

امکان سنجی پایش سیلاب با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای و تعیین دقت اندازه‌گیری، حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری

مسعود بحرینی مطلق^{*}، رضا روزبهانی^۱، مرتضی افتخاری^۱، حمید کاردان مقدم^۲، مهدی عباسی^۲، کمال محتشم^۳

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

۲. کارشناس پژوهشی پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران

۳. کارشناس شرکت سنج آب فناوری خلیج فارس، شیراز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۳۰)

چکیده

پایش سیلاب و اندازه‌گیری دقیق موج سیل به منظور مدیریت آن اهمیت دارد. روش تیکه‌نگاری صوتی مبتنی بر دانش صوتیات از فناوری‌های نوین پایش رودخانه‌ها و اندازه‌گیری موج سیل است. در این روش دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی در دو طرف رودخانه قرار می‌گیرند و با ارسال و دریافت امواج صوتی، خصوصیات جریان را اندازه‌گیری می‌کنند. در مطالعه حاضر محاسبه کمترین و بیشترین برد و دقت اندازه‌گیری سرعت جریان در رودخانه‌هایی با عرض‌های مختلف بررسی شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد کمترین برد اندازه‌گیری با استفاده از ام-سیکونس درجه ۷، برابر ۱۹ متر است که در این فاصله دقت اندازه‌گیری سرعت جریان بسیار کم و حدود ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه است. در روش تیکه‌نگاری صوتی با افزایش فاصله بین دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. از این رو، دقت اندازه‌گیری سرعت جریان در فاصله ۱۰۰ و ۲۰۰ متری به ترتیب ۳/۵ و ۲ سانتی‌متر بر ثانیه برآورد شد. همچنین، بیشترین برد اندازه‌گیری با استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲ حدود ۱۹۵۵ متر با دقت ۰/۲ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد. با توجه به مطالعات پیشین در خصوص پایش سیلاب با استفاده از این روش و ارزیابی روش یادشده در مطالعه حاضر، به کارگیری این روش به منظور پایش پیوسته جریان و اندازه‌گیری به هنگام موج سیل در رودخانه‌های عریض کشور برای کمک به تصمیم‌گیری مدیران منابع آب پیشنهاد می‌شود.

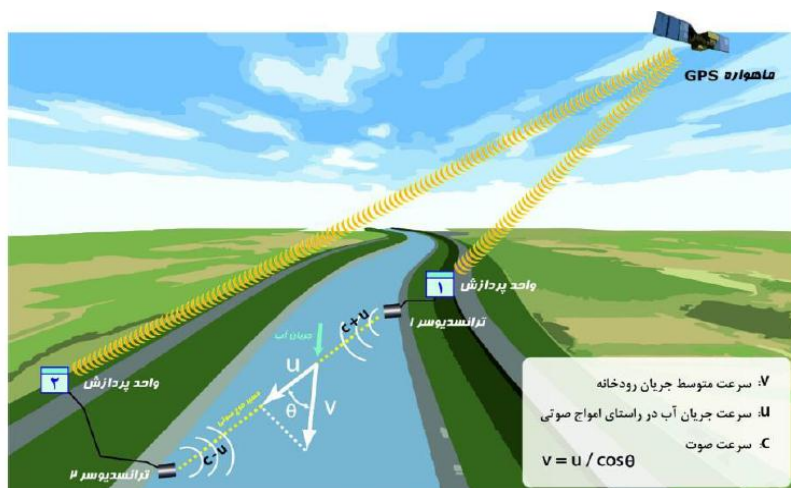
کلیدواژگان: اندازه‌گیری موج سیلاب، پایش به هنگام جریان، دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز.

مقدمه

در سال‌های اخیر سیلاب از حوادث طبیعی مهم جهان به‌شمار می‌رود. اگرچه پیش‌بینی بارش با استفاده از ماهواره‌ها و دیگر ابزار هواشناسی انجام می‌شود، داشتن اطلاعات به‌هنگام دبی جریان رودخانه‌ها برای اخذ تصمیم‌های صحیح به منظور مدیریت سیلاب اهمیت دارد [۱]. اندازه‌گیری دقیق و به‌هنگام دبی جریان با استفاده از روش‌های سنتی نظیر دبی-اشل امکان‌پذیر نیست. از این رو، در سال‌های اخیر فناوری‌های پیشرفته‌ای برای پایش پیوسته جریان رودخانه‌ها توسعه یافته است. بین فناوری‌های موجود، از دستگاه‌های مبتنی بر امواج صوتی استقبال شده است.

