

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.5.9

درصد همانندی: ۷٪

## مطالعه نوسانات روزانه تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان با استفاده از داده‌های ARGO

ایمان مهرابی دستنایی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا سبحانی<sup>۲</sup>

mehraby.phd@hormozgan.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، نوشهر، ایران.

sobhani278@gmail.com

<sup>۲</sup> مرکز آموزش تخصص‌های دریایی باقرالعلوم (ع) رشت، رشت، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

### چکیده

تیپ‌های هیدروآکوستیکی، نیم‌رخ‌های غالب سرعت صوت در ستون آب را نشان می‌دهند. این تیپ‌ها بسته به تعداد لایه‌ها و کانال‌های صوتی با یکدیگر متفاوت و در مطالعه انتشار امواج صوتی در دریا از اهمیت بالایی برخوردارند. نیم‌رخ‌های سرعت صوت بیشترین تاثیرپذیری را از تغییرات دمایی دارند. این پژوهش در نظر دارد تاثیر ساعات سپری شده از روز به عنوان یک عامل تعیین کننده بر نیم‌رخ‌های سرعت صوت را در سه بازه زمانی و در مناطق مختلف دریای عمان بررسی نماید. در این پژوهش از داده‌های سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ برنامه بین‌المللی جمع‌آوری اطلاعات ARGO استفاده شده است. در این پژوهش جهت رسم نیم‌رخ‌های سرعت صوت، میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در هر منطقه، میانگین ماهانه در هر سه بازه زمانی و نشان دادن فراوانی داده‌ها از زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد کمترین تراکم داده در تمامی مناطق مربوط به بازه صبح و بیشترین، در بازه غروب تا طلوع می‌باشد. مقایسه میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در پنج منطقه ثابت می‌کند اثرپذیری نیم‌رخ‌های سرعت صوت از تغییرات طول جغرافیایی در صبح بیشتر از بعد از ظهر و غروب تا طلوع می‌باشد. بیشترین تعداد تشکیل کانال سطحی در بازه صبح رخ داده است که نشان می‌دهد تیپ‌های هیدروآکوستیکی شکل گرفته در این بازه دارای عدد مثبت باشند. از ماه مارس تا ماه می، کانال سطحی در هیچ یک از بازه‌های زمانی تشکیل نشده است و به نظر می‌رسد عدم تشکیل این کانال در بازه غروب تا طلوع، به دلیل باقی ماندن تاثیرات ناشی از افزایش دمای سطحی در بازه بعد از ظهر باشد.

**واژه‌های کلیدی:** امواج صوتی؛ تیپ‌های هیدروآکوستیکی؛ نوسانات روزانه؛ کانال صوتی سطحی؛ دریای عمان.

## ۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای صوت در دریا، سرعت صوت است که نحوه تغییر آن، سایر پدیده‌های صوتی در دریا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت صوت در لایه‌های بالایی دریا، وابستگی شدید به دما دارد [۱]. نمودار سرعت صوت از چند لایه که ویژگی‌های متفاوتی دارند، تشکیل شده است. در زیر سطح آب، لایه سطحی قرار دارد. در این لایه، سرعت صوت متأثر از تغییرات شبانه روزی دما، وضعیت جوی، پارامترهای سطحی و عملکرد باد است [۲]. نیم‌رخ سرعت صوت را می‌توان به عنوان تابع عمق توصیف کرد. خطی‌سازی نیم‌رخ سرعت صوت برای به دست آوردن فاصله افقی پرتو صوت به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۳-۲۱]. روش متداول برای بازسازی میدانی نیم‌رخ سرعت صوت با داده‌های سطح دریا، بازسازی میدانی دمای زیرسطحی است. نیم‌رخ سرعت صوت عامل کلیدی موثر بر آکوستیک زیر آب است و به دست آوردن آن در زمان واقعی بسیار مهم است [۴-۱۹]. شکل کلی این نیم‌رخ‌ها را می‌توان با در نظر گرفتن تغییرات دما در ستون آب درک کرد. در اعماق زیاد چگالی حداکثر مقدار خود را به دلیل فشار هیدرواستاتیکی بالا دارد و از آنجایی که دمای آب در این اعماق حدود ۴ درجه سانتیگراد است، آب در متراکم‌ترین حالت است. از طرف دیگر، در سطح، شار ناشی از تابش خورشید و فرایندهای جوی معمولاً آب را بسیار گرم‌تر می‌کند. بنابراین روند کلی کاهش دمای آب با عمق است. با این حال نیم‌رخ سرعت صوت به سادگی نیم‌رخ دما را ردیابی نمی‌کند [۵-۲۰]. به همین منظور ثبت تغییرات پارامترهای موثر بر سرعت صوت در محدوده مورد مطالعه و یا دسترسی به داده‌های جمع‌آوری شده از مراکز داده جهانی یک نیاز ضروری در محاسبات سرعت صوت می‌باشد.

Argo یک آرایه جهانی از ۳۰۰۰ شناور پروفیل با رانش آزاد است که دما و شوری عمق ۲۰۰۰ متر بالای اقیانوس را اندازه‌گیری می‌کند. داده‌ها و ابرداده‌های شناورهای آرگو از طریق مراکز جمع‌آوری داده‌های جهانی<sup>۱</sup>، امکان نظارت مداوم بر دما، شوری و سرعت صوت در بالای اقیانوس را

فراهم می‌کند و همه داده‌ها ظرف چند ساعت پس از جمع‌آوری ارسال شده و در دسترس عموم قرار می‌گیرند. این آرایه ۱۰۰۰۰۰ نیم‌رخ دما، شوری و چگالی در سال را ارائه می‌کند که در اقیانوس‌های جهانی به طور متوسط با فواصل ۳ درجه توزیع می‌شود. برخی از شناورها پارامترهای زیستی اضافی مانند اکسیژن یا کلروفیل را ارائه می‌دهند. تمام داده‌های جمع‌آوری شده توسط شناورهای آرگو در زمان واقعی از طریق مراکز جمع‌آوری داده‌های جهانی در برست (فرانسه) و مونتری (کالیفرنیا) پس از کنترل کیفیت خودکار ارائه می‌گردند [۶]. تیپ‌های هیدروآکوستیکی یا توزیع عمودی سرعت صوت نسبت به عمق را می‌توان به ۷ نوع تقسیم‌بندی کرد. عمقی که در آن سرعت صوت بیشینه باشد را لایه صوتی و در عمقی که سرعت کمینه است کانال صوتی نامیده می‌شود [۷]. برای اولین بار الگویی جدید جهت نام‌گذاری تیپ‌های هیدروآکوستیکی در [۸] ارائه گردید.

سام‌دلیری در پژوهشی به مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در دریای عمان با استفاده از روش تئوری پرتو پرداخته است. در این پایان‌نامه تحلیل انتشار امواج صوتی زیر آب در دریای عمان با استفاده از تئوری پرتو با ارائه یک مدل رایانه‌ای مدل‌سازی می‌شود و از مفهوم جبهه موج پیشرونده برای بررسی پروفایل سرعت صوت در دریای عمان استفاده می‌شود [۹]. خلیل‌آبادی و همکاران در پژوهشی در دریای عمان نشان دادند که در فصل گرم در این محدوده به طور تقریبی بین عمق‌های ۱۵۰ الی ۲۵۰ متری وارونگی دما رخ می‌دهد. بین عمق‌های ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر تقریباً یک لایه هم‌دما با اختلاف دمای کمتر از ۰/۵ درجه سانتیگراد تشکیل می‌دهد. در فصل سرد این لایه در عمق‌های ۲۰۰ تا ۳۰۰ متری تشکیل شده است [۱۰]. چنگ‌چن و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی با عنوان بازسازی نیم‌رخ‌های سرعت صوت در سراسر جهان با استفاده از داده‌های سطح دریا به بازسازی نیم‌رخ‌های سرعت صوت با روش رگرسیون تابع قائم تجربی در مقیاس جهانی پرداخته است. تجزیه و تحلیل نشان داد که ناهنجاری‌های نیم‌رخ سرعت صوت از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. فرضی وجود داشت که این تفاوت به دلیل فعالیت دینامیکی ادی است و نقشه انرژی جنبشی ادی تصویر

شده است. نتایج نشان داد که این دو متغیر با یکدیگر همبستگی دارند. هر چه انرژی جنبشی ادی بزرگتر باشد، ناهنجاری‌های نیم‌رخ سرعت صوت بزرگتر است. با این حال، در مقایسه با مقدار مطلق ناهنجاری‌های نیم‌رخ سرعت صوت، نسبت بهبود تخمین خطا در بیشتر مکان‌ها نسبتاً ثابت باقی ماند [۴].

