

The difference in the stability of the water column and the speed of sound from the north to the south of the Persian Gulf in winter

Mohammadpour, F.¹  | Soyuf Jahromi, M.²   | Hamzei, S.³ 

1. Master Science of physical oceanography, Department of Nonliving Resources of Atmosphere and Ocean, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
2. Associate Professor of physical oceanography, Department of Nonliving Resources of Atmosphere and Ocean, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
3. Assistant Professor of physical oceanography, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir

(Received: 10 Aug 2024, Revised: 05 Sep 2024, Accepted: 28 Sep 2024, Published online: 09 Apr 2025)

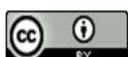
Abstract

The Persian Gulf is a semi-closed sea that leads to the Gulf of Oman and open waters through the Strait of Hormuz. The main inflow is the Indian Ocean Surface Water (IOSW), which after circulating in the Persian Gulf, Persian Gulf Water (PGW) is created. It was used 11 stations of a valid data set, temperature and salinity, of wintertime ROPME1992 Cruise, which was prepared from the National Oceanographic Research Institute to investigate temperature and salinity changes by measurements and density, sound speed, and water column stability changes caused by software calculations (Ocean Data View) due to the inflow and outflow of Persian Gulf. The measured stations started from Iranian Waters (Lavan Island) and continued until the United Arab Emirates (Sir Bani Yas Island). The results showed water temperature changes in winter between 17.56°C and 20.25°C, salinity changes from 38.48 psu to 43.93 psu, potential density anomaly changes from 27.47 kg/m³ to 19.32 kg/m³ and the changes of sound speed are 1521.7 m/s to 1528 m/s. Southern shallow waters have lower temperature, higher salinity and density. In density changes, the role of salinity is greater than temperature, but in the changes of sound speed, temperature has a greater contribution in the north of the Persian Gulf and in the south of it, salinity has a greater contribution. The highest speed of sound is related to the north and the lowest is related to the middle and south of the Persian Gulf. Near the coasts of Iran, at the depth more than 30 meters, a subsurface flow of warm water is observed, which is not affected by the surface layers that have cooled in winter, and still has the effect of Indian Ocean Surface Water (IOSW). The presence of CE1 eddy, at station 4, at a depth of about 30 meters is completely visible, which is due to the return of the IOSW flow. Although the water column from station 5 to 9 is mixed and relatively homogeneous, it is horizontally heterogeneous. Also, the results clearly show that the two different flows of IOSW (in the north) and PGW (in the south) cause different water column stability regimes, so that in the northern stations, the diffusive regime and in the southern stations, the finger regime plays a greater role in creating double diffusion convection. In the southern stations, layers consisting of static instability are seen more than layers consisting of double diffusion convection in the water column. In conclusion, the diffusive regime generally plays a greater role in creating double diffusion convection in this cross section of The Persian Gulf in winter.

Keywords: Persian Gulf, Stability, Temperature, Salinity, Density, Speed of sound, ODV

Cite this article: Mohammadpour, F., Soyuf Jahromi, M., & Hamzei, S. (2025). The difference in the stability of the water column and the speed of sound from the north to the south of the Persian Gulf in winter. *Journal of the Nivar*, 49(128-129), 19-33. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.472074.1304>

E-mail: (1) farzaneh.mohammadi.118@gmail.com (3) s_hamzei@inio.ac.ir



تفاوت پایداری ستون آب و سرعت صوت از شمال به طرف جنوب خلیج فارس در فصل زمستان

فرزانه محمدپور^۱ | مریم سیوف جهرمی^۲ | صمد حمزه‌ئی^۳

۱. کارشناسی ارشد اقیانوس‌شناسی فیزیکی، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲. دانشیار فیزیک‌دریا، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳. استادیار فیزیک‌دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰)

چکیده

خلیج فارس دریایی نیمه بسته است که از طریق تنگه‌ی هرمز به خلیج عمان و آب‌های آزاد راه پیدا می‌کند و جریان ورودی به آن به صورت آب سطحی اقیانوس هند (IOSW) است که بعد از چرخیدن در خلیج به صورت آب خلیج فارس (PGW) خارج می‌شود. از ۱۱ ایستگاه داده‌های معتبر دما و شوری گشت زمستانه ROPME1992، که از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی تهیه شده بود، استفاده شد تا تغییرات دما و شوری ناشی از اندازه‌گیری و تغییرات چگالی، سرعت صوت و پایداری ستون آب ناشی از محاسبات نرم افزاری (Ocean Data View) در اثر جریان ورودی و خروجی خلیج فارس مورد بررسی قرار گیرد. ایستگاه‌های اندازه‌گیری از آب‌های ایرانی (جزیره لاوان) شروع و تا آب‌های امارات متحده عربی (جزیره صیر بنی یاس) ادامه می‌یافت. نتایج نشان داد تغییرات دمای آب در زمستان بین $17/56^{\circ}\text{C}$ تا $20/25^{\circ}\text{C}$ ، تغییرات شوری $38/48$ psu تا $43/93$ psu، تغییرات آنومالی چگالی پتانسیل $27/47$ تا $32/19$ kg/m^3 و تغییرات سرعت صوت $1521/7$ m/s تا 1528 m/s می‌باشد. آب‌های کم عمق جنوبی دمای کمتر و شوری و چگالی بیشتری دارند. در تغییرات چگالی نقش شوری بیش از دما است اما در تغییرات سرعت صوت، در شمال خلیج فارس دما و در جنوب آن، شوری سهم بیشتری دارد. بیشترین سرعت صوت مربوط به شمال و کمترین آن مربوط به میانه و جنوب خلیج فارس است. در نزدیکی سواحل ایران، در عمق بیش از ۳۰ متر، جریان آب گرمی به صورت زیرسطحی مشاهده می‌شود که تحت تاثیر لایه‌های سطحی که در فصل زمستان سرد شده است، نیست و هنوز اثرات آب ورودی اقیانوس هند (IOSW) را دارد. وجود پیچک CEI، در ایستگاه ۴، در عمق حدود ۳۰ متری کاملاً قابل رویت است که بر اثر بازگشت جریان IOSW است. اگرچه ستون آب از ایستگاه ۵ تا ۹، آمیخته و نسبتاً همگن است، اما از نظر افقی ناهمگن است. همچنین، نتایج به خوبی نشان می‌دهد که دو الگوی متفاوت جریان IOSW (در شمال) و PGW (در جنوب) موجب رژیم‌های مختلف پایداری ستون آب می‌شود به طوری که در ایستگاه‌های شمالی رژیم پخش و در ایستگاه‌های جنوبی رژیم انگشتی نقش بیشتری در ایجاد همرفت پخش دو گانه دارند. در ایستگاه‌های جنوبی لایه‌های متشکل از ناپایداری ایستایی بیش از لایه‌های متشکل از همرفت پخش دو گانه در ستون آب دیده می‌شود. همچنین به طور کلی در فصل زمستان رژیم پخش نقش بیشتری در ایجاد همرفت پخش دو گانه در این مقطع عرضی از خلیج فارس ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: خلیج فارس، پایداری، دما، شوری، چگالی، سرعت صوت، ODV

۱. مقدمه
یکی از بحث‌های اولیه اما مهم در علم اقیانوس‌شناسی، شناخت مولفه‌های فیزیکی آب دریاست. تغییرات زمانی و

استناد: محمدپور، فرزانه، سیوف جهرمی، مریم، و حمزه‌ئی، صمد. (۱۴۰۴). تفاوت پایداری ستون آب و سرعت صوت از شمال به طرف جنوب خلیج فارس در فصل زمستان.

مجله نیوار، ۱۲۹ (۱۲۸-۱۲۹)، ۳۳-۱۹. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.472074.1304>

رایانامه: (۱) farzaneh.mohammadi.118@gmail.com (۳) s_hamzei@inio.ac.ir



داشته باشد، لایه‌بندی تحت تاثیر دو یا چند مولفه با ضرایب پخش مولکولی متفاوت قرار می‌گیرد و ناپایداری رخ می‌دهد. علت آن پخش سریع تر مولفه دما، نسبت به شوری است. ضریب پخش مولکولی دما حدود ۱۰۰ برابر سریع تر از شوری طبق روابط (۱) و (۲) است (استوارت، ۲۰۰۸).

$$K_T = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (1)$$

$$K_S = 1.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2)$$

از این رو، لایه‌های نازک می‌توانند در حین حرکت، گرمای خود را از دست داده اما شوری خود را حفظ کنند؛ در نتیجه ساختارهای لایه‌ای موجود در نمودارهای قائم شوری برای مدت طولانی‌تری نسبت به دما حفظ می‌شود و انتظار می‌رود در نمودارهای شوری ساختارهای قائم لایه‌ها مشخص‌تر باشند (آل یاسین و همکاران، ۱۳۹۲). این ویژگی، موجب حرکات شدید و اختلاط قائم می‌شود که به آن همرفت پخش دوگانه گفته می‌شود (رودیک و کرر، ۲۰۰۳). همرفت پخش دوگانه به دو زیرمجموعه‌ی رژیم‌انگشتی و پخشی تقسیم می‌شود. هنگامی که یک لایه گرم و شور روی یک لایه آب سرد و کم‌شور قرار بگیرد رژیم‌انگشتی و هنگامی که لایه سرد و کم‌شور روی لایه گرم و شور قرار گیرد، رژیم پخشی رخ می‌دهد. در رژیم‌انگشتی شوری و در رژیم پخشی دما عامل ناپایدارکننده ستون آب است.

