

# Identification of Special Rays Using the Ray Theory Method in the Latian Dam Reservoir Using Coastal Acoustic Tomography System

Reza Hosseinzadeh Asl<sup>1</sup>, Mehdi Yasi<sup>2\*</sup>, Masoud Bahreini Motlagh<sup>3</sup>

1- Graduated Ph.D., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Assistant Professor, Water Research Institute, Tehran, Iran.

\* [m.yasi@ut.ac.ir](mailto:m.yasi@ut.ac.ir)

Received: 26 November 2023

Accepted: 17 February 2024

Discussion: 22 June 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Various measurement tools are used to monitor water environments such as oceans, seas, rivers, and dam reservoirs. Acoustic tomography is one of the branches of remote sensing, which is a powerful tool for monitoring the characteristics of water resources, such as water temperature and velocity in different layers of water depth (in various water environments such as the ocean, sea, river, and dam reservoir). This technology is used with the aim of obtaining information from a desired area, without any interference in the characteristics of that area. In acoustic tomography systems with at least two devices, the waves are sent through the transmission part on both sides of the water environment. Due to the presence of two important boundaries of the bottom of the bed and the water surface, these waves propagate in the entire water depth. By calculating the travel times of each sound ray sent to the opposite station, the average sound speed is calculated for each path. These calculations are used to understand the temperature and flow rate changes as a function of water depth in a water environment such as a dam reservoir. The basis of the work of layering the water environment in depth to monitor changes in temperature and flow speed is the way sound rays propagate in that water environment. Amplitude-independent ray simulation is performed using conductivity-temperature-depth (CTD) data on the transmission line.

**Methodology:** Experiments and measurements were carried out in the reservoir of Latian Dam, which is located on the Jajroud River. In this study, two experiments were conducted with sound frequencies of 10 kHz and 30 kHz. In each experiment, two acoustic tomography stations were deployed in the dam reservoir. The approximate distance between the two stations was 1617 meters. CTD and bathymetry data were collected. The time of data collection took place on the 22 and 23 of October 2020. No valve of Latian Dam was open during data collection.

The sound ray propagation pattern in the dam reservoir can be well approximated by the ray tracing method that only considers sound refraction (Snell's refraction law). Snell's law describes the refraction of sound waves in an environment where the speed of sound in

separate horizontal layers varies with depth (reflection of sound rays in an environment with variable speed). Transmission losses and mirror reflections on the water surface and reservoir bed can also be included in this method. For this purpose, we first interpolate and draw the depth measurement data with a distance of 0.1 meters. Then we interpolate the CTD data including depth, temperature and salinity to a distance of 0.1 m. After obtaining the depth, temperature and salinity in every 0.1 meter depth, using the McKenzie relationship, the average depth reference sound speed is obtained. Ray simulation identifies transmitted rays (special rays) that are valuable for peak detection and for solving the tuned inverse problem.

**Results and Discussion:** It was done by processing the data obtained from acoustic tomography in the Latian dam reservoir and measuring the ray traveling time from one to two and two to one station. The correlation plot (signal-to-noise-travel time) was plotted for the data sent from the one-to-two and two-to-one stations with a frequency of 10 kHz. Considering the distance of 1617 meters between the two stations and the approximate sound speed of 1470 meters per second in water (considered as an approximation according to CTD data collection), the first peak travel time should occur in the range of 1100 milliseconds. Therefore, the plots were plotted between 1080 milliseconds and 100 milliseconds after that. It was observed that the first peak occurred for the data in the range of 1100 ms.

To accurately measure the travel time (arrival time) of the first peak that will be used in the selection of the special ray, the first peak (the largest peak) was identified for each data and the travel time of the first peaks was calculated and plotted against the data acquisition time. Due to the fact that the travel time of the sound ray and the speed of sound in water are related to the temperature gradient the measurement was done with the frequency of 10 kHz and 30 kHz on two different days.

400 rays launched from the first station were intercepted. 36 rays reached the second station. The results of the simulation of sound wave propagation patterns were studied and validated by using CTD and by measuring the travel time of the waves. It can be seen that the difference between the travel time simulated by the ray theory method and the travel time obtained from the acoustic tomography and the calculations of the first peak is in the thousandth of a second, which is very insignificant and shows the accuracy of the simulation.

**Conclusion:** The propagation pattern of sound waves in the Latian Dam reservoir, which is considered shallow and fresh water, was intercepted, and as a result, three special rays were identified and validated. The results of this ray tracing were evaluated using the acoustic tomography system. The results showed that this model can simulate different sound paths with different propagation angles as well as the travel time of sound waves. Changing the frequency has no effect on the radiation pattern in the dam reservoir, but it affects the intensity of the signal.

As a result, the radiation interception in the dam reservoir depends on the topography of the reservoir, water level, and bed as boundary conditions and thermal stratification and temperature, salinity, and depth. Finally, according to the propagation of rays in the entire depth of the tank, it was observed that the location of the transom should be placed near the water level of the tank, considering the shape of the cross-section of the reservoir.

**Keywords:** Propagation pattern of sound waves underwater, Ray theory, Dam reservoir, Coastal acoustic tomography, Acoustic tomography.

# شناسایی پرتوهای ویژه با روش تئوری پرتو در مخزن سد لتیان به کمک سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی

رضا حسین زاده اصل<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>، مسعود بحرینی مطلق<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- استاده، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

\* m.yasi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** پرتونگاری مقطعی صوتی شاخه‌ای از دانش سنجش از دور است که با اندازه‌گیری زمان طی شده امواج صوتی در آب، قادر است متغیرهای محیط آبی را اندازه‌گیری کند. اولین گام برای استخراج نیمرخ حرارتی و پایش دمای مخزن سد با روش پرتونگاری مقطعی صوتی، شناسایی پرتوهای ویژه و شبیه‌سازی آن‌ها در مخزن سد است. در این مطالعه به شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج صوتی با تئوری پرتو در مخزن سد لتیان پرداخته شد. برای این منظور از داده‌های عمق‌سنجی و سی‌تی‌دی (هدایت - دما - عمق) برای شرایط مرزی، سرعت صوت، نیمرخ دما و شوری در مخزن سد استفاده شد. از دو ایستگاه صوتی پرتونگاری مقطعی صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و ۳۰ کیلوهرتز به فاصله ۱/۶ کیلومتر برای پرتونگاری مقطعی صوتی استفاده شد. زاویه انتشار نسبت به افق (سطح آب) از منفی ۲۰ تا مثبت ۲۰ درجه با اختلاف ۰/۱ درجه رهگیری شدند. با توجه به توپوگرافی مخزن، سه پرتو صوتی با زاویه‌های ۰/۹، ۱۴ و منفی ۲۰ درجه از بین ۳۶ پرتو رهگیری شده انتخاب شد. نتایج نشان داد که الگوی رهگیری شده در مخزن سد لتیان با اختلاف ۴ تا ۸ میلی‌ثانیه زمان پیمایش پرتو صوتی را درست تخمین زده است. سه پرتو انتخابی نشان داد که پرتوی که شکست کم‌تری داشته و برخورد کم‌تری به کف مخزن و یا سطح آب دارد سریع‌تر به ایستگاه دوم خواهد رسید و طول کم‌تری خواهد داشت. همچنین تغییر بسامد از ۱۰ کیلوهرتز به ۳۰ کیلوهرتز در زمان پیمایش پرتو صوتی هیچ اثری نداشت. از نتایج این مطالعه و پرتوهای ویژه شناسایی شده، برای محاسبه طول پرتو طی شده جهت استخراج نیمرخ حرارتی در مخزن سد به کمک سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی استفاده می‌شود.

**کلیدواژگان:** الگوی انتشار امواج صوتی در زیرآب، تئوری پرتو، مخزن سد، پرتونگاری ساحلی، پرتونگاری مقطعی صوتی.

## ۱- مقدمه

می‌آید و این نوع موج‌ها در آب به سرعت تضعیف می‌شوند. در مقابل، آب محیطی شفاف برای موج‌های صوتی است و این موج‌ها می‌توانند هزاران کیلومتر را در این محیط طی کنند (Bahreinimotlagh et al., 2019; Bjørnø & Buckingham, 2017). برای اینکه موج‌های صوتی مسافت‌های درازتری را طی کنند، به بسامدهای صوتی پایین‌تر نیاز دارند، زیرا میزان جذب صوت با افزایش بسامد، افزایش می‌یابد (Khodayari et al., 2010). فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی<sup>۴</sup> به عنوان یکی از

برای پایش محیط‌های آبی مانند اقیانوس‌ها، دریاها، رودخانه‌ها و از جمله مخزن سدها از ابزار اندازه‌گیری متنوعی استفاده می‌شود. در دانش سنجش از دور، برای شناخت و پایش متغیرهای محیطی، از انواع موج‌های الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> (رادئویی)، نوری و صوتی استفاده می‌شود اما شایان یادآوری است که محیط زیر آب<sup>۲</sup> برای موج‌هایی به غیر از موج‌های صوتی<sup>۳</sup>، محیطی مات به‌شمار

1. Electromagnetic Waves
2. Underwater
3. Acoustic Waves

4. Acoustic Tomography Technique

عمق برای پایش تغییرپذیری دما و سرعت جریان، چگونگی انتشار پرتوهای صوتی در آن محیط آبی است. شبیه سازی الگوی انتشار موج‌های صوتی در زیر آب، از مبحث‌های مهم و پایه‌ای صوت در محیط آبی است. تغییرپذیری‌های جزیی در فراسنجه‌های آب مانند دما، شوری، فشار (عمق)، اسیدیته و بسامد موج صوتی، تغییر زیادی در سرعت و در نتیجه چگونگی انتشار صوت ایجاد می‌کند (Neighbors III, 2017). بنابراین رفتار موج‌های صوتی در آب‌های کم عمق مانند دریاها، رودخانه‌های آب شیرین و مخزن سدها با آب‌های عمیق مانند اقیانوس‌ها متفاوت است. آب کم عمق به محیط آبی گفته می‌شود که برخورد قابل توجه صوت با بستر آن پیش‌بینی می‌شود. معادله موج، نظریه حاکم بر همه مدل‌های ریاضی انتشار صوت است که روش‌های حل متفاوتی برای توصیف چگونگی انتشار موج‌های صوتی در زیر آب با اعمال شرایط مرزی و محدودیت‌های انتشار، برای این معادله وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان روش‌های نظریه پرتو<sup>۵</sup>، مدهای عادی<sup>۶</sup>، بسط چند مسیره<sup>۷</sup>، میدان سریع<sup>۸</sup> (انتگرال عدد موج) و معادله سهموی<sup>۹</sup> را نام برد (Etter, 2012). هنگامی که مسئله انتشار موج‌های با بسامدهای بالا (بالتر از ۵۰۰ هرتز) مطرح باشد، مدل نظریه پرتو بسیار سریع‌تر از مدل‌های دیگر به پاسخ مناسب می‌رسد. به علت سادگی و سرعت در محاسبه‌ها، متداول‌ترین مدل برای شبیه‌سازی الگوی انتشار موج‌های صوتی، روش نظریه پرتو است. در این روش موج‌های صوتی به صورت پرتوهای صوتی با استفاده از قانون اسنل بررسی شود. نظریه پرتو بر مفهوم جبهه موج استوار است. در یک محیط ثابت و بدون جریان مانند مخزن سد در شرایطی که دریچه‌های آن بسته باشند، برای جبهه موج عمود بر جهتی است که انرژی صوتی در آن منتشر می‌شود (Pierce, 2019). الگوی انتشار صوت در دریاها یا ساحلی به شدت تحت تاثیر وضعیت لایه‌بندی دمایی است. بنابراین پایش سرعت صوت و سرعت جریان توسط سی‌ای‌تی بدون دانش

