

Technical Note

Acoustic Tomography Technology; a Useful Tool for Continuous Monitoring of Flow Velocity and Temperature

M. Bahreinimotlagh^{1*}, R. Roozbahani²,
A. Farokhnia², M. Soltanias³ and K. Mohtasham⁴

Abstract

Underwater Acoustic Tomography (AT) is a branch of remote sensing techniques which can continuously measure the flow velocity and temperature in rivers, seas and the oceans by transmitting acoustic waves into the water. The AT systems are synchronized with a GPS clock currently accurate to a few nanoseconds, which makes it possible to transmit the acoustic waves at the exact same time. The systems record the arrival time of acoustic waves and by analyzing the received signals, the flow characteristics would be estimated. In the present study, the performance of the AT system is investigated in a physical model; Kousar Channel in Malek-Ashtar University of Technology. Two Fluvial Acoustic Tomography Systems (FATS) were deployed on both sides of the channel. The horizontal distance between the two systems was 127m. The FATS transmitted simultaneous sound pulses every 60 seconds from the 30 kHz omnidirectional transducers. The results showed that the underwater sound speed and the water temperature were 1482 m/s and 20.3 °C, respectively. The temperature sensor measured the surface temperature in the various points of the channel and confirmed the validity of the FATS measurement. The estimated flow velocity was zero which due to the water stagnation in the channel, the accuracy of the velocity measurement by FATS was also completely confirmed.

Keywords: Remote Sensing, Underwater Acoustic Tomography, Underwater Sound Speed, Flow Temperature, Flow Velocity.

Received: December 7, 2017

Accepted: April 20, 2018

یادداشت فنی

فن آوری تکه‌نگاری صوتی، ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته سرعت و دمای جریان آب

مسعود بحرینی مطلق^{۱*}، رضا روزبهانی^۲، اشکان فرخ‌نیا^۲،
محمد سلطانی اصل^۳ و کمال محتشم^۴

چکیده

تکه‌نگاری صوتی شاخه‌ای از دانش سنجش از دور است که با ارسال امواج صوتی در درون آب، سرعت و دمای جریان آب را به صورت پیوسته در رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه‌های تکه‌نگاری صوتی با اتصال به ماهواره‌های GPS با دقت نانو ثانیه هم‌زمان‌سازی می‌گردند و در یک زمان واحد امواج صوتی را ارسال می‌کنند. با تجزیه و تحلیل زمان رسیدن امواج صوتی به دستگاه‌ها، خصوصیات جریان آب محاسبه می‌گردد. در این مقاله، نحوه‌ی عملکرد فن آوری تکه‌نگاری صوتی بررسی شده و کارایی آن در کانال آب کوثر دانشگاه صنعتی مالک اشتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور دو دستگاه تکه‌نگاری صوتی به فاصله‌ی ۱۲۷ متری از یکدیگر قرار داده شد و امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در فواصل زمانی ۶۰ ثانیه‌ای ارسال گردید. براساس تحلیل‌های انجام شده، سرعت صوت در آب ۱۴۸۲ متر بر ثانیه و دمای آب نیز ۲۰/۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. داده‌های سرعت صوت و دمای آب به دست آمده از روش تکه‌نگاری صوتی با استفاده از سنسور دما صحت‌سنجی شده و مورد تأیید قرار گرفت. همچنین سرعت جریان آب، صفر متر بر ثانیه توسط دستگاه برآورد شد که با توجه به ساکن بودن آب کانال، صحت اندازه‌گیری و عملکرد دستگاه کاملاً مورد تأیید واقع گردید.

کلمات کلیدی: سنجش از دور، تکه‌نگاری صوتی درون آب، سرعت صوت در آب، دمای جریان آب، سرعت جریان آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱/۳۱

1- Assistant Professor, Water Research Institute, Tehran, Iran. Email: m.bahreini@wri.ac.ir

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

3- PhD, Khorasan Razavi Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

4- SanjAb Fannavary Khalije FARS Company, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

۲- استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

۳- دکتری، گروه تحقیقات شرکت آبای خراسان رضوی، شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی، مشهد، ایران.

