در حل مسئله معکوس است که معمولاً از طریق شبیه‌سازی (رهگیری) پرتو انجام می‌گیرد. برای حل مسائل معکوس روش‌های مختلفی وجود دارد که هدف از آن کمینه‌سازی خطای مدل در تابع هدف است. از جمله آن روش‌ها، روش حل حداقل مربعات^{۱۱}، روش حل حداقل مربعات میرا^{۱۲}، روش تنظیم‌شده تیخونوف^{۱۳}، هستند. فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. توسعه کاربرد این فناوری در مخازن سدها، بخصوص سدهای ایران، نیز پیشنهاد می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت تعیین سرعت جریان در لایه‌های مختلف مخزن سد، در این پژوهش با کمک فناوری

1. Electromagnetic Waves
2. Underwater
3. Acoustic Waves
4. Acoustic Tomography Technique
5. OAT: Ocean Acoustic Tomography
6. CAT: Coastal Acoustic Tomography
7. FAT: Fluvial Acoustic Tomography
8. Transducer
9. Forward Problem
10. Inverse Problem
11. Least Squares
12. Damped Least Squares
13. Tikhonov's Regularization



پرتونگاری مقطعی صوتی و حل مسئله معکوس به روش تنظیم‌شده تیخونوف به تعیین سرعت جریان در لایه‌های مختلف مخزن سد لتیان پرداخته شد. از نوآوری این روش می‌توان به بررسی کاربرد فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد برای تعیین سرعت جریان لایه‌ای برای اولین بار در ایران نام برد.

پیشینه پژوهش

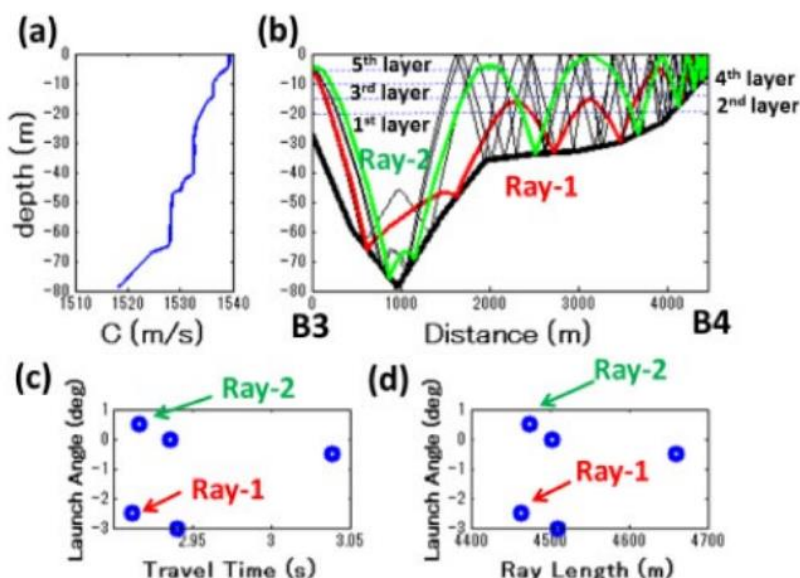
محققان زیادی پروفیل عمودی سرعت جریان و دمای آب را در محیط اقیانوس و دریایی با استفاده از روش پرتونگاری مقطعی صوتی نگاشته‌اند ولی این مطالعه در مخازن سدها به ندرت صورت گرفته است. (Taniguchi et al., 2010). یک آزمایش با استفاده از پرتونگاری مقطعی صوتی در طول ماه می تا سپتامبر ۲۰۰۸ در تنگه لوزون^۱ با دو ایستگاه به فاصل حدودی ۳۵ کیلومتر و عمق ۸۰۰ متری که در آن جزر و مد شدید رخ می‌دهد، انجام دادند. اگرچه انتقال صوت متقابل بین دو ایستگاه صوتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای توسط امواج جزر و مدی مختل شد ولی سیگنال‌های متناسب (سه پرتو ویژه) با فیلتر کردن پایین گذر^۲ موج بسامد بالا، با موفقیت بازیابی شدند. (Dushaw et al., 2017)، نتایج یک آزمایش انتشار پرتو صوتی در فاصله ۳۰۸ کیلومتری در محدوده قناری^۳ در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۸ که برای ارزیابی توانایی پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی انجام شده بود را برای اندازه‌گیری جریان آب مدیترانه و محدوده جزر و مدی مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعه هشت پرتو ویژه شناسایی شد.

پرتونگاری مقطعی صوتی ساحلی^۴ (سی‌ای‌تی^۵) یک فناوری نوآورانه و یک توسعه از پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی^۶ برای استفاده در دریاها و کم‌عمق و ساحلی است (Roux et al., 2008; Kaneko et al., 2020b; Wells et al., 2016). سرعت و دمای جریان در دریاچه بیوا^۷ واقع در ژاپن را با استفاده از سی‌ای‌تی به مدت دو ماه اندازه‌گیری کردند که هدف از آن به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در داده‌گویی^۸ سیستم‌های پیش‌بینی جریان و دما بود. آن‌ها با استفاده از تراگذارهای ۵ کیلوهرتز، از آگوست ۲۰۱۴ تعدادی آزمایش سی‌ای‌تی موفقیت‌آمیز در حوضه شمالی، که عمق متوسط آن ۴۱ متر است، انجام دادند. این مطالعه به‌عنوان اولین آزمایش موفقیت‌آمیز پرتونگاری مقطعی صوتی است که تاکنون برای یک دریاچه گزارش شده است.

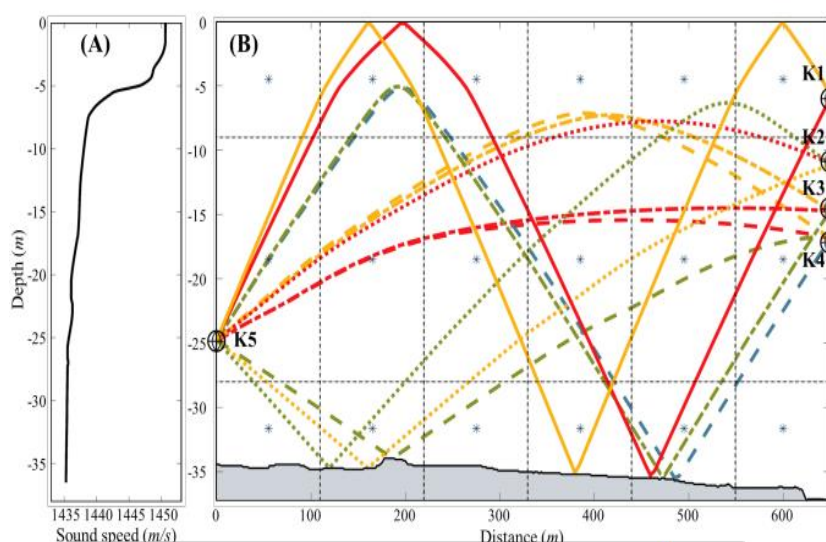
(Syamsudin et al., 2017)، یک آزمایش انتقال صوت با استفاده از دو سیستم صوتی طی چهار روز، در امتداد یک خط مقطعی در تنگه بالی^۹ با جریان‌های جزر و مدی قوی برای اندازه‌گیری سرعت جریان و دمای آب متوسط پنج لایه انجام دادند. شکل ۱ نتایج شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی دو گروه از امواج صوتی نشان داد که گروه اول با کف دریا برخورد کرده و پس از بازتاب و با گذشت ۲/۹۱۸۶ ثانیه و ۴۴۶۲/۸ متر به ایستگاه مقابل رسیده‌اند، در حالی که گروه دوم پس از برخورد با سطح آب و پس از ۲/۹۲ ثانیه و ۴۴۷۳/۲ متر به ایستگاه مقابل رسیده‌اند داده‌های شبیه‌سازی شده در انجام محاسبات اندازه‌گیری دما و سرعت جریان با استفاده از سی‌ای‌تی مورد استفاده قرار گرفت.

(Xu et al., 2022)، با یک روش شبکه میانگین و روش ناحیه اعتماد^{۱۰} به پایش دقیق دما و سرعت جریان با فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی پرداختند. برای این منظور یک آزمایش با تعداد پنج ایستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی با بسامد ۵۰ کیلوهرتز از ۲۸ فوریه تا ۷ مارس ۲۰۲۲ در مخزن هوانگکای^{۱۱} در چانگشای چین انجام دادند. چهار ایستگاه سی‌ای‌تی در یک موقعیت با عمق‌های مختلف برای محل قرارگیری تراگذار مستقر شدند و یک ایستگاه سی‌ای‌تی دیگر در فاصله ۶۵۰ متری از هم قرار گرفت. در این آزمایش نتایج بازسازی دمای آب و سرعت جریان در امتداد بخش انتشار صوت با روش ناحیه اعتماد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با داده‌های دما به‌دست‌آمده با حسگر دما مقایسه شد. در نهایت صحت و امکان‌سنجی این روش با نتایج مشاهدات تأیید شد (شکل ۲).

