

اندازه‌گیری دمای متوسط فاصله و عمق دریای ساحلی با استفاده از روش

تیکه‌نگاری صوتی

مسعود بحرینی مطلق^۱؛ ایمان خاکی^۲؛ رضا روزبهانی^۱؛ یونس ظهرابی^۳ و حمید کاردان مقدم^{۱*}

۱- استاد یار، موسسه تحقیقات آب

۲- دانشجوی دکتری، گروه آب، دانشگاه تهران

۳- مدیر امور آزمایشگاه‌ها، موسسه تحقیقات آب

(تاریخ دریافت ۹۹/۰۴/۰۴-تاریخ پذیرش ۹۹/۰۵/۲۹)

چکیده:

در دهه‌های اخیر افزایش دمای آب دریاها به یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیط طبیعی تبدیل شده است و زندگی گیاهان دریایی و آبزیان را به مخاطره انداخته است. لذا پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام دمای آب دریاها از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار کارشناسان محیط زیست دریا و سواحل قرار دهد. فناوری تیکه‌نگاری صوتی یکی از ابزارهای کارآمد به‌منظور پایش جریان‌های دریایی است. سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی در اطراف محیط آبی قرار گرفته و امواج صوتی را به صورت همزمان ارسال می‌کنند. سپس با استفاده از میانگین زمان رسیدن امواج صوتی، دمای جریان‌های آبی را محاسبه می‌نمایند. در این مطالعه، ابتدا سامانه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در مجرای موسسه تحقیقات آب مورد آزمایش قرار گرفت و با حسگر دما ارزیابی شد. نتایج نشان داد که دمای آب بین دو ایستگاه صوتی ۱۸ درجه سانتی‌گراد است و با دمای حسگر دمایی کاملاً تطابق دارد. در آزمایش دوم، دمای جریان‌های آبی بین دو جزیره به فاصله تقریباً ۴۵۰۰ متر به صورت بهنگام اندازه‌گیری شد. دمای متوسط فاصله و عمق بین دو جزیره در هر دقیقه اندازه‌گیری و سپس با میانگین‌گیری متحرک ۳۰ دقیقه‌ای (۳۰ داده) خطای اندازه‌گیری دما از ۷٫۲ به ۱٫۳ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. دمای آب در طول مدت اندازه‌گیری تقریباً ۲۸ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. با توجه به وجود جزایر متعدد در خلیج فارس، استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی به منظور پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام دمای جریان‌های دریایی توصیه می‌شود.

کلید واژگان: دمای آب جریان‌های دریایی، تیکه‌نگاری صوتی ساحلی ۱۰ کیلوهرتز، پایش پیوسته و بهنگام.

۱. مقدمه

تغییرات دمای آب دریاها اثرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌های دریایی و زندگی جوامع انسانی حواشی دریاها می‌گذارد (Zahraei et al., 2019). در سال‌های اخیر با توجه به مساله گرمایش جهانی، افزایش دمای آب نه تنها اثرات مخربی بر روی رشد و نمو گیاهان دریایی گذاشته است (Qin et al., 2020)، بلکه حیات آبریان را نیز تحت خطر قرار داده است. به عنوان نمونه مطالعه نحوه رشد و نمو فیتوپلانکتون‌ها در دریای ساحلی مدیترانه نشان داد که متغیر دمای آب در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی، بیشترین تاثیر را در شکوفایی آن‌ها دارد (Trombetta et al., 2019). مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات دمای آب دریاها بیشترین تاثیر را بر اکوسیستم مناطق ساحلی جهان دارد (Androulakis et al., 2020). بنابراین پایش پیوسته و بهنگام دمای آب دریاها و بخصوص مناطق ساحلی بسیار حائز اهمیت است.

به‌منظور اندازه‌گیری دمای آب متوسط عمق^۱ دریا، از حسگرهای دمایی استفاده می‌شود که دمای آب را به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کنند و با به‌کارگیری آرایه‌ای از حسگرها در اعماق مختلف، دمای متوسط عمق آب به دست می‌آید (Wang et al., 2020). این روش نه تنها باعث افزایش هزینه و زمان اندازه‌گیری می‌شود، بلکه برای اندازه‌گیری دمای متوسط بین دو جزیره (متوسط فاصله^۲) با استفاده از این روش به شناور نیاز است. اگرچه دمای سطح آب با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با دقت بالا قابل تخمین است

