Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 13, No. 1, 2025

(Research Article)
Analysis of Hydrophysical Parameters of the Water Column in the East Coast of Antarctica

Mohammad Reza Khalilabadi, Saeed Daneshmehr*, Mohammad Akbarnejad Baie
Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology, Iran
Received: 2024/10/15, Accepted: 2025/05/16

Abstract

Antarctica has become the focus of the world's attention in recent decades due to its importance in influencing the Earth's climate, huge potential resources, and its unique location and pristine environment. In the last decade, this issue has been given attention in our country, and even the region between 59.5 and 63.14 degrees east longitude has been declared as the target region of Iran, considering that one of the most basic conditions and stages of membership in Antarctica is the beginning of research activities in this region, especially the ecology of the region. In this research, the environmental characteristics of seawater in the targeted geographical area of Iran have been studied. Temperature and salinity profiles have been extracted for different seasons of the year. Because the main basis of the subsurface exploration is acoustic methods, in this research, the layering of the water column and the sound speed profile have also been calculated and analyzed. The analysis of the sound speed profile showed that in all seasons of the year, the trend of sound speed changes depends on the temperature, so it is possible to predict the way of sound speed changes with the help of temperature changes. Also, in the winter season, the signs of changes due to the different layers of the thermocline are clearly visible. Despite these changes, no audio channel is visible in the desired station in Antarctica.

Keywords: Sound speed profile, Antarctica, Thermocline, Sound channel.

pp. 33-44 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: Daneshmehr@mut.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۴، دوره: ۱۳، شماره ۱، صفحات: ۳۳-۴۴

تحلیل شبه‌سنج‌های هیدروفیزیکی ستون آب در سواحل شرقی قطب جنوب

محمدرضا خلیل‌آبادی، سعید دانش‌مهر*، محمد اکبرنژاد بایی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوادریا

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

چکیده

قطب جنوب به دلیل اهمیت در تاثیر بر روی اقلیم زمین، منابع بالقوه عظیم و موقعیت منحصر به فرد و محیط‌زیست بکر آن، در دهه‌های اخیر به کانون توجه جهانیان تبدیل شده‌است. در یک دهه اخیر این موضوع در کشور ما نیز مورد توجه قرار گرفته شده‌است و حتی منطقه بین طول‌های جغرافیایی ۵۹٫۵ تا ۶۳٫۱۴ درجه شرقی به عنوان منطقه هدف کشور ایران اعلام شده‌است، با توجه به اینکه یکی از ابتدایی‌ترین شرایط و مراحل عضویت در قطب جنوب، شروع فعالیت‌های پژوهشی در این منطقه و به ویژه محیط‌شناسی منطقه است. در این پژوهش به شناخت مشخصه‌های محیطی آب دریا در محدوده جغرافیایی مورد هدف ایران پرداخته شده‌است. الگوهای دما و شوری برای فصول مختلف سال استخراج شده‌است. با توجه به اینکه پایه غالب اکتشافات زیرسطح دریا روش‌های صوتین است، در این پژوهش نحوه لایه‌بندی ستون آب و الگو سرعت صدا نیز محاسبه و تحلیل شده‌است. تحلیل الگو سرعت صدا نشان داد، که در تمام فصول سال روند تغییرات سرعت صدا از دما تبعیت می‌کند در نتیجه می‌توان به کمک تغییرات دما، نحوه تغییرات سرعت صدا را پیش بینی کرد. هم‌چنین در فصل زمستان نشان از تغییراتی به دلیل لایه‌های مختلف ترموکلاین به طور واضح نمایان شده‌است. با وجود این تغییرات هیچ کال صدایی در ایستگاه مورد نظر در قطب جنوب قابل مشاهده نمی‌باشد.

کلیدواژه‌ها: الگو سرعت صدا، قطب جنوب، ترموکلاین، کال صدا.

۱. مقدمه

قطب‌جنوب در تصور بسیاری از مردم جهان، سرزمین کوه‌های یخی و برفی با پنگوئن‌های بازیگوش است؛ در حالی که این منطقه سرشار از منابع غنی دریایی، معدنی، نفت و گاز است و همین موضوع باعث‌شده کشورهای مختلف ادعاهای ارضی نسبت به آن داشته باشند. قطب جنوب سردترین نقطه کره زمین با پوشش کاملا یخی است که دانشمندان معتقدند منابع گسترده و غنی مختلفی در آن وجود دارد. قطب جنوب مرتفع‌ترین، خشک‌ترین، سردترین و باد خیزترین قاره زمین است. صفحه یخی قطب جنوب بزرگ‌ترین ذخیره یخ روی زمین است. مساحت آن ۱۴ میلیون کیلومتر مربع و جرم آن ۳۰ میلیون مترمکعب است، حداکثر عمق در قطب جنوب ۴۷۷۶ متر و عمق متوسط آن ۲۱۶۰ متر می‌باشد. قطب جنوب شامل ۹۰ درصد از یخ‌های روی زمین دارا می‌باشد و ۷۰ درصد از آب‌های شیرین جهان را شامل می‌شود. به دلیل تأثیر قطب جنوب بر روی اقلیم زمین، موقعیت منحصر به فرد آن در قطب جنوب، منابع بسیار زیست‌محیطی و طبیعی و محیط زیست دست نخورده‌اش به کانون توجه جهانیان تبدیل شده‌است. به صورتی‌که می‌توان از آن به عنوان یک آزمایشگاه طبیعی برای پژوهش علمی در بسیاری از شاخه‌های علوم بهره جست؛ زیرا این منطقه، ناحیه‌ای کلیدی و مهم برای فهم بوم‌سازگان[1] زمین و محیط زیست آن است. ویژگی‌های منحصر به فرد قطب جنوب، در طی ۵۰ سال گذشته،

* نویسنده پاسخگو: Daneshmehr@mut.ac.ir

[1] Ecosystem

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

امکان پژوهش بر روی خاستگاه خشکی‌ها، آلودگی هوا و تغییر اقلیم زمین را برای دانشمندان فراهم آورده است. هواشناسی قطب جنوب شاخص‌های مورد نیاز جهت پیش‌بینی مدل‌های هواشناسی نیم‌کره جنوبی و الگوی چرخش سامانه‌های اقیانوسی در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد [۱].

مغزه‌های یخی بدست آمده از این قاره به عنوان یک مخزن ارزشمند اطلاعات در خصوص اقلیم گذشته و تاریخ محیطی زمین محسوب می‌شوند. اقلیم قطب جنوب سردترین جای در همه زمین است. قطب جنوب پائین‌ترین دمای ثبت شده تاکنون را دارد. این دما برابر با ۸۹٫۲- درجه سلسیوس و در پایگاه وستوک ثبت شده‌است. ماهواره‌ها درجه حرارتِ پایین‌تری را نیز ثبت کرده‌اند که برابر با ۹۳٫۲- درجه سلسیوس بوده است [۳,۲].

اقیانوس محیط پویا و همیشه در حال تغییر است و هرکدام از پدیده‌های اقیانوسی دارای خصوصیات منحصر به فردی است. برای مثال پدیده‌های همچون جریان‌ها، امواج داخلی و تلاطم‌های کوچک مقیاس، لایه‌بندی افقی، جریان‌های نفوذی و افت و خیزهای دما و شوری در راستای عمودی باعث ایجاد تغییرات بر روی الگو سرعت صدا می‌شوند [۵,۴].