شاخه‌های سنجش از دور است که ابزاری با قدرت برای 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) کاربرد دارد (Munk & Walter et al., 1996). این فناوری با هدف به‌دست آوردن اطلاعات از یک ناحیه مورد نظر، بدون هرگونه دخالتی در ویژگی‌های آن ناحیه به کار گرفته می‌شود (Barth & Raabe, 2011). پرتونگاری مقطعی صوتی با توجه به محیط آبی به سه دسته اقیانوسی (آی‌تی<sup>۱</sup>)، ساحلی (سی‌ای‌تی<sup>۲</sup>) و رودخانه‌ای (اف‌ای‌تی<sup>۳</sup>) تقسیم می‌شود. تنها تفاوت سه نوع دستگاه آی‌تی، اف‌ای‌تی و سی‌ای‌تی در بسامد موج‌هایی است که ارسال می‌کند، به طوری که بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی کمتر از یک کیلوهرتز و در فاصله‌های چند هزار کیلومتری، بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی ساحلی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز در فاصله‌های کمتر از ۱۰۰ کیلومتر و بسامد دستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی رودخانه‌ای ۱۰ تا ۶۰ کیلوهرتز و در فاصله‌های ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر است (Bahreinimotlagh et al., 2020). در سامانه‌های پرتونگاری مقطعی صوتی با دست کم دو دستگاه، موج‌ها از طریق بخش تراگذار<sup>۴</sup> در دو طرف محیط آبی ارسال می‌شوند. به دلیل وجود دو مرز مهم کف بستر و سطح آب این موج‌ها در کل عمق آب منتشر می‌شوند. بخش گیرنده هر دو تراگذار، موج‌های رسیده را دریافت کرده و زمان پیمایش موج‌ها را در بخش پردازنده ذخیره می‌کند. با استفاده از محاسبه زمان‌های پیمایش هر پرتو صوتی ارسال شده به ایستگاه مقابل، سرعت صوت میانگین برای هر یک از مسیرها محاسبه می‌شود. این محاسبه‌ها در شناخت روند تغییرپذیری دما و سرعت جریان به عنوان تابعی از عمق آب در یک محیط آبی مانند مخزن سد کاربرد دارند (Kawanisi et al., 2013; Munk & Worcester, 1988). مبنای کار لایه‌بندی محیط آبی در

5. Ray Theory  
6. Normal Mode  
7. Multipath expansion  
8. Fast Field  
9. Parabolic Equation

1. OAT: Ocean Acoustic Tomography  
2. CAT: Coastal Acoustic Tomography  
3. FAT: Fluvial Acoustic Tomography  
4. Transducer

۱-۱- شناسایی پرتوهای ویژه مدل انتشار صوت با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در محیط آبی اقیانوسی

(Taniguchi et al., 2010) با استفاده از پرتونگاری مقطعی صوتی در طول ماه می تا سپتامبر ۲۰۰۸ در تنگه لوزون<sup>۲</sup> با دو ایستگاه به فاصل حدودی ۳۵ کیلومتر و عمق ۸۰۰ متری که در آن جزر و مد شدید رخ می دهد، آزمایش انجام دادند. (شکل ۲).

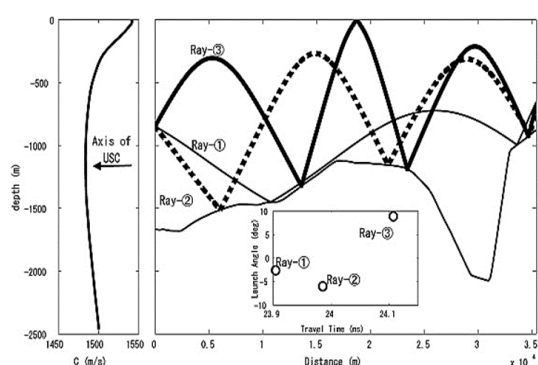


Fig. 2 The result of the three detected special rays and the speed of sound relative to depth

شکل ۲ نتیجه سه پرتو ویژه شناسایی شده و سرعت صوت نسبت به عمق (Taniguchi et al., 2010)

(Sagen et al., 2016) به تعیین دوره زمانی دما در تنگه فرام<sup>۳</sup> بر مبنای اندازه گیری های پرتونگاری مقطعی از ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ در امتداد یک مسیر ۱۳۰ کیلومتری پرداختند. دمای میانگین از اطلاعات و داده های اندازه گیری های پرتونگاری مقطعی به دست آمد. دماهای محاسبه شده، برای محدوده ۰ تا ۱۰۰۰ متر عمق، به طور میانگین ۱/۱۱ درجه سلسیوس و تغییرات  $\pm 0.33$  درجه سلسیوس داشتند. (شکل ۳).

در بررسی های (Dushaw et al., 2017)، نتایج انتشار پرتو صوتی در فاصله ۳۰۸ کیلومتری در محدوده قناری<sup>۴</sup> در سال های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۸ که برای ارزیابی توانایی پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی انجام شده بود، برای اندازه گیری جریان آب مدیترانه و محدوده جزر و مدی استفاده شد. در این بررسی ها هشت پرتو ویژه شناسایی شد (شکل ۴).

پیشین از وضعیت لایه بندی دمایی محیط آبی دشوار است. لایه بندی دمایی در دریاهای ساحلی همگی در فصل تابستان در عرض های متوسط آن و در دریاهای گرمسیری در همه فصل ها دیده می شود. در یک دریای دارای لایه بندی حرارتی، پرتوهای صوتی یک الگوی شکست رو به بالا<sup>۱</sup> را پیروی می کنند. شکل ۱ یک الگوی پیمایش پرتو مطلوب به دست آمده از ایستگاه T1 و T2 را نشان می دهد. برابر شکل ۱، در صورتی که منبع صوتی در نزدیکی بستر دریا قرار گیرد، مسیرهای پرتو صوتی در عمق گسترده می شود و اطلاعات را در عمق های مختلف می توان گردآوری کرد و در نتیجه شرایط خوبی را برای پرتونگاری مقطعی صوتی ایجاد می کند. در صورتی که هنگامی منبع صوتی در نزدیکی سطح آب قرار دارد، منطقه ای به وجود می آید که در آن هیچ پرتوی منتشر نشده است. بنابراین یافتن موقعیت مناسب برای قرار گیری تراگذار برای انجام موفق آزمایش سی ای تی بسیار دشوار است. به صورت خلاصه، با توجه به نیمرخ سرعت صوت در عمق آب که همگی همانند نیمرخ دما در عمق آب است، اگر این تغییر پذیری ها از سطح آب تا بستر از بزرگ تر به کوچکتر تغییر کند (سطح آب گرم تر از بستر آب باشد) در این صورت بهتر است تا تراگذارها در بستر محیط آبی قرار بگیرند. در صورتی که تغییر پذیری های دما از سطح آب تا بستر محیط آبی افزایشی باشد، بهتر است تراگذار در سطح آب قرار گیرد (Kaneko et al., 2020).

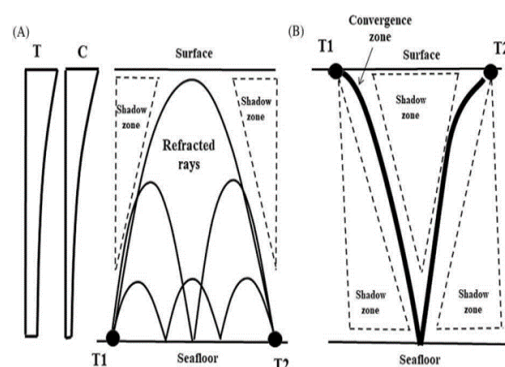


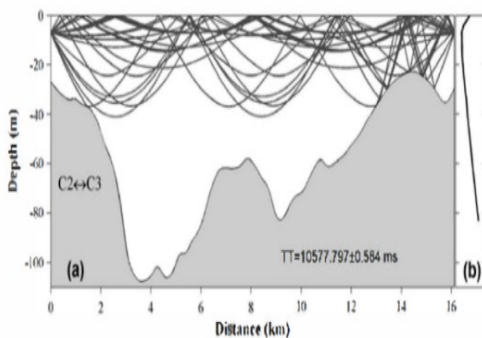
Fig. 1 Acoustic ray propagation pattern in a thermally stratified sea (Kaneko et al., 2020)

شکل ۱ الگوی انتشار پرتو صوتی در یک دریای دارای لایه بندی حرارتی (Kaneko et al., 2020)

2. Luzon Strait  
3. Fram Strait  
4. Canary

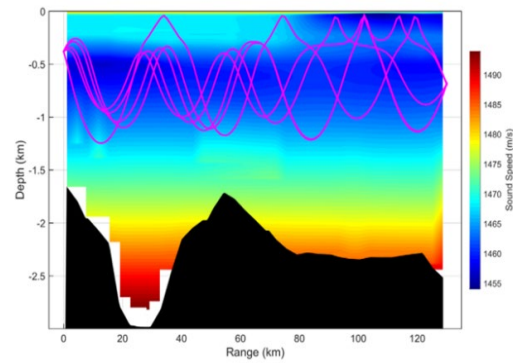
1. upward refracted pattern

کیونگژو<sup>۴</sup>، با فاصله ایستگاه بین ۶/۶ کیلومتر و ۱۸/۶ کیلومتر انجام داد و بازسازی میدان دمای دو بعدی را به دست آورد. برای شبیه‌سازی الگوی انتشار پرتو صوتی، از نیمرخ میانگین سرعت صوت تعیین شده توسط داده‌های سی‌تی‌دی<sup>۵</sup> استفاده شد. سی‌تی‌دی مخفف رسانایی، دما و عمق<sup>۶</sup> است که به بسته‌ای از ابزار اندازه‌گیری این ویژگی‌ها اشاره دارد. کار اصلی سی‌تی‌دی شناسایی چگونگی تغییر رسانایی و دما در ارتباط با عمق آب است. رسانایی مستقیم با شوری در آب مرتبط است. برابر شکل ۵، سرعت صوت از سطح آب به عمق تقریبی ۷ متر کاهش یافته و آن‌گاه از ۱۵ متر به پایین افزایش یافته است. زاویه انتشار پرتو در محدوده  $-1/5$  تا  $1/5$  درجه، با فاصله  $0.1$  درجه تنظیم شد.



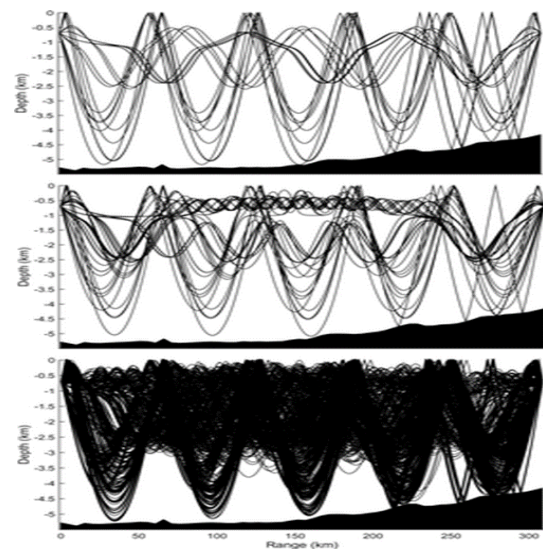
**Fig. 5** Ray simulation results between stations C2 and C3 (Liu et al., 2016).  
شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی پرتو بین ایستگاه‌های C2 و C3 (Liu et al., 2016).

