

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1402.9.2.4.1

درصد همانندی: ۸٪

استخراج تپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان بر اساس داده‌های ARGO و معرفی یک الگوی جدید برای شناسایی این تپ‌ها

حمیدرضا سبحانی^۱، ایمان مهرابی دستنایی^{۲*}

Sobhani278@gmail.com

^۱ دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، نوشهر، ایران.

Mehraby.phd@hormozgan.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، نوشهر، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

چکیده

با توجه به نبود هیچ الگویی از تپ‌های هیدروآکوستیکی در دریای عمان، به کارگیری داده‌های چند سال گذشته و ارائه یک الگو در این منطقه ضروری است. در این پژوهش دریای عمان به پنج بخش تفکیک و از اطلاعات میدانی ثبت شده پایگاه داده برنامه بین‌المللی جمع‌آوری اطلاعات ARGO از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۳ استفاده و برای نخستین بار الگوی جدیدی برای نام‌گذاری تپ‌های هیدروآکوستیکی ارائه می‌شود. در ضمن مشاهده شد که بیشترین تراکم نیم‌رخ‌های به‌دست آمده از داده‌های ARGO مربوط به بخش جنوب غربی دریای عمان و کم‌ترین مربوط به آب‌های شمال و شمال شرق راس‌الحد است. هم‌چنین این نتیجه به‌دست آمد که میانگین تپ‌های هیدروآکوستیکی غالب شکل گرفته از ماه مارس تا می منفی هستند، در نتیجه غالباً در این ماه‌ها کانال سطحی تشکیل نمی‌شود. از دیگر نتایج این تحقیق این است که روند تغییرات عمق کانال صوتی تقریباً در همه مناطق از ماه ژوئن تا فوریه سال آینده افزایشی است. در ضمن مقایسه ماهانه عمق کانال سطحی این نتیجه را ارائه کرد که در مناطق ۱، ۲ و ۳ که به خطوط ساحلی نزدیک‌ترند، کانال سطحی دارای عمق بیشتری است. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش مقایسه اثر طول و عرض جغرافیایی بر تپ‌های هیدروآکوستیکی است، این نتیجه به دست آمد که نیم‌رخ‌ها بیشتر از تغییرات طول جغرافیایی تأثیر می‌پذیرند. مشاهده شد که در اعماق بیشتر آب‌های نزدیک به تنگه هرمز (به جز ماه‌های مارس و جولای)، سرعت صوت بر اثر افزایش دما و شوری آب‌های وارده از خلیج فارس افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تپ‌های هیدروآکوستیکی؛ صوت در دریا، داده‌های ARGO؛ نیم‌رخ سرعت صوت؛ دریای عمان.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری صوت زیر آب به سرعت به عنوان یک حوزه تحقیقاتی دارای اولویت به منظور نظارت بر اقیانوس‌ها و تبادل اطلاعات در استفاده‌های نظامی و غیرنظامی توسعه یافته است [۱]. کانال صوتی زیر آب^۱ به عنوان یکی از پیچیده‌ترین رسانه‌های ارتباطی شناخته می‌شود. سیگنال‌های صوتی در کانال، در معرض تلفات مختلفی قرار می‌گیرند که شامل جذب، پراکندگی، انتشار چندمسیره^۲، جابجایی داپلر^۳ و غیره می‌شود [۲]. اگرچه در ابتدا، پژوهشگران از تفسیر و پیش‌بینی شرایط صوتی در دریا فقط برای طراحی سیستم‌های زیردریایی‌ها و جنگ‌افزارهای ضد زیردریایی، دفاع زیردریا و ارزیابی عملکرد سونارهای مخابرات زیرآبی استفاده می‌کردند، اما کاربردهای غیرنظامی دیگری مانند: عمق‌یابی، نقشه‌برداری بستر، ماهیگیری پیشرفته، اکتشافات زمین‌شناسی، ناوبری و مخابرات زیرآبی، کشف اهداف و تعیین موقعیت آن‌ها به سرعت در حال توسعه است [۳]. مدل‌سازی و شبیه‌سازی نحوه انتشار امواج صوتی، از مباحث مهم و پایه‌ای صوت در دریاست. شبیه‌سازی کانال‌های زیر آب به منظور ارزیابی الگوی انتقال و مسافت طی شده توسط سیگنال صوتی در آب دریا انجام می‌شود [۴-۱۸]. نیم‌رخ‌های سرعت صوت قابلیت تغییر در ساعت‌ها، روزها، ماه‌ها، سال‌ها و مناطق جغرافیایی مختلف را دارد؛ بنابراین ضرورت دارد تا قبل از انجام هرگونه شبیه‌سازی، تیپ‌های هیدروآکوستیکی منطقه مورد مطالعه استخراج شود. دریای عمان به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق دریایی، همواره در طول تاریخ به دلیل موقعیت راهبردی، ملاحظات اقتصادی و انرژی، از موقعیت استراتژیک ویژه‌ای برای کشورها و قدرت‌های دنیا، همچنین جمهوری اسلامی ایران برخوردار است؛ بنابراین لزوم شناسایی دقیق این منطقه به‌ویژه در مقوله چگونگی انتشار امواج صوتی به منظور به کارگیری هرچه بهتر واحدهای زیرسطحی خودی و شناسایی واحدهای زیرسطحی بیگانه برای تأمین امنیت و حفظ سیادت دریایی، نیاز دفاعی و ناوبری زیر دریا بیش‌ازپیش احساس می‌شود که متأسفانه در این زمینه اقدامات بارزی صورت نگرفته است.

با توجه به نبود هیچ الگویی از شرایط اقلیمی تیپ‌های هیدروآکوستیکی در منطقه‌ی دریای عمان، جامعه‌ی علمی کشور نیاز به یک مطالعه‌ی مناسب برای به کارگیری داده‌های چند سال گذشته و تولید الگوهای تیپ‌های هیدروآکوستیکی را به شدت احساس می‌کند. این پژوهش در نظر دارد در حد امکان به این نیاز پاسخ دهد.

۱-۱. سابقه و پیشینه

علیرغم پیشرفت مداوم در فناوری‌های دریایی، توسعه سونارهای هوشمند، تجهیزات شناسایی و ردیابی هدف شناورهای زیرسطحی، شناورهای زیرآبی بدون سرنشین و مسائل ارتباطی ایمن و پایدار در میان دستگاه‌های صوتی مختلف در زیر دریا که امروزه با توجه به اهمیت تحقیق در این حوزه توجه زیادی را به خود جلب کرده است، اقدامات مؤثری در زمینه تحلیل جامع و بررسی تیپ‌های هیدروآکوستیکی با تغییرات در بازه‌های زمانی متفاوت روزانه، ماهانه و سالانه در دو دهه گذشته صورت نگرفته است. تحقیقات صورت گرفته عمدتاً یک بازه زمانی و یک منطقه محدود را برای مطالعه مورد بررسی قرار داده‌اند.

مهدی‌زاده و همکاران [۵] در سال ۱۳۹۲ کانال سطحی شمال دریای عمان و اثر آن بر سونارهای سطحی و زیرسطحی را مورد تحلیل قرار داده‌اند. به منظور مطالعه روند تغییرات سرعت صوت با عمق، رایج‌ترین راه، اندازه‌گیری نمایه (نیم‌رخ) دما و شوری با عمق و قرار دادن این مقادیر در روابط تجربی محاسبه سرعت صوت است. در این مقاله، نیم‌رخ سرعت صوت منطقه محصور بین عرض جغرافیایی ۲۴/۵۰ درجه شمالی و خط ساحلی جنوب جمهوری اسلامی ایران و بین طول‌های ۵۶/۲۰ درجه تا ۵۸/۷۵ درجه شرقی مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه به دستیابی به دو نمودار به عنوان الگوهای زمستانه و تابستانه نمایه‌های سرعت صوت سواحل مکران منجر شد. از این الگوها برای محاسبه پارامترهای انتشار صوت استفاده شد. حسینی و همکاران [۶] در پژوهشی به شبیه‌سازی عددی اثر امواج درونی ناشی از جزر و مد روی انتشار صوت در دریای عمان پرداخته‌اند. با

تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدروفیزیکی خلیج چابهار در سال‌های (۱۳۹۱-۱۳۹۰) را انجام داده‌اند. در پروژه مورد اشاره، پارامترهای آب محدوده خلیج چابهار در ۹ مرحله عملیات میدانی از آبان ۱۳۹۰ تا تیر ۱۳۹۱ و در ۲۴ ایستگاه شامل ۱۷ ایستگاه داخل خلیج (داخلی) و ۷ ایستگاه خارج خلیج (شاهد) اندازه‌گیری شد. مهرابی و همکاران [۱۲] در پژوهشی با عنوان بررسی اثرپذیری کانال صوتی سطحی شمال اقیانوس هند از شار گرمایی محسوس در زمان وقوع مونسون تابستانی برای نخستین بار، تأثیر شار گرمایی محسوس در حضور شکست موج و گردش لانگمویر ناشی از مونسون تابستانه شمال اقیانوس هند با استفاده از روش شبیه‌سازی پیچک‌های بزرگ مورد مطالعه قرار گرفته است. شانگ لین و همکاران [۱۳] در مقاله‌ای اثرات پروفایل سرعت صوت به منطقه همگرایی در آب‌های عمیق را مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که پروفایل‌های سرعت صوت در محیط‌های دریایی مختلف تأثیر قابل توجهی بر مناطق همگرایی آب‌های عمیق دارند. نهاوندیان و همکاران [۱۴] در پژوهشی با عنوان تغییرات سرعت صوت آب در جنوب شرق دریای خزر بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی به مطالعه بررسی تغییرات فصلی سرعت صوت در ستون آب و به تبع آن دما، شوری در منطقه‌ی بابلرس، بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده پرداخته‌اند.

