# امکان‌ســنجی پایش جریان‌های خلیج‌فارس با اســتفاده از فناوری تیکه‌نگاری صــوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز

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

[۱*] 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
[۴] کارشناس پژوهشی، موسسه تحقیقات آب، آدرس پست الکترونیکی hkardan@ut.ac.ir
[۵] دانش‌آموخته دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه فیزیک حالت جامد، m.khoshhali@gmail.com
[۶] شرکت سنج‌آب فناوری خلیج فارس، ipats@chmail.ir

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸

*کلمات کلیدی:*
دســـتگاه‌تیکه‌نگاری صـــوتی ۱۰ کیلوهرتز
حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری
دقت اندازه‌گیری سرعت جریان

**چکیده**

در کشورهای توسعه‌یافته فناوری تیکه‌نگاری صوتی به عنوان یکی از ابزارهای نوین پایش منابع آب در اقیانوس‌ها، دریاها و رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز به‌منظور پایش پیوسته جریان‌های دریایی در مقیاس چند کیلومتری، مورد بررسـی قرار گرفته اسـت. با توسـعه رابطه انتشـار امواج صـوتی در آب، رابطه جدیدی ارائه شد و حداکثر برد اندازه‌گیری این روش محاسبه گردید. نتایج نشان داد حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری این نوع دستگاه به ترتیب ۵۷ تا ۱۸۰۰۰ متر است. همچنین مشاهده شده که اندازه‌گیری سرعت جریان در فواصل بیش از ۷۰۰۰ متر دارای دقت بهتر از ۰/۱ سـانتی‌متر بر ثانیه اسـت. تاثیر انتخاب ام- سـیکنونس مناسـب با توجه به فاصـله بین ایسـتگاه‌های صوتی یکی دیگر از موضوعات مهم به‌کارگیری روش تیکه‌نگاری صوتی به‌منظور داشـتن بهترین عملکرد است. پیشنهاد می‌شود جریان‌های خلیج‌فارس با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری شود.

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

**Masoud Bahreinimotlagh[1*], Reza Roozbahani[2], Mortaza Eftekhari[3], Hamid Kardanmoghadam[4], Mahdi Khoshhali[5], Kamal Mohtasham[6]**

*[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**

*Article History:*
Received: 20 May. 2019
Accepted: 29 Nov. 2019

*Keywords:*
10-kHz Coastal Acoustic Tomography Technique
Minimum and Maximum Operational Ranges
Velocity Resolution

**ABSTRACT**

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.