حسن‌زاده و همکاران در مطالعه‌ای با عنوان مدل‌سازی عملکرد تجهیزات صوتی در دریای خزر در فصل بهار به مقایسه نیم‌رخ‌های قائم سرعت صوت، دما و شوری برای دو حوزه شمالی و جنوبی دریای خزر در فصل بهار پرداخته‌اند [۱۱]. محسنی آراسته و همکاران در پژوهشی مدل عددی دو بعدی انتشار امواج صوتی در آب‌های تنگه هرمز به روش تفاضل محدود<sup>۲</sup> را شبیه‌سازی کرده که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد در اثر تغییر عمودی سرعت صوت، امواج منتشره به دو شاخه تقسیم می‌شوند و در نهایت حرکت گردابی امواج صوتی را به وجود می‌آورد و مناطق با نوفه زیاد مشخص می‌شود [۱۲]. مهربانی دستنایی و همکاران در پژوهشی با عنوان مطالعه حساسیت رفتار روزانه لایه آمیخته اقیانوسی به تبخیر سطحی روی شمال دریای عربی در حین مانسون تابستانی به بررسی نوسانات روزانه دمای سطح آب بر نیم‌رخ سرعت صوت در یک بازه ۲۴ ساعته در حضور واداشت باد و موج با روش شبیه‌سازی پیچک بزرگ پرداخته‌اند [۱۳]. حسینی و همکاران [۱۴] در شبیه‌سازی عددی اثر امواج درونی ناشی از جزر و مد روی انتشار صوت، خلیل‌آبادی و همکاران [۱۵] با الگوسازی امواج صوتی زیر آب و همچنین مهدی‌زاده و همکاران [۱۶] در تحلیل کانال سطحی شمال دریای عمان و اثر آن بر سونارهای سطحی و زیرسطحی را می‌توان از جمله پژوهش‌هایی نامید که به مطالعه روند تغییرات سرعت صوت با عمق در محدوده دریای عمان پرداخته‌اند. مهربانی دستنایی و همکاران ادی بزرگ با تاثیر ترکیبی شارهای گرم و نیروی موج مونسون تابستانی بر روی لایه آمیخته اقیانوسی روزانه در دریای عرب شمالی را شبیه‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش تغییرات پارامترهای مختلف شبیه‌سازی شده در طول یک دوره ۲۴ ساعته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه

نشان می‌دهد که اثر تابش خورشیدی بر لایه آمیخته اقیانوسی قابل توجه و حتی موثرتر از تبخیر سطحی است [۱۷]. عاشوری و همکاران در پژوهشی به شبیه‌سازی اثر گرداب‌های میان‌مقیاس بر انتشار امواج صوتی در خلیج فارس و دریای عمان شمالی پرداخته‌اند. هدف این مقاله شناسایی الگوهای انتشار صوت در مناطق مختلف خلیج فارس و دریای عمان برای کمک به مهندسان در کاربردهای مختلف می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که صدا نمی‌تواند به مناطق با چگالی بالا در مرکز این گرداب‌ها نفوذ کند. در عوض، صدا به سمت مناطقی با کمترین سرعت هدایت می‌شود [۱۸].

با وجود تحقیقات گسترده در مورد بررسی نیم‌رخ‌های سرعت صوت و ویژگی‌های آن در مقوله چگونگی انتشار امواج صوتی در محیط پیچیده آب‌های عمیق، تغییرات سرعت صوت ناشی از نوسانات روزانه و تاثیر ساعات سپری شده روز بر نیم‌رخ‌های سرعت صوت و تپ‌های هیدروآکوستیکی در دریای عمان تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است و در این پژوهش برای اولین بار به این مقوله پرداخته می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

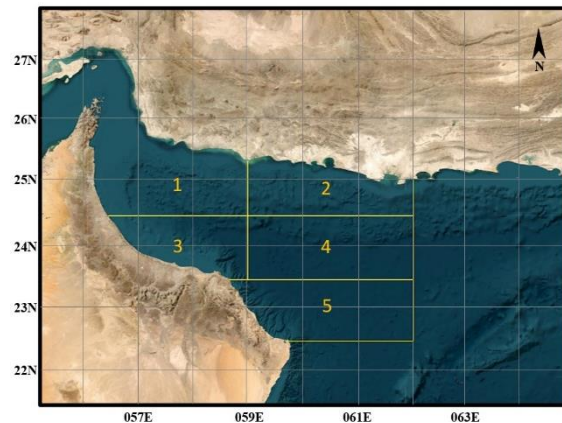
به جهت امکان‌سازی مقایسه نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، همانند [۸] از داده‌های اندازه‌گیری شده پایگاه داده برنامه بین‌المللی جمع‌آوری اطلاعات ARGO از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۳ در محدوده مورد مطالعه دریای عمان استفاده شده است. در این پژوهش دریای عمان به پنج منطقه تفکیک گردید. محدوده مورد مطالعه هر یک از مناطق پنجگانه در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به گستردگی دریای عمان و اثرپذیری نیم‌رخ‌های سرعت صوت از تغییرات دمایی و همچنین پدیده‌های جوی و جریان‌های منطقه‌ای، این مناطق به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دارای شرایط و ویژگی‌های متفاوت از یکدیگر باشند. هر منطقه دارای ویژگی خاص از جمله میزان اثرپذیری از مانسون و بادهای سطحی در فصول مختلف، نزدیکی و دوری از سواحل، نزدیکی به تنگه هرمز و جریان‌های خروجی آب گرم و شور خلیج فارس است. لایه

شدند. به جهت درک بهتر تغییرات تیپ‌های رسم شده، با استفاده از توابع متلب در سه روش میانگین، میانه و مد، از همه داده‌ها و تیپ‌های غالب میانگین‌گیری صورت گرفت. این کار برای هر سه بازه زمانی نیز انجام و نمودار خروجی آنها در کنار یکدیگر رسم گردید. همچنین فراوانی داده‌ها و نسبت تراکم داده مناطق در بازه‌های زمانی تعیین شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به همین منظور داده‌ها در سه بازه زمانی صبح، بعد از ظهر و بین غروب تا طلوع آفتاب<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش، بازه صبح از زمان طلوع آفتاب تا هنگام ظهر، پس از آن بازه بعد از ظهر تا زمان غروب خورشید و همچنین بازه غروب تا طلوع، در غیاب خورشید در نظر گرفته شده است. به دلیل وابستگی شدید سرعت صوت در لایه‌های بالایی به تغییرات دما، نیم‌رخ‌های ترسیمی تا عمق ۴۰۰ متری از سطح دریا مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

### ۳. یافته‌ها

در این بخش، یافته‌های حاصل از میزان اثرپذیری نیم‌رخ‌های سرعت صوت و تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان با توجه به ساعات سپری شده از روز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به متغیر بودن مساحت و تعداد داده‌های موجود در هر یک از مناطق پنجگانه تعریف شده، تراکم داده‌های موجود (تعداد داده بر مساحت) با یکدیگر مقایسه و در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، کمترین تعداد داده‌برداری مربوط به منطقه ۲ در بازه صبح با ۷۸ سیکل و بیشترین داده‌برداری مربوط به غروب تا طلوع منطقه ۴ با ۶۹۴ سیکل می‌باشد. با مقایسه تراکم داده‌ها در هر منطقه مشاهده شد، منطقه ۲ در صبح با ۰/۰۱۱ کمترین و منطقه ۳ در بازه غروب تا طلوع، با نسبت ۰/۱۰۰ بیشترین تراکم داده را دارند.

