

اهمیت روش تیکه‌نگاری صوتی در مطالعات اقیانوس‌شناسی

مهراں صادقی دلویی دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران sadeghi.mehran@ut.ac.ir	مرتضی افتخاری استادیار پژوهشکده منابع آب مؤسسه تحقیقات آب، تهران m.eftekhari@wri.ac.ir	رضا روزبهانی استادیار پژوهشکده منابع آب مؤسسه تحقیقات آب، تهران r.roozbahani@wri.ac.ir	مسعود بحرینی مطلق* استادیار پژوهشکده منابع آب مؤسسه تحقیقات آب، تهران masoud.bahraini.m@gmail.com
---	--	--	---

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

چکیده

پایش پیوسته و بلند مدت دما و جریان‌های اقیانوسی به‌منظور درک بهتر دینامیک اقیانوس‌ها و همچنین بررسی اثر گرمایش جهانی بر اقیانوس‌ها حائز اهمیت است. روش تیکه‌نگاری صوتی^۱ یکی از ابزارهای کارآمد جهت پیش اقیانوس‌ها است. روش تیکه‌نگاری صوتی براساس قانون زمان طی شده امواج صوتی و با محاسبه اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه‌های مختلف، خصوصیات جریان آب را محاسبه می‌کند. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی با ارسال امواج صوتی با بسامد کمتر از ۱ کیلوهرتز، قادرند دما و سرعت جریان را در مقیاس ده هزار کیلومتری اندازه‌گیری نمایند. در این تحقیق علاوه بر بررسی مبانی تئوری روش تیکه‌نگاری صوتی، پژوهش‌های انجام شده در این خصوص مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به انتقال فناوری تیکه‌نگاری صوتی به ایران، با به‌کارگیری این روش در شمال اقیانوس هند و جریان‌های ورودی به تنگه هرمز، اطلاعات ارزشمندی در اختیار محققان قرار خواهد گرفت.

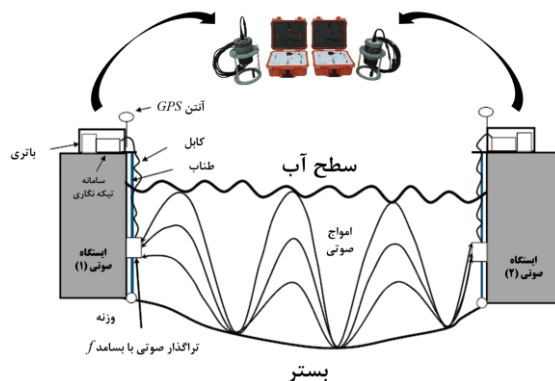
واژگان کلیدی: تیکه‌نگاری صوتی، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی، پیش پیوسته دما و سرعت جریان.

۱. مقدمه

تیکه‌نگاری صوتی به‌عنوان یک روش سنجش از دور ابزاری کارآمد به‌منظور پیش پیوسته پهنه‌های آبی است. فناوری تیکه‌نگاری صوتی در سه مقیاس رودخانه‌ای، دریایی، و اقیانوسی خصوصیات جریان‌های آبی را با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای با بسامدهای ۳۰ [۱] و ۵۰ کیلوهرتز [۲]، دما، سرعت و دبی جریان رودخانه‌ها [۳] و دریاچه‌ها [۴] را به‌صورت پیوسته پیش می‌کنند. حداکثر برد اندازه‌گیری دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای به دلیل استفاده

از امواج صوتی با بسامدهای بالا (۳۰ و ۵۰ کیلوهرتز) کمتر از ۲۰۰۰ متر است [۵]. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی دریایی با به‌کارگیری بسامدهای ۴ و ۱۰ کیلوهرتز حجم آب عبوری از آب‌های کم‌عمق از جمله تنگه‌ها، ساختار جریان‌های جزر و مدی در خورها و خلیج‌ها، تغییرات دمای آب، وضعیت دو بعدی و سه بعدی جریان‌های دریایی و غیره را در فواصل چند ده کیلومتری مورد پیش قرار می‌دهند [۶]. در مقابل، فناوری تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی با انتشار امواج صوتی با بسامد کمتر از ۱ کیلوهرتز، قادر است جریان‌های عمیق اقیانوسی را در مقیاس چند هزار کیلومتری اندازه‌گیری

کرده و زمان رسیدن امواج صوتی را اندازه‌گیری می‌کنند که در شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۱. طرح‌واره ارسال دوسویه امواج صوتی بین دو ایستگاه تیکه‌نگاری صوتی به همراه تصویری از دو کنترلر و تراگذار صوتی عملیاتی

با استفاده از اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی، سرعت جریان آب با دقت 0.1 سانتی‌متر بر ثانیه محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی در مقیاس میکروثانیه است، خطای کوچک در ثبت زمان سیر امواج صوتی در آب، باعث ایجاد خطای بزرگ در اندازه‌گیری‌های سرعت جریان آب می‌شود. از این رو دقت ثبت زمان رسیدن امواج صوتی در مقیاس نانو ثانیه انجام می‌پذیرد تا خطای اندازه‌گیری کمینه گردد. پس از هم‌زمان‌سازی، تولید سیگنال‌های الکتریکی با بسامد مورد نظر توسط یک پردازنده انجام می‌شود و به سمت تراگذار نصب شده در آب ارسال می‌شود تا امواج الکتریکی به امواج مکانیکی صوتی تبدیل شود و در محیط آبی ارسال گردند.