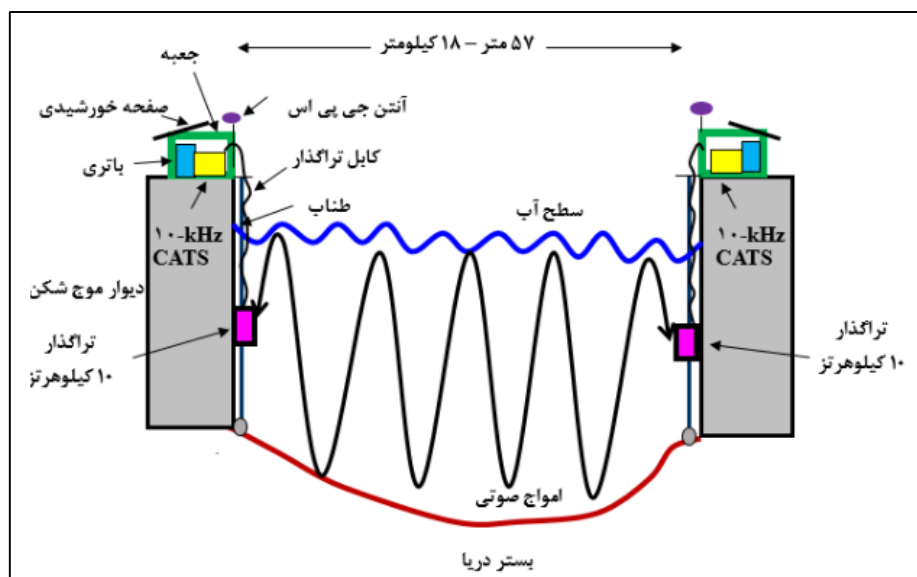
(Vanhellemont et al., 2020). اما به دلیل عدم نفوذ امواج الکترومغناطیس در آب، داده‌های دمایی متوسط عمق آب را نمی‌توان با استفاده از ماهواره‌ها اندازه‌گیری نمود. برخلاف امواج الکترومغناطیس که به شدت در آب تضعیف می‌گردند، آب برای امواج صوتی محیطی شفاف است و این نوع امواج بسته به بسامد و شدت تراز صدا^۳، قادر به پیمایش هزاران کیلومتر در آب هستند. روش تیکه‌نگاری صوتی^۴ یکی از فناوری‌های صوتی پیشرفته به‌منظور پایش محیط‌های آبی کوچک (رودخانه) تا محیط‌های آبی بزرگ (اقیانوس) است (Bahreinimotlagh et al., 2018). سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای^۵ با بسامد ۳۰ کیلوهرتز و شدت تراز ۱۹۰ اطلاعات جریان تا حداکثر مسافت ۲۰۰۰ متری در رودخانه‌های بزرگ را اندازه‌گیری می‌کند (Bahreinimotlagh et al., 2019). سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی ساحلی^۶ با بسامد ۱۰ کیلوهرتز و شدت تراز ۱۹۰، مناطق دریایی را تا حداکثر فاصله ۱۸ کیلومتری اندازه‌گیری می‌کند (Bahreinimotlagh et al., 2019) و سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی با بسامد ۵۷ هرتز و شدت تراز ۲۰۵، اطلاعات جریان تا فواصل ۱۸۰۰۰ کیلومتری اقیانوس‌ها را پایش می‌کنند (Baggeroer et al., 2002). از این رو، فناوری تیکه‌نگاری صوتی، به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام اقیانوس‌ها (Dushaw et al., 2016)، دریاها (Taniguchi et al., 2020 and Yamamoto et al., 2006)، رودخانه‌ها (Bahreinimotlagh et al., 2016) و دریاچه‌ها (Bahreinimotlagh et al., 2019) به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

- 4- Acoustic Tomography
- 5- Fluvial Acoustic Tomography
- 6- Coastal Acoustic Tomography

- 1- Depth averaged
- 2-Range averaged
- 3- dB ref 1 μ Pa at 1 m

در آب منتشر می‌کنند (Bahreinimotlagh *et al.*, 2019). سپس با تحلیل میانگین زمان رسیدن^۳ امواج صوتی در دو ایستگاه صوتی و همچنین اختلاف زمان رسیدن^۴ امواج صوتی در هر ایستگاه، به ترتیب دمایی متوسط فاصله و عمق آب (یا سرعت متوسط صدا در آب) و سرعت متوسط جریان آب محاسبه می‌شوند (Yamamoto *et al.*, 2006). شکل ۱ مدل مفهومی سامانه تیکه‌نگاری ساحلی ۱۰ کیلوهرتز مناسب برای مناطق ساحلی تا حداکثر مسافت ۱۸ کیلومتر را نشان می‌دهد (Bahreinimotlagh *et al.*, 2019).

سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی حداقل از دو دستگاه تشکیل شده‌اند که در دو طرف محیط آبی قرار گرفته و با انتشار همزمان امواج صوتی در کل عمق آب، متغیرهای متوسط فاصله و عمق^۱ سرعت جریان و دمایی آب را اندازه‌گیری می‌کنند (Adityawarman *et al.*, 2011). هر دستگاه شامل یک پردازنده است که در خارج از آب در ساحل (بر روی موج‌شکن‌ها، پایه‌ها، اسکله‌ها و ...) نصب می‌شود و توسط یک کابل به یک تراگذار^۲ که در آب قرار گرفته است متصل می‌شود. دستگاه‌ها با اتصال به ماهواره‌های جی‌پی‌اس همزمان‌سازی شده و امواج صوتی را به طور همزمان



شکل ۱- مدل مفهومی سامانه تیکه‌نگاری صوتی ساحلی ۱۰ کیلوهرتز (Bahreinimotlagh *et al.*, 2018)