آمیخته که در سطح دریاها یا اقیانوس‌ها قرار دارد، به دلیل وجود تلاطم و آشفتگی ناشی از برهم‌کنش هوا-دریا دارای ویژگی‌های فیزیکی تقریباً یکنواخت است. به علت تماس مستقیم لایه آمیخته با جو، خصوصیات این لایه تحت تأثیر مستقیم تغییرات روزانه، فصلی و سالانه جوی است و از طرفی شار گرمایی جو از طریق این لایه به قسمت عمیق اقیانوس منتقل می‌شود [۲۱].

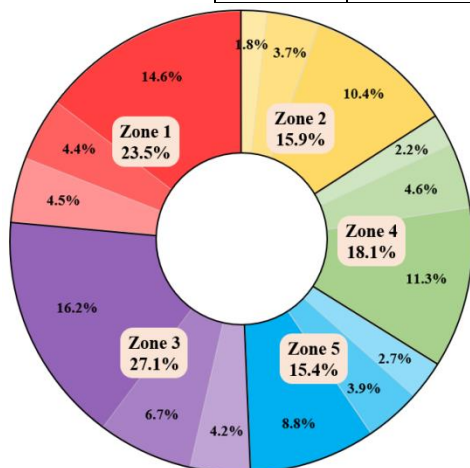


شکل ۱. محدوده مناطق پنجگانه مورد مطالعه

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر ساعات سپری شده روز بر نیم‌رخ‌های سرعت صوت و تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان است. بنابراین در این پژوهش علاوه بر دسته‌بندی داده‌های اندازه‌گیری شده بر اساس موقعیت جغرافیایی و در بازه‌های زمانی ماهانه، این داده‌ها در بازه‌های زمانی روزانه نیز دسته‌بندی شدند. به این ترتیب علاوه بر تحلیل و بررسی تغییرات مکانی و ماهانه نیم‌رخ‌های سرعت صوت و تیپ‌های هیدروآکوستیکی در محدوده مورد مطالعه، امکان بررسی تأثیر ساعات مختلف شبانه‌روز نیز فراهم می‌گردد. در این پژوهش جهت رسم نیم‌رخ‌های سرعت صوت، میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در هر منطقه، میانگین ماهانه در هر سه بازه زمانی، نشان دادن فراوانی داده‌ها و تفکیک آنها از زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است. همچنین در هر بازه زمانی نیم‌رخ‌های سرعت صوت تا عمق ۴۰۰ متری به صورت جداگانه رسم

جدول ۱. مساحت مناطق، تعداد و تراکم داده در سه بازه زمانی و پنج منطقه این پژوهش

منطقه مورد مطالعه	بازه زمانی	مساحت منطقه (مایل مربع)	تعداد داده موجود	تراکم داده
منطقه ۱	صبح	۷۳۳۶	۲۰۵	۰/۰۲۸
	بعد از ظهر		۲۰۰	۰/۰۲۷
	غروب تا طلوع		۶۶۵	۰/۰۹۱
منطقه ۲	صبح	۷۰۴۰	۷۸	۰/۰۱۱
	بعد از ظهر		۱۶۰	۰/۰۲۳
	غروب تا طلوع		۴۵۴	۰/۰۶۴
منطقه ۳	صبح	۴۸۷۵	۱۲۸	۰/۰۲۶
	بعد از ظهر		۲۰۱	۰/۰۴۱
	غروب تا طلوع		۴۸۹	۰/۱۰۰
منطقه ۴	صبح	۹۹۰۰	۱۳۲	۰/۰۱۳
	بعد از ظهر		۲۷۹	۰/۰۲۸
	غروب تا طلوع		۶۹۴	۰/۰۷۰
منطقه ۵	صبح	۹۳۲۹	۱۵۴	۰/۰۱۷
	بعد از ظهر		۲۲۵	۰/۰۲۴
	غروب تا طلوع		۵۱۱	۰/۰۵۵



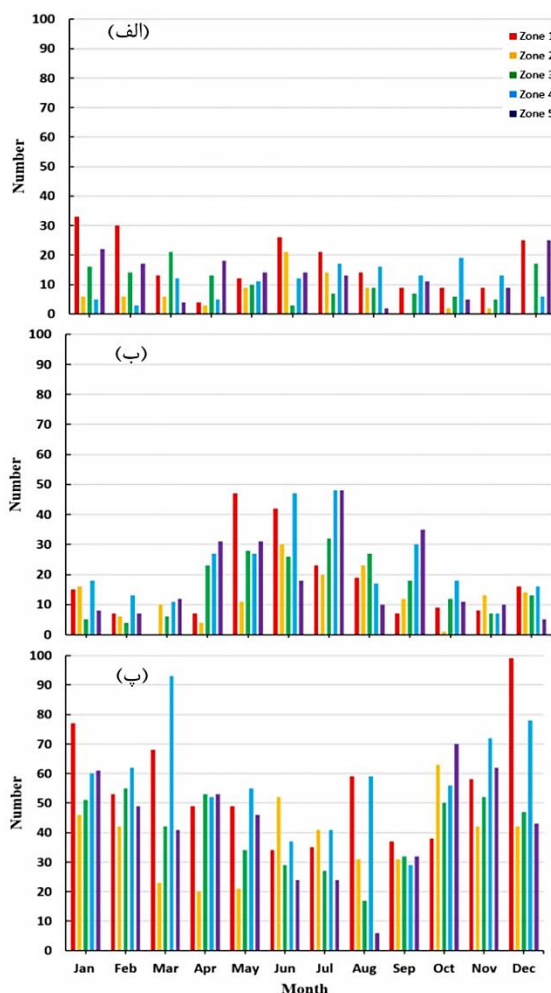
شکل ۲. مقایسه تراکم داده در سه بازه زمانی و پنج منطقه این پژوهش

در شکل ۳ نمودار فراوانی داده‌های در دسترس برای مناطق پنجگانه پژوهش در هر یک از ماه‌های میلادی و در هر یک از بازه‌های زمانی تعیین شده آورده شده است. مطابق این شکل، در بعد از ظهر ماه مارس در منطقه ۱ و همچنین در صبح ماه‌های سپتامبر و دسامبر در منطقه ۲، داده‌ای ثبت نشده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد در صبح تعداد داده کمتری نسبت به بازه‌های زمانی بعد از ظهر و غروب تا طلوع اندازه‌گیری شده است. در صبح‌ها، منطقه ۱ در زمستان و