سرعت صدا است که دارای مقدار عمومی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در اقیانوس‌های استوایی و معتدل است، تغییرات چگالی نیز بر انتشار این امواج مؤثر هستند، اما این تغییرات روی تمام ستون آب اقیانوسی قابل چشم پوشی هستند، ولی در لایه‌های رسوبی در کف اقیانوس به عنوان فاکتور مهم در محاسبات در نظر گرفته می‌شود [۶,۵].

تعیین سرعت صدا فرآیندی تجربی است که بر اساس سه شبه‌سنج اصلی دما، شوری و عمق در نواحی مختلف صورت می‌گیرد. سرعت صدا در آب دریا یکی از مهم‌ترین شبه‌سنج‌هایی است که در اکثر فعالیت‌های میدانی مورد نیاز بوده و در بسیاری از کارهای تحقیقاتی بر اساس آن محاسبات صورت می‌گیرد. در این پژوهش، برای مطالعه مشخصات هیدروفیزیکی از جمله الگو سرعت صدا، محاسبه آن از فرمول معادله مکنزی[1] استفاده شده‌است [۸,۷].

بر اساس سامانه پیمان قطب جنوب، مناطق پایین‌تر از مدار ۶۰ درجه جنوبی، تنها منطقه‌ای برای تحقیقات علمی است و هر گونه فعالیت نظامی و ادعای مالکیت در آن ممنوع است. این پیمان، نخستین پیمان کنترل تسلیحات در زمان جنگ سرد است. دفتر این پیمان از سپتامبر سال ۲۰۰۴ در بوئنوس آیرس آرژانتین قرار دارد. این پیمان از سال ۱۹۵۹ و به‌دنبال ادعا مالکیت آرژانتین بر قطب جنوب ظهور پیدا کرد [۱۰,۹].

قدرت‌های بزرگ (کشورهای آمریکا، شوروی سابق و انگلیس) تصمیم گرفتند که با ایجاد معاهده‌ای مانع از سلطه کشورها بر قطب جنوب شوند. این پیمان در یکم دسامبر ۱۹۵۹ امضا شده و در ۲۳ ژوئیه ۱۹۶۱ به اجرا درآمده‌است. در ابتدا تنها ۱۲ کشور فعال در پروژه سال ژئوفیزیک بین‌الملل (از ژوئیه ۱۹۵۷ تا دسامبر ۱۹۵۸) شامل آمریکا، شوروی سابق، انگلیس، آرژانتین، استرالیا، بلژیک، شیلی، فرانسه، ژاپن، نیوزیلند، نروژ و آفریقای جنوبی آن را امضا کردند. این کشورها ۵۰ ایستگاه تحقیقاتی در قطب جنوب ایجاد کرده‌اند. این پیمان، بیانی دیپلماتیک از همکاری علمی و عملی است که اصطلاحاً «بر روی یخ» به دست آمده‌است تا سال ۲۰۱۶، ۵۳ کشور آن را امضا کرده‌اند [۱۲,۱۱].

قطب جنوب ایران منطقه‌ای ادعا شده توسط جمهوری اسلامی ایران در قطب جنوب است که ما بین ۵۹٫۹ درجه شرقی تا ۶۳٫۱۴ درجه شرقی قرار گرفته‌است. هم اکنون این منطقه میان ایران و استرالیا مورد مناقشه است. سازمان اقیانوس‌شناسی ایران در صدد ایجاد مرکز پژوهشی در قطب جنوب است [۱۳].

در اسفند ۱۳۹۱ محمدحسین باقری، رئیس ستاد کل نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران گفت که ایران به

[1] Mackenzie Equation

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

دلیل امکان دسترسی از طریق دریای مکران به قطب جنوب و حایل نبودن هیچ سرزمینی در این میان می‌تواند «بر طبق قوانین بین‌المللی در بخشی از قطب جنوب ادعای حاکمیت کند.» منطقه مورد نظر حد فاصل مختصات ۵۹٫۵۰ تا ۶۳٫۱۴ شرقی از سواحل ایران (۶۴٫۳ درجه عرض جغرافیایی) یک قطاع به طول تقریبی ۳۰۰۰ کیلومتر و عرض ۴۰۵ کیلومتر و مساحت تقریبی ۲۰۰ تا ۲۵۰ هزار کیلومتر مربع است. این محدوده مورد نظر ایران در شکل ۱ نشان داده شده‌است که قطب جنوب ایران با قلمرو قطب جنوب استرالیا هم‌پوشانی دارد [۱۴].

با توجه به موارد بالا و اهمیت حضور فعال در منطقه قطب جنوب، در این پژوهش مطالعه محیط‌شناسی آب‌های این ناحیه مدنظر قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شده‌است مشخصه‌های محیطی هیدروفیزیکی ستون آب در سواحل شرقی قطب جنوب را استخراج نموده و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شود. در این مطالعه با استفاده از داده‌های محیطی، شبه‌سنج‌های هیدروفیزیکی ستون آب در فصول مختلف سال مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۵].

شکل ۱ قاره قطب جنوب و منطقه هدف ایران [۱۴].

با توجه به اینکه پایه غالب اکتشافات زیرسطح دریا روش‌های صوتین[1] است، در این پژوهش نحوه لایه‌بندی ستون آب و الگو سرعت صدا نیز محاسبه و تحلیل شده‌است. در اقیانوس شناسی و تحقیقات دریایی، تپ صوتین[2] به طور گسترده برای تحقیقات خصوصیات بستر و اندازه‌گیری جریانات و امواج استفاده می‌شود. سرعت صدا در هر عمقی از آب و تعیین محل کال[3] صوتی، به داده‌های هیدروفیزیکی آب از جمله دما و شوری بستگی دارد.

سرعت صدا یکی از مهم‌ترین شبه‌سنج‌هایی است که در ورودی مدل‌های صوتین برای تجزیه و تحلیل نحوهٔ انتشار صوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. محیط دریاها و اقیانوس‌ها، محیطی ناهمگون می‌باشد. این ناهمگونی‌ها در راستای عمودی شامل تغییرات الگوهای دما و شوری است [۱۷,۱۶].

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در موقعیت جغرافیایی به مختصات عرض ۶۴٫۵۲ درجه جنوبی و طول ۶۲٫۰۸ درجه شرقی اجرا شده‌است که در محدوده هدف کشور ایران در قاره قطب جنوب واقع شده‌است. عمق این نقطه ۳۰۰۰ متر می‌باشد. شکل ۲ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از پایگاه‌های داده‌های بین‌المللی معتبر و بروز، داده‌های محیطی منطقه هدف از سطح تا عمق ۳۰۰۰ متری برای یک دوره بیش از ۳۰ ساله استخراج گردید. این پایگاه‌های داده شامل موارد زیر است:

- **پایگاه داده جبکو**[4]: این پایگاه در حقیقت تامین‌کننده نقشه‌های توپوگرافی[5] بستر دریاست و از سال ۱۹۰۳ کار خود را شروع کرده است و سالانه نقشه‌های توپوگرافی را توسعه داده است به طوری که امروزه نقشه‌های توپوگرافی

[1] Acoustic
[2] Acoustic pulse
[3] Channel
[4] GEBCO; General Bathymetric Chart of the Oceans
[5] Topography

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

و عمق‌سنجی کل اقیانوس‌ها را با درجه تفکیک ۳۰ ثانیه جغرافیایی ارایه می‌دهد. در این پژوهش برای استخراج توپوگرافی و نقشه عمق منطقه هدف از این پایگاه داده استفاده شد [۱۸].