برخلاف دستگاه‌های پروفایل‌سنج صوتی داپلر ($ADCP^4$) که براساس اثر داپلر، یعنی رابطه بین بسامد و سرعت امواج صوتی بین گیرنده و فرستنده استوار هستند، فناوری تیکه‌نگاری صوتی تنها از زمان‌های طی‌شده امواج صوتی بهره می‌گیرد. به عبارت دیگر تیکه‌نگاری صوتی به دنبال برقراری یک رابطه بین زمان طی‌شده امواج صوتی، سرعت صوت و سرعت جریان است.

نماید. این نوع فناوری، اندازه‌گیری دقیقی از اجزاء جریان‌های جزر و مدی ($Q1, M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1$) [۷]، جریان‌های گردابی مدیترانه‌ای^۲ [۸]، پایش پیوسته جریان‌های اقیانوسی [۹]، تغییرات دمای آب [۱۰] و داده‌گذاری مدل‌های عددی اقیانوسی [۱۱] را ارائه می‌کند.

از مزایای روش تیکه‌نگاری صوتی نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری دما و سرعت جریان می‌توان به برد بسیار بالا، الگوی غیرخطی انتشار امواج (که باعث پخش امواج در کل سطح مقطع عمودی می‌شود)، پس‌پردازش ساده داده‌ها و عدم ایجاد مزاحمت برای ترافیک‌های دریایی اشاره کرد [۱].

اگرچه در سال‌های اخیر روش تیکه‌نگاری صوتی در مقیاس آزمایشگاهی [۱۲] و رودخانه‌ای [۱۳] در ایران مورد استفاده قرار گرفته است و اطلاعات ارزشمندی را در اختیار پژوهشگران و ذی‌نفعان منابع آب کشور قرار داده است، اما عدم به‌کارگیری این نوع فناوری در بخش‌های شمالی اقیانوس هند و تنگه هرمز، باعث خلاء اطلاعاتی خصوصیات جریان که مورد استفاده دریانوردان و ماهیگیران ایرانی و همچنین نیروهای نظامی کشور ایران است شده است. لذا در این مطالعه مبانی تئوری روش تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی و همچنین برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در سایر کشورها مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف اصلی این مقاله معرفی روش تیکه‌نگاری صوتی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی است که نتایج حاصل از به‌کارگیری این فناوری سهم عظیمی در مطالعات و تصمیم‌گیری‌های پژوهشگران، دریانوردان و نیروهای نظامی کشور ایران خواهد داشت.

۲. مواد و روش‌ها: مبانی علم تیکه‌نگاری صوتی

۲-۱. ارسال دوسویه امواج صوتی^۳ در محیط آبی
دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از ماهواره‌ها هم‌زمان‌سازی شده و امواج صوتی را به‌طور هم‌زمان ارسال

$$\Delta\tau_i^\pm \approx \int_{\Gamma_i^\pm} \frac{ds}{C_0} \left(1 - \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right) - \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (4)$$

با اجرای بسط دوم تیلور، معادله‌ی فوق به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\begin{aligned} \Delta\tau_i^\pm &= - \int_{\Gamma_{0,i}^\pm} \frac{(\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds}{C_0^2} \\ &+ \int_{\Gamma_{0,i}^\pm} \frac{1}{C_0} \left(1 - \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right) \Delta(ds) \quad (5) \\ &\approx - \int_{\Gamma_{0,i}^\pm} \frac{(\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds}{C_0^2} \end{aligned}$$

در معادله ۵ تفاضل و مجموع زمان‌های طی شده دوسویه^۸ را می‌توان به صورت جداگانه نوشت که نشان‌دهنده اثر سرعت جریان آب و سرعت صوت است که به ترتیب با معادله‌های ۶ و ۷ ارائه می‌گردد:

$$\delta\tau_i^v = \Delta\tau_i^+ - \Delta\tau_i^- \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0^2} \quad (6)$$

$$\delta\tau_i^c = \Delta\tau_i^+ + \Delta\tau_i^- \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\delta C}{C_0^2} ds \quad (7)$$

با جای‌گذاری زاویه موج صوتی ϕ_i نسبت به صفحه افقی و تصویر کردن^۹ موج صوتی در صفحه‌ی افق معادلات فوق به صورت زیر ارائه می‌گردند:

$$\begin{aligned} \delta\tau_i^v &\approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{u \cdot \cos\phi_i}{C_0^2} \frac{dx}{\cos\phi_i} \\ &= -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{u}{C_0^2} dx \quad (8) \end{aligned}$$

$$\delta\tau_i^c \approx -2 \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{\delta C}{C_0^2} \frac{dx}{\cos\phi_i} \quad (9)$$

به‌طور کلی انتشار امواج صوتی در محیط آب تابع سرعت صوت $C(x,y,z)$ و سرعت جریان آب $\mathbf{u}(x,y)$ در آن محیط است. زمان طی شده امواج صوتی بین دو ایستگاه صوتی که هم‌زمان امواج صوتی را به یکدیگر ارسال می‌کنند با استفاده از معادله انتگرال زیر قابل محاسبه است [۱۴]:

$$t_i^\pm = \oint_{\Gamma_i^\pm} \frac{ds}{C_0(Z) + \delta C(x,y) \pm \mathbf{u}(x,y) \cdot \mathbf{n}_i} \quad (1) \quad (i = 1, 2, \dots, M)$$