1. Luzon Strait
2. low-pass filtering
3. Canary
4. Coastal Acoustic Tomography
5. CAT
6. OAT: Ocean Acoustic Tomography
7. Biwa lake
8. Data assimilation
9. Bali Strait
10. Trust-Region Method
11. Huangcai Reservoir in Changsha, China



شکل ۱. نتایج شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه (Syamsudin *et al.*, 2017)



شکل ۲. رهگیری پرتو و الگوی رسیدن پرتوهای ویژه و مشخصات سرعت صوت اندازه‌گیری شده توسط سی‌تی‌دی (Xu *et al.*, 2022)

اولین پژوهش پرتونگاری مقطعی صوتی در ایران توسط بحرینی مطلق و همکاران در سال ۱۳۹۷ انجام شد. ایشان با معرفی پرتونگاری مقطعی صوتی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مستمر سرعت متوسط و دمای آب به ارزیابی و انجام آزمایش پرتونگاری مقطعی صوتی در کانال آب کوثر دانشگاه مالک اشتر پرداخت (بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷ الف). بحرینی مطلق و همکاران (۱۳۹۷ ب)، در مطالعه‌ای با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی، به ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیرآب (تئوری پرتو) در یک رودخانه پرداختند. در این مطالعه شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی در یک رودخانه آب شیرین با عمق کمتر از ۳ متر به اسم رودخانه گونو واقع در غرب ژاپن ارائه شده است. نتایج این مطالعه نشان داد بر خلاف دریا و اقیانوس که گرادیان دما، شوری و امواج درونی عوامل اصلی انتشار امواج صوتی در چند مسیر مختلف هستند، در رودخانه کم‌عمق که گرادیان دما و شوری وجود ندارد، جانگاری (توپوگرافی) بستر رودخانه از عوامل اصلی انتشار دو گروه اصلی امواج صوتی در چند مسیر مختلف می‌باشند و صحت‌سنجی شبیه‌سازی با استفاده از دو دستگاه تراگذار پرتونگاری مقطعی صوتی انجام شد.

پژوهش‌های متعددی درخصوص کاربرد علم پرتونگاری مقطعی صوتی در پیکره اقیانوسی و ساحلی انجام شده، اما به مخازن و بخصوص مخزن سدها توسعه نیافته است. با توجه به اهمیت پایش سرعت جریان در لایه‌های مختلف آب در مخازن سدها، و هزینه‌بر و زمان‌بر بودن روش‌های اندازه‌گیری مستقیم، بررسی کاربرد فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی در مخازن مورد توجه قرار دارد. هدف اصلی

این پژوهش، ارایه روشی برای پایش سرعت جریان در لایه‌های مختلف در مخازن سدها با استفاده از فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی بر پایه داده‌های برداشت شده از مخزن سد لتیان، با استفاده از الگوریتم حل معکوس است.

روش شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه و داده‌برداری

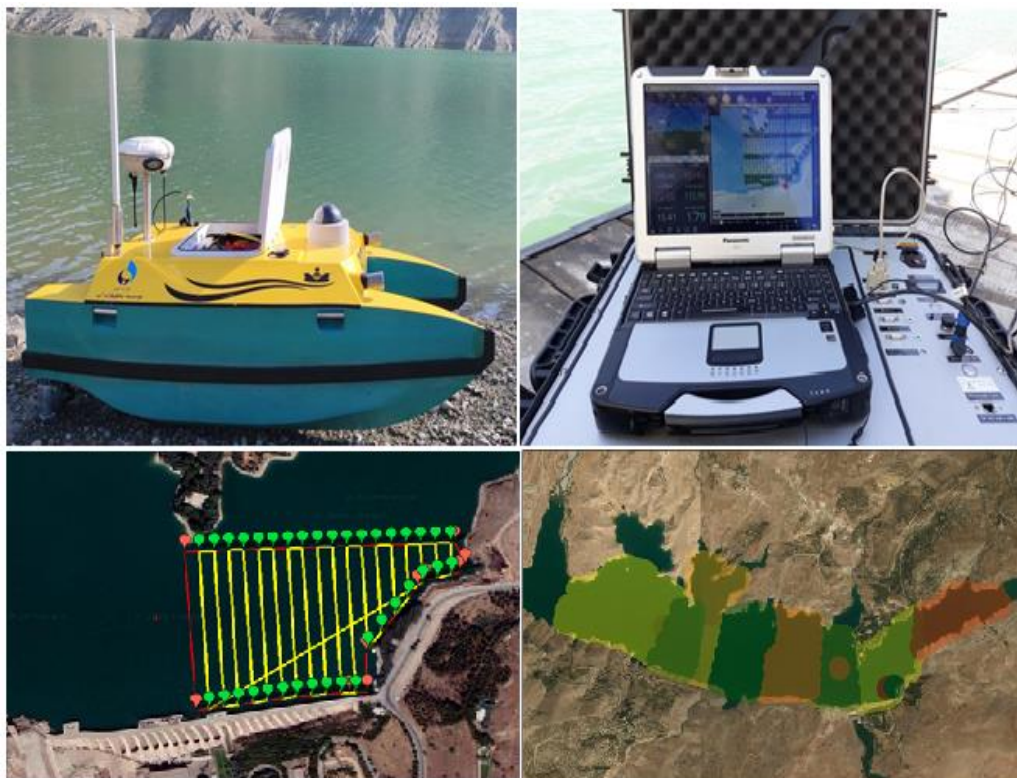
در این مطالعه، سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود، در ۱۰ کیلومتری شمال شرقی تهران و در جنوب شهر لواسان، مورد نظر قرار گرفت. دو ایستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی، در مخزن سد لتیان با بسامد صوتی ۱۰ کیلوهرتز مستقر شدند. ایستگاه اول در کنار اسکله قایق‌ها مجاور بدنه سد در عمق ۳ متری (با مختصات $N''28,33^{\circ}47'35$ و $E''51,50^{\circ}40'51$) و ایستگاه دوم در فاصله تقریبی $1/6$ کیلومتری (۱۶۱۷ متری) در کنار جنگل بانی، در جایی که دو لوله پمپاژ وجود دارد (با مختصات $N''34,40^{\circ}47'35$ و $E''48,20^{\circ}39'51$)، در عمق ۵۰ سانتی‌متری نصب شدند.

سیگنال‌های صوتی به‌صورت متقابل بین ایستگاه‌های اول و دوم در فواصل ۳۰ ثانیه‌ای ارسال شد. داده‌های عمق سنجی^۱ کف مخزن سد با استفاده از شهپاد اکوساندر (شکل ۴) جمع‌آوری شد. همچنین داده‌های پروفیل دمایی سد لتیان بر حسب عمق برای یک ستونی از عمق آب توسط دستگاه سی‌تی‌دی^۲ برداشت شد. زمان داده‌برداری روز یکم و دوم آبان سال ۱۳۹۹ بود. هیچ دریچه‌ای از سد لتیان در تاریخ‌های یکم و دوم آبان ۱۳۹۹ در هنگام داده‌برداری باز نبوده است.



شکل ۳. موقعیت مکانی ایستگاه اول و دوم از مقطع پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد لتیان

در این مطالعه ابتدا به بررسی و استخراج داده‌های هم‌زمان پرداخته شد؛ سپس برای تمامی داده‌های هم‌زمان ارسال شده از ایستگاه یک به دو و دو به یک، نمودار همبستگی استخراج گردید، تا زمان رسیدن اولین اوج استخراج شود و نتیجه آن با رهگیری پرتو ویژه شناسایی شده صحت‌سنجی شود. همچنین برای شبیه‌سازی الگوی انتشار پرتو و شناسایی پرتوهای ویژه، از زبان برنامه‌نویسی متلب 2022a و برای تجزیه و تحلیل داده‌های پرتونگاری مقطعی صوتی و استخراج نمودارهای همبستگی از زبان برنامه‌نویسی ولفرام متمتیکا^۳ ۱۳/۱ استفاده شد.