۱-۲. محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش دریای عمان یا دریای مکران به‌عنوان قلمرو مورد مطالعه انتخاب شده است. این دریا از غرب به تنگه هرمز و خلیج فارس، از شمال به ایران، از شرق به اقیانوس هند و از جنوب به کشور عمان محدود شده است. این دریا ۵۴۵ کیلومتر طول و ۱۸۱ هزار کیلومتر مربع وسعت دارد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در محدوده طول جغرافیایی ۵۶/۵ درجه شرقی تا ۶۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۲/۵ درجه شمالی تا سواحل جنوب ایران یا سواحل مکران است [۴]. با توجه به اثرپذیری نیم‌رخ سرعت صوت دریای عمان از بادهای سطحی، در نظر است در این پژوهش این دریا به ۵ منطقه تفکیک و هریک به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار

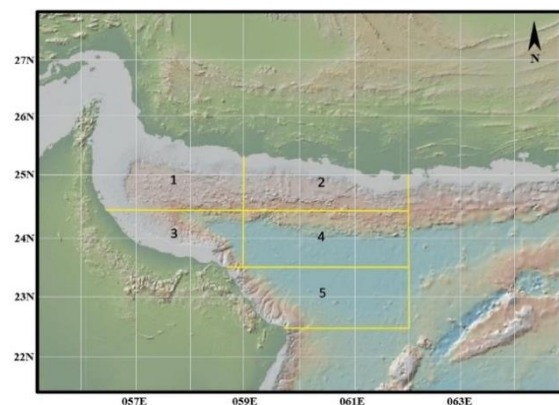
استفاده از خروجی هیدروفیزیکی مدل (دما و شوری)، در یک دوره جزر و مدی، پارامتر سرعت صوت (رابطه مکزی) محاسبه شد. نتایج تأثیر پرتوهای موج داخلی منتشر شده و بازتابیده شده بر پروفایل سرعت صوت را می‌توان به‌صورت اغتشاشات بین لایه‌ای در امتداد این پرتوها نشان داد. سهیلی فر و همکاران [۷] در کتاب سونار، مفاهیم انتشار امواج صوتی در آب و سامانه سونار، تجزیه و تحلیل معادله سونار که ترکیبی از شاخص‌های محیط انتشار امواج و خود سیستم است را بیان کرده‌اند. همچنین ایده‌های اصلی و اساسی مربوط به ماهیت فیزیکی و معادله‌های امواج صوتی، خواص و مرتبه بزرگی آن‌ها و استفاده عملی و کاربردی آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ریچارد پی هاجز در کتاب صوت‌شناسی زیرآب ترجمه حمید معیری [۸] به مفاهیم نیم‌رخ سرعت صوت و ردیابی صوت بر اساس قانون اسنل^۴ برای تصویر نمودن انتشار صوت پرداخته است. یونگ تائه و همکاران [۹] مروری بر نسل بعدی تشخیص و ردیابی هدف زیر آب، معماری یکپارچه زیر آب داشته‌اند. در این مطالعه، ابتدا به‌طور خلاصه در مورد اصطلاحات جدید به‌عنوان مثال، شبکه‌های صوتی شناختی^۵، شبکه‌های تعریف شده توسط نرم‌افزار^۶، مجازی‌سازی عملکرد شبکه^۷، محاسبات ابری، محاسبات مه و اینترنت اشیاء زیرآب^۸ و ادبیاتی که از این مفاهیم برای بهبود ارتباطات زیرآب استفاده می‌کنند، بحث شده؛ سپس راه‌حلی برای شناسایی و ردیابی هدف زیرآب نسل بعدی ارائه می‌کند. مهرابی [۱۰] در سال ۱۴۰۱ در کتاب مقدمه‌ای بر اقیانوس‌شناسی فیزیکی در دریا به ارائه برخی مفاهیم پایه اقیانوس‌شناسی فیزیکی و کاربرد اقیانوس‌شناسی در دریانوردی از هر دو جنبه‌ی تجاری و نظامی پرداخته است. در فصل هشتم کتاب چگونگی توزیع سرعت صوت در دریا با عمق در اقیانوس و نیم‌رخ کلی سرعت صوت و لایه‌های مختلف، از سطح آب تا اعماق زیاد اقیانوس‌ها توضیح داده شده است. همچنین شرایط ۷ گانه توزیع سرعت صوت استاندارد^۹ (SSVD) یا تپ‌های هیدروآکوستیکی هفت‌گانه به‌منظور انتخاب بهترین عمق برای کشف، اختفا در برابر شناورهای سطحی و زیرسطحی دشمن و حصول بیشترین برد ارتباطی بیان شده است. عینعلی و همکاران [۱۱]

بنابراین سرعت صوت تا حد زیادی توسط دمای آب تعیین می‌شود. ساختارهای دمایی عمودی اقیانوس را به‌طور کلی می‌توان به چهار لایه آمیخته سطحی، لایه دماشیب فصلی، لایه دماشیب اصلی و لایه هم‌دمای عمیق تقسیم کرد. قانون اسنل، انعکاس پرتوهای صوتی را در محیطی با سرعت متغیر تعریف می‌کند که بر اساس آن پرتوهای صوتی در هنگام عبور از محیطی با سرعت صوت کمتر به محیطی با سرعت صوت بیشتر به سمت خط قائم خم می‌شوند، یا به بیان دیگر، صوت در مسیرهای دایره‌ای شکل به سمت داخل مناطق با سرعت کم منحرف می‌شوند. پرتوهای صوتی پس از انتشار در مناطق با بیشترین میزان سرعت صوت سبب ایجاد لایه صوتی و در مناطقی که کمترین میزان سرعت صوت را دارند محور کانال صوتی را ایجاد می‌کنند [۳-۱۳].

مطالعه ویژگی‌های میدان صوتی و محدوده عمق تشکیل لایه‌ها و کانال‌های صوتی در آب‌های عمیق که باعث محصور ماندن صوت در کانال صوتی، شکستن پرتوهای صوتی و ایجاد مناطق با همگرایی با شدت بالا، مناطق واگرایی و نقاط کور می‌شود از اهمیت ویژه‌ای در فعالیت‌های مرتبط با صوت در دریا برخوردار است. به‌طور مثال در عملیات‌های شناورهای زیرسطحی، به‌منظور افزایش قابلیت کشف و شناسایی یگان‌های شناور سطحی و زیرسطحی دشمن، افزایش قابلیت مخفی شدن در برابر یگان‌های شناور سطحی، زیرسطحی دشمن و افزایش امنیت در ارتباطات زیرآبی از الگوهای «توزیع سرعت صوت استاندارد»^۱ یا تیپ‌های هیدروآکوستیکی^{۱۱} استفاده می‌شود. این تیپ‌ها هم‌زمان با تحویل زیردریایی‌های کلاس کیلو از کشور شوروی سابق وارد ادبیات دریایی و نظامی ایران شده است. این تیپ‌ها که با رسم تغییرات سرعت صوت بر حسب عمق یا توزیع عمودی سرعت صوت نسبت به عمق آب به دست می‌آیند را می‌توان مطابق شکل ۲ به هفت الگو تقسیم‌بندی کرد [۱۰].

اگرچه طی سال‌های گذشته این تیپ‌ها کاربرد گسترده‌ای در محیط‌های عملیات دریایی ایران پیدا کرده‌اند اما با پیشرفت فناوری و افزایش دقت سنجه‌های اندازه‌گیری میدانی،

گردد. منطقه‌ی ۱ در محدوده طول جغرافیایی ۵۶/۵ درجه شرقی تا ۵۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۴/۵ درجه شمالی تا سواحل جنوب ایران، منطقه‌ی ۲ در محدوده طول جغرافیایی ۵۹ درجه شرقی تا ۶۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۴/۵ درجه شمالی تا سواحل جنوب ایران، منطقه‌ی ۳ در محدوده طول جغرافیایی ۵۶/۵ درجه شرقی تا ۵۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۳/۵ درجه شمالی تا ۲۴/۵ درجه شمالی، منطقه ۴ در محدوده طول جغرافیایی ۵۹ درجه شرقی تا ۶۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۳/۵ درجه شمالی تا ۲۴/۵ درجه شمالی و منطقه ۵ مورد مطالعه در محدوده طول جغرافیایی ۵۹ درجه شرقی تا ۶۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۲/۵ درجه شمالی تا ۲۳/۵ درجه شمالی انتخاب شده است.



