

## Fluctuations of temperature and thermal energy in the place of double diffusion structures in the Strait of Hormuz

Solgi, M.<sup>1,2</sup>  | Mahdizadeh, M. M.<sup>3</sup>  | Ali Akbari Bidokhti, A. A.<sup>4</sup>  | Hassanzadeh, S.<sup>5</sup> 

1. **Corresponding Author**, PhD student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran. E-mail: [msolgi.ir@gmail.com](mailto:msolgi.ir@gmail.com)

2. PhD student, Department of Non-Biological Atmospheric and Ocean Sciences, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran. E-mail: [mehdizadeh@hormozgan.ac.ir](mailto:mehdizadeh@hormozgan.ac.ir)

3. Associate Professor, Department of Non-Biological Atmospheric and Ocean Sciences, Faculty of Marine Science and Technologies, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. E-mail: [mehdizadeh@hormozgan.ac.ir](mailto:mehdizadeh@hormozgan.ac.ir)

4. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [bidokhti@ut.ac.ir](mailto:bidokhti@ut.ac.ir)

5. Professor, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: [shz@sci.ui.ac.ir](mailto:shz@sci.ui.ac.ir)

(Received: 9 Mar 2023, Accepted: 13 Mar 2023, Published Online: 13 Mar 2023)

### Abstract

Double Diffusion Convection (DD) structures, in two types of Salt-Fingering (SF) and Diffusive Convection (DC), occur due to vertical temperature and salinity gradients with different diffusion coefficients. And thermohaline circulation in the Strait of Hormuz often causes the formation of SF on the surface and in the northern or middle parts of the strait and DC structure in the depth and southern parts of the Strait of Hormuz. In this study, the formation of DD investigated. This effect depends on the formation conditions of diffusion structures and the average structures and their role in temperature changes and thermal energy of water in the Strait of Hormuz have been temperature and thermal energy of the water mass. Due to the fluctuations resulting from the DD structures in the hot days of the year, a 2-5% change in the temperature and thermal energy of water is observed. So that the maximum changes up to 5% (change in energy) occur in the southern parts of the strait. The heat exchange during the DC process is higher than that of SF (more than 10 times). However, the thermal energy is minimal at the place of the cold mass and strong convection, and the DC structure is weakened due to the increased energy exchange with the environment,. This heat exchange causes the internal energy of water to decrease by about 250 J. While during the growth of SF, the temperature and thermal energy of the environment (on a small scale) increases.

**Keywords:** Double diffusion, Salt-fingering, Diffusive convection, Strait of Hormuz, Temperature, Thermal energy.

**Cite this article:** Solgi, M; Mahdizadeh, M. M; Ali Akbari Bidokhti, A. A; Hassanzadeh, S. (2022). Fluctuations of temperature and thermal energy in the place of double diffusion structures in the Strait of Hormuz. Nivar, Vol. 46, No. 118-119. 113-129. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.389044.1239>



## نوسانات دما و انرژی گرمایی در محل ساختارهای پخش دوگانه در تنگه هرمز

مصطفی سلگی<sup>۱</sup> | مهدی محمد مهدی زاده<sup>۲</sup> | عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۴</sup> | اسماعیل حسن زاده<sup>۵</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [msolgi.ir@gmail.com](mailto:msolgi.ir@gmail.com)
۲. دانشجوی دکتری، گروه علوم غیر زیستی جو و اقیانوس، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳. دانشیار، گروه علوم غیر زیستی جو و اقیانوس، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. رایانامه: [mehdzadeh@hormozgan.ac.ir](mailto:mehdzadeh@hormozgan.ac.ir)
۴. استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [bidokhti@ut.ac.ir](mailto:bidokhti@ut.ac.ir)
۵. استاد، گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [shz@sci.ui.ac.ir](mailto:shz@sci.ui.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲)

