



Study of Temperature and Salinity Inversions in the Oman Sea

Eram Ghazi ^{1*}, Abbasali Aliakbari Bidokhti ², Mojtaba Ezam ³, Mojtaba Zoljoodi ⁴

¹ Department of Marine Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Marine Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁴ Atmospheric science Meteorological Research Center (AS MERC), Faculty Member and Assistant Professor, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Code: A-10-13-5

Article History:

Received: 2020/11/8

Revised: 2020/12/19

Accepted: 2020/12/31

Keywords:

temperature and salinity

inversions

double diffusion

salt fingering

Persian Gulf Outflow

*Corresponding author:

eram.ghazi@srbiau.ir

 [10.52547/joc.12.45.16](https://doi.org/10.52547/joc.12.45.16)

ABSTRACT

In this research, observational data are analyzed to explain temperature and salinity inversions and double diffusion in the Oman Sea by using the vertical structure and lateral gradient of temperature and salinity and the cross-sections of temperature, salinity and potential density in three parts of the upper-middle and lower in winter and summer. The results of this paper show that intrusive structures extend over a depth of about 100-450 meters in the Oman Sea. Temperature and salinity inversions observed depth of 250 m in winter and summer in the Oman Sea. Steps thickness is about 10 to 20 meters. A warm and saline lens in these waters with common diffusive convection on the top layers and salt fingering in bottom layers are expected. Both processes occur (diffusive and finger convection) that have an important role in creating temperature and salinity inversions. Convective diffusion is the dominant factor in dual diffusion in the steady-state. While the warm and saline tongue expands due to the salt fingering and the baroclinicity, Convective diffusion is a major factor limiting the growth of tongues.

©2021 JOC. All rights reserved



NUMBER OF TABLES

2



NUMBER OF FIGURES

9



NUMBER OF REFERENCES

14

مطالعه وارونگی‌های دما و شوری در آب‌های دریای عمان

ارم قاضی^{۱*}، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۲، مجتبی عظام^۳، مجتبی ذوالجودی^۴^۱ دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران^۲ استاد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران^۳ دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران^۴ پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۸/۸/۱۳۹۹	در تحقیق حاضر مطالعات میدانی به بررسی ساختارهای قائم و گرادیان‌های افقی دما، شوری و چگالی و همچنین مطالعه کنتورهای هم کمیت در سه بخش بالایی، میانی و پایینی دریای عمان در زمستان و تابستان پرداخته است. نتایج این بررسی حضور جریان نفوذی ترموهالاینی را در اعماق بین ۱۰۰ تا ۴۵۰ متر تأیید می‌کند. ماکزیمم دما و شوری در لایه‌های نفوذی در عمق حدود ۲۵۰-۳۰۰ متر نشان داده شده است. این بررسی نشان می‌دهد که در دریای عمان وارونگی‌های دما و شوری در دو فصل زمستان و تابستان در عمق ۲۵۰ متری مشاهده می‌شود و هر دو فرآیند همرفت پخش (رژیم انگشتی و رژیم پخشی) در ایجاد وارونگی‌های دما و شوری نقش متعارف دارند. ضخامت لایه‌های نفوذی در مرز بین توده‌های آب حدود ۱۰ تا ۲۰ متر است و دمای بیشینه با عمق شوری بیشینه منطبق است. لنزهای گرم و شور نشان دهنده دو مرز در بالا و پائین هستند که همرفت پخش دوگانه و رژیم انگشتی بترتیب در مرزهای بالا و پایین مشاهده می‌شوند. پخش همرفتی و نه رژیم انگشتی، عامل غالب در پخش دوگانه مربوط به حالت پایدار است.
تاریخ بازبینی: ۲۹/۹/۱۳۹۹	
تاریخ پذیرش: ۱۱/۱۰/۱۳۹۹	
واژگان کلیدی:	
وارونگی دما و شوری	
رژیم انگشتی	
همرفت پخش دوگانه	
جریان خروجی خلیج فارس.	
*نویسنده مسئول ✉ eram.ghazi@srbiau.ir	

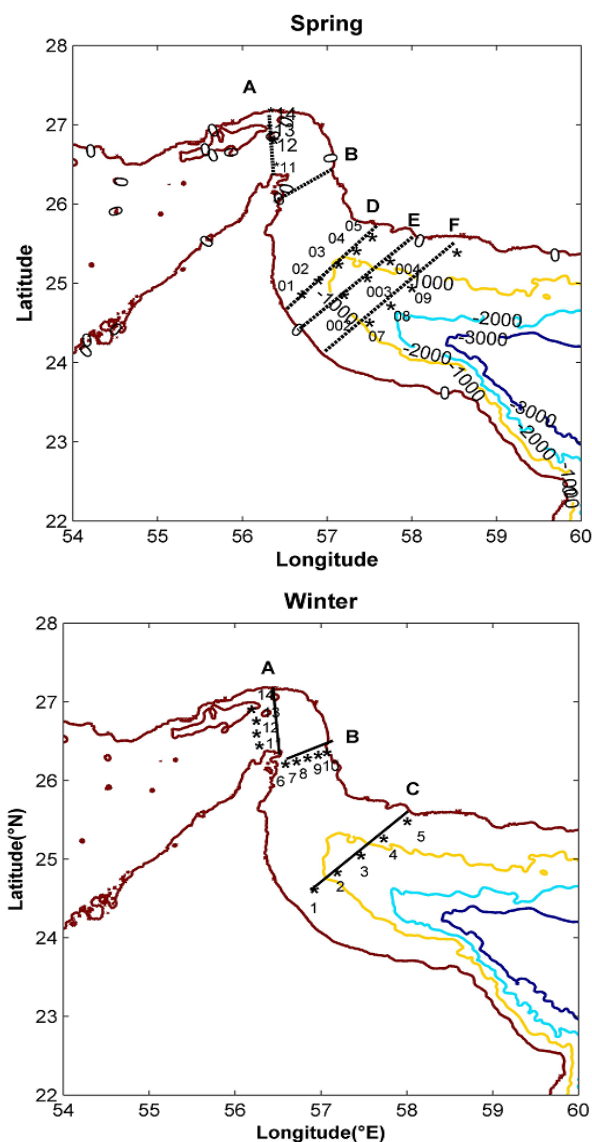
مقدمه

خلیج فارس یک دریای کم عمق و نیمه بسته با تبخیر زیاد از شورترین نواحی آب‌های دنیاست و به صورت یک خور معکوس همواره از طریق تنگه هرمز در حال تبادل با دریای آزاد است [1]. تبادل آب بین خلیج فارس و دریای آزاد باعث می‌شود آب حالت دو لایه داشته باشد. اختلاط افقی باعث شکل‌گیری زبانه‌های شور ترموهالاینی می‌گردد. در حاشیه توده‌های آب جریان ترموهالاینی با نفوذ جانبی یک توده آب در توده آبی دیگر با ویژگی‌های متفاوت ترموهالاینی در عمقی مشخص جبهه ترموهالاینی ایجاد می‌شود که با گرادیان‌های افقی دما و شوری همراه هستند در مجموع به گونه‌ای تنظیم^۱ می‌شوند که در راستای قائم ستون آب پایدار باشد. پخش دما و شوری فرآیندهایی مثل همرفت پخش دوگانه را در حاشیه توده‌های آب ایجاد می‌کنند که جریان نفوذی ترموهالاینی نامیده می‌شوند وقتی این جریان در لایه‌ها تنظیم می‌شود می‌توانند تا هزاران کیلومتر پیش رفته و بر روی ترموکلاین اصلی، لایه بندی اقیانوس و گردش‌های اقیانوسی اثر بگذارند. این جریانات نقش مهمی در دینامیک اقیانوس‌ها دارند. با وجود اینکه در مقایسه با جریانات سطحی آهسته‌تر هستند، اما حجم آب انتقالی توسط این جریانات در مقایسه با حجم آب انتقالی در سطح قابل توجه