یکی از ابزارهای صوتی ای‌دی‌سی‌پی‌های افقی^۱ هستند که به منظور پایش پیوسته جریان رودخانه‌ها استفاده می‌شوند [۲]. در حالی که این نوع دستگاه‌ها در رودخانه‌های کم‌عمق و یا در شرایط کدورت زیاد جریان آب مناسب نیستند. از این رو، دستگاه‌های پایش سیلاب باید توانایی کار در شرایط حاد آب‌وهوایی و همچنین قابلیت اندازه‌گیری جریان با کدورت زیاد (ذرات معلق) را داشته باشند، همچنین به پس‌پردازش‌های پیچیده نیاز نداشته باشند و در کوتاه‌ترین زمان ممکن اطلاعات دقیق دبی جریان را مخابره کنند [۳]. به منظور رفع محدودیت‌های یادشده، محققان روش تیکه‌نگاری صوتی را توسعه داده‌اند.

فناوری تیکه‌نگاری صوتی به عنوان یکی از روش‌های سنجش از دور، ابزاری قدرتمند برای پایش منابع آب سطحی است [۴]. این روش را مونک و همکارانش (۱۹۷۹) به‌منظور پایش دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی ابداع کردند [۵]. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی با ارسال امواج با بسامد کمتر از یک کیلوهرتز قادر به پایش جریان‌های اقیانوسی در فواصل چند هزار کیلومتری است [۶]. ژنگ و همکارانش (۱۹۹۷) با توسعه فناوری یادشده و به منظور اندازه‌گیری جریان‌های دریایی در فواصل چند ده کیلومتری، دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی را ابداع کردند [۷]. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی دریایی با ارسال امواج صوتی با بسامد ۴ تا ۱۰ کیلوهرتز جریان‌های دریایی را اندازه‌گیری می‌کنند [۸ و ۹]. کاوانیشی و همکارانش (۲۰۱۰) با توسعه فناوری تیکه‌نگاری صوتی، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای را ابداع کردند که با ارسال امواج با بسامد ۳۰ کیلوهرتز قادر به پایش پیوسته جریان رودخانه‌ها در کلیه شرایط آب‌وهوایی است [۱۰]. مدل مفهومی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی برای پایش جریان رودخانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز، با قرار گرفتن به صورت مورب در دو طرف رودخانه، امواج صوتی را به طور هم‌زمان به سمت یکدیگر ارسال می‌کنند و با استفاده از روابط موجود، سرعت جریان آب را اندازه می‌گیرند [۱۱].



شکل ۱. مدل مفهومی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز برای پایش متغیرهای آب در یک مقطع رودخانه (تراگذار، واحدهای پردازنده و چگونگی قرارگیری ترانسدیوسرها در رودخانه [۴])

1. Horizontal ADCP

پیشینه تحقیق

کاوانیشی و همکاران (۲۰۱۰)، دبی جریان آب را به صورت پیوسته طی ۴۴ روز در رودخانه جزر و مدی اوتا^۱ واقع در ژاپن، با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتزی که به فاصله ۲۲۰ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند، اندازه گرفتند و با دستگاه ای‌دی‌سی‌پی مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد فناوری تیکه‌نگاری صوتی، ابزاری کارآمد و دقیق برای پایش پیوسته و درازمدت دبی جریان آب در رودخانه‌های جزر و مدی است [۱۰]. همچنین، کاوانیشی و همکاران دبی جریان آب را به مدت ۲۷ روز در رودخانه هیاکن^۲ واقع در ژاپن با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتزی که به فاصله ۴۱۸ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند، اندازه گرفتند و با دستگاه ای‌دی‌سی‌پی مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این روش، دبی جریان را با دقت زیاد و به صورت پیوسته اندازه می‌گیرد [۱۲].