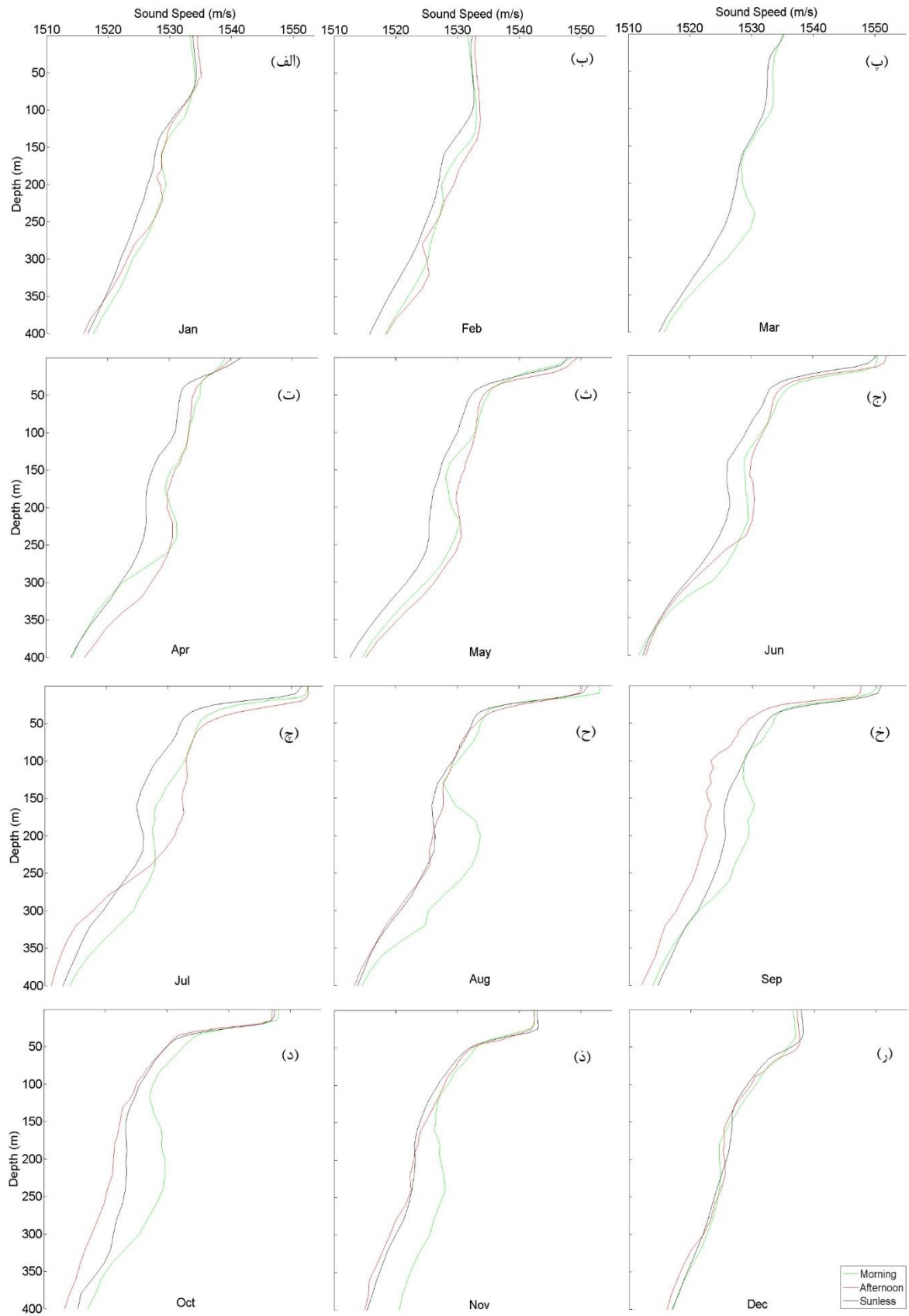
در شکل ۲ تراکم داده مناطق در سه بازه زمانی تعیین شده با یکدیگر مقایسه شده است. در هر یک از قطعات، رنگ‌ها به ترتیب از کم‌رنگ تا پررنگ نشان‌دهنده داده‌های مربوط به صبح، بعد از ظهر و غروب تا طلوع می‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، کمترین میزان توزیع یکنواخت داده‌ها در منطقه ۳ رخ داده است؛ زیرا تراکم داده غروب تا طلوع این منطقه تقریباً ۴ برابر صبح می‌باشد. در نقطه مقابل توزیع داده در منطقه ۵ تا حدودی یکنواخت‌تر و بیشینه تراکم تقریباً ۳ برابر کمینه است. ضمناً مشاهده می‌شود مناطق شرقی‌تر دریای عمان، دارای تراکم داده بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشند.

در ادامه، میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت منطقه ۱ در سه بازه زمانی صبح، بعد از ظهر و غروب تا طلوع در ماه‌های مختلف میلادی مطالعه شد. این نیم‌رخ‌ها برای کلیه مناطق پنج‌گانه این پژوهش رسم، اما به جهت اختصار، تنها نیم‌رخ‌های منطقه ۱ در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی انتظار می‌رود به دلیل افزایش شار گرمایی ناشی از تابش خورشید، سرعت صوت در لایه سطحی با طلوع آفتاب افزایش یابد. برای نیم‌رخ‌های بعد از ظهر نیز انتظار داریم روند افزایش سرعت صوت ادامه پیدا کند. اما مطابق شکل ۵، سرعت صوت صبح در نزدیک سطح در ماه‌های آگوست و اکتبر، نسبت به بعد از ظهر بیشتر می‌باشد. همچنین نیم‌رخ سرعت صوت غروب تا طلوع در نزدیک سطح، به غیر از ماه‌های آوریل، سپتامبر، نوامبر و دسامبر، سرعت بیشتری را نسبت به سایر زمان‌ها نشان می‌دهد و مطابق انتظار رفتار نمی‌کند. بنابراین مشاهده می‌شود رفتار سرعت صوت در ماه‌های مختلف یکدست نیست. تاثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس که باعث ایجاد وارونگی در اعماق ۱۵۰ متر تا ۳۰۰ متری در دریای عمان می‌شود را می‌توان به ویژه در نیم‌رخ‌های صبح ماه‌های مارس، آوریل، آگوست و اکتبر در منطقه ۱ و در نیم‌رخ صبح ماه‌های آوریل، جولای و به ویژه در آگوست با تغییرات بیشتر در منطقه ۳ مشاهده نمود و با نتایج حاصل از مطالعات گذشته [۱۰-۲۲] هم‌خوانی دارد. همانند پژوهش قبلی در خصوص تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان [۸] نیم‌رخ‌های مناطق ۲، ۴ و ۵ که در بخش شرقی تر دریای عمان قرار دارند، اثرپذیری کمتری با دور شدن از این جریان‌ها دارند. همین امر سبب می‌شود در این مناطق، نیم‌رخ‌های سرعت صوت در هر سه بازه زمانی شکل یکنواخت‌تر و رفتار منظم‌تری داشته باشند.

تابستان و منطقه ۴ در پائیز و بهار تعداد داده بیشتری نسبت به سایر مناطق دارند. در منطقه ۲ به جز فصل تابستان، ضعف داده نسبت به سایر مناطق مشهودتر است (شکل ۳-الف). در بعد از ظهرها، در بهار و تابستان بیشترین تعداد داده مشاهده می‌شود؛ منطقه ۴ در ژوئن و جولای بیشترین و منطقه ۲ در ماه اکتبر کمترین داده را دارند (شکل ۳-ب). در بازه‌های غروب تا طلوع، بیشترین داده در دسامبر منطقه ۱ و پس از آن در ماه مارس منطقه ۴ وجود دارد. همچنین برای ماه آگوست در منطقه ۵ کمترین داده ثبت شده است (شکل ۳-پ).



شکل ۳. نمودار مقایسه ماهانه فراوانی داده‌های در دسترس در مناطق پنج‌گانه پژوهش در بازه‌های زمانی تعیین شده (رنگ‌بندی مناطق پنج‌گانه همانند شکل ۲ است) (الف) بازه زمانی صبح (ب) بازه زمانی بعد از ظهر (پ) بازه زمانی غروب تا طلوع



شکل ۴. میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت منطقه ۱ در بازه‌های زمانی صبح (خطوط سبز)، بعد از ظهر (خطوط قرمز) و غروب تا طلوع (خطوط مشکی) در هر ماه میلادی تا عمق ۴۰۰ متری

