مقاله

بررسی فناوری‌های صوتی پایش جریان در رودخانه‌ها

مسعود بحرینی مطلق*
استادیار، مهندسی آب،
مؤسسه تحقیقات آب
m.bahreini@wri.ac.ir

رضا روزبهانی
استادیار، مهندسی آب،
مؤسسه تحقیقات آب
rezaroozbahani@gmail.com

مرتضی افتخاری
استادیار ،مهندسی آب،
مؤسسه تحقیقات آب
mortazaeftekhari@gmail.com

سید امیرمحمد حسنلی
دانشجوی مهندسی آب،
دانشگاه تهران
amir.hasanli@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴

چکیده

در کشورهای توسعه یافته انواع مختلفی از دستگاه‌های صوتی جهت پایش منابع آب سطحی توسعه یافته است. به‌طورکلی روش‌های به‌کارگیری امواج صوتی به منظور پایش جریان آب در رودخانه‌ها به سه دسته مبتنی بر قانون داپلر، روش زمان طی شده و روش تیکه‌نگاری صوتی تقسیم می‌شوند. دستگاه‌های مبتنی بر قانون داپلر با نام ای‌دی‌سی‌پی عموما به صورت متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرند و نه تنها سرعت و دبی جریان رودخانه را اندازه‌گیری می‌کنند، بلکه نقشه بستر رودخانه را نیز تهیه می‌کنند. اما مهم‌ترین ایراد این روش عدم اندازه‌گیری پیوسته جریان است. دستگاه‌های مبتنی بر زمان طی شده در دو طرف رودخانه به صورت مورب نصب می‌شوند و با ارسال و دریافت امواج صوتی، سرعت جریان را به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌کنند. مهم‌ترین عیب این روش ارسال امواج صوتی در یک راستای مستقیم از عمق رودخانه است. بنابراین برای تخمین سرعت متوسط رودخانه به محاسبات پیچیده و واسنجی دستگاه نیاز است. همچنین یکی از ملزومات استفاده از این روش تهیه نقشه بستر به منظور تخمین دبی رودخانه است. روش سوم، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی است که مانند روش زمان طی شده در دو طرف رودخانه به صورت مورب نصب می‌شوند و با ارسال و دریافت امواج صوتی سرعت جریان را به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌کنند. در این روش بر خلاف روش زمان طی شده امواج صوتی در کل عمق آب انتشار می‌یابند و سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی بدون نیاز به محاسبات پیچیده و یا واسنجی اندازه‌گیری می‌شود. ایراد این روش نیز مانند روش زمان طی شده، نیاز به نقشه‌برداری بستر رودخانه است.

واژگان کلیدی: پایش رودخانه، روش‌های صوتی، قانون داپلر، روش زمان طی شده، روش تیکه‌نگاری صوتی.

۱. مقدمه

اندازه‌گیری دقیق سرعت و دبی جریان رودخانه یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب هر کشور است. از اواخر قرن نوزدهم پایش جریان رودخانه‌ها در دستور کار کشورهای توسعه یافته قرار گرفت.

این موضوع در کشورهای درحال توسعه کمتر مورد توجه بوده و بسیاری از رودخانه‌های آنها فاقد آمار دبی جریان هستند [۱].

برخی از مهم‌ترین موضوعاتی که در آنها از اطلاعات دبی جریان رودخانه‌ها استفاده می‌گردد، مدیریت حوضه آبریز، تخصیص آب، بهره‌برداری از مخازن سدها، طراحی سازه‌های آبی، پیشبینی و سامانه‌های هشدار سیل، مطالعات ذوب برف، مسائل زیست محیطی، و تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند [۲].

