

طراحی سیستم تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز به منظور پایش جریان‌های دریایی

مسعود بحرینی مطلق^{۱*}، نعمت‌اله کریمی^۱، حمید کاردان مقدم^۱، محمد بابایی ملک‌شاه^۲، محمد گل‌محمدی سامانی^۳، کمال محتشم^۴

۱- استادیار مؤسسه تحقیقات آب، ایران

۲- کارشناس پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، ایران

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد رودهن، ایران

۴- کارشناس شرکت هوادریای آسیا شیراز، ایران

(*نویسنده مسئول: masoud.bahraini.m@gmail.com)

علمی-پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

چکیده

تیکه‌نگاری صوتی دریایی به‌عنوان یکی از روش‌های سنجش از دور در پایش‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش تیکه‌نگاری صوتی متغیرهای سرعت جریان، جریان‌های فرازجوشی، جزر و مدی، حجم عبوری از تنگه‌ها، دمای آب و غیره را به‌صورت پیوسته و بلندمدت اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه مطالعات زیادی در سطح دنیا در خصوص پایش جریان‌های دریایی با استفاده از دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی انجام شده است، اما تاکنون اصول طراحی این نوع سیستم‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه نحوه طراحی و اصول تولید و انتشار امواج صوتی در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد هم‌زمان‌سازی دستگاه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری دقیق زمان رسیدن امواج صوتی دارای اهمیت است و بایستی با دقت نانو ثانیه انجام شود. همچنین استفاده از ام-سیکونس‌ها به‌منظور افزایش برد امواج صوتی انتشار یافته و کاهش نوفه محیط حائز اهمیت است. در آخرین مرحله از طراحی، افزایش قدرت ارسال امواج با استفاده از ترانسفورمرهای افزایشده و تطبیقی و نحوه محاسبه تعداد دور سیم‌پیچ مورد نیاز محاسبه شد. نتایج محاسبات نشان داد که برای رسیدن به شدت تراز $1\mu\text{Pa at 1m}$ نیاز به یک ترانسفورمر افزایشده با تعداد ۱۰۰۰ دور سیم و یک ترانسفورمر تطبیقی با تعداد ۷۰ دور سیم است. با توجه به حصول فناوری تیکه‌نگاری صوتی در جمهوری اسلامی ایران پیشنهاد می‌شود از این روش در پایش جریان‌های خلیج فارس استفاده شود.

کلمات کلیدی: اصول طراحی، پایش جریان‌های دریایی، روش تیکه‌نگاری صوتی، دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز

۱- مقدمه

مبنای قانون زمان طی شده امواج صوتی^۳ و محاسبه اختلاف زمان رسیدن امواج به ایستگاه مقابل، سرعت جریان و سرعت صوت و دمای آب را محاسبه می‌کند (بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷).

روش تیکه‌نگاری صوتی بر خلاف سایر دستگاه‌های صوتی، امواج صوتی را در کل مقطع انتشار می‌دهد و می‌تواند برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی انتشار امواج صوتی مورد استفاده قرار گیرد (بحرینی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷). از

روش تیکه‌نگاری صوتی^۱ یکی از روش‌های سنجش از دور است که به‌منظور اندازه‌گیری خصوصیات مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی روش تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی^۲ توسط مونک و وانش (۱۹۷۹) به‌عنوان یک رویکرد جدید جهت پایش جریان‌های اقیانوسی معرفی شد (مونک و همکاران، ۱۹۹۵). روش تیکه‌نگاری صوتی بر

1- Acoustic Tomography

2- Ocean Acoustic Tomography

3- Travel Time (Time of flight)

