

بررسی وضعیت جریان آب در دریاچه هفت برم با استفاده از فناوری تکه‌نگاری صوتی

مسعود بحرینی مطلق^{۱*} - رضا روزبهانی^۲ - مرتضی افتخاری^۳ - علیرضا کاوسی حیدری^۴ - سینا ابوالحسینی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷

چکیده

تکه‌نگاری صوتی شاخه‌ای از علم سنجش از دور است که با ارسال و دریافت دوسویه امواج صوتی خصوصیات جریان را اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه این روش به‌طور گسترده در کشورهای توسعه‌یافته برای پایش سرعت آب در رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها بکار گرفته می‌شود، اما هیچ سابقه‌ای از استفاده آن برای اندازه‌گیری سرعت جریان در درون دریاچه‌ها وجود ندارد. در این مقاله نتایج کاربرد فناوری تکه‌نگاری صوتی برای اندازه‌گیری سرعت جریان در دریاچه برای اولین بار ارائه شده است. جهت انجام این تحقیق دو دستگاه تکه‌نگاری صوتی به فاصله‌ی ۲۶۲ متر از یکدیگر در یکی از دریاچه‌های شیرین هفت برم واقع در غرب شیراز قرار داده شد و امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۴۰ ثانیه توسط دستگاه‌ها ارسال شدند. نتایج نشان داد که زمان طی شده امواج صوتی در طول آزمایش حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه است. با استفاده از میانگین زمان رسیدن امواج به ایستگاه مقابل و اختلاف زمان رسیدن امواج در ایستگاه‌ها، سرعت صوت و سرعت متوسط جریان آب به ترتیب ۱۴۸۱ متر بر ثانیه و ۱/۵ - سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، جریان معنی‌داری به سمت حاشیه دریاچه در زمان انجام این آزمایش وجود داشته است. به‌عبارت‌دیگر این مطالعه بیانگر تغذیه آبخوان آبرفتی حاشیه دریاچه از آب درون دریاچه می‌باشد، که این امر با شرایط هیدروژئولوژیکی این آبخوان و مطالعات پیشین انجام شده در منطقه همخوانی دارد. بنابراین این مطالعه نشان می‌دهد امکان تعیین جریان‌های ورودی یا خروجی زیرزمینی از دریاچه‌ها با استفاده از فناوری تکه‌نگاری صوتی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: روش تکه‌نگاری صوتی، زمان طی شده امواج صوتی، سرعت جریان آب، سرعت صوت در آب، سنجش از دور درون آب

مقدمه

تکه‌نگاری صوتی درون آب^۷ شاخه‌ای از دانش سنجش از دور و ابزاری قدرتمند جهت اندازه‌گیری خصوصیات جریان مثل دمای آب، سرعت، دبی آب، شوری، جهت جریان آب و غیره در رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها است (۲ و ۳). تکه‌نگاری صوتی توسط مونک و همکاران در سال ۱۹۷۹ جهت پایش دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی ابداع گردید (۴ و ۵). دستگاه تکه‌نگاری صوتی اقیانوسی (OATS)^۸ با ارسال بسامدهای پایین امواج صوتی (کمتر از ۱ کیلوهرتز) جهت اندازه‌گیری دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی در مقیاس کمتر از ۱۰۰ کیلومتر^۹ به‌کاربرده می‌شود (۶ و ۸). بهرینگر و همکاران (۹) در سال ۱۹۸۲ زمان رسیدن امواج صوتی را در جنوب غربی جزیره برمودا در مقیاس ۳۰۰×۳۰۰ کیلومتر با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی اندازه گرفتند. کرنوله و همکاران (۱۰) در سال ۱۹۸۳ نیز روش تکه‌نگاری صوتی را در مقیاس ۱۰۰۰ کیلومتری در

امروزه علم سنجش از دور ابزاری بسیار مفید جهت پایش عوامل محیطی محسوب می‌گردد. ماهواره‌های متنوعی در مدارهای اطراف زمین قرار دارند که با ارسال امواج الکترومغناطیس، شاخص‌های بسیار زیادی را در سطح زمین و جو اندازه‌گیری می‌کنند. یکی از نقاط ضعف این فناوری، تضعیف امواج الکترومغناطیس در درون آب و عدم امکان پایش محیط‌های آبی توسط آن است. ازاین‌رو محققان جهت به‌کارگیری فناوری سنجش از دور در درون آب، از امواج صوتی^۶ بهره می‌برند (۱).

۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ - به‌ترتیب استادیاران پژوهشی و کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران

(Email: m.bahreini@wri.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v33i1.72706

6- Acoustic

7- Underwater acoustic tomography

8- Ocean acoustic tomography systems (OATS)

9- Mesoscale

* - نویسنده مسئول:

شمال شرقی اقیانوس آرام به کار بردند.

در سال ۱۹۹۷ محققان ژاپنی نمونه‌ی اولیه‌ی دستگاه تکه‌نگاری دریایی (CATS)^۱ جهت اندازه‌گیری جریان‌های دریایی در فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر را طراحی کردند (۱۱). از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷ مطالعات زیادی جهت اندازه‌گیری جریان، دما، سرعت جزرومد^۲، داده‌گواهی^۳، تغییرات جهت جریان و غیره با استفاده از CATS انجام شده است (۱۲ و ۱۹).

بحرینی مطلق و همکاران (۲۰) سرعت و دبی جریان را در یکی از بزرگ‌ترین رودخانه‌های جزرومدی دنیا به نام رودخانه‌ی کیانتانگ^۴، واقع در چین با استفاده از CATS اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که سرعت مد در بازه‌ی مورد مطالعه ۱/۵- متر بر ثانیه است و دبی عبوری ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه است. ایشان با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با ADCP^۵ نتیجه گرفتند که CATS جهت پیش پیوسته‌ی جریان روشی مناسب‌تر است. ADCP نوعی از دستگاه‌های صوتی است که با استفاده از قانون داپلر^۶ خصوصیات جریان را اندازه‌گیری می‌کند.

در سال ۲۰۱۰ محققان ژاپنی با توسعه دستگاه CATS، دستگاه تکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای (FATS)^۷ را برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان در رودخانه‌ها در فواصل ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر طراحی و ابداع کردند (۲۰). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی توسط FATS در رودخانه‌ها جهت اندازه‌گیری سرعت جریان، دما، دبی، جزرومد، شوری، رسوبات معلق و پایش سیلاب‌ها انجام پذیرفته است (۲۱ و ۲۶).

کاوانیشی و همکاران (۲۷) سرعت، دبی و دمای جریان را در یکی از رودخانه‌های ژاپن با استفاده از FATS به‌صورت پیوسته پایش کردند و با داده‌های ADCP و حسگر دما مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که FATS کارایی بهتری نسبت به سایر روش‌ها برای پایش پیوسته خصوصیات جریان دارد.