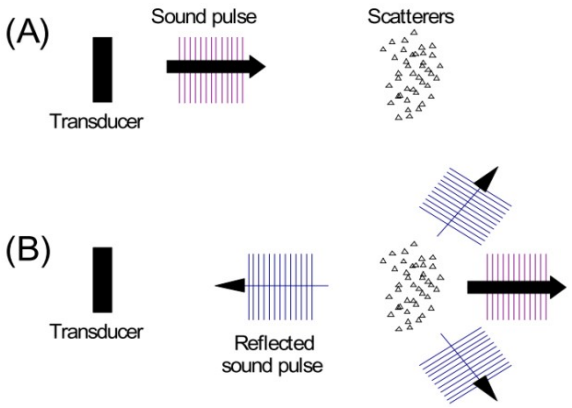
معمول‌ترین روش اندازه‌گیری دبی جریان در رودخانه‌ها استفاده از روش دبی- اشل است [۳]. یکی از معایب این روش، هزینه‌ی بالای نصب و نگهداری ایستگاه‌های دبی- اشل است [۴]. به عنوان نمونه هزینه نصب یک ایستگاه دبی- اشل در امریکا بین ۲۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰۰ دلار و هزینه نگهداری آن نیز سالانه بالغ بر ۲۰۰۰۰ دلار است [۵]. از دهه گذشته تعداد ایستگاه‌های دبی – اشل در امریکا به دلیل کمبود بودجه رو به کاهش بوده است [۶] و برنامه این کشور، تجهیز ایستگاه‌های آب‌سنجی با استفاده از فناوری‌های نوین است.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری سرعت جریان آب استفاده از امواج صوتی است. دستگاه‌های صوتی در سه نوع تولید می‌شوند که هر یک با استفاده از قوانین مختلف دانش صوت، اندازه‌گیری جریان آب را انجام می‌دهند. نوع اول که معمولا با نام ای‌دی‌سی‌پی[۱] شناخته می‌شود با استفاده از قانون داپلر[۲] سرعت جریان آب را اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه‌های نوع دوم با بهره‌گیری از قانون زمان طی شده[۳] سرعت جریان آب را اندازه‌گیری می‌کنند و دستگاه‌های نوع سوم با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی[۴] جریان آب را پایش می‌کنند. در این مطالعه مزایا و معایب هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. ای‌دی‌سی‌پی کف‌خواب[۵]

اصول اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از ای‌دی‌سی‌پی‌ها به این صورت است که امواج صوتی پس از انتشار در آب به ذرات معلق در آب برخورد کرده و قسمتی از آن به سمت دستگاه بازتاب پیدا می‌کند. با فرض یکسان بودن سرعت حرکت ذرات معلق در آب و سرعت جریان آب، مقدار انرژی و بسامد برگشتی ضبط گردیده و با استفاده از قانون داپلر سرعت جریان محاسبه می‌گردد که در شکل ۱ قابل مشاهده است.

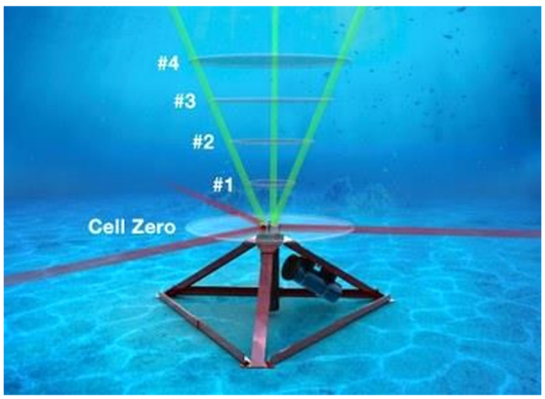


شکل ۱. اصول اندازه‌گیری سرعت جریان با ای‌دی‌سی‌پی [۲۸]

ای‌دی‌سی‌پی‌های کف‌خواب اولین نوع ای‌دی‌سی‌پی هستند که از دهه ۱۹۸۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفتند. این دستگاه‌ها در کف محیط آبی (رودخانه، دریا و اقیانوس) قرار می‌گیرند و امواج صوتی را به صورت عمودی به سمت سطح آب ارسال می‌نمایند که در شکل ۲ آمده است.

ای‌دی‌سی‌پی‌ها سرعت جریان را در سلول‌هایی که بین[۶] نامیده می‌شود به‌طور جداگانه محاسبه می‌کنند. از این‌رو قادرند سرعت جریان در لایه‌های مختلف آب را اندازه‌گیری نمایند و از طرفی با جمع سرعت کل سلول‌ها، سرعت در ستون آب محاسبه می‌شود.

از مهم‌ترین کاربردهای این روش می‌توان به مواردی چون اندازه‌گیری سرعت جریان در عمق‌های مختلف [۷]، اندازه‌گیری موج‌های سطحی[۷] [۸]، اندازه‌گیری امواج درونی[۸] [۹]، اندازه‌گیری آشفتگی جریان[۹] [۱۰] و اندازه‌گیری رسوبات معلق در آب[۱۰] [۱۱] اشاره نمود.



