

(Research Article)
Study of sound speed profile and formation of sound channels in deep waters of North Indian Ocean

M.R. Khalilabadi, S. Daneshmehr*

Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar University of Technology

Received: 2023/10/09, Accepted: 2023/12/24

Abstract

In this research, an attempt has been made to observe the seasonal changes of hydrophysical variables by using temperature and salinity data relative to depth during a 20-year statistical period in the Indian Ocean and calculating the sound speed profile. Using Mackenzie's formula, the speed of sound in the studied area has been calculated and analyzed. Seasonal changes in the sound profile of the Indian Ocean occur regularly throughout the year. These changes are mostly related to factors such as ocean currents, weather conditions and changes in water level. By drawing the profiles of these data, it can be seen that sea water has density stratification and seasonal and permanent temperature gradients and as a result, seasonal and permanent acoustic channels are formed in the deep ocean.

Keywords: Density stratification, Sound channel, Sound speed, Indian Ocean, Temperature gradient.

pp. 27-32 (In Persian)

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

بررسی نیمرخ سرعت صدا و شکل‌گیری کال‌های صدا در آب‌های عمیق اقیانوس هند شمالی

محمد رضا خلیل‌آبادی، سعید دانش‌مهر*

مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

چکیده

در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از داده‌های دما و شوری نسبت به عمق، طی یک دوره آماری ۲۰ ساله در اقیانوس هند و محاسبه نیمرخ سرعت صدا، تغییرات فصلی متغیرهای هیدروفیزیکی مشاهده شود. با استفاده از فرمول مکنزی، سرعت صدا در منطقه مورد مطالعه، محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تغییرات فصلی در نیمرخ صدای اقیانوس هند به صورت مرتب در طول سال رخ می‌دهد. این تغییرات بیش‌تر به عواملی مانند جریانات اقیانوسی، شرایط آب و هوایی و تغییرات در سطح آب در ارتباط هستند. با ترسیم نیمرخ‌های این داده‌ها مشاهده می‌شود که آب دریا دارای چینه‌بندی چگالی است و دما شیب‌های فصلی و دایمی و در نتیجه آن کال‌های (کانال‌های) صوتی فصلی و دایمی در اعماق اقیانوس تشکیل می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: چینه‌بندی چگالی، کال (کانال) صدا، سرعت صدا، اقیانوس هند، دما شیب.

۱. مقدمه

ایجاد باران‌های فصلی و هم‌چنین جریان‌های آب‌های گرم استوایی می‌شود. عمق اقیانوس هند به طور میانگین ۳۸۴۰ متر می‌باشد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های میدانی اقیانوس هند، متغیرهای هیدروفیزیکی و صوتی در چهار فصل، سپس نحوه انتشار صدا در لایه وارونگی سرعت صدا، که بدلیل جریان نفوذی بوجود آمده، مورد مطالعه قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه از یک طرف به خلیج عمان، که یکی از مناطق تقریباً شور دنیا است، و از طرف دیگر به آب‌های آزاد، که دارای شوری نسبتاً پایینی در قیاس با خلیج عمان است، متصل می‌باشد [۲].

۲. مواد و روش‌ها

سرعت صوتی در محیط فقط به دما، شوری و عمق بستگی دارد. سرعت صوتی یکی از عامل‌های مهمی است که در ورودی الگوهای صوتی، برای بررسی نحوه انتشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. محیط دریا، محیطی بسیار ناهمگون می‌باشد. این ناهمگون‌های در راستای قائم شامل تغییرات دما و شوری است. در اقیانوس‌شناسی و تحقیقات