تایوان را در فاصله ۴۸ کیلومتری اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی ابزاری کارآمد جهت اندازه‌گیری پیوسته و بلندمدت جریان‌های دریایی است. تا پیش از این آزمایش محدودیت روش تیکه‌نگاری صوتی خطای ساعت درونی سیستم‌ها بود که با توجه به ارتقاء سیستم‌ها و به‌کارگیری ساعت‌های دقیق‌تر، خطای اندازه‌گیری کاهش یافت. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از ۴ دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز و شدت تراز $1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ re ۱۹۰ dB که با ام-سیکونس درجه ۱۲ کدگذاری شده بودند. جریان‌های فرازجوشی^۵ و هم‌چنین جریان‌های جزر و مدی روزانه در خلیج هیروشیما^۶ را اندازه‌گیری کردند. فاصله ایستگاه‌های صوتی بین ۳/۹ تا ۸/۹ کیلومتر بود. هانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز و شدت تراز $1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ re ۱۹۰ dB تغییرات دما و سرعت جریان را در اسکله باچمین^۷ تایوان اندازه‌گیری کردند. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی از ام-سیکونس درجه ۱۰ استفاده کردند و فاصله بین آن‌ها ۴۸۸ متر بود. ساکن و همکاران (۲۰۱۷) آزمایش تیکه‌نگاری صوتی را در تنگه فرام^۸ انجام دادند. بسامد مورد استفاده ۲۵۰ هرتز با شدت تراز $1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ re ۱۹۰ dB به فاصله ۳۰۱ کیلومتر انجام شد. سیامسودین و همکاران (۲۰۱۷) دو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز و شدت تراز $1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ re ۱۹۰ dB با ام-سیکونس درجه ۱۲ را در فاصله ۴/۶ کیلومتری از یکدیگر در تنگه بالی^۹ اندونزی قرار دادند و نیمرخ عمودی جریان‌های جزر و مدی را اندازه‌گیری کردند. اگرچه دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی خصوصیات جریان و دما را در فواصل زیاد اندازه‌گیری می‌کنند، اما این دستگاه‌ها به‌دلیل استفاده از امواج صوتی با بسامد کم، در فواصل کوتاه و آب‌های کم‌عمق قابل استفاده نیستند. از این‌رو دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی^{۱۰} با بسامد ۱۰ کیلوهرتز به‌منظور پایش جریان‌های دریایی در فواصل چند کیلومتری و آب‌های کم‌عمق ابداع گردید. در اولین آزمایش

طرفی به‌دلیل انتشار امواج در کل مقطع، به محاسبات پیچیده جهت محاسبه سرعت متوسط مقطع عرضی نیاز نیست. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی از امواج صوتی کم‌تر از ۱ کیلوهرتز استفاده می‌کنند و قادر هستند جریان‌های اقیانوسی در مقیاس هزاران کیلومتر را اندازه‌گیری کنند.

اسپی‌زبرگر و متزگر (۱۹۹۱) اندازه‌گیری جریان با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی را در فاصله ۴۰۰۰ کیلومتری بین جزیره هاوایی و غرب امریکا انجام دادند. بسامد مورد استفاده ۲۵۰ هرتز با شدت تراز 1 m re μPa at ۱۹۱ dB بود. نتایج نشان داد روش تیکه‌نگاری صوتی یک ابزار کارآمد جهت پایش جریان در فواصل طولانی است. باگریور و مونک (۱۹۹۲) در پروژه‌ای با نام HIFT^۱ با استفاده از دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی اقیانوسی، حداکثر مسافت طی شده توسط امواج صوتی را مورد آزمایش قرار دادند. به‌منظور حذف نوفه^۲ و افزایش برد امواج صوتی، دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی، امواج صوتی را با روش ام-سیکونس کدگذاری^۳ می‌کنند. در آزمایش HIFT از امواج صوتی با بسامد ۵۷ هرتز و شدت تراز $1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ re dB استفاده شد. در آن آزمایش امواج صوتی انتشار یافته در فاصله ۱۸۰۰۰ کیلومتری دریافت شدند. ژنگ و همکاران (۱۹۹۸) دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز با شدت تراز 1 m re μPa at ۲۰۰ dB را با استفاده از ام-سیکونس درجه ۱۱ کدگذاری کردند و سرعت جریان‌های دریایی را در فاصله ۱۱ کیلومتری با موفقیت اندازه‌گیری نمودند. لیو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از هفت دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز و شدت تراز 1 m re μPa at ۱۹۰ dB که با ام-سیکونس درجه ۱۲ کدگذاری شده بودند، جریان‌های جزر و مدی خلیج ژیتویانگ چین را به صورت پیوسته پایش کردند. حداکثر فاصله بین ایستگاه‌های صوتی حدود ۱۲ کیلومتر بود. تانیگوچی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۸۰۰ هرتز با شدت تراز dB re 1 m at μPa ۱۸۲ جریان‌های کروشو^۴ جنوب شرقی

5- Upwelling

6- Hiroshima Bay

7- Bachimen Harbor

8- Fram Strait

9- Bali Strait

10- Coastal Acoustic Tomography

1- Heard Island Feasibility Test

2- Noise

3- M Sequence

4- Kuroshio

ام-سیکونس یک سری اعداد سودو هستند که درجات ۷ تا ۱۲ آن در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژنگ و همکاران، ۱۹۹۷). طول دوره هر کدام-سیکونس بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$L_{M-Seq} = 2^n - 1 \quad (1)$$

که n درجه ام-سیکونس است. افزایش بهره سیگنال به نوبه (SNR)^۳ با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$Gp = 10 \log L_{M-Seq} \quad (2)$$