- **پایگاه داده‌های آب و هوا**[1]: یکی از منابع اصلی استخراج دادههای اقلیمی و اقیانوسی است که تقریبا کل کره زمین را پوشش می‌دهد. در این مطالعه برای استخراج داده‌های محیطی هیدروفیزیکی منطقه هدف از این پایگاه استفاده شد [۱۹].

- **پایگاه داده هایکام**[2]: داده‌های این پایگاه حاصل اجرای مستمر مدل اقیانوسی هایکام است که برای حوزه‌های اقیانوسی اجرا می‌شود. داده‌های این پایگاه به طور مستمر واسنجی[3] و صحت‌سنجی می‌شود و در کنار داده‌های مشاهداتی برای تکمیل و بالا بردن درجه تفکیک جغرافیایی داده‌ها بسیار مفید و کاربردی است. از این پایگاه برای استخراج داده‌های دما و شوری در لایه‌های مختلف آب دریا استفاده شد و بانک داده‌های این پژوهش را تکمیل نمود [۲۰].

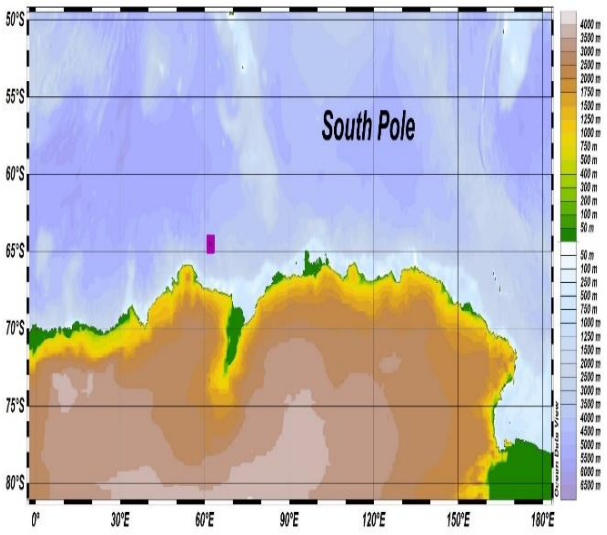
پس از اینکه داده‌های محیطی مورد نظر برای دوره سی ساله در منطقه هدف از پایگاه‌های داده معتبر که در بالا ذکر شد استخراج گردید، در مرحله بعد این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای اقیانوسی و جغرافیایی نظیر ماژول اقیانوسی نرم‌افزار متلب و هم‌چنین با نرم‌افزار نمایش داده‌های اقیانوسی[4] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و میانگین داده‌های تحلیل[5] شده برای دوره ۳۰ ساله استخراج گردید.

با توجه به اهمیت و کاربرد روش‌های صوتین زیرآب برای مطالعات جغرافیایی و اقیانوس‌شناسی زیرسطح دریا، الگوهای سرعت صدا زیر آب نیز محاسبه و استخراج شد. در این پژوهش، الگو دما و شوری بر حسب عمق در منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. هم‌چنین الگوهای جریان مداری و نصف‌النهاری ترسیم شده‌است. این الگوها به همراه توپوگرافی منطقه، به عنوان ورودی برای محاسبه الگو سرعت صدا مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند.

۳. نتایج

همانطور که در بالا اشاره شد الگوهای مربوط به مشخصه‌های محیطی هیدروفیزیکی پس از آماده‌سازی و تحلیل برای یک دوره سی ساله میانگین گرفته شد.

نحوه‌ی تغییرات این شبه‌سنج[6]ها از سطح تا عمق سه هزار متری دریا در فصول مختلف سال استخراج گردید.



شکل ۲ نمایش منطقه مورد مطالعه قطب جنوب در محیط نرم‌افزار نمایش داده‌های اقیانوسی.

شکل ۳، نحوه تغییرات دما را در فصول مختلف سال از سطح تا عمق نشان می‌دهد. بررسی این الگوها نشان می‌دهد لایه‌بندی ستون آب از سطح تا عمق به طور غیرخطی تغییر می‌کند. شکل عمومی الگوها در فصل زمستان نسبت به سایر فصول سال کمی متفاوت است.

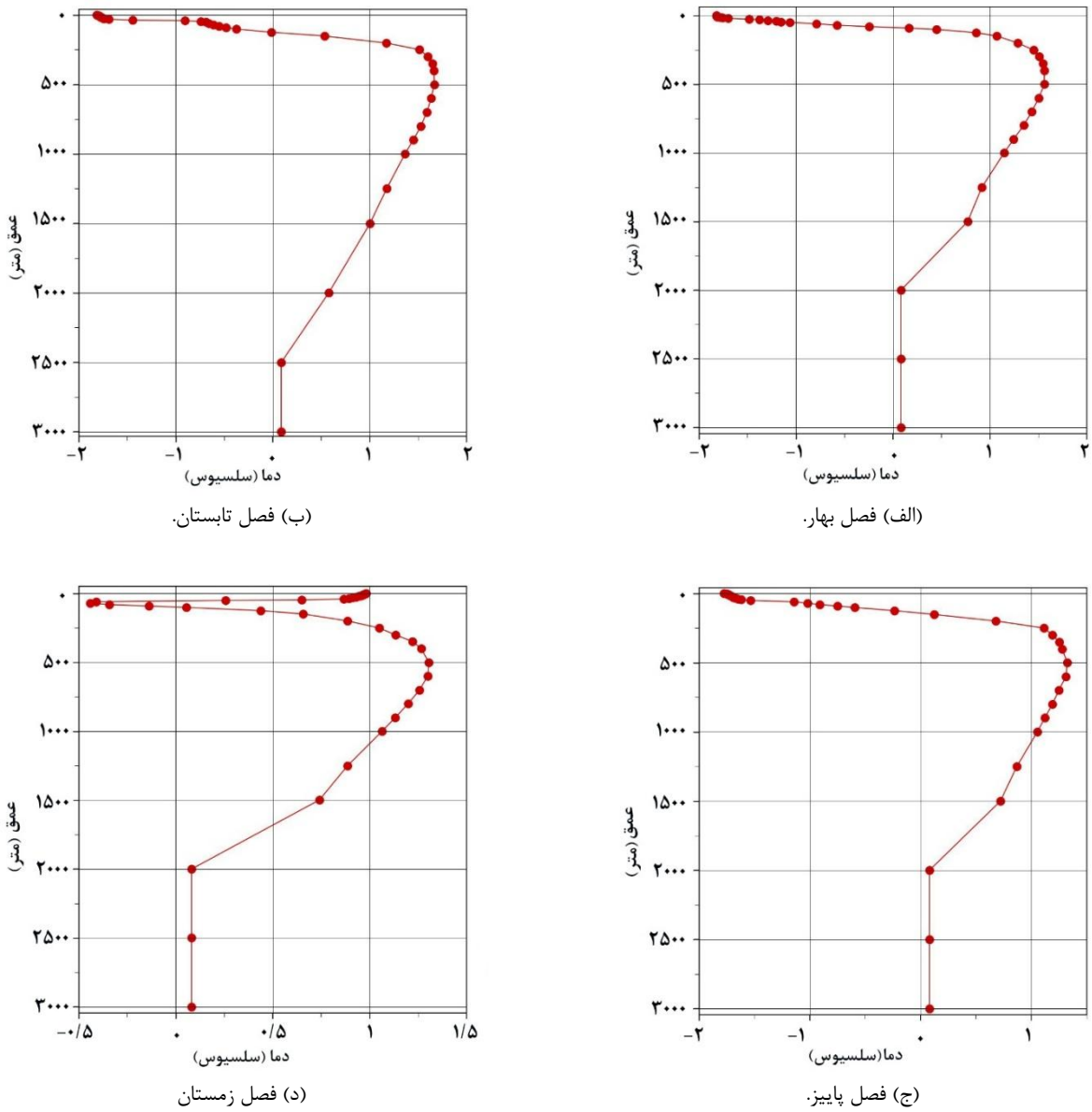
در همه فصول یک لایه سطحی هم‌دما شکل می‌گیرد که کم‌ترین ضخامت آن در فصل بهار است (۲۰ متر) و با گذشت فصل سال عمق آن افزایش می‌یابد، به طوری که

