

The First Fluvial Acoustic Tomography System Experience for River Flow Velocity Monitoring in Iran

MASOUD BAHREINIMOTLAGH¹, ABBAS KAZEMI KHOSHUEI², REZA ROOZBAHANI³, MORTAZA EFTEKHARI⁴,
HAMID KARDAN MOGHADAM⁵

1. Assistant Professor, Water Resources Research Department, Water Research Institute, Tehran, Iran,
 2. The Dean of Surface Water Group, Office of Water Resources Assessment, Regional Water Organization, Isfahan, Iran.
 3. The Dean of Water Resources Research Department, Water Research Institute, Tehran, Iran
 4. The Dean of Water Research Institute, Tehran, Iran
 5. Scientific staff of Water Resources Research Department, Water Research Institute, Tehran, Iran
- (Received: Feb. 2, 2019- Revised: Feb. 25, 2019- Accepted: Apr. 22, 2019)

ABSTRACT

The acquisition of continuous and precise river flow velocity is a high-priority issue for water resources management. In Iran, the river flow velocity is estimated using mechanical propeller flow meter. In this research, for the first time in Iran, the river flow velocity at the Chamtagh hydrometric station of the Zayanderud River was measured using Fluvial Acoustic Tomography System (FATS) technology. The reciprocal sound transmissions were performed between a pair of acoustic stations, located on both sides of the hydrometric station. Acoustic frequency was 30 kHz and the sound pulses were transmitted every 30 seconds. The measured stream flow discharge was 9.9 m³/s, while, the estimated flow rate by propeller flow meter was 10.3 m³/s. In this experiment, the maximum uncertainty of FATS was less than 15%. Moreover, the error analysis of the FATS was investigated for different rivers and the optimal setting of FATS was introduced.

Keywords: Hydrometric station, Continuous monitoring of river flow velocity, Fluvial Acoustic Tomography System

اولین تجربه سامانه تیکه‌نگاری صوتی برای پایش سرعت جریان رودخانه در ایران

مسعود بحرینی‌مطلق^{۱*}، عباس کاظمی خوشویی^۲، رضا روزبهانی^۳، مرتضی افتخاری^۴، حمید کاردان مقدم^۵

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

۲. رئیس گروه آب سطحی دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران

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

۴. رئیس موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

۵. کارشناس پژوهشی پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۲)

چکیده

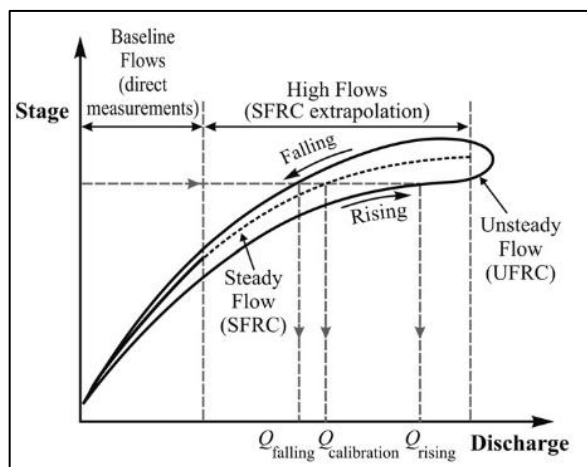
پایش پیوسته و دقیق سرعت جریان در رودخانه‌ها یکی از چالش‌های مهم مدیریت منابع آب است. در ایران سرعت جریان در رودخانه با استفاده از مولینه تخمین زده می‌شود. در این پژوهش برای اولین بار در ایران، سرعت جریان در رودخانه زاینده‌رود در محل ایستگاه چم‌طاق با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی مورد سنجش قرار گرفت. بدین منظور از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی استفاده گردید و سیگنال‌های صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۳۰ ثانیه ارسال گردید. بر این اساس دبی اندازه‌گیری شده مقدار ۹/۹ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. در همان شرایط میزان آبدهی رودخانه با استفاده از نمودار دبی-اشل موجود به میزان ۱۰/۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. با تحلیل خطای اندازه‌گیری روش تیکه‌نگاری صوتی، حداکثر عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از این فناوری ۱۵ درصد محاسبه شد. همچنین تحلیل خطای دستگاه تیکه‌نگاری صوتی برای رودخانه‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و بهترین نحوه تنظیم نصب دستگاه به منظور حداقل رساندن میزان عدم قطعیت توصیه گردید.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه آب‌سنجی، مولینه، پایش پیوسته سرعت جریان آب، فناوری تیکه‌نگاری صوتی.