اخیراً روش‌های صوتی برای مخابرات زیرآبی و مشاهدات از راه دور دریاها و اقیانوس‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های دما و شوری نسبت به عمق، طی یک دوره ۲۰ ساله در اقیانوس هند، نیمرخ سرعت صدا و تغییرات فصلی متغیرهای هیدروفیزیکی محاسبه شده است. این پژوهش در محدوده جغرافیایی ۲۱/۶ درجه شمالی و ۶۱/۷ درجه شرقی، شامل عمق ۳۰۰۰ متر در اقیانوس هند، انجام شده است. این اقیانوس گرم‌ترین حوزه اقیانوسی جهان به شمار می‌آید (نمونه بارز آن خلیج فارس است که از شاخه‌های این اقیانوس به شمار می‌آید و بر طبق آمار گرم‌ترین ناحیه آبی جهان با ۳۲ درجه سلسیوس می‌باشد) [۱]. از جمله مهم‌ترین تاثیرات این اقیانوس ایجاد بادهای باران‌آور موسمی است که در سرتاسر جنوب شبه قاره هند و آسیای جنوب شرقی باعث

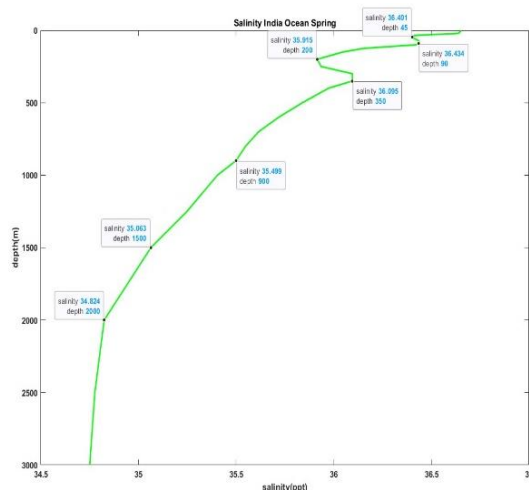
* نویسنده پاسخگو: mehr@sbu.ac.ir

انجام می‌گیرد. برای الگوسازی متغیرهای فیزیکی آب دریا نیاز به شناسایی الگوهای اقیانوسی و بررسی آن‌ها می‌باشد. لذا در این پژوهش نیاز است که ابتدا الگوهای عددی اقیانوسی مورد بررسی قرار گیرند و از بین آن‌ها الگوی مناسب منطقه مورد نظر برای متغیرهای فیزیکی انتخاب شده و پس از بومی‌سازی شدن با استفاده از آن نیمرخ سرعت صدا الگو شود. داده‌های اولیه ذکر شده به عنوان شرایط اولیه به الگو اعمال می‌شود و با اعمال معادله سرعت صدا، در نهایت خروجی الگو به صورت نیمرخ سرعت صدا برای نقاط مختلف اقیانوس حاصل می‌شود [۵-۶].

با استخراج داده‌ها و ورود این اطلاعات به فرمول مکنزی می‌توان نیمرخ سرعت صدا را در ایستگاه مورد نظر برای تمامی فصول سال محاسبه و ترسیم نمود. عبارتی ساده و تجربی برای سرعت صدا برگرفته از مطالعه مکنزی می‌باشد [۷].

۳. نتایج

با استخراج داده‌ها، نیمرخ دما بر حسب عمق و نیمرخ شوری نسبت به عمق در منطقه مورد مطالعه ترسیم شده است. این نیمرخ‌ها به همراه توپوگرافی منطقه، به عنوان ورودی نیمرخ سرعت صدا مورد استفاده قرار گرفته است (شکل‌های ۲ الی ۱۳).

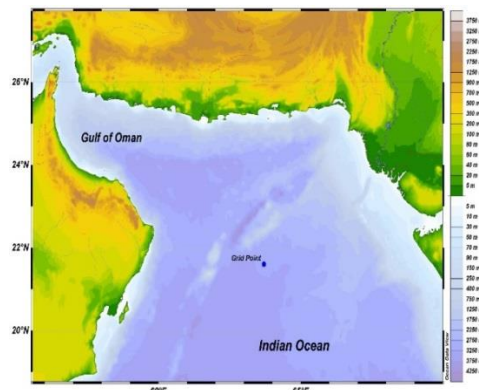


شکل ۲ نیمرخ شوری نسبت به عمق در فصل بهار اقیانوس هند.