[1] CDS; Climate Data Store
[2] HYCOM; Hybrid Coordinate Ocean Model
[3] Calibration
[4] ODV; Ocean Data View
[5] Analysis
[6] Parameter

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

ضخامت این لایه در نیمه دوم سال به حدود ۵۰ متر می‌رسد.

نکته جالب توجه در این مطالعه این است که در منطقه مورد مطالعه در زیر لایه سطحی دو لایه دماشیب[1] شکل می‌گیرد که در دماشیب بالایی برخلاف عرض‌های جغرافیایی میانی، در بیش‌تر طول سال دما در لایه دماشیب با عمق افزایش می‌یابد. این دماشیب از زیر لایه هم‌دمای سطحی تا عمق حدود ۵۰۰ متر امتداد یافته است. اما در دماشیب زیرین که از عمق حدود ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر امتداد می‌یابد، روند تغییرات دما با عمق کاهشی است.



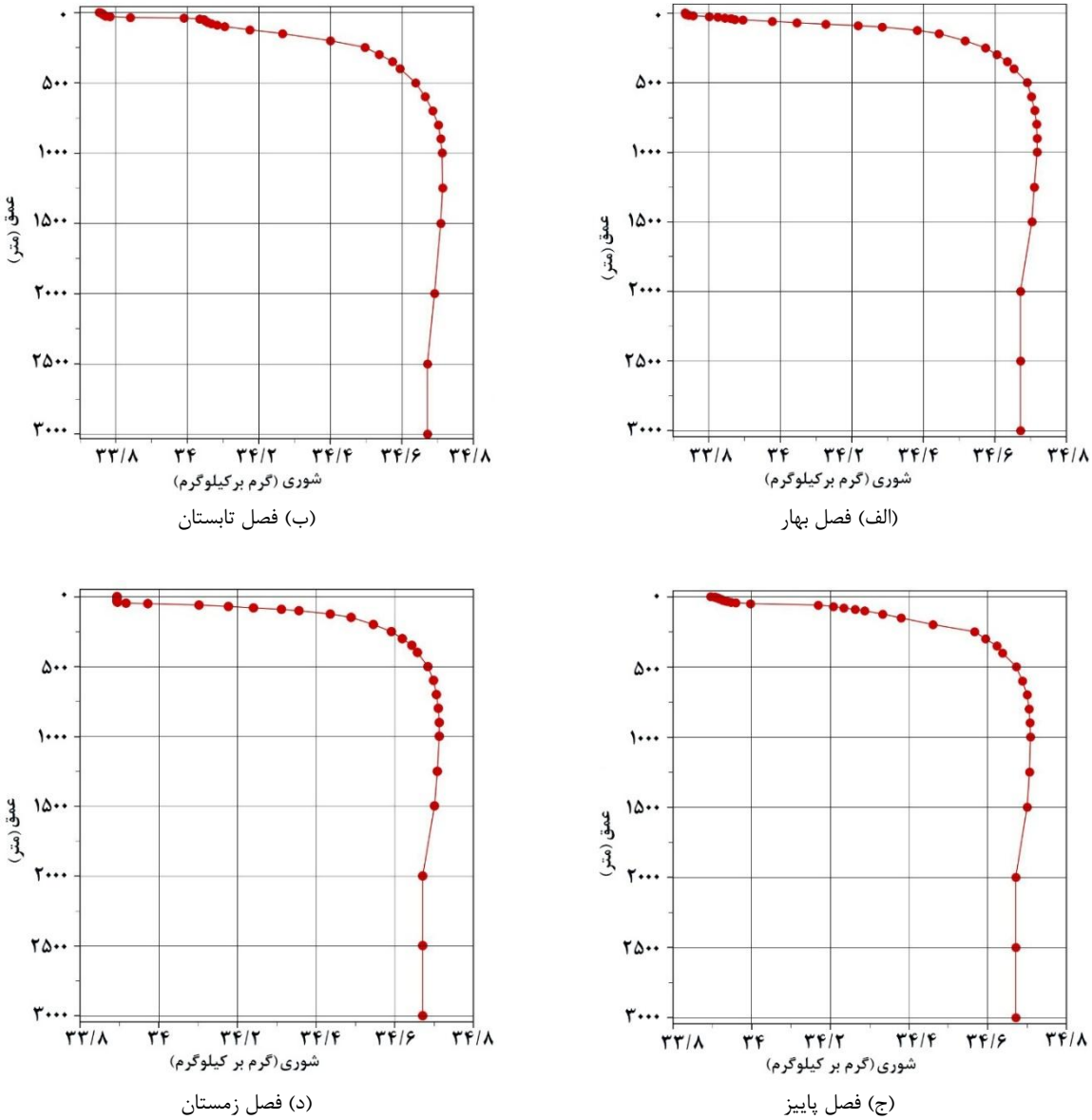
شکل ۳ تغییرات فصلی الگوی دما نسبت به عمق در شرق قطب جنوب.

[1] Thermocline

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه این است که در فصل زمستان سه لایه دماشیب متفاوت روی یکدیگر تشکیل می‌شود. در این فصل در زیر لایه هم‌دمای سطحی یک دماشیب فصلی کاملا متفاوت بین عمق‌های ۴۰ تا ۶۰ متر شکل می‌گیرد، به طوری که مشابه عرض‌های جغرافیایی میانی، دما با عمق به سرعت کاهش می‌یابد، اما در زیر این لایه روند کلی تغییرات دما با عمق مشابه سایر فصول سال (و متفاوت با عرض‌های میانی) است.

از عمق حدود ۲۰۰۰ متر به پایین یک لایه پایدار تقریبا هم‌دما شکل گرفته است که پیش‌بینی می‌شود با توجه به عمق زیاد آن در هیچ زمانی دستخوش تغییرات اقلیمی نبوده و شکل آن برای هزاران سال هیچ تغییری نکرده‌است.