### چکیده

ساختارهای پخش دوگانه (Double Diffusion Convection)، در دو نوع انگشت نمکی (Salt-Fingering) و همرفت پخش (Diffusion Convection)، به دلیل گرادیان‌های قائم دما و شوری با ضرایب پخش متفاوت رخ می‌دهند و گردش ترموهالینی در تنگه هرمز موجب می‌شود تا غالباً در طول سال ساختار نمکی در سطح و در بخش‌های شمالی و میانی تنگه و ساختار همرفت پخش در عمق و بخش‌های جنوبی تنگه هرمز تشکیل شود. در این مطالعه شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه و نقش آنها در تغییرات دمایی و انرژی گرمایی آب در تنگه هرمز بررسی شده است. این اثرگذاری به شرایط شکل‌گیری ساختارهای پخش و میانگین دما و انرژی گرمایی توده آب بستگی دارد. به دلیل نوسانات حاصل از ساختارهای پخش دوگانه در روزهای گرم سال، ۲-۵ درصد تغییر در دما و انرژی گرمایی آب مشاهده می‌شود، بطوریکه بیشینه تغییرات تا ۵ درصد (تغییر در انرژی) در بخش‌های جنوبی تنگه رخ می‌دهد. تبادل گرمایی در طول فرآیند همرفت بیشتر از ساختار انگشت نمک (بیش از ۱۰ برابر) است. با این وجود انرژی گرمایی در محل توده سرد و همرفت قوی کمینه است، و ساختار همرفت پخش با افزایش تبادل انرژی با محیط، ضعیف می‌شود. این تبادل گرمایی موجب می‌شود تا انرژی درونی آب تا حدود ۲۵۰ ژول کاهش یابد. در حالیکه در طول رشد ساختار نمکی دما و انرژی گرمایی محیط (در مقیاس کوچک) افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** پخش دوگانه، انگشت نمک، همرفت پخش، تنگه هرمز، دما، انرژی گرمایی.

### ۱. مقدمه

چگالی تولید شده توسط آب چگال واقع در انتهای غربی و شمالی (و کم شورتر مناطق جنوبی و شرقی) خلیج فارس جریان آب شیرین را از خلیج عمان به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز هدایت می‌کند (پراساد و همکاران، ۲۰۰۱). در واقع تنگه هرمز با محدود کردن تبادل آب میان خلیج فارس و آبهای آزاد نقش مهمی در گردش ترموهالینی (Thermohaline Circulation) خلیج فارس ایفا می‌کند. از نظر عمق‌سنجی (شکل ۱. الف)؛ هیچ برآمدگی و یا تپه دریایی در بستر تنگه هرمز وجود ندارد و عمق خلیج فارس در این

تنگه هرمز یک گذرگاه طبیعی است که در موقعیت جغرافیایی ۲۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است (الحجری، ۱۹۹۰). خلیج فارس در غرب تنگه هرمز قرار دارد و تنها از طریق تنگه باریک هرمز با دریای عمان در ارتباط است و این امر مبادلات آبی را محدود می‌سازد. آب و هوای گرم و خشک خلیج فارس، منطقه‌ای با تبخیر بیشتر از بارش را ایجاد کرده است (پریوت و همکاران، ۱۹۵۹؛ پراساد و همکاران، ۲۰۰۱؛ جونز و همکاران، ۲۰۰۳) و گرادیان

**استناد:** سلگی، مصطفی؛ محمد مهدی زاده، مهدی؛ علی اکبری بیدختی، عباسعلی؛ حسن زاده، اسماعیل. (۱۴۰۱)، نوسانات دما و انرژی گرمایی در محل ساختارهای پخش

دوگانه در تنگه هرمز، مجله نیوار، دوره ۴۶، شماره ۱۱۸-۱۱۹، ۱۲۹-۱۱۳. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.389044.1239>