نیمرخ دما در فصل زمستان و بهار نوسانات دمایی را نشان

دریایی، تپ صوتی (پالس آکوستیکی) به طور گسترده برای تحقیقات خصوصیات بستر و اندازه‌گیری جریان‌ات و امواج استفاده می‌شود [۳].

این پژوهش در محدود جغرافیایی ۲۱٫۶ درجه شمالی و ۶۱٫۷ درجه شرقی که شامل عمق ۳۰۰۰ متر در اقیانوس هند می‌باشد انجام شده است. این اقیانوس هم‌چنین گرم‌ترین حوزه اقیانوسی جهان به شمار می‌آید (نمونه بارز آن خلیج فارس است که از شاخه‌های این اقیانوس به شمار می‌آید و بر طبق آمار گرم‌ترین ناحیه آبی جهان با ۳۲ درجه سلسیوس می‌باشد). از جمله مهم‌ترین تاثیرات این اقیانوس ایجاد بادهای باران‌آور موسمی است که در سرتاسر جنوب شبه قاره هند و آسیای جنوب شرقی باعث ایجاد باران‌های فصلی و هم‌چنین جریان آب‌های گرم استوایی می‌شود. عمق اقیانوس هند به طور میانگین ۳۸۴۰ متر می‌باشد.



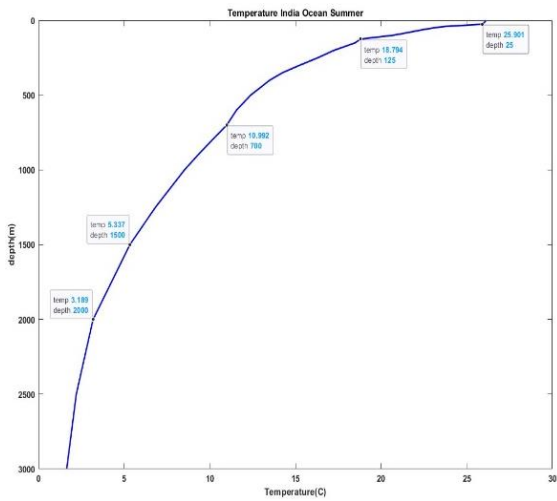
شکل ۱ منطقه مورد مطالعه در اقیانوس هند.

اطلاعات متغیرهای هیدروفیزیکی اقیانوس یکی از مهمترین مسائل برای محقق شدن هدف مورد نظر این پژوهش می‌باشد. از جمله این متغیرها می‌توان به دما، شوری و عمق اشاره کرد.

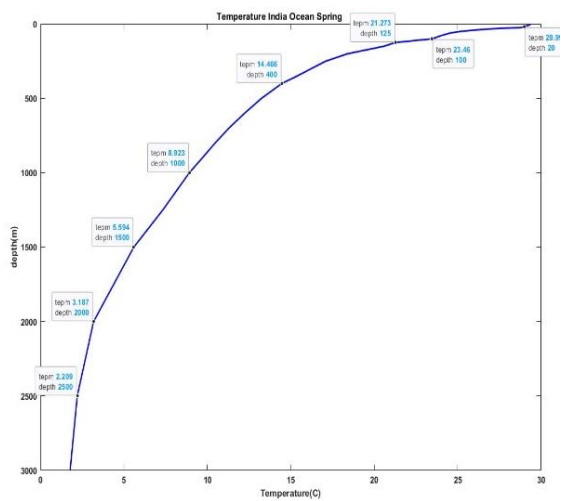
این اطلاعات توسط ایستگاه‌های مستقر در دریا اندازه‌گیری شده و با دسترسی به این اطلاعات و تهیه عملکرد و دستورات لازم می‌توان تغییرات متغیرهای هیدروفیزیکی مورد نظر را تجزیه و تحلیل نمود. سپس با داده‌های دما و شوری، نیمرخ صدا برای هر چهار فصل سال ترسیم شده است [۴]. بررسی نیمرخ سرعت صدا در اقیانوس هند با استفاده از الگوسازی متغیرهای فیزیکی