شکل ۲. ای‌دی‌سی‌پی کف خواب [۱۲]

از معایب این فناوری، مشکل قرار دادن ای‌دی‌سی‌پی در کف آب است، زیرا در زمانی که عمق آب زیاد است نیاز به تجهیزات اضافی مثل قایق و غواص است که در شکل ۳ آمده است.

شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری ای‌دی‌سی‌پی‌ها در کف محیط آبی

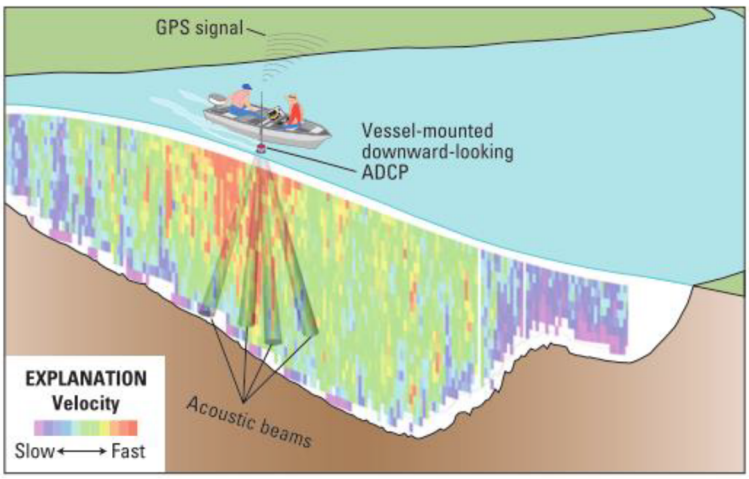
همچنین این نوع دستگاه‌ها قادر به اندازه‌گیری دبی جریان نیستند، زیرا در یک نقطه از کف رودخانه قرار گرفته و یک ستون از آب را اندازه‌گیری می‌کنند. ای‌دی‌سی‌پی‌ها در بسامدهای مختلف مناسب برای استفاده در عمق‌های مختلف تولید می‌شوند. در جدول ۱ مقایسه چهار نوع ای‌دی‌سی‌پی با بسامدهای مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است که اگر عمق آب افزایش و یا کاهش زیادی داشته باشد، ای‌دی‌سی‌پی نصب شده داده‌های مناسبی برداشت نمی‌کند.

جدول ۱. مقایسه چهار نوع ای‌دی‌سی‌پی بر اساس بسامد

اندازه‌گیری سرعت جریان آب				
بسامدهای صوتی (مگاهرتز)	۰/۴	۰/۶	۱	۲
بیشینه‌ی برد اندازه‌گیری (متر)	۹۰–۶۰	۴۰–۳۰	۲۰–۱۲	۱۰–۴
اندازه‌ی سلول‌های اندازه‌گیری (متر)	۸–۲	۴–۱	۰/۴–۳	۰/۲–۱
حداکثر تعداد سلول‌ها	۱۲۸			

۲-۲. ای‌دی‌سی‌پی‌ها متحرک[۱۱]

به منظور اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان در کل مقطع عرضی رودخانه، محققان در دهه ۲۰۰۰ میلادی نوعی از ای‌دی‌سی‌پی را توسعه دادند که به ای‌دی‌سی‌پی متحرک معروف است و با پیمایش بر روی مقطع عرضی قادر به اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان بوده و در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. استفاده از روش ای‌دی‌سی‌پی متحرک جهت اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان [۱۳]

روش‌های مختلف به‌کارگیری ای‌دی‌سی‌پی‌های متحرک در شکل ۵ نشان داده شده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از این روش قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان نقشه بستر رودخانه است. با استفاده از این روش ذرات معلق در آب ، جریان‌های جزر و مدی [۱۴]، دبی جریان رودخانه‌ها [۱۵] و آشفتگی جریان [۱۶] قابل اندازه‌گیری است.

مهم‌ترین عیوب این روش عبارتند از:

- عدم قابلیت اندازه‌گیری پیوسته‌ی جریان،
- نیاز به تجهیزات اضافی نظیر پل کابلی (پل تلفریک)، قایق و غیره،
- نیاز به کاربر متخصص جهت کار و تحلیل داده‌ها.