رودیک (۱۹۸۳) زاویه ترنر (رابطه ۳) را معرفی کرد که معمولاً هنگام مطالعه انتشار پخش دوگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و می‌تواند پایداری عمودی را ارزیابی کند (جدول ۱). روابط (۳) الی (۵) به ترتیب زاویه ترنر، ضریب تراکم شوری و ضریب انبساط دمایی را نشان می‌دهند.

$$Tu = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \Delta T - \beta \Delta S}{\alpha \Delta T + \beta \Delta S} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{R\rho - 1}{R\rho + 1} \right) \quad (3)$$

که در این رابطه، T ، دما، S شوری و $R\rho$ ، چگالی نسبی است. کمیت‌های α و β ، نیز به ترتیب ضریب تراکم شوری و ضریب انبساط دمایی هستند که بر اساس روابط (۴) و (۵) تعیین می‌شوند و ρ ، چگالی و P ، فشار است.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_{T,P} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{S,P} \quad (5)$$

مکانی مولفه‌های فیزیکی آب دریا، نقشی مهم در فعالیت سامانه‌های جوی، اقلیمی، جریان‌ات دریایی و غیره ایفا می‌کند. دما و شوری، همراه با فشار، خواص فیزیکی مهم موثر بر چگالی آب دریا هستند که در کنترل دینامیک و رفتار ترمودینامیکی دریاها و اقیانوس‌ها نقش به‌سزایی دارند (چاند و همکاران، ۲۰۰۴). توزیع دما در سطح دریا معمولاً مداری و مستقل از طول جغرافیایی است. سردترین آب‌ها نزدیکی قطب و گرم‌ترین آن‌ها در نزدیکی استواست. معمولاً در سمت ۴۰ درجه استوا، آب‌های خنک‌تر به سمت شرق می‌روند و در شمال این عرض جغرافیایی، معمولاً آب‌های سرد به طرف غرب در جریان هستند (استوارت، ۲۰۰۸). وارونگی دما، می‌تواند بیانگر تبادل آب باشد (علی اکبری بیدختی و صباغ کاشانی، ۱۳۸۲). توزیع شوری سطح آب نیز به طور معمول، مداری است. شورترین آب‌ها در عرض جغرافیایی میانی که تبخیر زیاد است، دیده می‌شوند. آب‌های کم‌شورتر، نزدیک استوا که سطح آب با بارش باران کم شور می‌شود، یا در عرض‌های جغرافیایی بالا که ذوب یخ‌ها، سطح آب را کم‌شور می‌کند، اتفاق می‌افتد (استوارت، ۲۰۰۸). شوری شاخصی اساسی برای چگالی آب محسوب می‌شود و تاثیر مستقیمی بر فرآیندهای فیزیکی آب داشته و می‌تواند در برخی از پدیده‌ها و فرآیندهای اقیانوسی موثر باشد. در حال حاضر مطالعات شوری آب دریاها بسیار پراکنده و کم است به طوری که نمی‌توان نمای مناسبی از تغییرات زمانی و مکانی شوری آب را به صورت جهانی ارائه داد (اهن و همکاران، ۲۰۰۸). آب‌های کم‌چگال در اعماق کمتر و آب‌های چگال‌تر در اعماق بیشتر قرار می‌گیرند؛ به عبارتی چگالی عمقی را تعیین می‌کند که آب در حال تعادل در آن‌جا باقی خواهد ماند.

هنگامی که شاره یا بسته‌ی آب سبک در بالای شاره‌ی سنگین قرار گیرد تمایل به حرکت قائم در ستون آب وجود ندارد و ستون آب پایداری ایستایی دارد. اما اگر شاره سنگین در بالای شاره سبک قرار گیرد، شاره سنگین فرو رفته و شاره سبک بالا می‌آید که در این حالت ستون آب توزیع چگالی ناپایدار دارد (استوارت، ۲۰۰۸). اگر شاره لایه‌بندی چگالی

که در آن SS سرعت صوت (بر حسب m/s)، T دما بر حسب $^{\circ}C$ ، S شوری (بر حسب psu) و Z عمق (بر حسب متر) است. ضرایب عبارتند از: $a=1448/96 m s^{-1}$ ، $b=4/591 C^{-1}$ ، $c=-5/304 \times 10^{-2} m s^{-1}$ ، $d=2/374 \times 10^{-4}$ ، $e=1/340 m s^{-1}$ ، $f=1/630 \times 10^{-2} s^{-1}$ ، $g=1/675 \times 10^{-2} m s^{-1}$ ، $h=-1/025 \times 10^{-2} m s^{-1}$ ، $i=1/39 \times 10^{-13} C^{-1}$ ، $j=-7/139 \times 10^{-13} C^{-1}$

اگرچه انگیزه‌ی اصلی گرایش به زمینه‌ی صوت زیر دریا و استفاده‌ی اولیه از سونار، نیازهای دفاعی و ناوبری زیر دریا بوده است ولی به مرور زمان استفاده در کاربردهای غیرنظامی و صنعتی گسترش یافته است (خدایاری رستم آباد و همکاران، ۱۳۸۹).

سرعت صوت در دریا هم از پارامترهای مهم اقیانوس‌شناسی است که به دما، شوری و فشار وابسته است و تاثیر پارامترهای دیگر بسیار کم است. حساسیت سرعت صوت نسبت به تغییرات دما، شوری و عمق قابل محاسبه است، به طوری که مقادیر تقریبی برابر افزایش $40 m/s$ به ازای $10^{\circ}C$ افزایش دما، $1/5 m/s$ به ازای افزایش $1 psu$ از شوری و $16 m/s$ به ازای افزایش 1000 متر در عمق می‌باشد (استوارت، ۲۰۰۸).

رابطه (۶)، به صورت اولیه برای محاسبه سرعت صوت استفاده می‌شود (Dushaw et al., 1993; Affatati et al., 2022):

$$SS(T, S, z) = a + bT + cT^2 + dT^3 + e(S - 35) + fz + gz^2 + hT(S - 35) + iTz^3 \quad (6)$$

جدول ۱. گستره‌ی تغییرات زاویه ترنر (Tu) بر حسب درجه و شرایطی که ستون آب تجربه می‌کند (رودیک، ۱۹۸۳).

مقدار زاویه ترنر (بر حسب درجه)	توضیحات
$45 < Tu < 45$	ستون آب به طور مضاعف پایدار است.
$45 < Tu < 90$	در ستون آب رژیم پخشی رخ میدهد و شدیدترین حالت هنگامی رخ میدهد که Tu به 90 نزدیکتر باشد.
$45 < Tu < 90$	در ستون آب رژیم انگشتی رخ میدهد و شدیدترین حالت هنگامی رخ میدهد که Tu به 90 نزدیکتر باشد.
$90 < Tu$ و $90 < Tu$	ستون آب از نظر ایستایی ناپایدار است.

زمستان افزایش می‌یابد. اختلاف دمای آب در ماه‌های گرم و سرد به حدود $18^{\circ}C$ می‌رسد. تغییرات چگالی وابسته به تغییرات دماست. در فصل گرم سال لایه گرمایش جزئی ایجاد می‌شود. در ماه‌های گرم مقادیر دما، هدایت الکتریکی و سرعت صوت بیشینه است و کمینه‌ی آن در ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد. اما این واقعیت در رابطه با مولفه‌های شوری و چگالی برعکس است.

مجیدی نیک و دلدار (۱۳۹۴) کاربرد آمار مکانی در پهنه-بندی و تحلیل فضایی سرعت صوت را در خلیج فارس بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد با حرکت از تنگه‌ی هرمز به شمال غرب خلیج فارس، سرعت صوت در تمام لایه‌ها حدود $20 m/s$ کاهش می‌یابد و بیش‌ترین مقادیر سرعت صوت در مناطق کم عمق جنوبی و به علت افزایش شوری است. در تمام ایستگاه‌های بررسی شده توسط ایشان، سرعت صوت با

قاضی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری گشت راپمی ۱۹۹۲، به بررسی تغییرات فصلی جریان، دما و شوری و جریان‌های باقی مانده در خلیج فارس پرداختند. ایشان دریافتند در زمستان در ساختار خلیج فارس حالت همگن و پایداری شدید دیده می‌شود و شوری به بیش‌ترین میزان خود می‌رسد. همچنین تغییرات دمایی در سطح و عمق از زمستان تا بهار روند افزایشی داشته است.