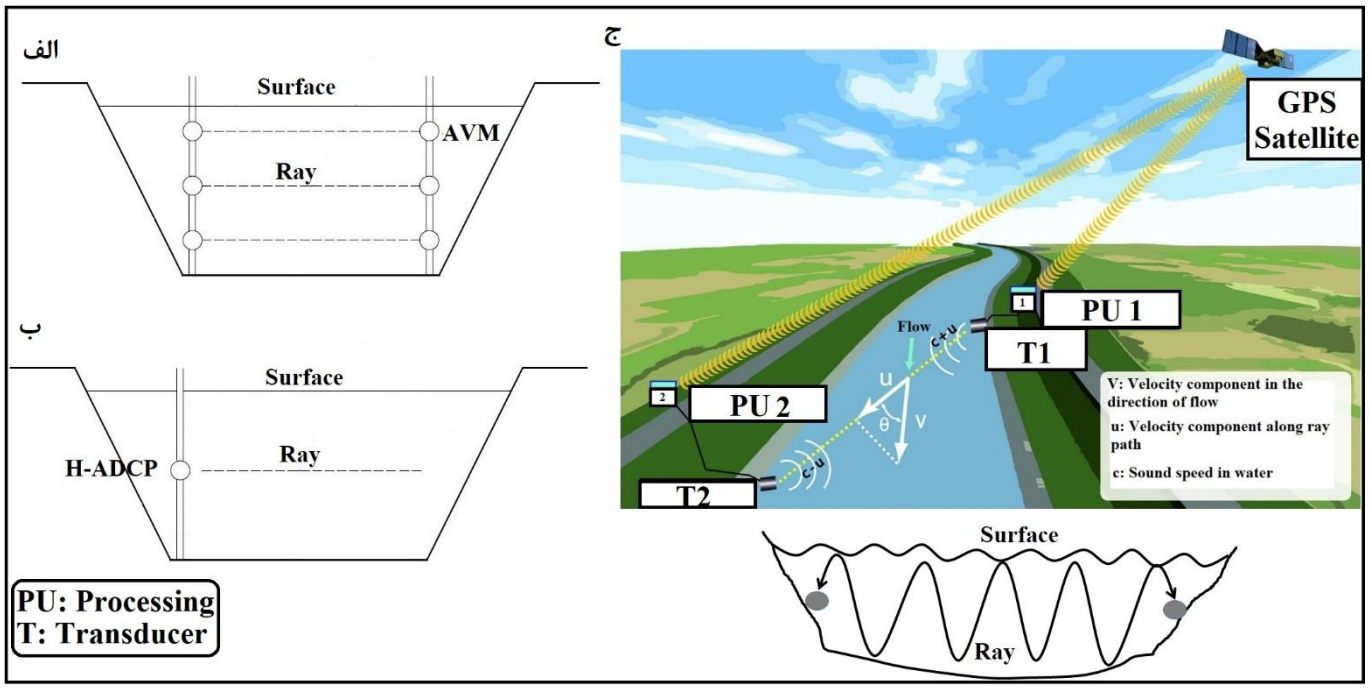


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

## ۱ – مقدمه

فناوری تیکه‌نگاری صوتی[1] به عنوان یکی از روش‌های سنجش از دور، ابزاری قدرتمند جهت پایش منابع آب سطحی است [1]. در این روش با استفاده از اندازه‌گیری زمان سیر امواج صوتی در آب، متغیرهایی نظیر دما و سرعت جریان به‌دست می‌آید [2]. همچنین از روش تیکه‌نگاری صوتی جهت صحت‌سنجی مدل‌های انتشار امواج صوتی در آب استفاده می‌شود [3]. فناوری تیکه‌نگاری صوتی به‌منظور پایش اقیانوس‌ها از امواج صوتی با بسامدهای ۵۷ هرتز [4] تا ۸۰۰ هرتز [5]، به‌منظور پایش جریان‌های دریایی از بسامدهای ۵ کیلوهرتز [6] و ۱۰ کیلوهرتز [7]، و به‌منظور پایش رودخلنه‌ها از بسامدهای ۳۰ کیلوهرتز [8] و ۵۰ کیلوهرتز [9] استفاده می‌کند. بنابراین، در مقایسه با سایر ابزارهای صوتی نظیر ای‌دی‌سی‌پی[2] و ای‌وی‌ام[3] (با بسامدهای ۳۵ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز)، قابلیت انتشار امواج در فواصل طولانی‌تری را دارد. همچنین بر خلاف دستگاه‌های ای‌دی‌سی‌پی و ای‌وی‌ام که الگوی انتشار امواج صوتی در راستای یک خط مستقیم انجام می‌شود، در این روش امواج صوتی در کل مقطع محیط آب انتشار می‌یابد و نیازی به پس‌پردازش‌های پیچیده نیست. شکل ۱ نحوه انتشار امواج صوتی در هر سه روش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با اتصال به ماهواره‌های جی‌پی‌اس همزمان‌سازی شده و امواج صوتی را در کل مقطع محیط آب انتشار می‌دهند [10].




**شکل ۱ – الگوی انتشار امواج صوتی با ابزارهای الف) ای‌وی‌ام، ب) ای‌دی‌سی‌پی 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 اقیانوسی[4] 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 اندازه‌گیری سرعت صوت در آب، دما و سرعت جریان‌های دریایی افزایش یافته است. بدین منظور دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی دریایی[5] توسعه یافته‌اند [13].

