



پایش پیوسته دمای آب با استفاده از فن آوری تکه‌نگاری صوتی

مسعود بحرینی مطلق^{۱*}، رضا روزبهانی^۱، محمدجواد زارعیان^۲، حمید کاردان مقدم^۱، کمال محتشم^۲

۱- پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۲- شرکت سنجاب فن آوری خلیج فارس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۰۵

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۲۵

کلمات کلیدی:

سنجش از دور درون آب

روش تکه‌نگاری صوتی

زمان طی شده امواج صوتی

سرعت صوت در آب

دمای جریان آب

خلاصه: فن آوری تکه‌نگاری صوتی با ارسال و دریافت دوسویه‌ی امواج صوتی خصوصیات جریان آب از جمله سرعت و دمای آب، دبی جریان، رسوبات معلق، شوری و جهت جریان را در رودخانه‌ها، مخازن سدها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه این روش به‌طور گسترده در کشورهای توسعه‌یافته به‌کار گرفته می‌شود، اما هیچ سابقه‌ای از استفاده آن در کشورمان وجود ندارد. در این مقاله نتایج کاربرد فن آوری تکه‌نگاری صوتی برای اندازه‌گیری دمای آب برای اولین بار در کشور، ارائه شده‌است. جهت انجام این تحقیق دو دستگاه تکه‌نگاری صوتی به فاصله‌ی ۲۶۲ متر از یکدیگر و به مدت ۲۰ دقیقه در دریاچه‌ی هفت‌برم واقع در غرب شیراز که دریاچه‌ی کم‌عمق است قرار داده‌شد و امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۴۰ ثانیه توسط دستگاه‌ها ارسال شدند. چهار نقطه در راستای ارسال امواج صوتی نیز انتخاب شدند و دمای سطحی نقاط با استفاده از سنسور دما با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که زمان طی‌شده امواج صوتی در طول آزمایش ثابت و حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه است. تغییرات دما نیز بین ۱۹/۷۰ تا ۱۹/۹۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که با داده‌های سنسور دما مطابقت داشت. دقت اندازه‌گیری دما با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی حدود ۰/۰۴ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد که نشان داد دما را با دقتی بهتر از سنسور دما اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین می‌توان از فن آوری تکه‌نگاری صوتی برای پایش پیوسته و درازمدت دما در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها بهره برد.

۱- مقدمه

گرمایش جهانی باعث افزایش دمای هوا و دمای سطح اقیانوس‌ها شده‌است [۱]. اما منابع آب شیرین نظیر رودخانه‌ها و دریاچه‌ها نسبت به تغییرات دمایی بسیار حساس‌تر می‌باشند [۲ و ۳]. تحقیقات نشان داده‌است که پایش درازمدت دمای دریاچه‌ها پتانسیل خوبی برای نشان دادن تغییرات اقلیم است [۴ و ۵]. از طرفی بسیاری از پارامترهای کیفی، فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب نیز وابسته به دمای آب است [۶]. با افزایش دمای آب، مقدار اکسیژن حل شده کاهش و مقدار انرژی جنبشی، تقاضای اکسیژن و رشد و نمو جلبک‌ها افزایش می‌یابد [۷]. به‌عنوان مثال به وجود آمدن لایه‌بندی حرارتی باعث کاهش کیفیت آب در مخازن سدها و دریاچه‌ها می‌گردد و

اکولوژی مخزن به خصوص حیات آبریان را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد

[۸ و ۹]. بنابراین اندازه‌گیری دائمی و پیوسته‌ی دمای آب امری

ضروری برای مطالعات گرمایش جهانی و بررسی خصوصیات فیزیکی،

شیمیایی و بیولوژیکی محیط‌های آبی است.

پایش دمای آب در دریاچه‌ها و مخازن سدها با استفاده از روش‌های

سنجی نظیر سنسورهای دما، کاری زمان‌بر و طاقت‌فرسا است. امروزه

دمای سطحی دریاچه‌های بزرگ با استفاده از روش‌های سنجش از

دور نظیر ماهواره‌ها به صورت پیوسته و درازمدت اندازه‌گیری می‌شود

[۱۰ و ۱۱]. اما امواج الکترومغناطیس ماهواره‌ها در آب به سرعت

تضعیف می‌گردند و معمولاً تنها قادر به تخمین دمای سطحی

دریاچه هستند [۱۲ و ۱۳]. برای رفع این مشکل محققان شاخه‌ای از

فن آوری سنجش از دور را مناسب برای محیط‌های آبی ابداع کردند

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.bahreini@wri.ac.ir



نقطه اندازه می‌گرفت، دمای اندازه‌گیری شده در دو روش ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد اختلاف داشتند [۳۰].

آدیتیاوارمان^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۱) دمای جریان آب بین دو جزیره در ژاپن را با استفاده از CATS به مدت ۳ روز و به صورت پیوسته اندازه گرفتند. فاصله‌ی دو ایستگاه CATS حدود ۳۰ کیلومتر از یکدیگر بود. دمای آب بین ۱۱/۴۵ تا ۱۱/۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر بود. نتایج نشان داد روش تکه‌نگاری صوتی ابزار قدرتمند برای پایش پیوسته و درازمدت دمای آب در دریاها است [۳۱].

کاونیشی و همکاران (۲۰۱۳) دمای جریان آب را در رودخانه‌ی گونو^{۱۲} واقع در ژاپن که رودخانه‌ای کم‌عمق و کوهستانی است با استفاده از FATS اندازه گرفتند. پایش تغییرات دما به مدت ۲۲ ساعت و در زمان تخلیه‌ی سدی در بالادست انجام شد. نتایج نشان داد که دمای رودخانه قبل از رسیدن موج تخلیه‌ی سد ۸ درجه‌ی سانتی‌گراد بود و در زمان گذر موج سیلاب حاصل از تخلیه‌ی سد دمای آب به ۷ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافت. ایشان نتیجه گرفتند FATS ابزار قدرتمند برای پایش دائمی دمای جریان آب در رودخانه‌ها است [۳۲].

ژانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از ۴ دستگاه CATS توزیع افقی تغییرات دمایی جریان آب که توسط طوفان به‌وجود آمده‌بود را در خلیج هیروشیما اندازه گرفتند و با دستگاه CTD^{۱۴} مقایسه نمودند. نتایج نشان داد شبکه‌ای از دستگاه‌های تکه‌نگاری صوتی ابزاری بسیار قدرتمند برای پایش توزیع افقی دمای جریان در منطقه‌ای وسیع از دریا است در حالی که دیگر روش‌ها مثل CTD دمای آب را به صورت نقطه‌ای اندازه می‌گیرد [۳۳].

هانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۶) دمای جریان را در اسکله‌ی باچیمین^{۱۶} تایوان با استفاده از دو ایستگاه CATS که در فاصله‌ی ۴۸۸ متری از یکدیگر قرار گرفته بودند اندازه گرفتند و با سنسور دما مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روند تغییرات دما در هر دو روش مشابه است با این تفاوت که نوسانات دما با استفاده از CATS بهتر اندازه‌گیری می‌شود [۳۴].

که با به‌کارگیری امواج صوتی^۱ انجام می‌پذیرد [۱۴]. امواج صوتی برخلاف امواج الکترومغناطیس که به شدت در محیط آبی تضعیف می‌گردند، قادر به پیمایش هزاران کیلومتر در آب هستند [۱۵ و ۱۶]. تکه‌نگاری صوتی درون آب^۲ شاخه‌ای از دانش سنجش از دور است و ابزاری قدرتمند برای پایش خصوصیات جریان مثل دمای آب، سرعت، دبی آب، شوری، جهت جریان آب و غیره در لایه‌های مختلف عمق آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشد [۲۰-۱۷]. روش تکه‌نگاری صوتی درون آب در سه سطح اقیانوسی OATS^۳ [۲۱-۲۳]، دریایی CATS^۴ [۲۴ و ۲۵] و رودخانه‌ای FATS^۵ [۲۶ و ۲۷] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

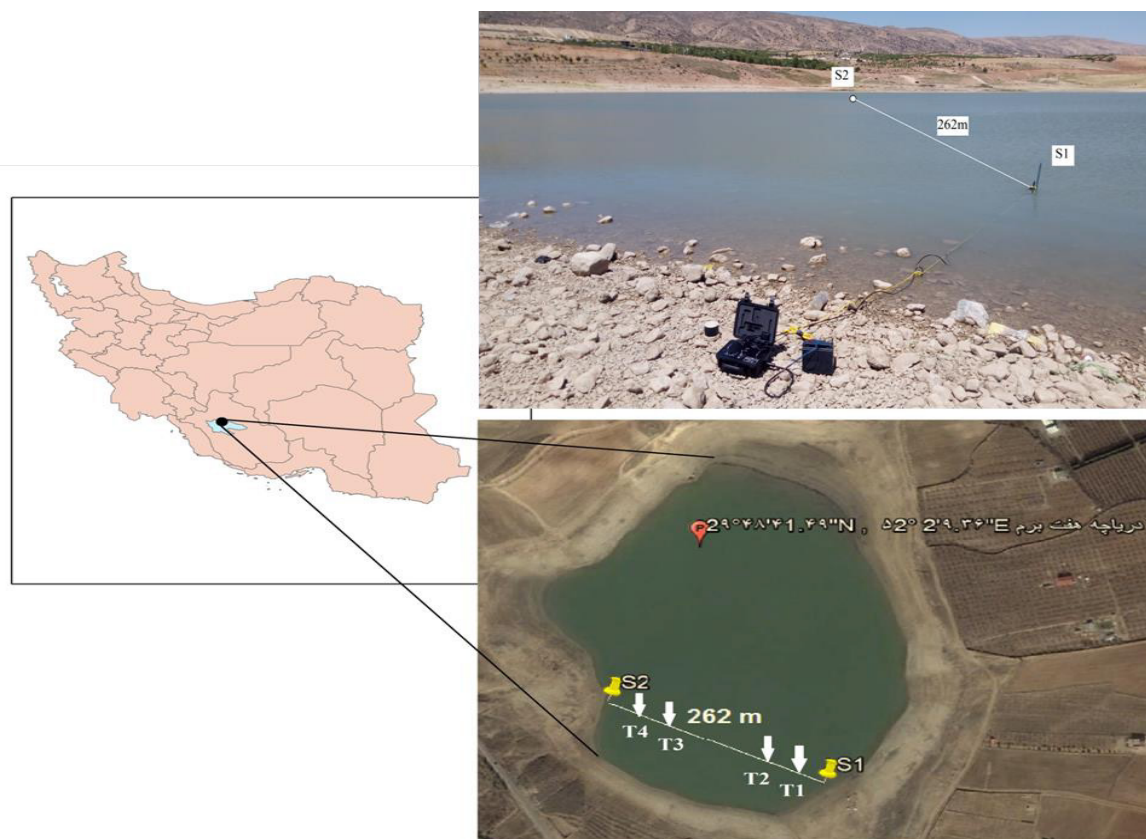
لویس^۶ و همکاران (۲۰۰۸) دمای جریان‌های اقیانوسی را با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی اندازه گرفتند و برای داده‌گواری^۷ در مدل ریاضی به‌کار بردند. نتایج نشان داد روش تکه‌نگاری صوتی ابزاری مناسب برای داده‌گواری تخمین دما در مدل‌های کامپیوتری است [۲۸].

کاونیشی^۸ و همکاران (۲۰۱۰) دمای جریان آب را به صورت پیوسته در مدت ۴۴ روز در رودخانه‌ی جزرومدی اوتا^۹ واقع در ژاپن با استفاده از دو دستگاه تکه‌نگاری صوتی FATS که به فاصله‌ی ۲۲۰ متر از یکدیگر قرار گرفته‌بودند را اندازه گرفتند و با سنسور دما مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی ابزاری کارآمد و دقیق برای پایش دائمی و درازمدت تغییرات دمای جریان آب در رودخانه‌های جزر و مدی است [۲۹].

کاونیشی و همکاران (۲۰۱۰) دمای جریان آب را به مدت ۲۷ روز در رودخانه‌ی هیاکن^{۱۰} واقع در ژاپن با استفاده از دو دستگاه FATS که به فاصله‌ی ۴۱۸ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند را اندازه گرفتند و با سنسور دما مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تغییرات دمای جریان در بازه‌ی مورد مطالعه بین ۲۱ تا ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر بود. روند نوسانات دمای جریان حاصل از FATS با سنسور دما مشابه یکدیگر بود اما به دلیل اینکه سنسور دما، دمای آب را در یک

- 1 Acoustic
- 2 Underwater Acoustic Tomography
- 3 Ocean Acoustic Tomography System
- 4 Coastal Acoustic Tomography System
- 5 Fluvial Acoustic Tomography System
- 6 Lewis
- 7 Data Assimilation
- 8 Kawanisi
- 9 Ota Estuary
- 10 Hyakken River

- 11 Adityawarman
- 12 Gono River
- 13 Zhang
- 14 Conductivity- Temperature- Depth
- 15 Huang
- 16 Bachimen Harbor



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و قرارگیری ایستگاه‌های FATS (S1 و S2) و مکان اندازه‌گیری دما با استفاده از دماسنج (T1-T4)
Fig. 1. The study area and the location of FATS deployment (S1, S2) and the positions of Temperature measurements by using Temperature Sensor (T1-T4).