حسینی و چگینی (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری CTD، در ۱۲ ایستگاه (تیرماه ۱۳۹۰ لغایت تیرماه ۱۳۹۱) به مطالعه‌ی تغییرات فصلی مولفه‌های فیزیکی و شیمیایی آب دریا در محدوده‌ی آب‌های ساحلی شبه جزیره بوشهر پرداختند. نتایج آنان نشان داد که در ماه‌های سرد سال، وجود اختلاف دمای ناچیز کم‌تر از یک درجه بین سطح و بستر موجب اختلاط کامل ستون آب می‌شود. در تابستان شوری سطحی از حدود $37 psu$ تا مقدار بیشینه‌ی حدود $41 psu$ در

ویژگی را به پیچک پادساعتگردی نسبت دادند که از آب سطحی ورودی اقیانوس هند (IOSW) به وجود می‌آید. آن پیچک از کاهش سرعت جریان ناشی می‌شد و ناپایداری افقی داشت که به تدریج موجب فراجوشی می‌شد. وجود فراجوشی در عمق بیش از ۵۰ متر به خوبی دیده می‌شد. کمینه دما برابر با $20/57^{\circ}\text{C}$ و شوری حدود ۴۰ psu در اعماق کمتری قابل مشاهده بود که بیانگر بالا آمدن آب بود. مطالعه آنان نیمه جنوبی خلیج فارس را بررسی ننموده بود. سوالی که در اینجا مطرح می‌شود آن است که آیا تفاوتی بین سواحل شمالی (آب‌های ایرانی) و جنوبی (آب‌های عربی) خلیج فارس وجود دارد؟ و در صورت وجود تفاوت، آیا می‌تواند بر پایداری ستون آب تأثیری داشته باشد یا خیر. از این رو عرض خلیج فارس با داده‌های معتبر گشت راپمی به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت تا در صورت وجود تفاوت، این موضوع قابل شناسایی باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس به طور تقریبی در ۲۴ تا ۳۰ درجه شمالی و ۴۸ تا ۵۶ درجه شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد و به عنوان امتدادی از اقیانوس هند، به صورت دریایی نیمه بسته است که از طریق تنگه‌ی هرمز به خلیج عمان، دریای عرب و اقیانوس هند متصل می‌شود. خلیج فارس طولی حدودی ۹۹۰ کیلومتر، مساحتی حدود ۲۳۹۰۰۰ کیلومتر، عمق متوسطی برابر با ۳۶ متر و حجمی حدود ۸۶۳۰ کیلومتر مکعب دارد (رینولدز، ۱۹۹۳). خلیج فارس سومین خلیج بزرگ جهان بعد از خلیج مکزیک و خلیج هادسون است (امری، ۱۹۵۶).

مهم‌ترین جریان‌های دریایی خلیج فارس، شامل جریان ورودی کم عمق خلیج عمان و جریان خروجی عمقی خلیج فارس است (جانز و اولسن، ۱۹۹۸) که در شکل ۱ (تروپیل و هانگ، ۲۰۱۰) نشان داده شده است. گردش چرخه‌ای خلیج فارس، آب‌های نسبتاً کم شور ورودی از خلیج عمان را به سمت شمال غربی و مناطق کم عمق جنوب شرقی جابجا می‌کند که در این نواحی به صورت آب‌های شورتر و چگال‌تر

افزایش عمق به علت کاهش دما کاهش می‌یابد و کانال صوتی مشاهده نمی‌شود.

محمدپور و همکاران (۱۴۰۱) پایداری ستون آب را در شرق تنگه‌ی هرمز (غرب خلیج عمان) را با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری گشت راپمی (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که بیشینه‌ی بسامد شناوری با حرکت از شمال به جنوب تنگه روند افزایشی و کمینه‌ی آن روند کاهش را طی کرده، به عبارتی پایدارترین و ناپایدارترین لایه‌ها در مقطع جنوبی تنگه هرمز مشاهده شده است. در آب‌های شمالی تا عمق ۵۳ متر و در آب‌های میانی و جنوبی تا آخرین عمق اندازه‌گیری شده ناپایداری دیده شد. در آب‌های شمالی و میانی تا آخرین عمق اندازه‌گیری شده رژیم انگشتی و در آب‌های جنوبی تا عمق ۱۲۰ متر رژیم انگشتی و در زیر آن تا آخرین عمق اندازه‌گیری شده، رژیم پخشی بیشترین سهم در ایجاد همرفت پخشی دو گانه دارد.

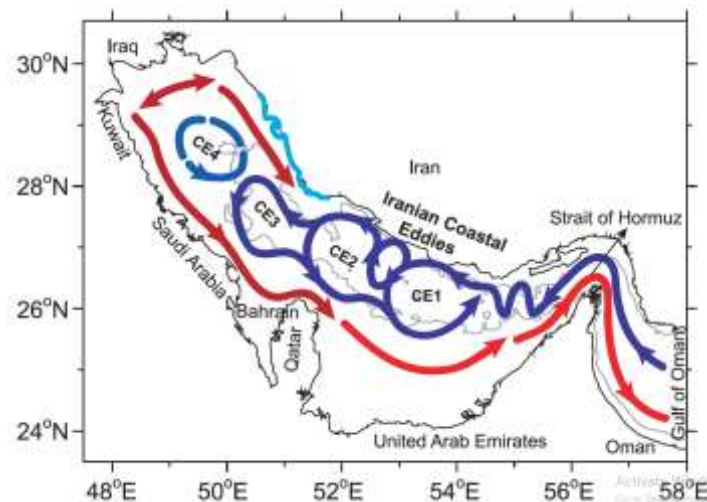
Yao و Johns (۲۰۱۰) گردش فصلی آب و فرآیند انتقال توده‌های آب در خلیج فارس و تبادل آب مابین خلیج فارس و خلیج عمان از تنگه‌ی هرمز را مورد مدلسازی HYCOM بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که آب سطحی ورودی اقیانوس هند به خلیج فارس به دو شاخه تقسیم می‌شود، شاخه‌ی اول در امتداد سواحل ایرانی به سمت شمال خلیج فارس حرکت می‌کند و شاخه‌ی دوم به سمت جنوب حرکت می‌کند. این دو شاخه سبب شکل‌گیری پیچک‌هایی پادساعتگرد در قسمت‌های جنوبی و شمالی خلیج فارس می‌شوند.

پاینده‌ی و همکاران (۱۴۰۲) تغییرات دما، شوری و چگالی آب‌های ایرانی خلیج فارس در فصل بهار (اردیبهشت ۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری کاوشگر خلیج فارس بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که در ایستگاه‌های عمود بر ساحل ایران، ستون آب تا آخرین عمق اندازه‌گیری شده، لایه‌بندی دارد که میزان لایه‌بندی در شمال آب‌های ایرانی بیشتر و یکنواخت‌تر از جنوب آب‌های ایرانی است. همچنین شرایط چگال‌گرایی از سمت ساحل ایران به طرف آب‌های میانه خلیج فارس به خوبی مشاهده می‌شود. آنان این

تبدیل شده و در امتداد محور خلیج فارس به پایین ترین نقطه آن فرو می روند و از طریق عمیق ترین قسمت در تنگه هرمز از خلیج فارس خارج می شوند (رینولدز، ۱۹۹۳). گردش در نیمه‌ی مرکزی خلیج فارس یک رفتار فصلی دارد که آب‌های ورودی سطحی تحت تاثیر نیروی کریولیس از خلیج فارس به سمت تنگه‌ی هرمز هدایت می شوند. جریان ورودی از اقیانوس هند در اواخر بهار و تابستان قوی تر می شود و از سواحل ایرانی بالاتر می رود و به سواحل امارات نزدیک تر می شود، این امر سبب پیدایش یک جبهه‌ی شور در میانه خلیج فارس می شود (کامپف و صدری نسب، ۲۰۰۵).

آب خلیج فارس با شوری معمول اقیانوسی، شوری ۳۶/۵ psu تا ۳۷ psu (شپارد و همکاران، ۲۰۱۰)، دمای ۲۲ و چگالی ۱۰۲۵/۵ (جانز و همکاران، ۲۰۰۳) تا ۱۰۲۸ (صدری نسب،

۱۳۸۹) به صورت سطحی (ساگدن، ۱۹۶۳؛ رینولدز، ۱۹۹۳) از شمال تنگه‌ی هرمز (جانز و اولسن، ۱۹۹۸) وارد خلیج فارس شده و در اثر نیروی کریولیس منحرف شده و به سمت شمال غرب خلیج فارس به موازات سواحل ایرانی حرکت می کند. در بخش غربی حوضه به سمت جنوب تغییر مسیر می دهد. در طی پیمودن این مسیر در اثر فرآیند تبخیر شوری و در نتیجه چگالی آب افزایش یافته و در نهایت این جریان پس از پیمودن بخش‌های جنوبی خلیج فارس چگال تر شده و آب با شوری ۴۰-۴۱ (شپارد و همکاران، ۲۰۱۰؛ جانز و همکاران، ۲۰۰۳) دمای ۲۲/۵ (جانز و همکاران، ۲۰۰۳) و چگالی ۱۰۲۸/۵ (جانز و همکاران، ۲۰۰۳) تا ۱۰۳۰ (صدری نسب، ۱۳۸۹) به صورت عمقی (جانز و اولسن، ۱۹۹۸؛ رینولدز، ۱۹۹۳؛ ساگدن، ۱۹۶۳) از جنوب تنگه‌ی هرمز خارج می شود.