ژنگ و همکاران ۱۹۹۷، اولین نمونه دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز را ابداع کردند. ایشان با استفاده از دو دستگاه و به کارگیری ام- سیکونیس درجه ۱۰، جریان‌های دریای ستوآیلند[6] ژاپن را به مدت ۵ ساعت اندازه‌گیری کردند. دو ایستگاه صوتی به فاصله ۵/۷ کیلومتر از یکدیگر قرار گرفتند. به منظور صحت‌سنجی آزمایش با استفاده از یک عدد دستگاه ای‌دی‌سی‌پی متحرک که توسط کشتی در راستای ارسال امواج صوتی دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی در حرکت بود، سرعت جریان آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که هر دو روش سرعت جریان را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کنند، با این تفاوت که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی به صورت ثابت نصب شده و قادرند داده‌های جریان را به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری کنند. در حالیکه به‌کارگیری دستگاه‌های ای‌دی‌سی‌پی نیازمند کشتی است و متعاقباً اندازه‌گیری پیوسته جریان امکان‌پذیر 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 اندازه‌گیری در فواصل طولانی‌تر مورد آزمایش قرار دادند. ایشان با استفاده از ام- سیکونیس درجه ۱۱ سرعت جریان‌های دریایی را در فاصله ۱۱ کیلومتری با موفقیت اندازه‌گیری کردند و با داده‌های ای‌دی‌سی‌پی 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 داده‌گواری[۸] مدل اقیانوسی پرینستون[۹] به‌کار بردند. نتایج نشان داد داده‌های اندازه‌گیری شده توسط این روش به‌منظور داده‌گواری در مدل‌های رایانه‌ای قابل استفاده است. ایشان دستگاه فوق را به دلیل تهیه داده‌های پیوسته جریان، و همچنین هزینه پایین اجرای عملیات داده‌برداری توصیه کردند [16].

لیو و همکاران ۲۰۱۰، هفت دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با ام- سیکونس درجه ۱۲ را در خلیج ژیتویانگ[۱۰] چین نصب کردند و با استفاده از روش مسائل معکوس[۱۱]، جهت تغییرات جریان‌های جزر و مدی در آن خلیج را به صورت پیوسته پایش کردند. حداکثر فاصله بین ایستگاه‌های صوتی حدود ۱۲۰۰۰ 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 داده‌گواری مدل‌های ریاضی به‌منظور پیش‌بینی‌های 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[۱۴] تایوان اندازه‌گیری کردند. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی از ام- سیکونس درجه ۱۰ استفاده کردند و فاصله بین آن‌ها ۴۸۸ متر بود. داده‌های سرعت با داده‌های دستگاه ای‌دی‌سی‌پی افقی[۱۵] 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 لندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد با استفاده از این روش می‌توان تغییرات سرعت و دمای جریان‌های دریایی را در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری کرد [7].

اگرچه اندازه‌گیری‌های زیادی با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در مناطق مختلف انجام شده است، اما تاکنون روابط حاکم در این فناوری، تاثیرات ام-سیکونس و همچنین قابلیت‌های این روش مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه قابلیت‌های دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز شامل حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری، تاثیر انتخاب مناسب ام- سیکونس بر برد لندازه‌گیری و همچنین دقت لندازه‌گیری سرعت جریان در فواصل مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ - روابط اساسی حاکم در روش تیکه‌نگاری صوتی

امواج صوتی در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی توسط یک سری اعداد تصادفی به نام ام- سیکونس[۱۶] کدگذاری می‌شوند 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 می‌کنند [21]. طول امواج صوتی کدگذاری شده ($L_{M-Seq}$) با استفاده از ام- سیکونیس، از رابطه $2^n - 1$ به دست می‌آید که $n$ درجه ام- سیکونس است و باعث افزایش بهره ($Gp$) امواج صوتی دریافتی می‌شود (رابطه ۱):

$$Gp = 10Log\ L_{M-Seq} \quad (۱)$$

دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، امواج صوتی کدگذاری شده با استفاده از ام- سیکونس را به صورت سه سیکل در هر دیجیت[۱۸] به‌کار می‌برد که کیو- ولیو[۱۹] نامیده می‌شود. حداقل 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 زیر محاسبه می‌شود [9]:

$$R_{min} = \frac{Q - value}{f} \times L_{M-Seq} \times c \quad (۲)$$



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

که $Q-value$ برابر ۳، $f$ بسامد صوتی با مقدار ۱۰۰۰۰ هرتز ، $L_{M-Seq}$ طول ام- سیکونس و $c$ سرعت صوت در آب است که ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض می‌شود.