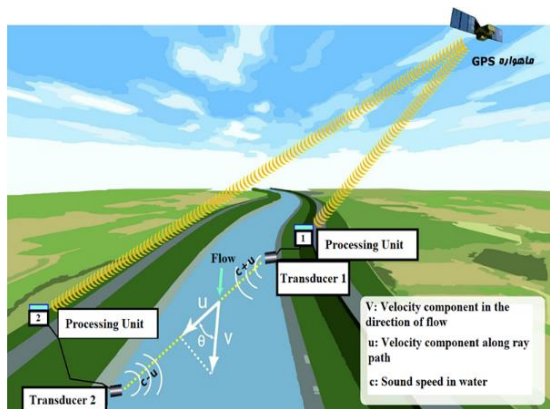
نشانه \pm نشان‌دهنده جهت ارسال موج روی مسیر Γ از ایستگاه صوتی بالادست به پایین‌دست و بالعکس است، C_0 سرعت صوت مرجع مستقل از مسافت، x,y,z به ترتیب طول و عرض و ارتفاع در محیط آبی، δC انحراف از سرعت صوت مرجع، \mathbf{u} بردار سرعت جریان آب \mathbf{n} تانژانت بردار واحد مسیر صوت، S مسافت قوس مسیر موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی و پسوند i شماره موج صوتی پیموده شده است. زمان طی شده^۵ (t_0, i) برای سرعت صوت مرجع توسط شبیه‌سازی موج^۶ و مستقل از مسافت^۷ تعیین شده و به صورت معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۵]:

$$t_{0,i} = \oint_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (2)$$

تفاضل معادله ۱ و ۲، انحراف زمان طی شده امواج صوتی نسبت به زمان طی شده موج صوتی مرجع را نشان می‌دهد:

$$\Delta\tau_i^\pm \approx \int_{\Gamma_i^\pm} \frac{ds}{C_0 \left(1 + \frac{\delta C \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}}{C_0}\right)} - \int_{\Gamma_{0,i}} \frac{ds}{C_0} \quad (3)$$

با توجه به اینکه $C_0 \gg \Delta C$ و $C_0 \gg \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ ، با استفاده از بسط تیلور و صرف نظر از جمله‌های بزرگ‌تر از ۲، معادله فوق به صورت زیر ساده می‌گردد:



شکل ۴. سرعت جریان آب در راستای امواج صوتی u ، سرعت در جهت جریان آب v و زاویه‌ی بین امواج صوتی و جهت جریان آب θ [۱۲]

و با حل دو معادله فوق سرعت متوسط جریان آب و سرعت صوت حاصل خواهد شد:

$$c_m = \frac{L}{t_m} \quad (12)$$

$$u_m = \frac{c_m^2}{2L} \Delta t \quad (13)$$

که L فاصله افقی بین دو ایستگاه صوتی و t_m (میانگین زمان‌های طی شده) و Δt (اختلاف زمان‌های طی شده) به شکل زیر هستند.

$$t_m = \frac{t_{Up} + t_{Down}}{2} \approx t_{Up} \approx t_{Down} \quad (14)$$

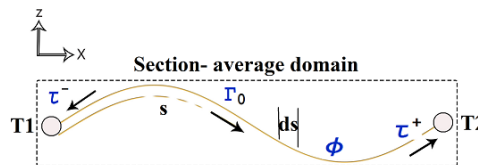
$$\Delta t = t_{Up} - t_{Down} \quad (15)$$

برای استخراج روابط ۱۲ و ۱۳ فرض شده که زمان طی شده برای ایستگاه بالادست و پایین‌دست تقریباً برابر بوده و خود آنها تقریباً برابر با میانگین زمان‌های طی شده هستند در رابطه ۱۴ آمده است.

با استفاده از معادله‌های ۱۲ و ۱۳، با معلوم بودن فاصله دو ایستگاه از یکدیگر و ثبت زمان رسیدن موج‌های صوتی در ایستگاه بالادست و پایین‌دست، سرعت متوسط جریان آب و سرعت صوت قابل محاسبه است.

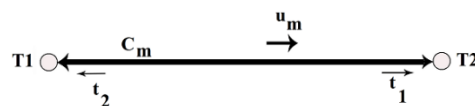
به دلیل ناچیز بودن سرعت عمودی جریان، v بیانگر سرعت جریان در محور افقی است.

در شکل ۲ مسیر یک موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی T1 و T2 نشان داده شده است. با توجه به مسیر موج صوتی نشان داده شده در این شکل، سرعت متوسط عمودی جریان در مقطع مورد نظر u و سرعت صوت در دامنه مستطیلی که توسط دو خط افقی که از بالا و پایین ایستگاه‌های صوتی عبور می‌کند و دو خط عمودی که ایستگاه‌های صوتی را احاطه کرده است، به‌دست می‌آید.



شکل ۲. مسیر موج صوتی بین دو ایستگاه صوتی T1 و T2 [۱۶]

از آنجا که سرعت عمودی جریان ناچیز شمرده می‌شود، سرعت متوسط جریان در مقطع بین دو ایستگاه (u_m) و سرعت صوت (c_m) را می‌توان به‌صورت افقی در نظر گرفت که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر موج صوتی در صفحه افق [۱۷]