مقدمه

(Muste *et al.*, 2011). بنابراین نه تنها اندازه‌گیری سرعت جریان با

استفاده از مولینه و محاسبه دبی با استفاده از روش‌های سنتی نظیر نمودار دبی-اشل طاقت‌فرسا و زمان‌بر است، بلکه این روش در زمان جریان‌های غیر دائمی دارای خطای بالایی است. (Alsawaf and Kawanisi, 2017)



شکل ۱. رابطه دبی-اشل با فرض جریان دائمی (نقطه‌چین) و شرایط واقعی جریان غیردائمی (خط) (Muste *et al.*, 2011).

داده پیوسته دبی جریان در رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین داده‌های پایه منابع آب به‌منظور مدیریت منابع آب، ارزیابی محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی است. از این رو، کشورهای توسعه‌یافته در حال ارتقاء فناوری‌های نوین به‌منظور پایش پیوسته و بهنگام منابع آب سطحی هستند (Kawanisi *et al.*, 2010). این در حالیست که در ایران دبی رودخانه‌ها توسط نمودار دبی‌اشل اندازه‌گیری می‌شود. در این روش معمولاً سرعت جریان آب با استفاده از سرعت‌سنج‌های مکانیکی به صورت ماهانه و یا دو بار در ماه اندازه‌گیری می‌شود و سپس با استفاده از یک رابطه یک‌به‌یک با ارتفاع آب، دبی جریان تخمین زده می‌شود. این روش با فرض وجود جریان دائمی در رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در طبیعت جریان رودخانه‌ها به صورت غیردائمی است و به‌خصوص در زمان گذر موج یا مواقع سیلابی تغییرات دبی نسبت به ارتفاع آب به صورت یک‌به‌یک نخواهد بود و تخمین دبی رودخانه با استفاده از نمودار دبی-اشل دارای خطای زیادی خواهد بود

موج تخلیه‌ی سد رسید. Bahreini Motlagh *et al.* (2016) سرعت جریان‌های جزر و مدی را در رودخانه کیانتانگ چین با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد در زمان مد، جریان با بیش از ۱۰۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به سمت بالادست رودخانه عبور می‌کند. Bahreini Motlagh *et al.* (2016) دبی جریان رودخانه‌ی گونو ژاپن را با استفاده از FATS اندازه‌گیری کردند و با داده‌های دستگاه ADCP و نمودار دبی-اشل مقایسه کردند. نتایج نشان داد که FATS نسبت به سایر روش‌ها کارآمدتر است. (Al Sawaf *et al.* (2017) با استفاده از FATS تغییرات دبی جریان را در رودخانه‌ی گونو ژاپن به مدت ۶ ماه و در هر ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری کردند تا نوسانات جریان را با استفاده از روش DFA^۵، بررسی نمایند. نتایج نشان داد که FATS قابلیت پایش جریان در بسامدهای بالا را دارا است.

در این تحقیق دبی جریان در ایستگاه آب‌سنجی چم‌طاق واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از دستگاه FATS به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری گردید و با نمودار دبی-اشل مقایسه شده است. این مطالعه به عنوان معرفی روشی نوین برای استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی به منظور پایش منابع آب سطحی است که با توجه به دقت آن می‌تواند در سراسر کشور بکار گرفته شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محل انجام آزمایش تیکه‌نگاری صوتی، ایستگاه آب‌سنجی چم‌طاق است. ایستگاه چم‌طاق بر روی رودخانه زاینده‌رود و در محل روستایی به همین نام در بهار سال ۱۳۹۵ ساخته شد. این روستا در استان اصفهان و در نزدیکی مرز سیاسی این استان و استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. رودخانه زاینده‌رود در مسیر خود در پایین‌دست سد زاینده‌رود از استان اصفهان وارد استان هم‌جوار (چهارمحال و بختیاری) شده و مجدداً در کمی بالاتر از روستای مذکور مجدداً وارد استان اصفهان می‌شود. با توجه به اینکه میزان رهاسازی آب از سد به گونه‌ای است که در بازه عبوری از چهارمحال و بختیاری می‌بایست فقط معادل تخصیص و حقابه‌های تعیین شده آب برداشت شود و به علت شرایط بحرانی چند سال اخیر ضرورت پایش دقیق‌تر آب دقیقاً در ورودی و خروجی رودخانه به استان چهارمحال و بختیاری بوجود آمده است. لذا ایستگاه چم‌طاق بدین منظور در سال ۱۳۹۵ احداث و از همان سال یعنی سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ وارد شبکه سنجش آب‌های سطحی کشور شده است (شکل ۲).