شکل ۱. محدوده مناطق پنج‌گانه مورد مطالعه

۳-۱. تیپ‌های هیدروآکوستیکی

نیم‌رخ سرعت صوت بر انتشار صوت زیر آب، به‌ویژه روی افت انتقال و ساختار رسیدن چندمسیره تأثیر می‌گذارد. سرعت صوت را می‌توان به‌عنوان تابعی از دما، شوری و عمق بیان کرد. از آنجا که فشار محیط تابعی از عمق است، مرسوم است که سرعت صوت (c) بر حسب m/s را به‌صورت تابعی تجربی از دما (t) بر حسب درجه سانتی‌گراد، شوری (s) بر حسب جزء بر هزار و عمق (z) بر حسب متر بیان می‌کنند [۱۵، ۱۶]. در پهنه اقیانوس‌ها به‌صورت کلی، به ازای افزایش دمای هر یک درجه سانتی‌گراد، افزایش شوری به میزان هر یک جزء بر هزار و افزایش عمق به میزان ۱۰۰۰ متر، سرعت صوت به ترتیب ۴، ۱/۵ و ۱۶ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد [۱۰]؛

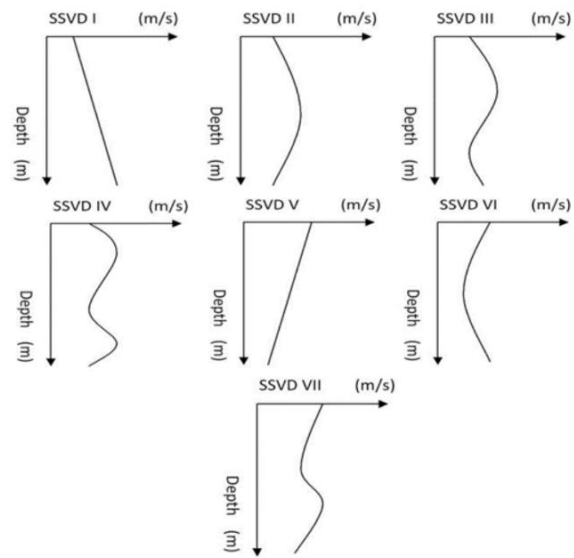
مختلف از سطح تا بستر دریا مورد نیاز است، از اطلاعات میدانی ثبت شده پایگاه داده برنامه بین‌المللی جمع‌آوری اطلاعات ARGO [۲۳] از سال ۲۰۰۳ استفاده شده است.

آرگو یک برنامه بین‌المللی است که ویژگی‌های آب را در سراسر اقیانوس جهان با استفاده از ناوگانی از تجهیزات روباتیک اندازه‌گیری می‌کند که با جریان‌های اقیانوس حرکت می‌کنند و در بین سطح و لایه میانی آب، بالا و پایین می‌روند. هر دستگاه (شناور) تقریباً تمام عمر خود را در زیر سطح می‌گذراند. داده‌هایی که آرگو جمع‌آوری می‌کند، دما و شوری آب را توصیف می‌کند و برخی از شناورها خواص دیگری را که زیست‌شناسی/شیمی اقیانوس را توصیف می‌کنند، اندازه‌گیری می‌کنند. در بالای هر شناور آرگو یک حسگر هدایت‌پذیری، دما، عمق یا CTD قرار دارد که دما را با دقت ۰/۰۰۱ درجه سانتی‌گراد، فشار (مرتبط نزدیک با عمق) با دقت ۰/۱ دسی بار و محاسبه شوری با استفاده از هدایت‌پذیری، دما و فشار با دقت ۰/۰۰۱ psu (واحد شوری عملی) اندازه‌گیری می‌کند. برنامه Argo توسط تیم‌هایی از دانشمندان و متخصصان داده مدیریت می‌شود که اطمینان حاصل می‌کنند که برنامه تا حد امکان کارآمد و مؤثر اجرا می‌شود و استانداردها در بالاترین سطح ممکن حفظ می‌شوند. آرگو بخشی از اقیانوس جهانی و سیستم‌های مشاهده آب‌وهوای جهانی است [۱۷].

۲. مواد و روش‌ها

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تپ‌های هیدروآکوستیکی بر اساس داده‌های ARGO همراه با تغییر شرایط در زمان و مناطق مختلف دریای عمان است. در این پژوهش فراوانی داده‌های موجود ARGO در مناطق تعیین شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت که آیا داده‌های موجود، همه زمان‌های مورد نظر را برای داشتن یک الگوی اقلیمی از نیم‌رخ سرعت صوت در دریای عمان را پوشش می‌دهد یا خیر. چگونگی انطباق تپ‌های هیدروآکوستیکی تشکیل شده بر اساس نیم‌رخ‌های سرعت صوت رسم شده با شرایط هفت‌گانه توزیع سرعت صوت استاندارد بررسی شده، همچنین تغییرات

ضرورت دارد امکان بازتعریف این تپ‌ها از طریق یک روش علمی و میدانی بررسی شود.



شکل ۲. تپ‌های هیدروآکوستیکی هفت‌گانه [۱۰]

۱-۴. نیم‌رخ سرعت صوت

نیم‌رخ‌های سرعت صوت قابلیت استفاده در شناورهای زیرسطحی، تجهیزات صوتی زیرآبی، طراحی و ساخت سونارهای هوشمند، شناورهای بدون سرنشین زیرآبی، شناورهای خودکار زیرآبی، گلایدرها، شبکه‌های صوتی زیر آب، دستگاه‌های هوشمند زیرآبی نسل آینده، سازمان‌های تحقیقاتی در حوزه دریا و طراحی مدل‌های ردیابی پرتو و همچنین شناسایی و ردیابی اهداف زیرآبی را دارند. جدا از محیط سخت شبکه‌های زیر آب، فناوری‌های مختلفی که برای شبکه‌های زمینی در حال ظهور هستند؛ نیز به بخشی از شبکه‌های زیر آب تبدیل می‌شوند. به‌عنوان مثال، شبکه‌های صوتی شناختی^{۱۲}، شبکه‌های تعریف شده توسط نرم‌افزار^{۱۳}، مجازی‌سازی عملکرد شبکه، محاسبات ابری، محاسبات مه و اینترنت اشیا زیر آب [۹-۱۹]، همه به شبکه‌های زیرآبی قابل اعتماد نسل آینده منتهی می‌شوند و قابلیت استفاده از نتایج این پژوهش را دارند.

۱-۵. جمع‌آوری داده‌ها

جهت به دست آوردن نیم‌رخ سرعت صوت امواج صوتی و شبیه‌سازی آن‌ها که داده‌های دما و شوری در عمق‌های

و نشان دادن فراوانی داده‌ها و تفکیک آن‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. رسم نیم‌رخ‌های سرعت صوت درک بهتری از تیپ‌های هیدروآکوستیکی غالب در این مناطق ارائه می‌کند. لازم به یادآوری است به دلیل اینکه بیشترین تغییرات در نیم‌رخ‌های سرعت صوت برای تشکیل لایه‌های مختلف آب و انجام عملیات‌های زیرسطحی و فعالیت‌های مرتبط با انتشار امواج صوتی در نزدیک سطح دریا به وجود می‌آید به همین دلیل نیم‌رخ‌های ترسیمی تا عمق ۴۰۰ متری از سطح دریا مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. وجود جریان‌های غالب و جریان‌های کشندی منطقه‌ی دریای عمان و سواحل مکران، ویژگی‌های آب دریا شامل شوری، چگالی و دمای سطح، زیرسطح آب، همچنین تناوب توزیع باد در منطقه از جمله عواملی هستند که سبب تغییرات در نیم‌رخ‌های سرعت صوت در محدوده مورد مطالعه می‌شوند. الگوی کلی جریان‌ها بر اساس بردارهای میانگین جریان منطقه دریای عمان نشان می‌دهد که جریان‌ها معمولاً کوچک و متغیر بوده و غالباً جهت جریان‌ها از ماه نوامبر تا ماه ژانویه جنوب غربی و بین فوریه و اکتبر شمال شرقی است. افزایش تبخیر به جهت نزدیک بودن به استوا و آب‌وهوای خشک جنب حاره‌ای منطقه سبب افزایش شوری، چگالی آب و دمای سطحی این منطقه می‌شود. به‌طور کلی مانسون جنوب غربی مرطوب، ناحیه شرقی دریای عمان را در تابستان تحت تأثیر قرار داده و بیشترین دماها در این ناحیه در زمان گذار بین مانسون شمال شرقی و جنوب غربی در ماه‌های می و ژوئن و دوباره در ماه‌های سپتامبر و اکتبر دیده می‌شود [۱۰]. یکی از خصوصیات بارز و مهم آب‌های دریای عمان مشاهده جریان خروجی خلیج فارس در بخش جنوبی، نیز نیروی جزر و مدی از شرق این منطقه است. جریان آب گرم و شور خلیج فارس باعث ایجاد وارونگی در اعماق بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ متری در خلیج عمان می‌شود [۲۲].

