

پایش پیوسته جریان‌های مدی با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی

مسعود بحرینی مطلق^{۱*}، رضا روزبهانی^۲، مرتضی افتخاری^۳،
حمید کاردان مقدم^۴، سیدامیرمحمد حسن‌لی^۵

۱- استادیار موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده منابع آب، پست الکترونیکی: masoud.bahraini.m@gmail.com
۲- استادیار موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده منابع آب، پست الکترونیکی: rezaroozbahani@gmail.com
۳- استادیار موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده منابع آب، پست الکترونیکی: mortazaeftekhari@gmail.com
۴- کارشناس پژوهشی موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده منابع آب، پست الکترونیکی: hkardan@ut.ac.ir
۵- دانشجوی کارشناسی مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پست الکترونیکی: amir.hasanli@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۲

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۲۸

چکیده

امروزه پیشروی جریان‌های شور مدی به سمت بالادست رودخانه‌ها یکی از مشکلات مناطق ساحلی است. پیشروی جریان‌های مدی عمدتاً به دلیل کاهش آورد رودخانه‌ها تشدید شده و باعث حرکت به سمت بالادست رودخانه‌ها و شور شدن اراضی کشاورزی آن مناطق می‌شود. در این مقاله، دبی رودخانه و حجم آب عبوری از بخشی از رودخانه کیوآوتا ژاپن با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری شد. دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی به مدت ۴۲ ساعت، عبور سه جریان مدی به سمت بالادست رودخانه را به صورت پیوسته اندازه‌گیری نمودند. نتایج اندازه‌گیری نشان داد که دبی جریان رودخانه در حالت عادی بین ۲۰ تا ۵۰ مترمکعب بر ثانیه در حال نوسان است. همچنین در زمان گذر امواج مدی، جهت جریان رودخانه عکس گردید و حجم ۲۰ مترمکعب بر ثانیه از آب شور به سمت بالادست رودخانه انتقال یافت. بنابراین می‌توان فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی را به عنوان ابزاری کارآمد به منظور پایش پیوسته و دائمی جریان‌های جزر و مدی به کار برد.

کلمات کلیدی: پیشروی آب شور، پایش پیوسته جریان‌های مدی، دبی رودخانه، فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی.

۱. مقدمه

برخوردار است. دبی جریان رودخانه‌ها را به صورت سستی با استفاده از روش دبی-اشل تخمین می‌زنند. در این روش رابطه‌ای بین ارتفاع آب و دبی رودخانه بدست می‌آید و سپس با اندازه‌گیری ارتفاع آب، دبی جریان تخمین زده می‌شود. این در حالی است که در رودخانه‌های جزر و مدی این روش دارای خطای زیادی است (Da et al., 2011). بنابراین تخمین دبی جریان‌های مدی با استفاده از مدل‌های عددی پیچیده انجام می‌شود (Li and Rong., 2012; Mofstakhari et al., 2016)، اما مدل‌های عددی نه تنها نیاز به

داده دبی جریان‌های شور مدی در رودخانه‌های جزر و مدی برای برنامه‌ریزی‌های منابع آب مناطق ساحلی حائز اهمیت است. علاوه بر این، پیشروی جریان‌های شور مدی باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی در بالادست رودخانه‌های جزر و مدی می‌شوند (Gong and Shen, 2011). بنابراین اندازه‌گیری سرعت و حجم جریان‌های مدی در مناطق متصل به دریا از اهمیت فراوانی