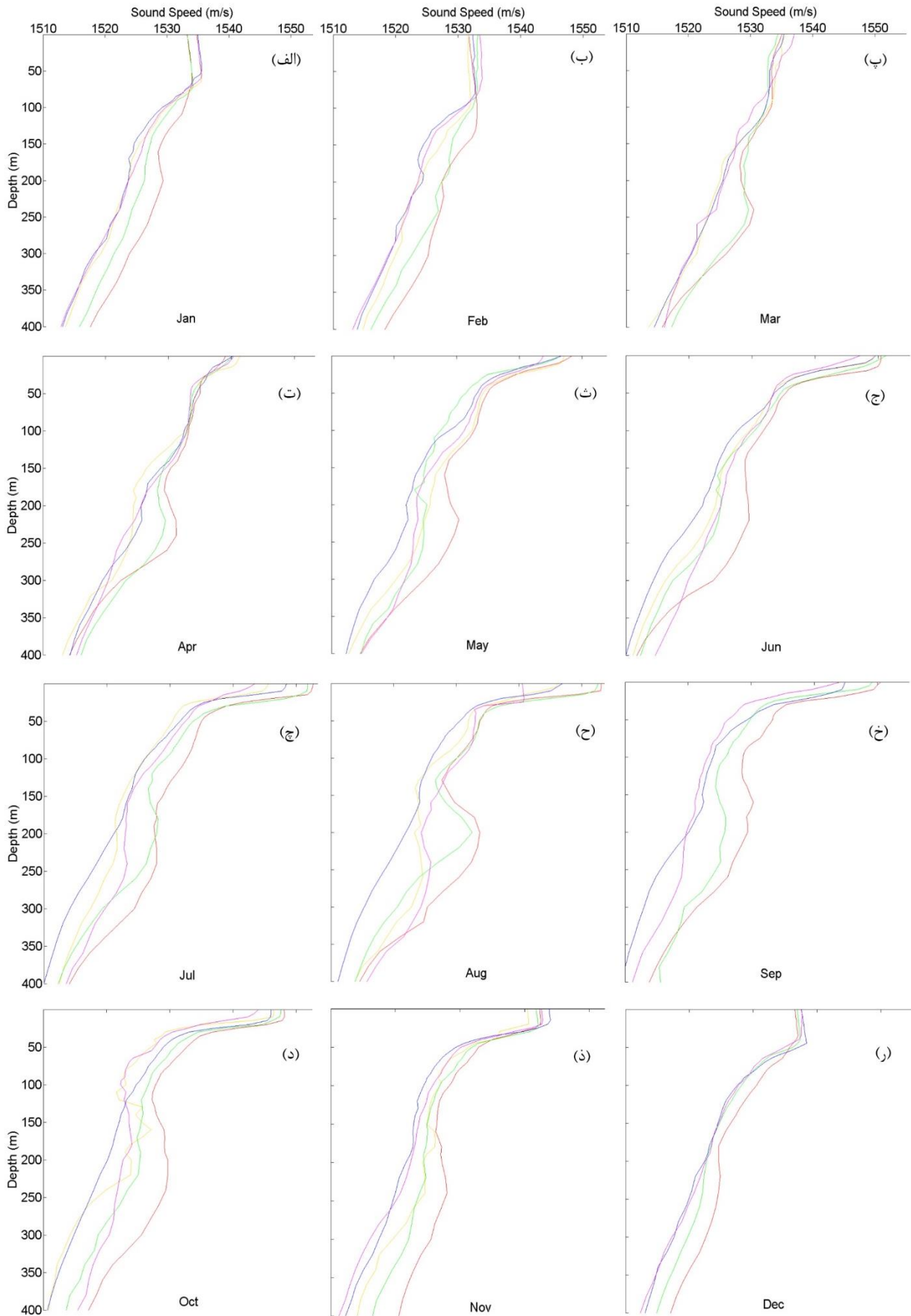
ماه‌ها سرعت صوت در منطقه ۴ از سایر مناطق کمتر و روند تغییرات آن نیز یکنواخت‌تر است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که نیم‌رخ‌های بعد از ظهر مناطق ۱ و ۳، برخلاف نیم‌رخ‌های صبح، صرفاً در ماه‌های می تا جولای مشابه یکدیگر هستند. در بخش ح این شکل (ماه آگوست) مشاهده می‌شود که نیم‌رخ منطقه ۵ مقادیر کمتری در نزدیکی سطح آب دارد (همانند نیم‌رخ‌های صبح). همانطور که در [۸] مشاهده شد، زمانی که نیم‌رخ‌های میانگین ماهانه با یکدیگر مقایسه می‌شوند، سرعت صوت در کل ستون آب در منطقه ۱ از سایر مناطق بیشتر و در منطقه ۵ کمینه است که می‌تواند به واسطه بیشتر بودن دما در ستون آب به دلیل تأثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس باشد. اما در ماه سپتامبر، نیم‌رخ بعد از ظهر منطقه ۱ در اعماق میانی کمینه و دارای نوسانات زیاد است که می‌تواند ناشی از ضعف و یا کمبود داده در این منطقه باشد. همچنین در پائین این نیم‌رخ‌ها در کلیه مناطق تقریباً مشابه یکدیگرند.

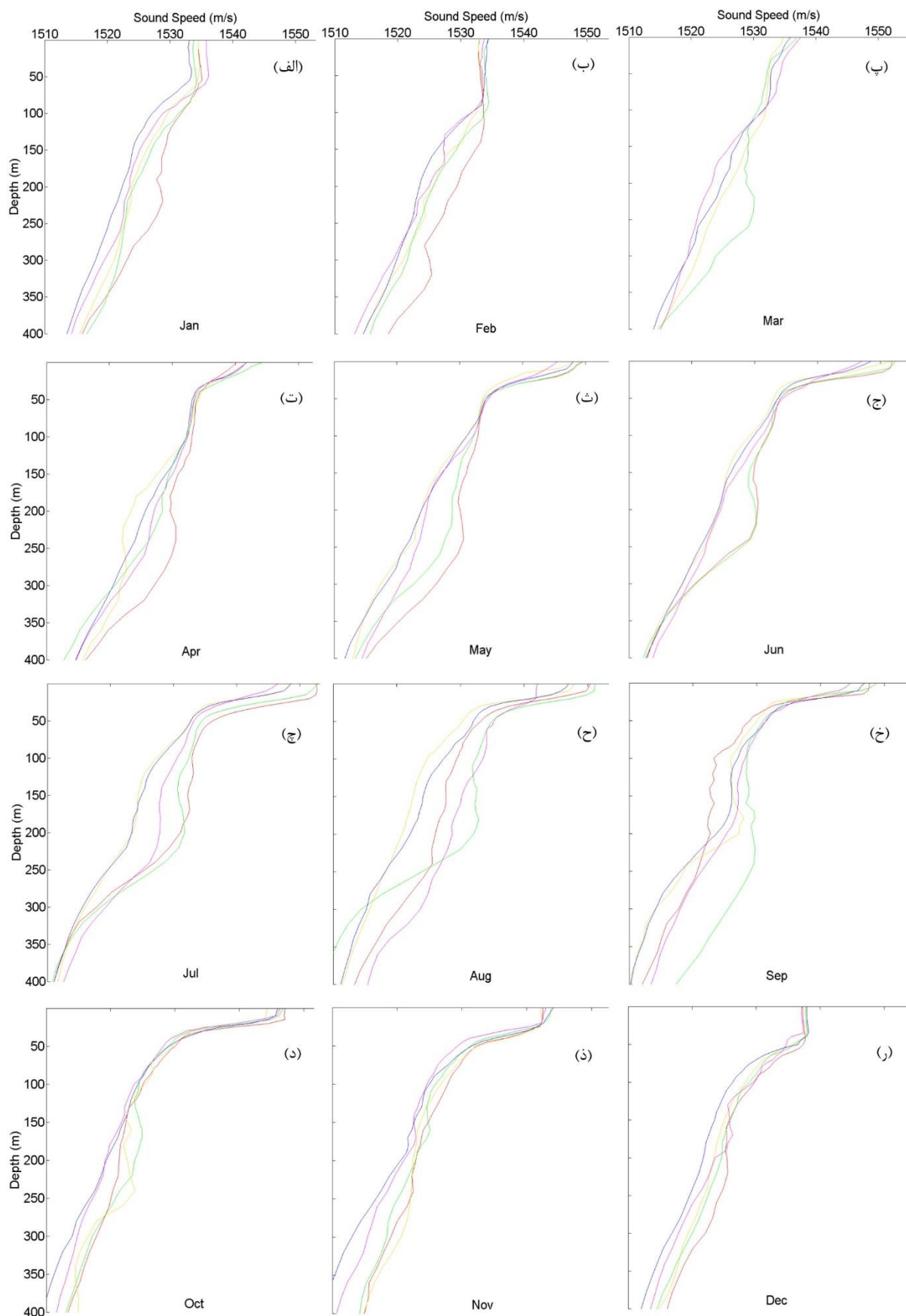
میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در غروب تا طلوع که در شکل ۷ آورده شده است نشان می‌دهد، این نیم‌رخ‌ها به غیر از ماه آگوست منطقه ۵ اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند که در این خصوص در بخش‌های مربوط به صبح و بعد از ظهر به تفصیل بحث شد.