پس از کدگذاری سیگنال‌ها با ام-سیکونس، سیگنال‌های الکتریکی به تراگذار منتقل می‌شوند تا به صورت امواج صوتی مکانیکی تبدیل شده و در محیط آبی انتشار یابند. همان‌طور که در بخش مرور منابع ذکر شد شدت تراز مطلوب امواج صوتی در دستگاه تیکه‌نگاری صوتی $190 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ است. بنابراین بایستی طراحی دستگاه طوری باشد که امواج خروجی از ترگذار به آن شدت تراز برسند. برای رسیدن به شدت تراز $190 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ ، یک ترانسفورمر افزایشنده^۴ طراحی می‌شود که ولتاژ ورودی ۲۴ ولت را به میزان مورد نیاز که V_{rms} نامیده می‌شود افزایش دهد، V_{rms} از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$V_{rms} = 10^{\frac{(SL-TV_R)}{20}} \quad (3)$$

که TV_R ^۵ پاسخ ولتاژ تراگذار است. ترانسفورمر افزایشنده ولتاژ دارای دو نوع سیم‌پیچ اولیه و ثانویه است که ولتاژ ورودی را به ولتاژ V_{rms} تبدیل می‌کند. محاسبات نشان داد که برای رسیدن به ولتاژ V_{rms} به هزاران دور سیم‌پیچ ثانویه نیاز است که فضای کافی برای پیچیدن سیم‌پیچ ثانویه در ترانسفورمر وجود ندارد. برای کاهش تعداد دور سیم‌پیچ، از ترانسفورمر تطبیقی^۶ بلافاصله پس از ترانسفورمر افزایشنده استفاده می‌شود. ترانسفورمر تطبیقی تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر افزایشنده را به میزان ۲ برابر کاهش می‌دهد که با ضریب $Q_{\text{Factor}} = 2$ نشان داده می‌شود.

امواج صوتی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز با روش ام-سیکونس درجه ۱۰ کدگذاری و با شدت تراز $1 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ ۱۹۰ منتشر شدند. با استفاده از این سیستم، جریان‌های دریای ستوآیلند^۱ ژاپن به مدت ۵ ساعت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد دستگاه تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز ابزاری کارآمد برای پایش جریان‌های دریایی مناطق کم‌عمق است (ژنگ و همکاران، ۱۹۹۷). پایش‌های دریایی زیادی با استفاده از دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز در مناطق مختلف انجام شده است، اما تاکنون اصول طراحی و نحوه عملکرد این روش مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه مبانی تئوری و اصول طراحی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی امواج صوتی را به‌طور همزمان ارسال می‌کنند و زمان رسیدن امواج صوتی را اندازه‌گیری می‌کنند (بحرینی‌مطلق و همکاران، ۲۰۱۹). (شکل ۱). با استفاده از اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی، سرعت جریان آب محاسبه می‌گردد (بحرینی‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به این که 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 بایستی در مقیاس نانوثانیه باشد. پس از هم‌زمان‌سازی، تولید سیگنال‌های الکتریکی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز توسط یک پردازنده انجام می‌شود و به سمت تراگذار^۲ ارسال می‌شود تا امواج الکتریکی به امواج مکانیکی صوتی تبدیل شود و در محیط آبی ارسال گردند. باید توجه داشت که به‌دلیل نوبه موجود در محیط آبی، امواج صوتی تضعیف می‌گردند و قادر به پیمایش مسافت زیاد نیستند. بنابراین با استفاده از روش ام-سیکونس بهره دستگاه افزایش یافته و امواج صوتی قادرند مسافت بسیار بیش‌تری را طی کنند (بحرینی‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۷).

3- Signal to Noise Ratio (SNR)