امواج صوتی انتشاریافته در آب نسبت به فاصله از منبع صوت تضعیف می‌شوند. یوریک در سال ۱۹۸۳ رابطه ساده زیر را برای محاسبه افت انتشار[۲۰] امواج صوتی نسبت به فاصله از منبع صوتی ارائه کرد [22]:

$$PL = 20\,Log\,R + \alpha R + L_0 \qquad (۳)$$

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[۲۳]، بازتاب[۲۴]، تداخل[۲۵] و غیره است که مقدار ۱۰ دسی‌بل فرض می‌شود. ضریب جذب امواج صوتی ($\alpha$) در آب شفاف (با فرض عدم وجود ذرات معلق) از رابطه زیر به دست می‌آید [23]:

$$\alpha_w = \alpha\left(dB/m\right) = \left(3.3\times10^{-3} + \frac{0.11\,f^2}{1+f^2} + \frac{44\,f^2}{4100+f^2} + 3\times10^{-4}f^2\right)\Big/1000 \qquad (۴)$$

که $f$ بسامد امواج صوتی به هرتز است.

بنابراین شدت امواج صوتی رسیده به دستگاه مقابل[۲۶] برابر است با تفاضل شدت امواج صوتی منبع صوتی ($SL$)[۲۷] و تلفات انتشار امواج صوتی ($PL$):

$$RL = SL - PL \qquad (۵)$$

رابطه ۵ برای دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود؛

$$SNR = SL - 20\,Log\,R - \alpha R - L_0 + Gp - Na \qquad (۶)$$

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 $SNR$[۲۸] نسبت سیگنال‌های دریافت‌شده به نوفه محیط یا همان $RL$ است.

دقت اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری میانگین متحرک چند داده انجام می‌شود که دقت اندازه‌گیری را به میزان $\frac{1}{\sqrt{n}}$ افزایش می‌دهد.

$$Ur = \frac{c^2}{2\,L}\times\frac{1}{2\,f}\times\frac{1}{\sqrt{n}} \qquad (۷)$$

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.

## ۳ – نتایج و بحث

### ۳-۱ حداقل برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری ۱۰ کیلوهرتز

بر اساس رابطه (۲) 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. بنابراین با فرض مقدار سرعت صوت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، حداقل برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز با استفاده ام- سیکونس درجه ۷ برابر ۵۷ متر است.

**جدول ۱ - ام- سیکونس‌های قابل استفاده در دستگاه‌تیکه‌نگاری صوتی و طول دیجیت آن**

| M-Sequence Degree (n) | Maximum Period (L) digit |
|---|---|
| 7 | **127** |
| 8 | 255 |
| 9 | 511 |
| 10 | 1023 |
| 11 | 2047 |
| 12 | 4095 |

### ۳-۲ حداکثر برد اندازه‌گیری دستگاه تیکه‌نگاری ۱۰ کیلوهرتز

با توجه به رابطه (۶)، حداکثر برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل و آب شفاف به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$20\,Log\,R_{max} + \alpha R_{max} = SL - L_0 + Gp - Na - SNR_{\,Threshold} \qquad (۸)$$

که $SL$ برای دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۹۰ (dB relative to 1 µPa at 1 m)، $\alpha$ برای امواج صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز ۰/۰۰۱ 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 حداکثر برد اندازه‌گیری 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)



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

است ۱۰۰ دسی بل در نظر گرفته می‌شود [14]. $SNR_{Threshold}$ کمترین نسبت سیگنال‌های دریافت‌شده به نوفه محیط است که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی می‌توانند سیگنال‌های رسیده شده از دستگاه مقابل را از نوفه محیط تفکیک کنند. معمولاً $SNR_{Threshold}$ برای دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ دسی‌بل در نظر گرفته می‌شوند [6].