کاوانیشی و همکاران (۲۸) تغییرات دما، سرعت و دبی جریان حاصل از تخلیه‌ی یک سد را با استفاده از FATS اندازه گرفتند. نتایج نشان داد که سرعت جریان قبل از گذر موج تخلیه‌ی سد ۰/۴ متر بر ثانیه بوده است و در هنگام گذر موج به بیش از ۱/۲ متر بر ثانیه رسید. دبی جریان نیز از ۵۰ متر مکعب بر ثانیه در حالت نرمال به ۱۸۰ متر مکعب در زمان گذر موج تخلیه‌ی سد رسید. دمای اندازه‌گیری

شده توسط FATS نیز از ۸ به ۷ درجه سانتی‌گراد در زمان گذر موج کاهش یافت.

بحرینی مطلق و همکاران (۲۹) دبی جریان رودخانه گونو^۸ ژاپن را با استفاده از FATS اندازه‌گرفتند و با داده‌های ADCP و روش دبی-اشل مقایسه کردند. نتایج نشان داد که FATS روشی کارآمد جهت پایش پیوسته جریان در رودخانه‌ها است و نسبت به سایر روش‌ها کارآمدتر است.

ولز و همکاران (۳۰) سرعت و دمای جریان در دریاچه‌ی بیوا^۹، واقع در ژاپن را با استفاده از CATS به مدت ۲ ماه اندازه‌گیری کردند. هدف ایشان از اندازه‌گیری داده‌های جریان و دما با استفاده از CATS، به کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در داده‌گواهی^{۱۰} سیستم‌های پیش‌بینی جریان و دما بود.

سواف و همکاران (۳۱) تغییرات سرعت و دبی جریان را در یک رودخانه‌ی کوهستانی به مدت ۶ ماه در هر ۳۰ ثانیه با استفاده از FATS اندازه‌گرفتند تا نوسانات جریان را با استفاده از روش DFA^{۱۱}، بررسی نمایند. نتایج نشان داد که FATS روشی کارآمد جهت پایش جریان در بسامدهای بالا است.

کاوانیشی و سواف (۳۲) FATS را به عنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری دائمی و زمان-واقعی^{۱۲}، دبی جریان رودخانه‌ها معرفی کردند. ایشان با استفاده از FATS در رودخانه گونو ژاپن، داده‌های سرعت و دبی جریان را به‌صورت آنلاین اندازه‌گیری کردند و به مرکز اطلاعات مخابره کردند.

لی و همکاران (۳۳ و ۳۴) در دو آزمایش که در دانشگاه ادینبارا اسکاتلند^{۱۳} انجام دادند، FATS را در یک تانک به قطر ۲۵ متر و عمق ۲ متر که دارای قابلیت تولید جریان آب با سرعت دلخواه بود به کار بردند و سرعت جریان آب را در ۵ لایه مختلف عمودی اندازه‌گیری کردند و با داده‌های دستگاه Vectrino (نوعی ADCP) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی جهت اندازه‌گیری سرعت جریان در اعماق مختلف بسیار کارآمد است.

با توجه به اهمیت روش تکه‌نگاری صوتی و کاربردهای فراوان آن در بحث علوم آب، پایه‌ریزی فن‌آوری فوق در کشور جهت رفع مشکلات حوزه آب امری ضروری است. هدف از این تحقیق، به کارگیری فناوری تکه‌نگاری صوتی به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در یک دریاچه است.

8- Gono river

9- Biwa lake

10- Data assimilation

11- Detrended fluctuation analysis

12- Real-time

13- University of Edinburgh

1- Coastal acoustic tomography system (CATS)

2- Tide

3- Data assimilation

4- Qiantang river

5- Acoustic doppler current profiler

6- Doppler

7- Fluvial acoustic tomography system (FATS)

$$\Delta \tau_i^{\pm} \approx \int_{\Gamma_i^{\pm}} \frac{ds}{C_0} \left(1 - \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right) - \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (4)$$

با اجرای بسط دوم تیلور، معادله‌ی فوق به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\Delta \tau_i^{\pm} = - \int_{\Gamma_{0,i}^{\pm}} \frac{(\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds}{C_0^2} + \int_{\Gamma_{0,i}^{\pm}} \frac{1}{C_0} \left(1 - \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right) \Delta(ds) \approx - \int_{\Gamma_{0,i}^{\pm}} \frac{(\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds}{C_0^2} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵ تفاضل و مجموع زمان‌های طی شده‌ی دوسویه^۵ را می‌توان به صورت جداگانه نوشت که نشان‌دهنده‌ی اثر سرعت جریان آب و سرعت صوت است که به ترتیب با روابط ۶ و ۷ ارائه می‌گردد:

$$\delta \tau_i^v = \Delta \tau_i^+ - \Delta \tau_i^- \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0^2} \quad (6)$$

$$\delta \tau_i^c = \Delta \tau_i^+ - \Delta \tau_i^- \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\delta C}{C_0^2} ds \quad (7)$$

با جایگذاری زاویه‌ی موج صوتی ϕ_i نسبت به صفحه‌ی افقی و تصویر کردن^۶ موج صوتی در صفحه‌ی افق روابط فوق به صورت زیر ارائه می‌گردند:

$$\delta \tau_i^v \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\mathbf{u} \cdot \cos \phi_i}{C_0^2} \frac{dx}{\cos \phi_i} = -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{u}{C_0^2} dx \quad (8)$$

$$\delta \tau_i^c \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\delta C}{C_0^2} \frac{dx}{\cos \phi_i} \quad (9)$$

به دلیل ناچیز بودن سرعت عمودی جریان، v بیانگر سرعت جریان در محور افقی است.

در شکل ۱ مسیر یک موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی T_1 و T_2 نشان داده شده است. با توجه به مسیر موج صوتی نشان داده شده در این شکل، سرعت متوسط عمودی جریان در مقطع مورد نظر^۷ و سرعت صوت در دامنه‌ی مستطیلی که توسط دو خط افقی که از بالا و پایین ایستگاه‌های صوتی عبور می‌کند و دو خط عمودی که ایستگاه‌های صوتی را احاطه کرده است به دست می‌آید.

از آنجاکه سرعت عمودی جریان ناچیز شمرده می‌شود، سرعت متوسط جریان در مقطع بین دو ایستگاه (u_m) و سرعت صوت (c_m) را می‌توان به صورت افقی در نظر گرفت که در شکل ۲ نشان داده شده است.

در نهایت زمان طی شده برای ایستگاه بالادست و پایین‌دست به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌گردد «شکل ۳» (۱۱):

مبانی علم تکه‌نگاری صوتی

۱-۲- ارسال دوسویه‌ی امواج صوتی^۱ در محیط آبی

اگر دو منبع صوتی در یک محیط آبی قرار داده شوند و هم‌زمان امواج صوتی را به یکدیگر ارسال نمایند، با اندازه‌گیری زمان رسیدن امواج به ایستگاه مقابل، سرعت صوت و سرعت جریان آب قابل استخراج است.