به حسگرهای نقطه‌ای کارآمدتر است. Huang و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی دمایی جریان در اسکله‌ی باچیمین تایوان را اندازه‌گیری و با حسگر دمایی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روند تغییرات دمایی در هر دو روش مشابه است با این تفاوت که نوسانات دمایی با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی بهتر اندازه‌گیری می‌شود. Syamsudin و همکاران

سامانه تیکه‌نگاری ساحلی به طور گسترده در مناطق مختلف به منظور پایش دمایی آب مورد استفاده قرار گرفته است. Zhang و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری ساحلی ۱۰ کیلوهرتز، تغییرات دمایی جریان آب که توسط طوفان بوجود آمده بود را در خلیج هیروشیما ژاپن اندازه گرفتند و با حسگرهای دمایی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد این روش نسبت

3-Mean arrival time

4-Difference arrival time

1-Range- and depth averaged

2-Transducer

به صورت پیوسته، و بهنگام به مدت ۳۶ ساعت اندازه‌گیری شد.

۲. مواد و روشها

۲-۱. روابط روش تیکه‌نگاری صوتی

بر اساس رابطه مکنزی^۳ سرعت صدا در آب تابعی از از دما (T)، شوری (S) و عمق آب (D) است و به صورت زیر ارائه می‌شود: (۱)

$$10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.304(S-35)^7 D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3$$

که بازه‌ی پارامترهای ذکر شده بایستی به صورت زیر

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

باشد: در حال اگر دو ایستگاه تیکه‌نگاری صوتی در دو طرف محیط آبی قرار گیرد و همزمان امواج صوتی را به یکدیگر ارسال نمایند، طبق روابط ۲ و ۳، زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه دوم که در جهت جریان آب است برابر است با فاصله‌ی بین دو ایستگاه تقسیم بر مجموع سرعت صدا و سرعت جریان آب، و زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول که در خلاف جهت جریان آب است برابر است با فاصله‌ی بین دو ایستگاه تقسیم بر تفاضل سرعت صدا و سرعت جریان آب (Bahreinimotlagh et al., 2018).

$$t_1 = \frac{L}{c_m + u_m} \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (3)$$

که L فاصله‌ی افقی بین دو ایستگاه صوتی، C_m سرعت متوسط عمق صدا و U_m سرعت متوسط جریان بین دو ایستگاه صوتی است. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی زمان رسیدن امواج صوتی در هر دو ایستگاه را با دقت

(۲۰۱۷) با استفاده از این سامانه دمای عبوری بین جزایر کشور اندونزی را به مدت یک و نیم ساعت اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد این روش ابزاری کارآمد جهت اندازه‌گیری دمای جریان‌های دریایی است. Huang و همکاران (۲۰۱۹) جریان‌های فرازجوشی^۱ مصنوعی را در یک مجرا به طول ۵۰، عرض ۱۵ و عمق ۱۰ متر متعلق به دانشگاه ژيجیانگ^۲ چین با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد این روش دارای دقت بالایی به منظور پایش دمای آب است.

در حال حاضر روش اندازه‌گیری دمای جریان‌های دریایی در ایران عمدتاً با استفاده از حسگرهای دمایی به صورت نقطه‌ای انجام می‌شود. در این مطالعه برای اولین بار اصول نظری و عملی پایش دمای جریان‌های دریایی در مقیاس وسیع (بین دو جزیره) به صورت پیوسته با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی تشریح می‌گردد. هدف از انجام این تحقیق معرفی روش تیکه‌نگاری صوتی به عنوان روشی کارآمد برای پایش دمایی جریان‌های دریایی است که با توجه به ثابت بودن سامانه و عدم نیاز به شناور و نیروی انسانی، نه تنها در هزینه‌های اجرایی صرفه‌جویی می‌گردد بلکه با تهیه داده‌های پیوسته دما در هرگونه شرایط آب و هوایی، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد.

این مطالعه در دو بخش انجام گرفته است. در بخش اول، سامانه تیکه‌نگاری صوتی در مجرای موسسه تحقیقات آب آزمایش و صحت عملکرد آن با استفاده از حسگر دما مورد ارزیابی قرار گرفت. در آزمایش دوم، تغییرات دمای متوسط فاصله و عمق آب بین دو جزیره

(۷)

$$\alpha = 4.591 - 0.05304 \times 2T_0 + 2.374 \times 10^{-4} \times 3T_0^2 - 1.025 \times 10^{-2} (S_0 - 35) - 7.139 \times 10^{-13} D^3$$

و

$$\beta = 1.340 - 1.025 \times 10^{-2} T_0 \quad (۸)$$

براساس رابطه ۴ انحراف سرعت صدا نسبت به فاصله و متوسط زمان رسیدن امواج صوتی به صورت زیر به دست می‌آید:

(۹)

$$\frac{\delta C_m}{C_m} = \frac{\partial C_m}{\partial L} \delta L + \frac{\partial C_m}{\partial t_m} \delta t_m = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t_m}{t_m}$$