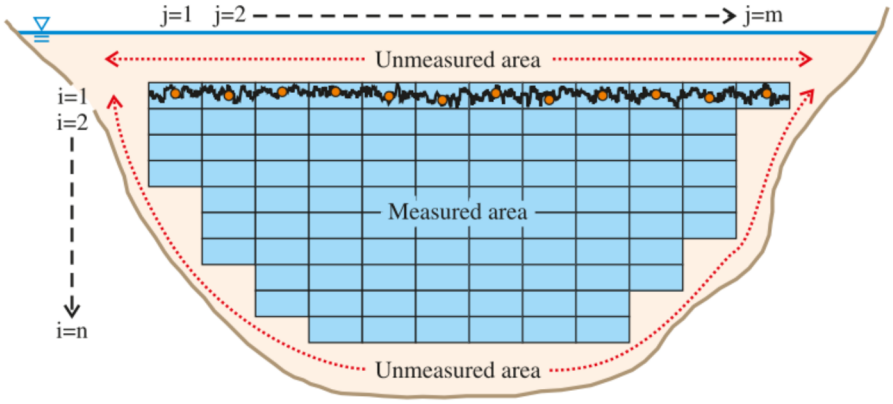
همچنین در شرایط سیلابی استفاده از این روش تقریبا غیرممکن و یا بسیار خطرناک است [۱۷].

شکل ۵. انواع روش‌های به‌کارگیری ای‌دی‌سی‌پی متحرک

یکی دیگر از عیوب ای‌دی‌سی‌پی‌ها، عدم اندازه‌گیری سواحل چپ و راست رودخانه به دلیل کم عمق بودن آب، عدم اندازه‌گیری در نزدیکی سطح آب در مجاورت ترانسدیوسرها

و عدم اندازه‌گیری در مجاورت کف رودخانه است که در شکل ۶ آمده است.

سرعت و دبی جریان در این مناطق در بخش پس پردازش به‌طور خودکار برون‌یابی شده و در محاسبات دبی جریان لحاظ می‌گردند.



شکل ۶. مناطق غیر قابل اندازه‌گیری با استفاده از ای‌دی‌سی‌پی متحرک [۱۹].

۲-۳. ای‌دی‌سی‌پی‌های افقی[۱۲]

با توجه به اینکه ای‌دی‌سی‌پی‌های متحرک قادر به اندازه‌گیری پیوسته دبی جریان نیستند، محققان نسل جدیدی از ای‌دی‌سی‌پی‌ها را طراحی و ابداع کردند که با نام ای‌دی‌سی‌پی‌های افقی شناخته می‌شود و توانایی اندازه‌گیری پیوسته سرعت جریان و تخمین دبی را به صورت پیوسته دارد، این مدل در شکل ۷ دیده می‌شود [۲۰]. با استفاده از این روش، دبی جریان [۲۱]، پایش جریان‌های جزر و مدی [۲۲] و ذرات معلق قابل اندازه‌گیری است. همچنین این روش توانایی اندازه‌گیری بهنگام[۱۳] جریان را دارد و برای پایش لحظه‌ای جریان مناسب است.

شکل ۷. ای‌دی‌سی‌پی افقی [۱۹]

ای‌دی‌سی‌پی‌های افقی دارای محدودیت‌های زیر هستند:

- برد اندازه‌گیری این روش با افزایش غلظت ذرات معلق به شدت کاهش می‌یابد [۲۳]،
- جهت تخمین دبی جریان نیاز به محاسبات پیچیده‌ای مانند روش سرعت شاخص[۱۴] است [۲۲]،
- دقت این روش در جریان‌های پیچیده مثل جریان‌های جزر و مدی کاهش می‌یابد [۲۴].

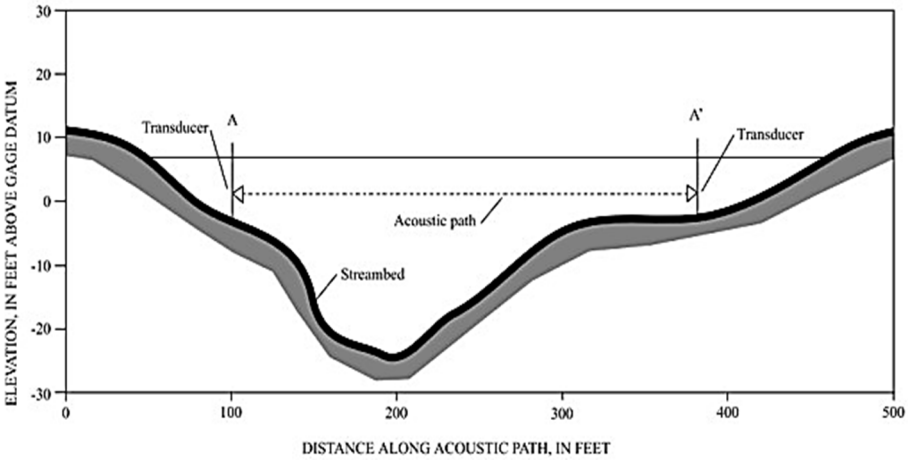
همچنین این نوع روش مناسب استفاده در رودخانه‌های کم عمق نیست.