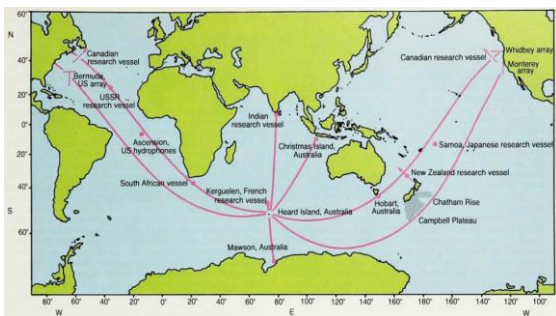
در نهایت زمان طی شده برای ایستگاه بالادست و پایین‌دست به‌ترتیب به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. [۱۸]:

$$t_{Down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad (10)$$

$$t_{Up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (11)$$

- آیا می‌توان امواج صوتی انتشار یافته را در فواصل بیش از ۱۰۰۰۰ کیلومتری دریافت نمود؟
- و آیا می‌توان زمان رسیدن امواج صوتی را با دقت ۰/۱ ثانیه اندازه‌گیری نمود و دمای آب اقیانوس‌ها را به دست آورد؟

در این راستا در سال ۱۹۹۱ یک منبع صوتی در جزیره هرد^{۱۶} در جنوب اقیانوس هند امواج صوتی با بسامد ۵۷ هرتز و تراز ۲۰۵-۱۹۵ dB re 1 μPa at 1 m را منتشر کرد و گیرنده‌های صوتی امواج انتشار یافته را در فاصله ۱۸۰۰۰۰ کیلومتری یعنی تقریباً فاصله نصف کره زمین دریافت کردند در شکل ۵ مشاهده می‌شود [۲۰]. اسناد و داده‌های این آزمایش در پایگاه اینترنتی دانشگاه واشنگتن در دسترس است^{۱۷}.



شکل ۵. انتشار امواج صوتی در نزدیکی جزیره هرد و دریافت آن در اقیانوس آرام، اطلس و هند [۲۰]

پروژه AMODE^{۱۸}: پروژه AMODE به مدت ۳۰۰ روز در سال ۱۹۹۱-۱۹۹۲ به منظور پایش مدهای پایین جزر و مد درونی^{۱۹} عبوری از غرب اقیانوس اطلس شمالی انجام شد. در آن آزمایش از پنج دستگاه تیکه‌نگاری صوتی با بسامد ۲۵۰ هرتز استفاده شد. فاصله دستگاه‌ها ۳۵۰ تا ۶۶۰ کیلومتر از یکدیگر قرار داشت [۲۱، ۲۲]. در همان سال پروژه دریای مدیترانه THETIS I^{۲۰} در خلیج لیون به منظور اندازه‌گیری دمای جریان با استفاده از ۶ دستگاه تیکه‌نگاری صوتی که به فواصل ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتر از یکدیگر قرار داده شده بودند انجام شد [۲۳].

براساس رابطه مکنزی^{۱۱} سرعت صوت در آب تابعی از دما (T)، شوری (S) و عمق آب (D) است و به صورت معادله ۱۶ بیان می‌شود.

$$C(T, S, D) = 1448.9 + 4.591T - 0.05304T^2 + 2.734 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (۱۶)$$

با اندازه‌گیری شوری سایت تیکه‌نگاری صوتی و محاسبه سرعت صوت از رابطه ۱۲ می‌توان با حل معادله مکنزی دمای میانگین سایت مورد بررسی را محاسبه نمود.

۲-۲. تحقیقات انجام شده در زمینه تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی

الف) پژوهش‌های تیکه‌نگاری اقیانوسی دهه ۱۹۹۰

پروژه HIFT^{۱۲}: در صده گذشته انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسید کربن سبب افزایش دمای جو و اقیانوس‌ها شده است. لذا درک تغییرات دمایی اقیانوس‌ها و اثرات آن بر جو، مستلزم پایش پیوسته و دائمی دمای اقیانوس‌ها است. از آنجایی که اندازه‌گیری نقطه‌ای دمای اقیانوس‌ها اطلاعات جامعی در اختیار محققان قرار نمی‌داد، روش تیکه‌نگاری صوتی به منظور پایش اقیانوس‌ها در مقیاس چند ده هزار کیلومتری ابداع شد [۱۹]. در این راستا در سال ۱۹۸۹ اداره تحقیقات نیروی دریایی آمریکا^{۱۳}، اداره ملی اقیانوسی و جوی آمریکا^{۱۴}، بنیاد ملی علوم آمریکا^{۱۵} و وزارت انرژی آمریکا پروژه مشترکی با نام HIFT را آغاز کردند. هدف از این آزمایش پاسخ به دو پرسش زیر بود:

صوتی ابزاری کارآمد برای پایش درازمدت سرعت جریان در اقیانوس‌ها است [۲۷]. اسناد و داده‌های این آزمایش در پایگاه اینترنتی دانشگاه واشنگتن در دسترس است [۲۷].

پروژه ATOC^{۲۸}: یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های انجام شده در دنیا، پروژه‌ای با نام ATOC به منظور پایش درازمدت دمای اقیانوس آرام بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ است. در این آزمایش ارسال کننده‌های امواج صوتی در کالیفرنیا و کائوآئی^{۲۹} نصب شدند. ارسال کننده‌های صوتی امواجی با بسامد ۴۵ هرتز را به دریافت کننده‌هایی که در اقیانوس آرام شمالی قرار داشتند ارسال کردند. فاصله بین ارسال کننده و دریافت کننده امواج صوتی ۱۵۰۰ تا ۵۵۰۰ کیلومتر بود. دستگاه‌های تیکه‌نگاری نصب شده در کالیفرنیا و کائوآئی در سال ۱۹۹۹ خاتمه یافتند. اما تحقیقات کائوآئی دوباره در سال ۲۰۰۲ تحت بخشی از پروژه‌ای با نام (NPAL)^{۳۰} دوباره آغاز شد و تا سال ۲۰۰۶ ادامه یافت. این آزمایش‌ها به اندازه کافی طولانی بود که تغییرات گرمایی فصل‌ها، سالانه و درازمدت را اندازه‌گیری کند [۲۸، ۲۹].