به‌طور کلی انتشار امواج صوتی در محیط آب تابع سرعت صوت $C(x,y,z)$ و سرعت جریان آب $u(x,y)$ در آن محیط است. زمان طی شده‌ی امواج صوتی بین دو ایستگاه صوتی که هم‌زمان امواج صوتی را به یکدیگر ارسال می‌کنند با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه است (۳۵):

$$t_i^{\pm} = \int_{\Gamma_i^{\pm}} \frac{ds}{C_0(Z) + \delta C(x,y) \pm \mathbf{u}(x,y) \cdot \mathbf{n}_i} \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (1)$$

که نشانه \pm نشان‌دهنده‌ی جهت ارسال موج از ایستگاه صوتی بالادست به پایین‌دست و بالعکس است، C_0 سرعت صوت مرجع مستقل از مسافت، x,y,z به ترتیب طول و عرض و ارتفاع در محیط آبی، δC انحراف از سرعت صوت مرجع، \mathbf{u} بردار سرعت جریان آب، \mathbf{n} تانژانت بردار واحد مسیر صوت، s مسافت قوس مسیر موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی و پسوند i شماره‌ی موج صوتی پیموده شده است. زمان طی شده^۲ (t_0,i) برای سرعت صوت مرجع توسط شبیه‌سازی موج^۳ و مستقل از مسافت^۴ تعیین شده و به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد (۳۶ و ۳۷):

$$t_{0,i} = \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (2)$$

تفاضل روابط ۱ و ۲، انحراف زمان طی شده‌ی امواج صوتی نسبت به زمان طی شده‌ی موج صوتی مرجع را نشان می‌دهد:

$$\Delta \tau_i^{\pm} = \int_{\Gamma_i^{\pm}} \frac{ds}{C_0 \left(1 + \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right)} - \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (3)$$

با توجه به اینکه $C_0 \gg \Delta C$ و $C_0 \gg \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ ، با استفاده از بسط تیلور و صرف نظر از جمله‌های بزرگ‌تر از ۲، رابطه ۳ به صورت زیر ساده می‌گردد:

5- Reciprocal travel time

6- Projecting

7- Vertical section-average current

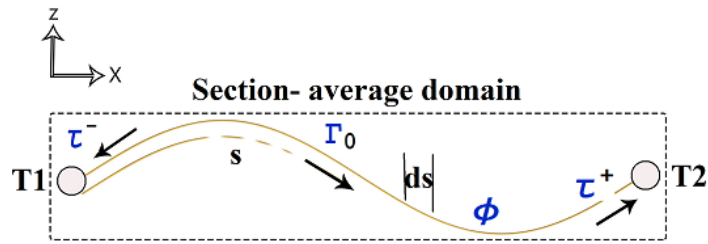
1- Reciprocal sound transmission

2- Travel time

3- Ray simulation

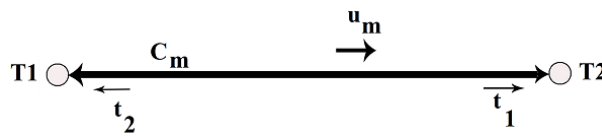
4- Range- independent

$$t_{Down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad (10)$$

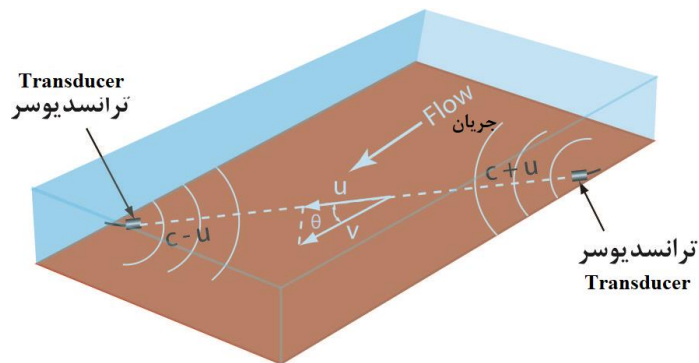


شکل ۱- مسیر موج یک موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی T₁ و T₂ (۱۸)

Figure 1- Sketch of the acoustic ray traveling reciprocally between T₁ and T₂ and the relevant parameters



شکل ۲- تصویر موج صوتی در صفحه‌ی افق (۱)
Figure 2- Projection to the horizontal plane



$$v = u / \cos \theta$$

v : سرعت متوسط جریان رودخانه
 u : سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی
 c : سرعت صوت

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 (۲۱)
Figure 3- Velocity component along ray path u , velocity component in the direction of flow v , and ray-path angle θ

که L فاصله‌ی افقی بین دو ایستگاه صوتی،

$$\Delta t = t_{up} - t_{Down} \text{ و } t_m = \frac{t_{Up} + t_{Down}}{2} \text{ می‌باشد.}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۲، با معلوم بودن فاصله‌ی دو ایستگاه از یکدیگر و ثبت زمان رسیدن موج‌های صوتی در ایستگاه بالادست و پایین‌دست، سرعت متوسط جریان آب و سرعت صوت قابل محاسبه است. دقت اندازه‌گیری سرعت جریان توسط FATS، ± 0.1 سانتی‌متر بر ثانیه است و قادر است سرعت‌های بسیار کم را اندازه‌گیری کند. FATS توانایی اندازه‌گیری سرعت جریان از -20 متر بر ثانیه تا $+20$

$$t_{Up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (11)$$

و با حل دو رابطه‌ی فوق سرعت متوسط جریان آب و سرعت صوت حاصل خواهد شد:

$$\begin{cases} c_m = \frac{L}{t_m} \\ u_m = \frac{c_m^2}{2L} \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

متر بر ثانیه را دارد.

(حدود ۴/۵ میلیون مترمکعب) احتمالاً به صورت خروجی زیرسطحی وارد آبخوان ابرفتی مجاور دریاچه می‌شود.

دو ایستگاه تکه‌نگاری صوتی با نام‌های S₁ و S₂ به فاصله‌ی ۲۶۲ متر از یکدیگر قرار داده شدند. هر دو دستگاه با استفاده از ماهواره‌های GPS همزمان‌سازی شده و امواج صوتی را با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۴۰ ثانیه ارسال کردند. امواج صوتی با استفاده از روش M-Sequence درجه ۹ تلفیق شده^۳ تا نوفه‌های^۴ محیط حذف شده و سیگنال‌های شفاف در ایستگاه‌های مقابل دریافت گردد.

۲-۲- دستگاه تکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای (FATS)

FATS دارای دو قسمت پردازنده و دو تراگذار^۲ است. هر پردازنده 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 1Hz، سیگنال 10MHz 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 10MHz که توسط ماهواره‌های GPS تولید می‌شود دقت بسیار بالایی را مهیا می‌کند و باعث می‌شود که خطای زمانی دستگاه به حداقل برسد (۳۸). تراگذارها که توسط یک کابل به قسمت مرکزی دستگاه متصل هستند در درون آب قرار می‌گیرند و بلافاصله پس از ارسال صوت، منتظر دریافت صوت از ایستگاه مقابل می‌شوند و زمان رسیدن موج صوتی از ایستگاه مقابل را ثبت می‌کنند.