et al., 2017; Syamsudin et al., 2017; Zhang et al., 2017; Li et al., 2016;) و محیط آزمایشگاهی (Zhu et al., 2016) در مطالعات بسیاری مورد تاکید قرار گرفته است. روش کار دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی بدین صورت است که دستگاه‌ها در دو طرف رودخانه به صورت مورب قرار می‌گیرند. هر دستگاه دارای یک پردازنده است. از آنجایی که روش تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از قانون زمان طی شده، سرعت جریان آب را محاسبه می‌کند، بایستی هر دو دستگاه در یک زمان واحد امواج صوتی را به سمت یکدیگر ارسال نمایند. از این رو، هر دو دستگاه با اتصال به ماهواره‌های GPS از لحاظ زمانی همزمان‌سازی می‌گردند و در یک زمان واحد امواج صوتی را به صورت الکترونیکی تولید می‌نمایند. سپس هر پردازنده توسط یک کابل به یک مبدل صوتی (تراگذار)^۳ متصل می‌شود. تراگذارها امواج الکترونیکی را به امواج صوتی مکانیکی تبدیل کرده و آن را با بسامد ۳۰ کیلوهرتز ارسال و دریافت می‌کنند. روش تیکه‌نگاری صوتی به‌طور گسترده برای پایش پیوسته جریان‌های مدی مورد استفاده قرار گرفته است. Nguyen و همکاران (۲۰۰۹) خصوصیات جریان‌های جزر و مدی را در خور هیروشیما^۴ با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری کردند. این محققین گزارش نمودند که با استفاده از این روش می‌توان سرعت و دبی جریان‌های جزر و مدی را با دقت بالا و به صورت پیوسته اندازه‌گیری نمود. Kawanisi و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی، سرعت و دبی جریان‌های جزر و مدی رودخانه‌ی جزر و مدی اوتا^۵ واقع در ژاپن را به صورت پیوسته و در مدت ۴۴ روز اندازه گرفتند و با ADCP مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی ابزاری کارآمد و دقیق برای پایش دائمی و درازمدت جریان‌های جزر و مدی است و نسبت به ADCP ها برتری دارد. Adityawarman و همکاران (۲۰۱۱) سرعت جریان‌های جزر و مدی بین دو جزیره هونشو و شیکوکو^۶ واقع در ژاپن را با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی پایش نمودند. در بازه زمانی اندازه‌گیری، سرعت متوسط آب بین ۳/۸ تا ۴/۴ سانتی‌متر بر ثانیه متغیر بود. این محققین روش تیکه‌نگاری صوتی را ابزاری قدرتمند برای پایش پیوسته و درازمدت سرعت و دمای آب در دریاها

ورودی‌های زیادی دارند بلکه دارای خطای قابل توجه‌ای نیز هستند. از این رو به دلیل اهمیت اندازه‌گیری داده‌های جریان رودخانه‌های جزر و مدی به‌خصوص در هنگام عبور مد، فن-آوری‌های نوین صوتی برای پایش پیوسته جریان توسعه یافته‌اند. دستگاه‌های Horizontal-ADCP یکی از فن‌آوری‌های موجود به‌منظور اندازه‌گیری پیوسته سرعت پروفیل افقی جریان در بخشی از مقطع رودخانه و تخمین دبی جریان در رودخانه‌های جزر و مدی است (Sassi et al., 2011; Vougioukas et al., 2011). دستگاه‌های ADCP با ارسال امواج صوتی و به‌کارگیری قانون داپلر سرعت ذرات معلق در آب و در نتیجه سرعت جریان آب و یا امواج دریا را اندازه‌گیری می‌کنند (Merz, 2011؛ عسگری و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه این روش در رودخانه‌های جزر و مدی به‌کار گرفته می‌شود، اما دارای محدودیت‌های قابل توجه‌ای است. به‌عنوان مثال با توجه به‌اینکه بسامد امواج صوتی این دستگاه چندصد کیلوهرتز (به عنوان نمونه ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز) است در صورت وجود ذرات معلق زیاد، امواج صوتی به‌سرعت تضعیف می‌گردند. همچنین داده‌های صوتی این دستگاه در رودخانه‌های کم‌عمق از کیفیت مطلوبی برخوردار نیستند. علاوه بر این امواج صوتی این دستگاه در زمان عبور جریان‌های شور مدی تحت تاثیر قرار می‌گیرند و دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. علاوه بر معایب ذکر شده مهمترین عیب این روش محاسبات پیچیده و استفاده از ابزارهای کمکی برای استخراج پارامترهای هیدرولیک مورد نیاز است (Kawanisi et al., 2012). به‌منظور رفع معایب روش ذکر شده محققان، فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی^۱ را توسعه دادند. در این روش اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از قانون زمان طی شده^۲ امواج صوتی انجام می‌شود (Bahreinimotlagh et al., 2016). در این روش برخلاف Horizontal-ADCP نه تنها نیازی به محاسبات پیچیده نیست، بلکه به‌دلیل ارسال امواج صوتی با بسامد پایین (۱۰ تا ۵۳ کیلوهرتز)، ذرات معلق در آب باعث تضعیف امواج صوتی نمی‌شوند. روش تیکه‌نگاری صوتی و روابط مورد استفاده در این روش به تفصیل در مطالعات پیشین تشریح شده است. دقت و صحت اندازه‌گیری و کارآمدی دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در رودخانه‌ها (Razaz et al., 2013; Soltaniasl et al., 2013; Kawanisi et al., 2013; Kawanisi et al., 2016)، دریاها (Chen

³ Transducer⁴ Hiroshima Bay⁵ Ota Estuary⁶ Honshu & Shikoku¹ Underwater Acoustic Tomography² Travel time