۳. یافته‌ها

با توجه به اینکه مساحت و تعداد داده‌برداری هر یک از مناطق پنج‌گانه این پژوهش متغیر است، به‌همین منظور در جدول ۱ تراکم داده‌های موجود در این مناطق با یکدیگر

نیم‌رخ سرعت صوت دریای عمان نسبت به تغییرات موقعیت جغرافیایی، تیپ‌های هیدروآکوستیکی غالب ماهانه در هر منطقه و چگونگی تشکیل کانال‌های صوتی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

در ابتدا همه داده‌های اندازه‌گیری شده از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۳ در محدوده مورد مطالعه دریای عمان از پایگاه داده ARGO به تعداد ۶۳۰۱ سیکل استخراج شد. هر سیکل از داده شامل شماره پلتفرم، تاریخ و زمان، موقعیت جغرافیایی، پارامترهای دما برحسب درجه سانتی‌گراد، شوری برحسب جزء بر هزار، عمق برحسب متر و کیفیت اطمینان به داده‌های اندازه‌گیری شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش از فرمول زیر برای محاسبات سرعت صوت استفاده شده است، به‌منظور کسب نتایج دقیق‌تر، سیکل‌هایی که فاقد یکی از پارامترهای گفته شده بودند، حذف شدند. [۲۰، ۲۱]

$$C = 1448/96 + 4/591T - 0/05304T^2 \quad (1)$$

$$+ 0/0002374T^3 + 0/0160Z + (1/340 - 0/01025T)$$

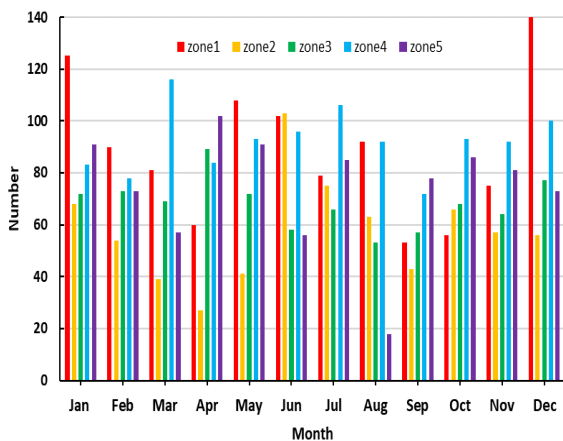
$$(S - 35) + 1/675 \times 10^{-7} Z^2 - 7/139 \times 10^{-13} TZ^2$$

که در آن C سرعت صوت (متر بر ثانیه)، S شوری، T دما برحسب درجه سانتی‌گراد و Z عمق (m) است.

داده‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی در مناطق تفکیک شده دسته‌بندی شدند. سپس یک کد یکتا بر اساس تاریخ و زمان داده‌برداری برای هر سیکل ایجاد شد. با توجه به اینکه میزان شوری در یک منطقه تغییرات چندانی ندارد؛ بنابراین تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در سرعت صوت ایجاد نمی‌کند، به همین دلیل نیم‌رخ سرعت صوت بیشترین تأثیرپذیری را از تغییرات دما دارد؛ بنابراین در این پژوهش، داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه‌های ماهانه مدنظر قرار گرفتند و در هر منطقه برای هر ماه میلادی محاسبه شده و از آن در تفکیک داده‌ها استفاده شد.

سپس داده‌های تفکیک شده توسط کدهای نوشته شده در نرم‌افزار متلب جهت رسم نیم‌رخ‌های سرعت صوت، میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در آن منطقه، میانگین ماهانه آن‌ها

نمودار فراوانی داده‌های در دسترس به صورت ماهانه برای هر منطقه در شکل ۴ آورده شده است. در ماه دسامبر تعداد ۱۴۰ سیکل داده‌برداری در منطقه‌ی ۱ ثبت شده که بیشترین مقدار به نسبت سایر مناطق است. ماه آگوست در منطقه ۵ با تعداد ۱۸ سیکل داده‌برداری کمترین تعداد را دارند. بیشترین داده‌برداری ماهانه در همه مناطق، مربوط به ماه دسامبر با ۴۴۶ سیکل و کمترین آن در ماه سپتامبر با ۳۰۳ سیکل است. به‌غیر از ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و اکتبر، منطقه ۲ دارای کمترین داده‌برداری به نسبت سایر مناطق است.



شکل ۴. نمودار فراوانی داده ماهانه در مناطق پنج‌گانه پژوهش.

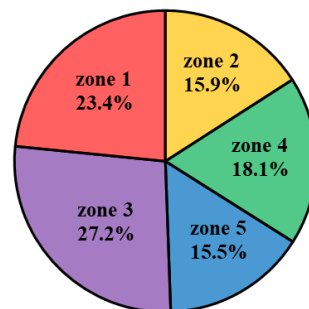
به‌منظور رسم نیم‌رخ‌های سرعت صوت، در ابتدا نیم‌رخ مناطق پنج‌گانه تحقیق در ماه‌های مختلف میلادی برای همه ایستگاه‌هایی که حداقل تا عمق ۴۰۰ متری اقدام به داده‌برداری کردند، در نظر گرفته شد. سپس تلاش شد تا با در نظر گرفتن کانال‌ها، لایه‌های صوتی محلی و بر اساس تپ‌های هیدروآکوستیکی استاندارد (شکل ۲)، تپ هیدروآکوستیکی هر نیم‌رخ تعیین شود اما مشاهده شد که تعداد تغییر رفتار سرعت صوت با عمق (تغییر رفتار از گرادیان مثبت به منفی یا برعکس) و به تعبیر دیگر تعداد کانال‌ها و لایه‌های صوتی محلی، بیش‌تر از الگوی استاندارد ارائه شده در شکل ۲ است؛ بنابراین این نتیجه حاصل شد که امکان شناسایی نیم‌رخ‌ها بر اساس نمودارهای استاندارد وجود ندارد؛ بنابراین مکانیزم شماره‌گذاری تپ‌های هیدروآکوستیکی تغییر داده شد و الگوی جدیدی برای اولین بار به شرح زیر ارائه شد.

موردبررسی قرار گرفته است. در مجموع ۴۵۶۷ سیکل داده‌برداری شده با قابلیت اطمینان بالا مورد استفاده قرار گرفته است. متوسط داده‌برداری در مناطق برابر با ۷۶/۲ سیکل در هر ماه است. بیشترین تعداد داده‌برداری مربوط به منطقه ۴ با ۱۱۰۵ سیکل و کمترین داده‌برداری در منطقه ۲ با ۶۹۲ سیکل است. منطقه ۴ با ۹۹۰۰ مایل مربع دارای بیشترین مساحت و منطقه‌ی ۳ با ۴۸۷۵ مایل مربع، کمترین مساحت را در مقایسه با سایر مناطق پنج‌گانه دارند؛ بنابراین با توجه به مساحت هر منطقه، نتایج نشان می‌دهد در منطقه ۳ با ۰/۱۶۸ بیشترین تراکم داده به نسبت مساحت و منطقه ۵ با ۰/۰۹۶ کمترین تراکم داده به نسبت مساحت را شامل می‌شوند.

جدول ۱. تعداد داده، مساحت و تراکم داده‌های هر یک از مناطق پنج‌گانه پژوهش

منطقه	تعداد داده موجود	مساحت منطقه (مایل مربع)	تراکم داده (تعداد داده بر مساحت)
zone 1	۱۰۶۱	۷۳۳۶	۰/۱۴۵
zone 2	۶۹۲	۷۰۴۰	۰/۰۹۸
zone 3	۸۱۸	۴۸۷۵	۰/۱۶۸
zone 4	۱۱۰۵	۹۹۰۰	۰/۱۱۲
zone 5	۸۹۱	۹۳۲۹	۰/۰۹۶

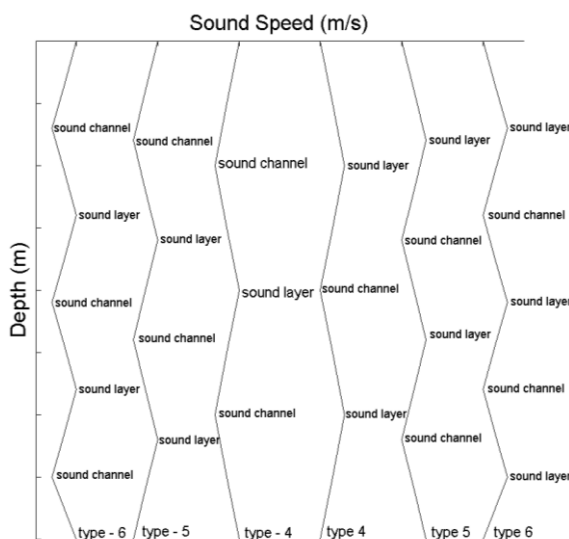
مقایسه تراکم داده‌های اندازه‌گیری شده مناطق که در شکل ۳ آورده شده است، نشان می‌دهد منطقه ۳ که مساحت کمتری نسبت به سایر مناطق دارد، با نسبت ۲۷/۲ درصد و پس از آن منطقه‌ی ۱ با نسبت ۲۳/۴ درصد، دارای بیشترین تراکم داده می‌باشند؛ بنابراین در مناطق شرقی‌تر دریای عمان تراکم داده نسبت به مساحت بیشتر بوده و هرچه به سمت عرض‌های پایین‌تر می‌رویم تراکم داده کمتر و نیاز به انجام داده‌برداری در آینده بیشتر می‌شود.