شکل ۴. (شکل بالا سمت چپ): شهپاد (شناور هدایت پذیر خودکار هیدروگرافی)، (شکل بالا سمت راست): نحوه داده برداری و نرم افزار طراحی خطوط عمق سنجی، (شکل پایین چپ): نمونه طراحی خطوط عمق سنجی در نرم افزار برنامه ریزی خودکار برداشت اطلاعات توسط شناور در مخزن سد لتیان و (شکل پایین سمت راست): محدوده مأموریت های طراحی شده برای عمق سنجی در بخشی از مخزن سد لتیان

رهگیری پرتو

رهگیری پرتو اساس کار و اولین گام در روش پرتونگاری مقطعی صوتی است. الگوی انتشار پرتو صوتی را در مخزن سد با روش رهگیری پرتو^۱ که فقط شکست صوت (قانون شکست اسنل^۲) را در نظر می گیرد، می توان به خوبی تقریب زد. شبیه سازی پرتو، پرتوهای انتقال یافته (پرتوهای ویژه) را مشخص می کند که برای شناسایی نقاط اوج و حل مسئله وارون تنظیم شده ارزشمند هستند. روش تئوری پرتو، با حل معادله هلمهولتز آغاز می گردد به طوری که برای این روش جواب معادله به فرم رابطه (۱) تا (۳) در نظر گرفته می شود. شبیه سازی الگوی انتشار امواج صوتی با استفاده از روش تئوری پرتو با حل معادلات دیفرانسیل زیر انجام شد که در آن u و C به ترتیب سرعت جریان و سرعت صوت در یک صفحه (x,z) هستند و θ زاویه موج اندازه گیری شده است نسبت به خط افقی است. معادله دیفرانسیل عادی کوپل شده مرتبه اول به صورت عددی با روش تفاضل محدود مانند روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم^۳ با در نظر گرفتن شرایط اولیه در موقعیت منبع صوتی حل می شود. شبیه سازی پرتو مستقل از دامنه، با استفاده از داده های رسانایی-دما-عمق (سی تی دی) روی خط انتقال انجام می شود (Kaneko et al., 2020).

$$\frac{dx}{dt} = \{C(x,z) + u \cdot n\} \cos\theta \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\frac{dz}{dt} = C(x,z) \sin\theta \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial C(x,z)}{\partial z} \cos\theta \quad \text{رابطه ۳}$$

سرعت جریان میانگین و فیلتر پایین گذر

1. Ray-Tracing
2. Snell's Law of Refraction
3. fourth-order Runge-Kutta method

بعد از رهگیری پرتو و شناسایی دو یا چند پرتو با زمان‌های پیمایش مختلف و درحالی‌که از عمق‌های مختلف منطقه مورد مطالعه می‌گذرند، دامنه محاسباتی که همان صفحه عمود است به چندین لایه تقسیم‌بندی می‌شود (Kaneko et al., 2020). با در نظر گرفتن دو ایستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی در داخل مخزن سد با فاصله L و انتقال صدای دو سویه در مخزن سد ($S1 \rightarrow S2$ و $S2 \rightarrow S1$)، زمان پیمایش t_1 و t_2 با انتگرال‌گیری مسیر^۱ طبق روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند. انتگرال مسیر با میانگین مقطع از نقطه عطف بالا به نقطه عطف پایین در برش عمودی تقریبی محاسبه می‌شود که در آن سرعت جریان در یک جهت مثبت از $S1$ به $S2$ تعریف شده و C سرعت صوت می‌باشد. در روابط (۴) و (۵)، Γ^+ مسیر پرتو به سمت $S2$ از طرف $S1$ و Γ^- مسیر پرتو به سمت $S1$ از طرف ایستگاه $S2$ می‌باشد و ds طول قوس قطعه‌بندی شده در امتداد پرتو شکسته شده است. V_m و C_m به ترتیب سرعت صوتی متوسط و سرعت جریان متوسط می‌باشند.

$$t_1 = \int_{\Gamma^+} \frac{ds}{C + v} \approx \frac{L}{C_m + V_m} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$t_2 = \int_{\Gamma^-} \frac{ds}{C - v} \approx \frac{L}{C_m - V_m} \quad \text{رابطه (۵)}$$

از حل روابط (۴) و (۵)، روابط (۶) و (۷) به دست می‌آید که در آن t_m زمان پیمایش متوسط، C_0 سرعت صوتی مرجع بوده و $t_1 \approx t_2 \approx t_m$ ، $\Delta t = t_2 - t_1$ ، $t_m = (t_1 + t_2)/2$ ، $t_0 = \frac{L}{C_0}$ ، $C_0 \approx C_m$ می‌باشد.

$$C_m = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{L}{t_m} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$V_m = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{C_0^2}{2L} \Delta t = \frac{L}{2t_0^2} \Delta t \quad \text{رابطه (۷)}$$

با توجه به این که سری‌های زمانی سرعت جریان میانگین دارای نوسانات شدیدی به علت مؤلفه‌های بسامد بالا است، از فیلتر پایین‌گذر برای هموارسازی سری‌های زمانی^۲ سرعت جریان میانگین استفاده شد. به دلیل اعمال فیلتر پایین‌گذر، مقادیر سرعت میانگین تغییر می‌کند. بنابراین مطابق رابطه (۸) زمان‌های پیمایش تفاضلی اصلاح‌شده دوباره محاسبه شدند.

$$\Delta t' = V_m' \frac{2L}{C_0^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن V_m' و $\Delta t'$ به ترتیب سرعت جریان میانگین فیلترشده و زمان پیمایش تفاضلی اصلاح‌شده هستند. میانگین سرعت جریان و سرعت صدا در مسیر، از مجموع حسگرهای نقطه‌ای آرایه شده در امتداد پرتو به دست می‌آیند. بنابراین دقت داده‌های میانگین مسیر به طور قابل ملاحظه‌ای از طریق جمع داده‌ها بهبود می‌یابد. با این حال، تنظیم آرایه‌ای از حسگرهای نقطه‌ای در امتداد یک خط انتقال صدا در دریا و مخازن غیرواقعی است و بنابراین مزیت برجسته CAT را می‌توان در مقایسه با آرایه حسگر نقطه‌ای درک کرد.

مسئله معکوس تنظیم‌شده

در صورت عبور M پرتو صوتی از N لایه، زمان پیمایش پرتو i را می‌توان از رابطه (۹) محاسبه کرد. در رابطه (۹)، C_j سرعت صدای میانگین، u_j سرعت جریان برای لایه j ام، l_{ij} برابر طولی که پرتو i در لایه j طی می‌کند.

$$t_i^\pm = \sum_{j=1}^N \frac{l_{ij}}{C_j \pm u_j} \quad \text{رابطه (۹)}$$

به علت سرعت کم جریان در مخزن سدها در مقابل سرعت صوت متوسط که تقریباً برابر سرعت صوت مرجع است، زمان‌های پیمایش تفاضلی را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) و فرم ماتریسی رابطه (۱۱) محاسبه کرد (Kaneko et al., 2020).

$$\Delta t_i = (t_i^+ - t_i^-) = -2 \sum_{j=1}^N \frac{l_{ij} u_j}{C_j^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \vdots \\ \Delta t_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{l_{11}}{c_1^2} & -2 \frac{l_{12}}{c_2^2} & \dots & -2 \frac{l_{1N}}{c_N^2} \\ -2 \frac{l_{21}}{c_1^2} & -2 \frac{l_{22}}{c_2^2} & \dots & -2 \frac{l_{2N}}{c_N^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -2 \frac{l_{M1}}{c_1^2} & -2 \frac{l_{M2}}{c_2^2} & \dots & -2 \frac{l_{MN}}{c_N^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۹) و (۱۰)، منظور از علامت مثبت و منفی به ترتیب جهت صدا از ایستگاه یک به دو، و از ایستگاه دو به یک است. رابطه (۱۱) را نیز می‌توان به فرم رابطه (۱۲) نوشت که در آن $y = \{\Delta t_i\}$ ، برای $x = \{u_j\}$ ماتریس مجهول و $E = \left\{ -2 \frac{l_{ij}}{c_j^2} \right\}$ 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.

$$y = Ex + n \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

رویکردهای متنوعی برای حل مسئله معکوس وجود دارد. هدف از حل به روش حداقل مربعات، کمینه کردن بردار خطای زمان پیمایش (n) در رابطه (۱۲) است. اما این روش یک مسئله بدطرح^۱ بوده و حل آن ناپایدار است و نمی‌توان آن را با روش‌های جبر خطی حل کرد. روش حل مسئله معکوس تنظیم‌شده، حل مناسبی از مسئله را ارائه می‌دهد. رابطه (۱۳) تابع هدف موردنظر در روش تنظیم‌شده و رابطه (۱۴) حل آن را نشان می‌دهد.

$$J = (y - Ex)^T (y - Ex) + \lambda x^T H^T x \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\hat{x} = (E^T E + \lambda H^T H)^{-1} E^T y \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن λ ضریب لاگرانژ^۲، بالانویس T نشان‌دهنده ترانزپوز^۳ ماتریس و H ماتریس تنظیم^۴ است که از عملگر مشتق دوم $\frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$ برای هموار کردن^۵ حل از طریق اعمال میانگین متحرک^۶ بر سه لایه متوالی به‌دست می‌آید (رابطه (۱۵)).