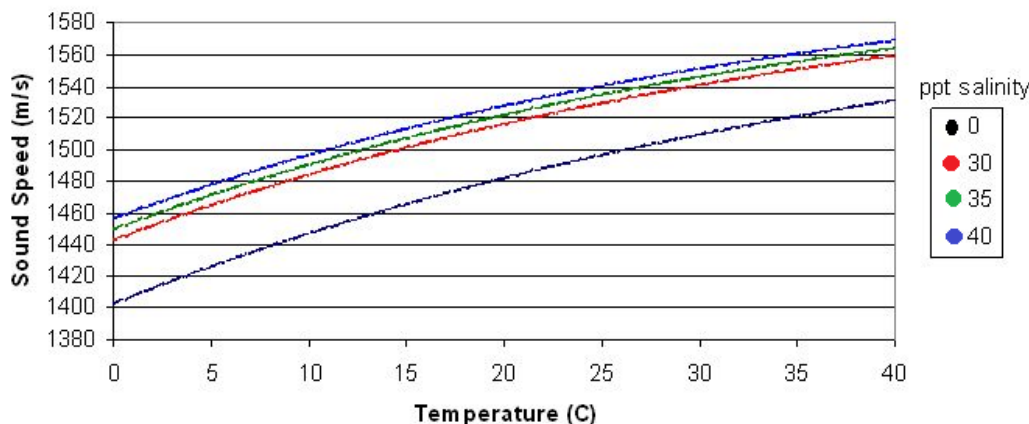
مرور منابع تحقیقات پیشین نشان داد که اکثر پژوهش‌های کاربرد روش تکه نگاری صوتی در اقیانوس، دریا و رودخانه انجام شده‌است. این تحقیق جزء مطالعات انگشت شمار به کارگیری فن آوری تکه نگاری صوتی در دریاچه و منابع آب شیرین است. در بخش دوم این تحقیق، اطلاعاتی پیرامون منطقه مورد مطالعه، نحوه‌ی نصب دستگاه‌های تکه نگاری صوتی و سنسور دما ارائه می‌شود. در بخش سوم معادلات مورد استفاده تشریح می‌گردد. در بخش چهارم، نتایج این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت در بخش آخر در مورد خطاهای اندازه‌گیری روش تکه نگاری صوتی بحث می‌شود.

۲- منطقه مورد مطالعه و روش انجام آزمایش با استفاده از FATS

این مطالعه در دریاچه هفت‌برم واقع در ۳۵ کیلومتری غربی شیراز و بین ساعت ۱۲:۲۰ تا ۱۲:۴۰ مورخ ۱۶ تیر ۱۳۹۶ انجام شد. در شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و قرارگیری ایستگاه‌های FATS نشان داده

ولز^۱ و همکاران (۲۰۱۶) سرعت و دمای جریان در دریاچه‌ی بیوا^۲ واقع در ژاپن را با استفاده از CATS به مدت ۲ ماه اندازه‌گیری کردند. هدف ایشان از اندازه‌گیری داده‌های سرعت جریان و دما با استفاده از CATS، به کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در داده‌گذاری سیستم‌های پیش‌بینی جریان و دما بود [۳۵]. سیامسودین^۳ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از دو دستگاه CATS که در تنگه‌ی بالی^۴ بین جزایر بالی و جاوای اندونزی به فاصله‌ی ۲ کیلومتر نصب گردیده بودند توزیع سرعت و دمای جریان آب را در ۵ عمق مختلف اندازه گرفتند. نتایج نشان داد که دمای جریان در عمق صفر تا پنج متر از سطح آب حدود ۲۹ درجه سانتی‌گراد و در عمق ۲۰ تا ۷۹ متر از سطح آب حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. نویسندگان نتیجه گرفتند که فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته‌ی خصوصیات جریان در لایه‌های مختلف آب است [۳۶].

- 1 Wells
- 2 Biwa Lake
- 3 Syamsudin
- 4 Bali Strait



شکل ۲. تغییرات سرعت صوت در آب بر اثر دما و شوری آب (عمق آب صفر فرض شده است)

Fig. 2. The effect of temperature and salinity on the sound speed in water ($D=0$ m).

$$0 \leq T \leq 35^\circ C, 0 \leq S \leq 45 \text{ and } 0 \leq D \leq 1000m$$

همان طور که مشاهده می شود تأثیر عمق (D) بر سرعت صوت ناچیز است، بنابراین در آب های کم عمق می توان از آن صرف نظر کرد. سرعت صوت در آب بر اساس دما و شوری آب در شکل ۲ نشان داده شده است. در آب های شیرین نظیر رودخانه ها، مخازن سدها و یا دریاچه های آب شیرین که شوری آب ناچیز است، سرعت صوت در آب تنها تابعی از دمای آب خواهد بود. لذا با اندازه گیری دقیق سرعت صوت در آب، می توان دمای آب را محاسبه نمود [۳۸ و ۳۹].

اندازه گیری سرعت صوت با استفاده از روش تکه نگاری صوتی

اگر دو ایستگاه تکه نگاری صوتی در دو طرف محیط آبی قرار گیرد (شکل ۳) و هم زمان امواج صوتی را به یکدیگر ارسال نمایند، طبق معادلات ۲ و ۳، زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه پایین دست که در جهت جریان آب است برابر است با فاصله ی بین دو ایستگاه تقسیم بر مجموع سرعت صوت و سرعت جریان آب، و زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه بالادست که در خلاف جهت جریان آب است برابر است با فاصله ی بین دو ایستگاه تقسیم بر تفاضل سرعت صوت و سرعت جریان آب.

$$t_{Down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad (2)$$

شده است. دریاچه هفت برم در موقعیت جغرافیایی $29^\circ 42'$ شمالی و $52^\circ 29'$ شرقی قرار دارد. در تابستان که آب دریاچه بخار می شود عمق دریاچه کاهش می یابد. دو ایستگاه صوتی به فاصله ی ۲۶۲ متر از یکدیگر قرار داده شدند. حداقل عمق آب که محل قرارگیری تراگذارها بود ۳۰ سانتی متر و حداکثر عمق آب در راستای ارسال امواج صوتی که تقریباً در میانه ی بین دو تراگذار بود $1/63$ متر برآورد شد. بسامد صوت ارسالی بر روی ۳۰ کیلوهرتز تنظیم شد و هر ۴۰ ثانیه امواج صوتی به یکدیگر ارسال شدند. چهار نقطه ($T1-T4$) نیز در راستای امواج صوتی بین ایستگاه های FATS انتخاب شد و با استفاده از یک سنسور دما، دمای سطحی دریاچه با دقت $0/1$ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. دمای محیط در طی انجام آزمایش ۳۳ درجه سانتی گراد بود.