(Syamsudin et al., 2017)، یک آزمایش انتقال صوت با استفاده از دو نظام صوتی طی چهار روز، در امتداد یک خط مقطعی در تنگه بالی<sup>۷</sup> با جریان‌های جزر و مدی قوی برای اندازه‌گیری سرعت جریان و دمای آب میانگین پنج لایه را انجام دادند. شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی دو گروه از موج‌های صوتی نشان داد که گروه اول با کف دریا برخورد کرده و پس از بازتاب و با گذشت  $2918/6$  میلی‌ثانیه و  $4462/8$  متر به ایستگاه مقابل رسیده‌اند، در حالی که گروه دوم پس از برخورد با سطح آب و پس از  $2920$  میلی‌ثانیه



**Fig. 3** The emission pattern of five eigen rays obtained from the sound speed of the Fram Strait model

شکل ۳ الگوی انتشار پنج پرتو ویژه به دست آمده از سرعت صوتی مدل تنگه فرام (Sagen et al., 2016)



**Fig. 4** Ray paths in different conditions without tides and with hypothetical tides

شکل ۴ مسیرهای پرتو در شرایط مختلف بدون جزر و مد و با جزر و مدهای فرضی (Dushaw et al., 2017)

## ۲-۱- شناسایی پرتوهای ویژه مدل انتشار صوت با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در محیط آبی دریایی

پرتونگاری مقطعی صوتی ساحلی<sup>۱</sup> (سی‌ای‌تی<sup>۲</sup>) یک فناوری نوآورانه و یک توسعه از پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی<sup>۳</sup> برای استفاده در دریاها، کم‌عمق و ساحلی است (Kaneko et al., 2020; Roux et al., 2008).

(Liu et al., 2016)، یک آزمایش سی‌ای‌تی را در تنگه

4. Qiongzhou Strait

5. CTD: Conductivity, Temperature and Depth

6. Conductivity, Temperature, Depth

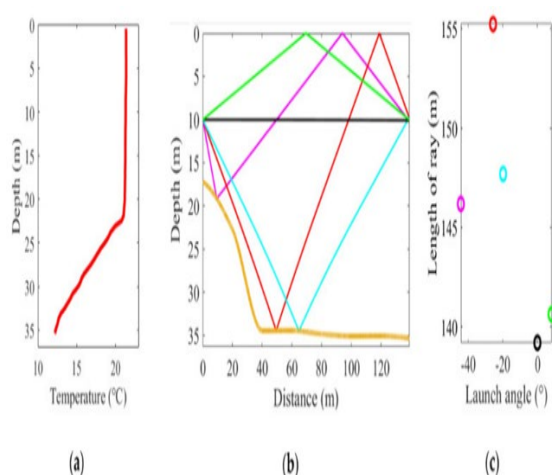
7. Bali Strait

1. Coastal Acoustic Tomography

2. CAT

3. OAT: Ocean Acoustic Tomography

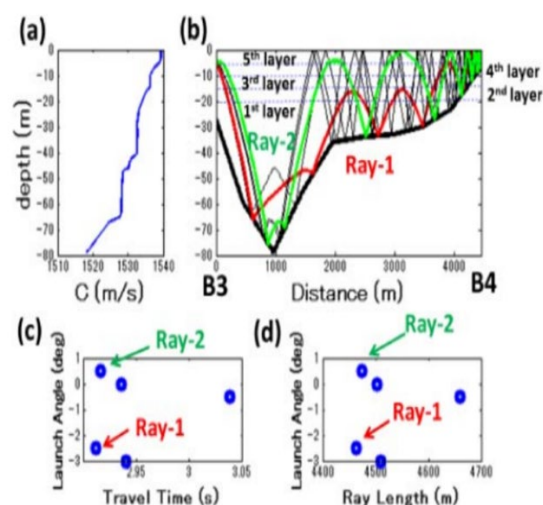
دو ایستگاه سی‌ای‌تی در دریاچه هزار جزیره<sup>۲</sup> هانگژو<sup>۳</sup> چین برای به‌دست آوردن داده‌های صوتی و محاسبه نیمرخ دمای آب انجام دادند. برای این منظور دو ایستگاه با فاصله ۱۴۰ متری در عمق ۱۰ متری از سطح آب قرار داده شد. پنج پرتو ویژه در لایه‌های مختلف و زمان پیمایش مربوطه با شبیه‌سازی صوت به‌دست آمد. شکل ۸-a، نیمرخ دما نسبت به عمق را که با استفاده از سی‌تی‌دی اندازه‌گیری شد نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸-b، شبیه‌سازی پرتو با پنج مسیر مختلف خط زرد کف زمین، خط سیاه پرتو مستقیم، خط سبز پرتو بازتابنده از سطح، خط سرخ‌آبی نخستین پرتو بازتابنده سطح کف، خط فیروزه‌ای پرتو بازتاب شده از کف و خط قرمز دومین پرتو بازتاب شده از سطح کف را نشان می‌دهد. زاویه پرتاب پرتو و طول متناظر آن را شکل ۸-c، نمایش می‌دهد.



**Fig. 8** (a) Temperature profile measured by CTD. (b) Ray simulation with five different ray paths. (c) Angle of projection of rays and its corresponding length  
 شکل ۸ (a) نیمرخ دما که توسط سی‌تی‌دی اندازه‌گیری می‌شود. (b) شبیه‌سازی پرتو با پنج مسیر پرتوی مختلف. (c) زاویه پرتاب پرتوها و طول متناظر آن (Huang et al., 2020).

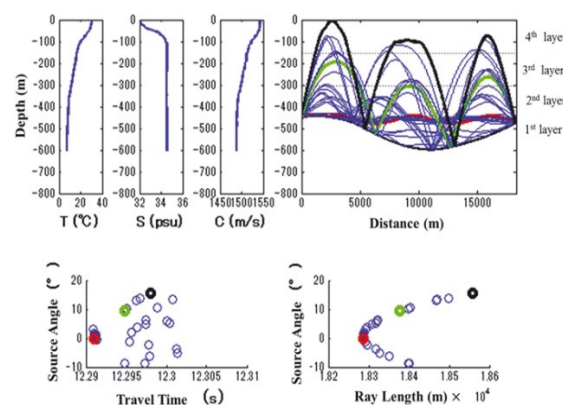
۳-۱- شناسایی پرتوها ویژه مدل انتشار صوت با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن  
 Huang et al. (2021) به سنجش پیوسته دمای آب با

و ۴۴۷۳/۲ متر به ایستگاه مقابل رسیده‌اند.



**Fig. 6** Range independent ray simulation results  
 شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه (Syamsudin et al., 2017).

(Syamsudin et al., 2019). در پژوهشی دیگر یک آزمایش انتقال پرتو صوت یک سویه را در تنگه لومبوک<sup>۱</sup> اندونزی توسط سی‌ای‌تی با دو موقعیت ایستگاه صوتی در فاصله ۱۸.۲۸۶ کیلومتری انجام داد که این آزمایش با موفقیت زمان پیمایش سه مسیر پرتو صوت را شناسایی کرد و بین دو ایستگاه به چهار لایه تقسیم شد (شکل ۷).

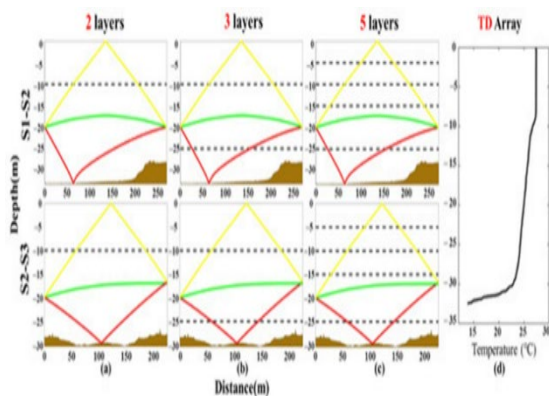


**Fig. 7** Ray simulation results and graph of sound speed, temperature and salinity with respect to depth. Travel time and length of each ray.  
 شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی پرتوها و نمودار سرعت صوت، دما و شوری نسبت به عمق. زمان پیمایش و طول هر پرتو (Syamsudin et al., 2019).

Huang et al. (2020) یک آزمایش انتقال صوتی متقابل با

2. Thousand Island  
 3. Hangzhou

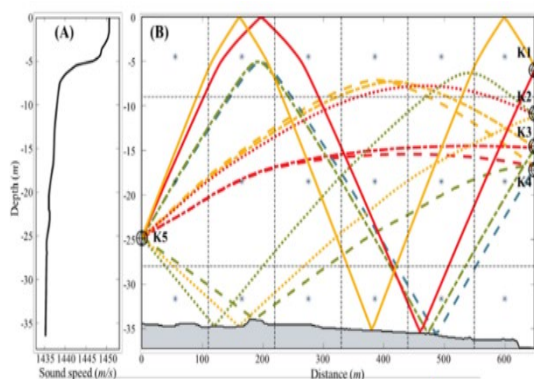
1. Lombok Strait



**Fig. 10** Ray simulation of different types of layers in S1-S2 and S2-S3 and temperature profile

شکل ۱۰ شبیه سازی پرتو انواع لایه های مختلف در S1-S2 و S2-S3 و نیمرخ دما (Xu et al., 2021).

(Xu et al., 2022) در پژوهش خود با یک روش شبکه میانگین و روش ناحیه اعتماد<sup>۴</sup> به پایش دقیق دما و سرعت جریان با فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی پرداختند. برای این منظور یک آزمایش با پنج ایستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی با بسامد ۵۰ کیلوهرتز از ۲۸ فوریه تا ۷ مارس ۲۰۲۲ در مخزن هوانگکای<sup>۵</sup> در چانگشای چین انجام دادند. چهار ایستگاه سی ای تی در یک موقعیت با عمق های مختلف برای محل قرارگیری تراگذار مستقر شدند و یک ایستگاه سی ای تی دیگر در فاصله ۶۵۰ متری از هم قرار گرفت (شکل ۱۱).

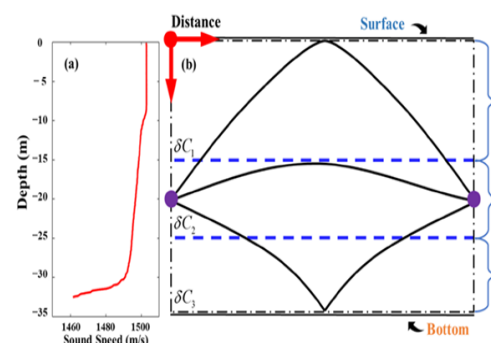


**Fig. 11** Ray tracing and arrival pattern of eigen rays and sound speed profile measured by CTD

شکل ۱۱ رهگیری پرتو و الگوی رسیدن پرتوهای ویژه و ویژگی های سرعت صوت اندازه گیری شده توسط سی تی دی (Xu et al., 2022).

روش معکوس شبکه<sup>۱</sup>، برمبنای پرتونگاری مقطعی صوتی پرداختند. یک آزمایش پرتونگاری مقطعی صوتی در یک مخزن با سه ایستگاه صوتی با بسامد ۵۰ کیلوهرتز برای پایش دمای آب انجام شد. در این بررسی یک روش معکوس شبکه جدید برای پایش نیمرخ دمای آب در امتداد یک برش عمودی پیشنهاد شد. آنان در این بررسی دریافتند که کیفیت میدان دمای آب عمودی دوبعدی بسیار به شمار پرتوهای صوتی شناسایی شده (پرتوهای ویژه) بستگی دارد. شکل ۹، ساختار انتشار صوت و تقسیم لایه در این بررسی را نشان می دهد.