$$H = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

یافته‌های پژوهش

رهگیری پرتو

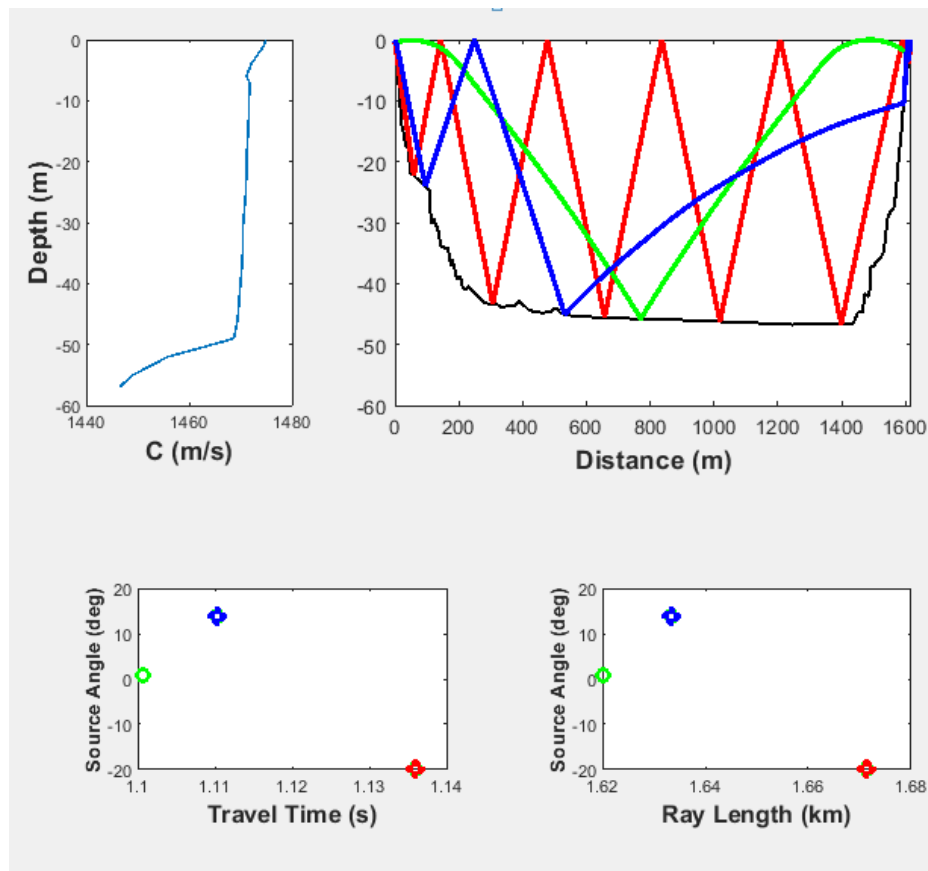
در این مطالعه انتشار امواج صوتی از ایستگاه اول به ایستگاه دوم شبیه‌سازی شد. شرایط مرزی انتخاب‌شده شامل بستر مخزن سد و سطح آب است. ابتدا نیم‌رخ سرعت صدا با استفاده از داده‌های سی‌تی‌دی و معادله مکزی (رابطه (۱۶)) محاسبه شد. شکل ۵ نمودار سرعت صوت به‌دست‌آمده از سی‌تی‌دی نسبت به عمق (شکل سمت چپ بالا) و مقطع عرضی مخزن در محدوده مورد مطالعه و پرتوهای ویژه رهگیری شده بین زاویه تعیین شده (شکل سمت راست بالا) را نشان می‌دهد. (شکل سمت چپ پایین)، زمان پیمایش هر پرتو با زاویه انتشار مشخص به ایستگاه دوم را نشان می‌دهد و (شکل سمت راست پایین) نیز طول طی شده توسط هر پرتو با زاویه انتشار مشخص را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده و نتایج همبستگی، دو پرتو صوتی سبز (نقطه اول) و قرمز (نقطه دوم) برای نقاط اوج انتخاب شدند.

1. Ill-Posed
2. Lagrange Multiplier
3. Transpose of the Matrix
4. Regularization Matrix
5. Smooth the Solution
6. Moving Average

$$C(T, Sa, D) = 1448.96 + 4.591T - 0.05304T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(Sa - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(Sa - 35) - 7.139 \times 10^{-13}D^3 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در رابطه (۱۶)، C سرعت صوت 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 ۲۵ تا ۴۰ واحد در هزار) و T دما بر حسب درجه سانتی‌گراد (برای بازه ۲ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. با توجه به داده‌های سی‌تی‌دی برداشت‌شده از مخزن سد لتیان در زمان داده‌برداری، پروفیل سرعت صدای آن رسم شد (شکل ۵ سمت چپ بالا). مطابق شکل ۵ سمت چپ بالا، مشاهده می‌شود سرعت صدا در لایه نزدیک سطح آب بیشتر از سرعت صدا در لایه نزدیک بستر است. علت این موضوع رابطه مستقیم سرعت صدا با دما است. در نزدیکی سطح آب به علت دما بالایی که انرژی خورشیدی تولید می‌کند، دمای آب بیشتر از دمای لایه‌های پایین‌تر است و بنابراین سرعت صدا در لایه سطحی بیش‌تر از لایه‌های پایینی خواهد بود.

هیچ محدودیتی برای انتخاب تعداد لایه‌ها وجود ندارد، و می‌توان آن را به هر تعداد لایه دل‌خواه تقسیم کرد، اما طول پرتو صوت در لایه، دقت محاسبه را تعیین می‌کند. برای انتخاب تعداد لایه، معمولاً بهتر است تعداد لایه یکی بیش‌تر از تعداد پرتو باشد. این امکان وجود دارد که تعداد لایه خیلی بیش‌تر از تعداد پرتو باشد ولی باعث ایجاد خطای بیش‌تر در جواب خواهد شد. در واقع هر چه تعداد لایه‌ها از تعداد پرتوهای صوتی بیش‌تر باشد، خطا بیش‌تر و حل بیش‌تر از مقدار واقعی منحرف می‌شود. از دیگر عوامل موثر در انتخاب تعداد لایه‌ها عبارتند از: تاثیر عمق، توجه به پروفیل تغییرات دما نسبت به عمق (اثر دما در نحوه انتشار امواج صوتی در آب بیشتر از سایر عوامل می‌باشد)، توجه به پروفیل سرعت نسبت به عمق، توجه به توپوگرافی کف دریا یا مخزن یا سایت مورد مطالعه. در این مطالعه با توجه به نمودار سرعت صدا، ۵ لایه با عمق‌های (۰ تا ۱۰ متر، ۱۰ تا ۲۰ متر، ۲۰ تا ۳۰ متر، ۳۰ تا ۴۰ متر، ۴۰ تا ۵۰ متر) انتخاب شد.

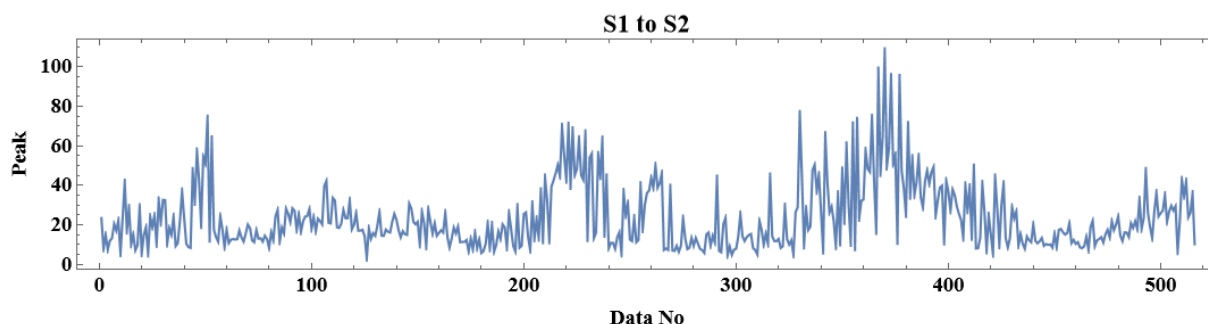


شکل ۵. انتخاب سه پرتو از بین پرتوهای ویژه رهگیری شده. (شکل بالا سمت چپ): پروفیل سرعت صوت در مخزن سد لتیان، (شکل بالا سمت راست): رهگیری سه پرتو انتخاب‌شده، (شکل پایین سمت چپ): زمان پیمایش سه پرتو نسبت به زاویه انتشار و (شکل پایین سمت راست): طول پرتوهای انتخاب‌شده نسبت به زاویه انتشار.