عرض جغرافیایی بالا (نیل و همکاران، ۱۹۶۹؛ مونچ و همکاران، ۱۹۹۰) مانند ژایر بیوفورت (Beaufort Gyre) در اقیانوس منجمد شمالی، شرایط شکل‌گیری ساختار همرفت پخش فراهم است. شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه بطور گسترده در مناطق مختلفی از جمله نواحی نیمه گرمسیری اقیانوس اطلس (اشمیت، ۱۹۸۱)، در دریای مدیترانه (ویلیامز، ۱۹۷۴)، در اقیانوس هند (یو، ۲۰۰۲) و در دریای سرخ (مگنل، ۱۹۷۶)، و بطور پراکنده در تنگه هرمز و خلیج فارس (عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۷؛ انصاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ اکبری نسب و همکاران، ۱۳۹۳) و در حاشیه جریان خروجی خلیج فارس به دریای عمان (بیدختی و عظام، ۲۰۰۹) مطالعه شده است. تنگه‌ها و محل تبادل ترموهالینی حوضه‌های شور با آبهای آزاد و یا مناطق با اختلاف دمای بالا میان لایه سطحی و عمیق از جمله نواحی مستعد شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه هستند. مناطقی مانند تنگه هرمز که تبادل عمده و اصلی در آن از طریق جریان ترموهالین است، مستعد ساختارهای پخش دوگانه بوده و بررسی آنها بعنوان یک اثر محیطی در منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی خلیج فارس و اهمیت ارتباطی آن از طریق تنگه هرمز با آبهای آزاد؛ بهره‌برداری علمی، اقتصادی، سیاسی و نظامی از آن وابسته به شناسایی و آگاهی از ویژگی‌های جغرافیایی و اقیانوس‌شناسی آن است. این امر موجب شده است تا در زمینه‌های مختلف اقیانوس‌شناسی مانند خواص فیزیکی، امواج و جزر و مد، گردش و تبادل ترموهالینی، فرآیندهای اقیانوسی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. بنابراین با توجه به شکل‌گیری ساختارهای ناشی از گرادیان‌های دما و شوری و به ویژه ساختارهای قائم پخش دوگانه، اثرات ناشی از شکل‌گیری و رشد این ساختارها در تنگه هرمز امری مهم و کاربردی است. هدف اصلی از این پژوهش، بررسی نوع، پراکندگی و عمق شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه در تنگه هرمز و مطالعه نقش این ساختارها در توزیع دما و انتقال انرژی گرمایی در ستون آب است. در این مطالعه ابتدا تغییرات قائم دما، شوری و فرکانس شناوری با تغییرات زاویه ترنر در ایستگاه‌های انتخاب شده در

ناحیه به بیش از ۱۱۱ متر نیز می‌رسد (رینولدز، ۱۹۹۳). عمق تنگه هرمز در نواحی جنوبی بیشتر از قسمت شمالی است. کف دریا در تنگه هرمز شیب نسبتاً تندی در جهت شمالی - جنوبی دارد بطوریکه عمق آن در نزدیکی جزیره لارک در حدود ۳۶ متر و در ساحل جنوبی نزدیک شبه‌جزیره المسندم ۱۸۰ متر است و دارای میانگین عمقی در حدود ۱۰۰ متر است. تغییر در جریان ورودی و خروجی آب در تنگه هرمز همراه با تبخیر سطحی، نقش مهمی در ایجاد گرادیان‌های دما و شوری و شکل‌گیری فرآیندهای افقی و قائم ناشی از آنها در ستون آب دارند. یکی از فرآیندهای قائم در ستون آب پخش دوگانه (Double Diffusion) است که به دلیل گرادیان قائم دما و شوری میان دو لایه آب و ضرایب پخش متفاوت دما و شوری (به ترتیب  $k_T = 1.04 \times 10^{-7} m^2/s$  و  $k_S = 1.04 \times 10^{-9} m^2/s$ ) ایجاد می‌شود. ساختارهای پخش دوگانه در انتشار دما و شوری در دریا نقش مؤثری دارند و اثرات آنها موجب شکل‌گیری ساختارهای لایه‌ای در دریا می‌شود که ممکن است بر ضرایب پخش قائم گرما، جرم و تکانه مؤثر باشد. فرآیند پخش دوگانه (DD)، در شرایط و شکل‌های متفاوت ایجاد می‌شود و موجب می‌شود تا ناپایداری و آمیختگی رخ دهد (استرن، ۱۹۶۰). دو نوع ساختار پخش دوگانه اقیانوسی وجود دارد؛ ساختار انگشت نمک (Salt-fingering) و همرفت پخشی (Diffusive Convection). انگشت نمک (SF)، زمانی اتفاق می‌افتد که لایه آب گرم و شور بر روی لایه سرد و کم شور قرار گیرد و دما و شوری به سمت بالا افزایش یابد (شکل ۲، الف). بطوریکه دما و شوری بسته آب بیشتر از محیط بوده و بسته انرژی از دست می‌دهد. از طرف دیگر همرفت پخش (DC) زمانی رخ می‌دهد که آب کم شور و سرد بر روی آب شور و گرم قرار گیرد (شکل ۲، ب) و نوسان قائم بسته آب با دریافت انرژی از محیط همراه است. SF و DC می‌توانند در عمق‌های مختلف بر اساس لایه بندی آب تشکیل شوند اما بطور غالب مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری همراه با تبخیر و گرمایش خورشیدی در سطح دریا، مستعد شکل‌گیری انگشتان نمک هستند و در مناطق با لایه بندی توده آب سرد بر لایه گرم در

