امکانسـنجی پایش جریانهای خلیجفارس با اسـتفاده از فناوری تیکهنگاری صـوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز

مسعود بحرینی مطلق^۱*، رضا روزبهانی^۲، مرتضی افتخاری^۳ ، حمید کاردان مقدم ^۴، مهدی خوشحالی^۵، کمال محتشم^۶

"* استادیار، موسسه تحقیقات آب، m.bahreini@wri.ac.ir

۲ استادیار، موسسه تحقیقات آب، rezaroozbahani@gmail.com

^۳ استادیار، موسسه تحقیقات آب، mortazaeftekhari@gmail.com

^{*} كارشناس پژوهشى، موسسه تحقيقات آب، آدرس پست الكترونيكى hkardan@ut.ac.ir

^۵ دانش آموخته دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه فیزیک حالت جامد، m.khoshhali@gmail.com

^۶ شرکت سنج آب فناوری خلیج فارس، ipats@chmail.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در کشورهای توسعهیافته فناوری تیکهنگاری صوتی به عنوان یکی از ابزارهای نوین پایش منابع آب در اقیانوسها، د رودخانهها مورد استفاده قرار میگیرد. در این مطالعه دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز بهمنظور پایش جریانهای دریایی در مقیاس چند کیلومتری، مورد بررسی قرار گرفته است. با توسعه رابطه انتشـار امواج صـوتی	<i>ناریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸
رابطه جدیدی ارائه شد و حداکثر برد اندازه گیری این روش محاسبه گردید. نتایج نشان داد حداقل و حداکثر برد انداز این نوع دستگاه به ترتیب ۵۷ تا ۱۸۰۰۰ متر است. همچنین مشاهده شده که اندازه گیری سرعت جریان در فواصل	<i>کلمات کلیدی:</i> دســـتگاهتیکـهنگاری صــوتی ۱۰
۲۰۰۰ متر دارای دقت بهتر از ۰/۱ سانتیمتر بر ثانیه است. تاثیر انتخاب ام- سیکنونس مناسب با توجه به فاص ایستگاههای صوتی یکی دیگر از موضوعات مهم به کارگیری روش تیکهنگاری صوتی بهمنظور داشتن بهترین عملکره پیشنهاد میشود جریانهای خلیجفارس با استفاده از روش تیکهنگاری صوتی اندازه گیری شود.	کیلوهرتز حداقل و حداکثر برد اندازهگیری دقت اندازهگیری سرعت جریان

Feasibility study of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for current monitoring in the Persian Gulf

Masoud Bahreinimotlagh^{1*}, Reza Roozbahani², Mortaza Eftekhari³, Hamid Kardanmoghadam⁴, Mahdi Khoshhali⁵, Kamal Mohtasham⁶

^{1*} Assistant Professor, Water Research Institute; m.bahreini@wri.ac.ir

² Assistant Professor, Water Research Institute; rezaroozbahani@gmail.com

³ Assistant Professor, Water Research Institute; mortazaeftekhari@gmail.com

⁴ Scientific researcher, Water Research Institute; hkardan@ut.ac.ir

⁵ Graduated of Solid Physics, K. N. Toosi University of Technology; m.khoshhali@gmail.com

⁶ Sanjab Fanavari Khalije Fars Ltd; ipats@chmail.ir

ARTICLE INFO ABSTRACT

<i>Article History:</i>	Acoustic To
Received: 20 May. 2019	monitoring
Accepted: 29 Nov. 2019	(CATS) is p
<i>Keywords:</i> 10-kHz Coastal Acoustic Tomography Technique Minimum and Maximum Operational Ranges Velocity Resolution	(CATS) is p evaluated th was develop kHz CAT sy and maximu resolution is Sequence du

Acoustic Tomography (AT) technique is widely used in developed countries for water resources monitoring of the oceans, seas, and rivers. The 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System (CATS) is previously applied to monitor coastal seas in the scale of kilometers. In this study, we evaluated the capability of the 10-kHz CAT system. The equation of sound propagation in water was developed to introduce a new equation to estimate the maximum operational range of 10-kHz CAT system. The results showed that with the assumption of clear seawater, the minimum and maximum operational ranges are 57 and 18000 m, respectively. Moreover, the velocity resolution is better than 0.1 cm/s in the range of greater than 7000 m. Choosing a suitable M Sequence due to the distances between acoustic stations is another point of operation to have the best performance. It is suggested that scientists apply this technique to monitor the Persian Gulf currents.