رودخانه، پیشروی جریان‌های شور مدی اتفاق می‌افتد. ارتفاع مد در خور هیروشیما در زمان مد کامل به بیش از ۴ متر می‌رسد. دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی FATS در دو طرف رودخانه به فاصله ۲۰۰ متر نصب گردید. دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی FATS با استفاده از ماهواره‌های GPS با دقت ۱۰ مگهرتز همزمان‌سازی شدند و امواج صوتی را با بسامد ۳۰ کیلوهرتز در هر ۳۰ ثانیه ارسال کردند. به منظور حذف سیگنال‌های محیطی، امواج صوتی در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از یک رشته اعداد سودو با نام M-Sequence کدگذاری می‌گردند. در این مطالعه از M-Sequence درجه ۹ استفاده گردید. تغییرات ارتفاع آب در هر ۱۰ دقیقه با استفاده از حسگر ارتفاع آب مدل HOB0 با دقت ۵ میلی‌متر که به تراگذار دستگاه FATS متصل بود اندازه‌گیری شد. ژرفاسنجی مقطع رودخانه بین دو تراگذار نیز با استفاده از ADCP متحرک اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تغییرات دبی جریان از تاریخ ۲۰۱۶/۶/۱۶ ساعت ۲۱:۰۰ شروع شد و تا تاریخ ۲۰۱۶/۶/۱۸ ساعت ۱۴:۰۰ به مدت ۴۲ ساعت انجام شد. منطقه مورد مطالعه و مقطع بستر رودخانه جزر و مدی بین دو ایستگاه صوتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲ روابط تیکه‌نگاری صوتی

سرعت صوت (c) در آب، تابعی از دما (T)، شوری (S) و عمق آب (D) است که به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود (Medwin, 1975):

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad \text{رابطه ۱}$$

که بازه‌ی پارامترهای اشاره شده در این معادله بایستی به صورت رابطه ۲ باشند:

$$0 \leq T \leq 35^\circ\text{C}, 0 \leq S \leq 45, \text{ and } 0 \leq D \leq 1000\text{m} \quad \text{رابطه ۲}$$

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، زمان طی شده امواج صوتی برای رسیدن به ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست به ترتیب به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌گردند (بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷):

معرفی نمودند. Adityawarman و همکاران (۲۰۱۲) سرعت و حجم آب عبوری جریان‌های جزر و مدی از تنگه‌ی کوروشیمای^۱ ژاپن را با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی به مدت ۳۶ روز اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان داد که سرعت جریان بین ۳۱/۱- و ۵۳/۸ سانتی‌متر بر ثانیه متغیر بود و میانگین حجم آب عبوری از این تنگه نیز 0.727×10^4 مترمکعب بر ثانیه است. این محققین روش تیکه‌نگاری صوتی را برای پایش دقیق، پیوسته و درازمدت جریان‌های جزر و مدی به خصوص در مکان‌هایی که رفت و آمد کشتی‌ها زیاد است توصیه نمودند. Bahreinimotlagh و همکاران (۲۰۱۵) یکی از بزرگترین جریان‌های جزر و مدی دنیا را در رودخانه‌ی کیانتانگ چین با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری کردند. در این آزمایش سرعت، دما، دبی و میزان رسوبات معلق به مدت ۲۴ ساعت مورد پایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت مد در بازه‌ی مورد مطالعه ۱ متربرثانیه و دبی بیش از ۱۰۰۰۰ مترمکعب برثانیه به سمت بالادست رودخانه می‌باشد. همچنین رسوبات معلق با استفاده از این فن‌آوری بیش از ۴ کیلوگرم برثانیه در هنگام عبور مد دریا محاسبه گردید. Kawanisi و همکاران (۲۰۱۵) سرعت، دبی و شوری جریان‌های جزر و مدی را در رودخانه‌ی جزر و مدی اوتا^۲ واقع در ژاپن با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی اندازه گرفتند. نتایج نشان داد که دبی رودخانه تاثیر به سزایی در جلوگیری از پیشروی شوری به سمت بالادست رودخانه دارد. تاکنون سرعت جریان‌های جزر و مدی در مناطق مختلفی با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی به عنوان روشی کارآمد و قابل اعتماد اندازه‌گیری شده است (Danial et al., 2017; Zhang et al., 2017; Zhu et al., 2016; Zhu et al., 2015). هدف از این مطالعه پایش پیوسته جریان‌های مدی عبوری از رودخانه کیواوتا با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی است.