می‌تواند تغییراتی در دما و شوری ستون آب ایجاد کند و علاوه بر آمیختگی در مرز دو لایه موجب تغییر در انرژی درونی و گرمای نهان تبخیر آب شود. جهت تبادل گرما با محیط با استفاده از اختلاف آنتالپی ( $dH=C_p dT$ )، بطوریکه  $C_p$  ظرفیت گرمایی آب در فشار ثابت بر حسب ژول بر درجه کلون است) تعیین می‌شود که منفی بودن مقادیر آن بیانگر گرماده بودن توده آب می‌باشد و هرچه قدرمطلق مقادیر آن بزرگ تر باشد شدت انتقال گرما به محیط بیشتر و عبارتی فرآیند پخش دمایی قوی‌تر است. نرخ تغییر دما در واحد فشار با کمیت نرخ کاهش (Lapse rate:  $\Gamma = -dT/dz$ )، بطوریکه  $T$  دما و  $Z$  عمق است) مشخص می‌شود و کمیتی مهم در تعیین تغییرات دمایی ناشی از پخش دوگانه با عمق است. انرژی درونی تنها تابع دما و تغییرات دمایی است و تبادل انرژی و تغییرات دمایی در ستون آب می‌تواند موجب تغییر در انرژی درونی آب شود ( $dU=C_v dT$ )، بطوریکه  $U$  انرژی درونی بر حسب ژول و  $C_v$  ظرفیت گرمایی آب در حجم ثابت بر حسب ژول بر درجه کلون است)، بطوریکه با کاهش انرژی درونی آب، مقدار انرژی لازم برای تبخیر یک کیلوگرم آب یا گرمای نهان تبخیر افزایش می‌یابد ( $Q_v = mL_v$ )، بطوریکه  $m$  جرم آب بر حسب کیلوگرم و  $L_v$  گرمای ویژه نهان تبخیر بر حسب ژول بر کیلوگرم است).

## ۲-۱. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

شرایط آب و هوایی و گردش ترموهالینی در تنگه هرمز موجب می‌شود تا همواره در طول سال ساختارهای SF و DC در عمق‌های مختلف در تنگه تشکیل شوند. متناسب با لایه بندی آب و زمان شکل‌گیری ساختارهای پخش، ممکن است انگشت نمک و یا همرفت پخش بطور غالب و با ساختارهای قوی و ضعیف تشکیل شوند. با این وجود جریان ترموهالینی گرم ورودی از شمال تنگه و جریان سرد و شور خروجی از جنوب تنگه موجب می‌شود تا بطور میانگین شرایط شکل-گیری انگشت نمک در سطح و در بخش‌های شمالی و میانی تنگه و شرایط شکل‌گیری همرفت پخش در عمق و اندک