۱ – مقدمه

فناوری تیکهنگاری صوتی ' به عنوان یکی از روشهای سنجش از
 فناوری تیکهنگاری صوتی ' به عنوان یکی از روشهای سنجش از
 دور، ابزاری قدرتمند جهت پایش منابع آب سطحی است [1]. در
 این روش با استفاده از اندازه گیری زمان سیر امواج صوتی در آب،
 متغیرهایی نظیر دما و سرعت جریان بهدست میآید [2]. همچنین
 مقطع محیط آب انتشار می
 از روش تیکهنگاری صوتی جهت صحتسنجی مدلهای انتشار امواج
 موده. همان طور که مسال اور شاد است.
 میده. همان طور که مسال اور موتی در آب،
 مقطع محیط آب انتشار می
 موتی در آب،
 موتی در آب استاده می شود [2]. فناوری تیکهنگاری صوتی می موتی با اتصال به ماهواره موتی در آب،
 موتی در آب استفاده می شود [2]. فناوری تیکهنگاری صوتی موتی با اتصال به ماهواره از مواج صوتی را در کل مقطع در از آب استاده از آب در کی مقطع دریایی از بسامدهای ۲۰ هراز [6] و ۲۰ کیلوهرتز [7]، و به منظور پایش رودخلنه ها از
 موتی در آب استفاده می کند.

ای وی ام^۲ (با بسامدهای ۳۵ کیلوهر تز تا ۲ مگاهر تز)، قابلیت انتشار امواج در فواصل طولانی تری را دارد. همچنین بر خلاف دستگاههای ای دی سی پی و ای وی ام که الگوی انتشار امواج صوتی در راس تای یک خط مستقیم انجام می شود، در این روش امواج صوتی در کل مقطع محیط آب انتشار می یابد و نیازی به پس پردازش های پیچیده نیست. شکل ۱ نحوه انتشار امواج صوتی در هر سه روش را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود دستگاههای تیکه نگاری صوتی با اتصال به ماهواره های جی پی اس همزمان سازی شده و امواج صوتی را در کل مقطع محیط آب انتشار می دهند [10].



شکل ۱ – الگوی انتشار امواج صوتی با ابزارهای الف) ایویام، ب) ای دی سی پی افقی، و ج) تیکهنگاری صوتی [10].

روش تیکهنگاری صوتی توسط مونک و همکاران ۱۹۷۹ بهمنظور پایش دما و سرعت جریانهای اقیانوسی ابداع شد [11]. دستگاههای تیکهنگاری صوتی اقیانوسی¹ با ارسال امواج با بسامد کمتر از ۱ کیلوهرتز قادر به پایش جریانهای اقیانوسی در فواصل چند هزار کیلومتری هستند [12]. در سالهای اخیر نیاز به پایش جریانهای دریایی در مقیاس چند ده کیلومتری و اندازه گیری سرعت صوت در آب، دما و سرعت جریانهای دریایی افزایش یافته است. بدین منظور دستگاههای تیکهنگاری صوتی دریایی[°] توسعه یافتهاند [13].

ژنگ و همکاران ۱۹۹۷، اولین نمونه دستگاه تیکهنگاری صوتی ۱۰ کلیوهرتز را ابداع کردند. ایشان با استفاده از دو دستگاه و به کارگیری ام- سیکونیس درجه ۱۰، جریانهای دریای ستوآیلند^۲

ژاپن را به مدت ۵ ساعت اندازه گیری کردند. دو ایستگاه صوتی به فاصله ۵/۸ کیلومتر از یکدیگر قرار گرفتند. به منظور صحتسنجی آزمایش با استفاده از یک عدد دستگاه ای دی سی پی متحرک که توسط کشتی در راستای ارسال امواج صوتی دستگاههای تیکهنگاری صوتی در حرکت بود، سرعت جریان آب اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که هر دو روش سرعت جریان را با دقت بالایی اندازه گیری می کنند، با این تفاوت که دستگاههای تیکهنگاری صوتی به صورت ثابت نصب شده و قادرند دادههای جریان را به صورت پیوسته اندازه گیری کنند. در حالیکه به کار گیری دستگاههای ای دی سی پی نیزازمند کشتی است و متعاقباً اندازه گیری پیوسته جریان امکان پذیر نیست. بنابراین ایشان روش تیکهنگاری صوتی را برای مناطقی که

بار ترافیکی سنگین کشتیها وجود دارد و یا در مناطقی که فعالیتهای ماهیگیری انجام میشود توصیه کردند [14].