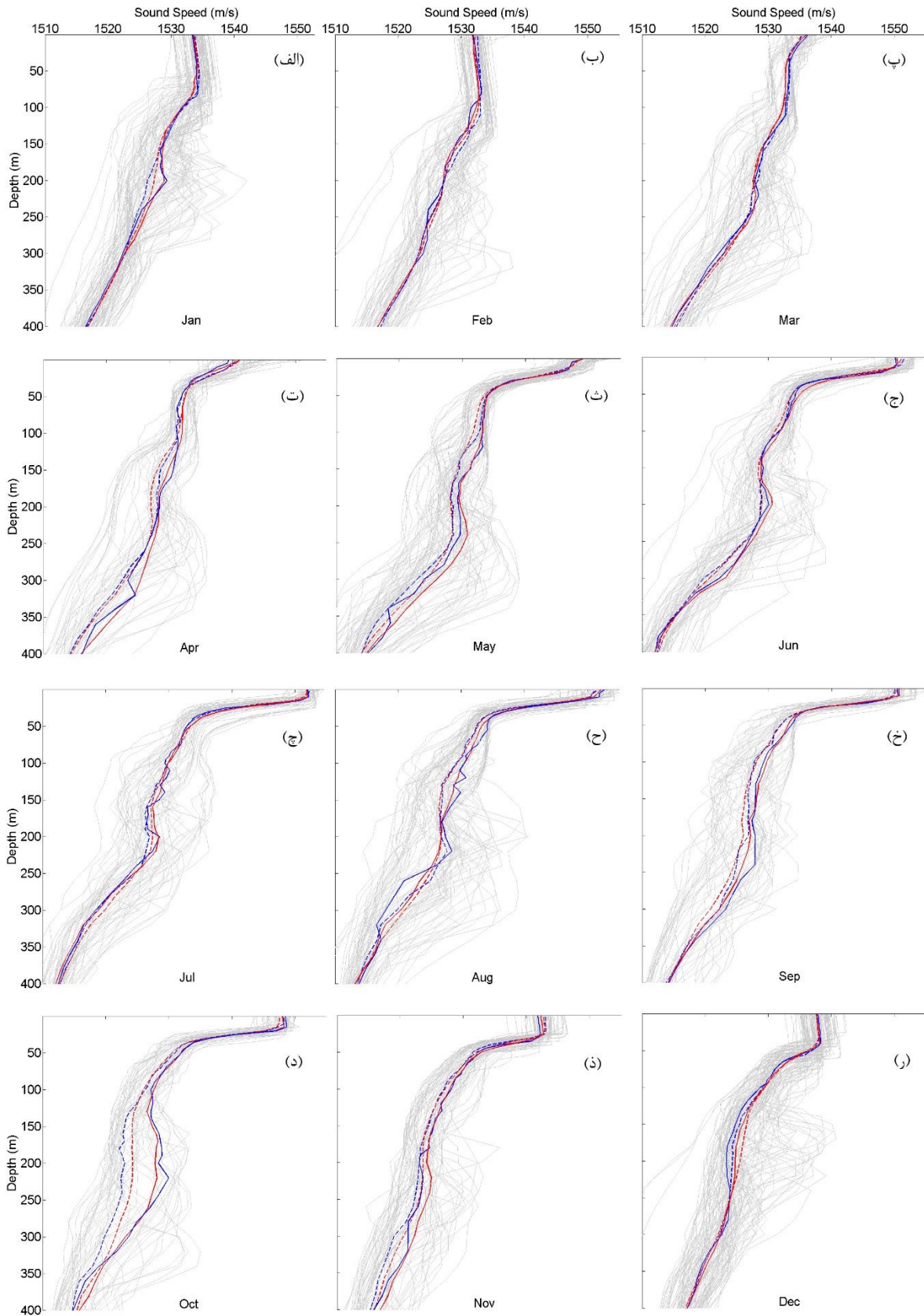
شکل ۳. مقایسه تراکم داده در مناطق پنج‌گانه پژوهش

در شکل ۶، نیمرخ‌های سرعت صوت مناطق پنج‌گانه این پژوهش در ماه‌های مختلف میلادی نشان داده شده است. در ابتدا همه نیمرخ‌های مناطق پنج‌گانه به تفکیک هر ماه تا عمق ۴۰۰ متری رسم گردید؛ اما به جهت اختصار، تنها نیمرخ‌های منطقه‌ی ۱ نشان داده می‌شود. مطابق این شکل، هرچند اکثر نیمرخ‌های سرعت صوت در هر ماه (خطوط طوسی) از الگوهای مشابهی (تیپ‌های یکسانی) پیروی می‌کند، لیکن به برای بررسی بهتر و دقیق‌تر تیپ‌های هیدروآکوستیکی، همچنین چگونگی تشکیل لایه‌های محلی و کانال‌های سطحی و محلی، میانگین و میانه همه نیمرخ‌ها (به ترتیب با خط چین قرمز و خط چین آبی) و نیمرخ‌های غالب (به ترتیب با خط قرمز و خط آبی) نیز آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد؛ برخلاف نیمرخ میانگین غالب (خط قرمز)، در نیمرخ میانه همه داده‌ها، تعداد تغییرات سرعت صوت (تغییر رفتار از گرادیان مثبت به منفی یا برعکس) بیش‌تر است که باعث ایجاد کانال‌ها و لایه‌های محلی زیاد می‌شود. نوسانات نیمرخ‌های میانه (خطوط آبی و خط چین آبی)، به‌خصوص در ماه‌های آوریل تا نوامبر و در اعماق ۱۰۰ الی ۳۰۰ متری قابل توجه است. همچنین مشاهده می‌شود نیمرخ‌های میانگین همه داده‌ها (خط چین قرمز) نیز پیدایش کانال صوتی سطحی را باز تولید نمی‌کند.

در این پژوهش برای اولین بار مشابه الگوی استاندارد قبلی، تیپ‌های ۱ تا ۴ نام‌گذاری شد با این تفاوت که تیپ ۵ تشابه بسیاری با تیپ ۴ دارد و نسبت به این تیپ صرفاً یک نوسان گردایان سرعت صوت بیشتر دارد. نیمرخ‌های سرعت صوتی که با افزایش سرعت صوت شروع می‌شوند با اعداد مثبت و نیمرخ‌هایی که با کاهش سرعت صوت شروع کردند با اعداد منفی نام‌گذاری شوند. این کار کمک می‌کند برخلاف شیوه قبلی، محدودیت در نام‌گذاری تیپ‌هایی که لایه‌ها و کانال‌های محلی بیشتری دارند، برداشته شود؛ بنابراین در این روش جدید می‌توان بی‌نهایت تیپ مثبت و بی‌نهایت تیپ منفی داشت (شکل ۵).



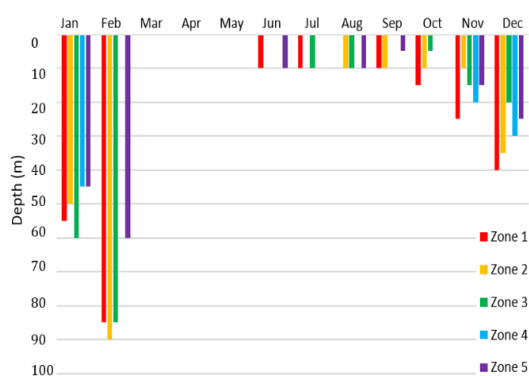
شکل ۵. برخی از تیپ‌های هیدروآکوستیکی بر مبنای تعریف جدید



شکل ۶. همه نیم‌رخ‌های ماهانه سرعت صوت منطقه‌ی ۱ دریای عمان تا عمق ۴۰۰ متری (خطوط طوسی)، نیم‌رخ میانه همه داده‌ها (خط چین آبی)، نیم‌رخ میانه نیم‌رخ‌های غالب (خطوط آبی)، نیم‌رخ میانگین همه داده‌ها (خط چین قرمز) و نیم‌رخ میانگین نیم‌رخ‌های غالب (خطوط قرمز)

شکل گرفته و عمق آن به تدریج افزایش یافته است. روند تغییرات عمق کانال صوتی تقریباً در همه مناطق از ماه ژوئن تا فوریه سال آینده افزایشی است. تنها در ماه فوریه و در منطقه ۴ کانال سطحی شکل نمی‌گیرد. با کاهش دما، سرعت صوت نیز افت می‌کند اما به دلیل آمیختگی بیشتر، عمق کانال صوتی افزایش پیدا کرده و به همین دلیل در ماه‌های ژانویه و فوریه بیشترین عمق کانال صوتی سطحی مشهود است؛ به طوری که در ماه فوریه در منطقه ۲ بیشترین عمق کانال در محدوده ۹۰ متری از سطح دریا تشکیل می‌شود.

مقایسه ماهانه عمق کانال سطحی نشان می‌دهد در مناطق ۲، ۱ و ۳ که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر قرار داشته و به خطوط ساحلی نزدیک‌ترند، کانال صوتی سطحی به نسبت سایر مناطق عمق بیشتری دارد.