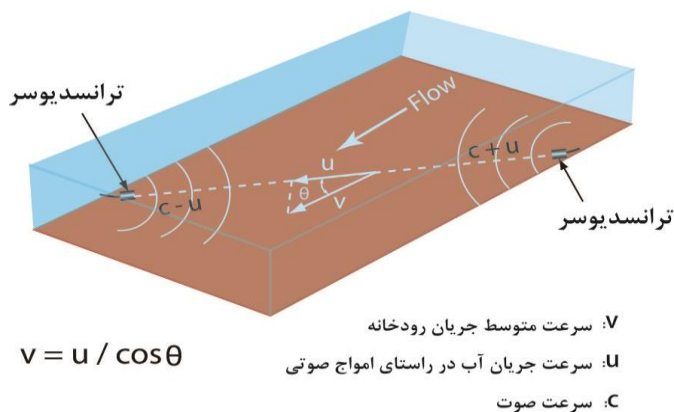
۳- مواد و روش ها

اندازه گیری دمای جریان با استفاده از امواج صوتی بر اساس فرمول مدوین^۱ سرعت صوت (c) در آب تابعی از دما (T)، شوری (S) و عمق آب (D) است که به صورت زیر بیان می شود [۳۷]:

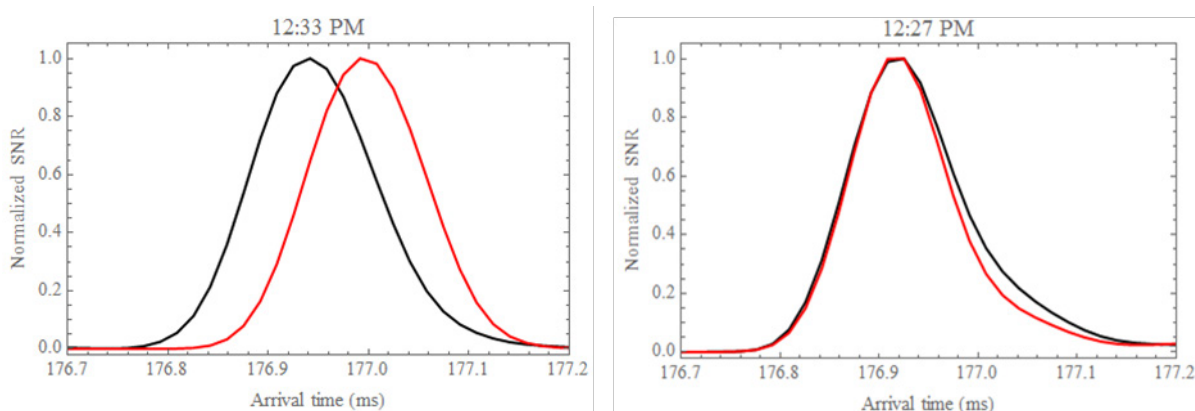
$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 2.9 \times 10^{-4} T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (1)$$

که بازه ی پارامترهای ذکر شده بایستی به صورت زیر باشد:

1 Medwin's Formula



شکل ۳. سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی u ، سرعت در جهت جریان آب v و زاویه بین امواج صوتی و جهت جریان آب θ .
 Fig. 3. Flow velocity along the ray path (u), flow velocity (v), the angle between ray path and the flow velocity.



شکل ۴. زمان رسیدن یک موج صوتی در ایستگاه اول (مشکی) و ایستگاه دوم (قرمز).
 Fig. 4. The arrival time of an acoustic wave at the Station 1 (black) and Station 2 (red).

۴- نتایج و بحث

در محیط آبی، نویزهای صوتی زیادی از قبیل صدای موتور قایق، کشتی، و دیگر موارد وجود دارد که باعث تضعیف و از بین رفتن سیگنال‌های صوتی ارسالی می‌شود. اما دستگاه‌های تکه‌نگاری صوتی، امواج صوتی ارسالی خود را با استفاده از تکنیکی به نام M-Sequence کدگذاری می‌کنند تا نویزهای محیطی از بین رفته و تنها سیگنال صوتی دلخواه شنیده شود [۴۰]. از این رو همه‌ی نویزهای محیط حذف شده و زمان رسیدن امواج صوتی به‌صورت یک قله نمایان می‌شود.

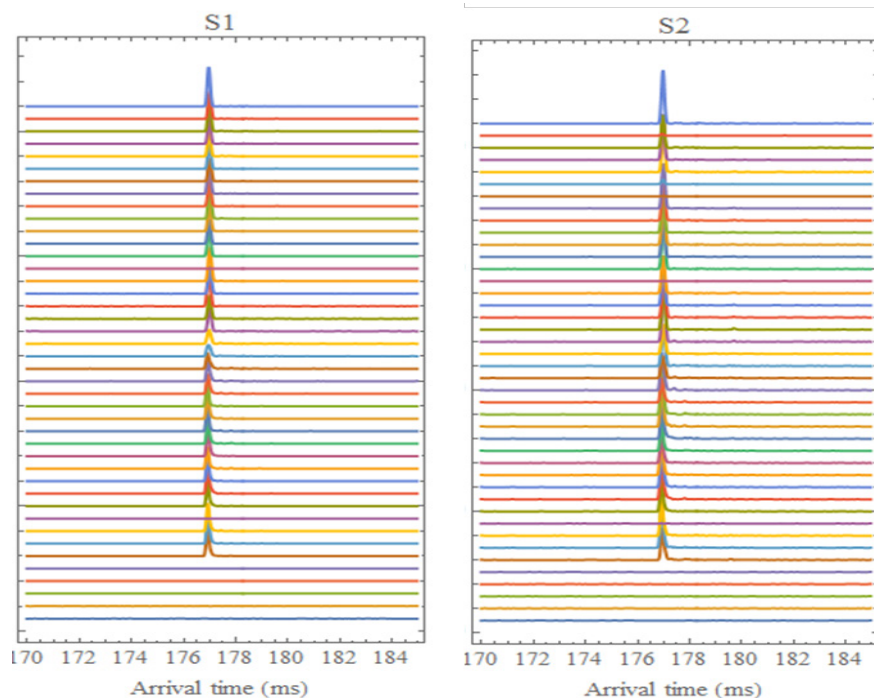
شکل ۴ زمان رسیدن دو موج صوتی که در ساعت ۱۲:۲۷ و ۱۲:۳۳ ارسال شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود

$$t_{Up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (3)$$

دستگاه تکه‌نگاری صوتی زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه را با دقت نانو ثانیه اندازه می‌گیرد و با حل معادلات ۲ و ۳ سرعت صوت در آب محاسبه می‌گردد (معادله ۴). بنابراین با اندازه‌گیری سرعت صوت توسط دستگاه تکه‌نگاری صوتی و با استفاده از معادله ۱، دمای آب قابل محاسبه است.