(الف) فصل بهار

(ب) فصل تابستان

(ج) فصل پاییز

(د) فصل زمستان

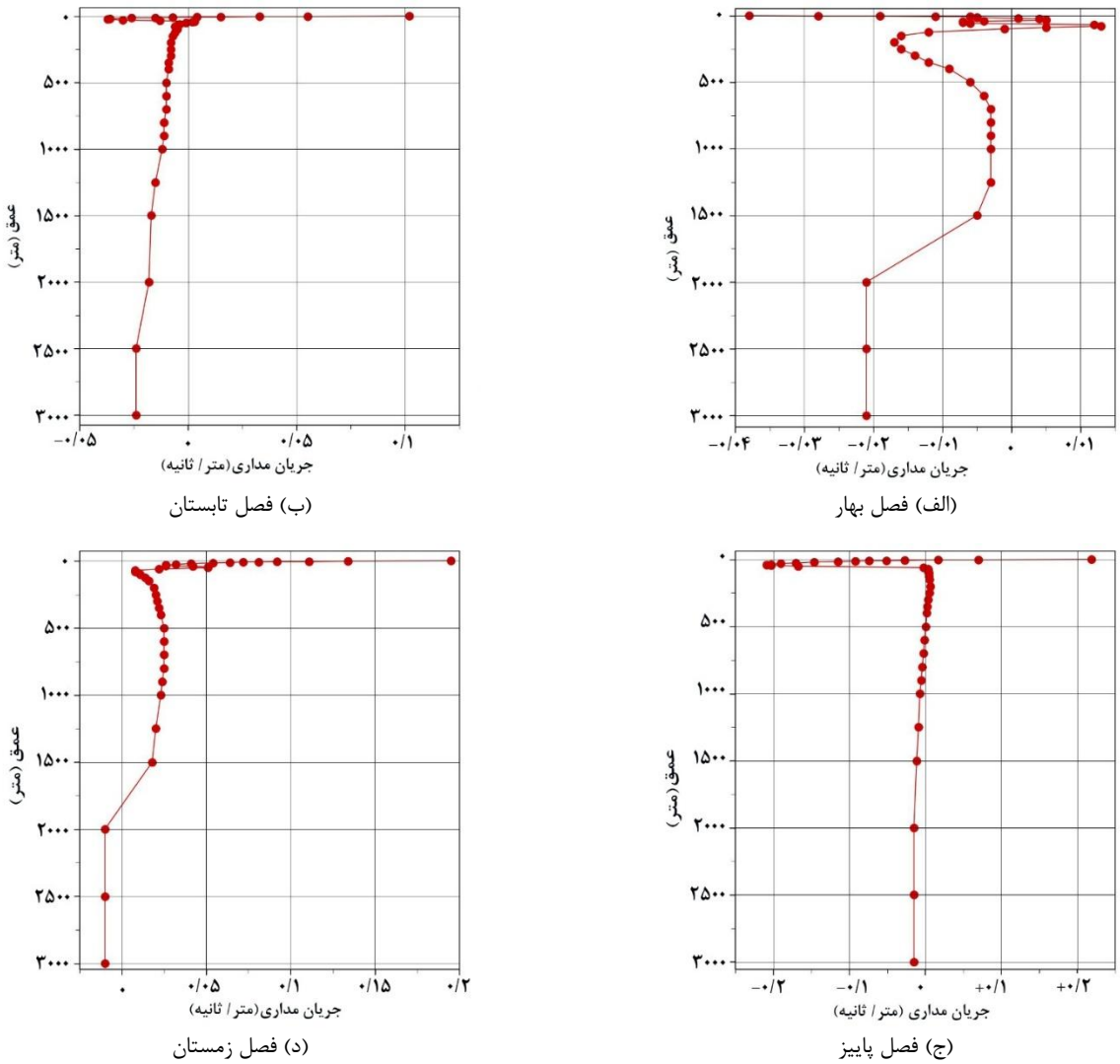
شکل۴ تغییرات فصلی الگوی شوری نسبت به عمق در شرق قطب جنوب.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

با توجه به شکل منحصربفرد استخراج شده برای لایه‌بندی دمایی آب در منطقه مورد مطالعه، انتظار می‌رود سایر مشخصه‌های محیطی که عمدتا از الگو دما پیروی می‌کنند نیز در این منطقه دارای شکل منحصربفردی باشند که به ندرت در مطالعات این گروه پژوهشی و یا سایر پژوهشگرانی که عمدتا در آب‌های حاره‌ای[1] و جنب‌حاره‌ای مطالعه کرده‌اند، یافته می‌شود.

شکل۴ الگوهای شوری آب را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این الگوها به جز فصل تابستان که میزان شوری از سطح تا عمق حدود ۱۰۰۰ متر روند افزایشی دارد و در زیر این عمق شوری تقریبا ثابت است، در سایر فصول سال میزان شوری از سطح تا عمق ۵۰۰ متری افزایش می‌یابد و در عمق‌های بیش‌تر از ۵۰۰ متر تقریبا تغییرات شوری قابل چشم‌پوشی است.

بررسی دقیق‌تر الگوهای شوری نشان می‌دهد، یک کاهش جزیی در میزان شوری (کم‌تر از ۱ پی‌اس‌یو[2]) از عمق ۲۰۰۰ متر به پایین قابل مشاهده است.