(Shijie Xu et al. (2021) در پژوهش خود به پایش دمای آب میانگین لایه ای در دریاچه هوانگکای چانگشای هونان<sup>۲</sup> چین در امتداد دو برش عمودی، توسط پرتونگاری مقطعی صوتی سه ایستگاهی با بسامد ۵۰ کیلوهرتز و با تمرکز بر عملکرد روش لایه بندی معکوس و خطای دمای هر لایه پرداختند. برای این منظور برابر شکل ۱۰، اطلاعات پیمایش صوتی از طریق ردیابی پرتو با استفاده از داده های جانگاری (توپوگرافی) با دقت بالای به دست آمده از طریق ای دی سی پی<sup>۳</sup> سوار بر کشتی در طول آزمایش شناسایی شد. بنابراین نتایج این بررسی، با شمار معینی از پرتوهای صوت، هر لایه حاوی پرتوهای صوتی منحصربه فردی است که با لایه های دیگر متفاوت است. همچنین خطای روش تحلیل میانگین لایه با طول پرتوهای صوت هر لایه رابطه نمایی منفی دارد.



**Fig. 9** Sound propagation structure and layer division Huang et al., (۲۰۲۱) شکل ۹ ساختار انتشار صوت و تقسیم لایه (Huang et al., 2021).

4. Trust-Region Method  
5. Huangcai Reservoir in Changsha, China

1. Grid Inversion Method  
2. Huangca, Changsha, Hunan  
3. Acoustic Doppler Current Profiler

## ۱-۴- شناسایی پرتوهای ویژه مدل انتشار صوت با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در ایران

نخستین پژوهش پرتونگاری مقطعی صوتی در ایران توسط Bahreinimotlagh et al. (2018) انجام شد. آنان با معرفی پرتونگاری مقطعی صوتی به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مستمر سرعت میانگین و دمای آب به ارزیابی و انجام آزمایش پرتونگاری مقطعی صوتی در آبراهه آب کوثر دانشگاه مالک اشتر پرداخت. Bahreinimotlagh et al. (2019)، در پژوهشی با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی، به ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیر آب (نظریه پرتو) در یک رودخانه پرداختند. در این پژوهش شبیه‌سازی انتشار موج‌های 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 بررسی نشان داد بر خلاف دریا و اقیانوس که تغییرپذیری دما، شوری و موج‌های درونی عامل‌های اصلی انتشار موج‌های صوتی در چند مسیر مختلف هستند، در رودخانه کم‌عمق که تغییرات دما و شوری وجود ندارد، جانگاری (توپوگرافی) بستر رودخانه از عوامل اصلی انتشار دو گروه اصلی موج‌های صوتی در چند مسیر مختلف می‌باشند و صحت‌سنجی شبیه‌سازی با استفاده از دو دستگاه تراگذار پرتونگاری مقطعی صوتی انجام شد.

پژوهش‌های چندی بر روی دانش پرتونگاری مقطعی صوتی اقیانوسی، دریایی و رودخانه‌ای انجام شده است، اما هنوز به صورت جدی بررسی این روش در مخزن‌ها به‌ویژه مخزن سدها صورت نگرفته و به جز سه مقاله اخیر که در منبع‌ها ذکر شد، بررسی دیگری در این موضوع صورت نگرفته و ابعاد مختلفی از مسئله پرتونگاری مقطعی صوتی نیازمند بررسی است. همچنین در پژوهش‌های انجام شده، بیشتر الگوی انتشار موج‌های صوتی در اقیانوس‌ها، دریاها و رودخانه بررسی شده است و در مخزن سدها نیاز به بررسی دقیق‌تر احساس می‌شود.

در حل مسئله معکوس تنظیم شده و برای ماتریس معلوم، نیاز به محاسبه طول طی شده توسط هر پرتو صوتی در هر لایه است که با استفاده از رهگیری پرتو این طول در هر لایه قابل

محاسبه است. این پژوهش، با توجه به اهمیت شناسایی پرتوهای ویژه و رهگیری پرتو در مخزن سد برای پایش دما و سرعت جریان با استفاده از روش پرتونگاری مقطعی صوتی و با توجه به مناسب بودن روش نظریه پرتو در آب‌های کم‌عمق و موج‌ها با بسامد صوتی بالا برای رهگیری پرتو، در مخزن سد لتیان که دارای آب شیرین بوده و کم عمق (کمتر از ۲۰۰ متر) به‌شمار می‌آید صورت گرفته است و نوآوری آن رهگیری پرتو صوتی و شناسایی پرتوهای ویژه با استفاده از نظریه پرتو در مخزن سد و صحت‌سنجی و مقایسه با داده‌های به‌دست آمده از روش پرتونگاری مقطعی است. همچنین نتایج شبیه‌سازی با استفاده از دستگاه سی‌ای‌تی و بسامد ۱۰ کیلوهرتز و ۳۰ کیلوهرتز ارزیابی و صحت‌سنجی شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه و محل قرارگیری

#### ایستگاه‌های پرتونگاری مقطعی صوتی

آزمایش و اندازه‌گیری‌ها در مخزن سد لتیان که بر روی رودخانه جاجرود (در محلی که رودخانه برگ جهان به جاجرود می‌ریزد)، در ۱۰ کیلومتری شمال شرقی تهران و در جنوب شهر لوسان است، انجام گرفت. در این بررسی، دو آزمایش با بسامد صوتی ۱۰ کیلوهرتز و ۳۰ کیلوهرتز انجام شد. در هر آزمایش، دو ایستگاه پرتونگاری مقطعی صوتی، در مخزن سد مستقر شدند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، ایستگاه اول در کنار اسکله قایق‌ها مجاور بدنه سد در عمق ۳ متری و ایستگاه دوم در فاصله تقریبی ۱۶۱۷ متری در کنار جنگل بانی، در جایی که دو لوله پمپاژ وجود دارد، در عمق ۵۰ سانتی متری نصب شدند. سیگنال‌های صوتی به صورت متقابل بین ایستگاه‌های اول و دوم در فاصله‌های ۳۰ ثانیه‌ای ارسال شد. داده‌های عمق‌سنجی<sup>۱</sup> کف مخزن سد با استفاده از شهپاد اکوساندر (شناور هدایت‌پذیر خودکار هیدروگرافی) جمع‌آوری شد. در شکل ۱۳، روش داده‌برداری و نمونه طراحی خطوط عمق‌سنجی در نرم‌افزار برنامه‌ریزی خودکار برداشت اطلاعات و محدوده ماموریت‌های طراحی شده برای عمق‌سنجی توسط شهپاد

1. Bathymetry

شد تا زمان رسیدن نخستین 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 ۲۰۲۲<sup>a</sup> و برای تجزیه و تحلیل داده‌های پرتونگاری مقطعی صوتی و استخراج نمودارهای همبستگی از زبان برنامه‌نویسی ولفرام ممتیکا ۱۳/۱ استفاده شد.

برای انتخاب موقعیت و عمق قرارگیری تراگذارها در مخزن سد لتیان، با توجه به دمای بالاتر سطح آب نسبت به بستر مخزن سطح آب نسبت به بستر مخزن در هنگام انجام این آزمایش، بهتر بود که تراگذارها در بستر مخزن قرار بگیرند. اما به علت شکل مقطع عرضی انتخاب شده و برای اینکه مسافت درازتری از مقطع عرضی مخزن بررسی شود، این تراگذارها در نزدیکی سطح آب قرار داده شدند. با توجه به اینکه برخلاف شکل مقطع عرضی دریا که مرزهای مهم تنها بستر و سطح محیط آبی است، در این مطالعه به علت شکل مخزن که بستر به سطح آب می‌رسد (مانند شکل ۲۱ در بخش نتایج) قرارگیری تراگذارها در نزدیکی سطح آب باعث ایجاد ناحیه‌های سایه<sup>۲</sup> نمی‌شود.

## ۲-۲- شبیه‌سازی موج‌های صوتی با استفاده از روش نظریه پرتو

الگوی انتشار پرتو صوتی را در مخزن سد با روش رهگیری پرتو<sup>۳</sup> که تنها شکست صوت (قانون شکست اسنل<sup>۴</sup>) را در نظر می‌گیرد، می‌توان به خوبی تقریب زد. قانون اسنل، در محیطی که سرعت صوت در لایه‌های افقی جداگانه بر حسب عمق تغییر می‌کند (انعکاس پرتوهای صوتی در محیطی با سرعت متغیر)، شکست موج‌های صوتی را توصیف می‌کند. شبیه‌سازی پرتو، پرتوهای انتقال یافته (پرتوهای ویژه) را مشخص می‌کند که برای شناسایی نقطه‌های اوج و حل مسئله معکوس تنظیم شده ارزشمند هستند. در مسیر موج صوتی ارسال شده از ایستگاه اول تا رسیدن آن به ایستگاه دوم، چندین حالت ممکن است رخ دهد. نخستین حالت موج‌هایی هستند که به سطح و بستر

اکوساندر نشان داده شده است. شکل مقطع عرضی مخزن سد در نرم‌افزار برنامه‌نویسی ولفرام ممتیکا رسم شد. همچنین داده‌های نیمرخ دمایی سد لتیان بر حسب عمق برای یک ستونی از عمق آب توسط دستگاه سی‌تی‌دی<sup>۱</sup> 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.

در این پژوهش در آغاز به بررسی و استخراج داده‌های همزمان ارسال شده از هر ایستگاه صوتی پرداختیم که با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، ۵۱۶ داده به صورت داده همزمان استخراج شد. برای همه‌ی داده‌های همزمان ارسال شده از ایستگاه یک به دو و دو به یک، نمودار همبستگی استخراج



Fig. 12 The location of the first and second stations of the acoustic tomography in the Latian dam reservoir

شکل ۱۲ موقعیت مکانی ایستگاه اول و دوم از مقطع پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد لتیان

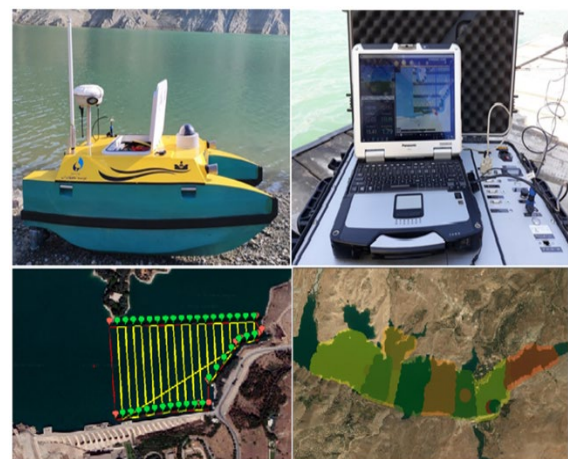


Fig. 13 Use of Shahpad and data taken in the Latian dam reservoir

شکل ۱۳ استفاده از شهپاد اکوساندر و داده‌برداری در مخزن سد لتیان

2. Shadow Zones  
3. Ray-Tracing  
4. Snell's Law of Refraction

1. CTD

۳۰ درجه سلسیوس) می‌باشد (Mackenzie, 1981). تغییرپذیری سرعت صوت در جهت عمق یکی از عامل‌های موثر در چگونگی انتشار صوت است به طوری که بنا بر نظریه پرتو، در شیب منفی سرعت صوت، پرتو صوتی به جهتی که سرعت صوت کاهش می‌یابد، خم می‌شود. با در نظر گرفتن معادله‌های اساسی حرکت سیال‌های تراکم پذیر<sup>۳</sup>، معادله حرکت ناویر-استوکس<sup>۴</sup> در فرم مختصات چرخشی<sup>۵</sup> یکنواخت بنا بر رابطه (۲) نوشته می‌شود (Kaneko et al., 2020).

$$\rho' \left( \frac{dv'}{dt} + 2\Omega \times v' \right) = -\nabla p' + \rho' \nabla \Phi + F(v') \quad (2)$$

معادله پیوستگی به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود.

$$\frac{d\rho'}{dt} + \rho' \nabla \cdot v' = 0 \quad (3)$$

که در آن مشتق (d/dt) برابر رابطه (۴) است و متغیرهای  $v'$ ،  $\rho'$  و  $p'$  به ترتیب بردار سرعت، چگالی و فشار است.  $\Omega$  بسامد زاویه سیاره‌ای<sup>۶</sup> است و  $\Phi$  تابع پتانسیل ناشی از نیروهای پایستار<sup>۷</sup> مانند گرانش و نیروهای گریز از مرکز است.