نتایج و بحث

در محیط آبی، نویزهای صوتی زیادی از قبیل صدای موتور قایق، کشتی، و غیره 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 (۱۱). از این‌رو همه نوفه‌های محیط حذف شده و زمان رسیدن امواج صوتی به‌صورت یک قله^۵ نمایان می‌شود.

شکل ۵ زمان رسیدن دو موج صوتی که در ساعت ۱۲:۲۷ و ۱۲:۳۳ ارسال شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه طول کشیده است 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 ۱۲ سرعت صوت در آب قابل محاسبه است. از طرفی بر اساس اختلاف زمانی رسیدن امواج در ایستگاه مقابل، سرعت جریان آب تعیین می‌گردد. در این آزمایش با فرض ساکن بودن آب دریاچه می‌بایست زمان رسیدن امواج در هر دو ایستگاه یکسان باشد. از این‌رو برای موج ارسالی ساعت ۱۲:۲۷ هر دو قله برای ایستگاه اول و دوم بر روی هم منطبق شده‌اند که نشان‌دهنده عدم وجود جریان است. اما در ساعت ۱۲:۳۳ حدود ۰/۰۰۴- 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 ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان رسیدن تمامی موج‌ها تقریباً در یک راستا است. در صورتی که سرعت جریان آب و یا دمای آب تغییر نماید؛ سرعت

منطقه مورد مطالعه و روش انجام آزمایش با استفاده از FATS

این مطالعه بر روی یکی از دریاچه‌های هفت برم واقع در ۳۵ کیلومتری غربی شیراز در موقعیت جغرافیایی "۴۹°۴۱'۴۸" ۲۹° شمالی و "۳۶'۲۹" ۵۲° شرقی در روز ۱۶ تیر ۱۳۹۶ انجام شد. در شکل ۴ منطقه مورد مطالعه و نحوه قرارگیری ایستگاه‌های FATS نشان داده شده است.

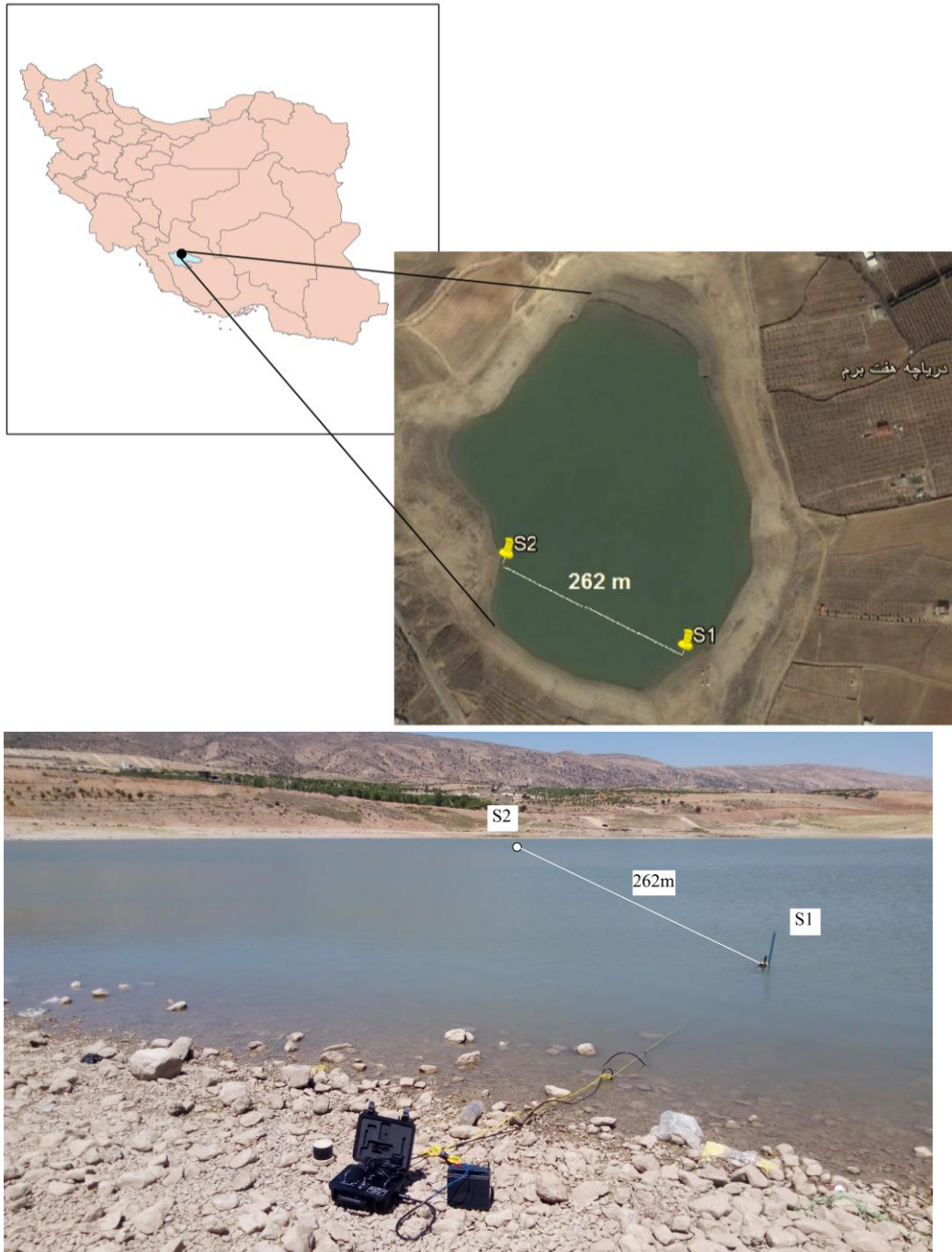
دریاچه‌های آب شیرین هفت‌برم بر روی رسوبات ابرفتی کواترنری واقع بر روی سازند گچساران، در مجاورت یال شمالی تاقدیس کارستی انار تشکیل شده‌اند. بررسی‌های انجام شده توسط عالم و محمدی (۳۹) و سعادت و محمدی (۴۰) نشان می‌دهد از دیدگاه هیدروژئولوژی با توجه به بیلان آبخوان کارستی انار، بالاتر بودن تراز آب این دریاچه‌ها از سطح آب زیرزمینی در این آبخوان، و نیز ترکیب ایزوتوپی منابع آب مختلف، امکان تغذیه این دریاچه از کف توسط آبخوان کارستی انار وجود ندارد. لذا مهم‌ترین منبع تغذیه این دریاچه‌ها از منابع آب سطحی (بارش مستقیم و رواناب سطحی) می‌باشد (۴۰). در تابستان آب این دریاچه‌ها تبخیر می‌یابد و از وسعت و عمق آن‌ها کاسته می‌گردد. محاسبات بیلان آب دریاچه توسط عالم و محمدی (۳۹) نشان می‌دهد سالانه بخشی از آب این دریاچه‌ها