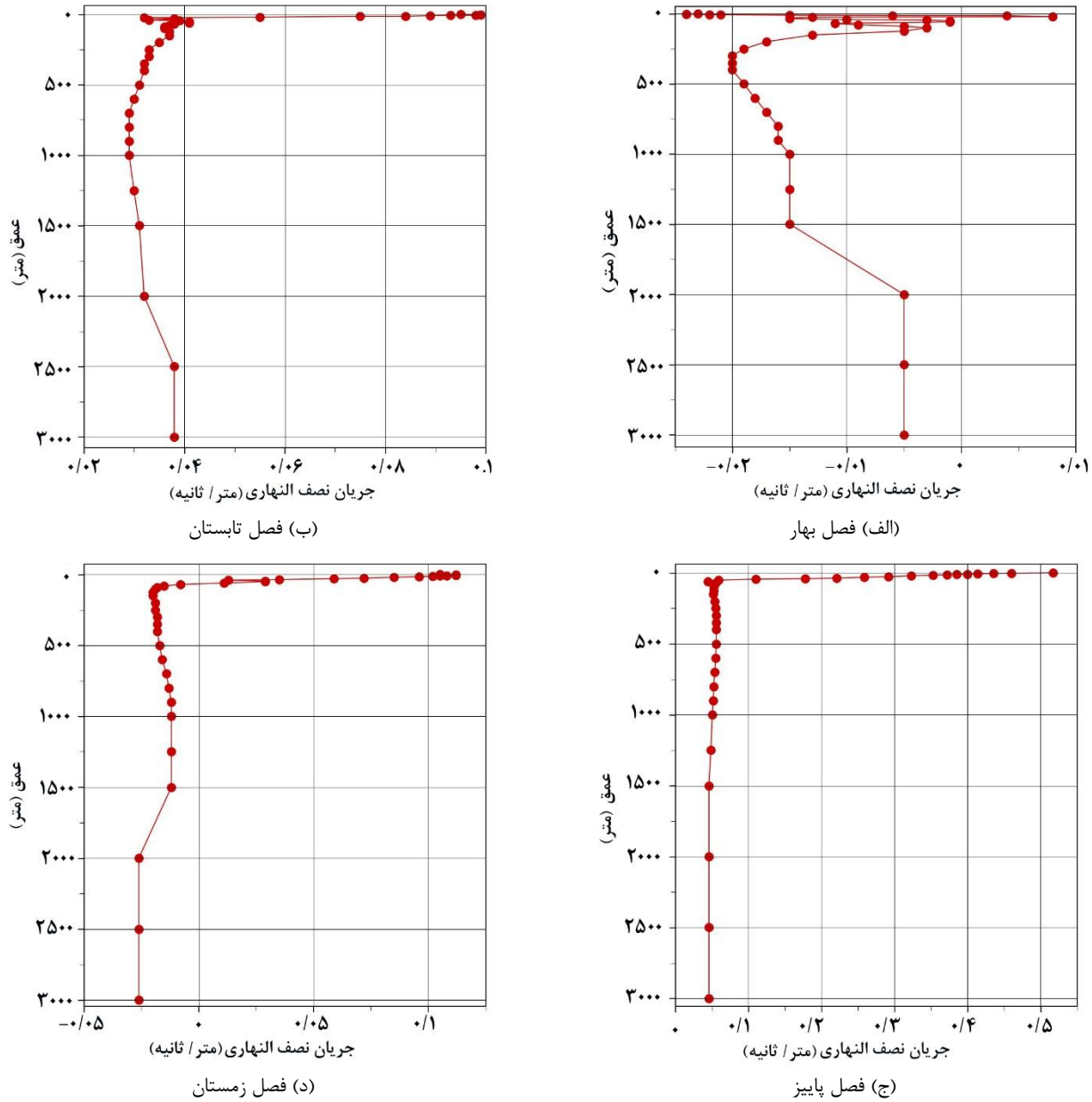
شکل۵ تغییرات فصلی الگوی شبه‌سنج مداری جریان در شرق قطب جنوب.

[1] آب با ویژگی مناطق گرمسیری

[2] PSU; Practical Salinity Unit

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب شبه‌سنج‌های مداری و نصف‌النهاری الگوی جریان را در فصول مختلف سال نشان می‌دهد. آنچه در همه این شکل‌ها به وضوح قابل مشاهده است این است که بیش‌ترین میزان سرعت در لایه سطحی رخ می‌دهد و در زیر این لایه جریان‌ها بسیار ضعیف هستند. هر چند مقادیر سرعت جریان در همه الگوها کوچک است، اما نحوه تغییرات آن در امتداد عمق، به ویژه در عمق‌های بیش‌تر از ۱۰۰ متر، از الگو دما پیروی می‌کند. ضعیف بودن جریان و همبستگی آن با الگوی دما دلیلی روشن است تا بتوان گردش دماشوری[1] را عامل اصلی ایجاد جریان‌های زیرسطحی در منطقه هدف در نظر گرفت.



شکل۶ تغییرات فصلی الگوی شبه‌سنج نصف‌النهاری جریان در شرق قطب جنوب.

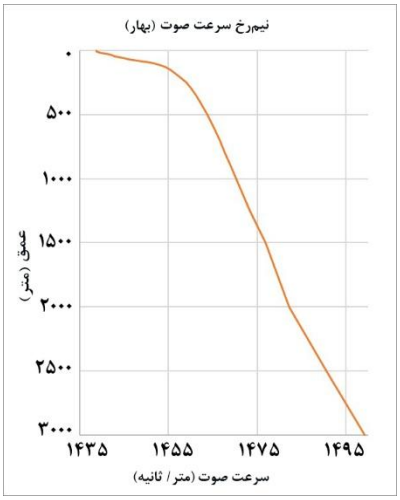
[1] Thermohaline

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

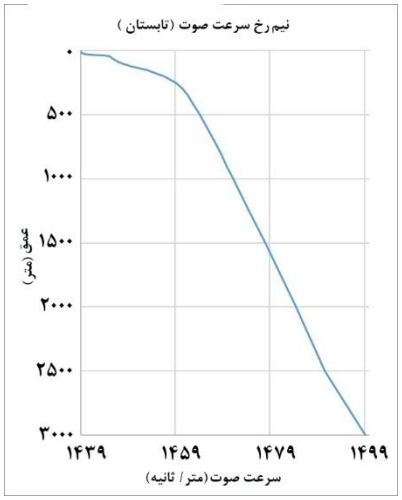
همانطور که در بخش مواد و روش‌ها گفته شد، در این پژوهش، تغییرات سرعت صدا با عمق با استفاده روابط صوتین زیر آب استخراج گردید.

شکل۷ الگوی کلی تغییرات سرعت صدا را در فصول مختلف سال در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در فصول بهار تا پاییز الگوی کلی تغییرات سرعت صدا نسبت به عمق تقریبا ثابت است. در الگوی مربوط به این فصول چند ویژگی بارز وجود دارد:

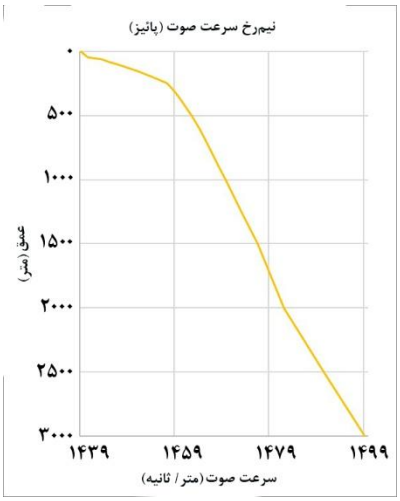
- میزان سرعت صدا از سطح تا نزدیک بستر دریا حدود ۶۰ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد که این میزان تغییر نسبت به سایر نقاط کره زمین چشمگیر است.
- روند افزایشی سرعت صدا نسبت به عمق در دو مرحله است، یکی در لایه سطحی که شیب منحنی تندتر است و دیگری در زیر لایه سطحی که تقریبا دارای شیب ملایم و ثابت است.
- در سه فصل ابتدای سال در هیچ عمقی کال صدایی شکل نمی‌گیرد.



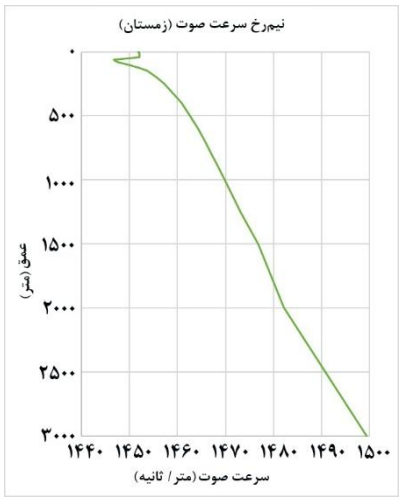
(الف) فصل بهار



(ب) فصل تابستان



(ج) فصل پاییز



(د) فصل زمستان

شکل۷ الگوهای سرعت صدا در شرق قطب جنوب، عمق ۳۰۰۰ متر.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

در فصل زمستان الگوی سرعت صدا دارای یک ویژگی متفاوت نسبت به سایر فصول سال است. آنچه اهمیت مطالعه صوتین زیر آب را در این فصل نسبت به سایر فصول برجسته‌تر می‌کند، این است که در زمستان در عمق حدود ۴۰ تا ۶۰ متر یک کال صدایی فصلی تشکیل می‌شود که روند تقریبا یکنواخت الگوی صوت این منطقه را بر هم می‌زند و یک گسست عمودی در لایه‌بندی صوتین زیر آب ایجاد می‌کند.