۲. روش کار

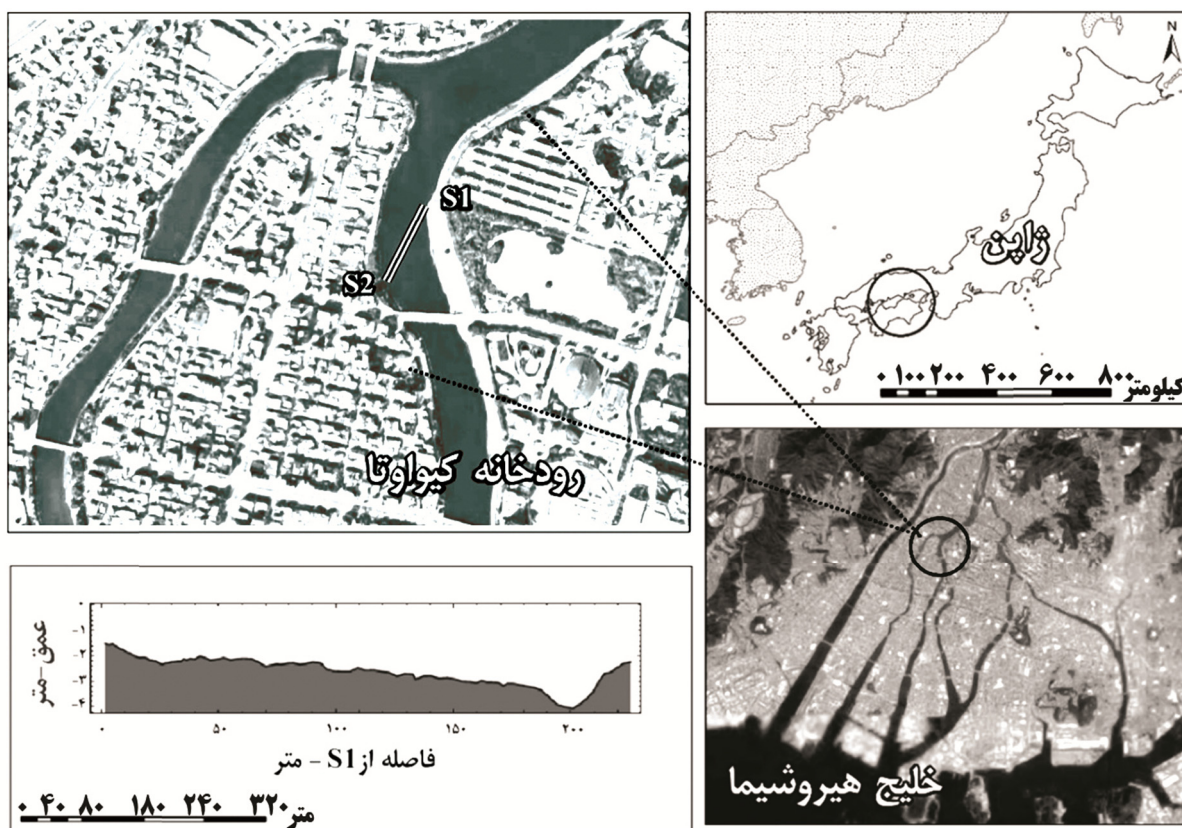
۱-۲ منطقه مورد مطالعه

پایش پیوسته جریان‌های مدی در رودخانه جزر و مدی کیواوتا واقع در بالادست خور هیروشیما ژاپن انجام شد (شکل ۱). در محدوده مورد مطالعه در صورت کاهش آب شیرین

^۱ Kurushima Strait

^۲ Ota

^۳ Water level logger



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و بستر رودخانه جزر و مدی بین دو ایستگاه صوتی S1 و S2

امواج صوتی و جهت جریان رودخانه و v سرعت جریان رودخانه است. در این معادله زمانی که جهت جریان از بالادست رودخانه به سمت دریا باشد، t_{Up} بزرگتر از t_{Down} است و در زمان عبور جریان‌های مدی که جهت جریان به سمت بالادست رودخانه تغییر می‌کند t_{Up} کوچکتر از t_{Down} می‌شود، بنابراین سرعت جریان به صورت منفی نشان داده می‌شود. از این رو، علامت منفی سرعت جریان به معنی عبور جریان‌های مدی به سمت بالادست رودخانه است. با توجه به معادله پیوستگی دبی جریان تابعی از حاصل ضرب سرعت متوسط جریان مقطع عرضی و سطح خیس شده مقطع عرضی است (رابطه ۷):

$$Q = A(H)v_v \sin \theta = A(H)u_m \tan \theta \quad \text{رابطه ۷}$$

که A سطح مقطع عرضی، H ارتفاع آب، v_m سرعت متوسط جریان مقطع عرضی، u_m سرعت متوسط جریان در راستای امواج صوتی و θ زاویه بین خط جریان و راستای امواج صوتی است.