کاوانیشی و همکاران (۲۰۱۲) دبی جریان آب را طی ۴۷ روز در رودخانه گونو^۳ واقع در ژاپن با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی که تقریباً به فاصله ۳۰۲ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند، اندازه گرفتند و با دستگاه ای‌دی‌سی‌پی مقایسه کردند. در بازه زمانی آزمایش دو عملیات تخلیه سد در بالادست اتفاق افتاد که دبی جریان را از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه به ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه افزایش داد. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی به‌خوبی توانایی اندازه‌گیری موج سیلاب را دارد [۱۳].

بحرینی مطلق و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی، دبی جریان در رودخانه جزر و مدی کیانتاگ^۴ واقع در چین را اندازه‌گیری کردند. از آنجا که فاصله دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی در طرفین رودخانه بیش از سه کیلومتر بود و در زمان عبور جریان‌های مدی غلظت رسوبات معلق (SSC)^۵ در آب به‌شدت افزایش می‌یافت، از دستگاه‌های قوی‌تر تیکه‌نگاری صوتی با بسامد ۵ و ۷ کیلوهرتز استفاده کردند. در زمان عبور جریان‌های مدی، دبی رودخانه به بیش از ۱۰ هزار مترمکعب بر ثانیه

رسید که با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری شد. همچنین در زمان اوج دبی، مقدار رسوبات معلق به بیش از ۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب رسید [۱۴].

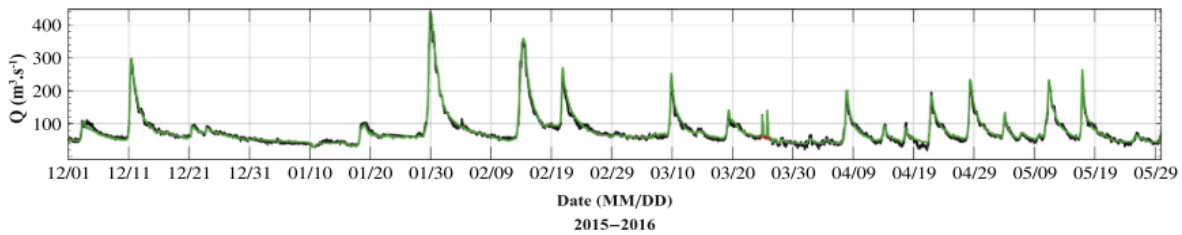
صواف و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز که به فاصله ۳۰۲ متر از یکدیگر قرار داشتند، دبی جریان آب را در یک رودخانه کوهستانی به مدت شش ماه اندازه گرفتند و با روش دبی-اشل مقایسه کردند (شکل ۲). یکی از اهداف تحقیق یادشده، اندازه‌گیری دقیق موج سیلاب عبوری در آن بازه از رودخانه بود. نتایج تحقیق آنها نشان داد در بازه زمانی شش‌ماهه، دبی جریان از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه تا بیش از ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه در مواقع عبور جریان‌های سیلابی متغیر بود. همچنین، نتایج پژوهش یادشده نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی به دلیل قابلیت پایش پیوسته جریان با دقت زیاد، برای اندازه‌گیری دقیق موج سیلاب کارآمد است. شایان یادآوری است که رسوبات معلق در رودخانه یادشده به میزان زیادی افزایش نیافت، به‌طوری که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز قابل استفاده بودند [۱۵].

باید به این نکته توجه داشت که برد اندازه‌گیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با افزایش ذرات معلق در آب کاهش می‌یابد. برای نمونه، کاوانیشی و همکاران (۲۰۱۳)، طی تحقیقی دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی را به فاصله تقریباً ۳۰۰ متری از یکدیگر در دو طرف رودخانه قرار دادند و موج سیلاب به‌وجودآمده از تخلیه سد بالادست را اندازه‌گیری کردند. دبی رودخانه در حالت نرمال ۵۰ مترمکعب بر ثانیه و در شرایط عبور موج سیلاب به بیش از ۱۸۰ مترمکعب بر ثانیه تغییر کرد. همچنین، نتایج پژوهش یادشده نشان داد رسوبات معلق موجود در جریان سیلابی به بیش از ۶۰ گرم بر مترمکعب رسید و در پی آن، SNR^۶ امواج صوتی دریافتی به میزان هشت دسی‌بل کاهش یافت [۱۶].