در ادامه ژنگ و همکاران ۱۹۹۸، دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز را به منظور لندازه گیری در فواصل طولانی تر مورد آزمایش قرار دادند. ایشان با استفاده از ام-سیکونیس درجه ۱۱ سرعت جریانهای دریایی را در فاصله ۱۱ کیلومتری با موفقیت لندازه گیری کردند و با دادههای ای دیسی پی متحرک مقایسه کردند. نتایج نشان داد دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز ابزاری کارآمد به منظور پایش پیوسته جریانهای دریایی در فواصل چند کیلومتری است [15].

لین و همکاران ۲۰۰۵، با استفاده از ۸ دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی، ساختار جریانهای جزر و مدی در تنگه کانمون^۷ که به فاصله حداکثر ۲/۵ کیلومتر از یکدیگر قرار داده شده بودند را مورد پایش قرار دادند. همچنین ایشان دادههای برداشتشده را در داده گواری[^] مدل اقیانوسی پرینستون^۴ به کار بردند. نتایج نشان داد دادههای اندازه گیری شده توسط این روش به منظور داده گواری در مدلهای رایانه ای قابل استفاده است. ایشان دستگاه فوق را به دلیل تهیه دادههای پیوسته جریان، و همچنین هزینه پایین اجرای عملیات داده برداری توصیه کردند [16].

لیو و همکاران ۲۰۱۰، هفت دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۲۰ کیلوهرتز با ام- سیکونس درجه ۱۲ را در خلیج ژیتویلنگ' چین نصب کردند و با استفاده از روش مسائل معکوس''، جهت تغییرات جریانهای جزر و مدی در آن خلیج را به صورت پیوسته پایش کردند. حداکثر فاصله بین ایستگاههای صوتی حدود ۲۰۰۰ متر بود. نتایج نشان داد که روش تیکهنگاری صوتی قابلیت پایش دو-بعدی جریانهای دریایی را دارد. همچنین این روش برای پایش بهنگام جریانهای دریایی و داده گواری مدلهای ریاضی بهمنظور پیشرینی های کوتاهمدت جریان قابل استفاده است [17].

ژآنگ و همکاران ۲۰۱۵، با استفاده از ۴ دستگاه تیکهنگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز جریانهای فرازجوشی^{۱۲} و همچنین جریانهای جزر و مدی روزانه^{۱۳} در خلیج هیروشیما را اندازهگیری کردند. فاصله ایستگاههای صوتی بین ۳/۹ تا ۸/۹ کیلومتر متغیر بود. نتایج نشان داد روش تیکهنگاری صوتی ابزاری بسیار قدرتمند جهت پایش تغییرات سریع جریانهای فرازجوشی و جزر و مد درونی دریاها است [18].

هانگ و همکاران ۲۰۱۶، با استفاده از دو دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز تغییرات دما و سرعت جریان را در اسکله باچیمن^{۱۰} تایوان اندازه گیری کردند. دستگاههای تیکهنگاری صوتی از ام- سیکونس درجه ۱۰ استفاده کردند و فاصله بین آنها ۴۸۸ متر بود. دادههای سرعت با دادههای دستگاه ای دیسی پی افقی^{۱۰} و دادههای دما با حسگرهای دما مقایسه شد. نتایج نشان

داد که دستگاه تیکهنگاری صوتی بهمنظور پایش جریان در اسکلهها کارآمد است [19].

سیامسودین و همکاران ۲۰۱۷، دو دستگاه تیگهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با ام- سیکونس درجه ۱۲ را در فاصله ۴/۶ کیلومتری از یکدیگر در تنگه بالی اندونزی قرار دادند و نیمرخ عمودی جریانهای جزر و مدی را لندازه گیری کردند. نتایج نشان داد با استفاده از این روش میتوان تغییرات سرعت و دمای جریانهای دریایی را در عمقهای مختلف اندازه گیری کرد [7].