$$t_{Down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad \text{رابطه ۳}$$

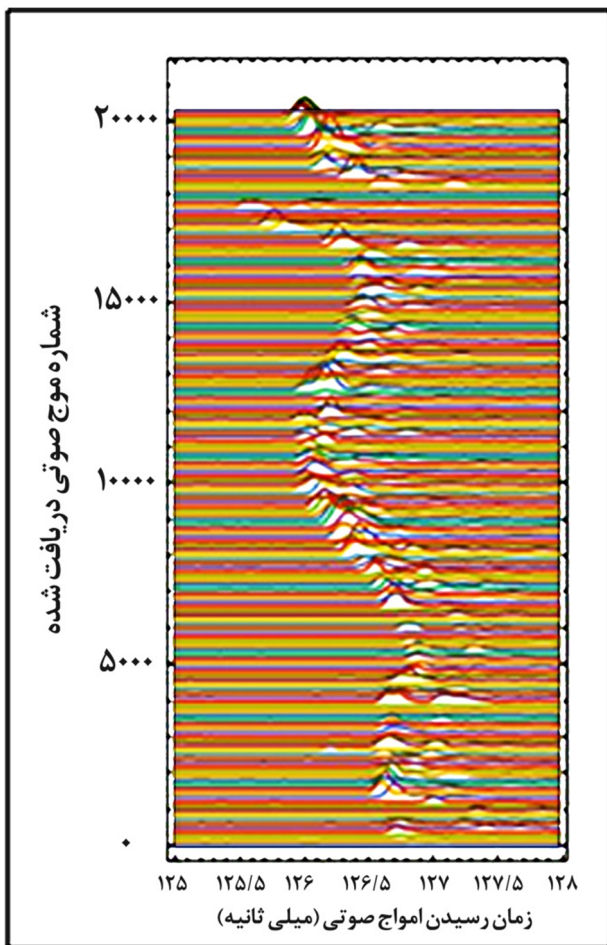
$$t_{Up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad \text{رابطه ۴}$$

و با حل دو رابطه‌ی فوق سرعت متوسط جریان آب و سرعت صوت حاصل خواهد شد (رابطه‌های ۵ و ۶):

$$\begin{cases} c_m = \frac{L}{t_m} \\ u_m = \frac{c_m^2 \Delta t}{2L} \end{cases} \quad \text{رابطه ۵}$$

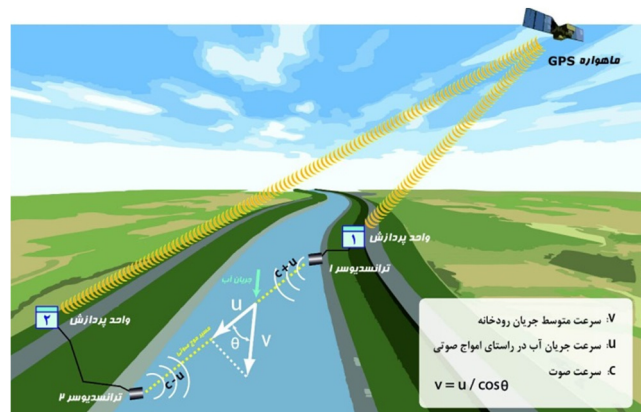
$$v = \frac{u}{\cos \theta} \quad \text{رابطه ۶}$$

که L فاصله‌ی افقی بین دو ایستگاه صوتی، t_{Down} زمان رسیدن امواج صوتی به ایستگاه پایین‌دست، t_{Up} زمان رسیدن امواج صوتی به ایستگاه بالادست، $t_m = \frac{t_{Up} + t_{Down}}{2}$ و $\Delta t = t_{up} - t_{Down}$ سرعت صوت در آب، u_m سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی، θ زاویه بین راستای