بحرینی مطلق و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز دبی جریان در رودخانه زاینده‌رود را اندازه گرفتند و با روش دبی-اشل مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این روش برای پایش پیوسته جریان رودخانه‌ها مناسب است [۱۷]. بحرینی مطلق و همکاران (۲۰۱۹) با قرار دادن دستگاه‌های تیکه‌نگاری

1. Ota Estuary
2. Hyakken River
3. Gono River
4. Qiantang River
5. Suspended Sediment Concentration

6. Signal to Noise ratio



شکل ۲. اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی (مشکی) و روش دبی-اشل (سبز) در رودخانه گونو [۱۵]

دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، امواج صوتی کدگذاری شده با استفاده از ام-سیکونس را به صورت سه سیکل در هر دیجیت به کار می‌برند که کیو-ولیو^۴ نامیده می‌شود. کمترین برد اندازه‌گیری با استفاده از این روش تابعی از کیو-ولیو، بسامد امواج صوتی، طول امواج کدگذاری شده و سرعت صوت در آب است که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$R_{min} = \frac{Q - value}{f} \times L_{M-Seq} \times c \quad (2)$$

که $Q - value$ برابر ۳، f بسامد صوتی با مقدار ۳۰ هزار هرتز، L_{M-Seq} طول ام-سیکونس و c سرعت صوت در آب است که ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض می‌شود.

محاسبه بیشترین برد اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز

قدرت امواج صوتی انتشار یافته در آب با افزایش فاصله نسبت به منبع صوتی کاهش می‌یابد. یوریک در سال ۱۹۸۳ رابطه ۳ را برای محاسبه افت انتشار^۵ امواج صوتی نسبت به فاصله از منبع صوتی ارائه کرد [۲۰]:

$$PL = 20 \cdot \log R + aR + L \quad (3)$$

که به ترتیب جملات اول و دوم در سمت راست رابطه مربوط به تلفات پخش امواج صوتی^۶ و جذب امواج صوتی^۷ نسبت به فاصله از منبع صوتی (R) است. همچنین، L_0 تلفات امواج صوتی بر اثر جهت^۸، بازتاب^۹، تداخل^{۱۰} و غیره است که مقدار ۱۰ دسی‌بل فرض می‌شود. ضریب جذب امواج صوتی (α) در آب شفاف از رابطه تقریبی ۴ به دست می‌آید [۲۱]:

صوتی ۳۰ کیلوهرتز در رودخانه کیواوتا ژاپن به فاصله ۲۰۰ متری از یکدیگر، دبی جریان را در زمان گذر امواج مدی به سمت بالادست اندازه‌گیری کردند. همچنین، نتایج پژوهش یاد شده نشان داد با استفاده از این روش، موج مدی عبوری از رودخانه به سمت بالادست قابل اندازه‌گیری است [۱۸].

اگرچه تحقیقات زیادی در خارج و داخل کشور با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز برای اندازه‌گیری پیوسته دبی جریان در رودخانه‌ها با عرض‌های مختلف و در مواقع نرمال، عبور جریان‌های مدی و سیلابی انجام شده است، تا کنون ارزیابی این روش شامل حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری نبوده و به تناسب دقت اندازه‌گیری این روش مطالعه نشده است. در تحقیق حاضر قابلیت‌های دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز، بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

محاسبه کمترین برد اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز

امواج صوتی در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی از طریق یک سری اعداد تصادفی به نام ام-سیکونس^۱ کدگذاری می‌شوند تا قدرت ارسال بیشتری داشته باشند و نوفه‌های محیط^۲ سبب کاهش سیگنال‌های صوتی نشوند [۴]. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز از ام-سیکونس درجه ۷ تا درجه ۱۲ استفاده می‌کنند. طول امواج صوتی کدگذاری شده^۳ با استفاده از ام-سیکونس، از رابطه ۱ به دست می‌آید که n درجه ام-سیکونس است و سبب افزایش بهره^۴ (Gp) امواج صوتی دریافتی می‌شود (رابطه ۱):

$$Gp = 10 \cdot \log L_{M-Seq} \quad (1)$$

4. Q - value
5. Propagation Loss (PL)
6. Spreading Loss
7. Absorption Loss
8. Directivity
9. Reflection
10. Interference

1. M Sequence
2. Ambient Noise
3. L_{M-Seq}

نتایج

نتایج محاسبه کمترین برد اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز بر اساس رابطه ۱، حداقل برد اندازه‌گیری تابعی از بسامد امواج صوتی، طول ام-سیکونس، کیو-ولیو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی و سرعت صوت در آب است. طول ام-سیکونس درجه‌های ۷ تا ۱۲ در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین طول، ۱۲۷ دیجیت برای ام-سیکونس درجه ۷ است.