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v' \cdot \nabla \quad (4)$$

$F(v)$  نیروی اصطکاک در سیال است که با رابطه (۵) بیان می‌شود که در آن  $\mu$  گرانروی مولکولی<sup>۸</sup> که روی یک سیال ساکن است. علت اینکه گرانروی گردابی<sup>۹</sup> در اینجا مطرح نشده است این است که هدف در اینجا ارایه معادله موج صوتی است.

$$F(v') = \mu \nabla^2 v' + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot v') \quad (5)$$

متغیرهای  $v'$ ،  $\rho'$  و  $p'$  به دو بخش  $(v_0, \rho_0)$  و  $(P_0)$  برای حرکت سیال و  $(v, \rho)$  و  $(P)$  برای موج

برخورد نکرده و فقط در مسیر انتشار شکسته می‌شوند. دومین حالت موج‌هایی هستند که به سطح برخورد داشته ولی به بستر برخوردی ندارند، در نتیجه در این حالت پرتو صوتی متحمل شکست صوت در آب و بازتاب از سطح می‌شود. سومین حالت پرتوهایی هستند که به بستر برخورد کرده ولی به سطح برخوردی ندارند و در نتیجه از بستر بازتاب داشته و در درون آب متحمل شکست خواهند شد و آخرین مورد، حالت چهارم، پرتوهایی هستند که هم به سطح و هم به بستر برخورد داشته و در نتیجه افزون‌بر تحمل شکست در درون آب، از بستر و سطح بازتاب خواهند کرد. هر چه برخورد با سطح و بستر بیشتر باشد، بازتاب بیشتر بوده و در نتیجه پرتوهای صوتی تحت تاثیر هدررفت انرژی ناشی بازتاب می‌شوند (Kaneko et al., 2020).

هدررفت انتقال<sup>۱</sup> و انعکاس‌های آینه‌ای<sup>۲</sup> در سطح آب و بستر مخزن را نیز می‌توان در این روش لحاظ کرد. برای این کار در آغاز داده‌های عمق‌سنجی را با فاصله ۰/۱ متر درون‌یابی و رسم می‌کنیم (شکل ۲۱). آن‌گاه داده‌های سی‌تی‌دی که شامل عمق، دما و شوری را به فاصله ۰/۱ متر درون‌یابی می‌کنیم. سپس با به‌دست آوردن عمق، دما و شوری در هر ۰/۱ متر عمق، با استفاده از رابطه مکنزی (رابطه ۱) سرعت صوتی مرجع میانگین عمق به‌دست می‌آید (Kaneko et al., 2020).

$$C(T, Sa, D) = 1448.96 + 4.591T - 0.05304T^2 + 2.374 \times 10^{(-4)} T^3 + 1.340(Sa - 35) + 1.630 \times 10^{(-2)} D + 1.675 \times 10^{(-7)} D^2 - 1.025 \times 10^{(-2)} T(Sa - 35) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، 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 سلسیوس (برای بازه ۲ تا

3. compressible fluids  
4. Navier-Stokes equation of motion  
5. uniformly rotating coordinate frame  
6. planetary angular frequency  
7. conservative forces  
8. molecular viscosity  
9. Eddy Viscosity

1. Transmission Losses  
2. Mirror Reflections

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho_0 \nabla \cdot v = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (v_0 + v) \cdot \nabla \approx \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \quad (18)$$

$$F(v) = \mu \nabla^2 v + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot v) \quad (19)$$

با توجه به ناچیز بودن تاثیر  $\Omega$  و  $\nabla \Phi$  بر روی موج‌های صوتی به علت کوچک بودن آن‌ها و با توجه به اینکه در یک سیال ناگرونیرو<sup>۱</sup>  $F(v) = 0$  است، بنابراین رابطه (۱۶) به رابطه (۲۰) خلاصه می‌شود.

$$\frac{d^2 \rho}{dt^2} = p \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{1}{c_0^2} \right) + \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \approx \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \quad (20)$$

رابطه‌های (۱۷) و (۲۰) معادله‌های اساسی برای انتشار موج‌های صوتی در یک محیط متحرک هستند. با در نظر گرفتن مشتق مادی<sup>۲</sup> رابطه (۱۷)، رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{d\rho}{dt} + \rho_0 \nabla \cdot v \right) = \frac{d^2 \rho}{dt^2} + \rho_0 \frac{d(\nabla \cdot v)}{dt} = 0 \quad (21)$$

با گرفتن گرادیان  $\nabla$  از رابطه (۲۰) مانند  $\nabla(\rho_0 \frac{dv}{dt}) = \rho_0 \frac{d(\nabla \cdot v)}{dt} = -\nabla^2 p$  و با حذف  $\rho_0 \left( \frac{d(\nabla \cdot v)}{dt} \right)$  از دو معادله اخیر رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$\nabla^2 p = \frac{d^2 \rho}{dt^2} \quad (22)$$

معادله حالت در یک فرایند هم‌انترپی<sup>۳</sup> به صورت رابطه (۲۳) نوشته می‌شود که در آن  $C_0$  بیانگر سرعت صوت در محیط سیال است.

$$C_0^2 = \frac{p}{\rho} \quad (23)$$

صوتی تقسیم می‌شوند (رابطه (۶) تا (۸)) (Zheng et al., 1997).

$$v' = v_0 + v \quad (6)$$

$$\rho' = \rho_0 + \rho \quad (7)$$

$$p' = p_0 + p \quad (8)$$

با توجه به شرایط، موج صوتی تغییر خیلی کمی نسبت به حرکت سیال در متغیرها ایجاد می‌کند. بنابراین:

$$v_0 \gg v, \rho_0 \gg \rho, p_0 \gg p \quad (9)$$

ولی به‌طور کلی، متغیرهای مربوط به حرکت سیال با زمان و مکان در مقایسه به متغیرهای موج صوتی به کندی تغییر می‌کنند. تغییر آهسته شرایط زمانی منجر به رابطه (۱۰) می‌شود.

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} \ll \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \ll \frac{\partial \rho}{\partial t}, \frac{\partial p_0}{\partial t} \ll \frac{\partial p}{\partial t} \quad (10)$$

و رابطه (۱۱) شرایط مکانی را نشان می‌دهد.

$$\nabla v_0 \ll \nabla v, \nabla \rho_0 \ll \nabla \rho, \nabla p_0 \ll \nabla p \quad (11)$$

با جایگذاری رابطه (۶) تا (۸) در رابطه‌های (۲) تا (۵) و در نظر گرفتن رابطه‌های (۹) تا (۱۱)، رابطه (۱۲) تا (۱۵) برای حرکت سیال و رابطه‌های (۱۶) تا (۱۹) برای موج صوتی به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \rho_0 \left( \frac{dv_0}{dt} + 2\Omega \times v_0 \right) &= -\nabla p_0 + \rho_0 \nabla \Phi \\ &+ F(v_0) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{d\rho_0}{dt} + \rho_0 \nabla \cdot v_0 = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \quad (14)$$

$$F(v_0) = \mu \nabla^2 v_0 + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot v_0) \quad (15)$$

$$\rho_0 \left( \frac{dv}{dt} + 2\Omega \times v \right) = -\nabla p + \rho \nabla \Phi + F(v) \quad (16)$$

1. Inviscid Fluid  
2. material derivative  
3. equation of state in an isentropic process

رانگ-کوتا مرتبه چهارم<sup>۱</sup> با در نظر گرفتن شرایط اولیه در موقعیت منبع صوتی (رابطه ۲۹) حل می‌شود. شبیه‌سازی پرتو مستقل از دامنه، با استفاده از داده‌های رسانایی-دما-عمق (سی‌تی‌دی) روی خط انتقال انجام می‌شود (Kaneko et al., 2020).

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد

##### لتیان و محاسبه زمان پیمایش پرتوها

با پردازش داده‌های به‌دست آمده از پرتونگاری مقطعی صوتی در مخزن سد لتیان، زمان پیمایش موج‌ها از ایستگاه یک به دو و دو به یک اندازه‌گیری شد.

شکل ۱۴، نمودار همبستگی (سیگنال به نوفه-زمان پیمایش) برای داده‌های فرستاده شده از ایستگاه یک به دو و دو به یک با بسامد ۱۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. با توجه به فاصله ۱۶۱۷ متری دو ایستگاه و سرعت صوت تقریبی ۱۴۷۰ متر بر ثانیه در آب (که به صورت تقریبی با توجه به داده‌برداری سی‌تی‌دی در نظر گرفته شده است) زمان پیمایش نخستین اوج باید در محدوده ۱۱۰۰ میلی‌ثانیه رخ دهد. به این منظور محدوده انتخاب شده برای زمان پیمایش در شکل ۱۴، از ۱۰۸۰ میلی‌ثانیه تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه پس از آن انتخاب شد. علت انتخاب محدوده زمانی برای نمایش زمان پیمایش، کم شدن محاسبه‌ها و دقیق‌تر نشان دادن موقعیت اوج‌هاست. برابر شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که نخستین اوج برای داده‌ها در محدوده ۱۱۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده است.

برای مشاهده دقیق‌تر نمودار آبخاری همبستگی (زمان پیمایش-زمان داده‌برداری-سیگنال به نوفه) برای بسامد ۱۰ کیلوهرتز رسم شد (شکل ۱۵). در این شکل، منطقه‌های قرمز و سبز رنگ سیگنال به نوفه بیشتری نسبت به منطقه‌های آبی پررنگ دارند. مشاهده می‌شود برابر این نمودار نخستین اوج در محدوده ۱۱۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده است. همچنین برابر شکل ۱۵ مشاهده می‌شود دومین اوج در محدوده ۱۱۳۰ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد.

با جایگذاری رابطه (۲۳) در رابطه (۲۲) و اینکه  $C_0$  تابعی از زمان و مکان بوده و تغییرپذیری‌های کمی دارد، رابطه (۲۴) به‌دست می‌آید.

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = p \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{1}{c_0^2} \right) + \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \approx \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \quad (24)$$

رابطه‌های (۱۸) و (۲۴) در رابطه (۲۲) جایگذاری شده و معادله موج صوت با میدان سرعت جای‌گزین می‌شود و رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید.

$$\frac{1}{c_0^2} \left( \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \right)^2 p = \nabla^2 p \quad (25)$$

برابر رابطه (۲۵) دریافت می‌شود که انتشار صوت در یک محیط متحرک تحت تاثیر جریان  $(V_0)$  و سرعت صوت  $(C_0)$  است. از همین رو است که می‌توان سرعت جریان و سرعت صوت را در محیط آبی اندازه‌گیری کرد (Kaneko et al., 2020).