اگرچه اندازه گیری های زیادی با استفاده از دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهر تز در مناطق مختلف انجام شده است، اما تاکنون روابط حاکم در این فناوری، تاثیرات ام-سیکونس و همچنین قابلیت های این روش مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه قابلیت های دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهر تز شامل حداقل و حداکثر برد اندازه گیری، تاثیر انتخاب مناسب ام- سیکونس بر برد لندازه گیری و همچنین دقت لندازه گیری سرعت جریان در فواصل مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

۲ - روابط اساسی حاکم در روش تیکهنگاری صوتی

امواج صوتی در دستگاههای تیکهنگاری صوتی توسط یک سری اعداد تصادفی به نام ام- سیکونس^۲ کدگذاری می شوند تا قدرت ارسال بیشتری داشته باشند و نوفههای محیط^{۱۷} باعث کاهش سیگنالهای صوتی نشوند [20]. دستگاههای تیکهنگاری صوتی از ام- سیکونس درجه ۷ تا درجه ۱۲ استفاده می کنند [21]. طول امواج صوتی کدگذاری شده (L_{M-Seq}) با استفاده از ام- سیکونیس، از رابطه 1 – 2 به دست می آید که n درجه ام- سیکونس است و باعث افزایش بهره (*Gp*) امواج صوتی دریافتی می شود (رابطه ۱):

 $Gp = 10 Log L_{M-Seq} \tag{1}$

دستگاههای تیکهنگاری صوتی، امواج صوتی کدگذاری شده با استفاده از ام- سیکونس را به صورت سه سیکل در هر دیجیت^۱ به کار میبرد که کیو- ولیو^{۱۰} نامیده میشود. حداقل برد اندازه گیری 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 زیر محاسبه میشود [9]:

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

که Q - value مقدار ۲۰۰۰ هرتز ، L_{M-Seq} طول ام- سیکونس و c سرعت صوت در آب است که ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض می شود. امواج صوتی انتشاریافته در آب نسبت به فاصله از منبع صوت تضعیف می شوند. یوریک در سال ۱۹۸۳ رابطه ساده زیر را برای محاسبه افت انتشار 7 امواج صوتی نسبت به فاصله از منبع صوتی ارائه کرد [22].

$$PL = 20 \log R + \alpha R + L_0 \tag{7}$$

که به ترتیب جملات اول و دوم در سمت راست رابطه مربوط به تلفات پخش امواج صوتی ^{۲۱} و جذب امواج صوتی ^{۲۲} نسبت به فاصله از منبع صوتی (R) است. همچنین L_0 تلفات امواج صوتی بر اثر جهت^{۲۲}, بازتاب ^{۲۲}, تداخل^{۲۰} و غیره است که مقدار ۱۰ دسیبل فرض میشود. ضریب جذب امواج صوتی (α) در آب شفاف (با فرض عدم وجود ذرات معلق) از رابطه زیر به دست میآید [23]:

$$\alpha_{w} = \alpha \left(\frac{dB}{m}\right)$$

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

که f بسامد امواج صوتی به هرتز است. بنابراین شدت امواج صوتی رسیده به دستگاه مقابل^{۲۲} برابر است با تفاضل شدت امواج صوتی منبع صوتی (SL)^{۲۷} و تلفات انتشار امواج صوتی (PL):

$$RL = SL - PL \tag{(a)}$$

رابطه ۵ برای دستگاههای تیکهنگاری صوتی بهصورت زیر بازنویسی می شود؛

$$SNR = SL - 20 \log R - \alpha R - L_0 + Gp - Na \qquad (\mathscr{P})$$

که Na مجموع نوفه محیط و دستگاه تیکهنگاری صوتی، Gp بهره دستگاه، SL شدت تراز دستگاه تیکهنگاری صوتی بر حسب dB relative to 1 µPa at 1 m و ۲^۸SNR نسبت سیگنالهای دریافتشده به نوفه محیط یا همان RL است.