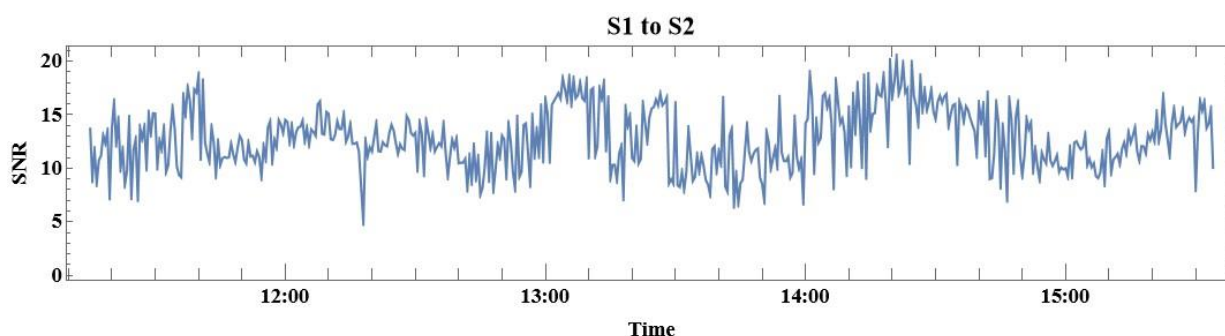
وقتی که صدا از تراگذار ایستگاه شماره یک ارسال می‌شود تا به تراگذار ایستگاه دو برسد، مسیری را طی می‌کند. در ارسال صدا از

ایستگاه اول به ایستگاه دوم، پرتوهای صوتی در جهات مختلفی انتشار می‌یابند. ایده‌آل‌ترین حالت این است که یک پرتو صوتی به صورت مستقیم از ایستگاه ۱ به ۲ ارسال شود، و برخورد به بستر مخزن یا سطح آب نداشته باشد. در نتیجه به خاطر فاصله ۱۶۱۷ متری بین دو ایستگاه و سرعت متوسط حدودی ۱۴۷۰ متر بر ثانیه این پرتو صوتی در بهترین حالت در ۱۱۰۰ میلی‌ثانیه به ایستگاه دوم خواهد رسید. هنگام رسیدن اولین پرتو صوتی ارسال شده به ایستگاه دوم نمودار SNR (سیگنال به نوفه) یک اوج بزرگی خواهد دید. این اوج اول همان اولین پرتو صوتی است که در اثر ارسال صدا از ایستگاه اول به ایستگاه دوم رسیده و کم‌ترین برخورد را به سطح آب یا بستر مخزن داشته است. همچنین پرتوهای صوتی بعد از رسیدن اولین پرتو صوتی به ایستگاه دوم، رفته‌رفته میزان سیگنال به نوفه کوچک‌تری خواهند داشت زیرا تعداد برخوردشان به سطح آب و بستر مخزن بیش‌تر می‌شود.

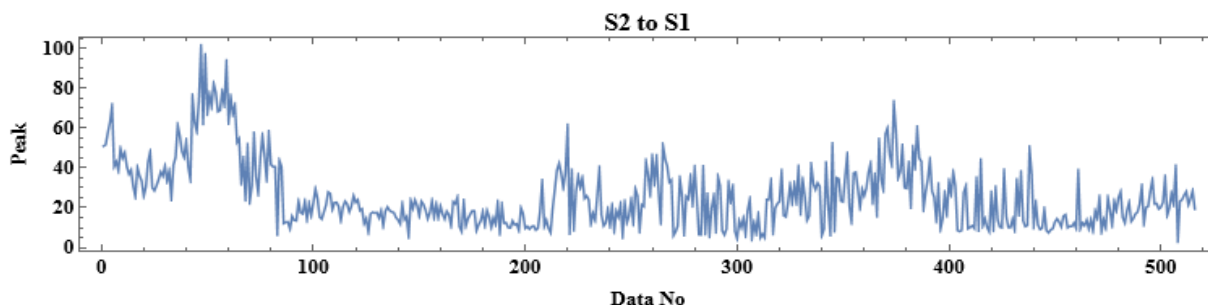
شکل ۶ مقدار اوج (حداکثر اوج) هر داده صوتی را از ایستگاه یک میبه دو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازه همبستگی از صفر تا ۱۰۰ است. برای تبدیل این مقدار به SNR، از همبستگی‌ها لگاریتم بر پایه ۱۰ گرفته و حاصل را ضرب در ۱۰ می‌کنیم. به خاطر اینکه لگاریتم اعداد زیر یک بر پایه ۱۰، منفی می‌شود برای این منظور تعریف شد که اعداد زیر یک را معادل صفر حساب کند. شکل ۷ تمامی حداکثر SNR محاسبه‌شده را برای هر داده صدای ارسال شده نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که مقدار سیگنال به نوفه اکثراً ۱۰ به بالا بوده و به‌عنوان سیگنال به نوفه مناسب تلقی می‌شود. در محور افقی این نمودار به جای شماره داده زمان ارسال داده صوتی درج شده است که با شماره داده تفاوتی ندارد. همچنین شکل ۸ مقدار اوج (حداکثر اوج) هر داده صوتی را از ایستگاه دو به یک نشان می‌دهد و شکل ۹ تمامی حداکثر SNR محاسبه‌شده را برای هر داده صدای ارسال شده از ایستگاه دو به یک نشان می‌دهد.



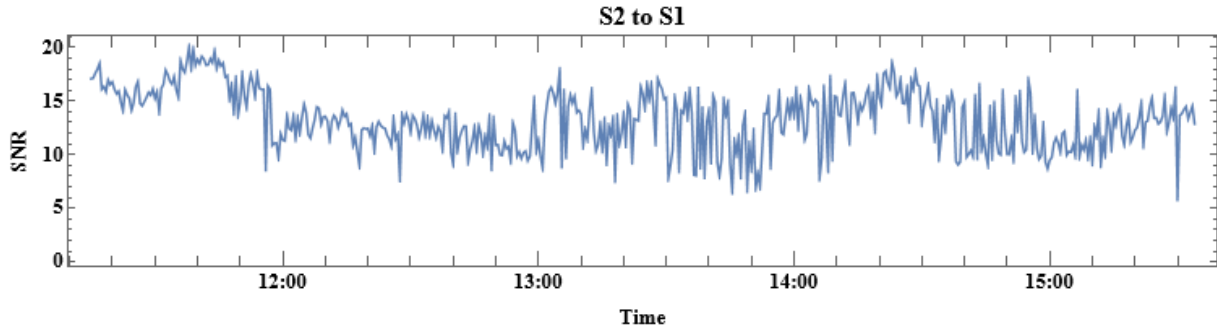
شکل ۶. نمایش اوج همبستگی هر داده صوتی ارسال شده از ایستگاه ۱ به ۲ با بسامد ۱۰ کیلوهرتز



شکل ۷. حداکثر سیگنال به نوفه هر داده صدای ارسال شده از ایستگاه ۱ به ۲ با بسامد ۱۰ کیلوهرتز

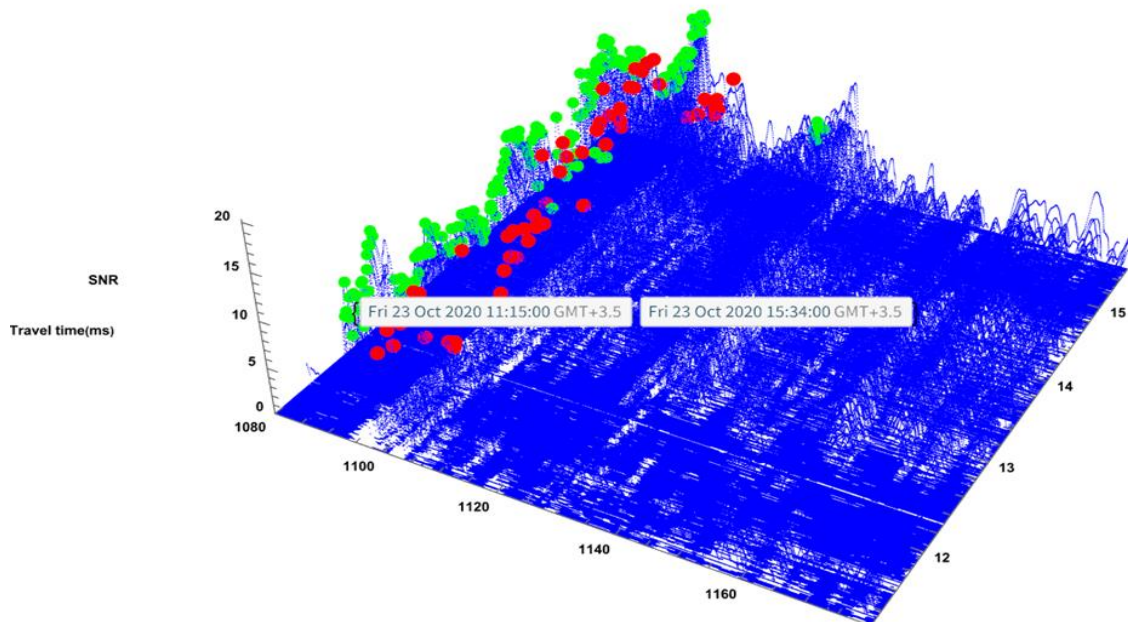


شکل ۸. نمایش اوج همبستگی هر داده صوتی ارسال شده از ایستگاه ۲ به ۱ با بسامد ۱۰ کیلوهرتز