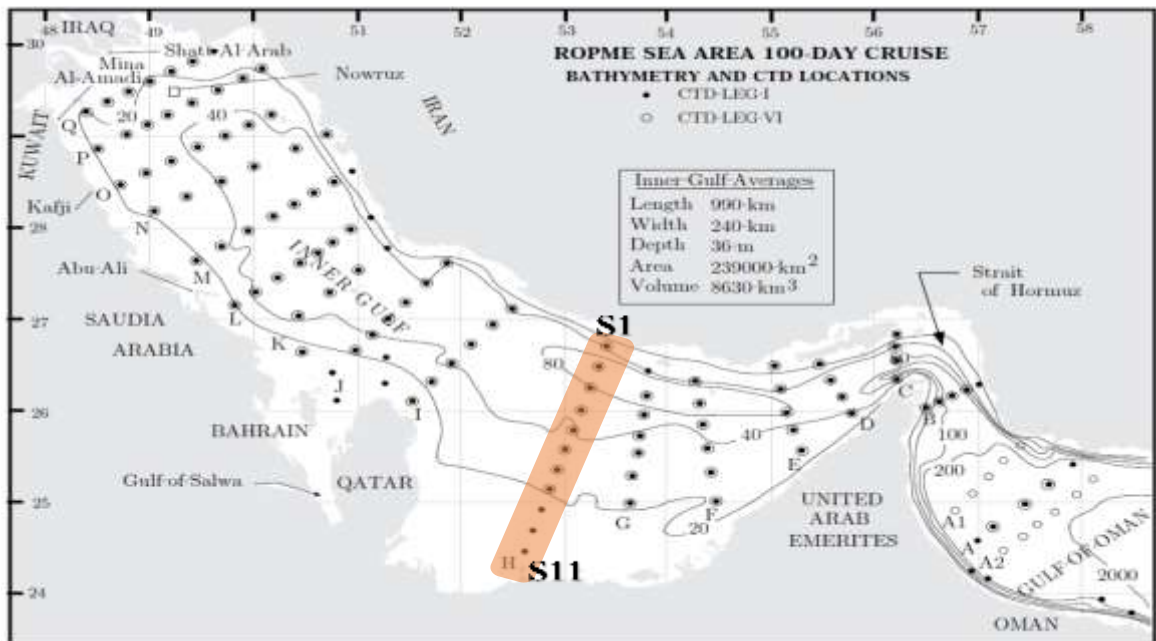
شکل ۱. الگوی شماتیک جریان خلیج فارس (تروپیل و هانگ، ۲۰۱۰).

امارات متحده عربی یعنی جزیره صیر بنی یاس واقع در امارات متحده عربی بود (ایستگاه S11) امتداد می یافت. نتایج این مقطع، در مطالعه رینولدز (۱۹۹۳) ترسیم نشده بود. به علاوه، طبق شکل ۱، این مقطع عرضی در خلیج فارس به گونه‌ای است که هر دو جریان ورودی و خروجی از خلیج فارس و یک پیچک اصلی (CE1، شکل ۱) را در بر می گیرد و تحلیل پایداری ستون آب پیچیدگی‌های کمتری به دنبال خواهد داشت. داده‌های ROPME1992، به صورت اولیه در

۲-۲. داده‌ها

در این پژوهش به بررسی مولفه‌های فیزیکی و پایداری ستون آب در خلیج فارس با استفاده از بسته‌ی داده‌ی رایمی (۱۹۹۲) با نام ROPME1992 مربوط به گشت دریایی مونت میشل در فصل زمستان پرداخته شده است (شکل ۲). داده‌ها شامل دما و شوری بود که از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی با فرمت txt تهیه گردید. این داده‌ها، شامل مقطع H (شکل ۲، رینولدز، ۱۹۹۳)، با ۱۱ ایستگاه بود که از آب‌های ایرانی خلیج فارس یعنی جزیره لاوان (ایستگاه S1)، تا آب‌های

محیط اکسل نسخه ۲۰۱۷ بررسی شدند و سپس وارد نرم‌افزار جهت تحلیل شدند.



شکل ۲. ایستگاه‌های اندازه‌گیری گشت زمستانی ROPME1992، که در این مطالعه از مقطع H با ۱۱ ایستگاه به ترتیب از سواحل ایران (S1) به طرف امارات متحده عربی (S11) استفاده شده است. نتایج مربوط به این مقطع در مطالعه (رینولدز، ۱۹۹۳) برای متغیرهای دما و شوری و چگالی نمایش داده نشده بود.

داده‌ها نیز از میانگین وزنی، با توجه به تعداد اندازه‌گیری موجود در هر ایستگاه استفاده شد.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

جدول ۲، نتایج اولیه حاصل از دما، شوری، آنومالی چگالی پتانسیل و سرعت صوت را در مقطع H از گشت ROPME1992 را نشان می‌دهد. مشاهده‌ی بیشینه و کمینه‌ی شوری و چگالی در ایستگاه و عمق مشابه رخ می‌دهد. بیشینه-ی رخداد دما و سرعت صوت نیز در ایستگاه و عمق مشابه مشاهده می‌شود. این می‌تواند بیانگر این نکته باشد که تقریباً در نقاط اکسترمم، شوری تاثیر بیشتری نسبت به دما بر روی چگالی دارد. به علاوه، دما نسبت به شوری تاثیر بیشتری روی سرعت صوت دارد.

۲-۳. تجزیه و تحلیل

مقادیر دما و شوری مستقیماً از داده‌های میدانی ROPME1992، به دست آمده بود. از داده‌های پایگاه داده اقیانوس جهانی به عنوان پایه اولیه تحقیق جهت ورود داده‌های ROPME1992 به نرم‌افزار اقیانوسی Ocean Data View استفاده شد. نرم‌افزار اقیانوسی Ocean Data View با نام اختصار ODV، نسخه اسپچلیر (۲۰۲۲) بود که از طریق وبسایت <https://odv.awi.de> به صورت رایگان قابل دسترس بود. مقادیر آنومالی چگالی پتانسیل، سرعت صوت و زاویه ترنر و دمای پتانسیل با استفاده از ODV، محاسبه شد و نمودارهای قطاعی و پراکندگی (دمای پتانسیل-شوری) در این نرم‌افزار ترسیم شد و مورد تحلیل قرار گرفت. جهت درون‌یابی فواصل بین ایستگاه‌ها در نمودارهای قطاعی از روش میانگین وزنی استفاده شد و جهت محاسبه میانگین