آزمایش شمال تنگه لوزون^{۳۱} در این پروژه که در سال ۲۰۰۸ انجام شد دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی به فاصله ۳۶ کیلومتر از یکدیگر نصب شد و امواج صوتی را با بسامد ۸۰۰ هرتز ارسال کردند. نتایج این مطالعه، قابلیت این روش برای پایش درازمدت جریان‌های اقیانوسی در اعماق مختلف را نشان داد [۳۰]. در تحقیق دیگری در این مکان با استفاده از سه دستگاه تیکه‌نگاری صوتی با بسامد ۸۰۰ هرتز و فواصل ۴۰ کیلومتر از یکدیگر، ساختار عمودی دما اندازه‌گیری شد. در این مطالعه دمای جریان در لایه‌های مختلف آب اندازه‌گیری شد [۳۱].

آزمایش جنوب تایوان: در سال ۲۰۰۹ آزمایش دیگری به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان کوروشیو^{۳۲} در اعماق مختلف آب در جنوب تایوان انجام شد. در این تحقیق از امواج صوتی با بسامد ۸۰۰ هرتز استفاده شد. فاصله بین دو ایستگاه صوتی ۴۸ کیلومتر بود. نتایج نشان داد با استفاده از

در سال ۱۹۹۴ مرحله دوم پروژه قبل با نام THETIS-2 به مدت ۹ ماه در دریای مدیترانه به منظور پایش دمای جریان آب با استفاده از ۷ دستگاه تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی انجام شد [۲۳]. بسامد امواج ارسالی ۲۵۰-۴۰۰ هرتز و فاصله ۱۳ راستای ارسال امواج صوتی بین ۷ دستگاه بین ۲۲۰ تا ۶۱۰ کیلومتر بود. نتایج این تحقیق نشان داد روش تیکه‌نگاری قابلیت پایش درازمدت دمای آب را با دقت بالا دارد [۲۴].

آزمایش CAMBIOS^{۳۱}: این آزمایش به منظور ارزیابی روش تیکه‌نگاری برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان آب در مدیترانه طراحی شد. در این آزمایش که در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۸ انجام شد، پنج ایستگاه تیکه‌نگاری صوتی بین جزایر قناری و آزور نصب شد. فاصله بین ایستگاه‌ها بیش از ۳۰۰ کیلومتر و به مدت ۲۶۵ روز به طول انجامید. نتایج نشان داد این روش به خوبی متغیرهای اقیانوسی را با دقت بالا و پیوسته اندازه‌گیری می‌نماید [۸].

پایش اقلیم اقیانوس منجمد شمالی با استفاده از صوت زیر آب (ACOUS)^{۳۲}: در سال ۱۹۹۸ محققان با انتشار امواج صوتی به روش تیکه‌نگاری صوتی و با بسامد ۲۰/۵ هرتز موفق به پایش گرم شدن آب اقیانوس منجمد شمالی شدند. در این تحقیق ارسال کننده‌های امواج صوتی در سرزمین فرانسه یوزف^{۳۳} قرار داده شدند و زمان رسیدن امواج صوتی در فواصل ۱۲۵۰ کیلومتر و ۲۷۲۰ کیلومتر به ترتیب در دریای لینکن^{۳۴} و آلاسکا توسط دریافت کننده‌ها ثبت شدند [۲۵]. نتایج روش تیکه‌نگاری با روش‌های مدل‌های عددی و پیش‌بینی‌های تئوری مقایسه شد و قابلیت پایش دمای آب اقیانوس‌ها با استفاده از روش تیکه‌نگاری به اثبات رسید.

ب) پژوهش‌های تیکه‌نگاری اقیانوسی دهه ۲۰۰۰

پروژه H.O.M.E^{۳۵}: این پروژه که در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۲ انجام شد، با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی امواج جزر و مد درونی^{۳۶} و سرعت جریان در هاوایی اندازه‌گیری شد [۲۶]. نتایج این تحقیق نشان داد که روش تیکه‌نگاری

رسیدن امواج صوتی را مورد مطالعه قرار داد و با دیگر روش‌ها از جمله CTD و مدل‌های ریاضی مقایسه کردند. نتایج نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی قادر است با دقت بالا خصوصیات جریان را اندازه‌گیری می‌نماید [۳۳]. لذا در سال ۲۰۱۷ روش تیکه‌نگاری صوتی بخشی از برنامه‌ی مطالعات اقیانوس اطلس شمالی [۳۴] به‌ویژه در خلیج بافین^{۳۵} [۳۵] معرفی گردید.

همچنین در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه پایش جریان‌های اقیانوسی با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی در آب‌های ژاپن [۹]، تنگه لوزون فیلیپین^{۳۶} [۳۶]، تنگه فرام [۳۷] و حوضه کانادا [۳۸] واقع در اقیانوس منجمد شمالی^{۳۷}، دریای چین [۳۹]، تایوان [۴۰] و غیره انجام شده است.

۳. نتیجه‌گیری

بررسی روش‌های مختلف پایش اقیانوس‌ها نشان می‌دهد که روش تیکه‌نگاری صوتی یکی از کارآمدترین ابزارهای پایش پیوسته و بلندمدت اقیانوس‌ها است [۴۱]. مقایسه فناوری تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی و روش‌های رایج سنجش سرعت جریان و دمای اقیانوس در جدول ۱ ارائه شده است.