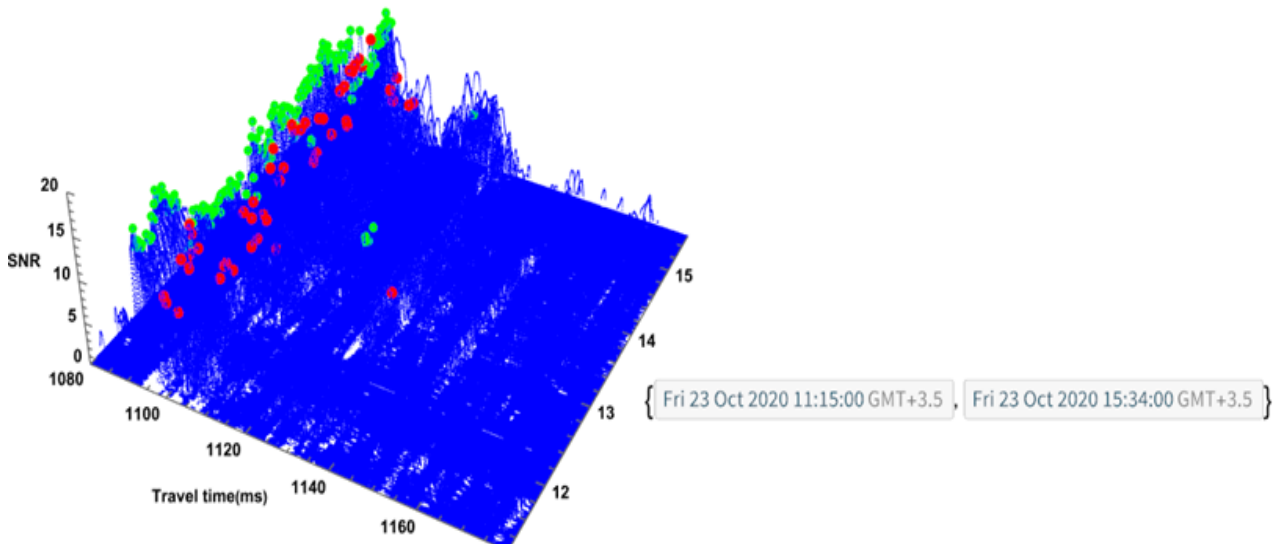


شکل ۹. حداکثر سیگنال به نوفه هر داده صدای ارسال شده از ایستگاه ۲ به ۱ با بسامد ۱۰ کیلوهرتز

برای نمایش دقیق تر و برای مقایسه تمامی داده‌های صوتی برداشت شده شکل ۱۰ برای پشته‌های همبستگی SNR از ایستگاه یک به دو با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و شکل ۱۱ برای پشته‌های همبستگی از ایستگاه دو به یک با بسامد ۱۰ کیلوهرتز رسم شد. مطابق شکل نقاط سبزرنگ برابر اوج اول و نقاط قرمز رنگ برابر اوج‌های دوم انتخاب شده است.



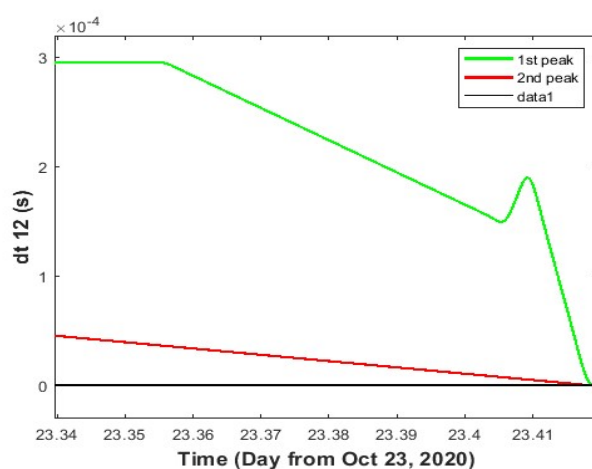
شکل ۱۰. نمودار همبستگی تمامی داده‌ها به همراه اوج اول (نقاط سبز) و اوج دوم (نقاط قرمز) از ایستگاه یک به دو با بسامد ۱۰ کیلوهرتز.



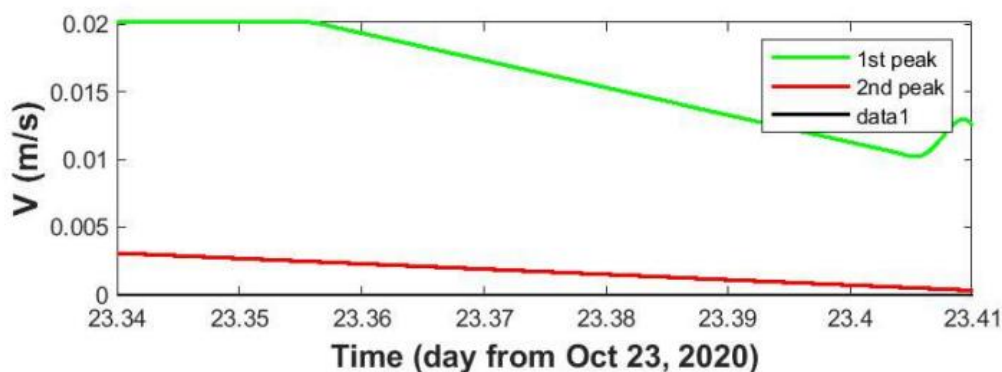
شکل ۱۱. نمودار همبستگی تمامی داده‌ها به همراه اوج اول (نقاط سبز) و اوج دوم (نقاط قرمز) از ایستگاه دو به یک با بسامد ۱۰ کیلوهرتز.

سرعت جریان میانگین

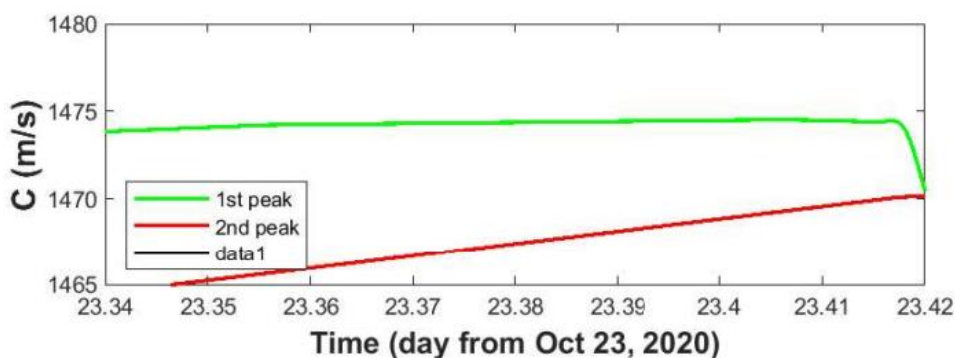
پس از محاسبه اوج‌های اول و دوم، زمان رسیدن و زمان داده‌برداری مربوط به اوج‌های اول و دوم انتخاب شدند و با تعریف سرعت ثابت صدا، سرعت جریان و سرعت صدای میانگین توسط اوج اول و اوج دوم محاسبه شد. پس از آن برای محاسبه بهتر پس از حذف داده‌های پرت به درون‌یابی سرعت جریان و سرعت صدای میانگین پرداخته شد. شکل ۱۲ تغییرات زمان پیمایش تفاضلی اصلاح‌شده را نسبت به زمان داده‌برداری نشان می‌دهد. این میزان هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نتیجه بهتر است. زیرا در زمان داده‌برداری از مخزن سد، دریچه‌ها بسته بوده و جریان در مخزن نزدیک صفر بوده است. مشاهده می‌شود که این مقدار از $0/3$ ثانیه نیز کمتر بوده و نزدیک صفر است. شکل ۱۳، سرعت جریان میانگین محاسبه‌شده با استفاده از اوج اول و اوج دوم (سبز و قرمز) نسبت به زمان داده‌برداری که همان اول آبان ۱۳۹۹ (۲۳ اکتبر ۲۰۲۰) است را نشان می‌دهد. با توجه به این که سرعت جریان میانگین نزدیک صفر محاسبه‌شده نشان از درستی محاسبات را دارد زیرا در زمان داده‌برداری جریان مخزن سد نزدیک صفر بوده است. شکل ۱۴ نیز سرعت صدای میانگین را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تغییرات زمان پیمایش تفاضلی اصلاح‌شده