مقایسه میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در بازه صبح پنج منطقه این پژوهش در شکل ۵ امکان‌پذیر است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که در اغلب موارد، در سطح و همچنین در اعماق زیاد، نیم‌رخ‌های مناطق ۱ و ۳ و مناطق ۲، ۴ و ۵ به یکدیگر شبیه‌اند. مطابق انتظار، در طول فصل تابستان دما در سطح آب به شدت افزایش یافته که همین امر منجر به افزایش شدید سرعت صوت در سطح و نزدیک سطح آب شده است. با این وجود و برخلاف انتظار، در ماه آگوست، منطقه ۵ در نزدیکی سطح آب رفتار متفاوتی دارد (شکل ۵-ح). در نوامبر، نیم‌رخ منطقه ۲ سرعت کمتری را در سطح نسبت به سایر مناطق نشان می‌دهد که تحلیل چرایی آن از چارچوب این مقاله خارج و در جای خود قابل طرح است (شکل ۵-ذ). در فصول سرد، مناطق ۱ و ۳ سرعت صوت کمتری در سطح دارند و نیم‌رخ‌های مناطق شرقی و جنوب شرقی مقادیر بیشتری نشان می‌دهند. از ماه می تا اکتبر این رفتار تغییر کرده به طوری که مناطق نزدیک به تنگه هرمز مقادیر سرعت صوت بیشتری دارند. می‌توان تأثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس را در مناطق ۱ و ۳ در مقایسه با سایر مناطق به ویژه در ماه آگوست (نیم‌رخ‌های قرمز و سبز رنگ شکل ۵-ح) و در اعماق ۱۵۰ تا ۳۰۰ متری به خوبی مشاهده نمود. همچنین در اعماق میانی و در اعماق زیاد، در اغلب

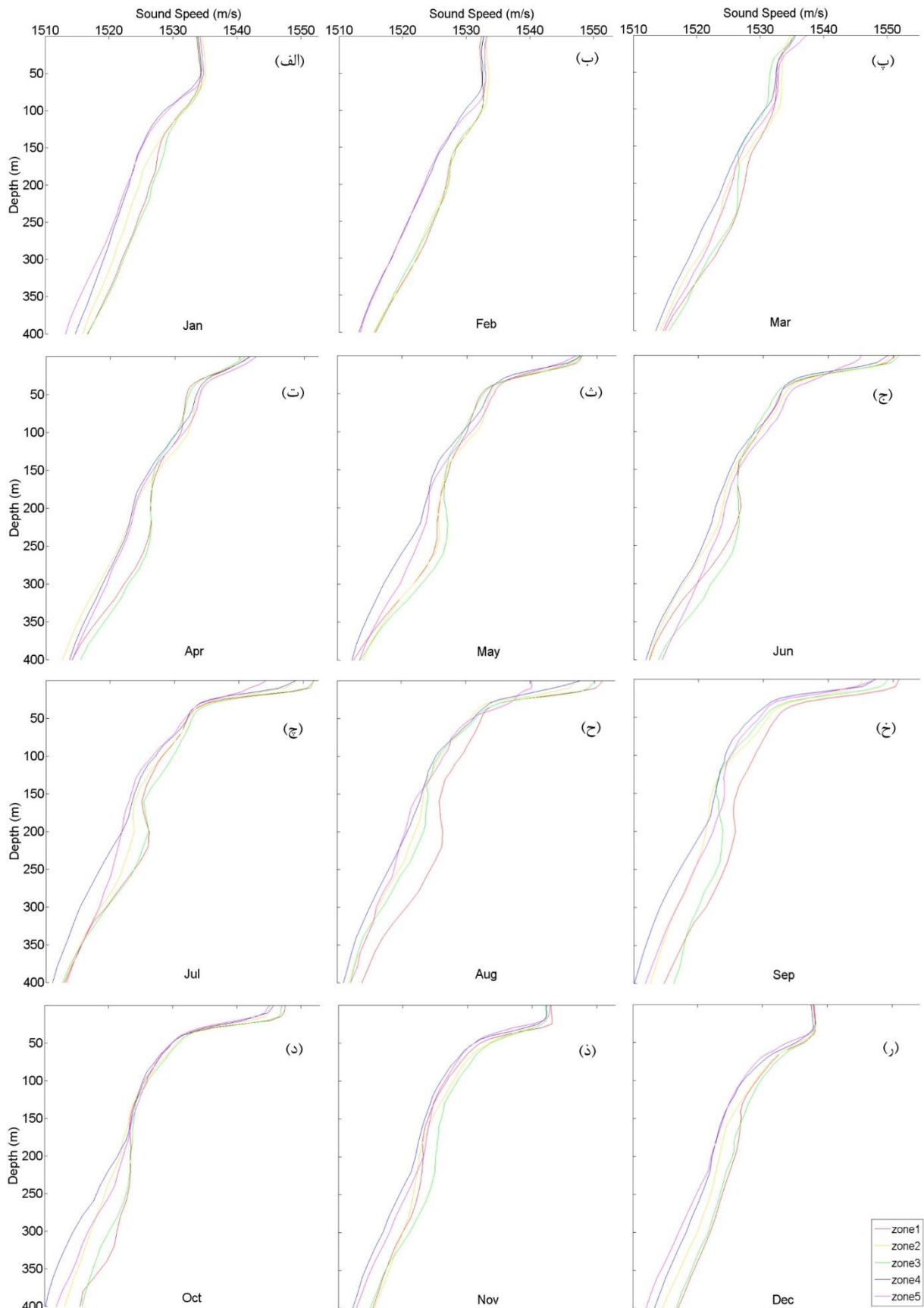




شکل ۵. میانگین ماهانه نیم‌رخ سرعت صوت مناطق پنجگانه پژوهش در بازه زمانی صبح تا عمق ۴۰۰ متری (رنگ‌بندی مناطق پنجگانه همانند شکل ۲ است)



شکل ۶. میانگین ماهانه نیم رخ سرعت صوت مناطق پنجگانه پژوهش در بازه زمانی بعد از ظهر تا عمق ۴۰۰ متری (رنگ‌بندی مناطق پنجگانه همانند شکل ۲ است)



شکل ۷. میانگین ماهانه نیم‌رخ سرعت صوت مناطق پنجگانه پژوهش در بازه زمانی غروب تا طلوع تا عمق ۴۰۰ متری (رنگ‌بندی مناطق پنجگانه همانند شکل ۲ است)

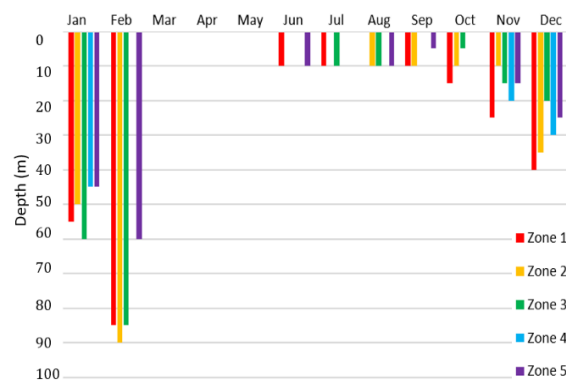
آن تا فوریه سال آینده افزایش می‌باشد. مطابق انتظار، کانال سطحی مشابه میانگین ماهانه از ماه مارس تا می در هیچ یک از بازه‌های زمانی تشکیل نشده است. علاوه بر آن در ماه سپتامبر نیز کانال سطحی در هیچ یک از سه بازه زمانی تشکیل نشده است. این کانال‌ها از ماه ژوئن تا اکتبر در اکثر مواقع تشکیل نشده و یا کانالی ضعیف در یکی از بازه‌های زمانی با عمق کم شکل گرفته است که اختلاف زیادی را در نمایش کانال سطحی با میانگین ماهانه نشان می‌دهد. با این وجود در ماه آگوست منطقه ۵ مشاهده می‌شود کانال سطحی در هر سه بازه زمانی در این منطقه تشکیل شده است (بر خلاف سایر مناطق).