این روش می‌توان سرعت جریان را در اعماق مختلف اقیانوس به‌صورت پیوسته و درازمدت پایش نمود [۹].

آزمایش DAMOCLES تنگه فرام^{۳۳}: در این آزمایش که به مدت ۱۰ ماه از ۲۱ سپتامبر ۲۰۰۸ تا پایان جولای ۲۰۰۹ انجام شد، تغییرات دمایی تنگه فرام در مجاورت گرین‌لند با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری شد. فاصله ایستگاه‌های صوتی در این پروژه ۱۳۰ کیلومتر بود و امواج صوتی با بسامد ۱۸۹ تا ۲۶۰ دسی‌بل و با تراز 1 dB re 1 mPa@1۹۰ ارسال شدند. نتایج نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی یکی از کارآمدترین ابزارهای پایش دمایی جریان‌های اقیانوسی در بلندمدت است [۳۲].

ج) پژوهش‌های تیکه‌نگاری اقیانوسی دهه ۲۰۱۰

در دهه حاضر نیز مطالعات و پژوهش‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی در کشورهای پیشرو ادامه داشته است. مرکز علوم محیطی و سنجش از دور نانسن (NERSC)^{۳۴} واقع در اروپا تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه آغاز کرده است. این مرکز در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ با استفاده از سه دستگاه تیکه‌نگاری صوتی که به فواصل ۱۰۱ تا ۳۱۱ کیلومتر از یکدیگر در تنگه فرام را نصب کرد و شرایط جریان و زمان

جدول ۱. مقایسه فناوری تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی و روش‌های رایج سنجش سرعت جریان و دمای اقیانوس

دستگاه CTD	دستگاه ADCP	فناوری تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی
اندازه‌گیری دما (هدایت الکتریکی و فشار) اقیانوس	اندازه‌گیری سرعت جریان‌های اقیانوسی	اندازه‌گیری دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی
به‌کارگیری آن نیازمند نیروی انسانی و تجهیزات خاص است و می‌تواند برای ترافیک کشتی‌ها مزاحمت ایجاد کند	ایجاد اختلال در ترافیک کشتی‌ها (در مدل‌های سوار بر کشتی) و هزینه بر بودن نصب دستگاه‌هایی که در کف بستر قرار می‌گیرند	سهولت در نصب و به‌کارگیری و عدم ایجاد مزاحمت برای فعالیت‌های ماهیگیری و تردد کشتی‌ها
اندازه‌گیری دما مبتنی بر امواج صوتی نمی‌باشد	امواج صوتی با بسامدهای بالا (۳۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز)	امواج صوتی با بسامدهای پایین (۲۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز)
اندازه‌گیری نقطه‌ای و محدود	اندازه‌گیری در مسافت‌های کوتاه (کمتر از ۱ کیلومتر)	توانایی اندازه‌گیری در مسافت‌های طولانی (چند هزار کیلومتر)
-	انتشار امواج صوتی در راستای یک خط مستقیم	انتشار امواج صوتی در کل مقطع محیط آب
اندازه‌گیری دما توسط این دستگاه مستقل از غلظت رسوب محیط آب است	عدم قابلیت اندازه‌گیری جریان با وجود غلظت‌های بالای رسوب به دلیل استفاده از بسامد بالای امواج صوتی	قابلیت اندازه‌گیری جریان با وجود غلظت‌های بالای رسوب به دلیل استفاده از بسامد پایین امواج صوتی
تولید تجاری	تولید تجاری	عدم تولید تجاری

و دریایی (با بسامد ۱۰ کیلوهرتز) در ایران و اندازه‌گیری‌های موفق در آب‌های ایران، می‌توان با توسعه فناوری فوق‌الذکر، دستگاه‌های تیکه‌نگاری اقیانوسی با بسامد کمتر از ۱ کیلوهرتز را نیز تولید کرد. لذا با توجه به وجود زیرساخت‌های دانشی و فناوریانه سیستم‌های تیکه‌نگاری صوتی در کشور ایران [۱۲]، پیشنهاد می‌شود با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی جریان‌های شمالی اقیانوس هند و به‌ویژه جریان‌های ورودی به تنگه هرمز مورد مطالعه قرار گیرد.

اگرچه کشورهای غربی سرمایه‌گذاری وسیعی در خصوص توسعه و به‌کارگیری روش تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی انجام داده‌اند، اما دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی به‌صورت تجاری تولید و عرضه نمی‌شوند و تنها کشورهای انگلستان و آمریکا که توانایی ساخت دستگاه‌های صدرا اشاره را دارا هستند در حال استفاده از این روش هستند. این درحالی‌است که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای و دریایی به صورت تجاری تولید و عرضه می‌گردند. با عنایت به بومی‌سازی فناوری تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای (با بسامد ۳۰ کیلوهرتز)

۷. مآخذ

- [1] Bahreinimotlagh, Masoud, Reza Roozbahani, Mortaza Eftakhari, Moghaddam Hamid Kardan, and Seyyed Amirmohammad Hasanli, "Continuous Monitoring of Tidal Bores Using Acoustic Tomography Technique", 2019, pp.57-64.
- [2] Bahreinimotlagh, Masoud, Kiyosi Kawanisi, Mochammad Meddy Danial, Mohamad Basel Al Sawaf, and Junya Kagami, "Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge", *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, Vol.51, pp.30-39.
- [3] Kawanisi, Kiyosi, Masoud Bahrainimotlagh, Mohamad Basel Al Sawaf, and Mahdi Razaz, "High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography", *Hydrological Processes*, 2016, Vo.30, no.13, pp.2247-2254.
- [4] Bahreinimotlagh, Masoud, Reza Roozbahani, Mortaza Eftekhari, A. Kavousi, and S. Abolhosseini, "Investigation of flow condition in the haftbarm lake using acoustic tomography technology", *Journal of Water and Soil*, 2019, Vol.33, no.1.