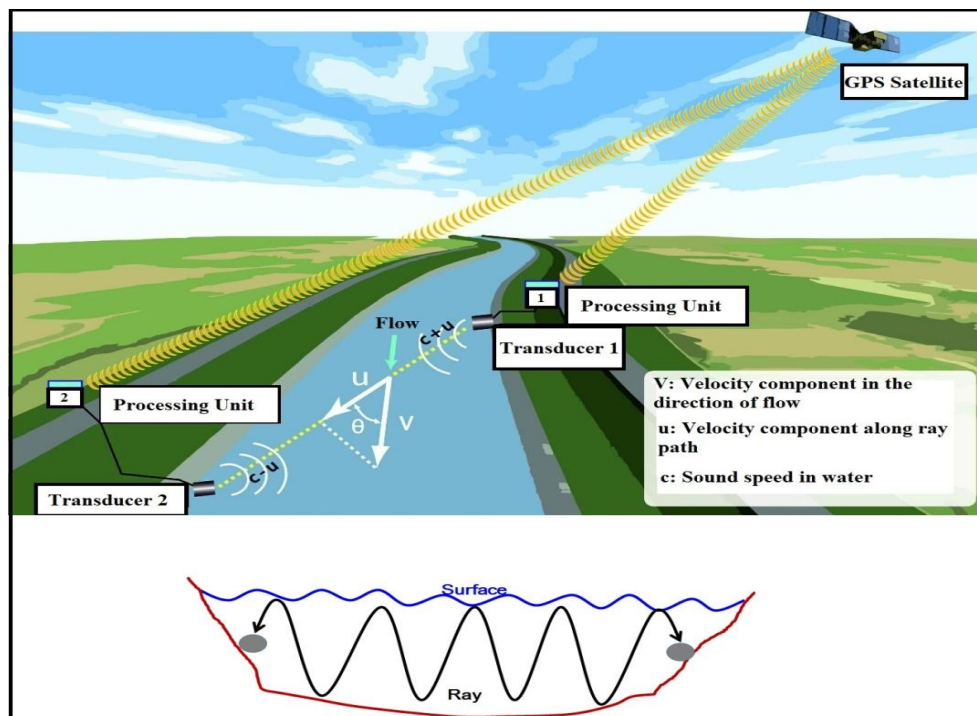
4- Step-Up Transformer

5- Transmitting Voltage Response (TVR)

6- Matching Transformer

1- Seto Inland

2- Transducer



شکل ۱: مسیر طوفان‌های تشکیل شده در شمال غرب اقیانوس هند از سال ۲۰۰۷ (برگرفته از سازمان هواشناسی هند IMD به نشانی www.imd.gov.in)

هدایت^۲ تراگذار و همچنین بسامد موج صوتی دارد. تعداد دور سیم‌پیچ ترانسفورمر تطبیقی از روابط (۶) تا (۹) محاسبه می‌شود.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (۶)$$

$$\omega C \times \omega L = 1 \quad (۷)$$

$$L (mH) = \frac{1}{2\pi f \omega C} \quad (۸)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} \quad (۹)$$

که ωC برابر رسانایی واکنشی (B) است، AL ضریب القا^۳ هسته مغناطیسی ترانسفورمر تطبیقی بر حسب $\frac{nH}{N^2}$ است.

از طرفی همان‌طور که گفته شد به‌منظور کاهش تعداد دور سیم‌پیچ ترانسفورمر افزایشده، $Q_{Factor} = 2$ در نظر گرفته می‌شود که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

تعداد دور سیم‌پیچ اولیه (n_1) بر اساس خصوصیات ترانسفورمر با استفاده از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$n_1 = \frac{E \times D}{\Delta B \times A \times f} \quad (۴)$$

که E ولتاژ ورودی و برابر ۲۴ ولت است، D ضریب ثابت ۰/۴۵ است، $\Delta B \times A$ شار مغناطیسی بر حسب تسلا است و f بسامد موج صوتی بر حسب هرتز است.

تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر افزایشده از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$n_2 = \frac{V_{rms} / Q_{matching}}{Input Voltage} \times n_1 \quad (۵)$$

که $Input Voltage$ ولتاژ ورودی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی و ۲۴ ولت است، و n_1 تعداد دور سیم‌پیچ اولیه ترانسفورمر افزایشده است.

تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر تطبیقی برای رسیدن به $Q_{Factor} = 2$ بستگی به رسانایی واکنشی (B) و قابلیت

2- Conductance (G)
3- Nominal Inductance

1- Susceptance (B)