ضمناً این شکل نشان می‌دهد بیشترین تعداد تشکیل کانال سطحی در بازه صبح و پس از آن در بازه غروب تا طلوع رخ داده است. در این ماه‌ها، کانال سطحی به غیر از ماه جولای منطقه ۱ که در بازه بعد از ظهر شکل گرفته، همگی در بازه زمانی صبح می‌باشند. ضمناً این نتیجه حاصل شد که در اکثر مواقع کانال سطحی در بازه صبح (۷ مرتبه) و یا به صورت مشترک با سایر بازه‌های زمانی (۳ مرتبه) بیشترین عمق را دارد. همچنین این شکل به خوبی نشان می‌دهد ماه فوریه منطقه ۲ و ماه دسامبر منطقه ۱ (هر دو در بازه بعد از ظهر) بیشترین عمق را دارند.

نمودار تغییرات عمق کانال صوتی سطحی در بازه‌های زمانی تعیین شده برای مناطق پنجگانه در شکل ۸ نمایش داده شده است. به منظور مطالعه دقیق تر اثر زمان سپری شده از روز بر عمق کانال صوتی سطحی منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ARGO، اعماق به دست آمده در این پژوهش با یکی از مطالعات گذشته مرتبط (شکل ۹ [۸]) در جدول ۲ مقایسه می‌شود. با توجه به شکل ۹ در مناطقی که کانال سطحی با عمق زیاد شکل گرفته انتظار داریم این کانال نیز در هر سه بازه زمانی با عمق مشابه تشکیل شود. نتایج نشان می‌دهد در ماه ژانویه در تمامی مناطق به غیر از منطقه ۳، در فوریه مناطق ۲ و ۳، در آگوست منطقه ۵، در نوامبر منطقه ۲ و دسامبر در تمامی مناطق، نیم‌رخ‌های تفکیک شده روزانه با میانگین ماهانه در نمایش کانال سطحی به خوبی با یکدیگر هم‌خوانی دارند. همچنین مشاهده شد در فوریه در مناطق ۱ و ۵ کانال سطحی فقط در بازه صبح تشکیل شده و به دلیل افزایش سرعت صوت در سطح آب در بازه بعد از ظهر و غروب تا طلوع این کانال تشکیل نشده است. در فوریه منطقه ۴ با وجود عدم تشکیل کانال سطحی در میانگین ماهانه، در بازه صبح کانال سطحی با عمق ۳۰ متر مشاهده می‌شود. مطابق نمودارها، کانال سطحی از ماه نوامبر در بیشتر بازه‌های زمانی در پنج منطقه شکل گرفته است و روند تغییرات عمق



شکل ۸. نمودار مقایسه ماهانه عمق کانال صوتی سطحی هر یک از مناطق پنجگانه پژوهش در بازه‌های زمانی تعیین شده



شکل ۹. نمودار عمق کانال صوتی سطحی بر اساس بازه‌های زمانی روزانه [۸]

جدول ۲. مقایسه تغییرات عمق کانال صوتی سطحی در سه بازه زمانی با اعماق بدست آمده از کانال سطحی ماهانه [۸] در پنج منطقه این پژوهش

ماه میلادی	بازه زمانی	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۴	منطقه ۵
Jan	صبح	۷۰	۶۰	۷۰	۵۰	۶۰
	بعد از ظهر	۵۵	۴۰	۰	۴۵	۵۰
	غروب تا طلوع	۵۵	۴۵	۶۰	۵۰	۵۰
	ماهانه	۵۵	۵۰	۶۰	۴۵	۴۵
Feb	صبح	۱۲۰	۹۵	۴۵	۳۰	۶۰
	بعد از ظهر	۰	۸۵	۸۵	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۶۰	۷۰	۰	۰
	ماهانه	۸۵	۹۰	۸۵	۰	۶۰
Mar	صبح	۰	۰	۰	۰	۰
	بعد از ظهر	*	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۰	۰	۰	۰	۰
Apr	صبح	۰	۰	۰	۰	۰
	بعد از ظهر	۰	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۰	۰	۰	۰	۰
May	صبح	۰	۰	۰	۰	۰
	بعد از ظهر	۰	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۰	۰	۰	۰	۰
Jun	صبح	۱۰	۰	۰	۰	۰
	بعد از ظهر	۰	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۱۰	۰	۰	۰	۱۰
Jul	صبح	۰	۰	۱۰	۰	۰
	بعد از ظهر	۱۰	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۱۰	۰	۱۰	۰	۰
Aug	صبح	۵	۰	۰	۰	۲۵
	بعد از ظهر	۰	۰	۰	۰	۲۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۱۰
	ماهانه	۰	۱۰	۱۰	۰	۱۰
Sep	صبح	۰	*	۰	۰	۰
	بعد از ظهر	۰	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۱۰	۱۰	۰	۰	۵
Oct	صبح	۱۰	۱۰	۵	۱۰	۰
	بعد از ظهر	۱۵	۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۰	۰	۰	۰	۰
	ماهانه	۱۵	۱۰	۵	۰	۰
Nov	صبح	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵	۱۵
	بعد از ظهر	۰	۲۰	۰	۰	۰
	غروب تا طلوع	۲۵	۱۰	۲۰	۱۵	۰
	ماهانه	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۱۵

منطقه ۵	منطقه ۴	منطقه ۳	منطقه ۲	منطقه ۱	بازه زمانی	ماه میلادی
۳۵	۴۵	۴۰	*	۳۵	صبح	Dec
۳۵	۳۵	۳۵	۳۰	۴۵	بعد از ظهر	
۲۵	۳۰	۲۵	۳۵	۳۵	غروب تا طلوع	
۲۵	۳۰	۲۰	۳۵	۴۰	ماهانه	

به ویژه در آگوست با تغییرات بیشتر در منطقه ۳ مشاهده نمود که با مطالعات گذشته و مرتبط با این پژوهش تطابق دارد. نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت بازه صبح در مناطق پنجگانه نشان داد که در اغلب موارد در سطح و همچنین در اعماق زیاد، نیم‌رخ‌های منطقه ۱ به ۳ و منطقه ۲ به ۴ و ۵ شبیه است. همچنین مشاهده شد در ماه آگوست، منطقه ۵ در نزدیک سطح آب رفتار متفاوت تری با سایر مناطق دارد که می‌توان آن را ناشی از تاثیر زیاد وزش باد مونسون تابستانه در صبح برای این منطقه در نظر گرفت. همچنین در اعماق میانی و در اعماق زیاد، در اغلب ماه‌ها سرعت صوت در منطقه ۴ از سایر مناطق کمتر و روند تغییرات آن نیز یکنواخت‌تر است. از دیگر نتایج این پژوهش تاثیرپذیری بیشتر نیم‌رخ‌های سرعت صوت در بازه صبح از تغییرات طول جغرافیایی است که با نتایج به دست آمده از [۸] هماهنگی دارد. نتایج نشان داد نیم‌رخ‌های بعد از ظهر مناطق ۱ و ۳، برخلاف نیم‌رخ‌های صبح، صرفاً در ماه‌های می تا جولای مشابه یکدیگر هستند. همچنین رفتار متفاوت نیم‌رخ‌های منطقه ۵ در کل ستون آب از ماه جولای تا سپتامبر نسبت به مناطق ۲ و ۴ و برای نیم‌رخ‌های منطقه ۲، از ماه اکتبر تا ژانویه سال بعد نسبت به مناطق ۴ و ۵ مشاهده شد. در بازه غروب تا طلوع این نیم‌رخ‌ها به غیر از ماه آگوست منطقه ۵ اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند.