شکل ۱ب، مقایسه می‌شوند. سپس تغییرات ضریب انبساط گرمایی، جهت تبادل انرژی بسته آب با محیط، نرخ انتقال گرما در عمق و تغییرات انرژی درونی و گرمای نهان تبخیر بعنوان اثرات ساختارهای پخش در ستون آب مقایسه و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲. داده و روش تحقیق

در این تحلیل، برای استخراج پروفایل‌های قائم از داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از CTD (PG-GOOS)، نوامبر ۲۰۱۲ تا آگوست ۲۰۱۳) و گردآوری شده توسط موسسه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ایران (شکل ۱.ب) و برای بررسی تغییرات دو بعدی متغیرهای فیزیکی در طول مقطع انتخاب شده (شکل ۱.ب، Section)، از داده‌های HYCOM با میانگین شش روزه از ۵ ژانویه ۲۰۱۵ استفاده شده است. همچنین، عمق سنجی و توپوگرافی منطقه از داده‌های Etopo-2 استخراج شده است. با استفاده از داده‌های موجود ساختارهای قائم انگشت نمک و همرفت پخش در ایستگاه‌های انتخاب شده در شکل ۱ تعیین و مقایسه می‌شوند و توزیع گرمایی ناشی از آنها بررسی می‌شود. برای بررسی و تحلیل پخش دوگانه از روش زاویه ترنر ( $Tu$ ) بر حسب مقادیر تفکیک شده نسبت چگالی ( $R_p$ ) استفاده می‌شود؛  $R_p = -\tan(Tu + 45)$ ، بطوریکه

$R_p = \frac{\alpha T_z}{\beta S_z}$  و  $T_z$  و  $S_z$  به ترتیب گرادیان قائم دما (

$T_z = \frac{\partial T}{\partial Z}$ ) و شوری ( $S_z = \frac{\partial S}{\partial Z}$ ) و  $\alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{S,P}$

به ترتیب ضریب انبساط گرمایی و شوری  $\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_{T,P}$

هستند (رودیک، ۱۹۸۳ و کاپلان، ۲۰۰۸). بر اساس مقادیر

نسبت چگالی، مقادیر زاویه ترنر برای شکل‌گیری ساختارهای

پخش دوگانه در محدوده مقادیر  $90 < Tu(DD) < -90$

تعریف می‌شوند. بطوریکه ساختار همرفت پخش به ازای

مقادیر  $-90 < Tu(DC) < -45$  و ساختار انگشت نمک به ازای

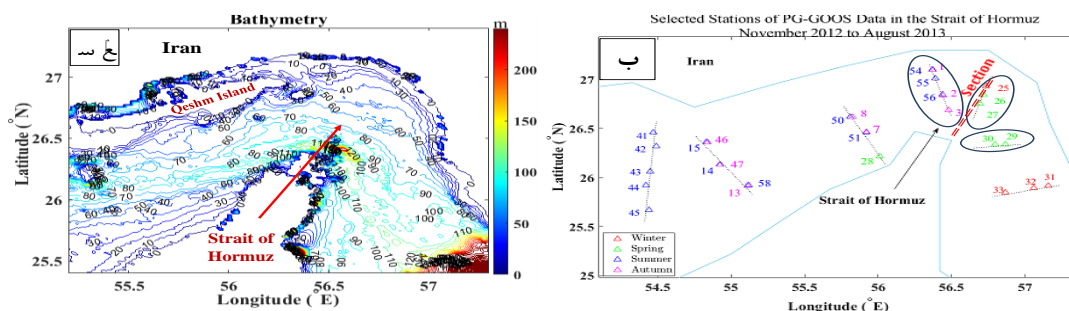
مقادیر  $45 < Tu(SF) < 90$  شکل می‌گیرد.