است [۲، ۳]. فرآیندهای نفوذی در انتقال جانبی گرما و شوری در جبهه‌های اقیانوسی اهمیت دارند. نیروهای مؤثر در چنین فرآیندهایی به علت ناپایداری باروکلینیکی جبهه ترموهالاینی یا همگرایی حرکت پیچک بوجود می‌آیند [۴]. بسیاری معتقدند که این ساختارها در نتیجه فرآیند تبادل آب خروجی از کف تنگه‌های دریای نیمه بسته پدید می‌آید که از برهم کنش توپوگرافی کف فلات و شیب قاره‌ای ایجاد می‌شود. برخی دیگر آنرا ناشی از نوسان‌های جزرومدی آب نفوذی در میان تنگه‌ها می‌دانند. تعاریف مربوط به زبانه‌های ترموهالاینی بین محققان متفاوت و معمولاً با وارونگی شوری و دمایی مرتبط است [۵، ۶]. وارونگی‌ها نشان دهنده لایه‌های متناوب آب گرم و شور و سرد و شیرین هستند. طول موج قائم لایه‌ها از ۱۰ تا ۱۰۰ متر و مسافت افقی آنها از ۱ تا ۱۰۰ کیلومتر یا بیشتر است. علت ایجاد آنها حرکت جانبی آب در حضور گرادیان‌های افقی دما و شوری در جبهه‌های اقیانوسی است. این لایه‌ها ترموهالاین نفوذی نامیده می‌شوند به این معنی که شکل‌گیری آنها با نفوذ یک توده آب ترموهالاینی به لایه دیگر صورت می‌گیرد [۷]. اخیراً نقش امواج داخلی در ایجاد آنها نیز مورد نظر است. در محیط‌های اقیانوسی دو مؤلفه گرما و شوری موجب چینه‌بندی چگالی می‌شوند. جریانات ترموهالاین نفوذی با وارونگی‌های دما و شوری بر حسب عمق شناخته می‌شوند و پدیده‌هایی

¹ Adjustment

منطقه مورد مطالعه در محدوده خلیج فارس و بخشی از دریای عمان با طول جغرافیایی 60°E - 54°E و عرض جغرافیایی 28°N - 22°N قرار دارد. مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری بر روی نقشه هیدروگرافی دریای عمان شکل ۱ و ایستگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب در زمستان بر روی سه مسیر A, B, C در زمستان و در تابستان بر روی مسیرهای F, E, D, A, B مشخص شده است.



شکل ۱: نقشه دریای عمان و ایستگاه‌های اندازه‌گیری گشت دریایی راپمی در فصل زمستان و تابستان ۱۹۹۲

Fig 1: Map of the Sea of Oman and Rapemi Marine Patrol Measurement Stations in Winter and Summer 1992

۲. همرفت پخش دوگانه

همرفت پخش دوگانه به دلیل اختلاف در پخش مولکولی شوری و دما رخ می‌دهد. هنگامی که توزیع شوری و دما در ستون آب از نظر توزیع چگالی اثرات معکوسی داشته باشند ساختارهای بسیار جالبی در ستون آب ایجاد می‌شود. دو نوع رژیم (رژیم انگشتی و رژیم پخشی نوسانی)

هستند که بطور طبیعی با پخش دوگانه رخ می‌دهند. این جریانات خودراندۀ^۱ بوده و انرژی پتانسیل ذخیره شده در مؤلفه شوری را آزاد می‌کنند و با چندین فرآیند متفاوت مثل رژیم انگشتی، فرارفت پخش، فرارفت مولکولی و غیره شکل می‌گیرند. اگر در یک شاره که دارای چینه‌بندی چگالی است اختلاف سرعت بین لایه‌ها وجود نداشته باشد، سیستم شاره پایدار است و لزومی ندارد که عاملی سبب شود تا بر نیروی شناوری غلبه کند. در صورتیکه چینه‌بندی چگالی، تحت تأثیر دو یا چند مؤلفه با ضرایب پخش مولکولی متفاوت باشد ناپایداری رخ می‌دهد که علت آن پخش سریعتر یک مؤلفه، نسبت به مؤلفه دیگر است و موجب حرکات شدید و اختلاط در جهت قائم می‌شود که به آن همرفته پخش دوگانه گفته می‌شود [۸]. دو نوع پخش دوگانه پذیر است، رژیم انگشتی و پخش همرفتی. هر دو نوع پخش دوگانه می‌توانند حرکت‌های زبانه‌ای ایجاد کنند. در محیط‌های اقیانوسی به علت اختلاف دما و شوری در اعماق مختلف، همرفت پخش دوگانه مشاهده می‌شود [۹]. وقوع پدیده همرفت پخش به طور دائمی و طبیعی در بسیاری از اقیانوس‌ها و دریاها ناشی از سه عامل اختلاف آب‌های سطحی و عمق، اختلاف غلظت شوری موجود در این آب‌ها و اختلاف پخش گرما و شوری است. باتوجه به نقش مهم این جریانات در دینامیک اقیانوس‌ها و حجم آب انتقالی توسط آن‌ها، که در مقایسه با حجم آب انتقالی در سطح، قابل توجه است و باتوجه به شارهای گرما، شوری و دیگر پارامترها که توسط این جریانات ایجاد می‌شوند و بودجه گرمایی زمین و اقلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بررسی لایه‌های وارونگی دما و شوری و جریان نفوذی جبهه ترموهالاینی جریان خروجی خلیج فارس و نقش فرآیند همرفت پخش (رژیم انگشتی و رژیم پخشی) در ایجاد وارونگی‌های دما و شوری در آب‌های خروجی خلیج فارس در دریای عمان ضروری به نظر می‌رسد. در بخش اول وارونگی‌های دما و شوری با استفاده از پروفایل‌های قائم و برش‌های مقطعی دما، شوری و سیگماتی در زمستان و تابستان ارائه شده است. در بخش دوم، بررسی همرفت پخش دوگانه (رژیم انگشتی و رژیم نوسانی) توسط زاویه ترنر، نسبت چگالی و رسم گرادین‌های دما و شوری مورد بحث قرار گرفته است.

روش پژوهش

مواد و روش‌ها

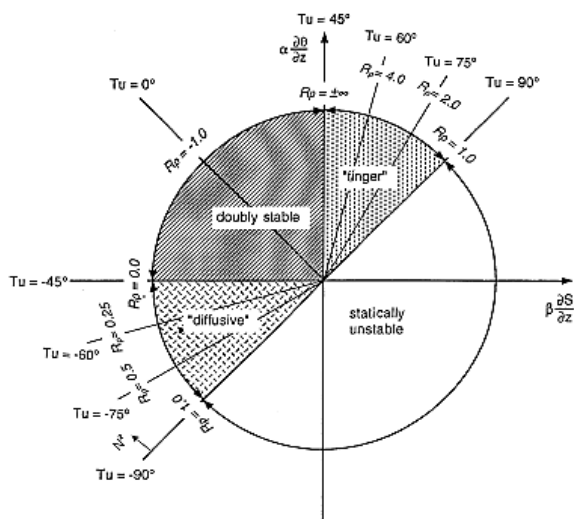
۱. داده‌های میدانی

در این تحقیق به بررسی مشاهدات میدانی با استفاده از داده‌های CTD^۲ بدست آمده از گشت دریایی ROPME 1992^۳ در مدت (ژانویه - فوریه) (leg1) و (می - جون) (leg6) در خلیج فارس و دریای عمان پرداخته شده است.

³ Mt. Mitchell Expedition to the ROPME Sea Area

¹ self-driven

² Conductivity Temperature Depth



شکل ۲: زاویه ترنر بر طبق مقادیر Rp به منظور مشخص کردن پخش دوگانه شدید، متوسط و ضعیف نشان داده شده است (You, 2002).