**جدول ۲ - ام- سیکونس‌های قابل استفاده در دستگاه‌تیکه‌نگاری 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 | 36.1 |

با توجه به معلوم بودن همه متغیرها به جز متغیر حداکثر برد اندازه‌گیری، می‌توان رابطه ۸ را به صورت رابطه (۹) ساده کرد:

$$20\ Log\ R_{max} + \alpha R_{max} = y \qquad (۹)$$

در نتیجه حداکثر برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$R_{max} = e^{\frac{\ln(10)\left(y - \frac{20\ LambertW\left(\frac{\alpha\, e^{y\ln(10)}\ln(10)}{20}\right)}{ln\ (10)}\right)}{20}} \qquad (۱۰)$$

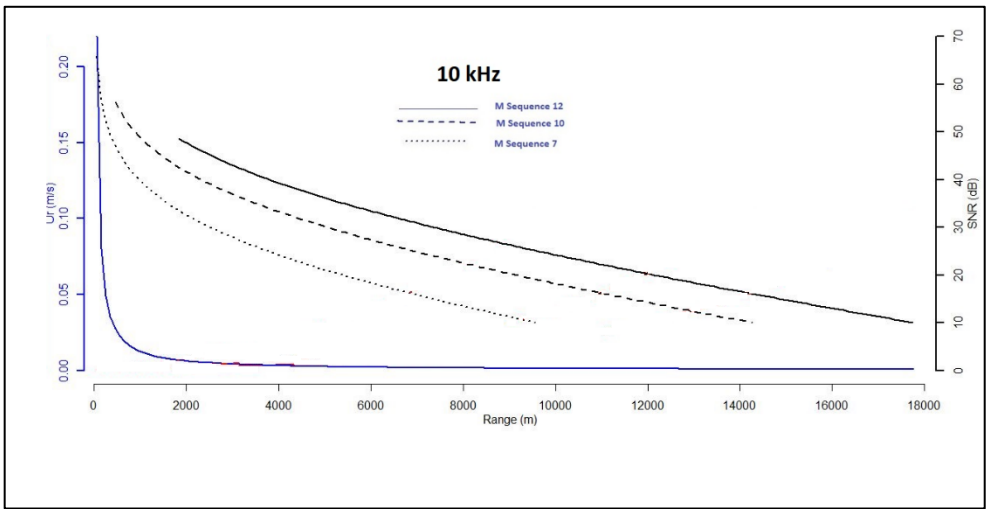
در نتیجه با معلوم بودن همه متغیرها ($y$) و مقدار $\alpha$ برابر ۰/۰۰۱ دسی‌بل بر متر، حداکثر برد اندازه‌گیری در شرایط ایده‌آل برای دستگاه‌تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز و استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۲ با بهره ۳۶ دسی‌بل، ۱۸۰۰۰ متر به دست می‌آید.

دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی دریایی قابلیت اندازه‌گیری سرعت جریان در هر ۳۰ ثانیه را دارند و برای افزایش دقت اندازه‌گیری سرعت، تعداد ۲۰ داده را با میانگین‌گیری متحرک محاسبه 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 ۱۰۰۰۰ هرتز، دقت دستگاه برای کمترین برد اندازه‌گیری ۵۷ متر، برابر با ۲۲ سانتی‌متر است که نشان می‌دهد به کارگیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در فواصل کوتاه دارای دقت پایینی است. این درحالیست که با افزایش فاصله بین دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، دقت اندازه‌گیری سرعت جریان افزایش قابل توجه‌ای می‌یابد، به طوری که در فاصله ۱۰۰۰ متری دقت اندازه‌گیری ۱ سانتی‌متر بر ثانیه و در فاصله ۲۰۰۰ متری به ۰/۶ سانتی‌متر برثانیه می‌رسد.