شکل ۱۳. سرعت جریان میانگین نسبت به زمان داده‌برداری از ۲۳ اکتبر ۲۰۲۰



شکل ۱۴. سرعت صدای میانگین نسبت به زمان داده‌برداری از ۲۳ اکتبر ۲۰۲۰

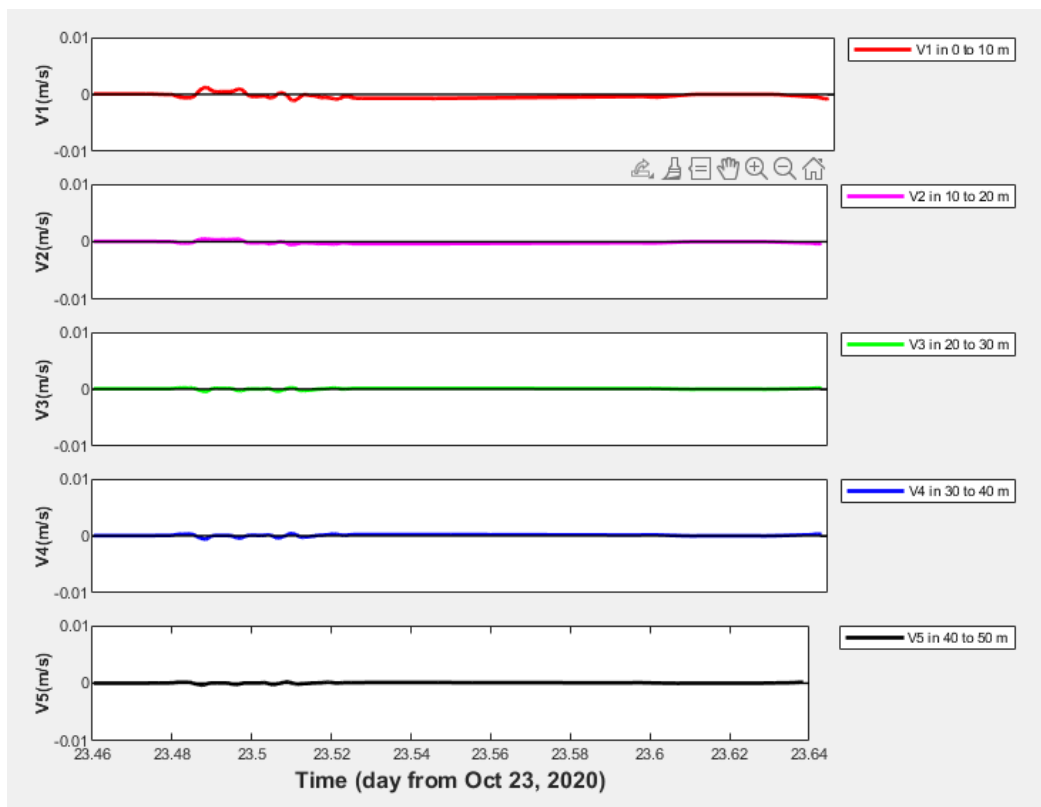
مسئله معکوس تنظیم شده و تعیین سرعت جریان لایه‌ای

با نتایج به دست آمده از بخش قبلی و سرعت صدای متوسط برای هر لایه که با درون‌یابی نتایج سی‌تی‌دی محاسبه شد و همچنین با استفاده از رهگیری پرتو طول طی شده در هر لایه توسط پرتو اول و دوم محاسبه شد. با انتخاب ماتریس تنظیم و روش حل مسئله معکوس تنظیم شده به محاسبه سرعت جریان و سرعت صدا در هر لایه پرداختیم. جدول (۱) طول طی شده در هر لایه انتخابی توسط پرتو رهگیری شده اول و دوم را به متر نشان می‌دهد. برای مقدار λ طبق محاسبات با خطای $0/0001$ عدد 2×10^{-8} برای سرعت جریان انتخاب شد.

جدول ۱. طول طی شده در هر لایه توسط پرتو رهگیری شده اول و دوم

طول طی شده به متر	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	لایه چهارم	لایه پنجم
پرتو اول	۵۷۱/۲۰۷۲	۲۴۳/۷۳۹۱	۲۸۶/۳۱۳۳	۲۶۵/۹۶۸۷	۲۶۴/۰۸۲۹
پرتو دوم	۱۴۹/۲۷۲۲	۴۰۲/۵۷۳۳	۵۱۴/۴۱۳۵	۳۱۶/۰۱۴۶	۲۶۵/۰۷۵۶

حل مسئله معکوس به روش تنظیم شده، سرعت جریان را در لایه‌های مختلف می‌دهد (شکل ۱۵). این تقسیم‌بندی با فاصله ده متر انجام شده است. به جز لایه سطحی (لایه اول که سرعت آن کم‌تر از $0/0006$ متر بر ثانیه است) در باقی لایه‌ها سرعت بسیار نزدیک به صفر بوده و سرعت‌های $0/0003$ ، $0/0001$ ، $0/0002$ ، $0/0001$ متر بر ثانیه برای لایه دو تا ۵ محاسبه شد. علت بیشتر بودن تغییرات در لایه سطحی احتمالاً موج حاصل از حرکت قایق و شهادت بوده است. لازم به یادآوری است که مثبت و منفی بودن سرعت جریان نشان‌دهنده جهت جریان است. اگر جهت جریان از ایستگاه یک به دو باشد، مثبت؛ و اگر از ایستگاه دو به یک باشد، منفی خواهد بود.



شکل ۱۵. سرعت جریان لایه‌ای مخزن سد لتیان در تاریخ اول آبان ۱۳۹۹

در مطالعه بحرینی و همکاران (۱۳۹۸)، امکان‌سنجی پایش جریان‌های خلیج فارس با استفاده از فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی ۱۰ کیلوهرتز انجام شد. در مقایسه با پژوهش حاضر مطالعه بحرینی و همکاران (۱۳۹۸)، در مناطق دریایی انجام گرفته در صورتی که مطالعه حاضر در مخزن یک سد است. همچنین مطالعه بحرینی و همکاران (۱۳۹۸) امکان‌سنجی پایش جریان در یک عمق کلی است در صورتی که مطالعه حاضر توانایی پایش جریان در لایه‌های مختلف عمق مخزن سد توسط این فناوری را امکان‌سنجی کرد به طوری که در ۵ لایه

مختلف عمق با فاصله ده متری جریان‌ها به صورت مجزا استخراج شدند.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پایش منابع آبی بخصوص به دست آوردن سرعت جریان و عمق با دقت مکانی و زمانی بالا، برای مطالعات هیدرولوژیکی، رسوبی، ماهیگیری و هیدروآکوستیک و توانایی سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی به‌عنوان یکی از شاخه‌های سنجش از دور در جهت پایش ویژگی منابع آبی مانند دما، سرعت جریان در لایه‌های مختلف عمق آب و مزیت‌های این سامانه نسبت به دیگر روش‌های پایش و با توجه به این که تاکنون مطالعات بر روی پرتونگاری مقطعی صوتی در منابع آبی مانند اقیانوس، دریا و رودخانه انجام شده بود ولی بررسی فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد بسیار محدود است، در این پژوهش به ارائه روشی برای پایش سرعت جریان در مخازن سدها به صورت لایه‌بندی شده با استفاده از فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی بر پایه داده‌های برداشت‌شده از مخزن سد لتیان پرداخته شد.

گام اول برای استخراج سرعت جریان توسط فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی رهگیری پرتوها و شناسایی پرتوهای ویژه است. در این مطالعه با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی و تجزیه و تحلیل داده‌های صوتی برداشت‌شده از مخزن سد لتیان و همچنین با استفاده از داده‌های عمق‌سنجی، سی‌تی‌دی و با به‌کارگیری تئوری پرتو، الگوی انتشار امواج صوتی در مخزن سد لتیان که به‌عنوان آب کم‌عمق و دارای آب شیرین محسوب می‌شود، رهگیری شد و در نتیجه دو پرتو ویژه شناسایی شدند.

اوج‌های اول و دوم مربوط به داده‌های برداشت‌شده از مخزن سد لتیان شناسایی شدند و پس از حذف داده‌های پرت و جایگزینی با داده‌های مناسب سرعت جریان و سرعت صدای متوسط محاسبه شد. با حل مسئله معکوس و اعمال سرعت‌های صدای متوسط به‌دست‌آمده برای هر لایه، سرعت جریان و سرعت صدای هر لایه محاسبه و رسم شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده سرعت جریان در هر لایه با حداکثر اختلاف ۰/۰۰۰۶ متر بر ثانیه، در حدود صفر محاسبه شد. این مقدار با شرایط واقعی مخزن که در پیچه‌های مخزن بسته بود همخوانی داشت. حداکثر سرعت جریان در لایه ۱ در ساعت ۱۱:۴۴:۳۸ (۲۳/۳۴۳۵) با بزرگی ۰/۰۰۰۶ متر بر ثانیه رخ داده است. در این لحظه سرعت در لایه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۰/۰۰۰۳، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۲، ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه بود.