این نوع لایه‌بندی صوتین خاص در فصل زمستان را می‌توان با لایه‌بندی دما در این فصل مرتبط دانست، زیرا همانطور که در تحلیل الگوهای دما گفته شد، در فصل زمستان یک ترموکلاین فصلی در عمق ۴۰ تا ۶۰ متر شکل می‌گیرد که دما به سرعت با عمق کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیت کشف این پدیده در منطقه مورد نظر از جنبه کاربرد تجهیزات صوتین در زیر آب، پژوهش‌های مفصلی در حوزه انتشار پرتوهای صوتین زیر آب را می‌طلبد.

۴. بحث

روند تغییرات الگوی عمودی سرعت صدا در ایستگاه مورد نظر (سواحل شرقی قطب جنوب) در فصول مختلف سال نشان می‌دهد که الگوی سرعت صدا از الگوی دما تبعیت می‌کند. همان‌طوری که در بخش نتایج این اشکال مشاهده می‌کنید، در فصل زمستان به علت افزایش سرعت باد، توده بسیار سرد آب و هوایی به دلیل کاهش تابش نور خورشید، موجب افزایش عمق لایه اختلاط می‌شود و در نتیجه در این فصل محیط قطب جنوب به صورت یکنواخت می‌گردد اما در فصل‌های دیگر سال، در این لایه، تغییرات بسیار خاصی قابل مشاهده نمی‌باشد [۲۲,۲۱].

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در قطب جنوب در فصول سال، آب‌های سرد و کم شور در لایه‌های سطحی دریا مشاهده می‌شود که آن به دلیل وجود پوشش یخی در سطوح لایه‌های سطحی آب قطب جنوب می‌باشد و باعث می‌شود در سطح آب شوری کم‌تر دیده شود. ولی در اعماق میانی توده‌های با شوری بالا مشاهده می‌شود. از پراکندگی نقاط مشخص‌است که در این اعماق، وارونگی شوری و لایه ترموکلاین وجود دارد. هنگامی که به آب‌های سطحی نزدیک می‌شویم، دوباره یکنواختی توده‌های آب دیده می‌شود که به‌دلیل انطباق با لایه اختلاط می‌باشد [۲۳].

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصه‌های محیطی و هیدروفیزیکی آب دریا در منطقه هدف واقع در ناحیه شرقی قطب جنوب مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج قابل توجهی استخراج گردید که با غالب مطالعات این حوزه که غالبا در حوزه آب‌های مناطق حاره‌ای و جنب حاره‌ای انجام شده‌است، تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دارد. در ادامه چند مورد از نتایج برجسته و منحصربفرد این پژوهش در حوزه محیط‌شناسی هیدروفیزیکی زیر آب در منطقه مورد مطالعه بطور خلاصه لیست می‌شود:

- بررسی الگوهای دما در فصول مختلف سال نشان می‌دهد، لایه‌بندی ستون آب از سطح تا عمق به طور غیرخطی تغییر می‌کند. شکل عمومی الگوها در فصل زمستان نسبت به سایر فصول سال کمی متفاوت است. در همه فصول یک لایه سطحی هم‌دما شکل می‌گیرد که کم‌ترین ضخامت آن در فصل بهار است (۲۰ متر) و با گذشت فصل سال عمق آن افزایش می‌یابد به طوری که ضخامت این لایه در نیمه دوم سال به حدود ۵۰ متر می‌رسد.

نکته جالب توجه در این مطالعه این است که در منطقه مورد مطالعه، در زیر لایه سطحی دو لایه دماشیب[1] شکل می‌گیرد که در دماشیب بالایی برخلاف عرض‌های جغرافیایی میانی، در بیش‌تر طول سال دما در لایه دماشیب با عمق افزایش می‌یابد. این دماشیب از زیر لایه

[1] Thermocline

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

هم‌دمای سطحی تا عمق حدود ۵۰۰ متر امتداد یافته است. اما در دماشیب زیرین که از عمق حدود ۵۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر امتداد می‌یابد، روند تغییرات دما با عمق کاهشی است.

نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه این است که در فصل زمستان سه لایه دماشیب متفاوت روی یکدیگر تشکیل می‌شود. در این فصل در زیر لایه هم‌دمای سطحی یک دماشیب فصلی کاملا متفاوت بین عمق‌های ۴۰ تا ۶۰ متر شکل می‌گیرد به طوری که مشابه عرض‌های جغرافیایی میانی، دما با عمق به سرعت کاهش می‌یابد اما در زیر این لایه روند کلی تغییرات دما با عمق مشابه سایر فصول سال (و متفاوت با عرض‌های میانی) است.

از عمق حدود ۲۰۰۰ متر به پایین یک لایه پایدار تقریبا هم‌دما شکل گرفته است که پیش‌بینی می‌شود با توجه به عمق زیاد آن در هیچ زمانی دست‌خوش تغییرات اقلیمی نبوده و شکل آن برای هزاران سال هیچ تغییری نکرده باشد.

با توجه به شکل منحصربفرد استخراج شده برای لایه‌بندی دمایی آب در منطقه مورد مطالعه انتظار می‌رود سایر مشخصه‌های محیطی که عمدتا از الگو دما پیروی می‌کنند نیز در این منطقه دارای شکل منحصربفردی باشند که به ندرت در مطالعات این گروه پژوهشی و یا سایر پژوهشگرانی که عمدتا در آب‌های حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای مطالعه کرده‌اند یافته می‌شود.

بررسی و تحلیل جریان‌های سطحی و زیرسطحی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد هرچند مقادیر سرعت جریان در همه الگوهای جریان کوچک است اما نحوه تغییرات آن در امتداد عمق، به ویژه در عمق‌های بیش‌تر از ۱۰۰ متر، از الگو دما پیروی می‌کند. ضعیف بودن جریان و همبستگی آن با الگو دما دلیلی روشن است تا بتوان گردش دماشوری را عامل اصلی ایجاد جریان‌های زیرسطحی در منطقه هدف در نظر گرفت.

بررسی تغییرات الگوهای شوری آب در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که به جز فصل تابستان که میزان شوری از سطح تا عمق حدود ۱۰۰۰ متر روند افزایشی دارد، در زیر این عمق شوری تقریبا ثابت است. در سایر فصول سال میزان شوری از سطح تا عمق ۵۰۰ متری افزایش می‌یابد و در عمق‌های بیش‌تر از ۵۰۰ متر تقریبا تغییرات شوری قابل چشم‌پوشی است. بررسی دقیق‌تر الگوهای شوری نشان می‌دهد یک کاهش جزیی در میزان شوری (کم‌تر از۱ پی‌اس‌یو) از عمق ۲۰۰۰ متر به پایین قابل مشاهده است.