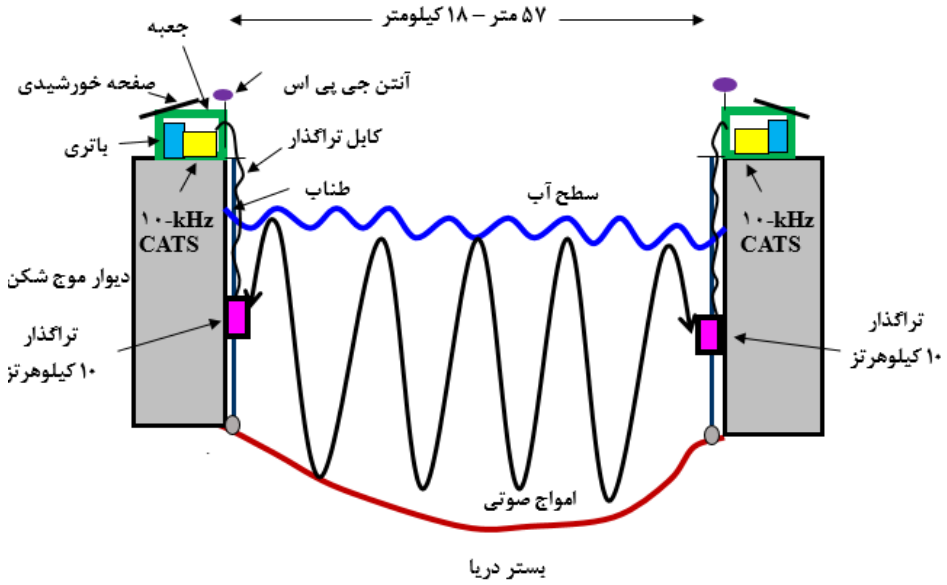
در شکل ۲ نسبت تغییرات اندازه‌گیری سرعت جریان از نظر دقت با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با رنگ آبی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین دقت اندازه‌گیری نسبت به فاصله دستگاه‌ها بصورت نمایی تغییر می‌کند. تحلیل رابطه نمایی نشان می‌دهد که در فاصله ۳۰۰ متری، دقت اندازه‌گیری این روش ۴ سانتی‌متر بر ثانیه است، درحالیکه اگر فاصله بین ایستگاه‌های صوتی ۷۰۰۰ متر باشد، دقت اندازه‌گیری سرعت جریان بهتر از ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه خواهد بود. همچنین بررسی تغییرات برد اندازه‌گیری با استفاده از ام-سیکونس نسبت به SNR دریافتی از امواج صوتی در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری سرعت جریان بین ۴۶۰ تا ۱۴۰۰۰ متر خواهد بود. میزان SNR دریافتی در این حالت بین ۵۶ تا ۱۰ دسی‌بل است. استفاده از بزرگترین درجه ام- سیکونس (درجه ۱۲)، در فاصله نصب بین ۱۸۰۰ تا ۱۸۰۰۰ متر توصیه می‌شود. در این فواصل نصب، مقدار حداکثر SNR دریافتی به ترتیب ۴۸ و ۱۰ دسی‌بل بدست آمده است. محاسبات و اندازه‌گیری‌های انجام شده در شرایط ایده‌آل یعنی بدون وجود مواد معلق انجام شده است. وجود هرگونه مواد معلق و ناخالصی سبب کاهش برد اندازه‌گیری خواهد شد.

مدل مفهومی به‌کارگیری دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاصله بین دو ایستگاه صوتی از ۵۷ متر تا ۱۸ کیلومتر قابل تنظیم است. پردازشگرها در خارج از آب درون یک جعبه قرار می‌گیرند و با استفاده از باتری تغذیه می‌شوند. باتری‌ها نیز توسط صفحات خورشیدی شارژ می‌گردند. تراگذارها (ترانسدیوسر) توسط یک کابل به پردازش‌گرها متصل شده و درون آب قرار می‌گیرند. همچنین تراگذارها توسط یک وزنه سنگین به کف دریا متصل می‌شوند و در نهایت امواج صوتی به سمت یکدیگر ارسال می‌شوند.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]




**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 به‌کارگیری دستگاه‌تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز.**

## ۴ – نتیجه‌گیری

در این مطالعه ارزیابی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با رویکرد محاسبه حداقل و حداکثر برد اندازه‌گیری و ارزیابی دقت اندازه‌گیری سرعت جریان آب در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی میزان ام-سیکونس درجه ۷ تا ۱۲ بر روی برد اندازه‌گیری 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 ایده‌آل با فرض عدم وجود ذرات معلق در آب، حداقل و حداکثر برد قابل اندازه‌گیری ۵۷ تا ۱۸۰۰۰ متر برآورد می‌گردد.

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



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

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

## ۵ - تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر حاصل از طرح تحقیقاتی شماره ۳۲۰/۹۸۰۱/-۰۲ طرح پژوهشی موسسه تحقیقات آب است.

## 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 1 µPa 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].

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.


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]

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

12- 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 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].

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.7.7 ]
[ DOI: 10.29252/marineeng.15.30.131 ]