۴- شرکت سنج‌آب فناوری خلیج فارس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

دبی رودخانه به مدت ۱۲۷ روز شدند. نتایج این مطالعه نشان داد، با FATS امکان پایش زمان واقعی و درازمدت جریان در رودخانه‌ها با دقت بالا وجود دارد. اگرچه فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی بطور گسترده‌ای در سایر کشورها نظیر ژاپن، چین، کانادا (Razaz et al., 2016) و اسکاتلند (Li et al., 2017) مورد استفاده قرار گرفته است، اما براساس بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، تا کنون مطالعه‌ای در این زمینه در ایران انجام نشده است. با توجه به کاربردهای فراوان روش تکه‌نگاری صوتی در علوم مهندسی آب، پایه‌ریزی فن‌آوری فوق در کشور جهت رفع مشکلات تهیه اطلاعات پایه منابع آب دقیق و پیوسته ضروری است. مطالعه‌ی حاضر اولین مقاله در خصوص ارزیابی آزمایشگاهی دستگاه FATS در ایران است.

۲- روش تحقیق

دستگاه FATS از دو پردازنده تشکیل شده است. هر پردازنده توسط یک کابل به تراگذار^{۱۰} مدل Neptune T257 که امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز را ارسال و دریافت می‌کند، متصل می‌شود. تراگذارها نیز درون آب قرار می‌گیرند. شکل ۱ نحوه قرارگیری FATS را در دو طرف رودخانه نشان می‌دهد. با معلوم بودن فاصله‌ی دو ایستگاه از یکدیگر و ثبت زمان رسیدن موج‌های صوتی در ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست، سرعت صوت، دمای متوسط جریان و سرعت متوسط جریان آب اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری سرعت جریان توسط FATS، ± 0.1 سانتی‌متر بر ثانیه است و قادر به اندازه‌گیری سرعت‌های بسیار کم نیز است. این دستگاه توانایی اندازه‌گیری سرعت جریان از ۲۰- متر بر ثانیه تا ۲۰+ متر بر ثانیه را دارد. منفی بودن جریان نشان‌دهنده‌ی به کارگیری FATS در رودخانه‌های جزر و مدی است که سرعت مد به سمت بالادست رودخانه را به صورت منفی نمایش می‌دهد. دقت اندازه‌گیری دمای آب (T_r) با استفاده از روش تکه‌نگاری صوتی تابعی از سرعت صوت، دمای آب، بسامد صوت و فاصله‌ی بین دو ایستگاه است (Kawanisi et al., 2012):

$$T_r = \frac{c^2}{2\alpha f L} \quad (1)$$

که c سرعت صوت در آب، f بسامد امواج صوتی، L فاصله‌ی بین دو ایستگاه صوتی است و α به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، 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 محاسبه می‌گردند (Hong Zheng et al., 1997):

دسترسی به اطلاعات پایه منابع آب صحیح و دقیق یکی از ملزومات مدیریت موفق منابع آب است که امروزه این مهم با استفاده از فن‌آوری‌های نوین امکان‌پذیر شده است. تکه‌نگاری صوتی درون آب^۱ شاخه‌ای از دانش سنجش‌از دور و ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری سرعت دبی و دمای آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها است (Kawanisi et al., 2013). روش تکه‌نگاری صوتی درون آب در سه سطح اقیانوسی OATS^۲ (Zhao and Wang, 2015)، دریایی CATS^۳ (BahreiniMotlagh et al., 2015) و رودخانه‌ای FATS^۴ (BahreiniMotlagh et al., 2016) مورد استفاده قرار می‌گیرد و اساس آن بر ارسال امواج صوتی در درون آب و تحلیل سرعت صوت در آب برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان آب استوار است. هم‌اکنون محققان دانشگاه هیروشیما ژاپن انحصار طراحی و ساخت دستگاه‌های FATS و CATS را در اختیار دارند.