$$c_m = \frac{L}{t_m} \quad (4)$$

که L فاصله‌ی افقی بین دو ایستگاه صوتی و $t_m = \frac{t_{Up} + t_{Down}}{2}$ می‌باشد.



شکل ۵. زمان رسیدن همهی امواج صوتی در ایستگاه اول و دوم

Fig.5. Stack diagrams of correlation wave forms of transmitted from both stations.

بر سرعت صوت، در رودخانه‌های جزرومدی، زمانی که مد اتفاق می‌افتد و آب شور به محیط اندازه‌گیری وارد می‌شود زمان رسیدن امواج صوتی نیز به شدت تغییر می‌کند و در یک راستا قرار نخواهند گرفت [۴۱].

طبق معادله‌ی ۴، برای تخمین سرعت صوت بایستی زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه اندازه‌گیری شود، سپس میانگین زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه که با t_m نشان داده می‌شود، محاسبه گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین زمان رسیدن امواج در دو ایستگاه حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه است و به دلیل عدم وجود جریان و عدم تغییر دمای آب و یا عدم تغییر شوری آب، میانگین زمان رسیدن امواج در طول دوره‌ی آزمایش تقریباً ثابت بوده‌است. در شکل ۶ میانگین زمان رسیدن امواج صوتی نشان داده شده‌است.

در شکل ۷ سرعت صوت در آب و دمای آب نشان داده شده‌است. همان‌طور که ذکر شد سرعت صوت تابعی از دما، شوری و عمق آب است. از آنجایی که مدت اندازه‌گیری ۲۰ دقیقه بوده و دمای آب تغییر محسوسی نداشت، لذا سرعت صوت در مدت اندازه‌گیری شده تقریباً ثابت و حدود ۱۴۸۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نتایج پایش دما با استفاده از فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی نیز بین ۱۹/۷ و ۱۹/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد محاسبه گردید. دمای اندازه‌گیری شده با استفاده

حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه طول کشیده‌است تا امواج صوتی به ایستگاه مقابل برسد. از آنجایی که فاصله‌ی دو ایستگاه ثابت است (۲۶۲ متر)، بنابراین با اندازه‌گیری زمان رسیدن امواج صوتی و با استفاده از معادله ۴ سرعت صوت در آب قابل محاسبه است. در این آزمایش با توجه به ساکن بودن آب دریاچه می‌بایست زمان رسیدن امواج در هر دو ایستگاه یکسان باشد. از این رو برای موج ارسالی ساعت ۱۲:۲۷ هر دو قله برای ایستگاه اول و دوم بر روی هم منطبق شده‌اند که نشان‌دهنده‌ی عدم وجود جریان است. اما در ساعت ۱۲:۳۳ حدود ۰/۰۴ میلی‌ثانیه اختلاف زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه اول نسبت به دوم مشاهده می‌شود. این اختلاف نشان‌گر وجود جریان بسیار ضعیفی است.

زمان رسیدن همهی امواج صوتی که در فواصل زمانی هر ۴۰ ثانیه ارسال شدند در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این آزمایش که سرعت جریان آب در دریاچه بسیار ضعیف بود، زمان رسیدن تمامی امواج صوتی تقریباً در یک راستا قرار گرفت. در صورتی که سرعت جریان آب و یا دمای آب تغییر محسوسی نماید؛ سرعت صوت نیز تغییر خواهد کرد و زمان رسیدن امواج به طور چشم‌گیری متغیر خواهند بود [۳۲]. از طرفی با توجه به تاثیر شوری

امواج بین دو ایستگاه صوتی است.

۵- نتایج تجزیه و تحلیل خطای اندازه‌گیری

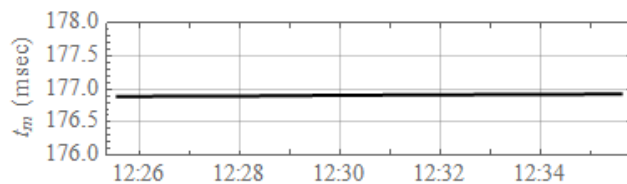
۵-۱- خطای اندازه‌گیری سرعت صوت

دقت اندازه‌گیری سرعت صوت با استفاده از FATS بستگی به دقت اندازه‌گیری زمان رسیدن امواج صوتی و دقت تعیین فاصله بین دو ایستگاه دارد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۴۰]:

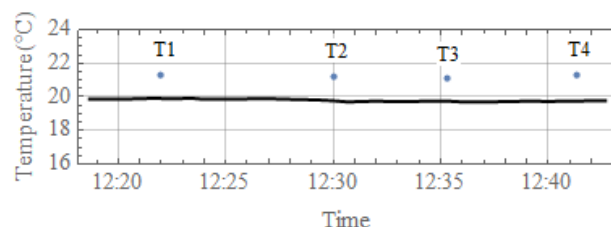
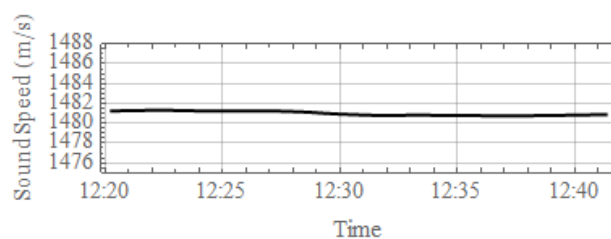
$$\frac{\delta c_m}{c_m} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t_m}{t_m} \quad (5)$$

که L فاصله بین دو ایستگاه صوتی و t_m میانگین زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه است.