در روش تیکه‌نگاری صوتی که فاصله بین دو ایستگاه صوتی کاملاً ثابت است، رابطه ۵ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\delta C = -\frac{C_0^2}{L} \delta t_m \quad (۱۰)$$

$$C_m \approx C_0 \text{ و } t_m \approx t_0 = L / C_0$$

بنابراین خطای میانگین زمان رسیدن (t_{m-err}) همانند رابطه ۱۰ به خطای انحراف سرعت صدا (δC_{err}) تبدیل می‌شود:

$$\delta C_{err} = -\frac{C_0^2}{L} \delta t_{m-err} \quad (۱۱)$$

قدرت تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری دمای آب (T_r) با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی تابعی از سرعت صدا، دمای آب، بسامد صوتی و فاصله‌ی بین دو ایستگاه است (Kawanisi et al., 2014):

$$T_r = \frac{c^2}{2\alpha f L} \quad (۱۲)$$

۳-۲. منطقه مورد مطالعه

در آزمایش اول، سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی در مجرای موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو که به طول ۱۰۰، عرض ۳ و عمق ۲ متر است مورد ارزیابی قرار

نانوتانیه اندازه‌گیری می‌کنند و با حل روابط ۲ و ۳

سرعت صدا در آب محاسبه می‌گردد:

$$c_m = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{L}{t_m} \quad (۴)$$

که $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$ می‌باشد. در نهایت با معلوم بودن مقدار شوری و با اندازه‌گیری سرعت صدا توسط سامانه تیکه‌نگاری صوتی و با استفاده از رابطه ۱، دمای آب به دست می‌آید.

۲-۲. خطاها و قدرت تفکیک‌پذیری دما

سرعت متوسط صدا (C_m) (در واقع همان سرعت صدا C در رابطه ۱ با استفاده از داده‌های میانگین زمان رسیدن سامانه تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری می‌شود. دما (T) با حل درجه سوم رابطه ۱ برای شوری (S) و عمق (D) ثابت با استفاده از داده‌های مشاهداتی سرعت صدا قابل محاسبه است. این روش منطقی برای به دست آوردن دما با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی است. زیرا تغییرات شوری در مناطق دریایی به مراتب از تغییرات دما (به جز در مصب رودخانه‌ها) کوچک‌تر است. بنابراین سرعت صدا، دما و شوری به دو بخش مرجع و انحراف از مرجع تقسیم می‌شوند:

$$\begin{cases} C = C_0 + \delta C \\ T = T_0 + \delta T \\ S = S_0 + \delta S \end{cases}$$

$$C_0 \square \delta C, T_0 \square \delta T, S_0 \square \delta S \text{ که}$$

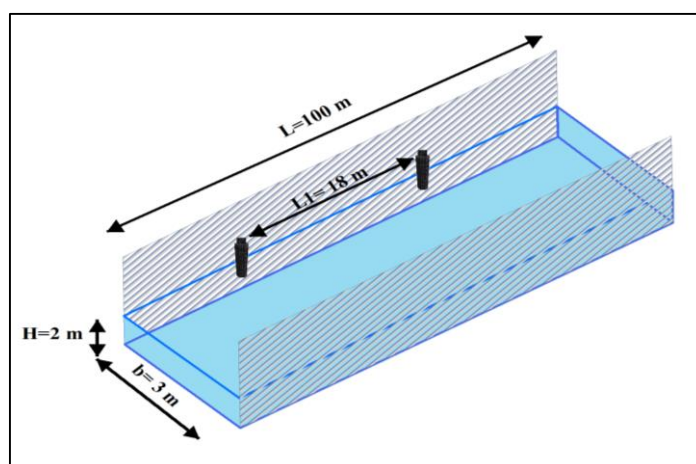
حال با جایگذاری T, C و S در رابطه مکنزی و صرف نظر از گزاره‌های دوم و بالاتر در بسط تیلور، انحراف سرعت صدا δC با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta C = \alpha \delta T + \beta \delta S \quad (۶)$$

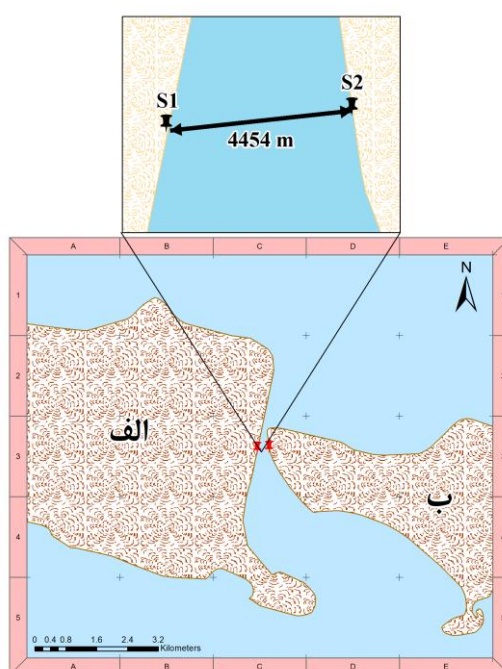
که

استفاده از ماهواره‌های جی‌پی‌اس در هر دقیقه امواج صوتی را منتشر کردند. داده‌های برداشت شده در هر دقیقه در بستر اینترنت ارسال شدند و اندازه‌گیری پیوسته و بهنگام دمای آب عبوری بین دو جزیره انجام شد. مقدار شوری با استفاده از یک حسگر شوری‌سنج ۳۴ پی‌اس‌یو اندازه‌گیری شد.