3- Modulated
4- Noise
5- Peak

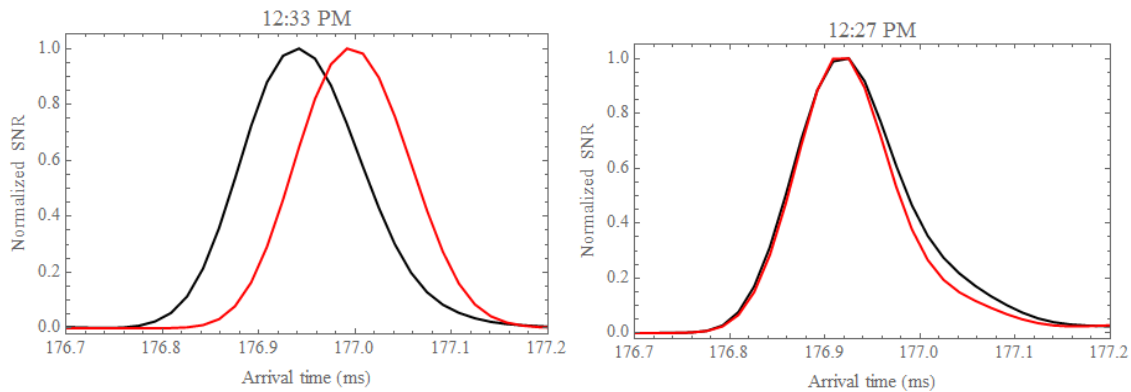
1- Fluvial acoustic tomography system
2- Transducer

آب شور به محیط اندازه‌گیری وارد می‌شود زمان رسیدن امواج صوتی نیز به شدت تغییر می‌کند و در یک راستا قرار نخواهند گرفت.

صوت نیز تغییر خواهد کرد و زمان رسیدن امواج به طور چشمگیری متغیر خواهند بود (۲۸). از طرفی با توجه به تأثیر شوری بر سرعت صوت، در رودخانه‌های جزرومدی، زمانی که مد اتفاق می‌افتد و

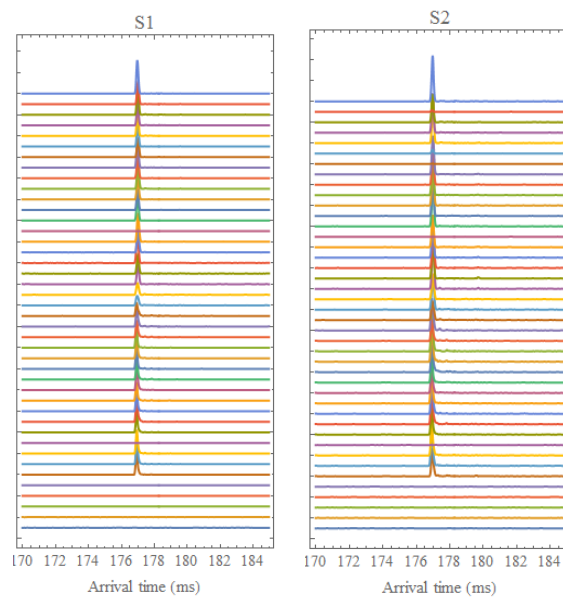


شکل ۴- منطقه مورد مطالعه و قرارگیری ایستگاه‌های FATS
Figure 4- Study area and FATS stations deployment



شکل ۵- زمان رسیدن یک موج صوتی در ایستگاه اول (مشکی) و ایستگاه دوم (قرمز)

Figure 5- The arrival time of one acoustic wave at station one (Black) and Station two (Red)



شکل ۶- زمان رسیدن همهی امواج صوتی در ایستگاه اول و دوم

Figure 6- Stack diagrams of correlation wave forms of transmitted from both stations

و بین ساعات ۱۲:۳۱ تا ۱۲:۳۴ اختلافی معادل $0.04/0$ میلی‌ثانیه مشاهده شد. منفی بودن اختلاف زمان رسیدن امواج بیانگر آن است که حرکت جریان آب بسیار ضعیفی از ایستگاه دوم به سمت ایستگاه اول وجود داشته است.

در شکل ۸ سرعت صوت در آب و سرعت جریان آب نشان داده شده است. سرعت صوت تابعی از دما، شوری و عمق آب است. از آنجایی که مدت اندازه‌گیری کوتاه بوده و دمای آب تغییر محسوسی نداشت، لذا سرعت صوت در مدت اندازه‌گیری شده تقریباً ثابت و حدود ۱۴۸۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. سرعت جریان آب از ساعت ۱۲:۲۶ تا ۱۲:۲۸ تقریباً صفر بود و بین ساعات ۱۲:۲۸ تا ۱۲:۳۵ سرعت جریان بسیار کمی مشاهده شد که بیشینه آن حدود $0.15/0$ متر بر ثانیه ($1/5$ سانتی‌متر بر ثانیه) بود که در ساعت ۱۲:۳۰ سرعت

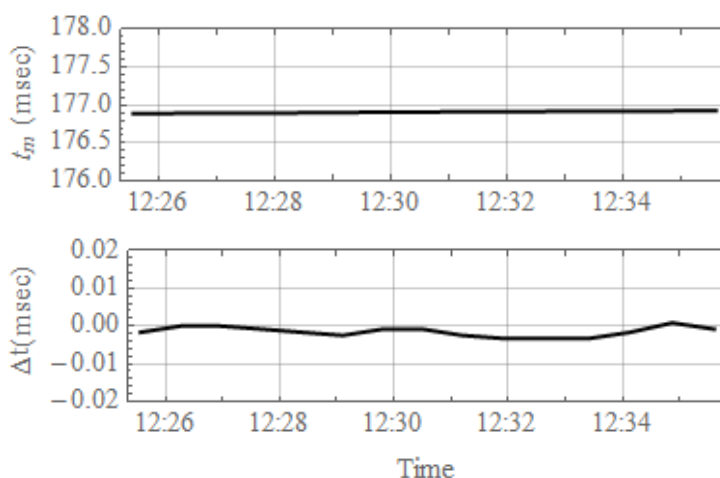
طبق معادله ۱۲، برای تخمین سرعت صوت بایستی زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه اندازه‌گیری شود، سپس میانگین زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه که با t_m نشان داده می‌شود، محاسبه گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین زمان رسیدن امواج در دو ایستگاه حدود ۱۷۷ میلی‌ثانیه است و به دلیل عدم وجود جریان و عدم تغییر دمای آب و یا عدم تغییر شوری آب، میانگین زمان رسیدن امواج در طول دوره آزمایش ثابت بوده است. در شکل ۷ میانگین زمان رسیدن امواج صوتی و اختلاف زمان رسیدن امواج در ایستگاه اول و دوم نشان داده شده است. طبق معادله ۱۲ برای تعیین سرعت جریان نیز بایستی اختلافی در زمان رسیدن امواج در ایستگاه‌های مقابل محاسبه گردد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اختلاف زمان رسیدن امواج از ساعت ۱۲:۲۶ تا ۱۲:۳۰ تقریباً صفر بود

درون آب است. دانش فوق روشی منحصر به فرد جهت پایش پیوسته‌ی خصوصیات جریان آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها است. در این مطالعه مقدمه‌ای بر تئوری و معادلات حاکم بر دانش تکه‌نگاری صوتی برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب ارائه شد و در اولین آزمایش FATS در کشور، سرعت صوت و سرعت جریان آب در دریاچه‌ی هفت برم اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که سرعت صوت در طی دوره آزمایش حدود ۱۴۸۱ متر بر ثانیه است.