شکل ۳: زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه S2

نتایج اندازه‌گیری ارتفاع آب و سرعت جریان با استفاده از دستگاه FATS در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عمق آب در زمان جزر اول حدود ساعت ۲:۰۰ بامداد ۲۰۱۶/۶/۱۷ به حداقل ۱/۵ متر رسید و سپس با رسیدن جریان مدی به حداکثر ۳ متر افزایش یافت. اگرچه عمق آب در زمان گذر هر سه مد تقریباً به عدد ۳ متر رسید؛ اما عمق آب در زمان جزر دوم به کمترین حد خود تقریباً ۰/۹ متر اندازه‌گیری شد. سرعت جریان اندازه‌گیری شده با استفاده از FATS نیز تحت تاثیر جریان‌های مدی قرار گرفت و در زمان عبور جریان‌های مدی به حداکثر ۰/۲- متر بر ثانیه رسید. درحالی‌که در زمان عدم وجود مد سرعت جریان رودخانه کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه به سمت پایین‌دست رودخانه بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این رودخانه جزر و مدی نیز مانند سایر



شکل ۲: نحوه قرارگیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در رودخانه

۳. نتایج و بحث

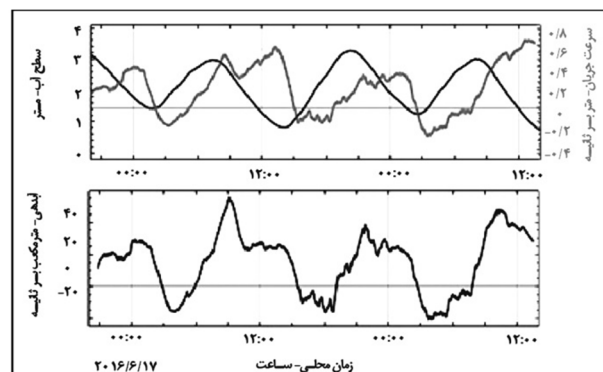
زمان رسیدن امواج صوتی برای ایستگاه دوم (t_{Down}) که در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه ارسال شدند در شکل ۳ به صورت یک قله نشان داده شده است. همان‌طور که در رابطه ۱ ارائه شد، سرعت صوت در آب به ترتیب اهمیت تابعی از شوری، دما و عمق آب است. اثرگذاری شوری آب تقریباً ۴ برابر دما بر سرعت صوت است، در حالی‌که اثر عمق آب روی سرعت صوت نسبت به شوری و دما بسیار ناچیز است (Medwin, 1975). بنابراین با عبور جریان‌های شور مدی از بازه مورد مطالعه سرعت صوت افزایش یافته و زمان رسیدن امواج صوتی به ایستگاه مقابل به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

در زمان عدم وجود جریان مدی رودخانه در حالت طبیعی آب شیرین بالادست را به سمت دریا انتقال می‌داد که زمان رسیدن امواج صوتی به ایستگاه دوم ۱۲۶/۸ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شد. اما در زمان عبور جریان‌های شور مدی سرعت صوت افزایش یافته، در نتیجه زمان رسیدن امواج صوتی تا کمتر از ۱۲۶ میلی‌ثانیه نیز رسید. به‌طور دقیق‌تر همان‌طور که مشاهده می‌شود بین ساعات ۳ تا ۶ بامداد، ۱۵ تا ۱۸ بعدازظهر ۲۰۱۶/۶/۱۷ و ۳ تا ۶ بامداد ۲۰۱۶/۶/۱۸ که مصادف با عبور جریان‌های مدی بود، زمان رسیدن امواج صوتی به طور چشم‌گیری کاهش یافت. از آنجایی‌که زمان رسیدن امواج صوتی ارتباط مستقیمی با شوری آب دارند، می‌توان استنباط کرد که جریان‌های مدی دوم و سوم شوری بیشتری نسبت به جریان مدی اول داشته و مقدار شوری بیشتری را به بالادست انتقال داده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر احداث سد‌ها و گرمایش جهانی منجر به کاهش آبدهی رودخانه‌ها به‌خصوص در مناطق پایین دست متصل به دریا شده است. نتیجه کاهش آبدهی رودخانه‌ها، پیشروی جریان‌های شور حاصل از مد دریا را به‌دنبال داشته است. پیشروی آب شور به سمت بالادست رودخانه‌ها مشکلات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را به‌دنبال دارد. در این مطالعه دبی رودخانه و حجم عبور جریان‌های مدی با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی در رودخانه کیواوتا ژاپن به‌مدت ۴۲ ساعت به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری شد. در مدت اندازه‌گیری عبور سه مد مورد مطالعه قرار گرفت. آورد رودخانه تقریباً ۴۰ متر مکعب بر ثانیه بود و در زمان عبور جریان‌های مدی جهت آب عکس شده و مقدار ۲۰ متر مکعب بر ثانیه به سمت بالادست رودخانه انتقال یافت.