در روش نظریه پرتو، با حل معادله هلم هولتز آغاز می‌شود به طوری که برای این روش پاسخ معادله به صورت رابطه (۲۶) تا (۲۸) در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی الگوی انتشار موج‌های صوتی با استفاده از روش نظریه پرتو با حل معادلات دیفرانسیل زیر انجام شد:

$$\frac{dx}{dt} = \{C(x, z) + u \cdot n\} \cos \theta \quad (26)$$

$$\frac{dz}{dt} = C(x, z) \sin \theta \quad (27)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial C(x, z)}{\partial z} \cos \theta \quad (28)$$

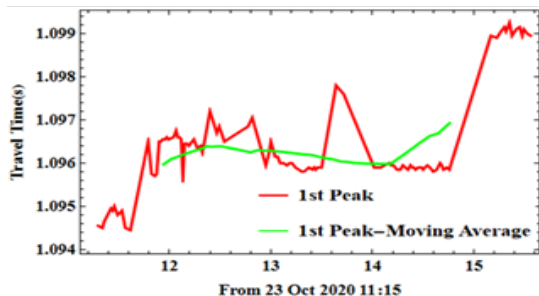
که در آن  $u$  و  $C$  به ترتیب سرعت جریان و سرعت صوت در یک صفحه  $(x, z)$  هستند و  $\theta$  زاویه موج اندازه‌گیری شده است نسبت به خط افقی است.

$$x = 0, z = z_0, \theta = \theta_0 \quad (29)$$

معادله دیفرانسیل عادی جفت شده مرتبه اول (رابطه ۲۶ تا ۲۸) به صورت عددی با روش تفاضل محدود مانند روش

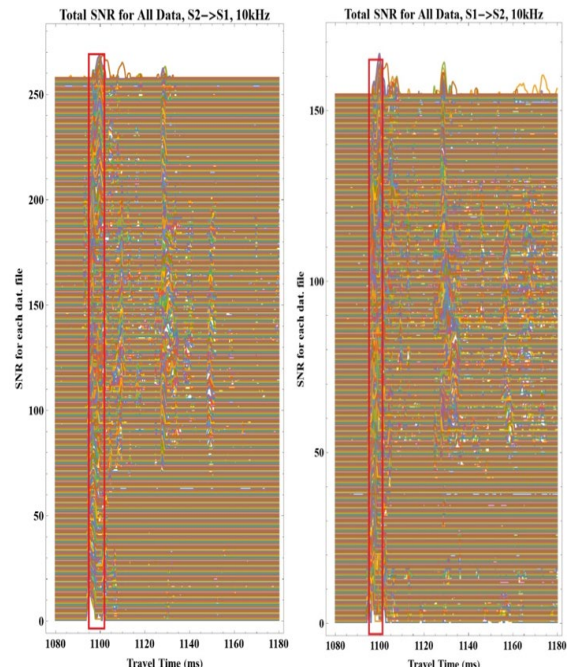
اول (بزرگ‌ترین اوج) برای هر داده شناسایی شد و زمان پیمایش اوج‌های اول نسبت به زمان داده‌برداری محاسبه و رسم شد. شکل ۱۶، نمودار زمان پیمایش مربوط به اوج اول هر داده با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و ایستگاه یک به دو را نشان می‌دهد. محور افقی این نمودار زمان داده‌برداری است که در اول آبان (۲۳ اکتبر ۲۰۲۰) از ساعت ۱۱:۱۵ شروع شده و در ساعت ۱۵:۳۴ به پایان رسیده است. اعداد ۱۲ تا ۱۵ همان ساعت در همان روز داده‌برداری است. در این شکل خط قرمز رنگ همان اوج‌های اول محاسبه شده هستند که زمان پیمایش آن‌ها از ۱۰۹۴ میلی ثانیه تا ۱۱۰۰ میلی ثانیه می‌باشد. برای دقت بیشتر با میانگین متحرک داده‌ها هموارتر شده و محدوده آن از ۱۰۹۶ میلی ثانیه تا ۱۰۹۶/۸ میلی ثانیه شد (شکل ۱۷). متوسط میانگین متحرک زمان‌های پیمایش، محاسبه شد که برابر ۱۰۹۶/۲۴ میلی ثانیه برای بسامد ۱۰ کیلوهرتز در ایستگاه یک به دو است.

شکل ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نمودار زمان پیمایش اوج‌های اول (خط قرمز) و میانگین متحرک آن‌ها (خط سبز) نسبت به زمان داده‌برداری و متوسط داده‌های به‌دست آمده از میانگین متحرک (خط سیاه) با بسامد ۱۰ کیلوهرتز برای ایستگاه دو به یک را نشان می‌دهد. با توجه به متوسط میانگین متحرک به‌دست آمده از اوج اول برای ایستگاه دو به یک با بسامد ۱۰ کیلوهرتز که برابر ۱۰۹۵/۸۸ میلی ثانیه است، ۰/۳۶ میلی ثانیه با متوسط میانگین متحرک زمان پیمایش اوج اول از ایستگاه یک به

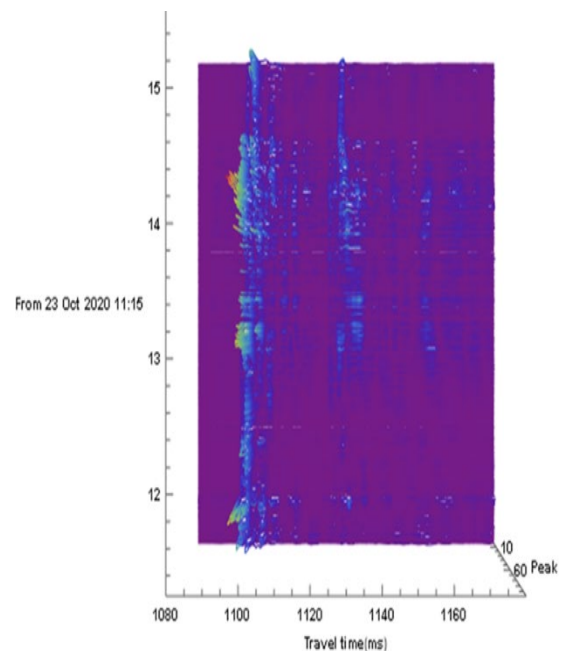


**Fig. 16** Traveling time of the first peaks (red line) and the moving average of the first peaks (green line) with respect to the time of data collection for the frequency of 10 kHz, from S1 to S2

شکل ۱۶ زمان پیمایش اوج‌های اول (خط قرمز) و میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه یک به دو.



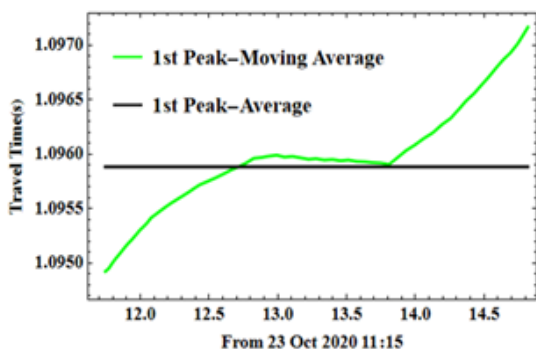
**Fig. 14** Correlation plot SNR and traveling time, for 10 kHz frequency, S1 to S2 station, and S2 to S1 station  
شکل ۱۴ نمودار همبستگی SNR با زمان پیمایش برای بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه یک به دو و از ایستگاه دو به یک



**Fig. 15** Correlation plot of (traveling time-data acquisition time-SNR) for frequency 10 kHz and station 1 to 2

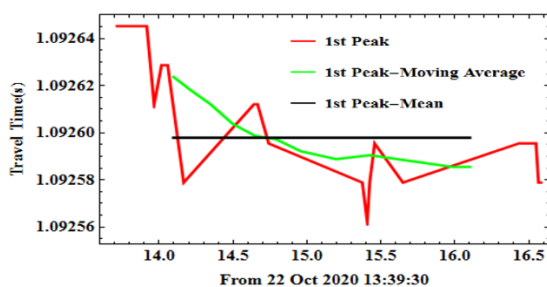
شکل ۱۵ نمودار آشناری همبستگی (زمان پیمایش-زمان داده‌برداری-سیگنال به نوفه) برای بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه ۱ به ۲

برای اندازه‌گیری دقیق زمان پیمایش (زمان رسیدن) اوج نخست که در انتخاب پرتو ویژه استفاده خواهد شد، اوج



**Fig. 19** The moving average of the first peaks (green line) and the average of the moving averages (black line) with respect to the time of data collection for the frequency of 10 kHz, and from S2 to S1.

شکل ۱۹ میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) و متوسط میانگین‌های متحرک (خط سیاه) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه دو به یک.



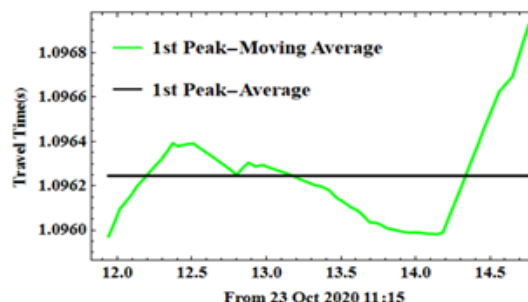
**Fig. 20** Travel time of the first peaks (red line), moving average of the first peaks (green line), and average moving average of the first peaks (black line) compared to the time of data collection for the frequency of 30 kHz, and from S1 to S2.

شکل ۲۰ زمان پیمایش اوج‌های اول (خط قرمز)، میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) و متوسط میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سیاه) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۳۰ کیلوهرتز، از ایستگاه یک به دو.

با توجه به اینکه زمان پیمایش پرتو صوتی و سرعت صوت در آب به تغییرپذیری‌های دمایی نسبت به عمق ارتباط دارد و اندازه‌گیری با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و ۳۰ کیلوهرتز در دو روز مختلف صورت گرفته است، برابر جدول ۱، اختلاف ۳/۹۸ میلی‌ثانیه‌ای مشاهده شده بین متوسط میانگین متحرک اوج‌های اول ایستگاه یک به دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز به علت تغییر دمای مخزن سد بین دو روز اندازه‌گیری است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر بسامد از ۱۰ کیلوهرتز به ۳۰ کیلوهرتز شدت صدا یا سیگنال به نوفه (SNR) را افزایش می‌دهد به طوری که بیشینه سیگنال به نوفه در بسامد ۱۰ کیلوهرتز برای ایستگاه یک به دو و دو به یک به ترتیب برابر ۱۳/۹ و

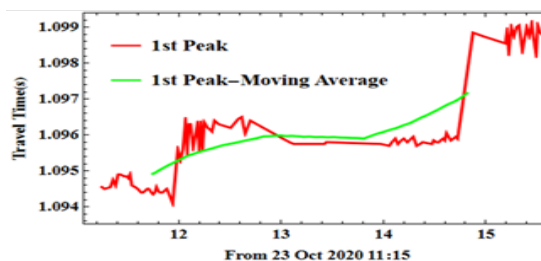
دو با بسامد ۱۰ کیلوهرتز تفاوت دارد.