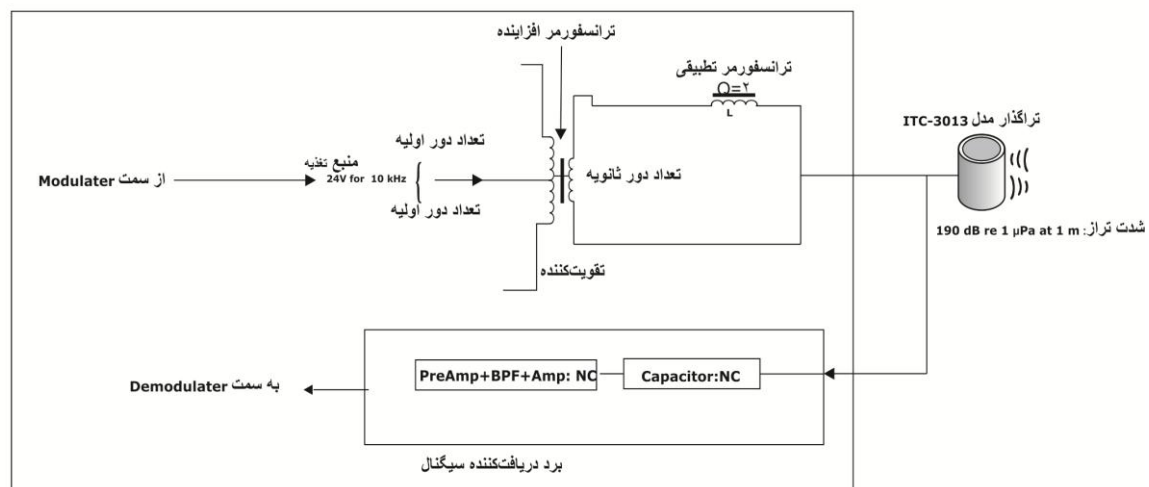
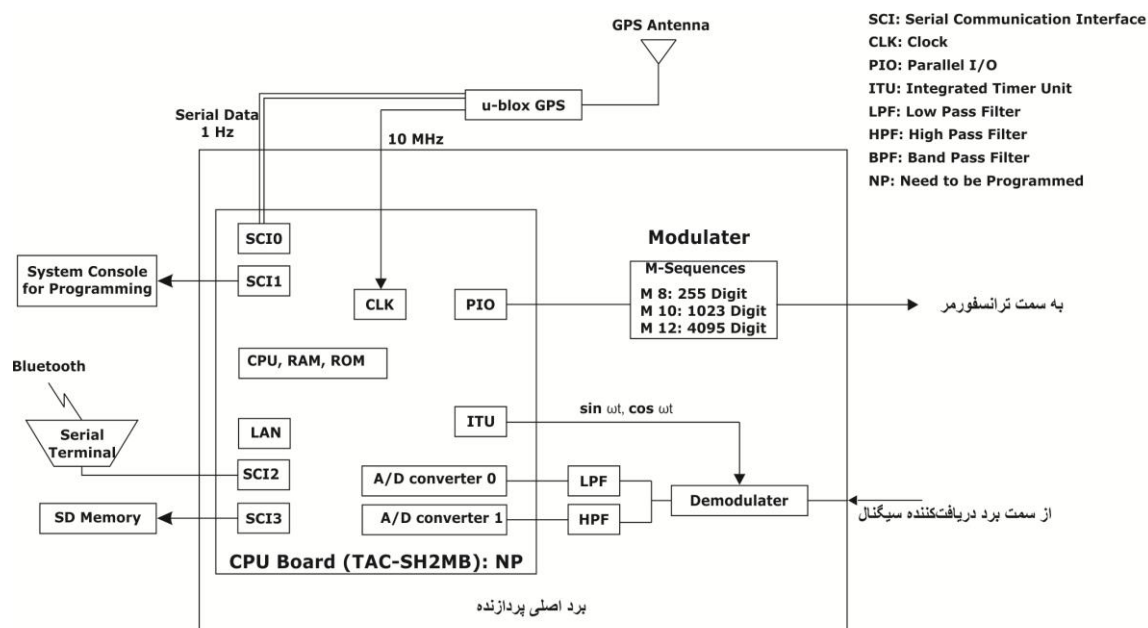
همان طور که در بخش مواد و روش ها تشریح شد، جهت همزمان سازی دستگاه های تیکه نگاری صوتی از ساعت ماهواره های GPS استفاده می شود. بنابراین ساعت داخلی پردازنده حذف شده و با استفاده از یک دریافت کننده GPS مدل U-blox LET-6T سیگنال های زمانی با بسامد 10 MHz به عنوان ساعت دستگاه دریافت می شود. با توجه به دقت ساعت ماهواره ها که در مقیاس نانو ثانیه قرار دارند، خطای زمانی دستگاه ها کمترین حالت ممکن را دارند.

$$Q_{Matching} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{c}} \cong 2 \quad (10)$$

که $c = \frac{B}{\omega}$ و $R = \frac{1}{G}$ و G قابلیت هدایت تراگذار است.

۳- نتایج

نحوه طراحی و رابطه اجزای مختلف دستگاه تیکه نگاری صوتی در شکل ۲ نشان داده شده است. پردازنده دستگاه های تیکه نگاری صوتی یک میکروکنترلر با نام TAC-SH2MB است.



شکل ۲: اجزاء مختلف دستگاه تیکه نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز

برای رسیدن به ولتاژ $1000 V_{rms}$ تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورمر افزایشده و تطبیقی محاسبه می‌شود. در دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی برای هر دو نوع ترانسفورمر افزایشده و تطبیقی از ترانسفورمر مدل TDK ferrite core PC95PQI26/12Z استفاده می‌کنند.