تحقیقات زیادی برای محاسبه خطای سرعت‌سنج‌های مکانیکی و تخمین دبی رودخانه با استفاده از روش دبی-اشل انجام شده است (Birgand *et al.*, 2013; Zeroual *et al.*, 2016; Sikorska and Renard, 2017; Ibeje, 2018; Herschy, 2002 and WMO, 2010). به‌عنوان مثال Westerberg *et al.* (2011) عدم قطعیت نمودار دبی-اشل در ایستگاه آب‌سنجی پاسولاسیبا رودخانه چولوتیکا کشور هندوراس را بین ۴۳- تا ۷۳ درصد محاسبه کردند. (Kiang *et al.* (2018) هفت روش مختلف تخمین عدم قطعیت دبی-اشل را در رودخانه‌های مختلف اروپا با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج ایشان نشان داد که عدم قطعیت نمودار دبی-اشل در رودخانه Isère River واقع در فرانسه بین ۳ تا ۱۷ درصد برای جریان‌های متوسط (نرمال) است. همچنین عدم قطعیت در رودخانه Mahurangi River واقع در نیوزلند برای جریان‌های بزرگ‌تر از نرمال از ۴۱ تا ۲۰۰ درصد متغیر است. عدم قطعیت نمودار دبی اشل در رودخانه Taf River واقع در کشور انگلستان نیز برای جریان‌های زیر نرمال بین ۲۸ تا ۱۰۱ درصد متغیر است. (Horner *et al.* (2018) با بررسی ۶ ایستگاه آب‌سنجی فرانسه نتیجه گرفتند تنها اثر خطای سیستماتیک اشل باعث عدم قطعیت ۴ تا ۱۲ درصدی تخمین دبی متوسط روزانه می‌شود.

به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری جریان رودخانه‌ها دو نوع فناوری صوتی با نام‌های ADCP^۱ و تیکه‌نگاری صوتی (FATS^۲) توسعه داده شده است. روش‌های فوق به‌ترتیب با استفاده از روابط داپلر^۳ و زمان‌طی شده^۴ سرعت جریان آب را اندازه‌گیری می‌کنند. از آنجایی که معمولاً ADCP ها به صورت متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرند، قابلیت پایش پیوسته جریان را ندارند (Simpson, 2014; Chauhan *et al.*, 2001). اما دستگاه تیکه‌نگاری صوتی به صورت ثابت در رودخانه قرار می‌گیرد و سرعت جریان را به صورت پیوسته و با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. فناوری تیکه‌نگاری صوتی در رودخانه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و با سایر روش‌ها مقایسه شده است (Soltaniasl *et al.*, 2013; Basel, 2015 and Razaz *et al.*, 2017).

Kawanisi *et al.* (2010) دبی رودخانه هیاکن ژاپن را با استفاده از FATS به مدت ۱۵ روز و به صورت پیوسته اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که FATS ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته جریان در رودخانه است. (Kawanisi *et al.* (2013) تغییرات دبی جریان حاصل از تخلیه‌ی یک سد را با استفاده از FATS اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که دبی جریان از ۵۰ مترمکعب بر ثانیه در حالت نرمال به ۱۸۰ مترمکعب در زمان گذر