Fig 2: Turner angles are shown in Rp values to indicate severe, moderate, and weak dual scattering (You, 2002).

رادیک [۱۳] پارامتری بنام زاویه ترنر به صورت

$$Tu = \tan^{-1} \left(\frac{Rp + 1}{Rp - 1} \right)$$

تعریف کرد که با استفاده از این رابطه می‌توان نوع فرآیند همرفت پخش دوگانه را مشخص کرد. بدین صورت که اگر $45^\circ < Tu < 90^\circ$ رژیم انگشتی (با شدیدترین حالت وقتی Tu نزدیک به ۹۰ است) و وقتی $-45^\circ < Tu < -90^\circ$ رژیم پخشی (با شدیدترین حالت وقتی Tu نزدیک به -۹۰ است) رخ می‌دهد. زمانی که $45^\circ < Tu < -45^\circ$ وقوع پخش دوگانه غیر ممکن است و ستون آب بطور مضاعف پایدار است. بدین معنی که ستون آب با نسبت دما و شوری چینه‌بندی پایدار دارد. برای بقیه مقادیر سیال به صورت استاتیکی ناپایدار است. در این مطالعه بررسی وارونگی‌های دما و شوری و همرفت پخش دوگانه در مسیر عرضی جبهه ترموهالاینی در فصل زمستان و تابستان با رسم نیمرخ‌های قائم و مقطع عرضی دما، شوری و چگالی پتانسیل و نیم رخ‌های نسبت چگالی و زاویه ترنر و گرادیان‌های دما و شوری در دریای عمان با استفاده از نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

۱. وارونگی‌های دما و شوری در دریای عمان

در دنیای اقیانوسی تقریباً در همه پروفایل‌های دما و شوری وارونگی‌هایی وجود دارد که ساختار نفوذی ترموهالاینی جانبی را نشان می‌دهد. پروفایل‌های قائم و برش‌های مقطعی دما، شوری و سیگماتی در مسیر A در تنگه هرمز و در مسیرهای F و C در دریای عمان در زمستان و تابستان رسم شده‌اند. مسیرهای مورد بررسی بر اساس

در این گونه همرفت وجود خواهد داشت [۲]. رژیم انگشتی هنگامی رخ می‌دهد که آب گرم و شور روی آب سرد و نسبتاً شیرین قرار می‌گیرد و رژیم لایه‌ای (نوسانی) هنگامی که آب‌های سرد و شیرین روی آب‌های گرم و شور قرار گیرند یا ستون آب با گرادیان شوری پایدار از پایین گرما ببیند. در این حالت به دلیل ناپایداری در اثر گرادیان دما یک لایه در کف ایجاد می‌شود و همرفت صورت می‌گیرد در نتیجه لایه نازکی تشکیل می‌شود [۱۰].

۳. نسبت چگالی Rp

نسبت پایداری یا نسبت چگالی رابطه پخش دوگانه با نسبت گرادیان دما و شوری است [۹]. نسبت چگالی Rp پارامتری کلیدی برای مطالعه همرفت پخش دوگانه است درحقیقت همرفت پخش دوگانه با نسبت چگالی برای نیمرخ‌های دما و شوری از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Rp = \alpha \Delta T / \beta \Delta S \quad (1)$$

α ضریب انبساط دمایی و β ضریب تراکم شوری است. نسبت چگالی یا نسبت پایداری برای $Rp > 1$ مساعد برای رژیم انگشتی است. $Rp < 1$ یا $0 < Rp < 1$ مساعد برای رژیم پخشی است و $Rp = 0$ بر دمای یکنواخت دلالت دارد. (احتمالاً نتیجه همرفت درون یک لایه) $Rp < 0$ بر گرادیان پایدار هر دو دما و شوری دلالت دارد و همرفت پخش وجود ندارد. وقتی Rp به ۱ نزدیک می‌شود وقوع هر دو رژیم پخشی و انگشتی محتمل است.

در جبهه‌های افقی اقیانوسی که یک سمت آن، آب گرم و شور و سمت دیگر آن آب سرد و شیرین قرار دارد Rp نزدیک به ۱ است. زیرا دما و شوری اثر معکوس بر روی چگالی گذاشته و جبران کننده یکدیگر هستند [۱۱]. در بیشتر مناطق اقیانوسی مقادیر Rp مقادیر مثبت یا منفی خیلی بزرگ و گاهی بینهایت هستند، به جز برای گردش جنب حاره‌ای که تقریباً یک مقدار ثابت است. مشکلات وقتی بوجود می‌آیند که σ_θ خیلی کوچک است و علامت Rp وابسته به علامت SZ است زیرا در ترموکلاین (σ_z) تقریباً در هر جایی مثبت است [۱۲]. به منظور ایجاد تفسیر راحت‌تر و اجتناب از ابهام علامت‌ها [۱۳] زاویه ترنر^۱ را معرفی کرد.

$$Tu(\text{deg}) = \tan^{-1} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} - \beta \frac{\partial S}{\partial z}, \alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} + \beta \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$Rp = -\tan(Tu + 45) \quad (3)$$

$$\alpha = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \quad (4)$$

$$\beta = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial S} \quad (5)$$

¹ Turner Angle

دارد. یک جریان خروجی شور با کمی تفاوت در هر دو فصل مشاهده می‌شود.

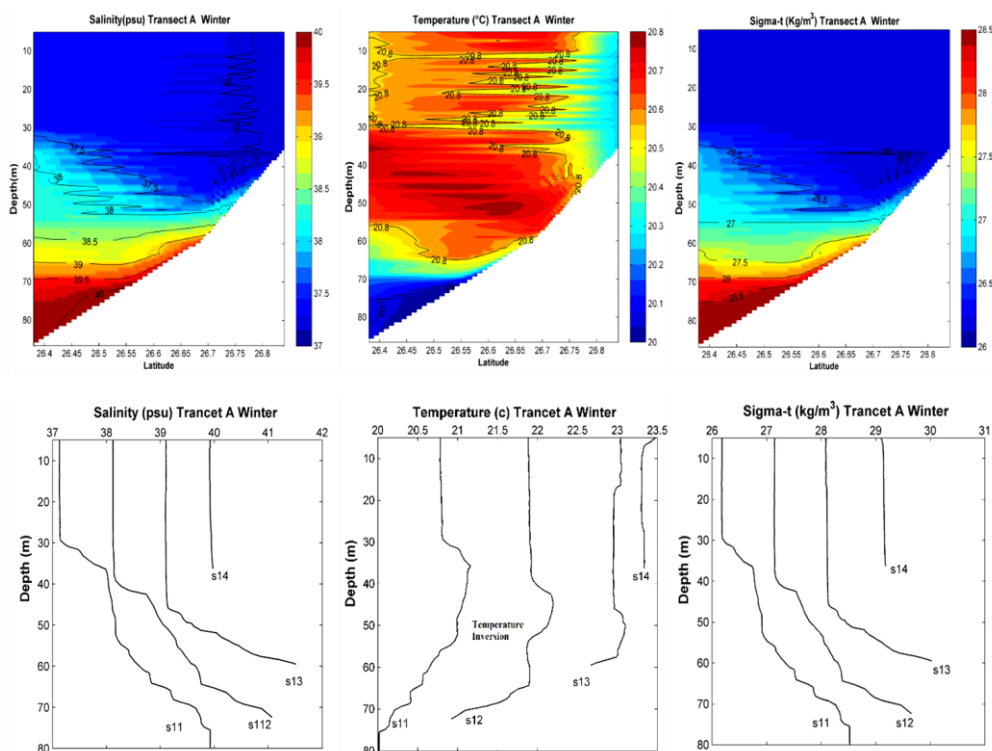
شکل‌های ۵ و ۶ پروفایل‌های قائم و برش‌های مقطعی دما، شوری و سیگماتی را در دو مسیر C و F به ترتیب در زمستان و تابستان در منطقه جبهه‌ای بین تنگه هرمز و راس‌الحد نشان می‌دهند. وارونگی های دما و شوری در تابستان از عمق حدود ۱۰۰ تا ۳۵۰ متر و در زمستان از عمق حدود ۱۵۰ تا ۴۵۰ متر مشاهده می‌شوند. در ۱۰۰-۱۵۰ متر بلایی آب‌های سرد جریان خروجی خلیج فارس با شوری کمتر بر روی آب گرم با شوری بیشتر قرار دارد که چینه‌بندی را برای شکل‌گیری فصل مشترک پخش و همرفت پخش دوگانه ایجاد می‌کند. لایه‌های نفوذی ترموهالاینی در پروفایل شوری از عمق ۱۰۰-۱۵۰ متر شروع شده و تا عمق بین ۲۵۰ - ۳۰۰ متر افزایش می‌یابند و به مقدار ماکزیمم خود می‌رسند.