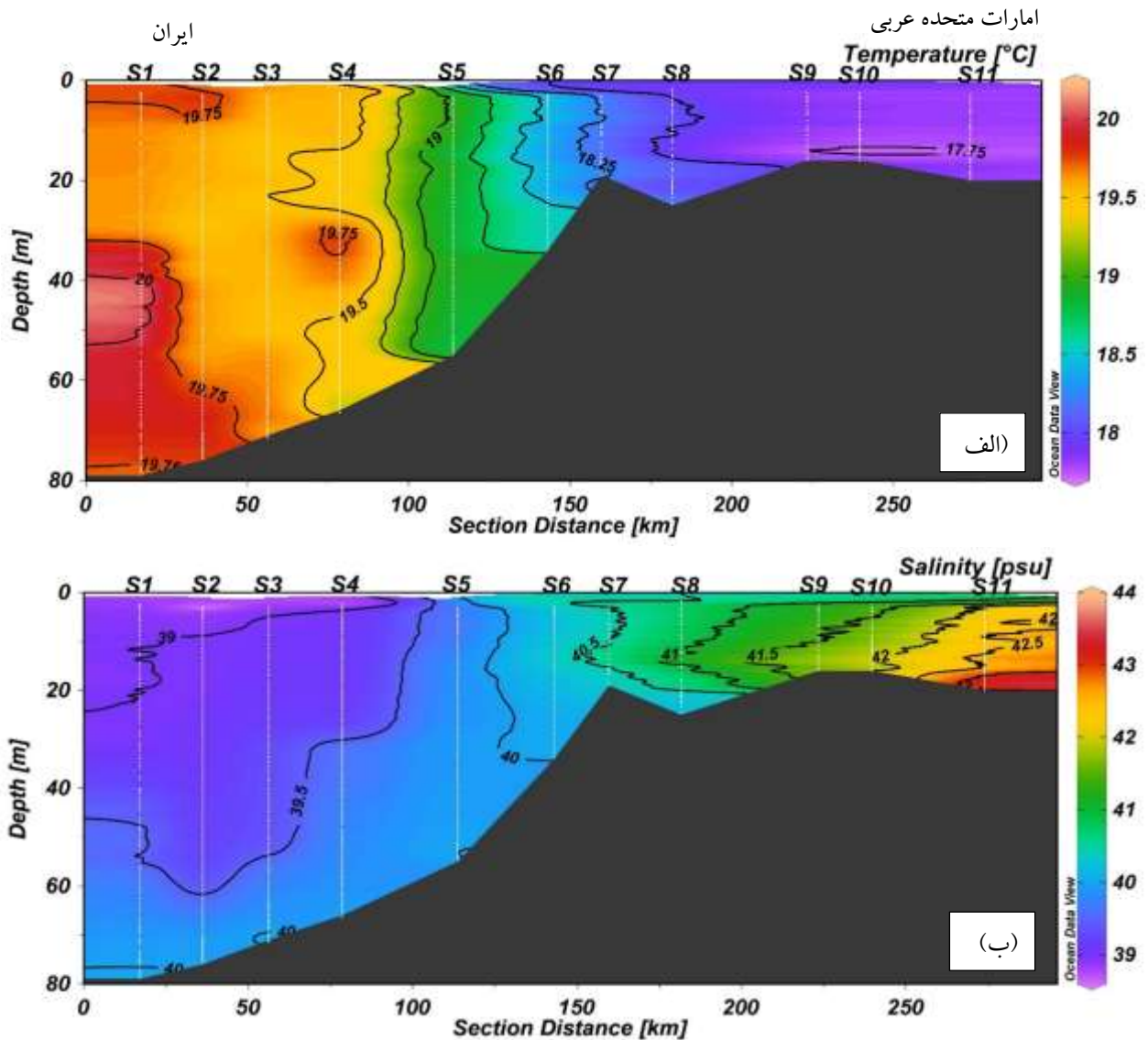
جدول ۲. گستره‌ی تغییرات دما (°C)، شوری (psu)، آنومالی چگالی پتانسیل (kg/m³) و سرعت صوت (m/s) در منطقه مورد نظر

میانگین	اختلاف بیشینه و کمینه	ایستگاه	عمق (m)	مقدار	کمیت	
۱۹/۱۷	۲/۶۹	S1	۴۵	۲۰/۲۵	بیشینه	اندازه‌گیری میدانی
		S9	۱۶تا۱۴	۱۷/۵۶	کمینه	
۳۹/۸۸	۵/۴۵	S11	۲۰	۴۳/۹۳	بیشینه	شوری (PSU)
		S2	۳	۳۸/۴۸	کمینه	
۲۸/۷۱	۳/۴۸	S11	۲۰	۳۲/۱۹	بیشینه	آنومالی چگالی پتانسیل (kg m-3)
		S2	۳	۲۷/۴۷	کمینه	
۱۵۲۵/۱۰	۶/۳۰	S1	۴۵	۱۵۲۸	بیشینه	سرعت صوت (m/s)
		S8	۲	۱۵۲۱/۷۰	کمینه	

آب افزایش می‌یابد. کم‌ترین تغییرات ستون آب مربوط به ایستگاه ۵ است و در آن ستون آب به خوبی همگن می‌باشد. بین ایستگاه‌های ۵ تا ۱۱، با وجود وارونگی‌های کوچک، لایه‌بندی شوری در ستون آب، مشهود است. هسته‌ی گرم ایجاد شده در ایستگاه ۲ در عمق کمتر از ۱۰ متر (شکل ۳-۱ الف) از لحاظ شوری از آب‌های اطراف تمایز چشمگیری ندارد (شکل ۳-۱ ب). بیشینه‌ی شوری در عمق ۲۰ متر ایستگاه ۱۱ (جنوبی‌ترین ایستگاه) به ۴۳/۹۳ psu و کمینه‌ی آن در عمق ۳ متر ایستگاه ۲ به ۳۸/۴۸ psu می‌رسد، که محل ورود آب IOSW (شکل ۱) است. در تمامی ایستگاه‌ها شوری به ۴۰ psu می‌رسد که در ایستگاه‌های نزدیک ایران، این میزان شوری در نزدیکی بستر و در ایستگاه‌های نزدیک امارات متحده عربی، در لایه سطحی است و لایه‌های بستر به بیش از ۴۲ psu نیز می‌رسد.

IOSW (شکل ۱) است. در تمامی ایستگاه‌ها شوری به ۴۰ psu می‌رسد که در ایستگاه‌های نزدیک ایران، این میزان شوری در نزدیکی بستر و در ایستگاه‌های نزدیک امارات متحده عربی، در لایه سطحی است و لایه‌های بستر به بیش از ۴۲ psu نیز می‌رسد.

۳-۱. مشاهدات میدانی دما و شوری در مقطع H شکل ۳-۱ الف تغییرات دما را در مقطع عمود بر ساحل ایران-امارات متحده نشان می‌دهد. با حرکت به جنوب خلیج فارس که منطقه کم عمق‌تری است، دمای آب کاهش می‌یابد. از آنجایی که اندازه‌گیری‌ها مربوط به فصل زمستان است، این کاهش دما در مناطق کم عمق‌تر منطقی به نظر می‌رسد. در نزدیکی سواحل ایران، در عمق بیش از ۲۸ متر (ایستگاه ۱) و بیش از ۵۷ متر (ایستگاه ۲) جریان آب گرم مشاهده می‌شود. در عمق حدود ۲۵ تا ۴۰ متر ایستگاه ۴، یک هسته‌ی آب گرم مشاهده می‌شود. در ایستگاه‌های مورد مطالعه، لایه‌بندی افقی دما مشاهده نمی‌شود و ستون آب نسبتاً آمیخته است. اما بین ایستگاه‌های ۳ تا ۹، اگرچه ستون آب از نظر قائم نسبتاً همگن و آمیخته است، اما از نظر افقی بین ایستگاه‌ها ناهمگن است و لایه‌بندی دمایی به صورت ستون‌های عمودی بین ایستگاه‌ها وجود دارد. بیشینه‌ی دما از سمت ساحل ایران، در عمق ۴۵ متر (ایستگاه ۱) به ۲۰/۲۵ °C و کمینه‌ی آن در عمق ۱۴ تا ۱۶ متر (ایستگاه ۹) به ۱۷/۵۶ °C می‌رسد، اگرچه ایستگاه ۱۰ نیز در همین حدود عمق، دمای کمتر از ۱۷/۷۵ °C وجود دارد. شکل ۳-۱ ب تغییرات شوری را نشان می‌دهد. با حرکت به طرف امارات متحده عربی که عمق آب کمتر است، شوری

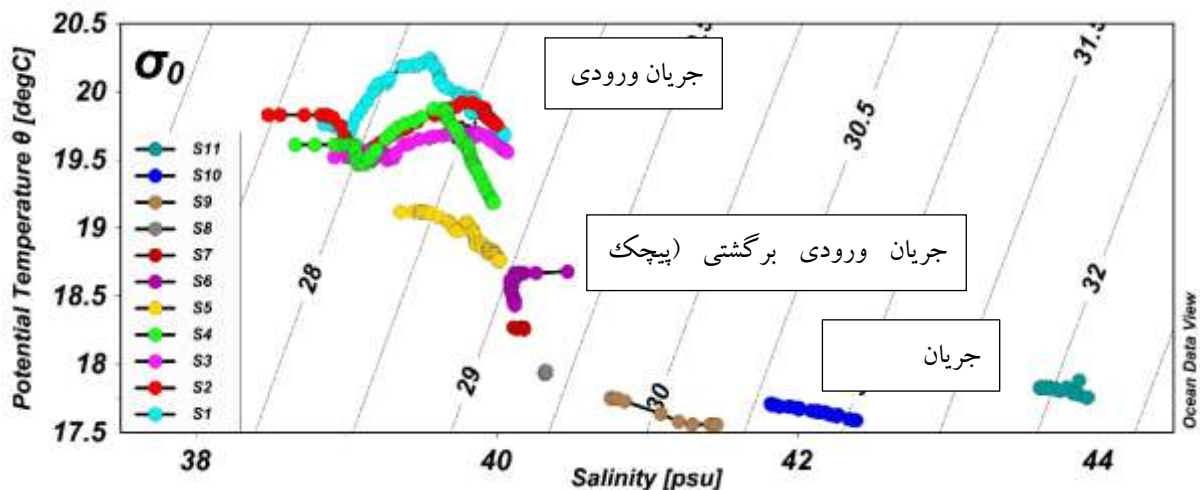


شکل ۳. نقشه (الف) دما (°C) و (ب) شوری (PSU) ستون آب خلیج فارس در مقطعی از سمت ساحل ایران (S1) به طرف ساحل امارات متحده عربی (S11) خلیج فارس.