4- Travel-Time

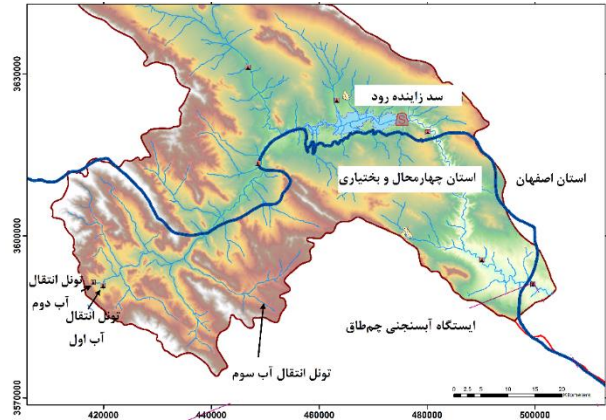
5- Detrended Fluctuation Analysis

1- Acoustic Doppler Current Profiler

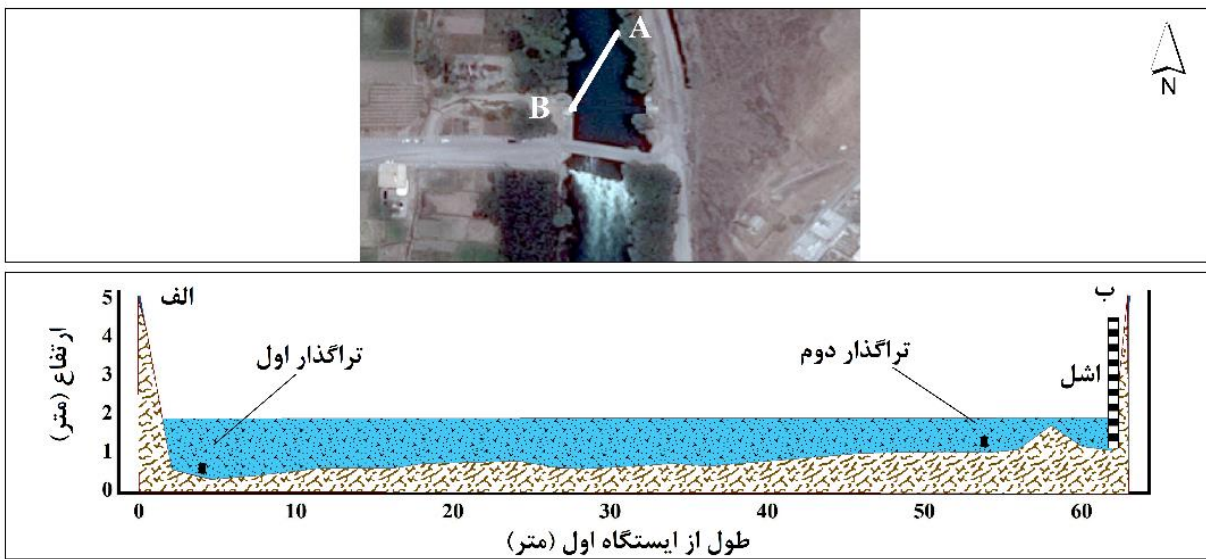
2- Fluvial Acoustic Tomography System

3- Doppler

شکل ۲. منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه آبسنجی چمطاق



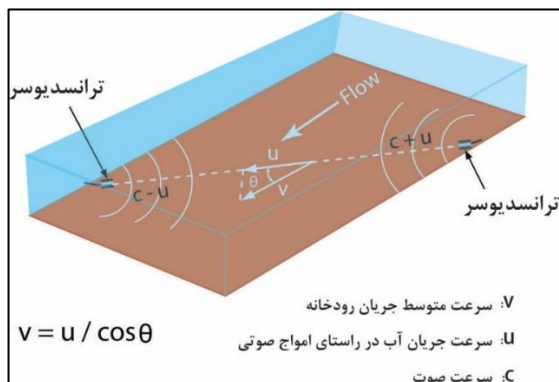
دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی (FATS) به صورت مورب در دو طرف رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه چمطاق نصب گردید. ایستگاه اول در بالادست رودخانه (A) و ایستگاه دوم در کنار اشل ایستگاه آب‌سنجی (B) به فاصله ۵۱ متر نصب گردید (شکل ۳). هر دو دستگاه با استفاده از ماهواره‌های جی‌پی‌اس هم‌زمان‌سازی شده و امواج صوتی را با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۳۰ ثانیه ارسال کردند.



شکل ۳. ایستگاه صوتی اول (A) و دوم (B)، نقشه بستر رودخانه بین دو ایستگاه صوتی (AB) و محل قرارگیری اشل ایستگاه آب‌سنجی.

$$t_{Up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$t_{Down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad \text{(رابطه ۲)}$$



شکل ۴. سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی u ، سرعت در جهت جریان آب v و زاویه‌ی بین امواج صوتی و جهت جریان آب θ (Kawanisi et al., 2010)

و با حل دو معادله‌ی فوق سرعت متوسط جریان آب در راستای امواج صوتی (U_m) و سرعت صوت (C_m) محاسبه می‌گردد:

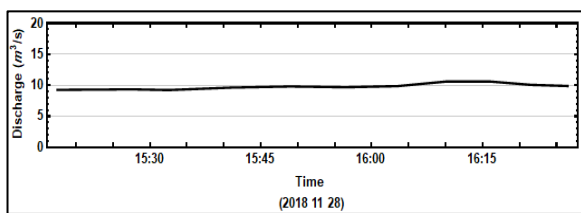
روابط موجود در تیکه‌نگاری صوتی

نحوه کار دستگاه FATS و روابط موجود روش تیکه‌نگاری صوتی در مطالعات پیشین تشریح شده است (Bahreini Motlagh et al., 2018 and Bahreini Motlagh et al., 2019). به طور خلاصه دو دستگاه صوتی FATS به صورت مورب در دو طرف رودخانه قرار می‌گیرد و امواج صوتی را در زمان واحد به سمت یکدیگر ارسال می‌کنند. هر دستگاه زمان رسیدن امواج صوتی از طرف مقابل را ثبت می‌کند. زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه پایین دست (در جهت جریان آب) عبارت است از فاصله بین دو ایستگاه تقسیم بر مجموع سرعت صوت و سرعت جریان آب در آن مقطع، و زمان رسیدن امواج صوت در ایستگاه بالادست (خلاف جهت جریان آب) عبارت است از فاصله دو ایستگاه تقسیم بر تفاضل سرعت صوت و سرعت جریان آب. بنابراین همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، زمان طی شده برای ایستگاه بالادست و پایین دست به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد (Zheng et al., 1997):