FATS توسط میکروکنترلری به نام TAC-SH2MB کنترل می‌گردد. میکروکنترلرها در هر ثانیه توسط ماژول U-blox که داده‌ی زمانی ماهواره‌های GPS را دریافت می‌کند هم‌زمان‌سازی می‌شوند. ماژول U-blox علاوه بر تولید سیگنال ۱ Hz، سیگنال ۱۰ MHz را نیز تولید می‌کند که برای هم‌زمان‌سازی ساعت داخلی میکروکنترلرها استفاده می‌شود و در یک‌زمان مشترک فرمان ارسال موج صوتی را صادر می‌کنند. استفاده از سیگنال ۱۰ MHz که توسط ماهواره‌های GPS تولید می‌شود دقت بسیار بالایی را مهیا می‌کند و باعث می‌شود که خطای زمانی دستگاه به حداقل برسد [۴۲]. بنابراین خطای زمانی ($\frac{\delta t_m}{t_m}$) قابل صرف‌نظر کردن است. لذا خطای نسبی اندازه‌گیری سرعت صوت تنها بر اساس خطای تعیین فاصله بین دو ایستگاه است. در این مطالعه فاصله بین دو ایستگاه با دستگاه GPS دقیق اندازه‌گیری شد تا خطای فاصله ($\frac{\delta L}{L}$) نیز به حداقل برسد. از آنجایی که در این مطالعه فاصله بین دو ایستگاه ۲۶۲ متر تعیین شده است، خطایی معادل یک متر باعث خطای نسبی $\frac{\delta c_m}{c_m} = 0.003$ می‌گردد. از طرفی سرعت صوت اندازه‌گیری شده ۱۴۸۱ متر بر ثانیه است، بنابراین خطای اندازه‌گیری سرعت صوت با استفاده از فن آروی تکه‌نگاری صوتی $\delta c_m = 5.65 m/s$ خواهد بود. لذا در روش تکه‌نگاری صوتی که با دقت نانوثانیه زمان رسیدن امواج صوتی اندازه‌گیری می‌شود، تنها بایستی فاصله بین دو ایستگاه با دقت بالا تعیین گردد تا خطای محاسبه‌ی سرعت صوت به حداقل برسد.



شکل ۶. میانگین زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول و دوم
Fig. 6. The mean Arrival time at both stations (S1 and S2).



شکل ۷. سرعت صوت در آب و مقایسه‌ی دمای جریان آب
Fig. 7. Sound Speed in water and water temperature comparison.

از سنسور دما (مدل CELSIUS-SENSOR-R1-RP) با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد) در نقاط T1 تا T4 به ترتیب ۲۱/۲، ۲۱/۳ و ۲۱/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌دست آمد. دماهای اندازه‌گیری شده با استفاده از فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی و سنسور دما اختلاف کمی دارند زیرا سنسور دما، دمای آب را در یک نقطه اندازه‌گیری کرده است در حالی که FATS دمای متوسط را در راستای امواج صوتی بین ایستگاه‌های اول و دوم اندازه‌گیری می‌کند و میانگین دمای آب در راستای ۲۶۲ متر را اندازه‌گیری کرده است. علاوه بر این، سنسور دما، دمای سطحی را اندازه‌گیری کرده است در حالی که امواج صوتی تمام عمق آب را از کف دریاچه تا سطح آب به صورت سیسنوسی می‌پیماید و دمای متوسط کل عمق آب را اندازه می‌گیرد، بنابراین دمای اندازه‌گیری شده با استفاده از FATS دمای متوسط کل عمق آب در راستای ارسال

خطای اندازه‌گیری دمای آب

دقت اندازه‌گیری دمای آب (T_r) با استفاده از FATS تابعی از سرعت صوت، دمای آب، فرکانس صوت و فاصله‌ی بین دو ایستگاه است [۴۳]:

$$T_r = \frac{c^2}{2\alpha fL} \quad (6)$$

که c سرعت صوت در آب، f فرکانس امواج صوتی، L فاصله‌ی بین دو ایستگاه صوتی FATS و α نیز از رابطه γ محاسبه می‌گردد:

$$\alpha = 4.6 - 0.11T + (8.7 \times 10^{-4} T^2) - 0.01(S - 35) \quad (7)$$

در این مطالعه دمای متوسط آب اندازه‌گیری شده با استفاده از فن آوری تکه‌نگاری صوتی بین ۱۹/۷ و ۱۹/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر بود و سرعت صوت ۱۴۸۱ متربرثانیه اندازه‌گیری شد، بسامد ۳۰ کیلوهرتز و فاصله‌ی بین دو ایستگاه ۲۶۲ متر تنظیم شد، بنابراین دقت اندازه‌گیری دمای آب با استفاده از FATS، ۰/۰۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. با توجه به معادله‌ی ۶ تأثیرات سرعت صوت، دما و فاصله‌ی بین دو ایستگاه نسبت به بسامد امواج صوتی بر روی دقت اندازه‌گیری دما ناچیز است. به‌عنوان مثال در صورتی که امواج صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز ارسال گردد، دقت اندازه‌گیری دمای آب به شدت کاهش خواهد یافت و برابر با ۰/۱۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

بسیاری از پارمترهای کیفی آب، مسائل زیست محیطی و حیات آبریان رابطه‌ی مستقیمی با دمای آب دارند. از طرفی گرمایش جهانی و اثرات تغییر اقلیم باعث تهدید حیات جانداران به‌خصوص آبریان می‌شود. مطالعات نشان داده‌است منابع آب شیرین به تغییرات دمایی نسبت به اقیانوس‌ها حساس‌تر هستند. بنابراین پایش پیوسته و دائمی دمای آب برای مدیریت بهتر رودخانه، دریاچه و مخازن سدها امری ضروری است. یکی از روش‌های پایش پیوسته و درازمدت محیط‌های آبی استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی است. در این مطالعه برای اولین بار در ایران با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی دمای آب یکی از دریاچه‌ی هفت برم واقع در غرب شیراز به صورت پیوسته اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که این روش نه تنها

دقتی بهتر از سنسور دما دارد بلکه قادر است برخلاف سنسورهای دما که دمای نقطه‌ای آب را اندازه‌گیری می‌کنند، دمای متوسط در عمق آب و کل مقطع عرضی بین دو ایستگاه صوتی را نیز اندازه‌گیری کند. نتایج این تحقیق با مطالعات گذشته مطابقت داشته و کارایی روش تکه‌نگاری صوتی برای پایش پیوسته دمای آب را نشان می‌دهد [۲۸-۳۲]. البته اکثر مطالعات پیشین پایش پیوسته و بلندمدت دمای آب به منظور بررسی تغییرات دمایی بر اثر گذشت شبانه روز و فصل‌ها، تغییرات اقلیم و گرمایش جهانی انجام شده‌است. در حالی که مطالعه‌ی حاضر به دلیل مشکلات پیش آمده و عدم حمایت مالی به مدت بسیار محدودی انجام شد. البته هدف از این مطالعه نشان دادن کارایی فن آوری تکه‌نگاری صوتی به منظور پایش منابع آب شیرین موجود در کشور است که با موفقیت انجام شد.