گرفتند (شکل ۲). فاصله بین دو ایستگاه ۱۸ متر و از ساعت ۱۲:۵۰ تا ۱۳:۰۵ دمای آب اندازه‌گیری و با حسگرهای دما مقایسه شد. در آزمایش دوم، سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز در دو جزیره "الف" و "ب" به طول ۴۴۵۴ متر نصب شدند (شکل ۳). اندازه‌گیری دما در این تحقیق از ساعت ۲۱:۰۰ تاریخ ۱۲ خرداد تا ساعت ۹:۰۰ تاریخ ۱۴ خرداد به طول انجامید. عمق متوسط بین دو ایستگاه ۳۰ متر بود. امواج صوتی پس از همزمان‌سازی با



شکل ۲- شماتیک مجرای موسسه تحقیقات آب و محل قرارگیری دو ایستگاه صوتی



شکل ۳- منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ساحلی ۱۰ کیلوهرتز.

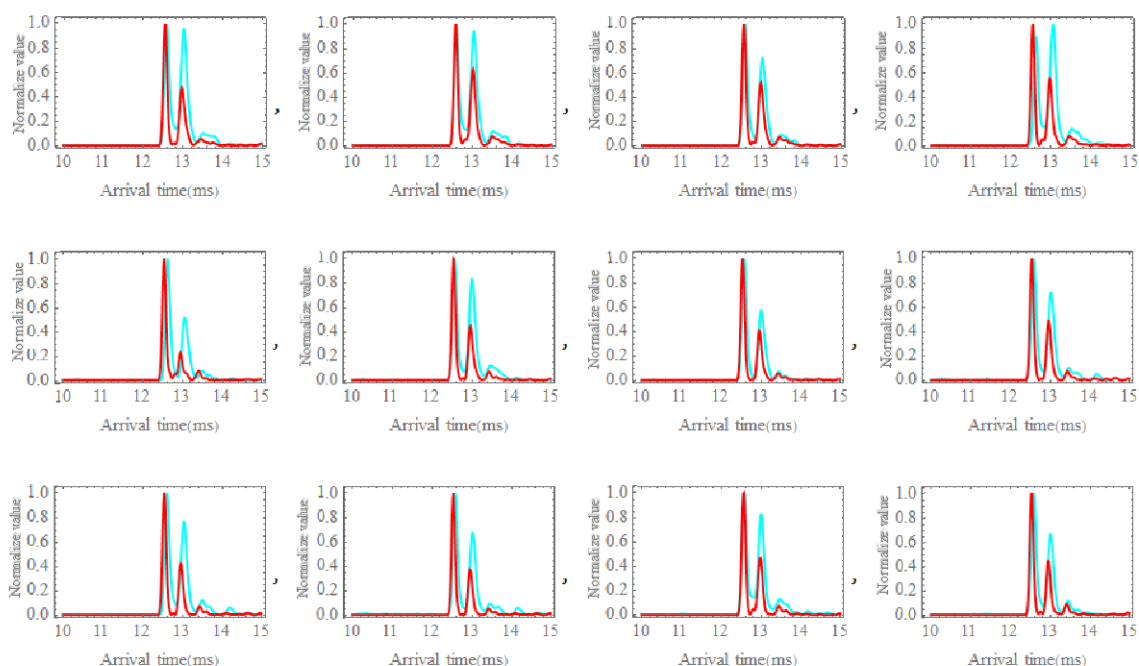
۳. نتایج

۳-۱. نتایج اندازه‌گیری دمای آب در مجرای

موسسه تحقیقات آب

ایستگاه بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. زمان رسیدن موج‌های اصلی در زمان تقریباً ۱۲،۵ میلی ثانیه است و امواج رسیده‌شده در زمان ۱۳ میلی ثانیه در واقع بازتاب امواج صوتی منتشر شده از دیواره‌های مجرا است. بنابراین در این آزمایش از قله‌های زمان رسیدن اول استفاده می‌شود.

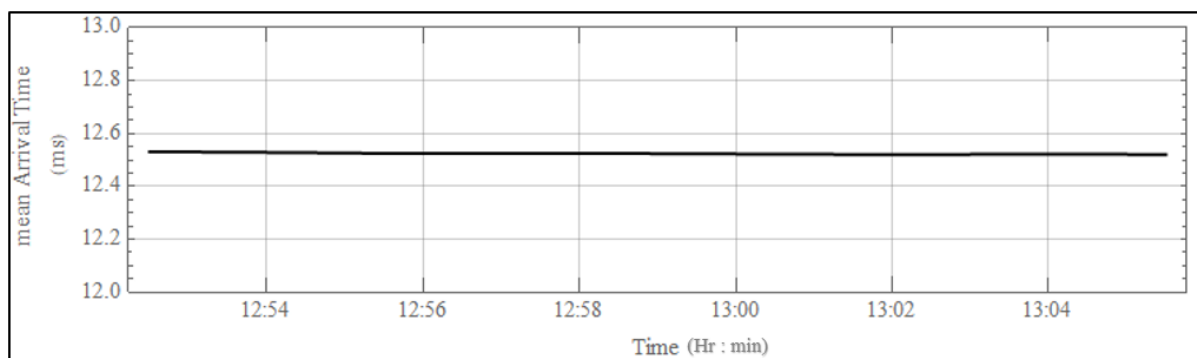
زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه اول (قرمز) و ایستگاه دوم (سبز) در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان رسیدن هر دو