۲-٤. دستگاه‌های مبتنی بر زمان طی شده[۱۵]

دستگاه‌های مبتنی بر زمان طی شده که به دستگاه‌های ترانزیت‌تایم معروف‌اند به صورت مورب در دو طرف رودخانه قرار می‌گیرند و امواج صوتی با بسامدهای ۱۵ تا ۲۰۰ کیلوهرتز را به سمت یکدیگر ارسال می‌کنند. محاسبه‌ی سرعت جریان در این روش بر اساس زمان رسیدن موج به گیرنده‌ی مقابل است.

مزیت این روش اندازه‌گیری سرعت جریان به صورت پیوسته است و به دلیل اینکه از امواج صوتی با بسامد کمتری نسبت

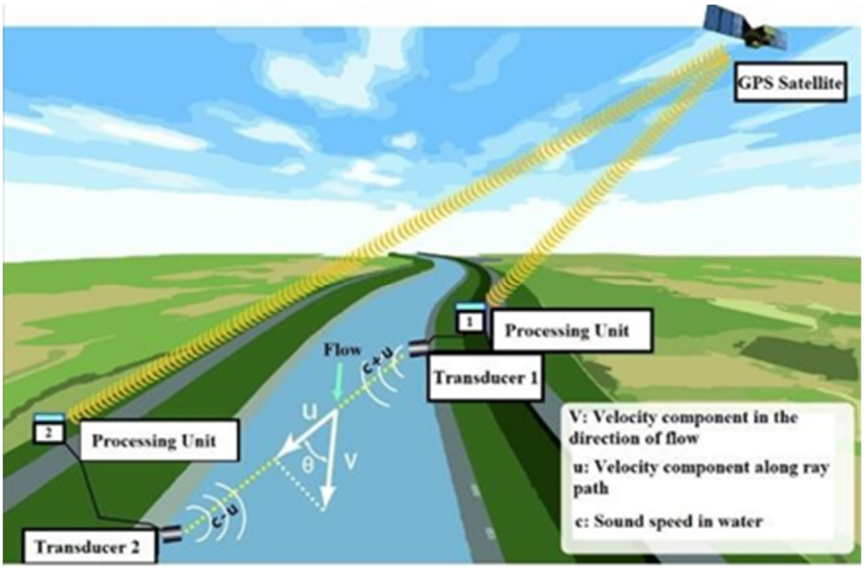
به ای‌دی‌سی‌پی‌های افقی استفاده می‌کنند، برد اندازه‌گیری بیشتری دارند. مهم‌ترین عیب این روش ارسال امواج صوتی در یک راستای مستقیم از عمق رودخانه است به‌طوری که کل عمق آب در مقطع عرضی را پوشش نمی‌دهد، این امر در شکل ۸ مشاهده می‌شود. بنابراین جهت تعیین سرعت متوسط مقطع عرضی رودخانه[۱۶] به محاسبات پیچیده نظیر روش شاخص سرعت نیاز است. برای رفع این محدودیت معمولا در عمق‌های مختلف دستگاه‌های متعددی می‌گذارند تا سرعت جریان در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری شود و سرعت متوسط در مقطع عرضی با استفاده از متوسط‌گیری تخمین زده شود. همچنین برای استفاده از این روش نقشه‌برداری بستر رودخانه[۱۷] لازم است.