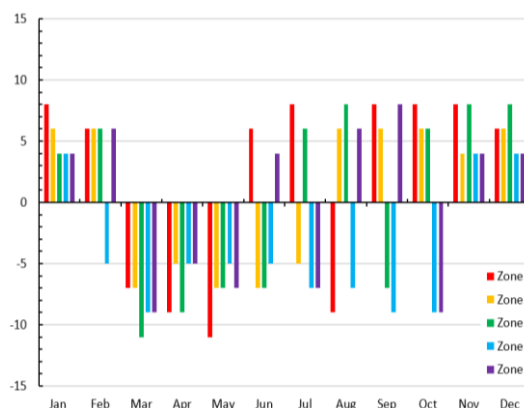


شکل ۸. نمودار عمق کانال صوتی سطحی

نیم‌رخ‌های میانگین ماهانه نیم‌رخ‌های غالب سرعت صوت هر منطقه در مقایسه با یکدیگر در شکل ۹ آورده شده است. هدف این است که بررسی کنیم تغییر مناطق چه تأثیری بر نیم‌رخ‌های سرعت صوت در هر ماه دارد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که سرعت صوت به صورت کلی در ستون آب در منطقه ۱ بیشینه و در منطقه ۴ کمینه است. همچنین این نیم‌رخ‌ها در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر در نزدیک سطح به یکدیگر شبیه‌اند و موقعیت جغرافیایی تغییر ملموسی بر نیم‌رخ سرعت صوت در نزدیک سطح در این ماه‌ها ایجاد نمی‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین تمایز نیم‌رخ‌ها در فصل تابستان و در منطقه ۵ رخ می‌دهد به طوری که از ماه جولای تا سپتامبر، برخلاف سایر مناطق، ایجاد کانال صوتی سطحی در منطقه ۵ مشهود است. مطابق این شکل، در اغلب موارد سرعت صوت مناطق ۱ و ۳ در سطح و نزدیک سطح آب، کمتر از سایر مناطق است؛ ولی در اعماق بیشتر از ۶۵ متر، این مناطق سرعت صوت

شکل ۷ تیپ‌های هیدروآکوستیکی غالب ماهانه بر اساس بیشترین فراوانی در مناطق پنج‌گانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است در ماه ژانویه تیپ هیدروآکوستیکی ۴ در مناطق ۳، ۴ و ۵ دارای بیشترین تکرار بوده و تمامی تیپ‌های هیدروآکوستیکی شکل گرفته در بازه مثبت هستند. در ماه فوریه به جزء منطقه ۴، سایر مناطق دارای تیپ هیدروآکوستیکی ۶ هستند. تمامی تیپ‌های شکل گرفته از ماه مارس تا می‌منفی بوده و به همین دلیل کانال سطحی تشکیل نشده است. میزان نوسانات تیپ‌های هیدروآکوستیکی از ماه ژوئن تا اکتبر (به‌غیر از منطقه ۴ که تمامی تیپ‌ها منفی هستند)، زیاد است. بررسی نوسانات نشان می‌دهد در طول یک سال بیشترین تکرار مربوط به تیپ هیدروآکوستیکی ۶ با ۱۴ تکرار و پس‌از آن تیپ هیدروآکوستیکی ۷- با ۱۱ مرتبه، دارای بیشترین تکرار است.

تیپ‌های هیدروآکوستیکی منطقه ۱ در بیشتر ماه‌های سال در بازه مثبت شکل می‌گیرد که نشان می‌دهد در این منطقه در بیشتر مواقع کانال سطحی تشکیل می‌شود. در منطقه ۴ برخلاف منطقه ۱ که دورتر از خطوط ساحلی است، در بیشتر ماه‌های سال تیپ‌های هیدروآکوستیکی در محدوده منفی شکل گرفته و در طول سال، کانال سطحی کمتر شکل می‌گیرد.

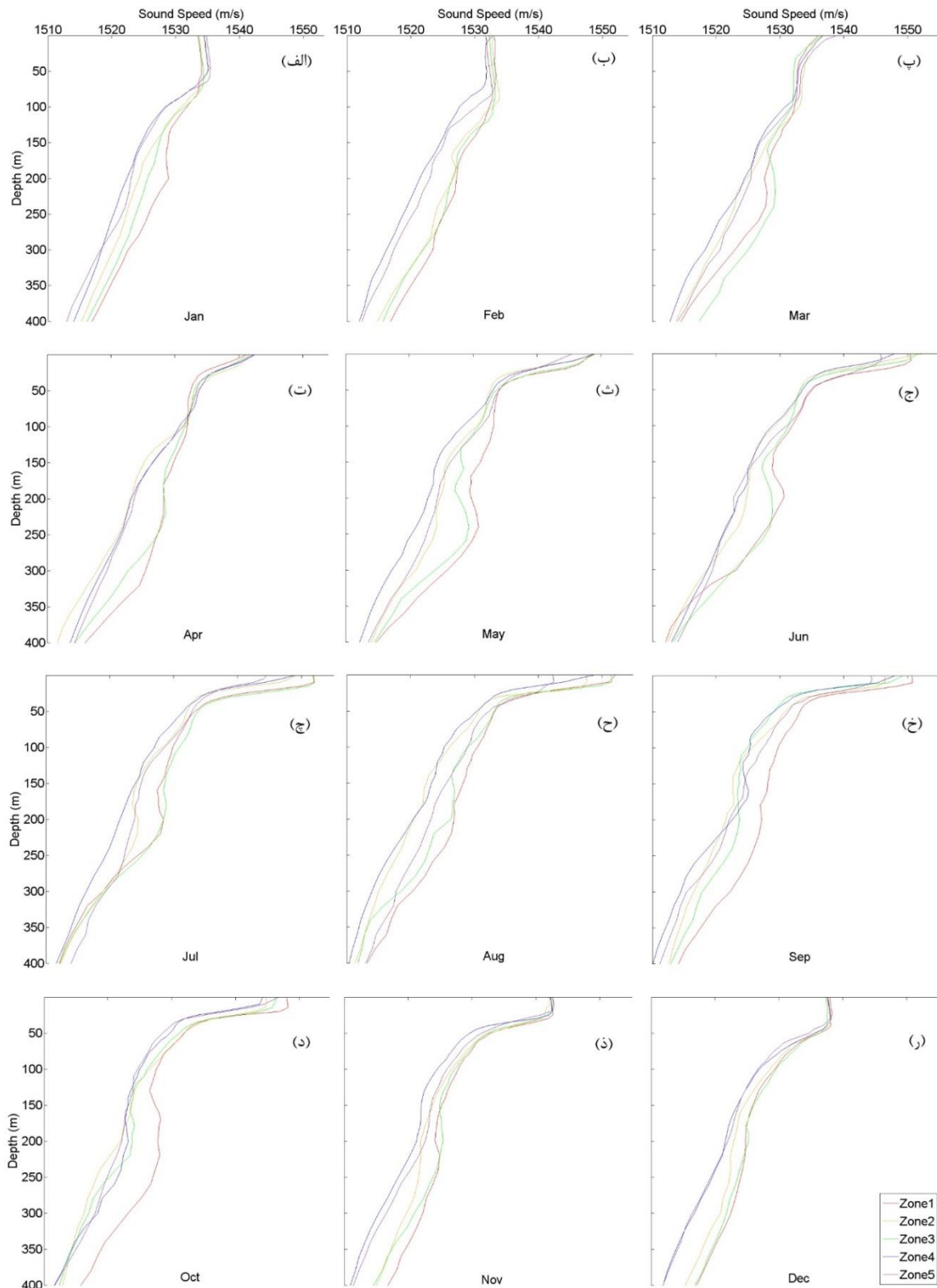


شکل ۷. تیپ‌های هیدروآکوستیکی غالب بر اساس بیشترین فراوانی

تغییرات عمق کانال صوتی سطحی در شکل ۸ آورده شده است. شکل‌های ۷ و ۸ در نمایش کانال سطحی با یکدیگر هماهنگ هستند و شکل‌گیری کانال‌های سطحی در مناطقی که تیپ‌های هیدروآکوستیکی مثبت هستند، کانال سطحی نیز شکل گرفته است. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که از ماه مارس تا می‌کانال سطحی تشکیل نشده و از ماه ژوئن تا اکتبر (در صورت تشکیل) در نهایت دارای عمقی برابر با ۱۰ متر هستند. البته از ماه نوامبر کانال سطحی در همه مناطق

مختلف مشاهده نمی‌شود. در این اعماق، به‌جز در ماه‌های مارس و جولای، سرعت صوت در منطقه‌ی ۱ از سایر مناطق بیشتر است.