دقت اندازه گیری سرعت جریان با استفاده از روش تیکهنگاری صوتی تابعی از سرعت صوت در آب، فاصله بین دستگاههای تیکهنگاری صوتی، و بسامد امواج صوتی است. در این روش برای افزایش دقت اندازه گیری میانگین متحرک چند داده انجام می شود که دقت اندازه گیری را به میزان $\frac{1}{\sqrt{n}}$ افزایش می دهد.

$$Ur = \frac{c^2}{2L} \times \frac{1}{2f} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \tag{Y}$$

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 میانگین گیری متحرک است.

۳ – نتايج و بحث

۱–۳ حداقل برد اندازه گیری دستگاه تیکهنگاری ۱۰ کیلوهر تز بر اساس رابطه (۲) حداقل برد اندازه گیری، 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. همان طور که مشاهده میشود کمترین طول، ۱۲۷ دیجیت برای ام- سیکونس درجه ۷ است. بنابراین با فرض مقدار سرعت صوت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، حداقل برد اندازه گیری دستگاه تیکهنگاری صوتی ۱۰ کیلوهر تز با استفاده ام- سیکونس درجه ۷ برابر ۵۷ متر است.

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

M-Sequence Degree	Maximum Period (L)	
(n)	digit	
7	<u>127</u>	
8	255	
9	511	
10	1023	
11	2047	
12	4095	

۲-۳ حداکثر برد اندازه گیری دستگاه تیکهنگاری ۱۰ کیلوهر تز با توجه به رابطه (۶)، حداکثر برد اندازه گیری در شرایط ایده آل و آب شفاف به صورت رابطه (۸) محاسبه می شود:

$$20 \ Log \ R_{max} + \alpha R_{max} = SL - L_0 + Gp - Na \qquad (\Lambda) - SNR \ Threshold \qquad (\Lambda)$$

که SL برای دستگاههای تیکهنگاری صوتی ۱۹۰ (dB relative to 1 ۱۹۰ کیلوهرتز ۰/۰۰۱) ۰/۰۰۱ به برای امواج صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز ۱۰/۰۰ ام دسیبل بر متر است، L₀ برابر ۱۰ دسیبل، و *Gp* برای ام سیکونسهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. بنابراین برای رسیدن به حداکثر برد اندازه گیری بایستی از درجه ۱۲ و بهره ۳۶ دسیبل استفاده نمود. *Na* که مجموع نوفه دستگاه (۱۵ دسی بل) و نوفه محیط در شرایط ترافیک سنگین عبور کشتیها (۸۵ دسی بل)

است ۱۰۰ دسی بل در نظر گرفته می شود [14]. SNR Threshold است که کمترین نسبت سیگنالهای دریافت شده به نوفه محیط است که دستگاههای تیکه نگاری صوتی می توانند سیگنالهای رسیده شده از SNR Threshold از نوفه محیط تفکیک کنند. معمولاً SNR Threshold برای دستگاههای تیکه نگاری صوتی ۱۰ دسی بل در نظر گرفته می شوند [6].

جدول ۲ – ام- سیکونسهای قابل استفاده در دستگاه تیکهنگاری صوتی

و افزایش بهره سیگنالهای صوتی		
M-Sequence Degree (n)	Gain (Gp) dB	
7	21	
8	24	
9	27	
10	30.1	
11	33.1	
12	<u>36.1</u>	

با توجه به معلوم بودن همه متغیرها به جز متغیر حداکثر برد اندازه گیری، می توان رابطه ۸ را به صورت رابطه (۹) ساده کرد:

$$20 \log R_{max} + \alpha R_{max} = y \tag{9}$$

در نتیجه حداکثر برد اندازه گیری در شرایط ایده آل از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$R_{max} = e^{\frac{\ln(10)\left(y - \frac{20 \, Lambert W\left(\frac{\alpha \, e^{y \ln(10)} \ln(10)}{20}\right)}{\ln(10)}\right)}{20}})$$
(1.1)

در نتیجه با معلوم بودن همه متغیرها (۷) و مقدار α برابر ۰/۰۰۱ دس<u>ی</u>بل بر متر، حداکثر برد لندازه گیری در شرایط ایده آل برای دستگاه تیکه نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهر تز و استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲ با بهره ۳۶ دسوبل، ۱۸۰۰۰ متر به دست می آید.