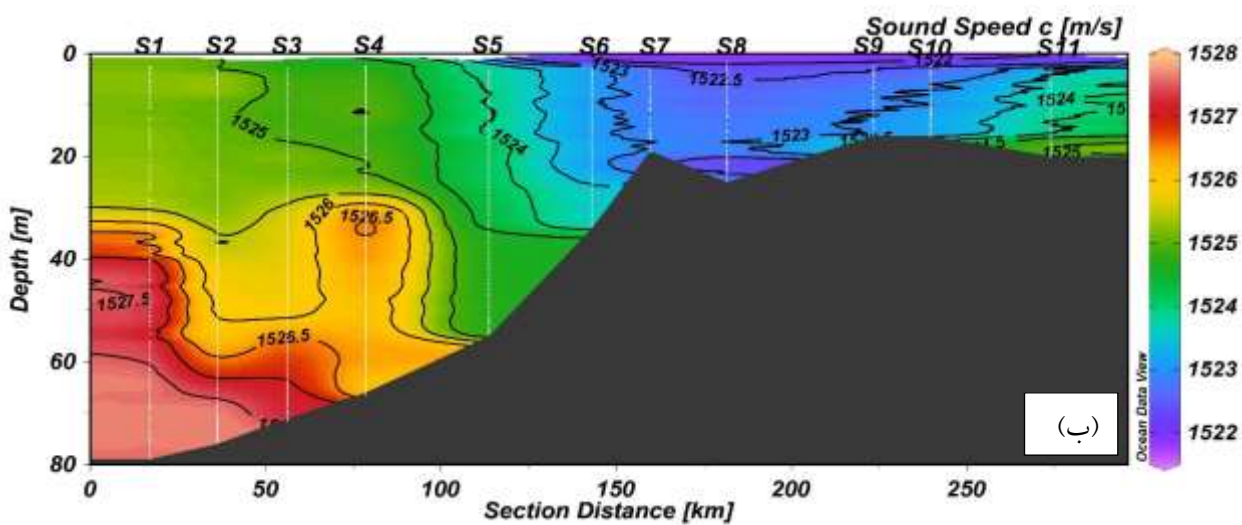
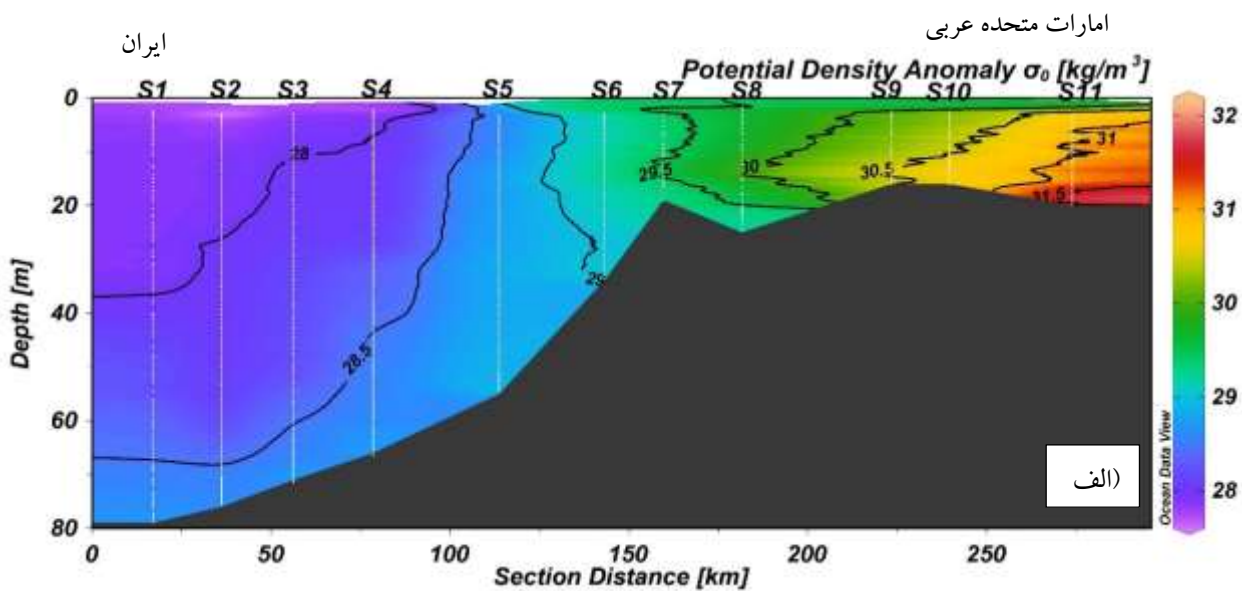
۹ و ۱۰ دارد. شوری تمامی ایستگاه‌ها بیش از ۳۹/۹۷ psu و چگالی بیش از ۲۷/۴۷ kg/m³ است.

۲-۳. آنومالی چگالی پتانسیل و سرعت صوت شکل ۵-الف آنومالی چگالی پتانسیل را نشان می‌دهد. مانند شوری با حرکت به طرف جنوب خلیج فارس و آب‌های کم عمق‌تر آب چگال‌تر شده و افزایش چگالی قابل مشاهده است.

شکل ۴، نمودار تغییرات دمای پتانسیل و شوری را نسبت به هم بر حسب چگالی نشان می‌دهد. ایستگاه‌های ۱ تا ۴ (شمال خلیج فارس) شباهت بیشتری به هم دارند و در ایستگاه‌های ۵ تا ۱۱ (آب‌های میانی و جنوب خلیج فارس) از همدیگر متمایز هستند. کمترین تغییرات به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های ۸ و ۷ است. با حرکت به طرف جنوب (آب‌های امارات متحده عربی) شوری و چگالی افزایش می‌یابد اما ایستگاه ۱۱ دمای کمتری نسبت به ایستگاه‌های



شکل ۴. نمودار دمای پتانسیل-شوری در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه الف) آنومالی چگالی پتانسیل (kg/m^3) و ب) سرعت صوت (m/s) ستون آب خلیج فارس در مقطعی از سمت ساحل ایران (S1) به طرف ساحل امارات متحده عربی (S11) خلیج فارس

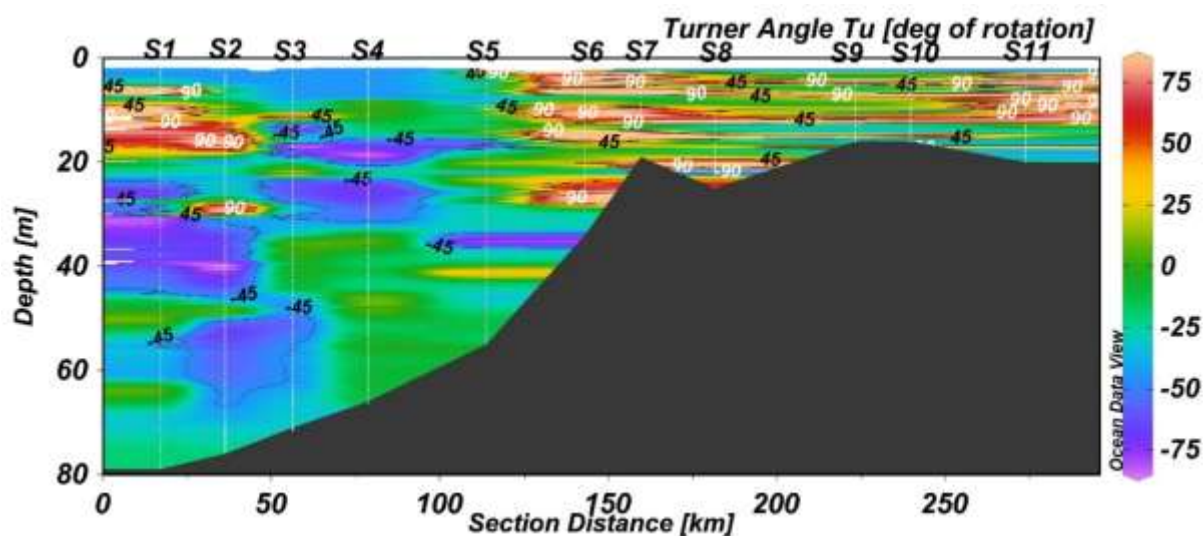
که در ایستگاه ۴ ایجاد شده سرعت صوت زیاد است. در بین ایستگاه‌های جنوبی، ایستگاه ۱۱ بیشترین سرعت صوت را دارد که به علت افزایش شوری و چگال‌تر نمودن آب می‌باشد. به عبارتی، در ایستگاه‌های شمالی دما و در ایستگاه‌های جنوبی شوری نقش بیشتری در تغییرات سرعت صوت دارد. بیشینه‌ی سرعت صوت در عمق ۴۵ متر ایستگاه ۱ به 1521.7 m/s و کمینه‌ی آن در عمق ۲ متر ایستگاه ۸ به 1528 m/s می‌رسد.