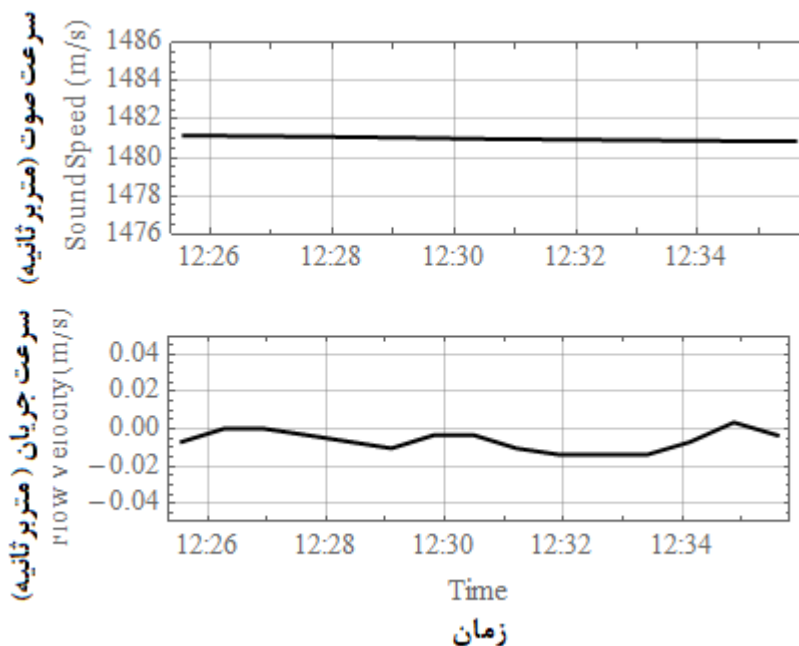
جریان دوباره به سمت صفر متمایل شد. پس از آن سرعت جریان تا مرز ۰/۰۱۸- متر بر ثانیه (۱/۸- سانتی‌متر بر ثانیه) بین ساعات ۱۲:۳۱ تا ۱۲:۳۵ تغییر کرد و دوباره به سمت صفر متمایل شد. سرعت جریان مشاهده شده می‌تواند نشان‌دهنده خروجی زیرزمینی دریاچه و یا اثر وزش باد باشد. منفی بودن سرعت جریان نیز بیانگر آن است که حرکت جریان آب از سمت ایستگاه دوم به ایستگاه اول بوده است.

نتیجه‌گیری

یکی از شاخه‌های دانش سنجش از دور روش تکه‌نگاری صوتی



شکل ۷- میانگین زمان رسیدن امواج صوتی و اختلاف زمان رسیدن امواج در ایستگاه اول و دوم
Figure 7- The averaged and difference of acoustic waves arrival times



شکل ۸- سرعت صوت در آب و سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی
Figure 8- Sound speed and flow velocity along the ray path

خطا تا این میزان در اثر این عامل وجود ندارد. بنابراین به احتمال بسیار زیاد جریان آب در دریاچه به سمت حاشیه آن وجود دارد. البته بهترین راه برای آزمودن این تئوری، استفاده از روش حل مسائل معکوس با استفاده از نتایج شبکه‌ای منتج از حداقل چهار دستگاه FATS در پیرامون دریاچه می‌باشد، که در صورت تأمین تجهیزات لازم امکان اندازه‌گیری را میسر خواهد نمود. سرعت جریان آب معمولاً با استفاده از مولینه (سرعت‌سنج) اندازه‌گیری می‌شود، اما از آنجایی که حداقل سرعت قابل اندازه‌گیری توسط مولینه‌ها ۳ سانتی متر بر ثانیه است، صحت سنجی نتایج این تحقیق با استفاده از دستگاه مولینه امکان‌پذیر نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از Professor. Arata Kaneko, Kiyosi Kawanisi and Noriaki Gohda اساتید دانشگاه هیروشیما به دلیل کمک‌های شایانی که در انتقال فناوری تکه‌نگاری صوتی به ایران داشتند، کمال قدردانی و تشکر را دارند. همچنین بدینوسیله از داوران محترم مقاله نیز بابت ارتقای سطح کیفی مقاله سپاسگزار می‌شود.

سرعت جریان آب با سرعت بسیار کمی نیز مشاهده شد که بیشینه سرعت جریان آب ۰/۱۸- متر بر ثانیه (۱/۸- سانتی‌متر بر ثانیه) محاسبه گردید، که منفی بودن آن نشانگر حرکت آب از سمت ایستگاه دوم به سمت ایستگاه اول بوده است. با توجه به این که این میزان سرعت بیش از حد دقت روش FATS (که برای آزمایش انجام شده در دریاچه برابر با ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه است) می‌باشد، لذا سرعت محاسبه شده معنی‌دار است، که برای آن دو دلیل می‌توان ذکر نمود: (۱) وجود جریان آب در درون دریاچه به سمت حاشیه آن و به عبارتی تغذیه آبخوان آبرفتی حاشیه دریاچه، و (۲) وجود جریان آب در درون دریاچه به دلیل وجود جریان باد در سطح آن. بررسی مطالعات پیشین انجام شده در منطقه نشان می‌دهد سالانه بخشی از آب دریاچه به صورت خروجی زیرسطحی وارد آبخوان آبرفتی مجاور آن می‌شود؛ از طرفی شیرین بودن آب دریاچه با وجود تبخیر نسبتاً بالای آن می‌تواند بیانگر ورود و خروج دائم آب به درون آن باشد، چرا که اگر خروجی آب این دریاچه فقط در اثر تبخیر از سطح می‌بود، آب آن به مانند برخی دریاچه‌های بسته (نظیر برم شش‌پیر در اردکان فارس) شوری فزاینده‌ای می‌داشت. از طرفی در زمان انجام اندازه‌گیری این مطالعه، جریان باد خفیفی در منطقه وجود داشت که با توجه به اندازه‌گیری‌های متعدد انجام شده در کشور ژاپن و چین احتمال بروز