دستگاههای تیکهنگاری صوتی دریایی قابلیت اندازه گیری سرعت جریان در هر ۳۰ ثانیه را دارند و برای افزایش دقت اندازه گیری سرعت، تعداد ۲۰ داده را با میانگین گیری متحرک محاسبه میکنند. بنابراین در حالت 20 = n تفکیک زمانی اندازه گیریها ۱۰ دقیقه خواهد بود. با فرض ثابت بودن سرعت صوت برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و بسامد ۱۰۰۰۰ هرتز، دقت دستگاه برای کمترین برد اندازه گیری ۵۷ متر، برابر با ۲۲ سانتیمتر است که نشان میدهد به کار گیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در فواصل کوتاه دارای دقت پایینی است. این درحالیست که با افزایش فاصله

افزایش قابل توجهای مییابد، به طوری که در فاصله ۱۰۰۰ متری دقت اندازه گیری ۱ سانتیمتر بر ثانیه و در فاصله ۲۰۰۰ متری به ۱/۶ سانتیمتر برثانیه میرسد.

در شکل ۲ نسبت تغییرات اندازه گیری سرعت جریان از نظر دقت با استفاده از دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با رنگ آبی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده نشان میدهد که رابطهی بین دقت اندازه گیری نسبت به فاصله دستگاهها بصورت نمایی تغییر می کند. تحلیل رابطه نمایی نشان می دهد که در فاصله ۳۰۰ متری، دقت اندازه گیری این روش ۴ سانتیمتر بر ثانیه است، درحالیکه اگر فاصله بین ایستگاههای صوتی ۷۰۰۰ متر باشد، دقت اندازه گیری سرعت جریان بهتر از ۰/۱ سانتیمتر بر ثانیه خواهد بود. همچنین بررسی تغییرات برد اندازه گیری با استفاده از ام-سیکونس نسبت به SNR دریافتی از امواج صوتی در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل اندازه گیری با درجه ۷ (نقطهچین مشکی)، با درجه ۱۰ (خطچین مشکی) و با درجه ۱۲ (خط مشکی) نسبت به SNR ترسیم شده است. تحلیل نتایج نشان میدهد که استفاده از ام-سیکونس درجه ۷ برای فواصل نصب بین ۴۰۰ تا ۹۰۰۰ مناسب است. در این فواصل میزان SNR دریافتی ۶۵ و ۱۰ دسیبل است. با به کارگیری ام- سیکونس درجه ۱۰، بهترین فاصله نصب ایستگاههای صوتی به منظور اندازه گیری سرعت جریان بین ۴۶۰ تا ۱۴۰۰۰ متر خواهد بود. میزان SNR دریافتی در این حالت بین ۵۶ تا ۱۰ دسی بل است. استفاده از بزرگترین درجه ام- سیکونس (درجه ۱۲)، در فاصله نصب بین ۱۸۰۰ تا ۱۸۰۰۰ متر توصیه می شود. در این فواصل نصب، مقدار حداکثر SNR دریافتی به ترتیب ۴۸ و ۱۰ دسیبل بدست آمده است. محاسبات و اندازه گیریهای انجام شده در شرایط ایدهآل یعنی بدون وجود مواد معلق انجام شده است. وجود هر گونه مواد معلق و ناخالصی سبب کاهش برد اندازه گیری خواهد شد.

مدل مفهومی به کارگیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود فاصله بین دو ایستگاه صوتی از ۵۷ متر تا ۱۸ کیلومتر قابل تنظیم است. پردازشگرها در خارج از آب درون یک جعبه قرار می گیرند و با استفاده از باتری تغذیه می شوند. باتری ها نیز توسط صفحات خورشیدی شارژ می گردند. تراگذارها (ترانسدیوسر) توسط یک کابل به پردازش گرها متصل شده و درون آب قرار می گیرند. همچنین تراگذارها توسط یک وزنه سنگین به کف دریا متصل می شوند و در نهایت امواج صوتی به سمت یکدیگر ارسال می شوند.



شکل ۲ – برد اندازهگیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با به کارگیری ام– سیکونس درجه ۷ (نقطه چین)، برد اندازهگیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با به کارگیری ام– سیکونس درجه ۱۲ (خطچین مشکی)، برد اندازهگیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با به کارگیری ام– سیکونس درجه ۱۲ (خط مشکی)، و دقت اندازهگیری سرعت جریان (خط آبی).



شکل ۳ – مدل مفهومی به کار گیری دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهر تز.