شکل ۴- زمان رسیدن امواج صوتی ایستگاه اول (قرمز) و ایستگاه دوم (سبز)

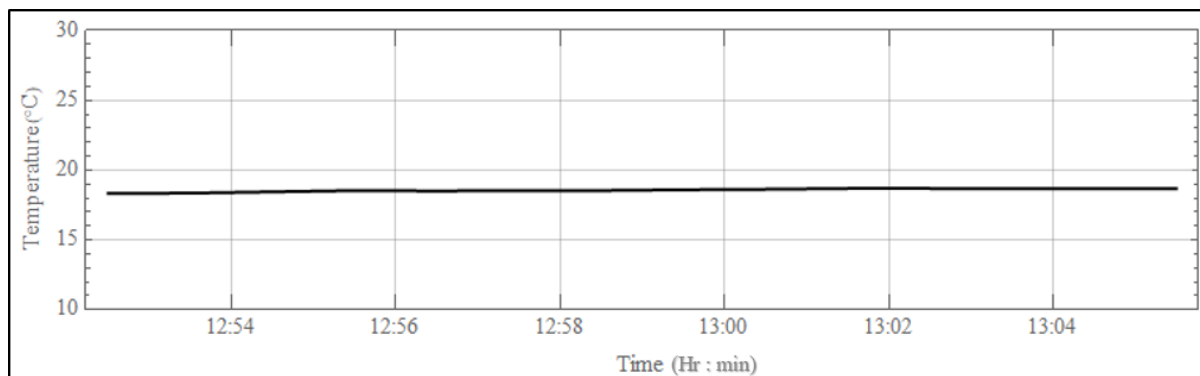
۱۲،۵ میلی ثانیه است. محور افقی گذر زمان آزمایش است که در هر دقیقه امواج صوتی ارسال شدند و از ساعت ۱۲:۵۰ آغاز و تا ساعت ۱۳:۰۵ پایان یافت.

سپس با استفاده از رابطه ۴ میانگین زمان رسیدن‌ها محاسبه می‌شود. شکل ۵ میانگین زمان رسیدن امواج صوتی را نسبت به گذر زمان نشان می‌دهد که تقریباً



شکل ۵- زمان رسیدن امواج صوتی ایستگاه اول (قرمز)

دمای اندازه‌گیری شده با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی در این آزمایش تقریباً ۱۸ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (شکل ۶). دمای آب بین دو ایستگاه با استفاده از یک حسگر دما نیز ۱۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و صحت عملکرد سامانه تیکه‌نگاری صوتی اثبات شد.



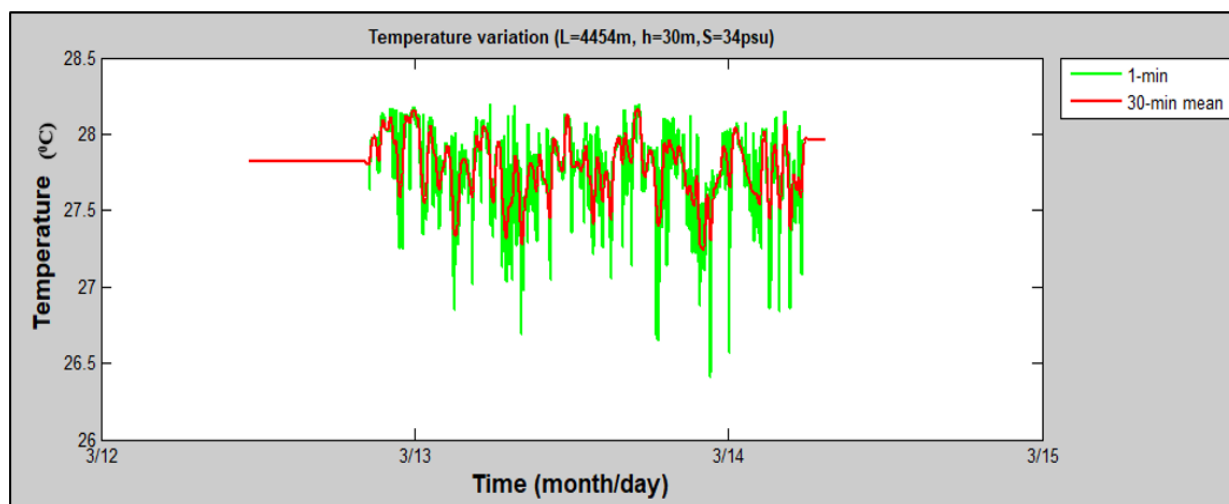
شکل ۶- دمای متوسط فاصله و عمق آب مجرا بین دو ایستگاه