مطالعات زیادی برای ارزیابی و صحت‌سنجی روش تکه‌نگاری صوتی انجام شده است. (Kawanisi et al., 2015) با استفاده از FATS شارش انرژی جریان آب بین دو جزیره در ژاپن را برای امکان‌یابی استفاده از توربین‌های جزر و مدی اندازه گرفتند. نتایج نشان داد که چگالی شارش انرژی جریان آب و شارش انرژی جریان آب به ترتیب 0.5 kWm^{-2} و 40 MW است. ایشان نتیجه گرفتند که FATS بدون مزاحمت برای امور کشتی‌رانی و صنعت آبی‌پروری قادر است خصوصیات جریان آب را برای به‌کارگیری در مطالعات استفاده از توربین‌های جزر و مدی اندازه‌گیری کند. BahreiniMotlagh et al. (2015) سرعت و دبی جریان را در رودخانه‌ی کیانتانگ^۵ واقع در چین (یکی از بزرگ‌ترین رودخانه‌های جزر و مدی دنیا) با استفاده از CATS اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که سرعت مد در بازه‌ی مورد مطالعه $1/5$ - متر بر ثانیه است و دبی عبوری بیش از ۱۰۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه است. نتایج بدست آمده در این مطالعه با داده‌های اندازه‌گیری شده با ADCP^۶ مقایسه شده و نشان داده شد که CATS جهت پایش پیوسته‌ی جریان در رودخانه‌های بزرگ روشی مناسب‌تر است. BahreiniMotlagh et al. (2016) دبی جریان رودخانه‌ی گونو^۷ ژاپن را با استفاده از FATS اندازه گرفته و با روش دبی-اشل مقایسه نمودند. نتایج مقایسه‌ها نشان داد که FATS برای پایش پیوسته و دائمی جریان در روخانه‌ها بدلیل عدم نیاز به کاربر و توانایی اندازه‌گیری جریان به صورت پیوسته و درازمدت، نسبت به سایر روش‌ها کارآمدتر است. در آخرین مطالعه، Kawanisi et al. (2018) با خودکارسازی^۸ دستگاه FATS موفق به پایش پیوسته و زمان واقعی^۹ سرعت، دما و

که بازه‌ی پارامترهای اشاره شده در این معادله بایستی به صورت زیر باشند:

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

با توجه به معادله (۳)، تأثیر عمق (D) بر سرعت صوت ناچیز است و قابل صرف نظر کردن کرد. در آب‌های شیرین نظیر رودخانه‌ها و مخازن سدها که شوری صفر است، سرعت صوت در آب تنها تابعی از دمای آب است. لذا با اندازه‌گیری سرعت صوت در آب، می‌توان دمای آب را محاسبه کرد.

$$\left\{ c_m = \frac{L}{t_m}, u_m = \frac{c_m^2 \Delta t}{2L} \right. \quad (2)$$

در معادله ۲، L فاصله افقی بین دو ایستگاه صوتی، $t_m = \frac{t_{Up} + t_{Down}}{2}$ زمان رسیدن موج صوتی به ایستگاه بالادست، t_{Down} زمان رسیدن موج صوتی به ایستگاه پایین‌دست، c_m سرعت متوسط صوت در آب و u_m سرعت متوسط جریان آب می‌باشند.