در این تحقیق دو دستگاه تکه‌نگاری صوتی در دو طرف دریاچه هفت برم نصب شد و دمای متوسط آب را در راستای ارسال امواج صوتی اندازه‌گیری نمود. فاصله‌ی دو ایستگاه صوتی ۲۶۲ متر و بسامد امواج ارسالی بر روی ۳۰ کیلوهرتز تنظیم شد. نتایج نشان داد در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه دمای متوسط آب بین ۱۹/۷ و ۱۹/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر بود. دقت اندازه‌گیری دما نیز با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی ۰/۰۴ درجه‌ی سانتی‌گراد محاسبه گردید. نتایج این مطالعه نشان داد با به کارگیری فن آوری تکه‌نگاری صوتی، داده‌های دمایی در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها به صورت پیوسته و درازمدت قابل پایش است. در این تحقیق به دلیل کم‌عمق بودن دریاچه لایه‌بندی حرارتی تشکیل نمی‌گردد، اما از آنجایی که فن آوری تکه‌نگاری صوتی قادر است دمای آب را در اعماق مختلف اندازه‌گیری نماید، پیشنهاد می‌گردد کاربرد این روش در مخازن سدها برای اندازه‌گیری لایه‌بندی حرارتی آب مورد مطالعه قرار گیرد.

علائم انگلیسی

C	سرعت صوت، m/s
u	سرعت جریان آب، m/s
C_0	سرعت صوت مرجع، m/s
n	تانژانت بردار واحد مسیر صوت
s	مسافت قوس مسیر موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی
\emptyset	زاویه‌ی موج صوتی نسبت به صفحه‌ی افق
L	فاصله‌ی افقی بین دو ایستگاه صوتی، m

water quality performance of reservoir multilevel intake configurations, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1) (2007) 78-86.

- [9] W. He, J. Lian, Y. Yao, M. Wu, C. Ma, Modeling the effect of temperature-control curtain on the thermal structure in a deep stratified reservoir, *Journal of environmental management*, 202 (2017) 106-116.
- [10] P. Schneider, S. Hook, R. Radocinski, G. Corlett, G. Hulley, S. Schladow, T. Steissberg, Satellite observations indicate rapid warming trend for lakes in California and Nevada, *Geophysical Research Letters*, 36(22) (2009).
- [11] P. Schneider, S.J. Hook, Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985, *Geophysical Research Letters*, 37(22) (2010).
- [12] G. Chavula, P. Brezonik, P. Thenkabail, T. Johnson, M. Bauer, Estimating the surface temperature of Lake Malawi using AVHRR and MODIS satellite imagery, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13-16) (2009) 749-754.
- [13] S. Sima, A. Ahmadalipour, M. Tajrishy, Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation, *Remote Sensing of Environment*, 136 (2013) 374-385.
- [14] Y. Adityawarman, Advanced design of the coastal acoustic tomography system and its application to environmental monitoring of the Seto Inland Sea, Hiroshima University Yudi, 2011.
- [15] W.H. Munk, P. Worcester, *Ocean Acoustic Tomography, Oceanography*. (1988) 1988-1990.
- [16] J.A. Mercer, J.A. Colosi, B.M. Howe, M.A. Dzieciuch, R. Stephen, P.F. Worcester, LOAPEX: The long-range ocean acoustic propagation EXperiment, *IEEE J. Ocean. Eng.* 34 (2009) 1-11. doi:10.1109/JOE.2008.2010656.
- [17] Y.A. Chepurin, Experiments on underwater acoustic tomography, *Acoust. Phys.* 53 (2007) 393-416. doi:10.1134/S1063771007030141.
- [18] C. Zhang, Innovative study on non-tidal environmental variations of the Seto Inland Sea by the external forcing, Hiroshima University, 2015.
- [19] Z.-N. Zhu, X.-H. Zhu, X. Guo, Coastal tomographic

سرعت متوسط صوت در آب در راستای امواج صوتی،
 c_m
 m/s

سرعت متوسط جریان آب در راستای امواج صوتی،
 u_m
 m/s

زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه پایین دست،
 t_{Down}
 msec

زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالا دست،
 t_{Up}
 msec

میانگین زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالادست و پایین دست،
 t_m
 msec

اختلاف زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالادست و پایین دست،
 Δt
 msec

مراجع

- [1] P. Brohan, J.J. Kennedy, I. Harris, S.F. Tett, P.D. Jones, Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D12) (2006).
- [2] G. YVON-DUROCHER, J.M. Montoya, M. Trimmer, G. Woodward, Warming alters the size spectrum and shifts the distribution of biomass in freshwater ecosystems, *Global change biology*, 17(4) (2011) 1681-1694.
- [3] H.G. Orr, G.L. Simpson, S. Clers, G. Watts, M. Hughes, J. Hannaford, M.J. Dunbar, C.L. Laizé, R.L. Wilby, R.W. Battarbee, Detecting changing river temperatures in England and Wales, *Hydrological Processes*, 29(5) (2015) 752-766.
- [4] W.C. Quayle, L.S. Peck, H. Peat, J. Ellis-Evans, P.R. Harrigan, Extreme responses to climate change in Antarctic lakes, *Science*, 295(5555) (2002) 645-645.
- [5] R. Coats, J. Perez-Losada, G. Schladow, R. Richards, C. Goldman, The warming of lake Tahoe, *Climatic change*, 76(1-2) (2006) 121-148.
- [6] B. Zouabi-Aloui, S.M. Adelana, M. Gueddari, Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach, *Environmental monitoring and assessment*, 187(5) (2015) 292.
- [7] A. Sadeghian, D. de Boer, J.J. Hudson, H. Wheeler, K.-E. Lindenschmidt, Lake Diefenbaker temperature model, *Journal of Great Lakes Research*, 41 (2015) 8-21.
- [8] R.K. Gelda, S.W. Effler, Simulation of operations and