۴ – نتیجهگیری

در این مطالعه ارزیابی دستگاه تیکهنگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با رویکرد محاسبه حداقل و حداکثر برد اندازه گیری و ارزیابی دقت اندازه گیری سرعت جریان آب در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی میزان ام-سیکونس درجه ۷ تا ۱۲ بر روی برد اندازه گیری نشان داد که فواصل ۵۷ متر تا حداکثر کمتر از ۹۰۰۰ متر برای ام-سیکونس درجه ۷ و فواصل ۱۸۰۰ متر تا حدود ۱۸۰۰۰ متر برای ام-سیکونس درجه ۱۲ مناسب است. بر این اساس در شرایط ایده آل با فرض عدم وجود ذرات معلق در آب، حداقل و حداکثر برد قابل اندازه گیری ۵۲ تا ۱۸۰۰۰ متر برآورد می گردد.

شایان ذکر است در طبیعت عوامل متعددی نظیر وجود رسوبات معلق در آب، نوفههای کشتیها و آبزیان، طوفان و غیره سبب کاهش برد اندازه گیری می شود. از این روی، بررسی مطالعات پیشین نشان داد که در عمل، حداکثر برد اندازه گیری شده توسط لیو و همکاران در سال ۲۰۱۰ به فاصله تقریبا ۱۲۰۰۰ متر انجام شده است [17]. با توجه به هزینههای بالای اندازه گیریهای میدانی با سایر روشها از جمله ای دی سی پیهای متحرک و از طرفی با وجود فناوری تیکهنگاری صوتی در ایران، به کار گیری این روش به منظور پایش جریانهای دریایی در خلیج فارس و دریای عمان توصیه می شود.

- 3- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Zareian, M. J. and Farokhnia, A., (2019), Evaluation of underwater acoustic propagation model (Ray theory) in a river using Fluvial Acoustic Tomography System, Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 6, p.29–38, [In Persian].
- 4- Baggeroer, A. and Munk, W., (1992), *The Heard Island Feasibility Test*, Physics Today, Vol. 45, p.22–30.
- 5- Taniguchi, N., Kaneko, A., Yuan, Y., Gohda, N., Chen, H., Liao, G., Yang, C., Minamidate, M., Adityawarman, Y., Zhu, X. and Lin, J., (2010), Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the northern part of the Luzon Strait, Geophysical Research Letters, Vol. 37,.
- 6- Chen, M., Syamsudin, F., Kaneko, A., Gohda, N., Howe, B. M., Mutsuda, H., Dinan, A. H., Zheng, H., Huang, C.-F., Taniguchi, N., Zhu, X., Adityawarman, Y., Zhang, C. and Lin, J., (2018), *Real-Time Offshore Coastal Acoustic Tomography Enabled With Mirror-Transpond Functionality*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, p.1–11.
- 7- Syamsudin, F., Chen, M., Kaneko, A., Adityawarman, Y., Zheng, H., Mutsuda, H., Hanifa, A. D., Zhang, C., Auger, G., Wells, J. C. and Zhu, X., (2017), *Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission*, Acoustical Science and Technology, Vol. 38, p.246–253.
- 8- 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 system, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 484, p.11–20.
- 9- Bahreinimotlagh, 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, Vol. 51, p.30–39.
- 10- Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K., Sawaf, M. ., Roozbahani, R., Eftekhari, M. and Kazemi Khoshuie, A., (2019), Continuous Streamflow Monitoring in Shared Watersheds Using Advanced Underwater Acoustic Tomography System: A Case Study on Zayanderud River. Environmental Monitoring Assessment.
- 11- Munk, W. and Wunsch, C., (1979), Ocean Acoustic Tomography: A Scheme for Large Scale Monitoring, Deep Sea Research Part A.

همچنین این روش برای اندازه گیری جریان در رودخانههای عریض جزر و مدی قابل استفاده است [24].