از طرفی سرعت صوت (c) در آب تابعی از دما (T)، شوری (S) و عمق (D) است که به صورت زیر بیان می‌شود (Medwin, 1975):

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

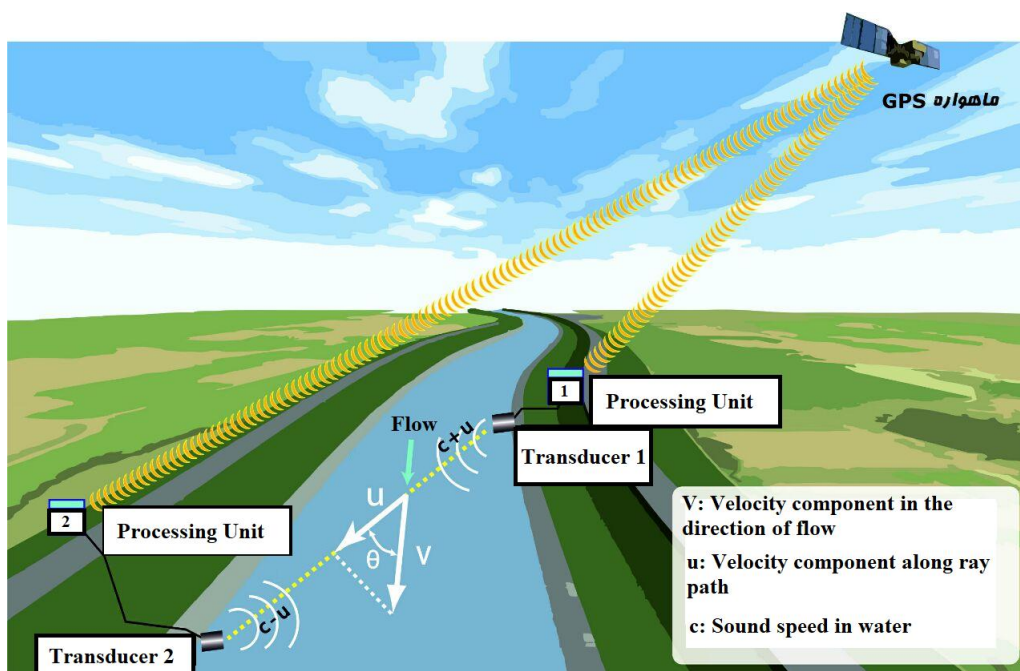


Fig. 1- Transducer and Unit Processing and FATS deployment in river

شکل ۱- نحوه‌ی قرارگیری ترانسدوسرها و پردازنده‌ها در رودخانه



Fig. 2- Kousar Channel where the FATS evaluation was conducted

شکل ۲- کانال کوثر و محل ارزیابی FATS

۳- نتایج و تحلیل نتایج

بین دو ایستگاه ۱۲۷ متر بود، بنابراین دقت اندازه‌گیری دمای آب با استفاده از این روش، ۰/۰۹ درجه سانتی‌گراد است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سرعت جریان آب، طی دوره‌ی اندازه‌گیری با استفاده از FATS، مقدار صفر بود. با توجه به ساکن بودن آب کانال صحت اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از FATS نیز تأیید گردید.