داده‌های صوتی در هر ۳۰ ثانیه ارسال می‌شوند و میانگین متحرک ۴۰ داده صوتی برابر با ۲۰ دقیقه می‌شود. بنابراین در این آزمایش دقت تفکیک زمانی دستگاه FATS ۲۰ دقیقه می‌باشد.

نتایج و بحث

دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه آب‌سنجی چم‌طاق با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود FATS قابلیت پایش پیوسته دبی رودخانه را دارد. دبی رودخانه در بازه زمانی آزمایش به‌طور متوسط ۹/۸۹ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. همان‌طور که ذکر شد عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی از چهار جزء خطا تشکیل می‌شود. اگر ارتفاع سطح آب با دقت ۰/۰۱ متر اندازه‌گیری شود و توپوگرافی بستر نیز با دقت ۰/۰۵ متر نقشه‌برداری شود خطاهای اجزاء اول و دوم به ترتیب برابر با $0.02 = \left| \frac{\delta Q_{hm}}{Q} \right|$ و $0.002 = \left| \frac{\delta Q_{AB}}{Q} \right|$ خواهد بود. در این آزمایش خطای مربوط به اندازه‌گیری سرعت جریان که وابسته به دقت دستگاه FATS است $0.03 = \left| \frac{\delta Q_{um}}{Q} \right|$ برآورد شد (Razaz et al., 2013). از آنجایی که در این آزمایش زاویه $\theta = 11^\circ$ بود، برای خطای اندازه‌گیری یک‌درجه‌ای زاویه $|\delta\theta| = 1^\circ$ خطایی برابر با $0.09 = \left| \frac{\delta Q_{\theta}}{Q} \right|$ حاصل خواهد شد. بنابراین مجموع چهار جزء خطا در این آزمایش ۱۵ درصد است که با مطالعه کاوانیشی و همکاران (Kawanisi et al., 2016)، ۲۰۱۶ مطابقت دارد. آبدی حاصل از نمودار دبی-اشل نیز در بازه زمانی مورد مطالعه ۱۰/۳ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده شد.



شکل ۵. دبی اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه FATS

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این آزمایش بیشترین جزء خطا مربوط به زاویه θ است. به‌منظور کاهش خطای حاصل از زاویه θ ، Kawanisi et al. (2012) زاویه ۴۵ درجه بین جهت جریان و خط ارسال امواج صوتی را پیشنهاد دادند که در این صورت جزء خطای زاویه به $0.03 = \left| \frac{\delta Q_{\theta}}{Q} \right|$ کاهش خواهد یافت. اما باید توجه داشت که اگرچه زاویه ۴۵ درجه باعث کاهش جزء خطای زاویه θ می‌گردد، اما جزء خطای اندازه‌گیری سرعت جریان

$$\begin{cases} c_m = \frac{L}{t_m} \\ u_m = \frac{c_m^2}{2L} \Delta t \end{cases} \quad (\text{رابطه ۳})$$

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

در نتیجه با اندازه‌گیری سرعت متوسط در راستای امواج صوتی (U_m)، سرعت متوسط جریان رودخانه (V_m) به دست می‌آید:

$$v_m = \frac{u_m}{\cos \theta} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در نهایت با استفاده از رابطه پیوستگی دبی جریان برابر است با حاصل ضرب سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی رودخانه که از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Q = A(H)v_m \sin \theta \quad (\text{رابطه ۵})$$

که A مساحت مقطع عرضی و تابعی از ارتفاع آب (H) است.