۶ – کلید واژگان

1- Acoustic Tomography Technique 2-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

3-AVM (Acoustic Velocity Meter)

4-Ocean Acoustic Tomography System

5-Coastal Acoustic Tomography Technique

6-Seto Inland Sea

- 7-Kanmon Strait
- 8-Data Assimilation
- 9-POM (Princeton Ocean Model)
- 10-Zhitouyang Bay
- 11-Inverse Problem
- 12-Coastal upwelling
- 13-Diurnal internal tides
- 14-Bachimen Harbor
- 15-Horizontal ADCP
- 16-M Sequence
- 17-Ambient noise
- 18-Digit
- 19-Q value
- 20-Propagation Loss (PL)
- 21-Spreading Loss
- 22-Absorption Loss
- 23-Directivity
- 24-Reflection
- 25-Interference
- 26-RL (Receive Level)
- 27-Sound Level dB relative to 1μ Pa at 1 m.
- 28-Signal to Noise ratio

۷- مراجع

- 1- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Heydari, A. K. and Abolhosseini, S., (2019), *Investigation of Current Status in Haftbarm Lake Using Acoustic Tomography Technology*, Journal of Water and Soil, Vol. 33, p.[In Persian].
- 2- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Farokhnia, A., Soltaniasl, M. and Mohtasham, M., (2019), *Technical Note: Acoustic Tomography Technology; a Useful Tool for Continuous Monitoring of Flow Velocity and Temperature*, Iran-Water Resources Research, Vol. 14, p.271–275, [In Persian].

internal tides in Hiroshima Bay, Japan Chuanzheng, Journal of Geophysical Research: Oceans Research, p.1152–1172.

- 19- Huang, C.-F., Taniguchi, N., Chen, Y.-H. and Liu, J.-Y., (2016), *Estimating temperature and current using a pair of transceivers in a harbor environment*, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 140, p.EL137– EL142.
- 20- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardanmoghadam, H. and Kavousi, A., (2018), *Design, Manufacture* and the Evaluation of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS), Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 6, p.1-11 [In Persian].
- 21- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardanmoghadam, H., Abbasi, M. and Mohtasham, K., (2019), *Feasibility* study of Fluvial Acoustic Tomography System for flood monitoring and determination of the measurement accuracy, minimum and maximum measurement ranges, Iranian Journal of Echo Hydrology, Vol. 6, p.585-592 [In Persian].
- 22- Urick, R. J., (1983). Principles of underwater sound, Peninsula Pub, New York.
- 23- Yamaguchi, K., Lin, J., Kaneko, A., Yayamoto, T., Gohda, N., Nguyen, H. Q. and Zheng, H., (2005), *A continuous mapping of tidal current structures in the kanmon strait*, Journal of Oceanography, Vol. 61, p.283–294.
- 24- Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftakhari, M., Kardan Moghaddam, H. and Hassanli, S. A., (2019), Continuous Monitoring of Tidal Bores Using Acoustic Tomography Technique, Journal of Oceanography, Vol. 9, p.57-64 [in Persian].

Oceanographic Research Papers, Vol. 26, p.123–161.

- Howe, B. M., Worcester, P. F. and Spindel, R. C., (1987), *Ocean acoustic tomography: Mesoscale velocity*, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 92, p.3785–3805.
- 13- Yun Shen, Zhang, C., Huang, L., Zhang, C., Wu, Y., Wu, G., Sheng, C., Guo, Y., Wang, Z., Liu, X. and Huang, H., Flow Velocity and Temperature Measuring in Large- Scale Wave-Current Flume by Coastal Acoustic Tomography, OCEANS 2018 MTS/IEEE, 2018, Charleston, SC, USA.
- 14- Zheng, H., Noriaki, G., 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, Vol. 53, p.117–127.
- 15- Zheng, H., Yamaoka, H., Gohda, N., NOGUCHI, H. and Kaneko, A.;, (1998), Design of the acoustic tomography system for velocity measurement with an application to the coastal sea, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol. 19, p.199–210.
- 16- Lin, J., Kaneko, A., Gohda, N. and Yamaguchi, K., (2005), Accurate imaging and prediction of Kanmon Strait tidal current structures by the coastal acoustic tomography data, Geophysical Research Letters, Vol. 32, p.1–4.
- 17- Liao, G., Wang, J., Xu, X., Yang, C., Wu, Q., Zhang, C. and Zhu, X., A Coastal Acoustic Tomography Inverse Method Based on Chebyshev Polynomials and Its Application in Zhoushan Field Experiment.
- 18- Zhang, C., Kaneko, A. ;, Xiao-Hua Zhu; and Gohda, N., (2015), *Tomographicmapping of a coastal upwelling and the associated diurnal*