برای بررسی تاثیر بسامد بر روی زمان پیمایش و شناسایی پرتوهای ویژه، نمودار همبستگی برای زمان پیمایش اوج‌های اول نسبت به زمان داده‌برداری برای بسامد ۳۰ کیلوهرتز از ایستگاه یک به دو و دو به یک نیز بررسی شد. شکل ۲۰، زمان پیمایش اوج‌های اول (خط قرمز)، میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) و متوسط میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سیاه) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۳۰ کیلوهرتز و یک به دو نشان داده شده است. برای جمع بندی دقیق‌تر در جدول ۱، برای بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز و ایستگاه یک به دو و دو به یک، محدوده‌های زمان پیمایش اوج اول به میلی‌ثانیه و محدوده میانگین متحرک اوج‌های اول به میلی‌ثانیه و متوسط میانگین متحرک آن‌ها نوشته شده است.



**Fig. 17** The moving average of the first peaks (green line) and the average of the moving averages (black line) with respect to the time of data collection for the frequency of 10 kHz, from S1 to S2.

شکل ۱۷ میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) و متوسط میانگین‌های متحرک (خط سیاه) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه یک به دو.



**Fig. 18** The moving average of the first peaks (green line) and the average of the moving averages (black line) with respect to the time of data collection with a frequency of 10 kHz and from S1 to S2.

شکل ۱۸ زمان پیمایش اوج‌های اول (خط قرمز) و میانگین متحرک اوج‌های اول (خط سبز) نسبت به زمان داده‌برداری با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، از ایستگاه دو به یک.

عرضی مخزن در محدوده مورد مطالعه و پرتوهای ویژه رهگیری شده بین زاویه تعیین شده را نشان می‌دهد. شکل ۲۲، زمان پیمایش هر پرتو با زاویه انتشار مشخص به ایستگاه دوم را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲۲ نیز طول طی شده توسط هر پرتو با زاویه انتشار مشخص را نشان می‌دهد. شمار گام‌های انتگرال‌گیری شده ۸۰۴۰ بار و اندازه افزایش گام‌های افقی ۰/۲ متر در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که موج‌های صوتی در چند مسیر متفاوت و در سه گروه اصلی انتشار یافته‌اند و به ایستگاه دوم می‌رسند. گروه اول پرتوهایی هستند که کمترین برخورد و شکست را با سطح آب و کف مخزن دارند و در نتیجه طول پرتو کمتری دارند (مانند پرتو سبز رنگ در شکل ۲۳). گروه دوم پرتوهایی هستند که بیشترین برخورد و شکست را با سطح آب و کف مخزن دارند و در نتیجه طول پرتو بزرگ‌تری نسبت به دیگر پرتوها دارند و زمان پیمایش آن‌ها به ایستگاه دوم بیشتر است (مانند پرتو قرمز رنگ در شکل ۲۳). گروه سوم نیز پرتوهایی که یک یا دو برخورد با کف مخزن و سطح آب داشته و به ایستگاه دوم رسیده‌اند (مانند پرتو آبی رنگ در شکل ۲۳). از بین پرتوهای ویژه با توجه به سه گروه پرتو یاد شده، سه پرتو انتخاب شدند (پرتو قرمز، سبز و آبی در شکل ۲۳) تا با توجه به زمان پیمایش تا رسیدن به ایستگاه دوم که از پرتونگاری مقطعی صوتی به‌دست آمده است به عنوان بهترین زاویه های انتشار پرتو صوتی انتخاب شدند.

بنابر نتایج بررسی‌های گذشته (Dushaw et al., 2017)، در اقیانوس‌ها و دریاها عامل‌هایی مانند موج‌های درونی، تغییرپذیری‌های دما و شوری باعث ایجاد این اختلاف در زمان پیمایش پرتوها به ایستگاه دوم می‌شود ولی در مخزن سد، به علت آب شیرین (ناچیز بودن شوری) و نبود موج‌های درونی، این اختلاف زمان پیمایش می‌تواند بر مبنای تغییرپذیری‌های دما باشد. با توجه به شکل ۲۳ مشاهده می‌شود پرتو سبز رنگ زاویه انتشار ۰/۹ درجه و طول پرتو ۱/۶۲ کیلومتر فاصله ایستگاه اول تا دوم را در ۱۱۰۰ میلی‌ثانیه طی می‌کند. در مقابل پرتو قرمز رنگ با زاویه انتشار منفی ۲۰ درجه و طول پرتو ۱/۶۷ کیلومتر،

جدول ۱ خلاصه نتایج زمان پیمایش اوج‌های اول و میانگین متحرک و متوسط آن‌ها برای بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز

**Table 1** Summary of the results for the time of the first peaks and their moving average and average for the frequency of 10 and 30 kHz

A SNR FP <sup>a</sup>	FP SNR R <sup>b</sup>	AMA FP <sup>c</sup> (ms)	RMA T FP <sup>d</sup> (ms)	TR FP (ms)	Ray sending side	Frequency (kHz)
11.72	10.1 to 13.9	1096.24	1096 to 1096.8	1094 to 1100	S1 to S2	10
12	10 to 15.58	1095.88	1095 to 1097	1094 to 1100	S1 to S2	
15.1	10.21 to 18.63	1092.26	1092.5 to 1092.65	1092.5 to 1092.7	S1 to S2	30
12.42	10 to 17.67	1094.1	1092.5 to 1094.8	1092.5 to 1095.9	S1 to S2	

۱۵/۵۸ و برای بسامد ۳۰ کیلوهرتز برای ایستگاه یک به دو و دو به یک به ترتیب برابر ۱۸/۶۳ و ۱۷/۶۷ است. در نتیجه تغییر بسامد به زمان پیمایش پرتو صوتی هیچ اثری نگذاشته (مسیر طی شده توسط پرتوهای صوتی به بسامد ارسالی آن ارتباطی ندارد) و تنها باعث تغییر نسبت سیگنال به نوفه می‌گردد.

### ۳-۲- نتایج شبیه‌سازی الگوی انتشار پرتو موج‌های صوتی (نظریه پرتو)

در این پژوهش انتشار موج‌های صوتی از ایستگاه اول به ایستگاه دوم شبیه‌سازی شد. شرایط مرزی انتخاب شده شامل بستر مخزن سد و سطح آب است. در آغاز زاویه انتشار پرتو از منفی ۲۰ تا مثبت ۲۰ درجه با فاصله ۰/۱ درجه انتخاب شدند و در نتیجه شمار ۴۰۰ پرتو پرتاب شده از ایستگاه اول، رهگیری شدند. از بین پرتوهای رهگیری شده، همگی به ایستگاه دوم نخواهند رسید. ما به دنبال پرتوهایی هستیم که به محدوده منفی مثبت یک متر عمق ایستگاه دوم (۲ تا ۴ متر زیر آب) برسند و آن پرتو هایی که به این محدوده از ایستگاه دوم برسند پرتو ویژه می‌گویند. از شمار ۴۰۰ پرتو رهگیری شده ۳۶ پرتو به ایستگاه دوم خواهند رسید. شکل ۲۱ نمودار سرعت صوت به‌دست آمده از سی‌تی‌دی نسبت به عمق و مقطع

زمان پیمایش معادل ۱۱۳۶ میلی ثانیه دارد. همچنین در پرتو آبی رنگ با زاویه انشار ۱۴ درجه و طول پرتو ۱/۶۳ کیلومتر، زمان پیمایش ۱۱۱۰ میلی ثانیه است. همان طور که انتظار می رفت پرتو قرمز رنگ نسبت به پرتو سبز مسیر درازتری را با اختلاف زمانی ۳۵/۳ میلی ثانیه طی می کند تا به ایستگاه دوم برسد.

زمان پیمایش معادل ۱۱۳۶ میلی ثانیه دارد. همچنین در پرتو آبی رنگ با زاویه انشار ۱۴ درجه و طول پرتو ۱/۶۳ کیلومتر، زمان پیمایش ۱۱۱۰ میلی ثانیه است. همان طور که انتظار می رفت پرتو قرمز رنگ نسبت به پرتو سبز مسیر درازتری را با اختلاف زمانی ۳۵/۳ میلی ثانیه طی می کند تا به ایستگاه دوم برسد.

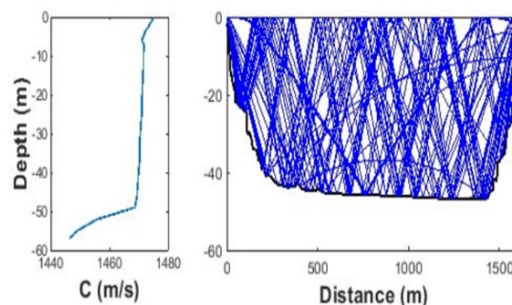


Fig. 21 Profile of sound speed over the depth obtained from CTD and the cross-section of the reservoir of Latian Dam along with the intercepted sound rays.

شکل ۲۱ نیمرخ سرعت صوت نسبت به عمق به دست آمده از سی تی دی و مقطع عرضی مخزن سد لتیان به همراه پرتوهای صوتی رهگیری شده

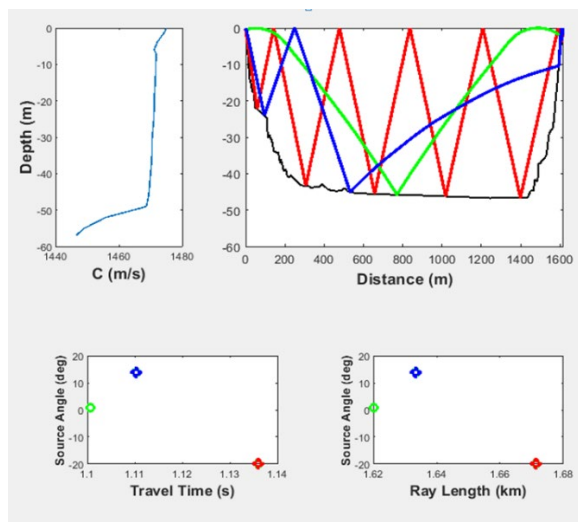


Fig. 23 Selecting three rays among the detected eigen rays, profile of sound speed, travel time of three rays relative to propagation angle, and the length of selected rays relative to propagation angle in Latian dam reservoir.

شکل ۲۳ انتخاب سه پرتو ویژه رهگیری و انتخاب شده. نیمرخ سرعت صوت، رهگیری سه پرتو شده، زمان پیمایش سه پرتو نسبت به زاویه انشار و طول پرتوهای انتخاب شده نسبت به زاویه انشار در مخزن سد لتیان.

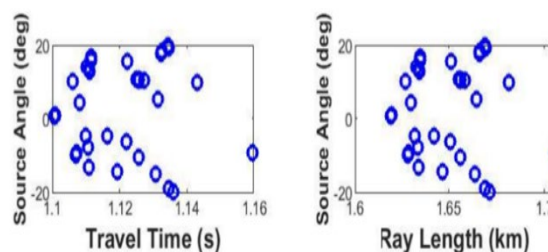


Fig. 22 The travel time of the traced rays to the second station relative to the emission angle of each ray and the length of sound rays emitted from the first station

شکل ۲۲ زمان پیمایش پرتوهای رهگیری شده به ایستگاه دوم نسبت به زاویه انشار هر پرتو و طول همان پرتوهای صوتی منتشر شده از ایستگاه اول

### ۳-۳- ارزیابی روش نظریه پرتو و الگوی انتشار رهگیری شده با استفاده از داده های مشاهده شدنی سی تی دی

نتایج شبیه سازی الگوی انتشار موج های صوتی با استفاده از سی تی دی و با اندازه گیری زمان پیمایش موج ها بررسی و صحت سنجی شد. برابر شکل های ۱۴ و ۱۵، که زمان

که پرتوهای رهگیری شده در همه عمق مخزن منتشر شدند به طوری که پرتوی که به سطح آب یا بستر برخوردی نداشته باشد مشاهده نشد (برابر شکل ۲۱).