افزایش سرعت باد و کاهش تابش خورشید است که

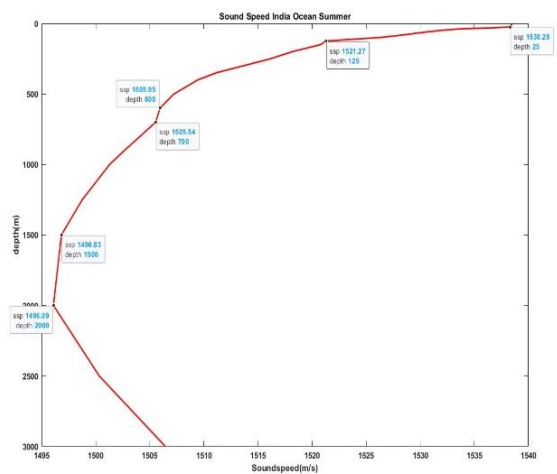
می دهد و آن به دلیل وجود باران های فصلی و به علت



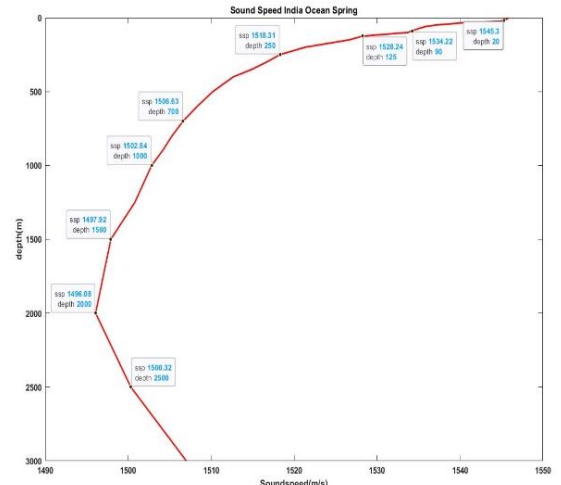
شکل ۶ نیمرخ دما نسبت به عمق در فصل تابستان اقیانوس هند.



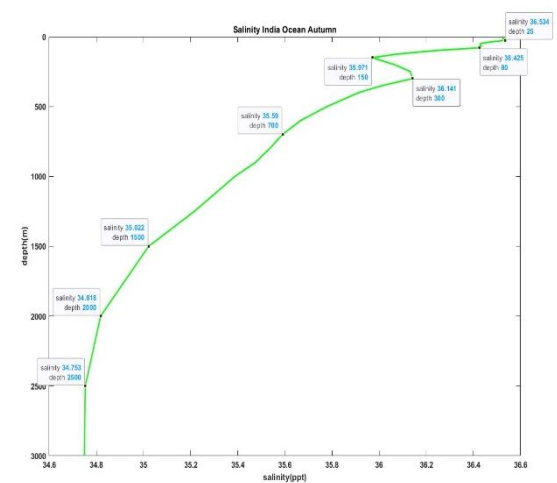
شکل ۳ نیمرخ دما نسبت به عمق در فصل بهار اقیانوس هند.



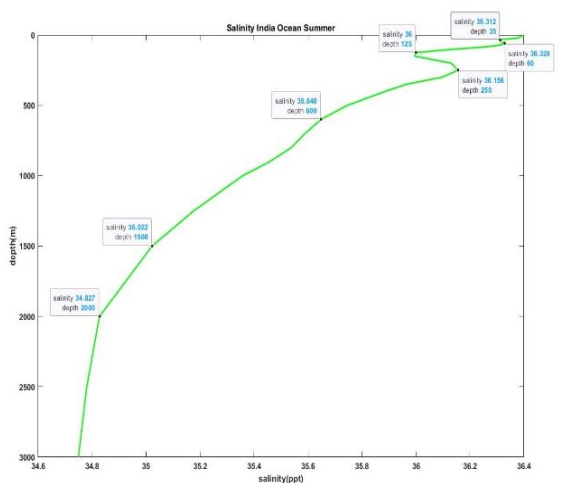
شکل ۷ نیمرخ سرعت صدا نسبت به عمق در تابستان اقیانوس هند.