از عمق میانگین ۲۵۰ متر تا حدود ۳۵۰-۴۵۰ متر دما و شوری هر دو کاهش یافته و چینه‌بندی ترموهالاینی با همرفت رژیم انگشتی سازگار است. از عمق حدود ۴۵۰ متر به بعد ستون آب بطور کامل چینه‌بندی پایدار دارد.

موقعیت جغرافیایی آنها در منطقه شیب قاره در دریای عمان انتخاب شده‌اند.

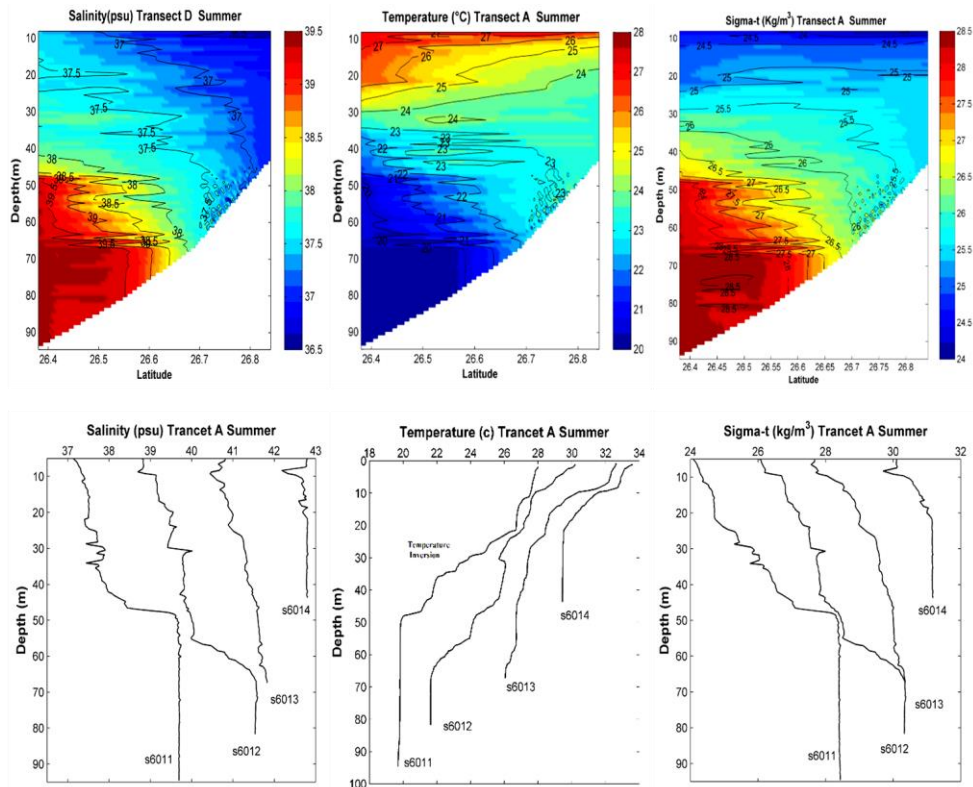
شکل‌های ۳ و ۴ پروفایل‌های قائم و برش‌های مقطعی دما، شوری و سیگماتی را در مسیر A در زمستان و تابستان در تنگه هرمز نشان می‌دهد. جریان خروجی خلیج فارس در زمستان و تابستان در این منطقه کمی با هم تفاوت دارند. در زمستان چینه‌بندی ابتدا یکنواخت و سپس ضعیف می‌شود. بادهای شمالی که سرد هستند در مجاورت آب‌های گرم خلیج فارس تبادل سرمایی انجام می‌دهند و باعث انتقال حرارت به سطح می‌شوند. بادهای سرد در لایه‌های بالا شروع به همرفت کرده و باعث ایجاد اختلاط می‌شوند که در مسیر A بخوبی قابل مشاهده است. در این منطقه وارونگی‌های دما قابل مشاهده است.

در تابستان ترموکلاین فصلی بسیار قوی وجود دارد که وقتی شروع به شکسته شدن می‌کند باعث سرد شدن آب‌های سطحی می‌شود. ترموکلاین در نیمرخ دما کاملاً گسترش یافته و اثرات آن در شکل به صورت لکه‌های آبی کم رنگ مشاهده می‌شود که نشان دهنده وارونگی است. در تابستان چینه بندی بسیار قوی تری نسبت به زمستان وجود



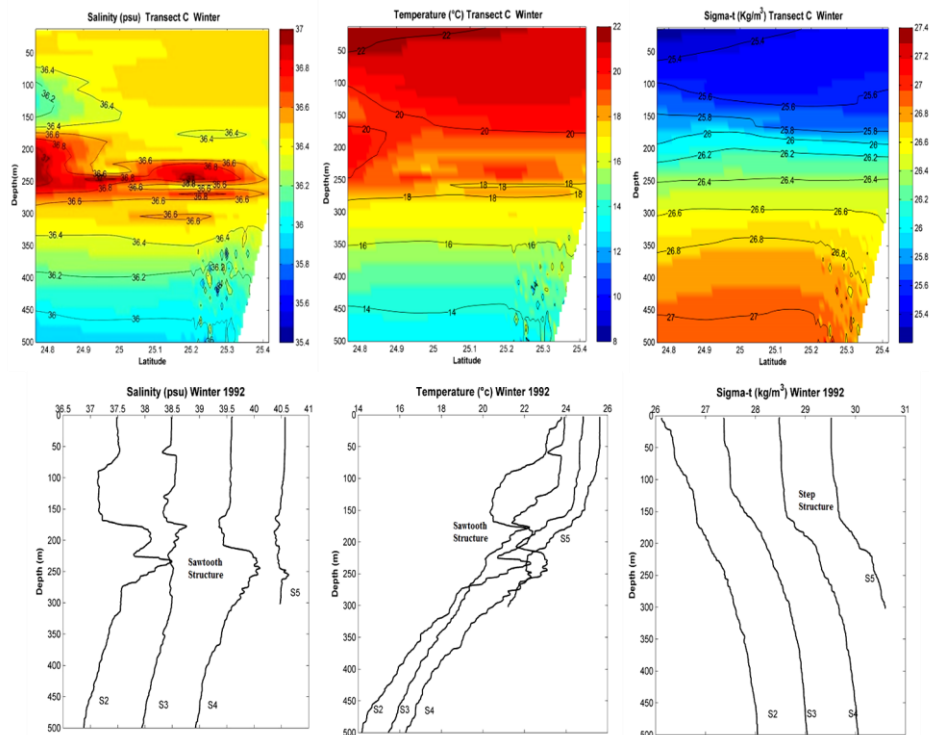
شکل ۳: برش‌های مقطعی و نیمرخ‌های قائم دما، شوری و سیگماتی در ترانسکت A در زمستان. برای بررسی واضح‌تر به ترتیب به اندازه واحدهای ایستگاه ۱۲ یک واحد و به ایستگاه ۱۳ دو واحد و اضافه شده است.