جدول ۱. ام-سیکونس‌های قابل استفاده در دستگاه تیکه‌نگاری صوتی و طول دیجیت آن

درجه ام-سیکونس (n)	بیشترین طول دیجیت (L)
۷	۱۲۷
۸	۲۵۵
۹	۵۱۱
۱۰	۱۰۲۳
۱۱	۲۰۴۷
۱۲	۴۰۹۵

بنابراین، با فرض مقدار سرعت صوت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، حداقل برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز با استفاده ام-سیکونس درجه ۷ برابر ۱۹ متر است.

نتایج محاسبه بیشترین برد اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز با توجه به رابطه ۱، بیشترین برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل و آب شفاف به صورت زیر (رابطه ۸) محاسبه می‌شود:

$$20 \log R_{max} + \alpha R_{max} = SL - L + Gp - Na - SNR_{Threshold} \quad (8)$$

که برای دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۹۰ (dB relative to 1 μPa at 1 m) برای امواج صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز ۰/۰۰۸ دسی‌بل بر متر است، L_0 برابر ۱۰ دسی‌بل، و Gp برای ام-سیکونس‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. بنابراین، برای رسیدن به بیشترین برد اندازه‌گیری باید از درجه ۱۲ و بهره ۳۶ دسی‌بل استفاده کرد. Na که مجموع نوفه دستگاه (۱۵ دسی‌بل) و نوفه محیط (۱۰۵ دسی‌بل) است، ۱۲۰ دسی‌بل در نظر گرفته

$$\alpha \left(\frac{dB}{m} \right) = \left(\frac{3.3 \times 10^{-2} + \frac{0.11 f^2}{1+f^2} + \frac{44 f^2}{4100+f^2} + 3 \times 10^{-4} \right) / 1000 \quad (4)$$

که f بسامد امواج صوتی به هرتز است.

بنابراین، شدت امواج صوتی رسیده به دستگاه مقابل^۱ برابر است با تفاضل شدت امواج صوتی منبع صوتی (SL)^۲ و تلفات انتشار امواج صوتی (PL) (رابطه ۵):

$$RL = SL - PL \quad (5)$$

از این رو، بیشترین برد اندازه‌گیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$SL - 20 \log R_{max} - \alpha R_{max} - L + Gp - Na = SNR_{Threshold} \quad (6)$$

که Na مجموع نوفه محیط و دستگاه تیکه‌نگاری صوتی است و $SNR_{Threshold}$ کمترین نسبت علامت به نوفه^۳ است که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی می‌توانند علامت رسیده از دستگاه مقابل را از نوفه محیط تفکیک کنند. معمولاً، $SNR_{Threshold}$ برای دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ دسی‌بل در نظر گرفته می‌شود [۸].

محاسبه دقت اندازه‌گیری سرعت جریان دستگاه

تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز در فواصل مختلف

دقت اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی تابعی از سرعت صوت در آب، فاصله بین دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، بسامد امواج صوتی است. در این روش برای افزایش دقت اندازه‌گیری میانگین متحرک چند داده انجام می‌شود که دقت اندازه‌گیری را به میزان $\frac{1}{\sqrt{n}}$ افزایش می‌دهد. n تعداد داده‌هاست.

$$Ur = \frac{c^2}{2L} \times \frac{1}{2f} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

که c سرعت صوت در آب (متر بر ثانیه)، L فاصله بین دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی (متر)، f بسامد امواج صوتی (هرتز) و n تعداد داده‌های میانگین‌گیری متحرک است.