صوتی میانگین‌گیری متحرک داده‌ها به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری است (Bahreinimotlagh *et al.*, 2019). در این آزمایش نیز با میانگین‌گیری ۳۰ داده، دقت اندازه‌گیری به میزان چشمگیری افزایش یافت (شکل ۷ خطوط قرمز رنگ). بنابراین دمای آب در هر نیم‌ساعت به مدت ۳۶ ساعت به صورت پیوسته اندازه‌گیری شد و به صورت بهنگام در بستر اینترنت ارسال شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای متوسط آب ۲۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

۲-۳. نتایج اندازه‌گیری دمای آب عبوری بین دو

جزیره

نتایج اندازه‌گیری نوسانات دمای متوسط فاصله و عمق جریان‌های دریایی بین دو جزیره در شکل ۷ نشان داده شده است. اگرچه داده‌های تیکه‌نگاری صوتی در هر دقیقه به دست می‌آیند، اما از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند و دارای نوسانات زیادی است (شکل ۷ خطوط سبز رنگ). یکی از اصول روش تیکه‌نگاری



شکل ۶- تغییرات دمای متوسط فاصله و عمق بین دو جزیره

۳-۳. تحلیل خطا و قدرت تفکیک پذیری

به منظور محاسبه خطای اندازه‌گیری دما بایستی بر اساس رابطه ۱۱ مقدار انحراف سرعت صدا را محاسبه نمود. خطای میانگین زمان رسیدن (St_{m-err}) در واقع تفکیک زمانی پرتوهای سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی (St_r) است که برابر با ۳۰ میلی‌ثانیه است. در نتیجه با احتساب سرعت صدای مرجع ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و فاصله ۴۴۵۴ متری بین دو ایستگاه صوتی مقدار انحراف سرعت صدای اندازه‌گیری شده برابر است با $SC_{err}=15.9m/s$. از طرفی با میانگین‌گیری متحرک ۳۰ داده (۳۰ دقیقه)، مقدار انحراف سرعت صدا به میزان $SC_{er} = \frac{15.9}{\sqrt{30}} = 2.9m/s$ ارتقاء می‌یابد. سپس با توجه به مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده $D_0=30m$ و $S_0=34psu, T_0=28^{\circ}C$ و آن‌ها در روابط ۷ و ۸، مقادیر α و β به ترتیب ۲٫۱۸ و ۱٫۰۵ به دست می‌آید. بنابراین رابطه ۶ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\delta C = 2.18\delta T + 1.05\delta S$$

حال با فرض شوری ثابت (عدم وجود انحراف از مقدار واقعی $SS=0$) و $SC_{err}=1.1m/s$ مقدار خطای دمایی اندازه‌گیری شده برابر است با $ST = \frac{SC}{2.18} = \frac{2.9}{2.18} = 1.3^{\circ}C$ همچنین مقدار تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری دما با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی بر اساس رابطه ۱۲ تابعی از سرعت صدای اندازه‌گیری شده $a=2.18, (c=1540m/s)$ که ۱۰۰۰۰ هرتز است و فاصله بین دو ایستگاه صوتی (۴۴۵۴ متر) محاسبه می‌شود که در این آزمایش قدرت تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری دما با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری صوتی ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد به دست آمد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام جریان‌های دریایی یکی از داده‌های پایه به‌منظور درک بهتر مسائل مربوط به محیط زیست دریایی است. از آنجایی که در دهه‌های اخیر، گرمایش جهانی باعث بالا رفتن دمای آب دریاها شده است و حیات گیاهان دریایی و آبزیان را با خطر مواجه کرده است، به‌کارگیری فناوری‌های نوین پایش دمای آب دریاها با هزینه اجرایی کم، حائز اهمیت است. پایش پیوسته، بلندمدت و بهنگام جریان‌های دریایی یکی از داده‌های پایه به‌منظور درک بهتر مسائل مربوط به محیط زیست دریایی است. ابزارهای موجود از جمله دستگاه‌های صوتی (نظیر دستگاه‌های ADCP) و غیر صوتی (نظیر دستگاه‌های CTD) نه تنها قابلیت اندازه‌گیری پیوسته دما در مقیاس وسیع را ندارند، بلکه به تجهیزات جانبی مثل شناوری و غیره نیاز دارند که هزینه‌های اجرایی را به شدت افزایش می‌دهد. این درحالیست که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با نصب در ساحل به نیروی انسانی و شناور نیاز ندارند و داده‌های دمایی جریان را به صورت پیوسته و بلندمدت اندازه‌گیری می‌کنند. در این مطالعه دمایی آب جریان‌های عبوری بین دو جزیره با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی به مدت ۳۶ ساعت به صورت پیوسته اندازه‌گیری شد. در این مدت دمای آب تقریباً ۲۸ سانتی‌گراد به دست آمد. نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات پیشین از جمله مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۵) در خلیج هیروشیما، Huang و همکاران (۲۰۱۶) در اسکله باچیمین تایوان، Syamsudin و همکاران (۲۰۱۷) در تنگه بالی اندونزی و Huang و همکاران (۲۰۱۹) در محیط آزمایشگاهی مطابقت دارد. در نتیجه فناوری تیکه‌نگاری صوتی یک ابزار قدرتمند به منظور پایش پیوسته و بهنگام دمای جریان‌های دریایی است.