این ترانسفورمر دارای ضریب $D = 0.45$ است، سطح مقطع آن 328 میلی‌متر مربع و $\Delta B = 0.3$ است. بنابراین بر اساس رابطه (۱۲) تعداد دور سیم‌پیچ اولیه ترانسفورمر افزایشده برابر است با:

$$n_1 = \frac{24 \times 0.45}{0.3 \times 328 \times 10^{-6} \times 10000} = 10 \text{ turn} \quad (12)$$

به دلیل تغییر فاز در سیگنال‌های تولید شده مقدار اولیه سیم‌پیچ ۲ برابر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$n_1 = 10 \times 2 = 20 \text{ turn} \quad (13)$$

سپس تعداد سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر افزایشده و نظر کارشناسی میزان افت آن، بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n_2 = \frac{1000}{24} \times 20 = 833 \text{ turn} \cong 1000 \text{ turn} \quad (14)$$

پس از طراحی ترانسفورمر افزایشده و محاسبه تعداد دور سیم‌پیچ مورد نیاز، بایستی تعداد دور سیم‌پیچ ترانسفورمر تطبیقی محاسبه گردد. AL ترانسفورمر مدل TDK ferrite core PC95PQI26/12Z برابر با $\frac{nH}{N^2} = 4690$ است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود رسانایی واکنشی (B) تراگذار معادل 0.6 میلی‌زیمنس در بسامد 10 کیلوهرتز است. با توجه به رابطه (۸) مقدار L به صورت رابطه (۱۵) به دست آید:

$$L (mH) = \frac{1}{2\pi \times 10000 \times 0.7 \times 10^{-3}} = 0.022 \quad (15)$$

در نهایت بر اساس رابطه (۱۶) تعداد دور سیم‌پیچ مورد نیاز برای ترانسفورمر تطبیقی به دست می‌آید:

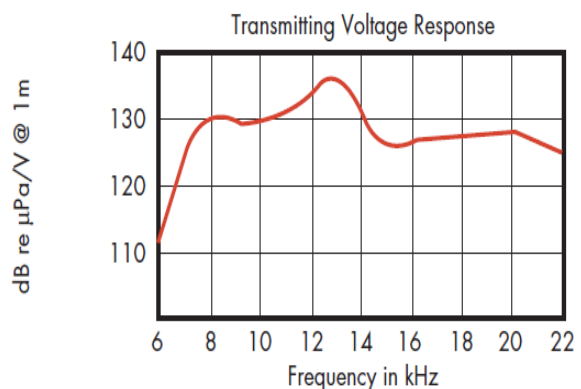
$$N = \sqrt{\frac{22 \times 10^{-6}}{4690}} = 68 \cong 70 \text{ turn} \quad (16)$$

پردازنده دستگاه دارای چهار رابط ارتباطی سریال (SCI) است. SCI0 اولین رابط ارتباطی است که سیگنال‌های ۱ هرترتز را از GPS دریافت می‌کند تا در هر ثانیه دستگاه عملیات همزمان‌سازی را انجام دهد. SCI1 رابطی برای برنامه‌نویسی پردازنده است. SCI2 رابط برقراری ارتباط با استفاده از بلوتوث است. بنابراین با استفاده از بلوتوث می‌توان عملکرد دستگاه تیکه‌نگاری صوتی را مشاهده نمود. SCI3 نیز به منظور انتقال داده‌های صوتی دریافت شده به کارت حافظه است.

پس از تولید سیگنال‌های الکتریکی با بسامد 10 کیلوهرتز در پردازنده، توسط ام-سیکونس کدگذاری شده و با ولتاژ ورودی 24 ولت به ترانسفورمر افزایشده انتقال می‌یابد تا ولتاژ آن افزایش یابد و به مقدار V_{rms} برای تأمین شدت تراز $190 \text{ dB re } \mu\text{Pa/V at } 1\text{m}$ برسد.

همان‌طور که گفته شد محاسبه V_{rms} بر اساس خصوصیات تراگذار است. دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی 10 کیلوهرتز از تراگذار پهن‌باند مدل ITC-3013 استفاده می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است پهنای باند این تراگذار از 6 تا 22 کیلوهرتز است. TVR این نوع تراگذار در 10 کیلوهرتز برابر با $130 \text{ dB re } \mu\text{Pa/V at } 1\text{m}$ است. بنابراین بر اساس رابطه ۳ بایستی ولتاژ سیگنال الکتریکی تولید شده توسط پردازنده قبل از رسیدن به تراگذار به میزان مورد نیاز افزایش یابد:

$$V_{rms} = 10^{(190-130)/20} = 1000 \quad (11)$$



شکل ۳: پاسخ ولتاژ تراگذار مدل ITC-3013 (کاتالوگ تراگذار)

اندازه‌گیری حجم آب عبوری بایستی با استفاده از روش‌های دیگر (اکوساندر) نقشه ژرفاسنجی بین ایستگاه‌ها تهیه شود.

۵- مراجع

[۱] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، زارعیان، م.ج.، فرخ‌نیا، ا.، (۱۳۹۷). ارزیابی الگوی انتشار صوتی زیرآب (نظریه پرتو) در یک رودخانه با استفاده از سامانه تیکه‌نگاری صوتی رودالی، مجله انجمن صوتیات ایران، ۲۹-۳۸، (۲)۶.