1. RL (Receive Level)
2. Sound Level dB (relative to 1 μPa at 1 m)
3. Signal to Noise ratio

اندازه‌گیری سرعت، تعداد ۲۰ داده را میانگین‌گیری متحرک می‌کنند. بنابراین، در حالت $n = 20$ تفکیک زمانی اندازه‌گیری‌ها ۱۰ دقیقه خواهد بود. با فرض ثابت بودن سرعت صوت برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و بسامد ۳۰ هزار هرتز، دقت دستگاه برای کمترین برد اندازه‌گیری ۱۹ متر برابر با ۲۲ سانتی‌متر بر ثانیه و برای بیشترین برد اندازه‌گیری ۱۹۵۵ متر برابر با ۰/۲ سانتی‌متر بر ثانیه خواهد بود. بنابراین، دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز برای رودخانه‌های با عرض زیاد دقت بسیار زیادی دارد.

تغییرات دقت اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز نسبت به فواصل بین کمترین و بیشترین برد اندازه‌گیری در شکل ۳ نشان داده شده است (خط آبی). همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت اندازه‌گیری نسبت به فاصله به صورت نمایی تغییر می‌کند، به طوری که استفاده از این روش در فواصل کمتر از ۵۰ متر دقت کمی دارد. در مقابل، در رودخانه‌هایی که فاصله نصب دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی به صورت مورب در طرفین رودخانه بیش از ۲۰۰ متر باشد، دقت اندازه‌گیری سرعت جریان تا میزان ۲ سانتی‌متر بر ثانیه ارتقا می‌یابد. همچنین، تغییرات حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری با به‌کارگیری ام-سیکونس درجه ۷ (نقطه‌چین) و ۱۲ (خط مشکی) نسبت به SNR دریافتی امواج صوتی در شکل ۳ نشان داده شده است. بنابراین، برای فواصل ۵۰ تا ۲۵۰ متر، استفاده از ام-سیکونس درجه ۷ توصیه می‌شود که به ترتیب SNR علامت‌های دریافتی ۵۵ و ۱۰ دسی‌بل است. همچنین، برای رودخانه‌های عریض که فاصله مورب دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی از ۶۰۰ تا دو هزار متر است، استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲ توصیه می‌شود. در این حالت حداکثر SNR علامت‌های دریافتی به ترتیب ۳۵ و ۱۰ دسی‌بل به دست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر ارزیابی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز به منظور محاسبه کمترین و بیشترین برد اندازه‌گیری و همچنین دقت اندازه‌گیری سرعت جریان انجام شد. کمترین برد قابل اندازه‌گیری با استفاده از ام-سیکونس درجه ۷ از ۱۹ متر تا حداکثر کمتر از ۱۲۰۰ متر

می‌شود. مقدار نوفه محیط در اقیانوس، دریا، سواحل و رودخانه‌ها متفاوت است. میودراگ و میومیر در سال ۲۰۱۱ نوفه محیط را برای سه رودخانه بزرگ اروپا اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد در بسامد ۳۰ کیلوهرتز نوفه محیط در رودخانه‌ها از ۷۵ تا ۱۳۰ $(dB \text{ re } 1 \mu Pa^2/Hz)$ متغیر است [۲۲]. بنابراین، در مطالعه حاضر نوفه محیط به طور متوسط ۱۰۵ دسی‌بل در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. ام-سیکونس‌های قابل استفاده در دستگاه تیکه‌نگاری صوتی و افزایش بهره‌ی علامت‌های صوتی

درجه ام-سیکونس (n)	بهره (Gp) دسی‌بل
۷	۲۱
۸	۲۴
۹	۲۷
۱۰	۳۰/۱
۱۱	۳۳/۱
۱۲	۳۶/۱

با توجه به معلوم بودن همه متغیرها به‌جز متغیر بیشترین برد اندازه‌گیری، می‌توان رابطه ۸ را به صورت رابطه ۹ ساده کرد:

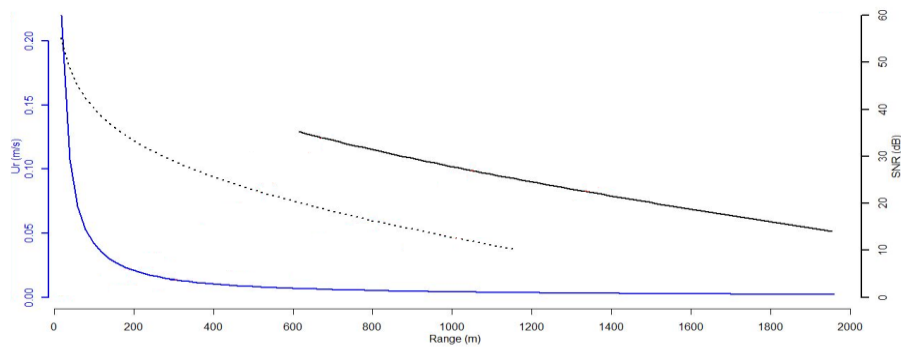
$$20 \log R_{max} + \alpha R_{max} = y \quad (9)$$

در نتیجه، بیشترین برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است:

$$R_{max} = e^{\frac{\ln(10) \left(y - \frac{20 \cdot \text{LambertW} \left(\frac{\alpha e^{y \ln(10)} \ln(10)}{20} \right)}{\ln(10)} \right)}{20}} \quad (10)$$

در نتیجه، با معلوم بودن همه متغیرها (y) برابر ۸۶ دسی‌بل و مقدار α برابر ۰/۰۰۸ دسی‌بل بر متر، بیشترین برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل برای دستگاه تیکه‌نگاری صوتی با بسامد ۳۰ کیلوهرتز و استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲ با بهره ۳۶ دسی‌بل، ۱۹۵۵ متر به دست می‌آید.

نتایج محاسبه دقت اندازه‌گیری سرعت جریان دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز در فواصل مختلف معمولاً، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در هر ۳۰ ثانیه سرعت جریان را اندازه می‌گیرند و برای افزایش دقت



شکل ۳. برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز با به‌کارگیری ام-سیکونس درجه ۷ (نقطه چین)، برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۳۰ کیلوهرتز با به‌کارگیری ام-سیکونس درجه ۱۲ (خط مشکی)، و دقت اندازه‌گیری سرعت جریان (خط آبی)

منابع

- [1]. Sunkpho J, Ootamakorn C. Real-time flood monitoring and warning system, Songklanakarin. J. Sci. Technol. 2011;33:227-235.
- [2]. Sassi MG, Hoitink AJF, Vermeulen B, Hidayat. Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed. Water Resour. Res. 2011;47:1-14.
- [3]. Chen YC. Flood discharge measurement of a mountain river-Nanshih River in Taiwan. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013;17:1951-1962.
- [4]. Bahreinimotlagh M, Roozbahani R, Eftekhari M, Kardanmoghadam H, Kavousi A. Design, Manufacture and the Evaluation of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS). J. Acoust. Soc. Iran. 2018;6:1-11 [In Persian].
- [5]. Munk W, Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography: A Scheme for Large Scale Monitoring. Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. Pap. 1979;26:123-161.
- [6]. Howe BM, Worcester PF, Spindel RC, Ocean acoustic tomography: Mesoscale velocity. J. Geophys. Res. Ocean. 1987;92:3785-3805.
- [7]. Zheng H, Noriaki G, Noguchi H, Ito T, Yamaoka H, Tamura T, et al. Reciprocal Sound Transmission Experiment for Current Measurement in the Seto Inland Sea. , Japan, J. Oceanogr. 1997;53:117-127.
- [8]. Chen M, Syamsudin F, Kaneko A, Gohda N, Howe BM, Mutsuda H, et al. Real-Time Offshore Coastal Acoustic Tomography Enabled With Mirror-Transpond Functionality. , IEEE J. Ocean. Eng. 2018;1-11.
- [9]. Huang CF, Taniguchi N, Chen YH, Liu JY. Estimating temperature and current using a pair of transceivers in a harbor environment. J. Acoust. Soc. Am. 2016;140: EL137-EL142.