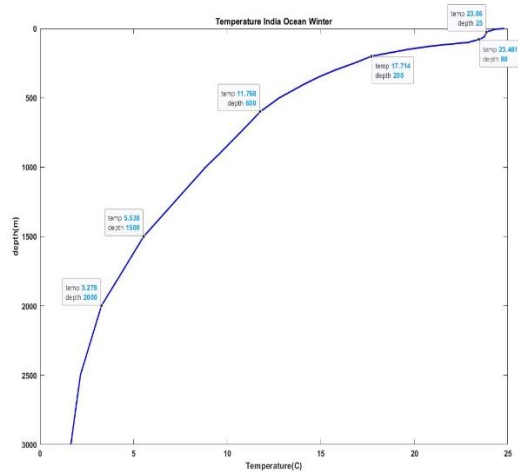
شکل ۴ نیمرخ سرعت صدا نسبت به عمق در فصل بهار اقیانوس هند.



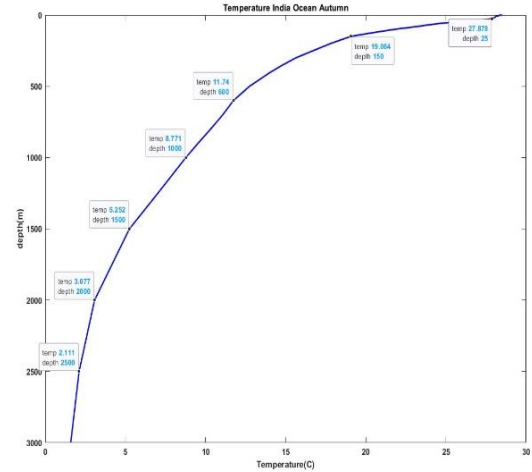
شکل ۸ نیمرخ شوری نسبت به عمق در فصل پاییز اقیانوس هند.



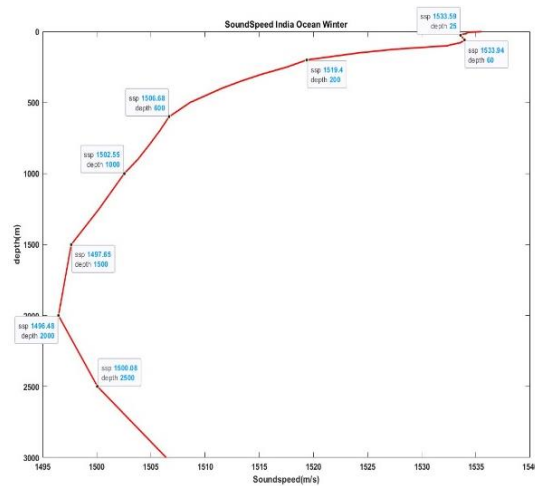
شکل ۵ نیمرخ شوری نسبت به عمق در فصل تابستان اقیانوس هند.



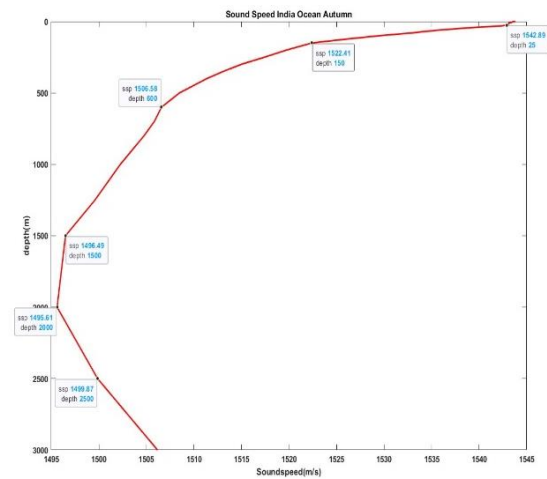
شکل ۱۲ نیمرخ شوری نسبت به عمق در فصل زمستان اقیانوس هند.