در این پژوهش، تغییرات سرعت صدا با عمق با استفاده روابط صوتین زیر آب استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد در فصول بهار تا پاییز الگوی کلی تغییرات سرعت صدا نسبت به عمق تقریبا ثابت است. در الگوی مربوط به این فصول چند ویژگی بارز وجود دارد:

- میزان سرعت صدا از سطح تا نزدیک بستر دریا حدود ۶۰ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد که این میزان تغییر نسبت به سایر نقاط کره زمین چشمگیر است.
- روند افزایشی سرعت صدا نسبت به عمق در دو مرحله است، یکی در لایه سطحی که شیب منحنی تندتر است و دیگری در زیر لایه سطحی که تقریبا دارای شیب ملایم وثابت است.
- در سه فصل ابتدای سال در هیچ عمقی کال صدایی شکل نمی‌گیرد.

در فصل زمستان الگوی سرعت صدا دارای یک ویژگی متفاوت نسبت به سایر فصول سال است. آنچه اهمیت مطالعه صوتین زیر آب را در این فصل نسبت به سایر فصول برجسته‌تر می‌کند این است که در زمستان در عمق حدود ۴۰ تا ۶۰ متر یک کال صدایی فصلی تشکیل می‌شود که روند تقریبا یکنواخت الگوی صدا این منطقه را بر هم می‌زند و یک گسست عمودی در لایه‌بندی صوتین زیر آب ایجاد می‌کند.

این نوع لایه‌بندی صوتین خاص در فصل زمستان را می‌توان با لایه‌بندی دما در این فصل مرتبط دانست، زیرا همان‌طور که در تحلیل الگوهای دما گفته شد، در فصل زمستان یک ترموکلاین فصلی در عمق ۴۰ تا ۶۰ متر

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]

شکل می‌گیرد که دما به سرعت با عمق کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیت کشف این پدیده در منطقه مورد نظر از جنبه کاربرد تجهیزات صوتین در زیر آب، پژوهش‌های مفصلی در حوزه انتشار پرتوهای صوتین زیر آب را می‌طلبد.

در این پژوهش الگوی سرعت صدا نشان داد، که در تمام فصول سال روند تغییرات سرعت صدا از دما تبعیت می‌کند. در نتیجه می‌توان به کمک تغییرات دما، نحوه تغییرات سرعت صدا را پیش بینی کرد. هم‌چنین در فصل زمستان نشان از تغییراتی به دلیل لایه‌های مختلف ترموکلاین به طور واضح نمایان شده‌است. با وجود این تغییرات هیچ کال صدایی در ایستگاه مورد نظر در قطب جنوب قابل مشاهده نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر پشتیبانی معنوی شده‌است و لذا قدردانی به عمل می‌آید.

تضاد منافع

هیچ گونه تضاد منافعی توسط نویسنگان بیان نشده‌است.

فهرست منابع

[1] M. Heidari, M. Khalilabadi, A. Bidokhti, “Monthly sea level variations in the northern part of Persian Gulf,” Journal of Aquatic Ecology, vol. 1, no. 3, pp. 10-20, 2012.
[2] M. Khalilabadi, “2D Modeling of wave propagation in shallow water by the method of characteristics,” Archives of Acoustics, vol. 47, no. 3, pp. 407–412, 2022.
[3] M. Khalilabadi, S. Hosseini, M. Akbarinasab, “Numerical simulation of the effect internal tide on the propagation sound in the Oman Sea,” Journal of the Earth and Space Physics, vol. 44, no. 1, pp. 215-225, 2018.
[4] M. Khalilabadi, “Internal wave generation in the gulf of Oman (outflow of Persian Gulf),” Indian Journal of Geo-Marine Sciences , vol. 44, no. 3, pp. 519-527, 2015.
[5] M. Khalilabadi, H Shahmirzaee, S Daneshmehr, “Propagation of ultrasonic radiation in the presence of seabed topography in the North Indian Ocean,” Journal of Oceanography, vol. 14, no. 54, pp. 87-99, 2023.
[6] K. Mackenzie, “Nine-term equation for sound velocity in the ocean, Journal of Acoustics Society of America, vol. 70, pp. 807-812, 1981.
[7] M. Khalilabadi, H. Shahmirzaei, S. Danesh-mehr, “Underwater acoustic modeling in the Gulf of Oman,” Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 10, no. 2, pp. 21-34, 2023.
[8] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders, “Fundamentals of Acoustics, 4th edition,” John Wiley & Sons, pp. 135-149, 2000.
[9] M. Levy, "Encyclopedia Britannica," https://www. Brita nnica.com, [Accessed 2025].
[10] S. Mollaesmaeilpour, M. Mahdizadeh, E. Hasanzade , M. Khalilabadi, “The study of hydrophysical properties of the northern Arabian Sea during monsoon: A numerical study,” Hydrophysics, vol. 5, no. 1, pp. 47-59, 2019.
[11] "Iran lays claim to a portion of Antarctica", https://snn.ir/003b13, [Accessed 2025].
[12] M. Khalilabadi, O. Mahpeykar, “Numerical modelling the effect of wind on water level and evaporation rate in the Persian Gulf,” International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 5, no. 1, pp. 47-53, 2021.
[13] "Iran to establish a station in Antarctica", https://jamejamonline.ir/002ofz, [Accessed 2025].
[14] "Iran's ability to assert sovereignty over a section of Antarctica", https://www.tabnak.ir/ 001Gyz. [Accessed 2025].
[15] A. Ghorbani, M. Khalilabadi, “Positioning using classification and regression: case study of Oman Sea,” International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 35-41, 2020.
[16] S. Zereshkian , D. Mansoury, “A study on the feasibility of using solar radiation energy and ocean thermal energy conversion to supply electricity for offshore oil and gas fields in the Caspian Sea,” RenewableEnergy, vol. 163, pp. 66-77, 2021.
[17] M. Khalilabadi, S. Daneshmehr, “Study of sound speed profile and formation of sound channels in deep waters of North Indian Ocean,” Journal of the Acoustical Society of Iran, vol. 11, no. 2, pp. 27-32, 2024.
[18] "General Bathymetric Chart of the Oceans", [Online]. Available: https://www.gebco.net/data _and_products/ gridded_bathymetry_data, [Accessed 2025].
[19] "Climate Data Store", https://cds.climate.coper nicus.eu, [Accessed 2025].
[20] "Hybrid Coordinate Ocean Model", https://tds .hycom.org/thredds/catalogs/GLBy0.08/expt_93.0.html, [Accessed 2025].
[21] M. Khalilabadi, “Tide–surge interaction in the Persian Gulf, strait of Hormuz and the Gulf of Oman,” Weather, vol. 71, pp. 256-261, 2016.
[22] M. Khalilabadi, “Underwater terrain and gravity aided inertial navigation based on Kalman filter,” International Journal of Coastal and Offshore Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 15-21, 2022.
[23] M. Khalilabadi, S. Daneshmehr, M. Akbarnezhad-Baie, “Modeling of water fronts in the Makran coast,” Hydrophysics, vol. 9, no. 2, pp. 27-39, 2024.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-12]