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت پایش منابع آبی و توانایی سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی در این امر و برتری‌های این سامانه نسبت به دیگر روش‌های پایش و با توجه به این که تا کنون بررسی‌های چندی 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 بوده است، گام نخست برای استخراج لایه‌بندی دمایی و پایش دمایی مخزن سد توسط فناوری پرتونگاری مقطعی صوتی رهگیری پرتوها و شناسایی پرتوهای ویژه است. در این بررسی با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی و تجزیه و تحلیل داده‌های صوتی برداشت شده از مخزن سد لتیان و همچنین با استفاده از داده‌های عمق‌سنجی، سی‌تی‌دی و با به کارگیری نظریه پرتو، الگوی انتشار موج‌های صوتی در مخزن سد لتیان که به عنوان آب کم‌عمق و دارای آب شیرین به‌شمار می‌آید، رهگیری شد و در نتیجه سه پرتو ویژه شناسایی و صحت‌سنجی شدند. نتایج این رهگیری پرتو با استفاده از سامانه پرتونگاری مقطعی صوتی نیز ارزیابی شد.

نتایج نشان داد که این الگو به خوبی می‌تواند مسیرهای صوتی متفاوت با زاویه‌های انتشار متفاوت و همچنین زمان پیمایش موج‌های صوتی را شبیه‌سازی کند. برای ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، دو ایستگاه سی‌ای‌تی در دو طرف مخزن سد لتیان قرار داده شد و هر ۳۰ ثانیه موج‌های صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و ۳۰ کیلوهرتز از ایستگاه یک به دو و دو به یک ارسال شد. همچنین زمان پیمایش هر پرتو صوتی با دقت میلی‌ثانیه ثبت شد. دقت محاسبه زمان پیمایش موج‌های صوتی با توجه به نتایج از ۴ تا ۸ میلی‌ثانیه بود. نتایج این پژوهش نشان داد که سی‌ای‌تی در محیط آبی مانند مخزن سد یکی از بهترین ابزار پایش پیوسته محیط آبی و لحظه‌ای سرعت موج‌های

جدول ۲ مقایسه نتایج پرتوهای ویژه رهگیری شده با نتایج پرتونگاری مقطعی صوتی

Table 2 Comparison of the results of eigen tracked rays with the results of the acoustic tomography

TTD <sup>1</sup> (seconds)	STTSGR <sup>1</sup>	AMATT <sup>1</sup> (ms)	sending side	Frequency(kHz)
0.004		1096.24	S1 to S2	10
0.004		1095.88	S1 to S2	
0.008	1100 ms	1092.26	S1 to S2	30
0.006		1094.1	S1 to S2	

بسامدهای ۳۰ کیلوهرتز نیز همان زمان‌های پیمایش پرتو سبز و آبی و قرمز را به روشنی نشان می‌دهد.

برابر جدول ۲، مشاهده می‌شود که اختلاف زمان پیمایش شبیه‌سازی شده با روش نظریه پرتو با زمان پیمایش به‌دست آمده از پرتونگاری مقطعی صوتی و محاسبه‌های اوج نخست، در حد هزارم ثانیه بوده که بسیار ناچیز است و نشان از دقت شبیه‌سازی انجام گرفته دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این اختلاف در ایستگاه یک به دو در هر دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز بسیار نزدیک به هم است که نشان می‌دهد تغییر بسامد در رهگیری و شناسایی پرتوهای ویژه و مسیر حرکت آن‌ها تاثیری ندارد و این مسئله تنها به جانگاری (توپوگرافی) مخزن و داده‌های سی‌تی‌دی آن و تعیین مرزها و موقعیت قرارگیری دستگاه تراگذار بستگی دارد. همچنین با توجه به نتایج به دست‌آمده مشاهده می‌شود که پرتونگاری مقطعی صوتی به خوبی توانسته است پرتوهای ویژه را در مخزن سد شناسایی و پیش‌بینی کند که نشان از توانایی این سامانه در مخزن سد می‌باشد.

در مقایسه نتایج با نتایج بررسی‌های (Xu et al., 2022)، برابر شکل ۱۰، هر چه محل قرارگیری تراگذار به سطح آب در مخزن نزدیک می‌شود، پرتوهای رهگیری شده به صورت گسترده‌تر و در کل عمق و لایه‌های محیط آبی مخزن منتشر می‌شوند. در این پژوهش نیز با توجه به قرارگیری تراگذار نزدیک سطح آب مخزن مشاهده شده

M., Kardanmoghadam, H., Khoshhali, M. & Mohtasham, K. (2020). Feasibility study of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for current monitoring in the Persian Gulf. *Journal of Marine Engineering*, 15(30), 131–138. (In Persian)

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. *Joasi*, 6(2), 29–38. <http://joasi.ir/article-1-123-fa.html> (In Persian)

Bahreinimotlagh, 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. [https://www.iwrr.ir/article\\_64947.html](https://www.iwrr.ir/article_64947.html) (In Persian)

Barth, M. & Raabe, A. (2011). Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air. *Measurement Science and Technology*, 22(3), 035102. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/3/035102>

Bjørnø, L. & Buckingham, M.J. (2017). Chapter 1 – General Characteristics of the Underwater Environment. In: Applied Underwater Acoustics, T.H. Neighbors & D. Bradley (Eds.), 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>.

Etter, P.C. (2012). Advanced applications for underwater acoustic modeling. *Advances in Acoustics and Vibration*, <https://doi.org/10.1155/2012/214839>.

Huang, H., Guo, Y., Li, G., Arata, K., Xie, X. & Xu, P. (2020). Short-range water temperature profiling in a lake with coastal acoustic tomography. In: Sensors (Switzerland), Vol. 20, Issue 16, 1–14. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20164498>.

Huang, H., Xu, S., Xie, X., Guo, Y., Meng, L. & Li, G. (2021). Continuous sensing of water temperature in a reservoir with grid inversion method based on acoustic tomography system. *Remote Sensing*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/rs13132633>

Kaneko, A., Zhu, X.H. & Lin, J. (2020). Coastal

صوتی در آب است، اما ابزارهایی مانند سی تی دی و یا رهگیری پرتو، توانایی پایش سرعت موج‌های صوتی به صورت پیوسته را ندارند.

با بررسی نتایج به دست آمده از پرتونگاری مقطعی صوتی با بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز، مشاهده شد که تغییر بسامد در الگوی انتشار پرتو در مخزن سد تاثیری ندارد ولی به شدت سیگنال به نوفه اثر می‌گذارد. در نتیجه رهگیری پرتو در مخزن سد به جانگاری (توپوگرافی) مخزن، سطح آب و بستر به عنوان شرایط مرزی و لایه‌بندی دمایی و دما، شوری و عمق بستگی دارد. در نهایت با توجه به انتشار پرتوها در کل عمق مخزن، مشاهده شد که محل قرارگیری تراگذار با توجه به شکل مقطع عرضی مخزن بهتر است در نزدیکی سطح آب مخزن قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه بسامد ۱۰ کیلوهرتز، اس‌ان‌آر بالاتری نسبت به بسامد ۳۰ کیلوهرتز دارد، برای بررسی جامع و دقیقی در مخزن سد لتیان، بسامد ۱۰ کیلوهرتز پیشنهاد و تاکید می‌شود.

## ۵- فهرست نشانه‌ها

C	سرعت صوت ، m/s
u	سرعت جریان آب ، m/s
C <sub>0</sub>	سرعت صوت مرجع ، m/s
L	فاصله افقی بین دو ایستگاه
C <sub>m</sub>	سرعت میانگین صوت در آب
u <sub>m</sub>	سرعت میانگین جریان
Δt	اختلاف زمان پیمایش
D	عمق بر حسب متر
Sa	شوری بر حسب واحد در هزار PPT
T	دما بر حسب درجه سلسیوس
v'	بردار سرعت
ρ'	چگالی
p'	جریان
Φ	تابع توان بالقوه
F(v')	نیروی اصطکاک در سیال

## ۶- منبع‌ها

Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari,

- DAMOCLES acoustic tomography measurements and an ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 4601–4617. <https://doi.org/10.1002/2015JC011591>
- Syamsudin, F., Chen, M., Kaneko, A., Adityawarman, Y., Zheng, H., Mutsuda, H., Hanifa, A.D., Zhang, C., Auger, G., Wells, J.C. & Zhu, X. (2017). Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission. *Acoustical Science and Technology*, 38(5). <https://doi.org/10.1250/ast.38.246>
- Syamsudin, F., Taniguchi, N., Zhang, C., Hanifa, A.D., Li, G., Chen, M., Mutsuda, H., Zhu, Z.N., Zhu, X.H., Nagai, T. & Kaneko, A. (2019). Observing Internal Solitary Waves in the Lombok Strait by Coastal Acoustic Tomography. *Geophysical Research Letters*, 46(17–18). <https://doi.org/10.1029/2019GL084595>
- Taniguchi, N., Kaneko, A., Yuan, Y., Gohda, N., Chen, H., Liao, G., Yang, C., Minamidate, M., Adityawarman, Y., Zhu, X. & Lin, J. (2010). Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the northern part of the Luzon Strait. *Geophysical Research Letters*, 37(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009GL042327>
- 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*, 60, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3220648>
- Xu, S., Xue, Z., Xie, X., Huang, H. & Li, G. (2021). Layer-Averaged Water Temperature Sensing in a Lake by Acoustic Tomography with a Focus on the Inversion Stratification Mechanism. *Sensors*, 21(22), 7448. <https://doi.org/10.3390/s21227448>
- 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. <https://doi.org/10.1002/2014JC010676>
- Zheng, H., Gohda, N., Noguchi, H., Ito, T., Yamaoka, H., Tamura, T., Takasugi, Y. & Kaneko, A. (1997). Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, 53(2), 117–127.
- acoustic tomography. In: *Coastal Acoustic Tomography*, Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04180-8>.
- 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. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/5/055303>
- Khodayari, R.A., Kamreai, M., Bakhodae Paskyabi, M. & Valinejad, A. (2010). An introduction to sonar and modeling of sound wave propagation in water, E. R. I. Ministry of Agricultural Jihad (Ed.). (In Persian)
- Liu, W., Zhu, X., Zhu, Z., Fan, X., Dong, M. & Zhang, Z. (2016). A coastal acoustic tomography experiment in the Qiongzhou Strait. 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium, COA 2016. <https://doi.org/10.1109/COA.2016.7535688>
- Mackenzie, K.V. (1981). Nine-term equation for sound speed in the oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), 807–812.
- Munk, W.H. & Worcester, P.F. (1988). Ocean acoustic tomography. *Oceanography*, 1(1), 8–10.
- Munk, W., Worcester, P., Wunsch, C. & Lynch, J.F. (1996). Ocean Acoustic Tomography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(6), 3275–3276. <https://doi.org/10.1121/1.414903>
- Neighbors III, T.H. (2017). Absorption of Sound in Seawater. In: Applied Underwater Acoustics, T.H. Neighbors & D. Bradley (Eds.), 273–295, Elsevier, [doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7).
- Pierce, A.D. (2019). Acoustics: an introduction to its physical principles and applications. Springer.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wrcr.20375>
- Roux, P., Cornuelle, B.D., Kuperman, W.A. & Hodgkiss, W.S. (2008). The structure of raylike arrivals in a shallow-water waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3430–3439. <https://doi.org/10.1121/1.2996330>
- Sagen, H., Dushaw, B.D., Skarsoulis, E.K., Dumont, D., Dzieciuch, M.A. & Beszczynska-Möller, A. (2016). Time series of temperature in Fram Strait determined from the 2008–2009



© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.