شکل ۹ نیمرخ دما نسبت به عمق در فصل پاییز اقیانوس هند.



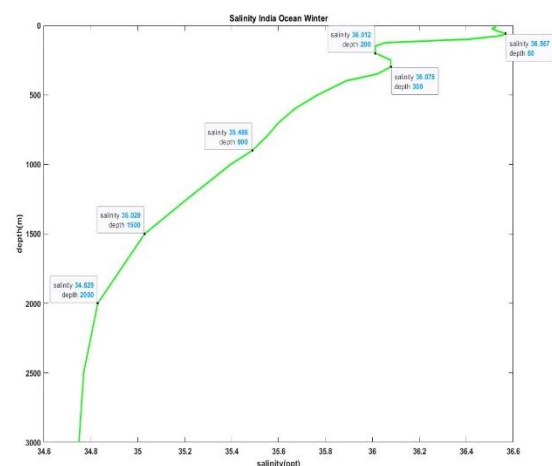
شکل ۱۳ نیمرخ سرعت صدا نسبت به عمق در فصل زمستان اقیانوس هند.



شکل ۱۰ نیمرخ سرعت صدا نسبت به عمق در فصل پاییز اقیانوس هند.

با توجه به تغییرات گرمایی بالاترین مقدار دما در عرض های بالای سطح اقیانوس در فصل تابستان و پاییز دیده شد [۸-۹].

در نیمرخ شوری در عمق ۲۰۰ تا ۳۵۰ متری، یک لایه ترموکلاین فصلی تشکیل شده است. هم چنین در ۲۰۰۰ متری ترموکلاین اصلی قابل مشاهده می باشد (شکل های ۲ و ۱۲). با استفاده از فرمول مکنزی و ورودی داده های دما، شوری و عمق، محاسبه سرعت صدا انجام شد و نیمرخ آن ترسیم گردید (شکل های ۴ و ۱۳). در عمق ۸۰ متری نیمرخ سرعت صدا در فصل زمستان و بهار نشان داده می شود که ترموکلاین فصلی تشکیل می گردد. هم چنین در عمق ۱۵۰۰ متری کال (کانال) صوتی ایجاد گردیده و ترموکلاین دایمی قابل مشاهده می باشد [۱۰]. سرعت صدا در لایه ترموکلاین فصلی، بیشترین مقدار و



شکل ۱۱ نیمرخ دما نسبت به عمق در فصل زمستان اقیانوس هند.

موجب افزایش عمق لایه اختلاط می شود، در نتیجه باعث کاهش دما در این فصل ها می گردد (شکل های ۳ و ۱۱).

نیم‌رخ‌های این داده‌ها مشاهده می‌شود که آب دریا دارای چین‌بندی چگالی است و دامشیب‌های فصلی و دائمی و در نتیجه آن کال‌های (کانال‌های) صوتی فصلی و دائمی در اعماق اقیانوس تشکیل می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر (مجمع دانشگاهی هوادریا) پشتیبانی گردیده شده است.

تضاد منافع

هیچ گونه تضاد منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

فهرست منابع

- [1] S. Zereskian, 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," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 66-77, 2021.
- [2] M. Heidari, M.R. 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.
- [3] A. Ghorbani, M.R. 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.
- [4] M. Khalilabadi, H. Shahmirzaei, S. Daneshmehr, "Underwater acoustic modeling in the Gulf of Oman," *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, vol. 10, no. 2, pp. 21-34, 2023.
- [5] L.E. Kinsler, "Fundamentals of Acoustics," Fifth edition, Wiley, 2000.
- [6] M.R. 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.
- [7] K.V. Mackenzie, "Nine-term equation for sound speed in the ocean," 1981.
- [8] M.R. 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.
- [9] M.R. Khalilabadi, "Tide-surge interaction in the Persian Gulf, Strait of Hormuz and the Gulf of Oman," *Weather*, vol. 71, pp. 256-261, 2016.
- [10] M.R. Khalilabadi, "Underwater Terrain and Gravity aided inertial navigation based on