رودخانه‌های جزر و مدی، اختلاف زمانی^۱ بین حداکثر ارتفاع حاصل از مد و سرعت جریان مد وجود دارد (Warner et al., 2003). به عنوان مثال ساعت ۳ بامداد ۲۰۱۶/۶/۱۷ سرعت جریان مدی به حداکثر خود معادل ۰/۱۸- رسید، در حالی که ارتفاع آب به تدریج در حال افزایش بود و با تاخیر چند ساعته به بیشترین حد خود رسید. با اندازه‌گیری سرعت جریان و ارتفاع آب دبی رودخانه محاسبه می‌گردد.



شکل ۴: تحلیل عمق آب، سرعت متوسط و دبی جریان جزر و مدی

منابع

- Adityawarman, Y.; Kaneko, A.; Nakano, K.; Taniguchi, N.; Komai, K.; Guo, X., 2011. Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of oceanography*, 67(2): 173-182.
- Adityawarman, Y.; Kaneko, A.; Taniguchi, N.; Mutsuda, H.; Komai, K.; Guo, X., 2012. Tidal current measurement in the Kurushima Strait by the reciprocal sound transmission method. *Acoustical Science and Technology*, 33(1): 45-51.
- Asgari, H R.; Shanehsazzadeh, A.; Akbari, G.H.; Ardalan, H., 2016. Study on wave characteristics based on field data analysis: A case study of Jask. *Journal of Oceanography*, 6(24): 1-11. [In Persian].
- Bahreinimotlagh, M.; Kawanisi, K.; Danial, M.M.; Al Sawaf, M.B.; Kagami, J., 2016. Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. *Flow Measurement and*

در این مطالعه دبی رودخانه در ابتدای آزمایش تقریباً ۲۰ متر مکعب بر ثانیه به سمت دریا بود که با گذر موج مدی تا حدود ۱۸- متر مکعب بر ثانیه بین ساعات ۳ تا ۶ بامداد ۲۰۱۶/۶/۱۷ به سمت بالادست رودخانه تغییر جهت داد. سپس با اتمام زمان مد، جریان رودخانه به حالت عادی بازگشت و حجم آب تا مقدار حداکثر ۵۰ متر مکعب بر ثانیه را به سمت پایین‌دست رودخانه انتقال داد. پس از آن دو مد دیگر نیز با گذشت حدود ۱۲ ساعت از منطقه مورد مطالعه عبور کردند که تقریباً به‌دلیل عدم تغییر آورد رودخانه از بالادست، حجم جریان مدی گذرا از منطقه مورد مطالعه همانند مد اول حدود ۲۰- متر مکعب بر ثانیه به‌دست آمد. نتایج مطالعات پیشین نشان دادند که پیشروی جریان‌های شور مدی توسط آورد آب شیرین رودخانه کنترل می‌گردد (Leonardi et al., 2015; Cai et al., 2016; Hosseini and Siadatmousavi, 2018). در این تحقیق نیز دبی جریان طبیعی رودخانه و عبور جریان‌های مدی، مورد مطالعه قرار گرفتند و نشان دادند که جریان‌های مدی در این رودخانه به سمت بالادست حرکت می‌کنند.