محاسبه شد. مشاهده شد که کمترین برد اندازه‌گیری به عوامل کیو-ولیو، بسامد امواج صوتی، طول دیجیت ام-سیکونس و سرعت صوت در آب بستگی دارد. همچنین، در صورت استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲، برد اندازه‌گیری از ۶۰۰ تا کمتر از دو هزار متر تخمین زده شد. بیشترین برد اندازه‌گیری نیز به عوامل تلفات پخش امواج صوتی و جذب امواج صوتی نسبت به فاصله از منبع صوتی، تلفات امواج صوتی ناشی از جهت، بازتاب و تداخل و همچنین ضریب جذب امواج صوتی بستگی دارد. باید توجه داشت که محاسبات انجام‌شده برای شرایط ایده‌آل و بدون در نظر گرفتن وجود رسوبات معلق در آب است. بنابراین، همان‌طور که در بخش مرور منابع تشریح شد، وجود ذرات معلق در آب سبب کاهش برد اندازه‌گیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی می‌شود. در عمل بیشترین برد اندازه‌گیری شده توسط کاوانیشی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به فاصله ۱۶۲۲ متر انجام شده است [۲۳]. نتایج بررسی دقت اندازه‌گیری در فواصل مختلف نیز نشان داد به‌کارگیری این روش در فواصل بیش از ۵۰ متر دقت قابل قبولی دارد، به طوری که در فواصل بیش از ۲۰۰ متر تا مقدار دو سانتی‌متر بر ثانیه بهبود می‌یابد. عوامل مؤثر بر دقت اندازه‌گیری سرعت جریان سرعت صوت در آب، فاصله بین ایستگاه‌های صوتی، بسامد امواج صوتی و تعداد داده‌های میانگین‌گیری شده است.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر برگرفته از طرح پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب است. به این وسیله، نویسندگان از همکاران محترم پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب مؤسسه تحقیقات آب کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- [10]. Kawanisi K, Razaz M, Kaneko A, Watanabe S. Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. *J. Hydrol.* 2010;380:74-81.
- [11]. Bahreinimotlagh M, Roozbahani R, Eftekhari M, Heydari AK, Abolhosseini S. Investigation of Current Status in Haftbarm Lake Using Acoustic Tomography Technology. *J. Water Soil.* 2019;33(1),23-35 [In Persian].
- [12]. Kawanisi K, Kaneko A, Nigo S, Soltaniasl M. New acoustic system for continuous measurement of river discharge and water temperature. *Water Sci. Eng.* 2010;3:47-55.
- [13]. Kawanisi, K, Razaz M, Ishikawa K, Yano J, Soltaniasl M. Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system. *Water Resour. Res.* 2012;48:1-10.
- [14]. BahreiniMotlagh M, Kawanisi K, Zhu X. Acoustic Investigations of Tidal Bores. *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. B1.* 2015;71:139-144.
- [15]. Al Sawaf MB, Kawanisi K, Kagami J, Bahreinimotlagh M, Danial MM. Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 2017;484:11-20.
- [16]. Kawanisi K, Razaz M, Yano J, Ishikawa K. Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines. *Meas. Sci. Technol.* 2013;24:1-10.
- [17]. Bahreinimotlagh M, Kazemi khoshuei A, Roozbahani R, Eftekhari M, Kardan Moghadam H. The first Fluvial Acoustic Tomography System experience for river flow velocity monitoring in Iran. *Iran. J. Soil Water Res.* 2019 [In Persian].
- [18]. Bahreinimotlagh M, Roozbahani R, Eftakhari M, Kardanmoghadam, H, Hasanli MA. Continuous Monitoring of Tidal Bores Using Acoustic Tomography Technique. *J. Oceanogr* 2019;9:57-64 [In Persian].
- [19]. Bahreinimotlagh M, Kawanisi K, Danial MM, Al Sawaf MB, Kagami J. Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. *Flow Meas. Instrum.* 2016;51:30-39.
- [20]. Urick RJ. Principles of underwater sound. 3rd ed. Peninsula Pub, McGraw-Hill, New York. 1983.
- [21]. Yamaguchi K, Lin J, Kaneko A, Yayamoto T, Gohda N, Nguyen HQ, et al. A continuous mapping of tidal current structures in the kanmon strait. *J. Oceanogr.* 2005;61:283-294.
- [22]. Vračar MS, Mijić M. Ambient noise in large rivers (L). *J. Acoust. Soc. Am.* 2011;130:1787-1791.
- [23]. Kawanisi K, Bahreinimotlagh M, Razaz M. Energy Flux Measurement of Tidal Stream in a Strait Using Two Crossing Ultrasonic Transmission Lines. In: 36th World Congr. Int. Assoc. Hydro-Environment Eng. Res. (IAHR-APD 2015), Hague, Netherlands. 2015;1-4.