- [5] Bahreinimotlagh, Masoud, Reza Roozbahani, Mortaza Eftekhari, Hamid Kardanmoghadam, Mahdi Abbasi, and Kamal Mohtasham, "Feasibility study of Fluvial Acoustic Tomography System for flood monitoring and determination of the measurement accuracy, minimum and maximum measurement ranges", *Iranian journal of Ecohydrology*, 2019, Vol.6, no.3, pp.585-592.
- [6] Kaneko, Arata, Xiao-Hua Zhu, and Ju Lin, *Coastal acoustic tomography*, Elsevier, 2020.
- [7] Stammer, Detlef, R. D. Ray, Ole Baltazar Andersen, B. K. Arbic, W. Bosch, L. Carrère, Yongcun Cheng et al., "Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models", *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol.52, no.3, pp.243-282.
- [8] Dushaw, Brian D., Fabienne Gaillard, and Thierry Terre. "Acoustic tomography in the Canary Basin: Meddies and tides." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol.122, no.11, pp.8983-9003.
- [9] Taniguchi, Naokazu, Chen-Fen Huang, Arata Kaneko, Cho-Teng Liu, Bruce M. Howe, Yu-Huai Wang, Yih Yang, Ju Lin, Xiao-Hua Zhu, and Noriaki Gohda, "Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, Vol.134, no.4, pp.3272-3281.
- [10] Dushaw, Brian D., Hanne Sagen, and Agnieszka Beszczynska-Möller, "Sound speed as a proxy variable to temperature in Fram Strait", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, Vol.140, no.1, pp.622-630.
- [11] Dushaw, Brian D., and Hanne Sagen, "A comparative study of moored/point and acoustic tomography/integral observations of sound speed in fram strait using objective mapping techniques", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, Vol.33, no.10, pp.2079-2093.
- [12] Bahreini Motlagh, M., R. Roozbahani, M. Eftekhari, H. Kardan Moghadam, and A. R. Kavousi Heydari, "Design, manufacture and the evaluation of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS)", *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, 2018, Vol.6, no.1, pp.1-11.
- [13] Bahreinimotlagh, Masoud, Abbas Kazemi Khoshuei, Reza Roozbahani, Mortaza Eftekhari, and Hamid Kardan Moghadam, "The First Fluvial Acoustic Tomography System Experience for River Flow Velocity Monitoring in Iran", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2019, Vol.50, no.7, pp.1793-1800.
- [14] Yamaguchi, Keisuke, Ju Lin, Arata Kaneko, Tokuo Yayamoto, Noriaki Gohda, Hong-Quang Nguyen, and Hong Zheng, "A continuous mapping of tidal current structures in the Kanmon Strait." *Journal of oceanography*, 2005, Vol.61, no.2, pp.283-294.
- [15] Park, J. H., "Study on the analyses of the Coastal Acoustic Tomography Data", *Doctor Dissertation, Graduate School of Engineering, Hiroshima University*, 2001.
- [16] Zhang, Chuanzheng, Arata Kaneko, Xiao-Hua Zhu, Bruce M. Howe, and Noriaki Gohd, "Acoustic measurement of the net transport through the Seto Inland Sea", *Acoustical Science and Technology*, 2016, Vol.37, no.1, pp.10-20.
- [17] Adityawarman, Yudi, "Advanced design of the coastal acoustic tomography system and its application to environmental monitoring of the Seto Inland Sea", PhD diss., 広島大学, 2011.
- [18] Bahreinimotlagh, Masoud, Kiyosi Kawanisi, Mohammad Basel Al Sawaf, Reza Roozbahani, Mortaza Eftekhari, and Abbas Kazemi Khoshuie, "Continuous streamflow monitoring in shared watersheds using advanced underwater acoustic tomography system: a case study on Zayanderud River", *Environmental monitoring and assessment*, 2019, Vol.191, no.11, pp.1-9.
- [19] Munk, P., Worcester, and C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography, in *Ocean Acoustic Tomography*, 1995.
- [20] Baggeroer, Arthur, and Walter Munk, "The Heard Island feasibility test", *Physics Today*, 1992, Vol.45, no.9, pp.22-30.
- [21] Cornuelle, Bruce D., and Peter F. Worcester, "Ocean acoustic tomography: Integral data and ocean models", In *Elsevier Oceanography Series*, 1996, Vol.61, pp.97-115.
- [22] Dushaw, Brian D., "Mode-1 internal tides in the western North Atlantic Ocean", *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2006, Vol.53, no.3, pp.449-473.
- [23] Send, Uwe, Friedrich Schott, Fabienne Gaillard, and Yves Desaubies, "Observation of a deep convection regime with acoustic tomography", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, Vol.100, no.C4, pp.6927-6941.