¹ Lag time

- estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202: 54-68.
- Kawanisi, K.; Bahreinimotlagh, M.; AlSawaf, M.; Razaz, M., 2016. High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography. *Journal of Hydrological Processes*, 30(13): 2247-2254.
- Kawanisi, K.; Razaz, M.; Bahreinimotlagh, M., 2015. Monitoring flow rate and salinity intrusion in a tidal floodway using Fluvial Acoustic Tomography. In: 36th World Congress of the International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR-APD 2015), The Hague, The Netherlands. 1-8P.
- Kawanisi, K.; Razaz, M.; Ishikawa, K.; Yano, J.; 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.; Kaneko, A.; 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.; Razaz, M.; Yano, J.; Ishikawa, K., 2013. Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines. *Measurement Science and Technology*, 24(5): 1-10.
- Leonardi, N.; Kolker, AS.; Fagherazzi, S., 2015. Interplay between river discharge and tides in a delta distributary. *Advances in Water Resources*, 80: 69-78.
- Li, G.; Ingram, D.; Kaneko, A.; Chen, M.; Gohda, N.; Polydorides N., 2017. Vertical underwater acoustic tomography in an experimental basin. *Journal of Acoustical Society of America*, 141(5): 3656-3656.
- Li, G.; Ingram, D.; Kaneko, A.; Gohda, N.; Polydorides, N., 2016. The application of coastal acoustic tomography to a large experimental wave/current basin. *Journal of Acoustical Society of America*, 140(4): Instrumentation, 51: 30-39.
- BahreiniMotlagh, M.; Kawanisi, K.; Zhu, X., 2015. Acoustic investigations of tidal bores. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 71(4): 139-44.
- Bahreinimotlagh, M.; Roozbahani, R.; Farokhnia, A.; Soltaniasl, M.; Mohtasham, K., 2019. Technical note: Acoustic tomography technology; a useful tool for continuous monitoring of flow velocity and temperature. *Iran-Water Resources Research Journal*, 14: 271-275. [In Persian].
- Cai, H.; Savenije, HHG.; Jiang, C.; Zhao, L.; Yang, Q., 2016. Analytical approach for determining the mean water level profile in an estuary with substantial fresh water discharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(3): 1177-95.
- Chen, M.; Kaneko, A.; Lin, J.; Zhang, C., 2017. Mapping of a typhoon-driven coastal upwelling by assimilating coastal acoustic tomography data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(10): 7822-37.
- Da, S.; Dias, F.J.; Lacerda, L.D.; Marins, R.V.; de Paula, F.C.F., 2011. Comparative analysis of rating curve and ADP estimates of instantaneous water discharge through estuaries in two contrasting Brazilian rivers. *Hydrological Process*, 25(14): 2188-201.
- Danial, M.M.; Kawanisi, K.; Bahreinimotlagh, M.; Basel, AlSawaf.; Wakabayashi, T., 2017. Investigation of flow velocity and salinity behaviour in Ota river estuary using acoustic tomography method and numerical modeling. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 73(4):1-6.
- Gong, W.; Shen, J., 2011. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China. *Continental Shelf Research*, 31(7-8): 769-88.
- Hosseini, S.T.; Siadatmousavi, S.M., 2018. Field observations of hypersaline runoff through a shallow

- River estuary, Japan. *Water Science and engineering*, 6(3): 283-95.
- Syamsudin, F.; Chen, M.; Kaneko, A.; Adityawarman, Y.; Zheng, H.; Mutsuda, H., 2017. Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission. *Acoustical Science and Technology*, 38(5): 246-53.
- Vougioukas, S.; Papamichail, D.; Georgiou, P.; Papadimos, D., 2011. River discharge monitoring using a vertically moving side-looking acoustic Doppler profiler. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2): 137-141
- Warner, J.C.; Schoellhamer, D.; Schladow, G., 2003. Tidal truncation and barotropic convergence in a channel network tidally driven from opposing entrances. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56(3-4): 629-39.
- Zhang, C.; Zhu, X.H.; Zhu, Z.N.; Liu, W.; Zhang, Z.; Fan, X., 2017. High-precision measurement of tidal current structures using coastal acoustic tomography. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 193: 12-24.
- Zhu, X.; Zhu, Z.; Ma, Y.; Fan, X.; Long, Y., 2015. Measuring tidal and residual currents and volume transport through a wide strait by use of the coastal acoustic tomography system. *Continental Shelf Research*, 17: 65-75.
- Zhu, Z.N.; Zhu, X.H.; Guo, X., 2016. Coastal tomographic mapping of nonlinear tidal currents and residual currents. *Continental Shelf Research*, 143: 219-27.
- 3183-3183.
- Li, M.; Rong, Z., 2012. Effects of tides on freshwater and volume transports in the Changjiang River plume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(6):1-15.
- Medwin, H., 1975. Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *Journal of Acoustical Society of America*, 58(6): 1318-1319.
- Merz, J., 2011. Discharge measurements in low flow conditions with ADCP technology - First experiences in Nepal. *Journal of Hydrology and Meteorology*, 7(1): 40-48.
- Moftakhari, H.R.; Jay, D.A.; Talke, S.A., 2016. Estimating river discharge using multiple-tide gauges distributed along a channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4): 2078-97.
- Nguyen, HQ.; Kaneko, A.; Lin, J.; Yamaguchi, K.; Gohda, N.; Takasugi, Y., 2009. Acoustic measurement of multisubtidal internal modes generated in Hiroshima Bay, Japan. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(2): 103-12.
- Razaz, M.; Kawanisi, K.; Nistor, I.; Sharifi, S., 2013. An acoustic travel time method for continuous velocity monitoring in shallow tidal streams. *Water Resources Research*, 49(8):4885-4899.
- Sassi, M.G.; Hoitink, A.J.F.; Vermeulen, B.; Hidayat., 2011. Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed. *Water Resources Research*, 47(6): W06504.
- Soltaniasl, M.; Kawanisi, K.; Yano, J.; Ishikawa, K., 2013. Variability in salt flux and water circulation in Ota