- shallow-water acoustic tomography, *Hydrol. Process.* (2016). doi:10.1002/hyp.10796.
- [28] J.K. Lewis, P.J. Stein, S. Rajan, The coupled oceanographic-tomographic analysis and prediction system: A practical means for utilizing high frequency tomography in the world's oceans, *Ocean Eng.* 35 (2008) 1727–1738. doi:10.1016/j.oceaneng.2008.08.017.
- [29] K. Kawanisi, M. Razaz, A. Kaneko, S. Watanabe, Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system, *J. Hydrol.* 380 (2010) 74–81. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.024.
- [30] K. Kawanisi, A. Kaneko, S. Nigo, M. Soltaniasl, New acoustic system for continuous measurement of river discharge and water temperature, *Water Sci. Eng.* 3 (2010) 47–55. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.005.
- [31] Y. Adityawarman, A. Kaneko, K. Nakano, N. Taniguchi, K. Komai, X. Guo, N. Gohda, Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.* 67 (2011) 173–182. doi:10.1007/s10872-011-0016-5.
- [32] K. Kawanisi, M. Razaz, J. Yano, K. Ishikawa, Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines, *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013) 55303. doi:10.1088/0957-0233/24/5/055303.
- [33] C. Zhang, A.; Kaneko, Xiao-Hua Zhu; N. Gohda, Tomographic mapping of a coastal upwelling and the associated diurnal internal tides in Hiroshima Bay, Japan Chuanzheng, *J. Geophys. Res. Ocean. Res.* (2015) 1152–1172. doi:10.1002/2014JC010299. Received.
- [34] C.-F. Huang, N. Taniguchi, Y.-H. Chen, J.-Y. Liu, Estimating temperature and current using a pair of transceivers in a harbor environment, *J. Acoust. Soc. Am.* 140 (2016) EL137-EL142. doi:10.1121/1.4959069.
- [35] J.C. Wells, Y. Aota, G. Auger, A. Kaneko, N. Goda, Application of coastal acoustic tomography to Lake Biwa, Japan, *J. Acoust. Soc. Am.* 140 (2016) 3183–3183. doi:10.1121/1.4970006.
- [36] F. Syamsudin, M. Chen, A. Kaneko, Y. Adityawarman, H. mapping of nonlinear tidal currents and residual currents, *Cont. Shelf Res.* 143 (2017) 219–227. doi:10.1016/j.csr.2016.06.014.
- [20] X. Zhu, Z. Zhu, Y. Ma, X. Fan, Y. Long, Measuring tidal and residual currents and volume transport through a wide strait by use of the coastal acoustic tomography system, *Cont. Shelf Res.* 17 (2015) 2015. doi:10.1016/j.csr.2015.08.016.
- [21] X. Zhao, D. Wang, Ocean acoustic tomography from different receiver geometries using the adjoint method, *J. Acoust. Soc. Am.* 138 (2015) 3733–3741. doi:10.1121/1.4938232.
- [22] N. Taniguchi, C.-F. Huang, A. Kaneko, C.-T. Liu, B.M. Howe, Y.-H. Wang, Y. Yang, J. Lin, X.-H. Zhu, N. Gohda, Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.* 134 (2013) 3272. doi:10.1121/1.4818842.
- [23] N. Taniguchi, C.-F. Huang, A. Kaneko, C.-T. Liu, B.M. Howe, Y.-H. Wang, Y. Yang, J. Lin, X.-H. Zhu, N. Gohda, Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.* 134 (2013) 3272. doi:10.1121/1.4818842.
- [24] H. Yamoaka, A. Kaneko, J.H. Park, H. Zheng, N. Gohda, T. Takano, X.H. Zhu, Y. Takasugi, Coastal acoustic tomography system and its field application, *IEEE J. Ocean. Eng.* 27 (2002) 283–295. doi:10.1109/JOE.2002.1002483.
- [25] C. Zhang, X.H. Zhu, Z.N. Zhu, W. Liu, Z. Zhang, X. Fan, R. Zhao, M. Dong, M. Wang, High-precision measurement of tidal current structures using coastal acoustic tomography, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 193 (2017) 12–24. doi:10.1016/j.ecss.2017.05.014.
- [26] M. Bahreinimotlagh, K. Kawanisi, M.M. Daniai, M.B. Al Sawaf, J. Kagami, Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge, *Flow Meas. Instrum.* 51 (2016) 30–39. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2016.08.010.
- [27] K. Kawanisi, M. BahrainiMotlagh, M. AlSawaf, M. Razaz, High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using

- T. Tamura, Y. Takasugi, A. Kaneko, Reciprocal Sound Transmission Experiment for Current Measurement in the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.* 53 (1997) 117–127.
- [41] K. Kawanisi, S. Watanabe, A. Kaneko, T. Abe, River Acoustic Tomography for Continuous Measurement of Water Discharge, in: 3rd Int. Conf. Exhib. “Underwater Acoust. Meas. Technol. Results,” Nafplion, Greece, 2009: pp. 613–620.
- [42] M.B. Al Sawaf, K. Kawanisi, J. Kagami, M. BahrainiMotlagh, Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system, *Physica A.* 484 (2017) 11–20. doi:10.1016/j.physa.2017.04.168.
- [43] K. Kawanisi, M. Razaz, K. Ishikawa, J. Yano, M. Soltaniasl, Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system, *Water Resour. Res.* 48 (2012) 1–10. doi:10.1029/2012WR012064.
- Zheng, H. Mutsuda, A.D. Hanifa, C. Zhang, G. Auger, J.C. Wells, X. Zhu, Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission, *Acoust. Sci. Technol.* 38 (2017) 246–253. doi:10.1250/ast.38.246.
- [37] H. Medwin, Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.* 58 (1975) 1318. doi:10.1121/1.380790.
- [38] K. Kawanisi, K. Ishikawa, M. Razaz, Acoustic Measurements Of Streamflow and Water Temperature In A Mountain River, in: Proc. 7th Int. Symp. Environ. Hydraul., 2014: pp. 29–32.
- [39] K. Kawanisi, K. Ishikawa, M. Razaz, J. Yano, K. Kawanisi, AN APPLICATION OF A SHALLOW ACOUSTIC TOMOGRAPHY : CONTINUOUS MONITORING OF STREAMFLOW AND WATER TEMPERATURE IN A MOUNTAIN RIVER, in: 1st Int. Conf. Exhib. Underw. Acoust., 2013: pp. 539–546.
- [40] H. Zheng, G. Noriaki, H. NOGUCHI, T. Ito, H. Yamaoka,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Bahreinimotlagh, R. Roozbahani, M.J. Zareian, H. Kardan Moghadam, K. Mohtasham, *The continuous water temperature monitoring by using Acoustic Tomography Technology, Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 1097-1108.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14381.5639](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14381.5639)