شکل ۸. نحوه پخش امواج در روش زمان طی شده [۲۵]

۲-۵. فناوری تیکه‌نگاری صوتی

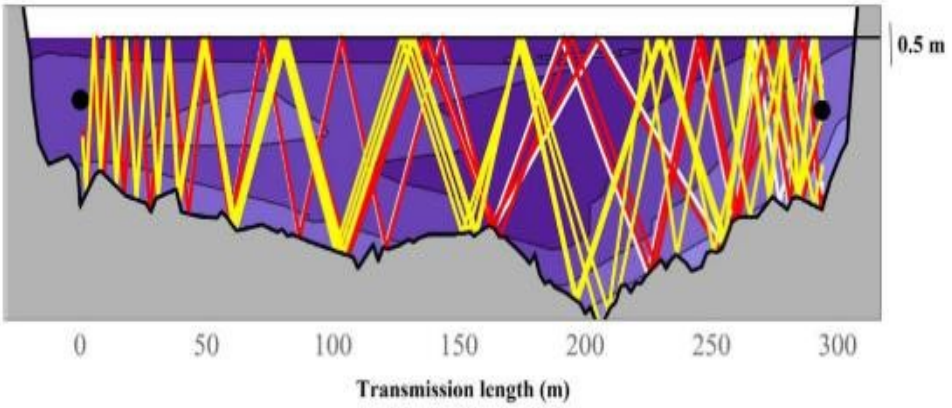
دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی مانند دستگاه‌های ترانزیت‌تایم از قانون زمان طی شده بهره می‌برد، با این تفاوت که در این روش، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با اتصال به ماهواره‌های جی‌پی‌اس هم‌زمان‌سازی شده و در یک زمان واحد امواج صوتی را ارسال می‌کنند، این امر در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۹. نحوه قرارگیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در رودخانه

برخلاف دستگاه‌های ترانزیت‌تایم، انتشار امواج صوتی دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در کل عمق آب انجام می‌شود و امواج صوتی با برخورد به سطح آب و بستر محیط آبی به سمت جلو انتشار می‌یابد [۲۶].

بنابراین جهت اندازه‌گیری سرعت متوسط رودخانه نیازی به محاسبات پیچیده مورد استفاده در روش‌های قبل نیست این امر در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود [۲۷].



شکل ۱۰. نحوه انتشار امواج صوتی در روش تیکه‌نگاری صوتی [۲۶]

این نوع دستگاه‌ها از امواج صوتی با بسامد ۱۰ تا ۵۰ کیلوهرتز استفاده می‌کنند و با استفاده از ماهواره‌های جی‌پی‌اس هم‌زمان‌سازی می‌شوند [۲۸]. تغییرات عمق آب تأثیری بر اندازه‌گیری این روش نمی‌گذارد و نیازی به نصب چند دستگاه در عمق‌های مختلف نیست. مطالعات زیادی جهت اندازه‌گیری بهنگام دما [۲۸]، سرعت [۲۹] و دبی جریان [۳۰] در رودخانه‌های آب شیرین، رودخانه‌های جزر و مدی و دریاچه‌ها انجام شده است. از طرفی نامنظمی بستر رودخانه تأثیری بر اندازه‌گیری با استفاده از این روش ندارد. علاوه‌بر این، روش تیکه‌نگاری صوتی بر خلاف سایر روش‌ها فاقد محاسبات پیچیده است، بنابراین نیازی به کاربر متخصص جهت بهره‌برداری به این نوع دستگاه‌ها نیست [۳۱]. از آنجایی که بسامد امواج صوتی دستگاه‌های تیکه‌نگاری در مقیاس چند ده کیلوهرتز است، این نوع دستگاه‌ها قادر به اندازه‌گیری دبی جریان در رودخانه‌های عریض با عرض بیش از ۵۰۰ متر هستند [۳۲]. مهم‌ترین ایراد روش تیکه‌نگاری صوتی نیاز به عملیات نقشه‌برداری بستر رودخانه است. همچنین به دام افتادن شاخ و برگ گیاهان اطراف ترانسدیوسرها باعث عدم دریافت امواج صوتی ارسال شده از طرف مقابل می‌شوند که سبب اخلال در عملیات اندازه‌گیری می‌شوند.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به اهمیت یافتن مدیریت منابع آب سطحی و همچنین نیاز به آمارهای دقیق جهت اخذ تصمیم‌های راهبردی، بهبود ایستگاه‌های آب‌سنجی و افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها امری ضروری است. با توجه به محدودیت‌های یاد شده برای هر یک از روش‌های اندازه‌گیری دبی جریان، فناوری تیکه‌نگاری صوتی به دلیل عملیاتی بودن در بازه‌ی بزرگ‌تری از عمق‌ها و فواصل طولانی‌تر نسبت به سایر فناوری‌ها و همچنین توانایی ثبت لحظه‌ای و نمایش برخط اطلاعات دارای برتری قابل توجهی است و در صورت بهره‌مندی کشور از این فناوری و تشکیل شبکه‌ای متصل و برخط، می‌توان علاوه‌بر امکان ارزیابی برخط وضعیت سیلابی رودخانه‌ها، راهبردهایی مناسب با شرایط روز منابع آب نیز ارائه داد.