برای پایش مخازن سدها، روش پرتونگاری مقطعی صوتی یک روش کارآمد و دقیق است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مخازن سدهای کشور این فناوری برای پایش پیوسته و کم‌هزینه‌تر استفاده شود. همچنین علاوه بر توانایی سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در پایش دمایی مخازن سدها، سامانه مذکور، توانایی پایش سرعت و جهت جریان را نیز دارد. در شرایط باز بودن در پیچه سدها، می‌توان از این سامانه جهت پایش تغییرات سرعت و لایه تحت تأثیر استفاده نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- بحرینی مطلق، مسعود، روزبهانی، رضا، فرخ نیا، اشکان، سلطانی اصل، محمد، و محتشم، کمال. (۱۳۹۷ الف). فن آوری تکه نگاری صوتی، ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته سرعت و دمای جریان آب. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۴)، ۲۷۹-۲۸۴.
- بحرینی مطلق مسعود، روزبهانی رضا، افتخاری مرتضی، زارعیان محمدجواد، فرخ‌نیا اشکان. (۱۳۹۷ ب). ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیرآب (نظریه پرتو) در یک رودخانه با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری صوتی رودالی. مجله علمی پژوهشی انجمن مهندسی صوتیات ایران، ۶(۲): ۲۹-۳۸. <http://joasi.ir/article-1133-fa.html>
- بحرینی مطلق مسعود، روزبهانی رضا، افتخاری مرتضی، کاردان مقدم حمید، خوشحالی مهدی، محتشم کمال. (۱۳۹۸). امکان‌سنجی پایش جریان‌های خلیج فارس با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز. مهندسی دریا، ۱۵(۳۰): ۱۳۱-۱۳۸. <http://marine-eng.ir/article-1132-fa.html>
- فقیهی راد، شروین، اردلان، حسین، نیکخواه، آرش، و اسفندیارنژاد، امیر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی فیزیکی تخلیه جریان از مجرای عمقی در مخازن چگال (با لحاظ استفاده در اداره لوله عمقی سد گتوند). مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، ۵۲(۷)، ۱۷۴۳-۱۷۶۴. SID. <https://sid.ir/paper/1036597/fa>

REFERENCES

Bahreimotlagh, M., Rouzbahani, R., Farokhnia, A., SoltaniAsl, M., & Mohtasham, K. (2018). Acoustic



- Tomography Technology, a Useful Tool for Continuously Flow Velocity and Temperature Monitoring. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 279-284. (In Persian). http://www.iwrr.ir/article_64947_79cee677807f51d63bece057bc76d8b3.pdf
- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Zareian, M. J., & Farokhnia, A. (2019). Evaluation of underwater acoustic propagation model (Ray theory) in a river using Fluvial Acoustic Tomography System [Research]. *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, 6(2), 29-38. (In Persian). <http://joasi.ir/article-1-123-fa.html>
- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardanmoghadam, H., Khoshhali, M., & Mohtasham, K. (2020). Feasibility study of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for current monitoring in the Persian Gulf [Research Paper]. *Journal Of Marine Engineering*, 15(30), 131-138. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/marineeng.15.30.131>
- Barth, M., & Raabe, A. (2011). Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air. *Measurement Science and Technology*, 22(3), 035102.
- Bjørnø, L., & Buckingham, M. J. (2017). Chapter 1 - General Characteristics of the Underwater Environment. In T. H. Neighbors & D. Bradley (Eds.), *Applied Underwater Acoustics* (pp. 1-84). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00001-1>
- Dushaw, B. D., Gaillard, F., & Terre, T. (2017). Acoustic Tomography in the Canary Basin: Meddies and Tides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(11), 8983-9003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JC013356>
- Faghihirad, S., Ardalani, H., Nikkhah, A., & Esfandiarnajad, A. (2020). Physical Simulation of Discharge Flow from Deep Conduit in Dense Reservoir (In Terms of Use in the Gotvand Dam Deep Pipe). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7), 1743-1764. (In Persian). doi: 10.22060/ceej.2019.15645.5982
- Kaneko, A., Zhu, X.-H., & Lin, J. (2020a). Chapter 7 - Inversion on a Vertical Slice. In A. Kaneko, X.-H. Zhu, & J. Lin (Eds.), *Coastal Acoustic Tomography* (pp. 81-93). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818507-0.00007-X>
- Kaneko, A., Zhu, X.-H., & Lin, J. (2020b). Coastal acoustic tomography. Elsevier.
- Kawanisi, K., Razaz, M., Yano, J., & Ishikawa, K. (2013). Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines. *Measurement Science and Technology*, 24(5), 055303.
- Munk, W. H., & Worcester, P. F. (1988). Ocean acoustic tomography. *Oceanography*, 1(1), 8-10.
- Razaz, M., Kawanisi, K., Nistor, I., & Sharifi, S. (2013). An acoustic travel time method for continuous velocity monitoring in shallow tidal streams. *Water Resources Research*, 49(8), 4885-4899.
- Roux, P., Cornuelle, B. D., Kuperman, W., & Hodgkiss, W. (2008). The structure of raylike arrivals in a shallow-water waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3430-3439.
- Syamsudin, F., Chen, M., Kaneko, A., Adityawarman, Y., Zheng, H., Mutsuda, H., Hanifa, A. D., Zhang, C., Auger, G., & Wells, J. C. (2017). Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission. *Acoustical Science and Technology*, 38(5), 246-253.
- Taniguchi, N., Kaneko, A., Yuan, Y., Gohda, N., Chen, H., Liao, G., Yang, C., Minamidate, M., Adityawarman, Y., & Zhu, X. (2010). Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the northern part of the Luzon Strait. *Geophysical Research Letters*, 37(7).
- Wells, J. C., Aota, Y., Auger, G., Kaneko, A., & Goda, N. (2016). Application of coastal acoustic tomography to Lake Biwa, Japan. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4), 3183-3183. <https://doi.org/10.1121/1.4970006>
- Xu, S., Li, G., Feng, R., Hu, Z., Xu, P., & Huang, H. (2022). Tomographic Mapping of Water Temperature and Current in a Reservoir by Trust-Region Method based on CAT. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Zhang, C., Kaneko, A., Zhu, X. H., & Gohda, N. (2015). Tomographic mapping of a coastal upwelling and the associated diurnal internal tides in Hiroshima Bay, Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(6), 4288-4305.

Determining the layered flow velocity in the Latyan reservoir using acoustic tomography technology

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Acoustic tomography technology is an advanced method of remote sensing, which has been used and verified by many researchers in recent years to measure flow velocity and temperature in different water environments. Measuring the flow velocity in different layers of the dam reservoir, to monitor the state of sedimentation that is affected by the flow of the dam reservoir, and also to monitor the appropriate position of water intake or outlet of water consumption in power plants along the coast, thick flow of sediment in water bodies, infiltration of salinity in reservoirs and dams and the discharge of salt water from the deep outlets of the dams is necessary.

Methodology

The practical development of this technology in reservoirs of dams, especially Iranian dams, is necessary. Therefore, according to the importance of determining the flow velocity in different layers of the dam reservoir, in this research, with the help of acoustic tomography technology and solving the inverse problem using the adjusted Tikhonov method, the determination of the flow velocity in the different layers of the Latian dam reservoir was done. The innovation of this method can be called the investigation of the application of acoustic tomography technology in the reservoir of the dam to determine the speed of layered flow for the first time in Iran.

Results and Discussion

The basis of this method is to calculate and record the travel time of acoustic rays in the water environment, including the reservoir of the dam. In this research, two acoustic stations with mutual transmission with a frequency of 10 kHz were placed in the reservoir of Latian Dam on October 23, 2020. Five layers with a distance of ten meters in depth were selected. After ray tracing and identifying two or more rays with different travel times and while they pass through different depths of the studied area, the computing domain, which is the same perpendicular plane, is divided into several layers.

Conclusion

The results of solving the adjusted inverse problem showed that the maximum velocity of 0.0006 m/s occurs in the first layer (0 to 10 m depth). For the flow velocity of layers, two to five, 0.0003, 0.0001, 0.0002, 0.0001 m/s were calculated respectively, which according to the close to zero flow velocity of the dam reservoir at the time of data collection, the velocity of the flow was obtained with a relatively good approximation. According to the obtained results, the flow velocity in each layer was calculated to be around zero with a difference of 0.02 m/s. This value was consistent with the actual condition of the reservoir when the reservoir valves were closed. It is suggested that in future studies, data collection should be done when the water discharge valves are open so that the results can be compared with the results of this research.

Keywords: Acoustic Tomography, Latian Dam, Regularization, Inverse Problem, Stratified Flow Velocity.