References

- Adityawarman, Y., Kaneko, A., Nakano, K., Taniguchi, N., Komai, K., Guo, X. and Gohda, N., 2011. Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of oceanography*, 67(2), pp.173-182.
- Androulakis, D.N., Banks, A.C., Dounas, C. and Margaris, D.P., 2020. An Evaluation of Autonomous In Situ Temperature Loggers in a Coastal Region of the Eastern Mediterranean Sea for Use in the Validation of Near-Shore Satellite Sea Surface Temperature Measurements. *Remote Sensing*, 12(7), p.1140.
- Bahreimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftakhari, M., Kardan Moghaddam, H., & Hasanli, S. A. 2019. Continuous Monitoring of Tidal Bores Using Acoustic Tomography Technique. *Journal of Oceanography*, 9(36), 57-64 [In Persian].
- Bahreini Motlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardan Moghadam, H., & Kavousi Heydari, A. R. 2018. Design, manufacture and the evaluation of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS). *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, 6(1), 1-11 [In persian].
- Bahreimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardanmoghadam, H., Abbasi, M & Mohtasham, K. 2019. Feasibility study of Fluvial Acoustic Tomography System for flood monitoring and determination of the measurement accuracy, minimum and maximum measurement ranges, Iran. *J. Echo Hydrol.* 6, 585-592 [In Persian].
- Bahreimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardanmoghadam, H., Khoshhali, M & Mohtasham, K., Feasibility study of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for current monitoring in the Persian Gulf. *Journal of Marine Engineering*, pp.131-138 [In Persian].
- Bahreimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Heydari, A.K & Abolhosseini, S. 2019. Investigation of Current Status in Haftbarm Lake Using Acoustic Tomography Technology, *J. Water Soil.* 33, 23-35 [In Persian].
- Bahreimotlagh, M., Khoshuei, A.K., Roozbahani, R., Eftekhari, M & Moghadam, H.K. 2019. The First Fluvial Acoustic Tomography System Experience for River Flow Velocity Monitoring in Iran, *Iran. J. Soil Water Res.* 50, 1793–1800, [In Persian].
- Baggeroer, A. and Munk, W., 1992. The Heard Island feasibility test. *Physics Today*, 45(9), pp.22-30.
- Bahreimotlagh, 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*, 51, pp.30-39.
- Bahreimotlagh, M., Kawanisi, K., Al Sawaf, M.B., Roozbahani, R., Eftekhari, M. and Khoshuei, A.K., 2019. Continuous streamflow monitoring in shared watersheds using advanced underwater acoustic tomography system: a case study on Zayanderud River. *Environmental monitoring and assessment*, 191(11), p.657.
- Dushaw, B.D., Sagen, H. and Beszczynska-Möller, A., 2016. Sound speed as a proxy variable to temperature in Fram Strait. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), pp.622-630.
- 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. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), pp.EL137-EL142.
- Huang, H., Guo, Y., Wang, Z., Shen, Y. and Wei, Y., 2019. Water Temperature Observation by Coastal Acoustic Tomography in Artificial Upwelling Area. *Sensors*, 19(12), p.2655.
- Kawanisi, K., Razaz, M., Ishikawa, K., Yano, J. and Soltaniasl, M., 2012. Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system. *Water Resources Research*, 48(5).
- Qin, L.Z., Kim, S.H., Song, H.J., Suonan, Z., Kim, H., Kwon, O. and Lee, K.S., 2019. Influence of Regional Water Temperature Variability on the Flowering Phenology and Sexual Reproduction of the Seagrass *Zostera marina* in Korean Coastal Waters. *Estuaries and Coasts*, pp.1-14.
- 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*, 38(5), pp.246-253.
- Taniguchi, N., Sakuno, Y., Mutsuda, H., Arai, M., 2020. Revisiting a coastal acoustic tomography experiment in Hiroshima Bay: Temporal variations in

path-averaged currents and its relation to wind. Applied Ocean Research, 102, 102303.

Trombetta, T., Vidussi, F., Mas, S., Parin, D., Simier, M. and Mostajir, B., 2019. Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. PloS one, 14(4).

Vanhellemont, Q., 2020. Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS. Remote Sensing of Environment, 237, p.111518.

Wang, L., Wang, Y., Wang, J. and Li, F., 2020. A High Spatial Resolution FBG Sensor Array for Measuring Ocean Temperature and Depth. Photonic Sensors, 10(1), pp.57-66.

Yamamoto, T. and Kaneko, A., 2006. Accurate imaging of the current and temperature structures in coastal oceans by acoustic data assimilation. The Journal of the Acoustical Society of America, 119(5), pp.3398-3398.

Zahraei, A., KHoshhal Dastjerdi, J., GHanghermeh, A. 2019. Assessment of Climate Changes in the Caspian Sea by trend analyzing the sea surface temperature, J. Nat. Environ. Hazards. 8, 217-232 [in Persian].

Zhang, C., Kaneko, A., Zhu, X.H. and Gohda, N., 2015. Tomographic mapping of a coastal upwelling and the associated diurnal internal tides in Hiroshima Bay, Japan. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(6), pp.4288-4305.