[۲] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، کاردان‌مقدم، ح.، حسن‌لی، س.ا.م.، (۱۳۹۷). پایش پیوسته جریان‌های مدی با استفاده از فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی، مجله اقیانوس‌شناسی، ۹(۳۶)، ۶۴-۵۷.

[۳] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، کاردان‌مقدم، ح.، خوشحالی، م.، محتشم، ک.، (۱۳۹۸). امکان‌سنجی پایش جریان‌های دریایی خلیج فارس با استفاده از فناوری تیکه‌نگاری صوتی دریایی ۱۰ کیلوهرتز. نشریه مهندسی دریا، ۱۵(۳۰)، ۱۳۸-۱۳۱.

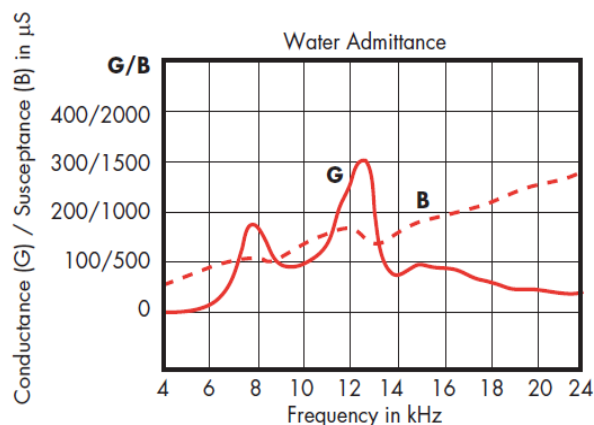
[۴] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، کاردان‌مقدم، ح.، کاوسی‌حیدری، ع.ر.، (۱۳۹۷). طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه تیکه‌نگاری صوتی رودالی. مجله انجمن صوتیات ایران، ۱۶(۱)، ۱۱-۱.

[۵] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، زارعیان، م.ج.، کاردان‌مقدم، ح.، (۱۳۹۷). پایش پیوسته دمای آب با استفاده از فن‌آوری تکه‌نگاری صوتی. مجله مهندسی عمران امیرکبیر، تیر ۱۳۹۷.

[۶] بحرینی‌مطلق، م.، روزبهانی، ر.، افتخاری، م.، کاوسی‌حیدری، ع.ر.، ابولحسینی، س.، (۱۳۹۸). بررسی وضعیت جریان آب در دریاچه هفت برم با استفاده از فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی. مجله آب و خاک، ۳۳(۱)، ۲۳-۳۵.

[7] Baggeroer, A., Munk, W., (1991). The heard Island feasibility test. Physics. Today. 45, 22-30.

[8] Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K., Sawaf, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kazemi Khoshuie, A., (2019). Continuous streamflow monitoring in shared watersheds using advanced underwater Acoustic Tomography System: A Case Study on Zayanderud River. Journal of



شکل ۴: رسانایی واکنشی (B) و قابلیت هدایت تراگذار (G) تراگذار مدل ITC-3013 (کاتالوگ تراگذار)

۴- نتیجه‌گیری

دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی دریایی به‌طور گسترده به‌منظور پایش جریان‌های دریایی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه به نحوه طراحی این نوع فن‌آوری پرداخته شد. در طراحی این نوع سیستم‌ها دو نکته حائز اهمیت است. هم‌زمان‌سازی دستگاه‌ها به‌منظور ارسال هم‌زمان امواج صوتی و اندازه‌گیری اختلاف زمان رسیدن امواج صوتی با استفاده از ساعت ماهواره‌های GPS با دقت نانوثانیه انجام می‌شود. نکته دوم استفاده از تراگذار مناسب و افزایش برد امواج صوتی در آب است. به‌منظور دست یافتن به این هدف، امواج صوتی با روش ام-سیکونس کدگذاری شده و سپس با استفاده از ترانسفورمرهای افزایشده و تطبیقی افزایش قدرت می‌یابند. نتایج نشان داد که دستگاه‌های تیکه‌نگاری صوتی ۱۰ کیلوهرتز برای رسیدن به شدت تراز 190 dB re μPa at 1m بایستی از یک ترانسفورمر افزایشده با تعداد ۱۰۰۰ دور و یک ترانسفورمر تطبیقی با تعداد ۷۰ دور سیم‌پیچ استفاده کند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در سایر کشورها که در بخش مقدمه تشریح شد و با توجه به بومی‌سازی فن‌آوری تیکه‌نگاری صوتی در جمهوری اسلامی ایران، پیشنهاد می‌شود این روش در خلیج فارس به‌منظور پایش پیوسته و بلندمدت سرعت جریان‌های دریایی تا فواصل ۱۸۰۰۰ متری با دقت بیش‌تر از ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گیرد (بحرینی‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۸). محدودیت این روش عدم برداشت نقشه ژرفاسنجی بین ایستگاه‌ها است. لذا در صورت نیاز به