Fig 3: Cross-sections and vertical profiles of temperature, salinity and sigma-t in transect A in winter. For a clearer review, one unit has been added to the size of station 12 and two units to station 13, respectively.



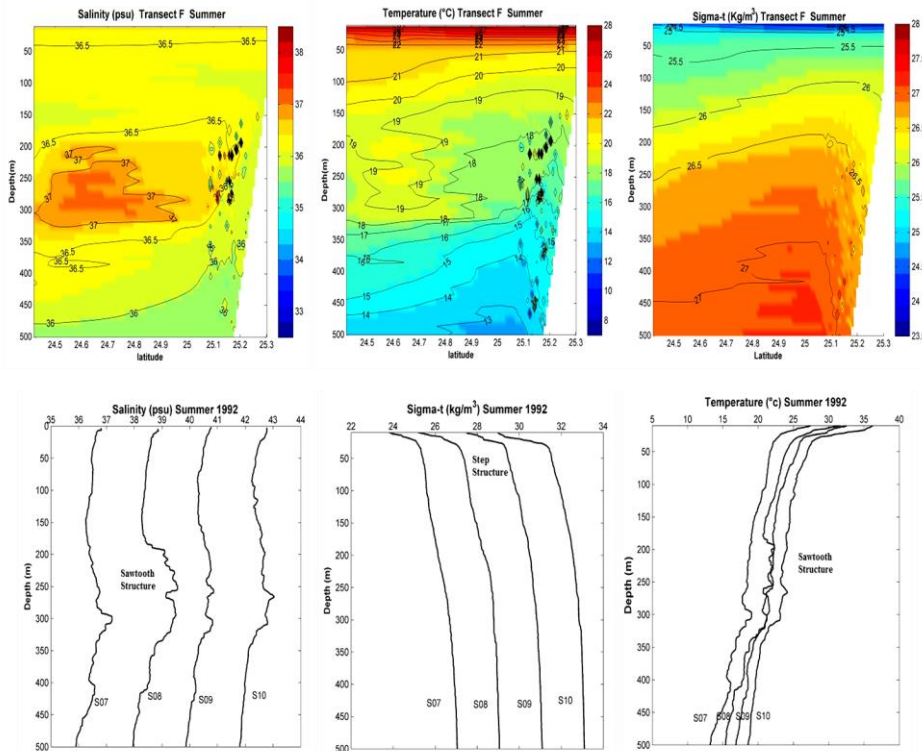
شکل ۴: برش‌های مقطعی و نیمرخ‌های قائم دما، شوری و سیگماتی در ترانسکت A در تابستان. برای بررسی واضح‌تر به ترتیب به اندازه واحدهای ایستگاه ۱۲ یک واحد و به ایستگاه ۱۳ دو واحد و اضافه شده است.

Fig 4: Cross-sections and vertical profiles of temperature, salinity and sigmatic in transect A in summer. For a clearer review, one unit has been added to the size of station 12 and two units to station 13, respectively.



شکل ۵: برش‌های مقطعی و نیمرخ‌های قائم دما، شوری و سیگماتی در ترانسکت C در زمستان. برای بررسی واضح‌تر به ترتیب به اندازه واحدهای ایستگاه ۲ یک واحد و به ایستگاه ۳ دو واحد و اضافه شده است.

Fig 5: Cross-sections and vertical profiles of temperature, salinity and sigmatic in transect C in winter. For a clearer review, one unit has been added to the size of Station 2 units and two units to Station 3, respectively.



شکل ۶: برش‌های مقطعی و نیمرخ‌های قائم دما، شوری و سیگماتی در ترانسکت F در تابستان. برای بررسی واضح‌تر به ترتیب به اندازه‌های ایستگاه ۲ یک واحد و به ایستگاه ۳ دو واحد و اضافه شده است.

Fig 6: Cross-sectional and vertical profiles of temperature, salinity and sigma-t in transect F in summer. For a clearer review, one unit has been added to the size of Station 2 units and two units to Station 3, respectively.

دو لایه با مقادیر سیگماتی حدود $25/5 \text{ kg/m}^3$ در لایه بالایی و 29 kg/m^3 در لایه پایینی و به صورت ضخیم را نشان می‌دهند.

ضخامت لایه‌های نفوذی در مرز بین توده‌های آب در پروفایل‌های دما، شوری و سیگماتی حدود ۱۰ تا ۲۰ متر است. در تابستان بر خلاف زمستان جریان خروجی خلیج فارس که وارد دریای عمان می‌شود یکپارچه و متحد است. زیرا ترموکلاین در این فصل از فصل‌های ضخامت لایه‌های نفوذی در مرز بین توده‌های آب در پروفایل‌های دما، شوری و سیگماتی حدود ۱۰ تا ۲۰ متر است.

در تابستان بر خلاف زمستان جریان خروجی خلیج فارس که وارد دریای عمان می‌شود یکپارچه و متحد است. زیرا ترموکلاین در این فصل از فصل‌های دیگر قوی‌تر است و مثل یک در پوش عمل می‌کند و اجازه نمی‌دهد واداشتهای سطحی مثل باد یا شناوری سطحی و پیچک‌ها به لایه‌های زیرین نفوذ کنند بنابراین جریان خروجی یکپارچه باقی می‌ماند و اختلاط کمتری دارد.

ضخامت لایه‌ها حدود (۵۰) در جریان خروجی خلیج فارس ممکن است به علت امواج درونی باشد که سریع‌تر از همرفت پخش در جریان خروجی ایجاد شده‌اند. مقایسه بین نیمرخ‌های قائم و مقطع عرضی نشان می‌دهد که وارونگی‌های دما و شوری در منطقه جبهه‌ای در عمق بین ۲۰۰-۲۵۰ متر مشاهده می‌شوند.

شکل ۷ نمودارهای دما بر حسب شوری (T-S) اختلاط توده‌های آب جریان خروجی خلیج فارس را در زمستان و تابستان نشان می‌دهند.

در این منطقه آب گرم و شور بین دو لایه آب سرد و شیرین قرار دارد. در این حالت یک مرز در بالا که آب سرد و شیرین بر روی آب گرم و شور و مرز دیگر آب گرم و شور بر روی آب سرد و شیرین قرار می‌گیرد. فرارفت پخش دوگانه در مرز بالا و رژیم انگشتی در مرز پائین مشاهده می‌شود. لایه‌های نفوذی ترموکلاینی در تمام ایستگاه‌ها در نیمرخ‌های دما و شوری ساختار دندان‌دانه‌ای داشته در حالیکه در میدان چگالی ساختار پله‌ای دارند به عبارتی یک توالی پایدار هیدروستاتیکی و گرادیان کم لایه‌ها را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه ضریب پخش مولکولی گرما (K_t) صد برابر بیشتر از ضریب پخش مولکولی شوری (K_s) است بنابراین لایه‌های نازک در حین حرکت گرمای خود را از دست داده ولی شوری خود را حفظ می‌کنند در نتیجه ساختار لایه‌ای ایجاد شده در نیمرخ‌های قائم شوری نسبت به نیمرخ‌های قائم دما برای مدت زمان طولانی‌تری باقی می‌ماند [۱۰]. بنابراین انتظار می‌رود که در نیمرخ‌های قائم شوری، ساختار لایه‌ای بارزتر ظاهر شوند.