علائم انگلیسی

Symbols

سرعت صوت (Sound speed)	C
سرعت جریان آب (Flow velocity)	u
سرعت صوت مرجع (Reference sound speed)	C_0
تانژانت بردار واحد مسیر صوت (Unit vector tangent)	n
مسافت قوس مسیر موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی (Arc length along the ray path)	s
زاویه‌ی موج صوتی نسبت به صفحه‌ی افق (Angle of horizontal plane)	\emptyset
فاصله افقی بین دو ایستگاه صوتی (Horizontal distance between acoustic stations)	L
سرعت متوسط صوت در آب در راستای امواج صوتی (Sound speed along the transmission line)	C_m
سرعت متوسط جریان آب در راستای امواج صوتی (Flow velocity along the transmission line)	u_m
زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه پایین‌دست (Arrival time of acoustic signals at the downstream)	t_{Down}
زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالادست (Arrival time of acoustic signals at the upstream)	t_{Up}
میانگین زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالادست و پایین دست (The average of arrival times)	t_m
اختلاف زمان رسیدن موج صوتی در ایستگاه بالادست و پایین دست (The difference of arrival times)	Δt

منابع

- Adityawarman Y. 2011. Advanced design of the coastal acoustic tomography system and its application to environmental monitoring of the Seto Inland Sea. Hiroshima University Yudi.
- Chepurin Y.A. 2007. Experiments on underwater acoustic tomography. *Acoust Phys* 53(3): 393–416.
- Zhang C. 2015. Innovative study on non-tidal environmental variations of the Seto Inland Sea by the external forcing. Doctoral Dissertation. Hiroshima University.
- Munk W.H. and Worcester P.F. 1988. Ocean acoustic tomography. *Oceanography* 1(1): 8-10.
- Munk W., Worcester P. and Wunsch C. 1995. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, New

York.

- 6- Howe B.M., Worcester P.F. and Spindel R.C. 1987. Ocean acoustic tomography: Mesoscale velocity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C4): 3785-3805.
- 7- Taniguchi N., Huang C.F., Kaneko A., Liu C.T., Howe B.M., Wang Y.H., Yang Y., Lin J., Zhu X.H., and Gohda N. 2013. Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography. *The Journal of the Acoustical Society of America* 134(4): 3272-3281.
- 8- Sagen H., Dushaw B.D., Skarsoulis E.K., Dumont D., Dzieciuch M.A. and Beszczynska- Möller A. 2016. Time series of temperature in Fram Strait determined from the 2008–2009 DAMOCLES acoustic tomography measurements and an ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7): 4601-4617.
- 9- Behringer D., Birdsall T., Brown M., Cornuelle B., Heinmiller R., Knox R., Metzger K., Munk W., Spiesberger J., Spindel R., and Webb D. 1982. A demonstration of ocean acoustic tomography. *Nature* 299(5879): 121.
- 10- Cornuelle B.D., Worcester P.F., Hildebrand J.A., Hodgkiss W.S., Duda T.F., Boyd J., Howe B.M., Mercer J.A., and Spindel R.C. 1993. Ocean acoustic tomography at 1000-km range using wavefronts measured with a large-aperture vertical array. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 98(C9): 16365-16377.
- 11- Zheng H., Gohda N., Noguchi H., Ito T., Yamaoka H., Tamura T., Takasugi Y., and Kaneko A. 1997. Reciprocal Sound Transmission Experiment for Current Measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal Oceanogr* 53: 117–127.
- 12- Park J., and Kaneko A. 2000. Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model. *Geophys Res Lett.* 27(20): 3373–3376.
- 13- Yamaoka H., Kaneko A., Park J.H., Zheng H., Gohda N., Takano T., Zhu Z.H., and Takasugi Y. 2002. Coastal acoustic tomography system and its field application. *IEEE Journal Ocean Eng.* 27(2): 283–295.
- 14- Adityawarman Y., Kaneko A., Nakano K., Taniguchi N., Komai K., Guo X. and Gohda N. 2011. Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan. *Journal Oceanogr* 67(2): 173–182.
- 15- Zhu X., Zhu Z., Ma Y., Fan X., and Long Y. 2015. 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.
- 16- Huang C.F., Taniguchi N., Chen Y.H., and Liu J.Y. 2016. Estimating temperature and current using a pair of transceivers in a harbor environment. *Journal Acoust Soc Am.* 140(1): 137-142.
- 17- Zhu Z.N., Zhu X.H., and Guo X. 2016. Coastal tomographic mapping of nonlinear tidal currents and residual currents. *Cont Shelf Res.* 143: 219–227.
- 18- Zhang C., Kaneko A., Zhu X.H., Howe B.M., and Gohda N. 2016. Acoustic measurement of the net transport through the Seto Inland Sea. *Acoust Sci Technol.* 37(1): 10–20.
- 19- Syamsudin F., Chen M., Kaneko A., Adityawarman Y., Zheng H., Mutsuda H., Hanifa A.D., Zhang C., Auger G., Wells J.C., and Zhu X. 2017. Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission. *Acoust Sci Technol.* 38(5): 246–253.
- 20- Bahreinimotlagh M., Kawanisi K., and Zhu X. 2015. Acoustic investigation of tidal bores in Qiantang River. *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 71(4): 139-144.
- 21- Kawanisi K., Razaz M., Kaneko A., and Watanabe S. 2010. Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. *Journal Hydrol.* 380(1–2): 74–81.
- 22- Kawanisi K., Razaz M., Ishikawa K., Yano J., and Soltaniasl M. 2012. Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system. *Water Resour Res.* 48(5): 1–10.
- 23- Soltaniasl M., Kawanisi K., Yano J., and Ishikawa K. 2013. Variability in salt flux and water circulation in Ota River Estuary, Japan. *Water Sci Eng.* 6(3): 283–95.
- 24- Kawanisi K., Bahrainimotlagh M., Sawaf A., Basel M., and Razaz M. 2016. High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography. *Hydrological Processes* 30(13): 2247-2254.
- 25- Al Sawaf M.B., Kawanisi K., Kagami J., Bahreinimotlagh M., and Danial M.M. 2017. Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system. *Phys A Stat Mech its Appl.* 484: 11–20.
- 26- Danial M.M., Kawanisi K., Bahrainimotlagh M., Basel M., Sawaf A., and Wakabayashi T. 2017. Investigation of Flow Velocity and Salinity Behaviour in Ota River Estuary Using Acoustic Tomography Method and Numerical Modeling. *Journal Japan Soc Civ Eng Ser.* 73(4): 1–6.
- 27- Kawanisi K., Kaneko A., Nigo S., and Soltaniasl M. 2010. New acoustic system for continuous measurement of