- [16] Taniguchi, N., Huang, C.F., Kaneko, A., Liu, C.T., Howe, B.M., Wang, Y.-H., Yang, Y., Lin, J., Zhu, X.-H., Gohda, N., (2013). Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography. *Journal of Acoustical Society of America*, 134.
- [17] Zhang, C., Kaneko, A., Zhu, X.H., Gohda, N., (2015). Tomographic mapping of a coastal upwelling and the associated diurnal internal tides in Hiroshima Bay, Japan. *Journal of Geophysics Research Ocean*, 120, 4288-4305.
- [18] Zheng, H., Noriaki, G., Taniguchi, H., Ito, T., Yamaoka, H., Tamura, T., Takasugi, Y., Kaneko, A., (1997). Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, 53, 117-127.
- [19] Zheng, H., Yamaoka, H., Gohda, N., NOGUCHI, H., Kaneko, A., (1998). Design of the acoustic tomography system for velocity measurement with an application to the coastal sea. *Journal of Acoustical Society of Japan*, 19, 199-210.
- Environmental Monitoring and Assessment, 191 (11), 1-9.
- [9] Huang, C.F., Taniguchi, N., Chen, Y.H., Liu, J.Y., (2016). Estimating temperature and current using a pair of transceivers in a harbor environment. *Journal of Acoustical Society of America*, 140.
- [10] Liao, G., Wang, J., Xu, X., Yang, C., Wu, Q., Zhang, C., Zhu, X., (2010). A coastal acoustic tomography inverse method based on chebyshev polynomials and its application in Zhoushan field experiment. in: *Proc. 3th Int. Congr. Image Signal Process. CISP 2010, IEEE*, 3825-3829.
- [11] Munk, W., Worcester, P., Wunsch, C., (1995). *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge University Press, New York.
- [12] Munk, W., Wunsch, C., (1979). Ocean Acoustic Tomography: A Scheme for Large Scale Monitoring. *Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. Pap.* 26, 123-161.
- [13] Sagen, H., Worcester, P.F., Dzieciuch, M.A., Geyer, F., Sandven, S., Babiker, M., Beszczynska-Möller, A., Dushaw, B.D., Cornuelle, B., (2017). Resolution, identification, and stability of broadband acoustic arrivals in Fram Strait. *Journal of Acoustical Society of America*. 141, 2055-2068.
- [14] Spiesberger, J.L., Metzger, K., (1991). Basin-scale tomography: A new tool for studying weather and climate. *Journal of Geophysics Research*, 96, 1991.
- [15] Syamsudin, F., Chen, M., Kaneko, A., Adityawarman, Y., Zheng, H., Mutsuda, H., Hanifa, A.D., Zhang, C., Auger, G., Wells, J.C., Zhu, X., (2017). Profiling measurement of internal tides in Bali Strait by reciprocal sound transmission. *Acoustical Science Technology*, 38, 246-253.

Design of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for Marine Monitoring

Masoud Bahreini Motlagh^{*1}, Neamtollah Karimi¹, Hamid Kardanmoghadam¹, Mohammad Babaei Malekshah², Mohammad Golmohammadi Samani³, Kamal Mohtasham⁴

1- Assistant Professor, Water Research Institute, Iran

2- Researcher, Water Research Institute, Iran

3- P.h.D student, Roudehen Islamic Azad University, Iran

4- Hava Daryaye Asia Company, Shiraz, Iran

(*Corresponding author: masoud.bahraini.m@gmail.com)

Received: 2021.02.20

Accepted: 2021.05.03

Abstract

Acoustic Tomography (AT) as a remote sensing method is widely used in marine monitoring. At systems continuously monitor the current velocity, upwelling current, tidal currents, volume transport in straits, temperature variation, etc. Although many studies have been conducted around the world on the application of AT technique to monitor the marine, the design principles of these kinds of systems have not been investigated yet. In this study, the principle design of the 10kHz-AT system and the acoustic propagation of this kind of system are investigated. The results showed that synchronization of the systems is highly important to accurately measure the travel time of acoustic waves and should be performed on the scale of nanosecond. It is also important to modulate the generated acoustic signals with M- Sequence to increase the range of propagation and decrease the effect of ambient noise. Finally, the design of the transmitting power increment procedure was computed using the step-up and matching transformers. The computational results showed that to achieve the intensity level of 190 dB re 1 μ Pa at 1m, a step-up transformer with 1000 rpm and a matching transformer with 70 rpm are required. Considering the achievement of acoustic tomography technology in the Islamic Republic of Iran, it is recommended to apply this technique in monitoring the Persian Gulf streams.

Keywords: Acoustic Tomography Technique, 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System, Principal Design, Marine Monitoring