- [24] Skarsoulis, E. K., Uwe Send, G. Piperakis, and Pierre Testor, "Acoustic thermometry of the western Mediterranean basin", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, Vol.116, no.2, pp.790-798.
- [25] Gavrilov, Alexander N., and Peter N. Mikhalevsky, "Low-frequency acoustic propagation loss in the Arctic Ocean: Results of the Arctic climate observations using underwater sound experiment", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, Vol.119, no.6, pp.3694-3706.
- [26] Pinkel, Robert, Walter Munk, Peter Worcester, Bruce D. Cornuelle, Daniel Rudnick, Jeffrey Sherman, Jean H. Filloux et al., "Ocean mixing studied near Hawaiian Ridge", *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2000, Vol.81, no.46, pp.545-553.
- [27] Dushaw, Brian D., "Mapping and wavenumber resolution of line-integral data for observations of low-mode internal tides", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003, Vol.20, no.7, pp.1043-1059.
- [28] Dushaw, Brian D., Bruce M. Howe, James A. Mercer, Robert C. Spindel, A. B. Baggeroer, D. Menemenlis, C. Wunsch et al., "Multimegameter-range acoustic data obtained by bottom-mounted hydrophone arrays for measurement of ocean temperature", *IEEE Journal of oceanic engineering*, 1999, Vol.24, no.2, pp.202-214.
- [29] Domingues, Catia M., John A. Church, Neil J. White, Peter J. Gleckler, Susan E. Wijffels, Paul M. Barker, and Jeff R. Dunn, "Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise", *Nature*, 2008, 453, no.7198, pp.1090-1093.
- [30] Taniguchi, Naokazu, Arata Kaneko, Yaochu Yuan, Noriaki Gohda, Hong Chen, Guanghong Liao, Chenghao Yang et al., "Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the northern part of the Luzon Strait", *Geophysical research letters*, 2010, Vol.37, no.7.
- [31] Lin, Ju, Araka Kaneko, Naokazu Taniguchi, Huan Wang, and Noriaki Gohda, "Inversion of temperature vertical structure by ocean acoustic tomography data in the Luzon Strait", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, Vol.131, no.4, pp.3314-3314.
- [32] Sagen, Hanne, Brian D. Dushaw, Emmanuel K. Skarsoulis, Dany Dumont, Matthew A. Dzieciuch, and Agnieszka Beszczynska-Möller, "Time series of temperature in Fram Strait determined from the 2008–2009 DAMOCLES acoustic tomography measurements and an ocean model", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, Vol.121, no.7, pp.4601-4617.
- [33] Sagen, Hanne, Peter F. Worcester, Matthew A. Dzieciuch, Florian Geyer, Stein Sandven, Mohamed Babiker, Agnieszka Beszczynska-Möller, Brian D. Dushaw, and Bruce Cornuelle, "Resolution, identification, and stability of broadband acoustic arrivals in Fram Strait", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, Vol.141, no.3, pp. 2055-2068.
- [34] Dushaw, Brian D., "Ocean acoustic tomography in the North Atlantic", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, Vol.36, no.2, pp.183-202.
- [35] Dushaw, Brian, and Eric Rehm, *Acoustic Tomography in Baffin Bay: A Preliminary Survey*, 2016, No.375, NERSC Technical Report.
- [36] Taniguchi, Naokazu, and Chen-Fen Huang, "Simulated tomographic reconstruction of ocean current profiles in a bottom-limited sound channel", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol.119, no.8, pp.4999-5016.
- [37] Geyer, Florian, Hanne Sagen, and Bruce Cornuelle, "Using a regional ocean model to understand the structure and sampling variability of acoustic tomography arrivals in Fram Strait", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol.144, no.3, pp.1694-1694.
- [38] Worcester, Peter F., Matthew A. Dzieciuch, John A. Colosi, Andrey Y. Proshutinsky, Richard A. Krishfield, Jonathan D. Nash, and John N. Kemp, "The 2016–2017 deep-water Canada basin acoustic propagation experiment (CANAPE): An overview", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol.144, no.3, pp.1665-1665.
- [39] Ji, Xingyu, and Hangfang Zhao, "Travel-time correction and preliminary results for ocean acoustic tomography in South China Sea", In *MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol.283, p.04003. EDP Sciences.

- [40] Huang, Chen-Fen, Yun-Wen Li, and Naokazu Taniguchi, "Mapping of ocean currents in shallow water using moving ship acoustic tomography", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, Vol.145, no.2 pp.858-868.
- [41] Howe, Bruce M., Jennifer Miksis-Olds, Eric Rehm, Hanne Sagen, Peter F. Worcester, and Georgios Haralabus, "Observing the oceans acoustically", *Frontiers in Marine Science*, 2019, p.426.

پی نوشت

1. Acoustic Tomography
2. Mediterranean Water Eddies (Meddies)
3. Reciprocal Sound Transmission
4. Acoustic Doppler Current Profiler
5. Travel Time
6. Ray Simulation
7. Range- Independent
8. Reciprocal Travel Time
9. Projecting
10. Vertical Section-average Current
11. Mackenzie
12. Heard Island Feasibility Test
13. Office of Naval Research
14. National Oceanic and Atmospheric Administration
15. National Science Foundation
16. Heard Island
17. <https://staff.washington.edu/dushaw/heard/index.shtml>
18. The Acoustic Mid-Ocean Dynamics Experiment
19. Low-Mode Internal Tides
20. Theoretical and Experimental Tomography in the Sea (THETIS I)
21. Canary-Azores-Madeira Basin Integral Observing System
22. Arctic Climate Observations using Underwater Sound
23. Franz Josef Land
24. Lincoln Sea
25. Hawaii Ocean-Mixing Experiment
26. Internal Tide
27. <http://staff.washington.edu/dushaw/HOME/farfield.html>
28. Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC)
29. Kauai
30. North Pacific Acoustic Laboratory (NPAL)
31. Luzon Strait
32. Kuroshio Current
33. Fram Strait
34. Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC)
35. Baffin Bay
36. Luzon Strait
37. Arctic Ocean