تحلیل خطا

همان‌طور که در معادله (۵) مشاهده شد دبی محاسبه شده با استفاده از FATS از چهار جزء تشکیل شده است که خطای هر یک باعث عدم قطعیت در اندازه‌گیری دبی می‌شود. اولین جزء اثر ارتفاع آب در مقطع مورد نظر است و بدیهی است که در رودخانه‌های عمیق این جزء از خطا کاهش می‌یابد و در رودخانه‌های کم‌عمق این جزء خطای بزرگ‌تری خواهد داشت (Kawanisi et al., 2017). جزء دوم خطای ناشی از بستر مقطع عرضی^۱ (AB) است که با نقشه‌برداری دقیق بستر رودخانه بین دو ایستگاه صوتی این خطا نیز ناچیز خواهد بود. جزء سوم و چهارم به ترتیب خطای ناشی از اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از FATS و تأثیر زاویه بین جریان آب و راستای امواج صوتی است.

(رابطه ۶)

$$\frac{\delta Q}{Q} = \left\{ \frac{\delta h_m/h_m}{1-AB/Lh_m} + \frac{\delta AB/AB}{1-Lh_m/AB} \right\} + \left\{ \frac{\delta u}{u} + \frac{\delta \theta}{\cos \theta \sin \theta} \right\}$$

که AB نقشه بستر مقطع عرضی بین دو ایستگاه صوتی است.

جزء خطای اندازه‌گیری سرعت جریان آب ($\frac{\delta u}{u}$) در حقیقت قدرت تفکیک^۲ دستگاه FATS برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب است و از رابطه (۷) به دست می‌آید (Kawanisi et al., 2012):

$$u_r = \frac{c^2}{2L} \frac{2}{2f} \frac{1}{\sqrt{40}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

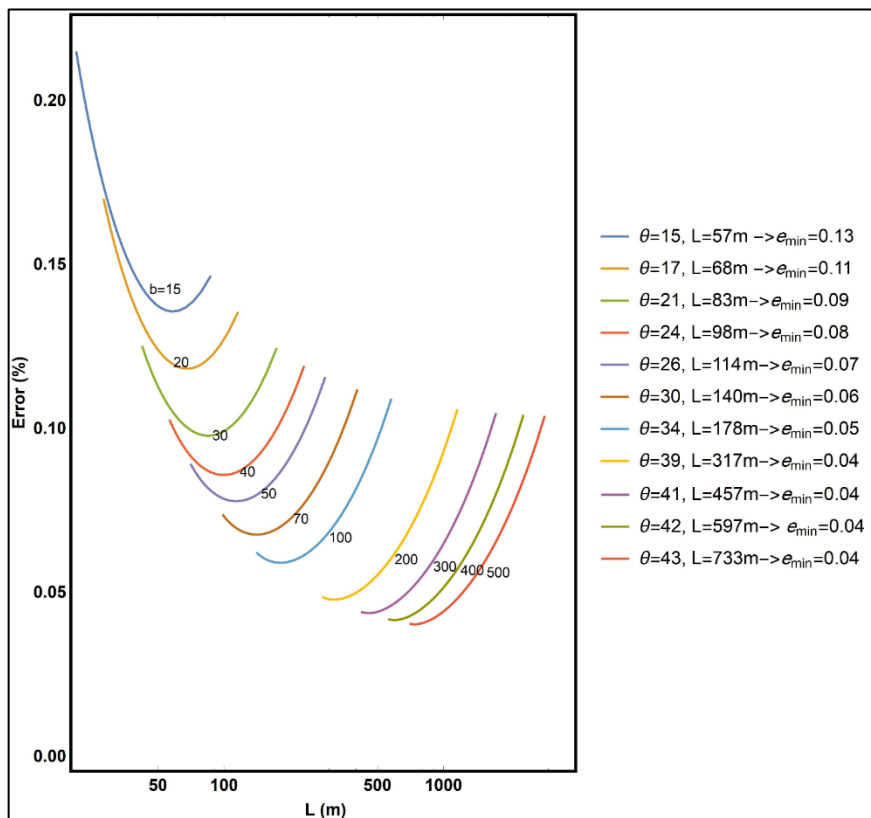
که c سرعت صوت در آب، L فاصله بین دو ایستگاه صوتی، f بسامد امواج صوتی که در این آزمایش ۳۰ کیلوهرتز بود و عدد ۴۰ میانگین متحرک تعداد داده‌های صوتی است، بدین صورت که

امکان قرار دادن ایستگاه‌های صوتی در زاویه ۲۱ درجه وجود نداشت و به ناچار زاویه ۱۱ درجه انتخاب گردید. با توجه به شکل (۶)، تنظیم زاویه ۴۵ درجه نیز برای رودخانه‌های عریض با عرض بیش از ۲۰۰ متر مناسب خواهد بود.