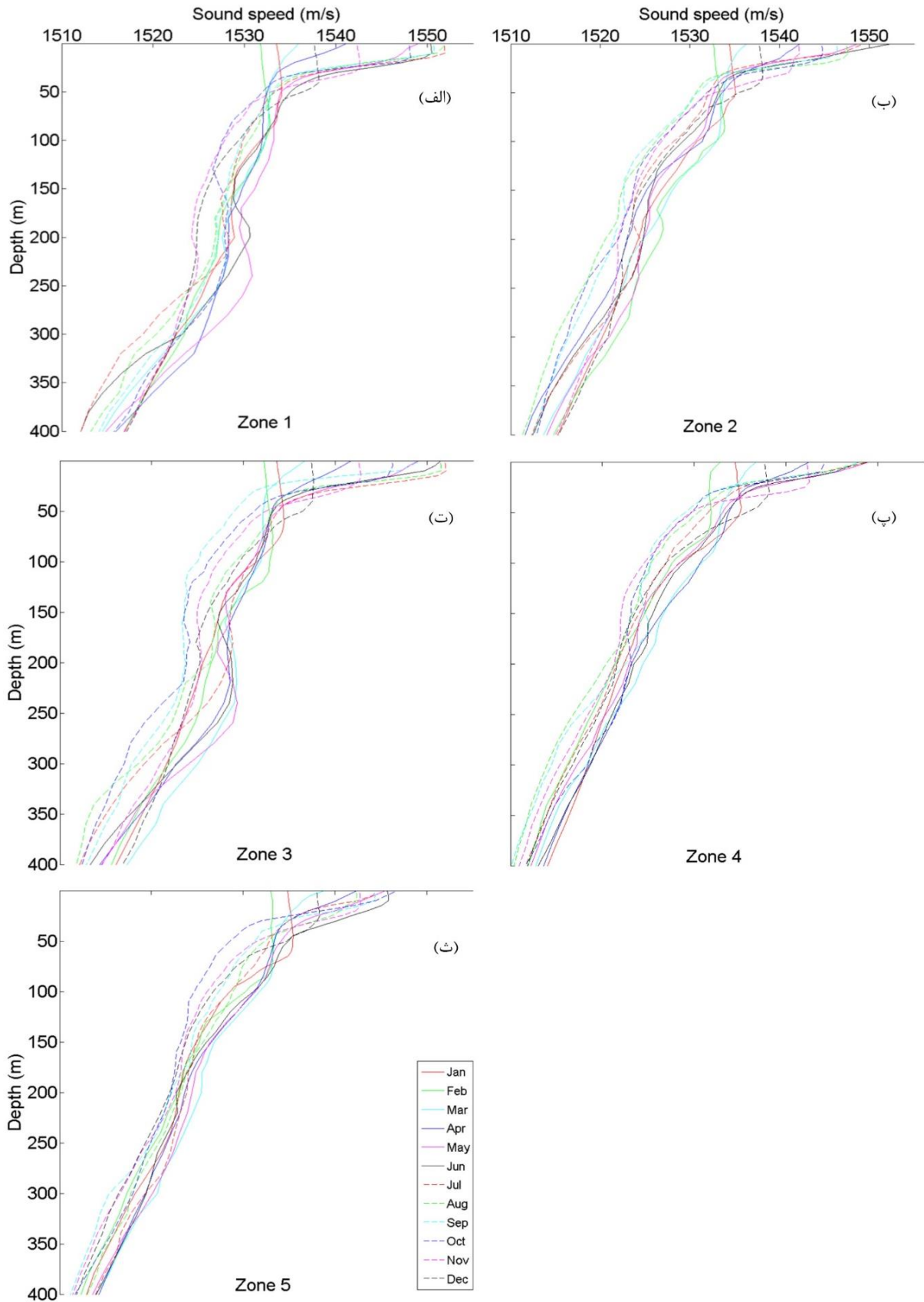
بیشتری نسبت به سایر مناطق دارند. فارغ از اعماق نزدیک به سطح و به‌غیر از ماه اکتبر، نیم‌رخ‌های منطقه ۱ به ۳ و منطقه ۲ به ۴ و ۵ شبیه است. در اعماق زیاد، به‌غیر از ماه‌های نوامبر و دسامبر تفاوت چشمگیری در سرعت صوت در مناطق



شکل ۹. میانگین ماهانه نیم‌رخ‌های غالب سرعت صوت در مناطق پنج‌گانه پژوهش

این شکل به خوبی نشان می‌دهد که به صورت کلی سرعت صوت با افزایش عمق به تدریج کاهش می‌یابد. در اعماق میانی با افزایش عمق، به ویژه در مناطق ۲، ۴ و ۵ بسیاری از نیم‌رخ‌های ماه‌های مختلف بر یکدیگر منطبق یا بسیار به هم نزدیک شده‌اند. نیم‌رخ‌های مناطق ۱ و ۳ (بخش شرقی دریای عمان) در اعماق ۱۵۰ الی ۳۰۰ متری که تحت تأثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس قرار دارند، به یکدیگر شبیه بوده و مناطق ۲، ۴ و ۵ نیز با دور شدن از این جریان‌های خروجی، مشابه هم هستند. اثرپذیری منطقه ۱ از جریان‌های گرم و شور خلیج فارس در ماه‌های ژانویه، می، ژوئن، جولای و اکتبر، سبب افزایش سرعت صوت می‌شود. افزایش سرعت صوت در این منطقه در سایر ماه‌ها به میزان کمتر نیز قابل مشاهده است. در منطقه ۳ افزایش سرعت صوت در اعماق میانی از ماه مارس تا اکتبر به میزان بیشتری نسبت به سایر ماه‌ها دیده می‌شود. این جریان‌ها از ماه نوامبر تا فوریه سال بعد تأثیر کمتری دارند. در اعماق زیاد به ویژه در مناطق ۲، ۴ و ۵ تفاوت چشمگیری در سرعت صوت در ماه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود.

به منظور بررسی بیشتر تغییر نیم‌رخ‌های سرعت صوت هر منطقه در ماه‌های مختلف، شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق انتظار در همه مناطق، بیشترین دامنه تغییرات سرعت صوت در نزدیک سطح مشاهده می‌شود. در تمامی مناطق کمترین میزان سرعت صوت در نزدیک سطح در ماه فوریه دیده می‌شود. در اکثر مناطق بیشینه سرعت صوت در سطح آب، مربوط به ماه جولای است. بیشینه دامنه تغییرات سرعت صوت در سطح در منطقه ۱ و کمینه‌ی آن در منطقه ۵ رخ می‌دهد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در طول سال در منطقه‌ی ۱ بیشترین تعداد کانال سطحی (در ۸ ماه) و در منطقه‌ی ۴ کمترین تعداد (در ۳ ماه) تشکیل می‌شود. این نتایج با شکل ۸ نیز هماهنگی دارد. شکل‌گیری کانال سطحی از ماه نوامبر تا فوریه سال بعد در همه مناطق مشاهده شده و پس از آن تا ماه می به مدت ۳ ماه در هیچ‌یک از مناطق دیده نشده است. در ضمن این شکل نشان می‌دهد منطقه ۴ در مقایسه با سایر مناطق کمترین عمق کانال سطحی و منطقه ۲ بیشترین عمق را به خود دیده است.



شکل ۱۰. تغییرات میانگین ماهانه نیم‌رخ‌های سرعت صوت غالب در هر یک از مناطق پنج‌گانه پژوهش

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه ویژگی‌های میدان صوتی و چگونگی انتشار امواج صوتی و فعالیت‌های مرتبط با عملیات‌های شناورهای زیرسطحی در محیط زیرآب، داشتن یک الگو مبتنی بر اقلیم منطقه از تیپ‌های هیدروآکوستیکی که شرایط توزیع سرعت صوت استاندارد در دریا را نشان دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش دریای عمان را به ۵ بخش تقسیم و رفتار نیم‌رخ‌های سرعت صوت در این مناطق را بر اساس داده‌های ARGO مطالعه می‌کند. تحلیل اولیه نشان می‌دهد که بیشترین تراکم نیم‌رخ‌های به‌دست آمده از داده‌های ARGO مربوط به بخش جنوب غربی دریای عمان (سواحل امارات متحده عربی) و کم‌ترین تراکم مربوط به آب‌های شمال و شمال شرق راس‌الحد است.

یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق عدم امکان دسته‌بندی تیپ‌های هیدروآکوستیکی در دسته‌بندی رایج ۷ گانه است. بنابراین در این پژوهش برای اولین بار الگوی جدیدی از نام‌گذاری این تیپ‌ها ارائه می‌شود. در این الگو نیم‌رخ‌هایی که با شیب مثبت سرعت صوت آغاز می‌شوند با علامت مثبت و آن‌هایی که با شیب منفی شروع و با علامت منفی نام‌گذاری می‌شوند. همچنین شماره هر تیپ از تعداد دفعات تغییر فاز صعودی یا نزولی شدن سرعت صوت به‌دست می‌آید.

بررسی میانگین و میانه نیم‌رخ‌های سرعت صوت مناطق پنج‌گانه در ماه‌های مختلف نشان داد در نیم‌رخ میانگین همه داده‌ها، میزان تغییرات سرعت صوت الگوی بهتری را نسبت به نیم‌رخ‌های میانه نمایش می‌دهد. تغییرات سرعت صوت در این حالت کمتر بوده و برخلاف نیم‌رخ‌های میانه، کانال‌ها و لایه‌های محلی زیاد تشکیل نمی‌شود. با این وجود نتایج بررسی این نیم‌رخ‌ها در تمامی مناطق پنج‌گانه نشان می‌دهد، به‌خصوص در ماه‌های ژوئن تا نوامبر که میزان تغییرات سرعت صوت در نزدیک سطح زیاد است، کانال‌های سطحی به‌خوبی نمایش داده نمی‌شود؛ بنابراین روش دیگری نیز به کار گرفته شد. در این روش، قبل از میانگین گرفتن، ابتدا نیم‌رخ‌ها بر اساس تیپ هیدروآکوستیکی (مبنای جدید

نام‌گذاری) دسته‌بندی شده و میانگین نیم‌رخ‌های هر تیپ به‌دست آمد. در نیم‌رخ میانگین نیم‌رخ‌های غالب، علاوه بر نمایش قابل قبول تغییرات سرعت صوت در اعماق، کانال‌های صوتی سطحی نیز به‌خوبی نشان داده شده است؛ بنابراین این نتیجه به دست آمد که نیم‌رخ میانگین نیم‌رخ‌های غالب در مقایسه با سایر نیم‌رخ‌ها، نمایندگان بهتری برای مطالعه و بررسی تغییرات تیپ‌های هیدروآکوستیکی در مناطق و ماه‌های مختلف هستند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میانگین تیپ‌های هیدروآکوستیکی غالب شکل گرفته از ماه مارس تا می منفی هستند و در نتیجه غالباً در این ماه‌ها کانال سطحی تشکیل نمی‌شود. همچنین مشاهده شد که تغییر نوع تیپ‌های هیدروآکوستیکی از ماه ژوئن تا اکتبر زیاد است (به‌غیر از منطقه ۴ که تمامی تیپ‌ها منفی هستند).