- river discharge and water temperature. *Water Sci Eng.* 3(31): 47–55.
- 28- Kawanisi K., Razaz M., Yano J., and Ishikawa K. 2013. Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines. *Meas Sci Technol.* 24(5): 55303.
- 29- Bahreinimotlagh M., Kawanisi K., Danial M.M., Al Sawaf M.B., and Kagami J. 2016. Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. *Flow Meas Instrum.* 51: 30–39.
- 30- Wells J.C., Aota Y., Auger G., Kaneko A., and Goda N. 2016. Application of coastal acoustic tomography to Lake Biwa, Japan. *Journal Acoust Soc Am.* 140(4): 3183–3183.
- 31- Al Sawaf M.B., Kawanisi K., Kagami J., and Bahrainimotlagh M. 2017. Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system. *Physica A.* 484:11–20.
- 32- Kawanisi K., Basel M., and Sawaf A.L. 2017. A Novel Hydro-Acoustic System For Automatically, Permanently Collecting Real-Time River Flow Data. In: *Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia.* 5504–5511.
- 33- Li G., Ingram D., Kaneko A., Chen M., Gohda N., and Polydorides N. 2017. Vertical underwater acoustic tomography in an experimental basin. *Journal Acoust Soc Am.* 141(5): 3656–3656.
- 34- Li G., Ingram D., Kaneko A., Gohda N., and Polydorides N. 2016. The application of coastal acoustic tomography to a large experimental wave/current basin. *Journal Acoust Soc Am.* 140(4): 3183–3183.
- 35- Yamaguchi K., Lin J., Kaneko A., Yayamoto T., Gohda N., Nguyen H.Q. and Zheng H. 2005. A continuous mapping of tidal current structures in the kanmon strait. *Journal Oceanogr* 61(2): 283–294.
- 36- Park J.H. 2001. Study on the Analyses of the Coastal Acoustic Tomography Data. Hiroshima University.
- 37- Bahreinimotlagh M. 2017. Application of Acoustic Tomography System for Monitoring Streamflow and Suspended Sediment Concentration in a Mountainous River and Tidal Estuary. Hiroshima University.
- 38- Basel M., Sawaf A.L., and Kawanisi K. 2017. A Mountainous River Flow Fluctuation Analysis Using Shallow-Water Acoustic Tomography System. *Journal Japan Soc Civ Eng Ser.* 73(4): 19–24.
- 39- Alem H., and Mohammadi Z. 2014. Determining the Water Sources of Lakes: A Case Study of Lakes Haftbarm, Fars Prvince, Iran. *Int Bull Water Resour Dev.* 2(5): 206–277. (In Persian with English abstract)
- 40- Saadat H., and Mohammadi Z. 2016. Hydrogeological characterization of the Asmari limestone aquifer, Anar anticline, Zagros Region, Iran. *Carbonates and Evaporites.* 33: 29–41.

Investigation of Flow Condition in the Haftbarm Lake Using Acoustic Tomography Technology

M. Bahreinimotlagh^{1*} - R. Roozbahani² - M. Eftekhari³ - A. Kavousi⁴ - S. Abolhoseini⁵

Received: 22-05-2018

Accepted: 27-01-2019

Introduction: Flow velocity measurement is an important hydrological factor in dam reservoirs, lakes, river and coastal planning/management, control of water resources and environmental conservation. A wide variety of techniques such as Current Meter and tracking float methods have been used to measure flow velocity. However, it is very difficult to measure cross-sectional average velocity in unsteady flows or during extreme hydrological events, such as flooding. Therefore, establishing the method and technology for flow velocity measurement is a crucial issue. Acoustic tomography systems offer powerful technique for measuring the flow velocity in oceans, seas, rivers and lakes. Ocean Acoustic Tomography (OAT) employs high-powered signals with frequencies less than 1 kHz to measure meso scale ocean currents. Coastal Acoustic Tomography System (CATS) applies OAT to coastal waters. Because CATS transmits signals at frequencies up to 10 kHz, it can be used in smaller water areas. To use this technique in shallow aquatic environment and in the shorter ranges as much as hundred meters, these systems must transmit sound at much higher frequencies. As a result, Fluvial Acoustic Tomography System (FATS) uses a second-generation - CATS that transmits sound at a frequency of 30 kHz to measure flow velocity and water temperature. Although, FATS is widely used to measure flow features in rivers and estuaries, it has never been used in the lakes. This study shows the result of first acoustical tomography experiment in one of the freshwater Haftbarm Lakes, located western part of Shiraz.

Materials and Methods: This study shows the first acoustical tomography experiment in a lake to measure the flow velocity. Reciprocal sound transmissions were performed between the two acoustic stations located diagonally on both sides of the lake during the period of July 7, 2017. The air temperature ranged from 32 °C to 33 °C and there was not meaningful wind. Sound pulses of the FATS were simultaneously transmitted from transducers every 40 second at a timing synchronized with a GPS clock. The length of sound transmission line was 262 m and the central frequency was set to 30 kHz. The velocity data was successfully collected.

Results and Discussion: FATS uses travel-time tomography approach. Based on the arrival time of acoustic signals at the upstream and downstream stations, the sound speed and flow velocity along the sound ray path are computable. To accurately identify the arrival time of a traveling acoustic signal mixed with noise, the transmission signal was phase-modulated by applying a pseudo-random sequence called an M-sequence. The FATS transmission signal was modulated with a 9th-order M-sequence (511 digits). A three cycles per digit (Q-value) was also selected as a suitable value to transmit the phase-modulated sound from the broadband transducers. The arrival times of the acoustic data were 176.96 and 177 msec at station 1 and station 2, respectively. Therefore, the differential of -0.004 msec was observed. The minus value shows the existence of an insignificant flow to the station 1. The results of calculations showed the speed of sound in water was about 1481 m/s during the experiment period. The flow velocity was estimated as much as 1.5 cm/s. Since, the flow velocity resolution of FATS is 0.1 cm/s, the measured value was meaningful. However, other instruments such as mechanical current meter cannot measure the flow velocity under the 3 cm/s. Therefore, the results of acoustic tomography experiment did not compare with other methods. There are two possibilities for observing the flow in the lake: 1) the effect of wind on the Lake Surface or 2) alluvium aquifer recharge where is located under the lake.

Conclusions: Continuous measurements of the flow velocity were conducted in a shallow lake using Fluvial Acoustic Tomography System (FATS), a state-of-the-art acoustic system. The FATS was equipped with a couple of 30-kHz broadband transducers with horizontally omnidirectional and vertically hemispherical beam patterns which can be used to estimate the cross-sectional average velocity from multiple ray paths that cover the cross-section of a water body. This study shows the recharge of alluvium aquifer located under the lake. This outcome

1, 2, 3, 4 and 5- Research Professor Assistant and Researcher, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran, Respectively

(*- Corresponding Author Email: m.bahreini@wri.ac.ir)

is confirmed by the previous studies that investigated about the hydrogeological situation of the aquifer located under the lake. In conclusion, this study shows the possibility of determination of ground flow inflow/outflow (discharge/recharge) into or out of the lakes.

Keywords: Acoustic tomography technique, Flow velocity, Sound speed, Travel time method, Underwater remote sensing