بنابراین به‌طور کلی در بدترین حالت مجموع خطای جزءهای سوم و چهارم برای رودخانه‌های با عرض ۱۵ متر، ۰/۱۳ خواهد بود و در بهترین حالت برای رودخانه‌هایی با عرض بیشتر از ۲۰۰ متر، ۰/۰۴ خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود مجموع خطاهای جزءهای سوم و چهارم که وابسته به خصوصیات دستگاه FATS است همواره بیشتر از ۰/۰۴ خواهد بود. این مقدار خطا نسبت به خطای سایر دستگاه‌های صوتی مشابه نظیر انواع مختلف ADCP^۱ های متحرک کمتر است (Lee ; Huang, 2015 ; et al., 2014 ; Huang, 2011).

افزایش می‌یابد. زیرا همان‌طور که در رابطه (۶) مشاهده می‌شود اندازه‌گیری سرعت جریان آب به فاصله بین دو ایستگاه صوتی بستگی دارد، بنابراین با افزایش زاویه θ ، فاصله بین دو ایستگاه صوتی کاهش یافته و خطای جزء سرعت افزایش می‌یابد.

در این پژوهش مقادیر بهینه زاویه و فاصله دو ایستگاه صوتی برای رودخانه‌ها با عرض‌های مختلف محاسبه شد و بهترین θ و L به منظور کمینه کردن خطای مجموع جزء سوم و چهارم $(\frac{\delta u}{u} + \frac{\delta \theta}{\cos \theta \sin \theta})$ پیشنهاد گردید. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود برای رودخانه‌هایی با عرض (b) ۱۵ متر، بهترین θ و L به ترتیب ۱۵ درجه و ۵۷ متر است تا کمینه خطای مجموع جزء سوم و چهارم ۰/۱۳ باشد. در این آزمایش که عرض رودخانه تقریباً ۳۰ متر بود، بهترین θ و L به ترتیب ۲۱ درجه و ۸۳ متر می‌باشد. اما به دلیل شرایط خاص توپوگرافی ایستگاه آب‌سنجی



شکل ۶. کمینه مجموع خطای اجزاء سوم و چهارم $(\frac{\delta u}{u} + \frac{\delta \theta}{\cos \theta \sin \theta})$ برای رودخانه‌ها با عرض‌های مختلف.

و راستای امواج صوتی ۱۱ درجه تنظیم شد. امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۳۰ ثانیه ارسال شدند و دبی جریان آب اندازه‌گیری شد. دبی اندازه‌گیری شده در بازه زمانی مورد مطالعه ۹/۹ مترمکعب بر ثانیه با عدم قطعیت ۱۵ درصد به دست آمد. دبی جریان با استفاده از نمودار دبی-اشل ۱۰/۳ مترمکعب بر

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اولین استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی به منظور اندازه‌گیری دبی جریان در ایران است. بدین منظور دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی در ایستگاه آب‌سنجی چم‌طاق نصب گردید. فاصله دو ایستگاه صوتی ۵۱ متر و زاویه بین خط جریان

سپاسگزاری

پژوهش حاضر حاصل از اعتبار پژوهشی شماره ۳۲۰/۹۶۰۹/۱۲ طرح پژوهشی موسسه تحقیقات آب و اعتبار پژوهشی شماره ۶۵۸۲۰۱ گروه آب‌سطحی دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای اصفهان است.

ثانیه برآورد شد. همچنین در این مطالعه مقادیر بهینه تنظیم زاویه و فاصله بین دو ایستگاه صوتی به منظور کمینه کردن خطای دستگاه تیکه‌نگاری صوتی معرفی شد. نتایج نشان داد که دستگاه تیکه‌نگاری صوتی برخلاف سایر دستگاه‌های صوتی نظیر ADCP های متحرک، با داشتن قابلیت پایش پیوسته و با دقت دبی جریان، روشی قابل اعتماد برای استفاده در ایستگاه‌های آب‌سنجی است.