مقدار ماکزیمم دما و شوری در زمستان به $21/4 \text{ }^\circ\text{C}$ و $37/9 \text{ psu}$ و در تابستان به $30/1 \text{ }^\circ\text{C}$ و 37 psu می‌رسد. ماکزیمم شوری در عمق پائین‌تری نسبت به ماکزیمم دما قرار دارد. در زمستان تغییرات لایه‌های نفوذی در برش‌های مقطعی شوری بیشتر از دما است. برش‌های مقطع عرضی در نیمرخ‌های سیگماتی شکل‌گیری محیط

جداول ۱ و ۲ مقادیر نسبت چگالی را بین $R_p < 21$ در ایستگاه‌های شکل ۲ نشان می‌دهند که وقوع هر دو رژیم پخشی و انگشتی محتمل است. شکل ۸ مثال‌هایی از نیمرخ‌های قائم زاویه ترنر و نسبت چگالی را در زمستان و تابستان نشان می‌دهد. ایستگاه‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی آنها در منطقه شیب قاره در دریای عمان انتخاب شده‌اند. نسبت چگالی بین $R_p < 21$ در عمق بین ۲۰۰-۳۰۰ متر جریان خروجی خلیج فارس، هر دو فرآیند همرفت پخش و رژیم انگشتی را در لایه‌های نفوذی نشان می‌دهد.

جدول ۱: نسبت چگالی در ایستگاه‌های شکل ۲ در زمستان ۱۹۹۲

Table 1: Density ratios at Figure 2 stations in winter 1992

ایستگاه‌های زمستان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نسبت چگالی
۱	۲۴/۵۵	۵۶/۸۶	۱/۳۸
۲	۲۴/۷۶	۵۷/۱۳	۱/۴۹
۳	۲۴/۹۸	۵۷/۴۰	۱/۷۱
۴	۲۵/۱۹	۵۷/۶۷	۱/۶۱
۵	۲۵/۴۱	۵۷/۹۵	۱/۰۶
۶	۲۴/۷۶	۵۷/۱۱	۱/۳۹
۷	۲۴/۹۶	۵۷/۴	۱/۴۵
۸	۲۵/۱۹	۵۷/۶۷	۱/۳۵

جدول ۲: نسبت چگالی در ایستگاه‌های شکل ۲ در تابستان ۱۹۹۲

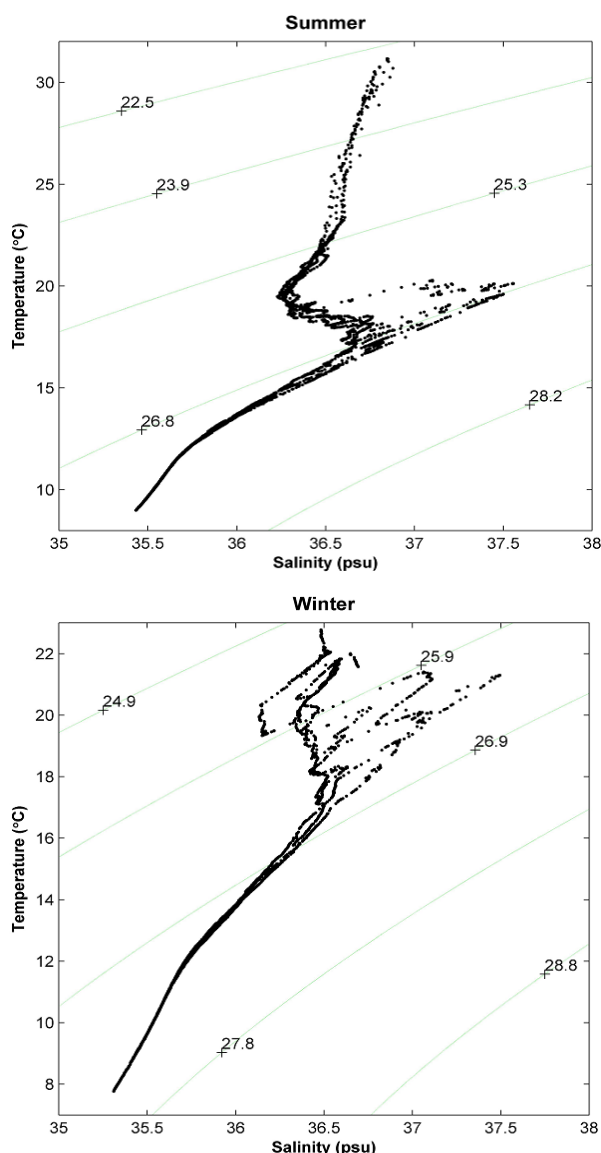
Table 2: Density ratios at Figure 2 stations in summer 1992

ایستگاه‌های تابستان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نسبت چگالی
۶	۲۴/۷۶	۵۷/۱۱	۱/۵۹
۷	۲۴/۹۶	۵۷/۴	۱/۴۲
۸	۲۵/۲۹	۵۷/۶۷	۱/۱۵
۹	۲۴/۴۲	۵۷/۴۳	۱/۵۷
۱۰	۲۴/۴۲	۵۷/۴۲	۱/۵۴
۱۱	۲۴/۶۲	۵۷/۶۹	۱/۴۱
۱۲	۲۴/۸۵	۵۷/۹۱	۱/۸۵
۱۳	۲۵/۳۰	۵۸/۴۵	۱/۸۱

بر اساس نیمرخ‌های قائم زاویه ترنر بنظر می‌رسد که هر دو فرآیند همرفت‌های پخش و رژیم انگشتی در منطقه جبهه‌ای دریای عمان رخ می‌دهند که نقش مهمی در انتقال گرما و شوری دارند.

در این آب‌ها لنزهای گرم و شور با همرفت پخش در مرز بالا و رژیم انگشتی در مرز پایین مورد انتظار هستند. نوسانات همرفت پخش بین ۹۰+ و ۹۰- در لایه‌های بالا جریان خروجی و افزایش از ۹۰- تا ۶۰- در قسمت پایین جریان خروجی خلیج فارس با رژیم انگشتی مطابقت دارند.

گرادیان‌های محلی دما و شوری در زمستان و تابستان در شکل ۹ نشان می‌دهند که در مرز بالائی گرادیان دما بزرگتر از گرادیان شوری بوده و دما ناپایدارتر از شوری می‌باشد. بنابراین همرفت پخش غالب است و



شکل ۷: نمودارهای دما بر حسب شوری (T-S) در زمستان (الف) و تابستان (ب) در دریای عمان.

Fig 7: Temperature graphs in terms of salinity (T-S) in winter (a) and summer (b) in the Oman Sea

در زمستان تغییرات در دما و شوری و سیگماتی به ترتیب 19°C ، 19 psu و $26/9\text{ kg/m}^3$ و $37/5\text{ kg/m}^3$ در تابستان به ترتیب 21°C ، 21 psu و $26/9\text{ kg/m}^3$ می‌باشد. در هر دو نمودار توده آب گرم و شور بین دو توده آب سرد و شیرین قرار دارد که در لایه‌های بالایی جریان خروجی خلیج فارس سازگار با همرفت پخش و در لایه‌های پایین با رژیم انگشتی مطابقت دارد. در قسمت‌های عمیق چینه‌بندی کاملاً پایدار است.

در زمستان جریان خروجی خلیج فارس به علت چگالی بیشتر آب در این فصل در عمق پایین‌تری نسبت به تابستان قرار دارد. نمودارهای دما و شوری موقعیت جریان خروجی نفوذی را با ضخامت متفاوت در اعماق مختلف در دریای عمان نشان می‌دهند. تغییر در موقعیت زبانه‌های شور در نمودارها به علت تغییرات توده‌های آب در عمق‌ها و مسیرهای متفاوت جریان خروجی نفوذی است.

اعماق بین ۱۰۰ تا ۴۵۰ متر در طول سال در دریای عمان تأیید می‌کنند.

در زمستان در عمق بین ۱۵۰-۴۵۰ متر و در تابستان ۱۰۰-۴۰۰ نشان می‌دهد. در زمستان جریان خروجی خلیج فارس به علت چگالی بیشتر آب در عمق پایین‌تری نسبت به بقیه فصول قرار دارد. در تابستان جریان سطحی‌تر است و در عمق شناوری بالاتری نسبت به زمستان قرار دارد. ماکزیمم شوری در لایه‌های نفوذی در چهار فصل سال بین ۲۵۰-۳۰۰ متر مشاهده شده است بطوریکه با نتایج [۲] مطابقت دارد. از عمق میانگین ۲۵۰ متر تا حدود ۴۵۰ متر دما و شوری هر دو کاهش یافته و از این عمق به بعد ستون آب بطور کامل چینه‌بندی پایدار دارد.