در همین راستا پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی کاربردی بودن در اقلیم‌های گوناگون ایران و همچنین بررسی دقت عملکرد نسبت به سایر روش‌ها مطالعاتی در این زمینه صورت گیرد.

٤. مآخذ

[1] Barrow, C. J., “River basin development planning and management: A critical review”, *World development*, 1998, Vol.26, no.1, pp.171-186.

[2] Hirsch, R. M., & Costa, J. E., “US stream flow measurement and data dissemination improve”, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, , 2004, Vol.85, no.20, pp.197-203.

[3] Rantz, S. E., “*Measurement and computation of streamflow”*, 1982, Vol. 2175, US Department of the Interior, Geological Survey.

[4] Petersen-Øverleir, A., Soot, A., & Reitan, T., “Bayesian rating curve inference as a streamflow data quality assessment tool”, *Water resources management*, 2009, Vol.23, no.9, pp.1835-1842.

[5] Fekete, B. M., & Vörösmarty, C. J., “The current status of global river discharge monitoring and potential new technologies complementing traditional discharge measurements”, *IAHS publ*, 2007, Vol.309, pp.129-136.

[6] Hannah, David M., Siegfried Demuth, Henny AJ van Lanen, Ulrich Looser, Christel Prudhomme, Gwyn Rees, Kerstin Stahl, and Lena M. Tallaksen, "Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs", *Hydrological Processes,* 2011, Vol.25, no.7, pp.1191-1200.

[7] Seim, Harvey E., and Catherine R. Edwards, "Comparison of buoy-mounted and bottom-moored ADCP performance at Gray’s Reef", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,* 2007, Vol.24, no.2, pp.270-284.

[8] Bouferrouk, Abdessalem, Jean-Baptiste Saulnier, George H. Smith, and Lars Johanning, "Field measurements of surface waves using a 5-beam ADCP", *Ocean Engineering,* 2016, Vol.112, p.173-184.

[9] van Aken, Hendrik M., Hans van Haren, and Leo RM Maas, "The high-resolution vertical structure of internal tides and near-inertial waves measured with an ADCP over the continental slope in the Bay of Biscay", *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers,* 2007, Vol.54, no.4, p.533-556.

[10] Lian, Qiang, and ZhiYu Liu, "Turbulence and mixing in a freshwater-influenced tidal bay: Observations and numerical modeling", *Science China Earth Sciences,* 2015, Vol.58, no.11, p.2049-2058.

[11] Defendi, V., V. Kovačević, F. Arena, and Luca Zaggia, "Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets", *Continental shelf research,* 2010, Vol.30, no.8, pp.883-893.

[12] Nortek-AS, Aquadopp HR-Profiler, http://www.nortek-as.com/lib/brochures/aquadopp-profiler/view (accessed 19 April 2019).

[13] Mueller, David S., C. Russell Wagner, Michael S. Rehmel, Kevin A. Oberg, and Francois Rainville, “*Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat”,* Reston, Virginia (EUA): US Department of the Interior, US Geological Survey, 2009.

[14] Chen, Zhigao, Shengping Wang, and Zhenxiang Wang, "A new interpolation scheme for detiding vessel-mounted ADCP data in tidal reach of Yangtze Estuary", *Flow Measurement and Instrumentation,* 2016, Vol.50, pp.185-196.