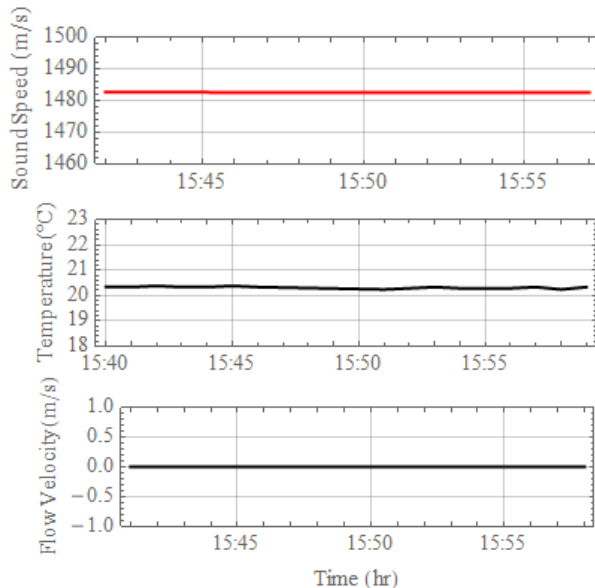


Fig. 3- Sound Speed, Water Temperature and Flow velocity, respectively

شکل ۳- به ترتیب سرعت صوت در آب، دما و سرعت جریان آب

۴- خلاصه و جمع بندی

در این مطالعه، فن آوری تکه‌نگاری صوتی تشریح شده و معادلات حاکم و نحوه عملکرد این روش ارائه گردید. مزیت این روش نسبت به استفاده از سنسور دما و مولینه جهت اندازه‌گیری سرعت جریان آب را می‌توان قابلیت پایش پیوسته، درازمدت و لحظه‌ای دما و سرعت جریان آب و عدم نیاز به کاربر ذکر کرد. مطالعات گذشته نیز روش تکه‌نگاری صوتی را به عنوان روشی مفیدتر نسبت به سایر روش‌ها مثل استفاده از سنسور دما، مولینه و روش دی-اشل معرفی کرده‌اند (Kawanisi et al., 2013; BahreiniMotlagh et al., 2015; Bahreinimotlagh et al., 2016). از طرفی سنسور دما و مولینه، دما و سرعت جریان آب را به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کنند، درحالی‌که با استفاده از FATS می‌توان دما و سرعت جریان متوسط یک مقطع از محیط آبی را اندازه‌گیری نمود. تست اندازه‌گیری سرعت جریان آب با استفاده از FATS نیز بایستی ابتدا در محیط آزمایشگاهی با وجود آب ساکن انجام شود که نتایج این آزمایش قابل تأیید بود. در

ارزیابی FATS در آزمایشگاه کانال آب کوثر دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تاریخ ۱۳۹۶/۰۴/۱۴ از ساعت ۱۵:۴۰ تا ۱۶:۰۰ انجام گردید (شکل ۲). طول کانال ۱۵۰ متر و عرض و عمق آن نیز به ترتیب ۷ و ۵/۳ متر می‌باشد. ترانسدوسرها به فاصله‌ی ۱۲۷ متری از یکدیگر درون کانال قرار گرفتند. در طی آزمایش، دمای سطحی آب با استفاده از سنسور دما در نقاط مختلف کانال اندازه‌گیری گردید که بین ۲۰/۸ تا ۲۱/۱ درجه‌سانتی‌گراد متغیر بود. به دلیل ساکن بودن آب کانال و مسقف بودن سالن آزمایش، توزیع دمای سطحی آب در طول کانال تقریباً یکنواخت و ثابت بود. بسامد موج صوتی ارسالی ۳۰ کیلوهرتز بود و در هر دقیقه یک موج صوتی از هر دو ایستگاه به طور همزمان به سمت یکدیگر ارسال گردیدند.

سرعت صوت در هوا تابعی از دمای هوا است، در حالی که سرعت صوت در آب تابعی از دما، شوری و عمق آب است. عمق آب تأثیر بسیار ناچیزی بر سرعت صوت داشته و قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین می‌توان سرعت صوت را تابعی از دما و شوری آب فرض کرد (Kawanisi et al., 2012). همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود سرعت صوت در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه تقریباً ثابت و حدود ۱۴۸۲ متر بر ثانیه محاسبه گردید. از آنجایی که در کانال مورد آزمایش شوری آب صفر است، بنابراین سرعت صوت رابطه مستقیمی با دمای آب دارد و با اندازه‌گیری سرعت صوت توسط FATS دمای آب نیز محاسبه می‌گردد. از این رو دمای آب محاسبه شده با FATS حدود ۲۰/۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (شکل ۳). با اندازه‌گیری دمای آب با سنسور دما می‌توان داده‌های دما و سرعت صوت برآورد شده توسط FATS را صحت‌سنجی کرد. سنسور دما، دمای سطحی آب را در نقاط مختلف کانال اندازه‌گیری نمود که بین ۲۰/۸ تا ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و میانگین دمای اندازه‌گیری شده در طول کانال ۲۱ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. تفاوت ۰/۸ درجه‌ای سنسورهای دما و FATS به دو دلیل می‌باشد: ۱) سنسورها، دمای آب سطح کانال را اندازه‌گیری کردند. درحالی‌که امواج صوتی FATS به صورت سینوسی به کف کانال و سطح آب برخورد کرده و بنابراین دمای اندازه‌گیری شده با FATS دمای متوسط کل عمق آب در بازه‌ی ۱۲۷ متری ارسال امواج صوتی است و نه سطح آب. ۲) سنسور دما، دما را به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کند در صورتی که FATS دمای آب را به صورت متوسط در راستای ارسال امواج صوتی در طول کانال اندازه‌گیری می‌کند. در این مطالعه دمای آب حدود ۲۰/۳ درجه سانتی‌گراد و سرعت صوت ۱۴۸۲ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد، بسامد ۳۰ کیلوهرتز و فاصله‌ی