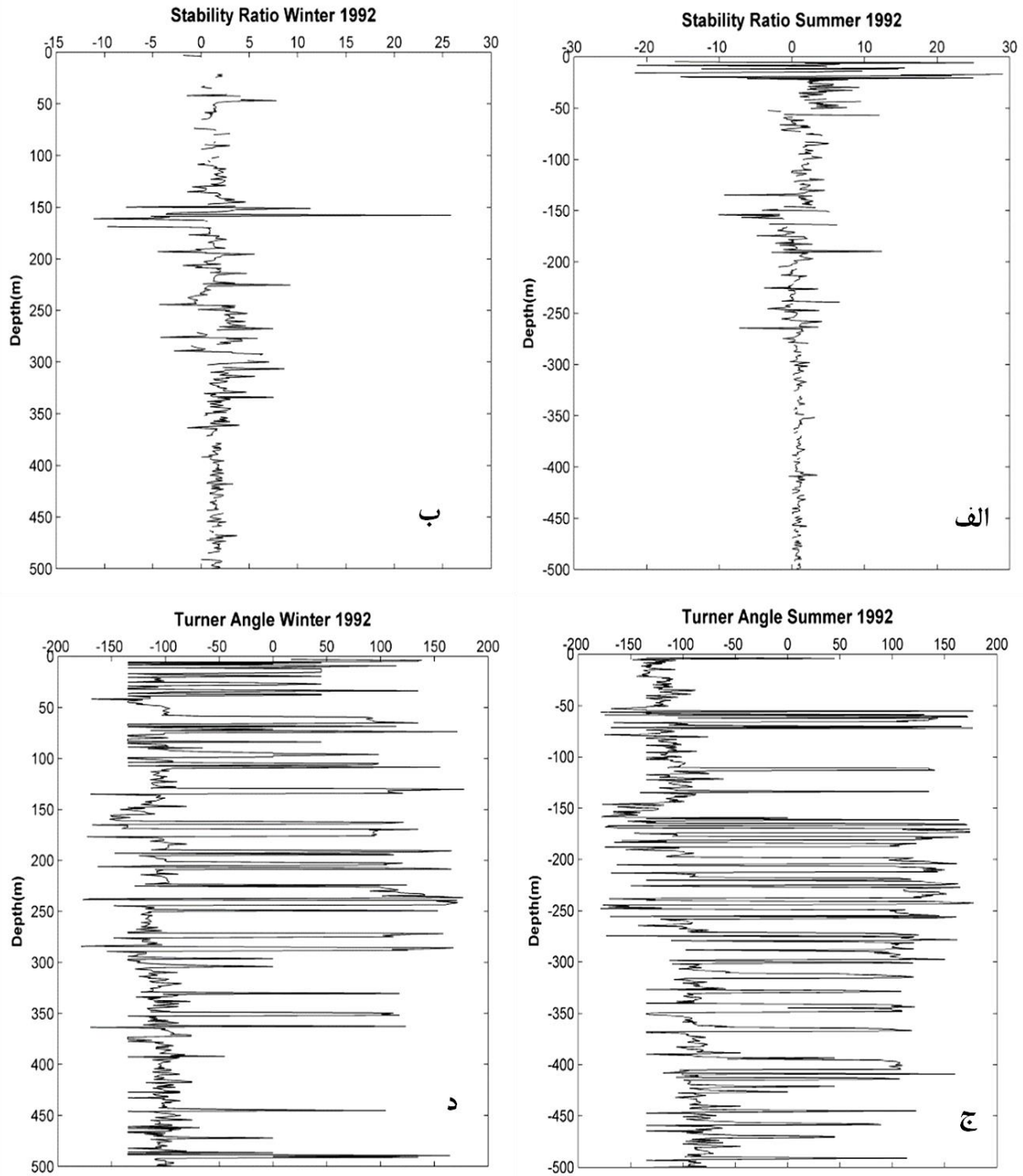
لایه‌های نفوذی ترموهالاینی در تمام ایستگاه‌ها در نیمرخ‌های دما و شوری ساختار دندانهای داشته در حالیکه در میدان چگالی ساختار پله‌ای دارند و ضخامت لایه‌های نفوذی در مرز بین توده‌های آب حدود ۱۰ تا ۲۰ متر است. توده‌های آب گرم و شور بین دو توده آب سرد و شیرین قرار دارند و لنزهای گرم و شور نشان‌دهنده دو مرز در بالا و پائین هستند که در مرز بالا همرفت پخش و در مرز پائین رژیم انگشتی وجود دارد همانطوری که در تحقیق [۲] نشان داده است. پخش همرفتی عامل غالب در پخش دوگانه مربوط به حالت پایدار است. زمانی که زبانه‌ها به دلیل رژیم انگشتی و شرایط باروکلینیکی گسترش می‌یابند این پخش همرفتی است که عامل اصلی در محدود کردن رشد زبانه‌ها می‌باشد. [۱۴]

در مرز پائین گرادیان دما و شوری هردو ناپایدارند و هر دو رژیم پخشی و رژیم انگشتی رخ می‌دهند. گرادیان دما بطور مشخص از گرادیان شوری بزرگتر است. لایه‌های با ضخامت کمتر از ۲۰ متر مربوط به خرد ساختارها می‌باشند و لایه‌های با ضخامت بیشتر دلایل دیگری همچون امواج درونی دارند همانطوری که [۱۰] نشان داده است. هنگامیکه گرادیان دما ناپایدار است همرفت پخش در لایه‌ها رخ می‌دهد و شار گرمایی بزرگتر از شار شوری است. زمانیکه گرادیان شوری ناپایدار است در این حالت رژیم انگشتی رخ می‌دهد و شارهای شوری بزرگتر از شارهای دمائی هستند.