REFERENCES

- AL SAWAF, M. B. and KAWANISI, K. (2017). Mountainous River Flow Fluctuation Analysis Using Shallow-Water Acoustic Tomography System. *J-STAGE Journal B1*, 73(4), 19-24.
- 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. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 484, 11-20.
- Al sawaf, M.B., Kawanisi, K. and Appelboom, T. W. (2018). water surface slope and streamflow hysteresis patterns according to. *J. Japan Soc. Civ. Eng*, 74, 181-186.
- Bahreini motlagh, M., Kawanisi, K. and Zhu, X. (2016). Acoustic Investigations of Tidal Bores. *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. B1*. 71, 139-144.
- Bahreini motlagh, 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 Measurement and Instrumentation*, 51, 30-39.
- Bahreini motlagh, M., Roozbahani, R., Zareian, M.J., Kardan moghaddam, H. and Mohtasham, k. (2018). The continuous water temperature monitoring by using Acoustic Tomography Technology. *Amirkabir J. Civ. Eng*. doi:10.22060/CEEJ.2018.14381.5639 [In Persian].
- Bahreini motlagh, M., Roozbahani, R., Farokhnia, A., Soltaniasl, M. and Mohtasham, k. (2019). Acoustic Tomography Technology; a Useful Tool for Continuous Monitoring of Flow Velocity and Temperature. *Iran-Water Resource. Res*, 14, 271-275. [In Persian]
- Basel, B.S., Zirzmeier, J., Hetzer, C., Phelan, B.T., Krzyaniak, M.D., Reddy, S.R., Coto, P.B., Horwitz, N.E., Young, R.M., White, F.J. and Hampel, F., 2017. Unified model for singlet fission within a non-conjugated covalent pentacene dimer. *Nature communications*, 8, p.15171.
- Birgand, F., Lellouche, G. and Appelboom, T. W. (2013). Measuring flow in non-ideal conditions for short-term projects: Uncertainties associated with the use of stage-discharge rating curves. *Journal of hydrology*, 503, 186-195.
- Chauhan, M. S., Kumar, V., Dikshit, P. K. S. and Dwivedi, S. B. (2014). Comparison of discharge data using ADCP and current meter. *Int J Adv Earth Sci*, 3(2), 81-86.
- Hersch, R. W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 281-284.
- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H. K. and Pierrefeu, G. (2018). Impact of stage measurement errors on stream flow uncertainty. *Water Resources Research*, 54(3), 1952-1976.
- Huang, H. (2011). Uncertainty model for in situ quality control of stationary ADCP open-channel discharge measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 4-12.
- Huang, H. (2015). Statistical quality control of stream flow measurements with moving-boat acoustic Doppler current profilers. *Journal of Hydraulic Research*, 53(6), 820-827.
- Ibeje, A. O. (2018). Use of Lower-Order and Higher-Order Streams in Modelling the Rating Curve. *Water Resources Management*, 1-12.
- 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 of Hydrology*, 380(1-2), 74-81.
- Kawanisi, K., Kaneko, A., Nigo, S., Soltaniasl, M. and Maghrebi, M. F. (2010). New acoustic system for continuous measurement of river discharge and water temperature. *Water Science and Engineering*, 3(1), 47-55.
- 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).
- 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), 055303.
- Kawanisi, K., Bahraini motlagh, M., Al Sawaf, M. B. 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.
- Kawanisi, K., Al Sawaf, M. B. and Danial, M. M. (2017). Automated Real-Time Stream flow Acquisition in a Mountainous River Using Acoustic Tomography. *Journal of Hydrologic*

- Engineering, 23(2), 04017059.
- Kiang, J. E., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K. and Reitan, T. (2018). A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. *Water Resources Research*, 54(10), 7149-7176.
- Lee, K., Ho, H. C., Marian, M. and Wu, C. H. (2014). Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP. *Journal of hydrology*, 509, 101-114.
- Muste, M., Ho, H. C. and Kim, D. (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), 289-300.
- Razaz, M., Kawanisi, K., Nistor, I. and Sharifi, S. (2013). An acoustic travel time method for continuous velocity monitoring in shallow tidal streams. *Water Resources Research*, 49(8), 4885-4899.
- Razaz, M., Kawanisi, K., Kaneko, A. and Nistor, I. (2015). Application of acoustic tomography to reconstruct the horizontal flow velocity field in a shallow river. *Water Resources Research*, 51(12), pp.9665-9678.
- Sikorska, A. E. and Renard, B. (2017). Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges. *Advances in water resources*, 105, 51-66.
- Simpson, M. R. (2001). Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler (p. 123). Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Soltaniasl, M., Kawanisi, K., Yano, J. and Ishikawa, K. (2013). Variability in salt flux and water circulation in Ota River Estuary, Japan. *Water Science and Engineering*, 6(3), 283-295.
- Westerberg, I., Guerrero, J. L., Seibert, J., Beven, K. J. and Halldin, S. (2011). Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras. *Hydrological Processes*, 25(4), 603-613.
- WMO-No. 1044, (2010). Manual on stream gauging.
- Zeroual, A., Meddi, M. and Assani, A. A. (2016). Artificial neural network rainfall-discharge model assessment under rating curve uncertainty and monthly discharge volume predictions. *Water Resources Management*, 30(9), 3191-3205.
- Zheng, H., Gohda, N., Noguchi, H., Ito, T., Yamaoka, H., Tamura, T. and Kaneko, A. (1997). Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, 53, 117-128.