[15] García, Carlos M., Leticia Tarrab, Kevin Oberg, Ricardo Szupiany, and Mariano I. Cantero, "Variance of discharge estimates sampled using acoustic Doppler current profilers from moving platforms", *Journal of Hydraulic Engineering,* 2012,Vol.138, no.8, pp.684-694.
[16] De Serio, Francesca, and Michele Mossa, "Analysis of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs", *Advances in water resources,* 2015, Vol.81, pp.172-185.
[17] Costa, J. E., R. T. Cheng, F. P. Haeni, N. Melcher, K. R. Spicer, E. Hayes, W. Plant, K. Hayes, C. Teague, and D. Barrick, "Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods", *Water Resources Research,* 2006, Vol.42, no.7.
[18] Chen, Zhigao, Zhenxiang Wang, Yangyang Liu, Shengping Wang, and Chun Leng, "Estimating the flow velocity and discharge of ADCP unmeasured area in tidal reach", *Flow Measurement and Instrumentation,* 2016, Vol.52, pp.208-218.
[19] García, Carlos M., Leticia Tarrab, Kevin Oberg, Ricardo Szupiany, and Mariano I. Cantero, "Variance of discharge estimates sampled using acoustic Doppler current profilers from moving platforms", *Journal of Hydraulic Engineering,* 2012, Vol.138, no.8, pp.684-694.
[20] H. Acoustic, D. Current, Workhorse H-ADCP Workhorse H-ADCP, http://www.teledynemarine.com/workhorse-hadcp?ProductLineID=12 (accessed 19 April 2019).
[21] Sassi, M. G., A. J. F. Hoitink, and B. Vermeulen, "Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed", *Water Resources Research,* 2011, Vol.47, no.6.
[22] Moore, S. A., Jérome Le Coz, David Hurther, and A. Paquier, "On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers", *Continental Shelf Research,* 2012, Vol.46, pp.50-63.
[23] Kawanisi, Kiyosi, Mahdi Razaz, S. Watanabe, A. Kaneko, and Tomoyuki Abe, "An innovative methodology/technology for streamflow observation", 2014, *River Flow* Vol.2010, pp.1741-1748.
[24] Kawanisi, K., M. Razaz, K. Ishikawa, J. Yano, and M. Soltaniasl, "Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system", *Water Resources Research,* 2012, Vol.48, no.5, 2012.
[25] Sloat, John V., and W. Scott Gain, "Application of acoustic velocity meters for gaging discharge of three low-velocity tidal streams in the St. John River Basin, Northeast Florida", *Water-Resources Investigations Report*, 1995, Vol.95, pp.4230.
[۲۶] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م .،زارعیان، م. ج. و فرخ‌نیا، ا.،"ارزیابی مدل انتشار صوت تئوری پرتو در رودخانه با استفاده از فناوری تکیه‌نگاری صوتی"، *مجله علمی پژوهشی صوتیات ایران*، ۱۳۹۷، سری۶، دوره ۲.
[۲۷] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، فرخ‌نیا، ا.، سلطانی اصل، م. و محتشم، ک.، "فناوری تیکه‌نگاری صوتی، ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته سرعت و دمای جریان آب"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳۹۷، سری ۱۴، دوره ۴، صص.۲۷۰-۲۷۱.
[۲۸] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، کاردان مقدم، ح.، زارعیان، م.ج. و محتشم، ک.،"پایش پیوسته دمای آب با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی"، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر*، انتشار برخط ۱۳۹۷/۰۴/۲۵.
[۲۹] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، کاووسکی حیدری، ع.ر.، ابولحسینی، س. و محتشم، ک.، "بررسی وضعیت جریان آب در دریاچه هفت برم با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی"، *نشریه علمی پژوهشی آب و خاک فردوسی مشهد*، ۱۳۹۸، سری ۳۳، دوره ۱.
[۳۰] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م .،کاردان‌مقدم، ح. و حسن‌لی، ا. م. ،"پایش پیوسته جریان‌های مدی با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی."، *مجله علمی پژوهشی اقیانوس‌شناسی*، ۱۳۹۷، سری ۳۶، دوره ۸، صص. ۵۷-۶۴.

[۳۱] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، کاردان‌مقدم، ح. و کاووسی حیدری، ع. ر.،"طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای (FATS)"، *مجله علمی پژوهشی انجمن صوتیات ایران*، ۱۳۸۷، سری ۶، دوره.

[۳۲] بحرینی مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م .،کاردان‌مقدم، ح.، عباسی، م. محتشم، ک.، "امکان‌سنجی پایش سیلاب با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای و تعیین دقت اندازه‌گیری، حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری"، *نشریه علمی و پژوهشی اکوهیدرولوژی*، ۱۳۹۸، دوره ۶، شماره ۳، صص۵۸۵-۵۹۲.

پی‌نوشت:

1. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)
2. Doppler
3. Transit time or travel time
4. Acoustic Tomography Technique
5. Bottom mounted
6. Bin
7. Surface Waves
8. Internal Waves
9. Turbulent
10. Suspended Sediment Concentration (SSC)
11. Moving Boat (Vessel Mounted) ADCP
12. Horizontal ADCP
13. Real-time
14. Index Velocity
15. Transit time
16. Cross-sectional averaged velocity
17. Bathymetry