نتایج حاصل از بررسی نمودار تغییرات عمق کانال صوتی سطحی در بازه‌های زمانی تفکیک شده این پژوهش با یکی از مطالعات گذشته مرتبط (شکل ۹ در مرجع شماره [۸]) نشان داد، بیشترین تعداد تشکیل کانال سطحی در بازه صبح و پس از آن در بازه غروب تا طلوع رخ داده است. بنابراین انتظار داریم در طول شبانه‌روز تیپ‌های هیدروآکوستیکی شکل گرفته در بازه صبح دارای عدد مثبت باشند. در این پژوهش مشاهده شد که در ماه‌های دسامبر، ژانویه و تا حدودی در فوریه، عمق کانال سطحی در بازه‌های تفکیک

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

تیپ‌های هیدروآکوستیکی، نیم‌رخ‌های غالب سرعت صوت در ستون آب را نشان می‌دهند. در این پژوهش، تغییرات سرعت صوت روزانه و تاثیر ساعات سپری شده از روز بر نیم‌رخ‌های سرعت صوت در مناطق مختلف دریای عمان با استفاده از داده‌های ARGO مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهش به خوبی بازه‌های زمانی و مناطقی که ضعف داده دارند را مشخص نموده که می‌توان از آن در داده‌برداری‌های آینده برای داشتن الگوی اقلیمی دقیق از تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان استفاده نمود. بررسی داده‌های موجود مناطق پنجگانه با یکدیگر در بازه‌های زمانی تعیین شده نشان داد کمترین تراکم داده در تمامی مناطق مربوط به بازه صبح و بیشترین آن در بازه غروب تا طلوع می‌باشد. همچنین بیشترین تعداد داده در بعد از ظهرهای بهار و تابستان ثبت شده است که می‌تواند به دلیل افزایش طول روز باشد. کمترین میزان توزیع یکنواخت داده‌ها در منطقه ۳ رخ داده و در نقطه مقابل، توزیع داده در منطقه ۵ تا حدودی یکنواخت‌تر است. ضمناً در بازه بعد از ظهر ماه مارس در منطقه ۱ و همچنین در صبح ماه‌های سپتامبر و دسامبر در منطقه ۲، داده‌ای ثبت نشده است. با مقایسه میانگین نیم‌رخ‌های سرعت صوت در بازه‌های زمانی تعیین شده، این نتیجه حاصل شد که در نزدیک سطح، رفتار سرعت صوت در ماه‌های مختلف یکدست نبوده و از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند. به نظر می‌رسد دلیل این امر، ضعف و یا کمبود داده باشد که باعث ایجاد نوسانات و تغییرات زیاد در این نیم‌رخ‌ها می‌شود. تاثیر جریان‌های آب گرم و شور خروجی خلیج فارس که باعث ایجاد وارونگی در اعماق ۱۵۰ متر تا ۳۰۰ متری در دریای عمان می‌شود را می‌توان به ویژه در نیم‌رخ‌های صبح ماه‌های مارس، آوریل، آگوست و اکتبر در منطقه ۱ و در نیم‌رخ صبح ماه‌های آوریل، جولای و

- [2] Ying-Tsong lin. A three-dimensional underwater sound propagation model for offshore wind farm noise prediction, The Journal of the Acoustical society of American, 2019.
- [3] 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.
- [4] Chen C, Ma Y, Liu Y. Reconstructing sound speed profiles worldwide with sea surface data. Applied Ocean Research. 2018 Aug 1; 77:26-33.
- [5] Blackstock, David T. Fundamentals of physical acoustics. Wiley-Interscience; University of Texas. 2000; 277-280.
- [6] Notarstefano G. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Centre (Argo GDAC) 2020.

[۷] مهربانی دستتایی ایمان. مقدمه‌ای بر اقیانوس‌شناسی فیزیکی در دریانوردی. نو شهر؛ انتشارات دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره). ۱۴۰۱. ص. ۵۳-۸۹.

[۸] سبحانی حمیدرضا. مهربانی دستتایی ایمان. استخراج تیپ‌های هیدروآکوستیکی دریای عمان بر اساس داده‌های ARGO و معرفی یک الگوی جدید برای شناسایی این تیپ‌ها. مجله هیدروفیزیک. ۱۴۰۲؛ ۹(۲): ۴۶-۵۱.

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

[۱۰] خلیل‌آبادی محمدرضا، شاه‌میرزایی حسین، دانش‌مهر سعید. الگوسازی امواج صوتی زیر آب در خلیج عمان. مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران. ۱۴۰۱؛ ۱۰(۲): ۳۴-۲۱.

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

[۱۲] محسنی آراسته افشین، ناظمیه نرگس، سهیلی‌فر محمدرضا. مدل عددی دو بعدی انتشار امواج صوتی

شده روزانه با میانگین ماهانه به خوبی با یکدیگر هم‌خوانی دارند. با این وجود در فوریه منطقه ۴ با وجود عدم تشکیل کانال سطحی در میانگین ماهانه، در بازه صبح کانال سطحی با عمق ۳۰ متر مشاهده شد. این کانال‌ها از ماه ژوئن تا اکتبر در اکثر مواقع تشکیل نشده و یا کانالی ضعیف در یکی از بازه‌های زمانی با عمق کم شکل گرفته است. به نظر می‌رسد ضعیف بودن این کانال‌ها باعث به وجود آمدن اختلاف در نمایش کانال سطحی با میانگین ماهانه شده است. همچنین در ماه‌هایی که کانال سطحی فقط در یکی از بازه‌های زمانی شکل گرفته است، به غیر از ماه جولای منطقه ۱ که در بازه بعد از ظهر شکل گرفته، همگی در بازه زمانی صبح می‌باشند. ضمناً نشان داده شد زمانی که کانال در هر سه بازه زمانی تشکیل می‌شود، بیشترین عمق کانال در بازه صبح رخ داده است.

یکی دیگر از نتایج این تحقیق این است که از ماه مارس تا ماه می، کانال سطحی در هیچ یک از بازه‌های زمانی تشکیل نشده است که با مطالعات گذشته هم‌خوانی دارد [۸] و به نظر می‌رسد عدم تشکیل این کانال در بازه غروب تا طلوع، به دلیل باقی ماندن تأثیرات ناشی از افزایش دمای سطحی در بازه بعد از ظهر باشد.

## سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب دکتر علی حسامی ریاست محترم دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نو شهر و اعضای هیئت علمی و مسئولین این دانشکده، هیئت تحریریه و داوران محترم مجله هیدروفیزیک مراتب سپاسگزاری خود را اعلام نمایند.

## مراجع

[۱] الهیاری بیگ، محمدی فیروز، عظام، علی اکبری، 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.



[۲۱] جان‌نار فریدونی فاطمه، نهایندیان اصفهانی سمیه، محمودی نعمت‌الله. تغییرات فصلی ستون قائم آب و تخمین عمق لایه آمیخته بر پایه دما با استفاده از روش آستانه در منطقه بابلسر و رامسر. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۹؛ ۴۶(۱): ۱۵۹-۱۷۴.

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

### پی‌نوشت‌ها

1. GDAC: Global Data Assembly Centers

2. finite difference

۳. به جهت رعایت اختصار، از این به بعد این بازه زمانی صرفاً با عنوان غروب تا طلوع یاد می‌شود.

در آب‌های تنگه هرمز به روش تفاضل محدود. مجله پژوهش علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۷؛ ۱۳(۲): ۳۹-۵۱.

[۱۳] مهربابی دستنایی ایمان، ملکوتی حسین، حسن زاده اسماعیل، راهبانی مریم. مطالعه حساسیت رفتار روزانه لایه آمیخته اقیانوسی به تبخیر سطحی روی شمال دریای عربی در حین مونسون تابستانی در حضور واداشت باد و موج با روش شبیه‌سازی پیچک بزرگ. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون. ۱۳۹۸؛ ۱۵(۲): ۹۴-۸۳.

[۱۴] حسینی سیدحبيب‌اله، 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.

[۱۵] خلیل‌آبادی محمدرضا، شاه‌میرزایی حسین، دانشمهر سعید. الگوسازی امواج صوتی زیر آب در خلیج عمان. مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران. ۱۴۰۱؛ ۱۰(۲): ۲۱-۳۴.

[۱۶] مهدی زاده مهدی محمد، راهبانی مریم، مهربابی 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).

[17] Mehraby Dastenay I, Malakooti H, Hassan Zadeh S, Raasch S. Large eddy simulation of the combined effect of heat fluxes and wave forcing of summer monsoon on a diurnal ocean mixed layer in the north Arabian Sea. The European Physical Journal Plus. 2024 Nov 8;139(11):984.

[18] Ashuri Rudposhti M, Allahyaribeik S, Ghodsihassanabad M. Simulating the effect of mesoscale eddies on sound wave propagation in the Persian Gulf and Northern Oman Sea. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2025; 22(5): 3091-3110.

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

[۲۰] خدایاری رستم‌آباد احمد. مقدمه‌ای بر سونار و مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در آب دریا، تهران؛ انتشارات وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۸۹.