روند تغییرات عمق کانال صوتی تقریباً در همه مناطق از ماه ژوئن تا فوریه سال آینده افزایشی است و تنها در ماه فوریه و در منطقه ۴ کانال سطحی شکل نمی‌گیرد. از آنجا که تعداد داده‌های در دسترس این ماه و منطقه از متوسط داده‌برداری‌ها کمتر نیست، تحلیل چرایی عدم تشکیل کانال در جای خود قابل طرح و از بحث این پژوهش خارج است. ضمناً مقایسه ماهانه عمق کانال سطحی این نتیجه را ارائه کرد که در مناطق ۲، ۱ و ۳ که به خطوط ساحلی نزدیک‌ترند، کانال سطحی دارای عمق بیشتری است.

یکی از سؤالات اولیه این تحقیق مقایسه اثرپذیری نیم‌رخ‌های سرعت صوت دریای عمان از طول و عرض جغرافیایی بود. نتایج حاصله پاسخ روشنی به این سؤال ارائه می‌کند و نشان می‌دهد که فارغ از اعماق نزدیک به سطح و به‌غیر از ماه اکتبر، نیم‌رخ‌های منطقه ۱ به ۳ و منطقه ۲ به ۴ و ۵ شبیه است؛ بنابراین نیم‌رخ‌ها بیشتر از تغییرات طول جغرافیایی تأثیر می‌پذیرند. ضمناً مشاهده شد که نتایج ارائه‌شده این پژوهش با نتایج حاصل از مطالعات گذشته ساختار لایه‌ای خلیج فارس به خلیج عمان و تأثیر آن بر انتشار صوت با چشمه‌های آکوستیکی نزدیک جریان نفوذی در فصل بهار [۲۲] هم‌خوانی دارد و بیانگر تأثیر جریان‌های آب گرم و شور

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران. ۱۴۰۱؛ ۱۰(۲): ۲۱-۳۴.

[۵] مهدی زاده مهدی محمد، راهبانی مریم، مهربانی دستنایی ایمان، سام‌دلیری حامد. تحلیل کانال سطحی شمال دریای عمان و اثر آن بر سونارهای سطحی و زیرسطحی. فصلنامه علوم و فناوری دریا. ۱۳۹۲؛ ۶۸(۱).

[۶] حسینی سیدحسین اله، اکبری‌نسب محمد، خلیل‌آبادی محمدرضا. شبیه‌سازی عددی اثر امواج درونی ناشی از جزر و مد روی انتشار صوت در دریای عمان. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۷. ۴۴(۱): ۲۱۵-۲۲۵.

[۷] سهیلی‌فر محمدرضا، خویشه محمد. سونار. نوشهر: انتشارات دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)؛ ۱۳۹۸.

[۸] پی‌هاجر ریچارد. صوت‌شناسی زیرآب. ترجمه حمید معیری. نوشهر: انتشارات دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)؛ ۱۳۹۸.

[9] Huma Ghafoor, Young Tae Noh. An Overview of Next-Generation Underwater Target Detection and Tracking: An Integrated Underwater Architecture. Islamabad, Pakistan: National University of Sciences and Technology; 2019 Jul.

[۱۰] مهربانی دستنایی ایمان. مقدمه‌ای بر اقیانوس‌شناسی فیزیکی در دریانوردی. نوشهر: انتشارات دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)؛ ۱۴۰۱. ص. ۵۳-۸۹.

[۱۱] عینعلی عباس، اکبری‌نسب محمد، چگینی وحید، عزیزپور جعفر. تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدروفیزیکی خلیج چابهار (۹۱-۱۳۹۰). فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون. ۱۴۰۱؛ ۹(۴): ۱۱۳-۱۲۳.

[۱۲] مهربانی دستنایی ایمان، نهاوندیان سمیه. بررسی اثرپذیری کانال صوتی سطحی شمال اقیانوس هند از شار گرمایی محسوس در زمان وقوع مونسون تابستانی. دوفصلنامه هیدروفیزیک. ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۵۱-۶۶.

[13] Wu S, Li Z, Qin J, Wang M, Li W. The effects of sound speed profile to the convergence zone in deep water. Journal of Marine Science and Engineering. 2022 Mar 15;10(3):424.

خروجی خلیج فارس بر نیم‌رخ سرعت صوت در این مناطق است و در اعماق بیشتر آب‌های نزدیک به تنگه هرمز (به جز ماه‌های مارس و جولای)، سرعت صوت بر اثر افزایش دما و شوری آب‌های وارده از خلیج فارس افزایش می‌یابد.

در این پژوهش نشان داده شد که بیشینه دامنه تغییرات سرعت صوت در سطح در نزدیکی تنگه هرمز و کمینه آن در حوالی راس‌الحد رخ می‌دهد. مطابق انتظار، درخصوص اعماق بیش‌تر (۱۵۰ الی ۳۰۰ متری) نیز مشاهده شد که نیم‌رخ‌های بخش شرقی دریای عمان در اعماق که تحت تأثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس قرار دارند، به یکدیگر شبیه و بخش غربی دریای عمان نیز با دور شدن از این جریان‌های خروجی، مشابه هم هستند. در اعماق بیشتر به‌ویژه در مناطق ۲، ۴ و ۵ تفاوت چشمگیری در سرعت صوت در ماه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از ریاست و اعضای هیئت‌علمی دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر و مسئولان، هیئت تحریریه و داوران مجله هیدروفیزیک که باعث ارتقای سطح این مقاله علمی شدند، مراتب سپاسگزاری خود را اعلام نمایند.

مراجع

[1] Rongkun JIANG, Shan CAO, Chengbo XUE, Lixing TANG. Modeling and Analyzing of Underwater Acoustic Channels with Curvilinear Boundaries in Shallow Ocean. China: Beijing Institute of Technology; 2017.

[2] Sana Gul, Haider Zaidi Sajjad. Underwater Acoustic Channel Modeling using Bellhop Ray Tracing Method. Islamabad, Pakistan: Department Electronics and Power Engineering; 2017Jan.

[۳] سام‌دلیری حامد. مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در دریای عمان با استفاده از روش تئوری پرتو [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. بندرعباس: دانشگاه هرمزگان؛ ۱۳۹۱.

[۴] خلیل‌آبادی محمدرضا، شاه‌میرزایی حسین، دانشمهر سعید. الگوسازی امواج صوتی زیرآب در خلیج عمان.

[23] Argo. Euro Argo. Dataselction. [Internet]. Available from: <https://dataselction.euro-argo.eu/>

پی‌نوشت

1. Underwater sound channels
2. Multipath propagation
3. Doppler shifts
4. Snell's Law
5. Underwater Cognitive Acoustic Network
6. Software-Defined Underwater Network
7. Network Function Virtualization
8. Internet Of Underwater Things
9. Standard Sound Velocity Distribution
10. Standard Sound Velocity Distribution
11. Hydroacoustic types
12. Underwater Cognitive Acoustic Network
13. Software-Defined Underwater Network

[۱۴] نهاوندیان سمیه، مهربانی ایمان. تغییرات سرعت صوت آب در جنوب شرق دریای خزر بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون. ۱۴۰۲؛ ۱۰(۱): ۹۱-۱۰۰.

[۱۵] الهیاری بیک، محمدی فیروز، عظام، علی‌اکبری، سهیلی‌فر. بررسی نحوه انتشار امواج صوتی در لایه سطحی از تنگه هرمز توسط معادلات سهموی و مدل RAMGEO. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون. ۱۴۰۰؛ ۸(۳): ۱۰۱-۱۱۸.

[۱۶] محسنی آراسته افشین، ناظمیه نرگس، سهیلی‌فر محمدرضا. مدل عددی دوبعدی انتشار امواج صوتی در آب‌های تنگه هرمز به روش تفاضل محدود. مجله پژوهش علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۷؛ ۱۳(۲): ۳۹-۵۱.

[17] Argo Data Management Handbook, 2023 Dec; <http://www.argodatamgt.org/Documentation>

[۱۸] حسن‌زاده افشین، اکبری نسب محمد، علی‌اکبری بیدختی عباسعلی. مدل‌سازی عملکرد تجهیزات صوتی در دریای خزر در فصل بهار. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون. ۱۳۹۶؛ ۴(۲): ۶۴-۷۱.

[19] Tiago C A. Oliveira, Ying-Tsong Lin, Michael B. Porter. Underwater Sound Propagation Modeling in a Complex Shallow Water Environment. 2021 Oct; 8:751327.

[20] Mackenzie, Kenneth V. Discussion of sea water sound-speed determinations. The Journal of the Acoustical Society of America 70, no. 3 (1981): 801-806.

[21] Munk, W, Worcester, P and Wunsch, C. 1995 Ocean Acoustic Tomography, 432. Cambridge (UK): Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511666926>

[۲۲] اکبری‌نسب محمد، صدری نسب مسعود، علی‌اکبری بیدختی عباسعلی. چگینی وحید. مطالعه ساختار لایه‌ای خلیج فارس به خلیج عمان و تأثیر آن بر روی انتشار صوت با چشمه‌های آکوستیکی نزدیک جریان نفوذی در فصل بهار. فصلنامه علمی و فنون دریایی. ۱۳۹۲؛ ۱۲(۴): ۱۱۰-۱۲۰.