Kawanisi K, Bahreinimotlagh M and Razaz M (2015) Energy flux measurement of tidal stream in a strait using two crossing ultrasonic transmission lines. In: 36th World Congress of the International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR-APD 2015), 28 June- 3 July, The Hague, The Netherlands, 1-4

Kawanisi K, Al Sawaf MB and Danial MM (2018) Automated real-time streamflow acquisition in a mountainous river using acoustic tomography. *Journal of Hydrologic Engineering* 23(2):1-7

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 Resources Research* 48(5):1-10

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. *Measurement Science and Technology* 24(5):1-10

Li G, Ingram D, Kaneko A, Chen M, Gohda N and Polydorides N (2017) Vertical underwater acoustic tomography in an experimental basin. *The Journal of the Acoustical Society of America* 141(5):1-8

Medwin H (1975) Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*. *Acoustical Society of America* 58(6):1318-1324

Razaz M, Zedel L, Hay A and Kawanisi K (2016) Multipath propagation of sound in a shallow tidal channel and its implications on tomographic current measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(4):3184-3184

Zhao X and Wang D (2015) Ocean acoustic tomography from different receiver geometries using the adjoint method. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138(6):3733-3741

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 of Oceanography* 53:117-127

مطالعه‌ی آینده دما، سرعت و دبی یکی از رودخانه‌های کشور با استفاده از FATS اندازه‌گیری خواهد شد و با روش دبی-اشل مقایسه خواهد گردید. از مهم‌ترین محدودیت‌های FATS گران بودن تولید آن و عدم کارایی در رودخانه‌هایی با عرض کمتر از ۵۰ متر و عمق آب کمتر از ۲۵ سانتی‌متر است.

۵- تشکر

بدینوسیله از آقایان Professors Arata Kaneko, Kiyosi Kawanisi and Noriaki Gohda اساتید دانشگاه هیروشیما که در انتقال فناوری تکه‌نگاری صوتی به ایران کمک‌های شایانی نمودند و همچنین از آقای دکتر حسین شاهمیرزایی استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر که امکانات آزمایشگاهی را برای ارزیابی دستگاه ساخته شده در کشور مهیا نمود، تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Underwater Acoustic Tomography
- 2- Ocean Acoustic Tomography System
- 3- Coastal Acoustic Tomography System
- 4- Fluvial Acoustic Tomography System
- 5- Qiantang River
- 6- Acoustic Doppler Current Profiler
- 7- Gono River
- 8- Automation
- 9- Real-Time Measurement
- 10- Transducer

۶- مراجع

Bahreinimotlagh M, Kawanisi K, Danial MM, Al Sawaf MB and Kagami J (2016) Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. *Flow Measurement and Instrumentation* 51:30-39

BahreiniMotlagh M, Kawanisi K and Zhu X (2015) Acoustic investigations of tidal bores. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 71(4):139-144