در لایه مختلط و نواحی عمیق کم‌ترین مقدار را داراست. اگر محیط سیالی دارای حباب‌های هوا باشد، به دلیل اختلاف چگالی هوا و آب دریا، باعث تغییر بسامد شناوری امواج داخلی می‌گردد. در اعماق زیاد اقیانوس، مقادیر بسامد شناوری به تدریج کاهش یافته که منجر به کاهش تاثیر امواج داخلی بر مقدار سرعت صدا می‌گردد [۱۱-۱۲].

۴. بحث

شکل‌های ۴، ۷، ۱۰ و ۱۳ روند تغییرات سرعت صدا در ایستگاه مورد نظر در طی یک سال را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در بخش بزرگنمایی این اشکال مشاهده می‌شود، توده آب شور و گرم اقیانوس هند به دلیل داشتن چگالی بالاتر نسبت به محیط اطراف در اعماق پایین‌تر داخل اقیانوس هند گسترش می‌یابد [۱۳-۱۴]. در فصل زمستان به علت افزایش سرعت باد و کاهش تابش خورشید عمق لایه اختلاط افزایش می‌یابد و در نتیجه در این فصل، محیط اقیانوس هند به صورت یکنواخت می‌گردد. در فصل بهار توده آب گرم و شور خلیج فارس با چگالی کم‌تری نسبت به آب‌های اعماق اقیانوس از سمت تنگه هرمز وارد محیط اقیانوس می‌شود و چون این توده چگالی کم‌تری نسبت به محیط آب‌های اطراف دارد، بنابراین در اعماق میانی شروع به نفوذ و گسترش می‌نماید [۱۵-۱۶]. در کل اقیانوس هند در فصل بهار و پاییز، در ایستگاه مورد نظر آب‌های سرد و نسبتاً کم شور در اعماق مشاهده می‌شود. ولی در اعماق میانی توده‌های با شوری بالا و نسبتاً گرم مشاهده می‌شود. از پراکندگی نقاط پیداست در این اعماق بایستی وارونگی شوری و دما آب‌های لایه با وارونگی شوری و لایه ترموکلاین باشد. در نزدیکی آب‌های سطحی، دوباره یکنواختی توده‌های آب دیده می‌شود که به دلیل انطباق با لایه اختلاط می‌باشد [۱۷-۱۸].

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش نیم‌رخ 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 پیش‌بینی کرد. با ترسیم

- Kalman filter,” *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 15-21, 2022.
- [11] M.R. Khalilabadi, M. Akbari Nasab, “Study of static stability and double diffusion in the Oman Sea,” *Iranian Journal of Marine Science and Technology*, vol. 18, no. 71, pp. 11-19, 2014.
- [12] M.R. Khalilabadi, M. Peimani, N. Kharestani, “Simulation of the effect of the holey-sock drogue on the drifter performance,” *Journal of Oceanography*, vol. 13, no. 50, pp. 107-116, 2022.
- [13] M.R. Khalilabadi, P. Alamdarloo, “Modeling marine currents in the gulf of Oman using the Mike 3D model,” *Journal of Environmental Science Studies*, vol. 5, no. 1, pp. 2404-2412, 2020.
- [14] M.R. 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.
- [15] M.R. Khalilabadi, S.H. 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.
- [16] M.R. 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.
- [17] N. Hatami Bavarsad, D. Mansoury, M.R. Khalilabadi, “Monitoring of atmospheric low pressures and its impact on the Caspian Sea water level,” *Hydrophysics Journal*, vol. 3, pp. 51-65, 2016.
- [18] S. Mollaesmaeilpour, M.M. Mahdizadeh, E. Hasanzade, M.R. 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.