۳-۳. پایداری

شکل ۶، تغییرات زاویه ترنر را نشان می‌دهد. در آب‌های شمالی بیشتر ستون آب، پایداری مضاعف دارد، بیشترین لایه‌های ناپایدار، در ایستگاه‌های ۶ تا ۱۱ و حدود ۲۰ متر سطحی از ایستگاه‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. طبق اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، در ایستگاه‌های شمالی رژیم پخشی و در ایستگاه‌های جنوبی رژیم انگشتی نقش بیش‌تری در ایجاد همرفت پخش دوگانه دارند. در عمق حدود ۲۵ تا ۳۰ متر از ایستگاه ۲، رژیم پخشی به صورت غالب دیده می‌شود. در جریان آب گرم مشاهده شده در عمق حدود ۳۰ متر شمالی خلیج فارس لایه‌هایی متشکل از پایداری مضاعف و رژیم پخشی به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

کم‌ترین تغییرات ستون آب مربوط به ایستگاه ۵ است و در آن ستون آب همگن می‌باشد. این ایستگاه که نزدیک محل برگشت پیچک CE1 (شکل ۱)، به طرف تنگه هرمز است به دلیل اختلاط شرایط همگن را هم از نظر شوری و هم چگالی و دما تجربه می‌کند. بین ایستگاه‌های ۵ تا ۱۱، ستون آب از نظر قائم همگن و از نظر افقی ناهمگن است و لایه‌بندی چگالی مابین ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. هسته‌ی گرم ایجاد شده در ایستگاه ۲، در عمق کمتر از ۱۰ متر نیز مشابه شوری، از لحاظ چگالی نیز از آب‌های اطراف تمایزی ندارد. تغییرات چگالی به وضوح بسیار متأثر از شوری است. بیشینه‌ی چگالی در عمق ۲۰ متر ایستگاه ۱۱ (جنوبی‌ترین ایستگاه) به kg/m^3 و کمینه‌ی آن در عمق ۳ متر ایستگاه ۲ به kg/m^3 می‌رسد.

شکل ۵-ب تغییرات سرعت صوت را نشان می‌دهد. در ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰ سرعت صوت کمترین مقدار خود را تجربه می‌کند. در ایستگاه‌های ۱، ۴ و ۸ وارونگی سرعت صوت قابل رویت است. جریان گرمی که در عمق بیش از ۳۰ متر شمال خلیج فارس دیده شد (ایستگاه ۱، شکل ۳-الف)، با افزایش سرعت صوت در آن محدوده همراه است و صوت در آن بیش‌ترین سرعت را دارد. همچنین در هسته‌ی گرمی



شکل ۶. نقشه زاویه ترنر (درجه) ستون آب خلیج فارس در مقطعی از سمت ساحل ایران (S1) به طرف ساحل امارات متحده عربی (S11) خلیج فارس

۴. بحث

طی مطالعه‌ی حاضر تغییرات دمای آب در زمستان بین $17/56^{\circ}\text{C}$ تا $20/25^{\circ}\text{C}$ ، تغییرات شوری $38/48$ psu تا $38/48$ psu، تغییرات آنومالی چگالی پتانسیل $27/47$ kg/m³ تا $32/19$ kg/m³ و تغییرات سرعت صوت $1521/7$ m/s تا 1528 m/s برآورد شد. آب‌های کم‌عمق جنوبی دمای کمتر و شوری و چگالی بیشتری نسبت به آب‌های شمالی دارند. مجیدی نیک و همکاران (۱۳۹۲، الف) نیز پیشینه‌ی شوری را در فصل سرد با مقدار $43/5$ psu در آب‌های جنوبی گزارش نمودند که علت آن را وزش بادهای شدید و تشکیل و شکست امواج در فصل سرد عنوان کردند که باعث می‌شد میزان تبخیر در فصل سرد بیش از فصل گرم باشد و شوری بیشتری در فصل سرد مشاهده شود. همان‌طور که شکل ۳- الف نشان می‌دهد در زمستان لایه‌بندی افقی دما بین ایستگاه‌ها ایجاد نمی‌شود و ستون آب نسبتاً آمیخته و همگن است اما بین ایستگاه‌های ۴ تا ۸ لایه‌بندی قائم در ستون آب رخ داده و آب از نظر افقی ناهمگن است که نشان می‌دهد بین ایستگاه‌های میانی تمایز دمای آب نسبت به ایستگاه‌های شمالی و جنوبی بیشتر است و به نظر می‌رسد این ایستگاه‌های میانی محدوده‌ای را مشخص می‌کند که IOSW و PGW در این محدوده در حال جداشدن از یکدیگر هستند.

در عمق بیش از ۳۰ متر شمال خلیج فارس (ایستگاه ۱، که در اعماق پایین‌تر تا ایستگاه ۳ اثرات آن قابل رویت است)، جریان آب گرمی مشاهده می‌شود که دارای بیشترین سرعت صوت است. کمترین سرعت صوت در آب‌های میانی و جنوبی (ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰) دیده می‌شود. ایستگاه ۱۱ نیز بیشترین سرعت صوت دارد که علت آن افزایش شوری است. اما مجیدی نیک و دلدار (۱۳۹۴) بیشترین سرعت صوت را در آب‌های جنوبی به علت افزایش شوری گزارش کردند اما در این مطالعه فقط ایستگاه ۱۱، بیشترین سرعت را در آب‌های جنوبی داشت. همچنین مجیدی نیک و دلدار (۱۳۹۴) بیان کردند که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه‌ی ایشان سرعت صوت با افزایش عمق به علت کاهش دما کاهش می‌یابد اما در مطالعه‌ی پیش رو همان‌طور که به خوبی در شکل ۵ دیده

می‌شود، در بسیاری از ایستگاه‌ها با افزایش عمق سرعت صوت روند افزایشی دارد.

ایستگاه ۴ (در عمق حدود ۲۵ تا ۴۰ متر) از شکل ۳- الف و ۵- ب به خوبی وجود پیچک را تایید می‌کند که در تطابق با شکل ۱، پیچک CEI، است که پیش از این در مطالعه تروپیل و هانگ (۲۰۱۰) به وجود آن در این مقطع اذعان شده است. این پیچک که حاصل IOSW است و آب نسبتاً سردی را به همراه دارد، در میانه خلیج فارس شروع به دور زدن می‌کند و آب‌های گرم‌تر را در میانه خود به دام می‌اندازد و از این رو یک پیچک با هسته گرم تشکیل می‌شود. در این پیچک سرعت صوت روند افزایشی دارد، اما از لحاظ شوری و چگالی نسبت به از آب‌های اطرافش تمایزی ندارد. علت تمایز از نظر دمایی پخش سریع‌تر دما نسبت به شوری است (استوارت، ۲۰۰۸) که پیش از این در بخش مقدمه به آن پرداخته شده است و شوری نسبت به دما به وضوح تاثیر بیشتری بر روی تغییرات چگالی دارد. از نظر پایداری نیز در آن پیچک رژیم پخشی مشاهده می‌شود.

در جدول ۲، ایستگاه و عمق قرارگیری پیشینه و کمینه‌ی شوری و چگالی مشابه هم می‌باشد که خود تایید کننده‌ی این موضوع است. کمترین تغییرات شوری و چگالی مربوط به ایستگاه ۵ است که می‌توان گفت در آن ستون آب نسبتاً از نظر قائم همگن و آمیخته است. از نظر دمایی نیز تغییرات در ایستگاه مذکور بسیار اندک است. در نتیجه عامل ناپایدار کننده‌ی کمی در لایه‌ها مشاهده می‌شود و بیشتر ستون آب را پایداری مضاعف تشکیل می‌دهد. البته در آن لایه‌هایی با رژیم پخشی هم مشاهده می‌شود (شکل ۶).

اما در رابطه با تغییرات سرعت صوت، در ایستگاه‌های شمالی دما و در ایستگاه‌های جنوبی شوری نقش بیشتری دارند. اما نتایج مجیدی نیک و همکاران (۱۳۹۲، ب) نشان داد تاثیر دما در بیشتر مناطق بیشتر از شوری است و بیشترین همبستگی دما و سرعت صوت در عمق میانگین و فصل گرم اتفاق می‌افتد. بیش‌ترین ناپایداری ایستایی مربوط به ایستگاه‌های ۶ تا ۱۱ (میانه و جنوب خلیج فارس) و حدود ۲۰ متر سطحی ایستگاه-های ۱ و ۲ (شمال خلیج فارس) است. در ایستگاه‌های شمالی

میانه خلیج با هسته‌ای گرم نیز در این مطالعه کاملاً مشهود است.

۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه هرمزگان جهت تأمین امکانات این پژوهش و سازمان ملی اقیانوس‌شناسی جهت تأمین داده‌های لازم، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

منابع

۱. آل یاسین، س. م.، علی اکبری بیدختی، ع.، و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۲، مطالعه وارونگی دما و شوری و همرفت پخش دوگانه در دریای خزر، مقاله‌نامه کنفرانس فیزیک ایران، صفحات ۲۷۷ تا ۲۸۰.
۲. پاینده‌ی، ی.، م. سیوف‌جهرمی، و ص. حمزه‌ئی، ۱۴۰۲، تغییرات دما، شوری و چگالی آب‌های شمالی خلیج فارس در فصل بهار بر اساس یافته‌های کاوشگر خلیج فارس (۱۳۹۸)، هیدروفیزیک، دوره ۹، شماره ۱، پذیرش.
۳. حسینی، س. ط.، و و. چگینی، ۱۳۹۳، مطالعه تغییرات فصلی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب دریا در محدوده‌ی آب‌های ساحلی شبه جزیره‌ی بوشهر، مجله اقیانوس‌شناسی، دوره ۵، شماره ۱۷، صفحات ۱۲۵ تا ۱۴۳.
۴. خدایاری رستم آباد، ا.، م. باخدای پاسکیایی، ع. ولی‌نژاد، و م. کمره‌ای، ۱۳۸۹، مقدمه‌ای بر سونار و مدلسازی انتشار امواج صوتی در آب دریا، پژوهشکده مهندسی، چاپ اول، صفحات ۵۶۶.
۵. صدری نسب، م.، ۱۳۸۹، مدل سازی عددی سه بعدی گردش آب در تنگه هرمز، اقیانوس‌شناسی، دوره ۱، شماره ۱، صفحات ۱۹ تا ۲۴.
۶. علی اکبری بیدختی، ع.، و ز. صباغ کاشانی، ۱۳۸۲، همرفت پخش دوگانه و وارونگی دما در آب‌های خلیج-فارس و دریای عمان مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۲۹، شماره ۱، صفحات ۳۳ تا ۴۵.

رژیم پخشی و در ایستگاه‌های جنوبی رژیم انگشتی نقش بیش‌تری در ایجاد همرفت پخش دوگانه دارند. لازم به ذکر است در ایستگاه‌های جنوبی لایه‌های متشکل از ناپایداری ایستایی بیش از لایه‌های متشکل از همرفت پخش دوگانه در ستون آب دیده می‌شود. به طور کلی در زمستان رژیم پخشی سهم بیش‌تری در ایجاد همرفت پخش دوگانه در خلیج فارس دارد که توسط مطالعه محمدپور و همکاران (۲۰۲۴) این موضوع در گودال جنوب جزیره تنب بزرگ بر اساس داده‌های کاوشگر خلیج فارس (۲۰۱۸) که منطقه‌ای نزدیک به مطالعه حاضر است، مورد تأیید قرار می‌گیرد. محمدپور (۱۴۰۱) نیز با بررسی داده‌های فصل سرد و گرم ROPME1992 در تنگه‌ی هرمز با مقاطعی به موازات ساحل عنوان کرد در این سال در فصل سرد رژیم پخشی و در فصل گرم رژیم انگشتی سهم بیش‌تری در ایجاد همرفت پخش دوگانه در تنگه هرمز دارند که مشابه با مطالعه حاضر در این مقطع عرضی مورد بررسی می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

پژوهش پیش‌را با هدف بررسی تفاوت ساحل شمالی و جنوبی خلیج فارس از نظر سرعت صوت و پایداری ستون آب، با استفاده از داده‌های زمستانه ROPME1992 در مقطعی که از آب‌های ایران (جزیره لاوان) به آب‌های امارات متحده عربی (جزیره صیر بنی یاس) متصل می‌شد، صورت پذیرفت. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که دو الگوی متفاوت جریان IOSW (در ساحل شمالی) و PGW (در ساحل جنوبی) موجب رژیم‌های مختلف پایداری ستون آب می‌شود. در ایستگاه‌های شمالی رژیم پخشی و در ایستگاه‌های جنوبی رژیم انگشتی نقش بیش‌تری در ایجاد همرفت پخش دوگانه دارند. در ایستگاه‌های جنوبی لایه‌های متشکل از ناپایداری ایستایی بیش از لایه‌های متشکل از همرفت پخش دوگانه در ستون آب دیده می‌شود. همچنین سرعت صوت در ایستگاه‌های شمالی خلیج فارس، بیشتر تحت تأثیر دما و در ایستگاه‌های جنوبی تحت تأثیر شوری است. وجود پیچک در

- the Strait of Hormuz. *Oceanography*, 11(2), pp.58.
17. Affatati, A., Scaini, C., Salon, S., 2022. Ocean sound propagation in a changing climate: Global sound speed changes and identification of acoustic hotspots. *Earth's Future*, 10(3), pp. e2021EF002099.
 18. Johns, W., Yao, F., Olson, D., Josey, S., Grist, J., and Smeed, D., 2003. Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred heat and freshwater budgets of the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12)
 19. Kämpf, J., and Sadrinasab, M., 2005. The circulation of the Persian Gulf: a numerical study. *Ocean Science Discussions*, 2(3), pp.129-164.
 20. Mohammadpour, F., Soyuf Jahromi, M., and Hamzei, S., 2024. Seasonal changes of the stability and double diffusive processes in the trench of the Strait of Hormuz, Iranian *Journal of Geophysics*, Accepted paper.
 21. Reynolds, R.M., 1993, Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*. 27, pp.35-59.
 22. Ruddick, B., and Kerr O., 2003. Oceanic thermohaline intrusions: theory. *Progress in Oceanography*. 56(3-4), pp.483-497.
 23. Dushaw, B.D., Worcester, P.F., Cornuelle, B.D., Howe, B.M., 1993. On equations for the speed of sound in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(1), pp. 255-275.
 24. Ruddick, B.R., 1983. A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep Sea Research*, 30(10), pp.1105-1107.
 25. Schlitzer R. 2022, Ocean Data View. <https://odv.awi.de>.
 26. Sheppard, C., Al-Husiani, M., Al-Jamali, F., Al-Yamani, F., Baldwin, R., Bishop, J., Benzoni, F., Dutrieux, E., Dulvy, N. K. and Durvasula, S.R.V., 2010. The Gulf: a young sea in decline. *Marine Pollution Bulletin*, 60(1), pp.13-38.
 27. Stewart, R.H., 2008. Introduction to physical oceanography. College Station: Texas A & M University, 2008 Sep.
 28. Sugden, W., 1963. The hydrology of the Persian Gulf and its significance in respect to evaporite deposition. *American Journal of Science*, 261(8), pp.741-755.
 ۷. قاضی، ا، علی اکبری بیدختی، ع، عظام، م، ترابی آزاد، م، ۱۳۸۹، تغییرات فصلی جریان، دما و شوری در خلیج-فارس. فناوری‌های نوین در توسعه آبی پروری (شیلات)، دوره ۴، شماره ۲، صفحات ۶۷ تا ۷۶.
 ۸. مجیدی نیک، م، س. جمشیدی، و س.ع. آزرما، ۱۳۹۲ الف، تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی پارامترهای فیزیکی در خلیج فارس با استفاده از مدل کریجینگ، نهمین همایش ملی خلیج فارس، سال ۱۳۹۲.
 ۹. مجیدی نیک، م، س. جمشیدی، و س.ع. آزرما، ۱۳۹۲ ب، تغییرات فصلی سرعت صوت و تاثیر پارامترهای فیزیکی آب بر تغییرات آن در خلیج فارس، نهمین همایش ملی خلیج فارس، سال ۱۳۹۲.
 ۱۰. مجیدی نیک، م، و ح. دلدار، ۱۳۹۴، کاربرد آمار مکانی در پهنه‌بندی و تحلیل فضایی سرعت صوت در خلیج-فارس، مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۶، شماره ۲، صفحات ۴۵ تا ۵۸.
 ۱۱. محمدپور، ف، ۱۴۰۱، تغییرات فصلی پایداری ستون آب در محدوده‌ی تنگه‌ی هرمز با استفاده از نرم‌افزار ODV. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بندرعباس، دانشگاه هرمزگان، دانشکده علوم و فنون دریایی. صفحات ۱۲۰.
 ۱۲. محمدپور، ف، ص. حمزه‌ئی و م. سیوف جهرمی، ۱۴۰۱، مطالعه زمستانه پایداری و همرفت پخش دوگانه در شرق تنگه هرمز. هیدروفیزیک، دوره ۸، شماره ۲، صفحات ۳۳ تا ۴۶.
 13. Ahn, Y.H., Shanmugam, P., Moon, J. and Ryu, J.H., 2008. Satellite remote sensing of a low-salinity water plume in the East China Sea. In *Annales Geophysicae* (Vol. 26, No. 7, pp. 2019-2035). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
 14. Chand, S., Aung, T. and Rao, S., 2004. Physical properties of southern Fiji waters. *The South Pacific Journal of Natural and Applied Sciences*, 22(1), pp.57-61.
 15. Emery, K.O., 1956. Sediments and water of the Persian Gulf. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 40(10), pp. 2354-2383.
 16. Johns, W., and Olson, D., 1998. Observations of seasonal exchange through

30. Yao, F., Johns, W. E. (2010). A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 2. Formation and export of Persian Gulf Water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C11).
29. Thoppil, P. G., and Hogan, P. J. (2010). A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical oceanography*, 40(9), pp.2122-2134.