نتیجه‌گیری

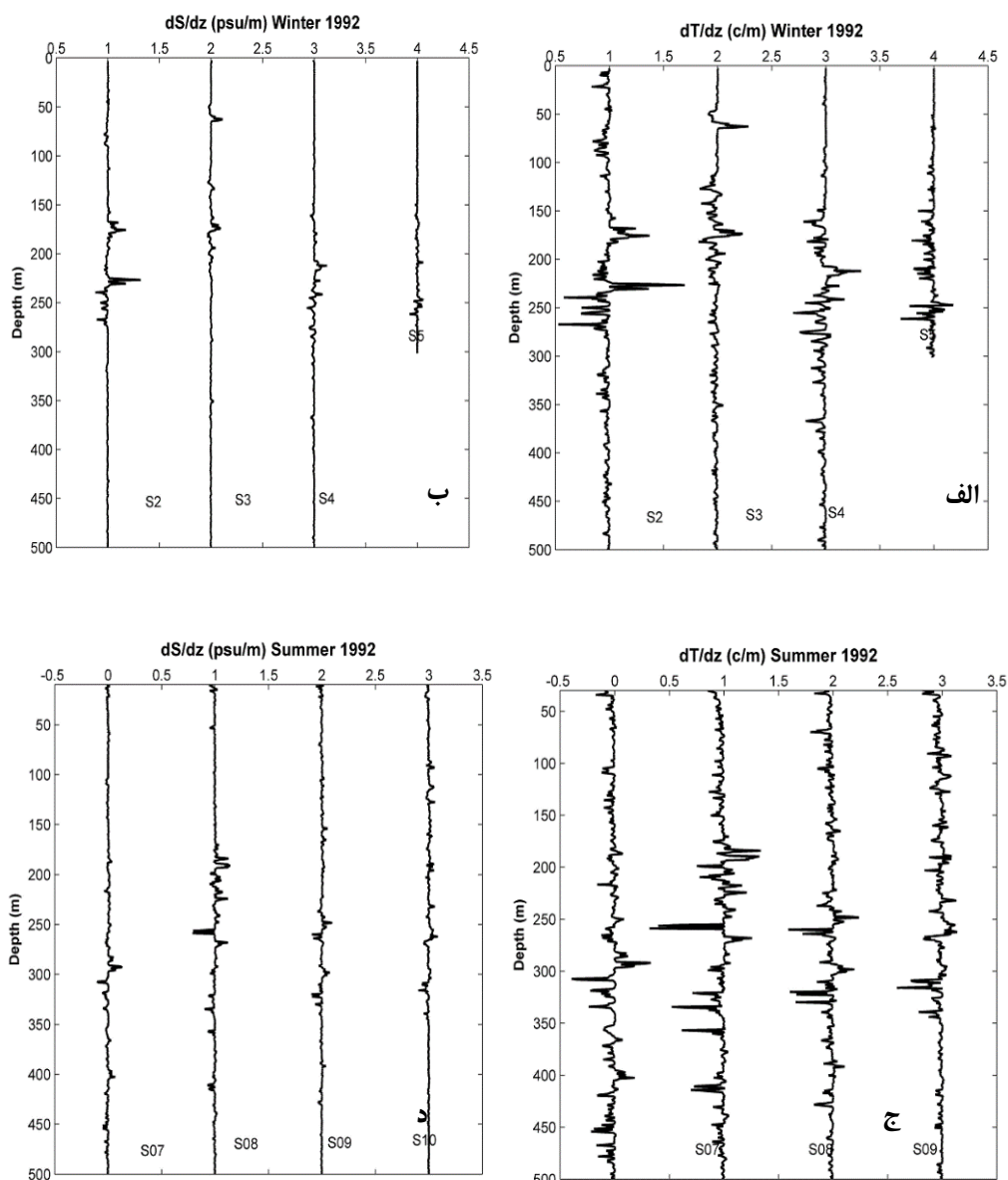
در تحقیق حاضر به منظور شناخت بهتر وارونگی‌های دما و شوری و نقش همرفت پخش دوگانه در دریای عمان ساختار نفوذی در دریای عمان تحلیل داده‌های اندازه‌گیری ROPME در زمستان و تابستان ۱۹۹۲ انجام شده است.

اندازه‌گیری‌های میدانی حضور ساختار لایه‌ای نفوذی و وارونگی‌های دما و شوری را در دریای عمان تأیید می‌کند. هنگامیکه جریان خروجی خلیج فارس وارد دریای عمان می‌شود، از بستر جدا شده و روی شیب قاره به مناطق عمیق‌تر نفوذ می‌کند تا به عمق شناوری خنثی برسد در این مرحله فرارفت افقی جریان به صورت جریان شورتر و گرمتر نسبت به آب‌های پیرامون مشاهده می‌گردد. جریان نفوذی ترموهالاینی را در



شکل ۸: نیمرخ‌های قائم زاویه ترنر و نسبت چگالی در مسیرهای F, C در ایستگاه‌های ۳ و ۰۵ در شکل ۱ در تابستان (الف و ج) و زمستان (ب و د) ۱۹۹۲

Fig 8: Turner angle profiles and density ratios on F, C lanes at stations 3 and 05 in Figure 1 in summer (a and c) and winter (b and d) 1992



شکل ۹: گرادیان محلی دما و شوری در زمستان (الف و ب) در مسیر C و تابستان (ج و د) در مسیر F. برای بررسی واضح‌تر به اندازه واحدهای ایستگاه‌های ۳ و ۸ به ترتیب یک واحد و به ایستگاه‌های ۴ و ۹ دو واحد و اضافه شده است.

Fig 9: Local temperature and salinity gradients in winter (a and b) in route C and summer (c and d) in route F. For a clearer study of the size of stations 3 and 08, one unit, respectively, and stations 4 and 09, two units. Added

به این وسیله، نویسندگان این مقاله از کلیه کسانی که در این مطالعه نقشی داشته‌اند تشکر و قدردانی مینمایند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی برای این مطالعه وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به یک میزان در نگارش این مقاله مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

References

1. Reynolds RM. Physical Oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman. Results from the Mt Mitchell Expedition. *Ma Marine Pollut Bullet.* 1993;27:35-59. doi: 10.1016/0025-326X(93)90007-7
2. Bidokhti AA, Sabagh kashani Z. Double Diffusive Convection and Temperature Inversion in the Persian Gulf and Oman Sea. 2003;29(1):33-46.
3. Swift SA, Bower AS. Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf. *J Geophysic*

- Res Ocean.* 2003;**108**(C1):1-4. doi: [10.1029/2002JC001360](https://doi.org/10.1029/2002JC001360)
4. Ruddick BR, Oakey NS, Hebert D. Measuring lateral heat flux across a thermohaline front: A model and observational test. *J Marine Res.* 2010;**68**(3-4):523-539. doi: [10.1357/002224010794657146](https://doi.org/10.1357/002224010794657146)
 5. Bidokhti AA. Shear induced splitting of a plume outflow in a stratified enclosed basin. *India J Geo Marine Sci.* 2005;**34**(2):192-211.
 6. Rudnick DL, Ferrari R. Compensation of horizontal temperature and salinity gradients in the ocean mixed layer. *Science.* 1999;**283**(5401):526-529. doi: [10.1126/science.283.5401.526](https://doi.org/10.1126/science.283.5401.526) pmid: 9915697
 7. May B, Kelly D. Growth and steady state stages of thermohaline intrusions in the Arctic Ocean. *J Physic Pceanograph.* 2001;**106**(C8):16783-16794. doi: [10.1029/2000JC000605](https://doi.org/10.1029/2000JC000605)
 8. Ruddick B, O. K. Oceanic thermohaline intrusions: theory. *Progress Oceanograph.* 2003a;**56**(3-4):483-497. doi: [10.1016/S0079-6611\(03\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00029-6)
 9. Turner JS. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge University Press, Cambridge 1973.
 10. Akbari A, Beidakhti AA. Fundamentals of fluid dynamics. University of Tehran Press. 2004.
 11. You Y. A global ocean climatological atlas of the Turner angle: Implications for double-diffusion and water mass structure. *Deep-Sea Res.* 2002;**49**(11):2075-2093. doi: [10.1016/S0967-0637\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00099-7)
 12. Griffiths RW, Bidokhti AA. Interleaving intrusions produced by internal waves: a laboratory experiment. *J Fluid Mechanic.* 2008;**602**:219-239. doi: [10.1017/S0022112008000839](https://doi.org/10.1017/S0022112008000839)
 13. Ruddick BR. A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Res.* 1983;**30**:1105-1107. doi: [10.1016/0198-0149\(83\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(83)90063-8)
 14. Bidokhti AA, M. E. The structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations. *Ocean Sci.* 2009;**5**(1):1-2. doi: [10.5194/os-5-1-2009](https://doi.org/10.5194/os-5-1-2009)

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Ghazi, E., Department of Marine Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran.

eram.ghazi@gmail.com

Bidokhti, A. Professor Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

bidokhti@ut.ac.ir

Ezam, M. Department of Marine Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ezam@srbiau.ir

Zoljoodi, M. Atmospheric Science Meteorological Research Center (ASMERC), Faculty Member and Assistant Professor, Tehran, Iran

M.zoljoodi@yahoo.com



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver) Ghazi, E, Bidokhti, A, Ezam M, Zoljoodi M. Study of Temperature and Salinity Inversions in the Oman Sea. 2021; 12(45): 16-27.

doi <http://doi.org/10.52547/joc.12.45.16>

uri <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1606-fa.html>

id <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.