رشد ساختارهای انگشت نمک و همرفت پخش به دلیل

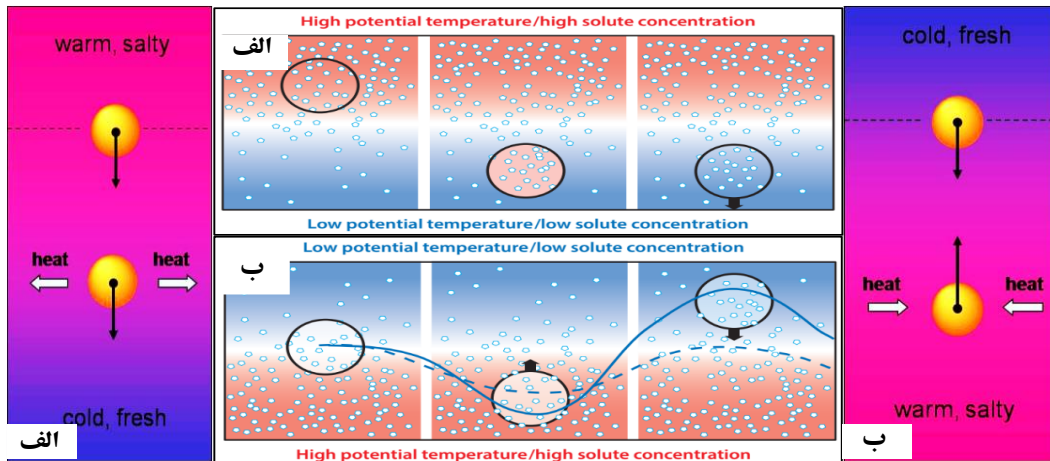
نوسانات قائم توده آب و تبادل گرما و شوری با محیط،

یابد بطوریکه در ایستگاه‌های ۱ و ۲، لایه سطحی گرم‌تر و شورتر است و دما و شوری از سطح تا عمق 5 m در ایستگاه ۱ و تا عمق 30 m در ایستگاه ۲ کاهش می‌یابد. افزایش نسبی شوری و وزن بسته آب موجب می‌شود تا شناوری آب تعدیل شود بطوریکه فرکانس شناوری در ایستگاه ۱، در عمق 1.5- 2.5 m حداقل مقدار را دارد و شرایط شکل‌گیری محدود و پراکنده انگشت نمک در این عمق را فراهم می‌کند (کادر مستطیلی در نمودار زاویه ترنر)، درحالیکه انگشت نمک قوی (در محدوده زاویه ترنر 90- 67.5 درجه) در محدوده دمای  $28.12-28.18^{\circ}\text{C}$  و شوری 36.72-36.78 psu رخ می‌دهد. اما هیچ ساختار همرفتی در این ایستگاه مشاهده نمی‌شود. از شمال به جنوب تنگه (St2)، انگشتان نمک تقویت شده و چندین انگشت نمک در عمق 15- 30 m و انگشت نمک قوی در عمق 20 m و 50 m در ستون آب تشکیل می‌شود اما در عمق ۳۰ متر شاره متلاطم می‌شود. با افزایش جریان گرم ورودی از دریای عمان در فصل بهار و تابستان و افزایش نرخ تبخیر در اواخر بهار، شکل‌گیری و رشد انگشتان نمک بطور قابل توجهی تقویت می‌شود، بطوریکه ریزش نمکی در تمام ایستگاه‌های شرقی و میانی تنگه رخ می‌دهد و نقش مهمی در آمیختگی قائم در ستون آب دارد. جریان آب ورودی و آمیختگی ناشی از آن، در بخش‌هایی سبب می‌شود تا ساختار انگشت نمک در عمق رشد بیشتری داشته باشد (St26, St27, St54 and St55) در حالیکه در ایستگاه‌های جنوبی (St29, St30 and St56) انگشتان نمک از سطح تا عمق ۶۵ متری ستون آب گسترش یافته‌اند.

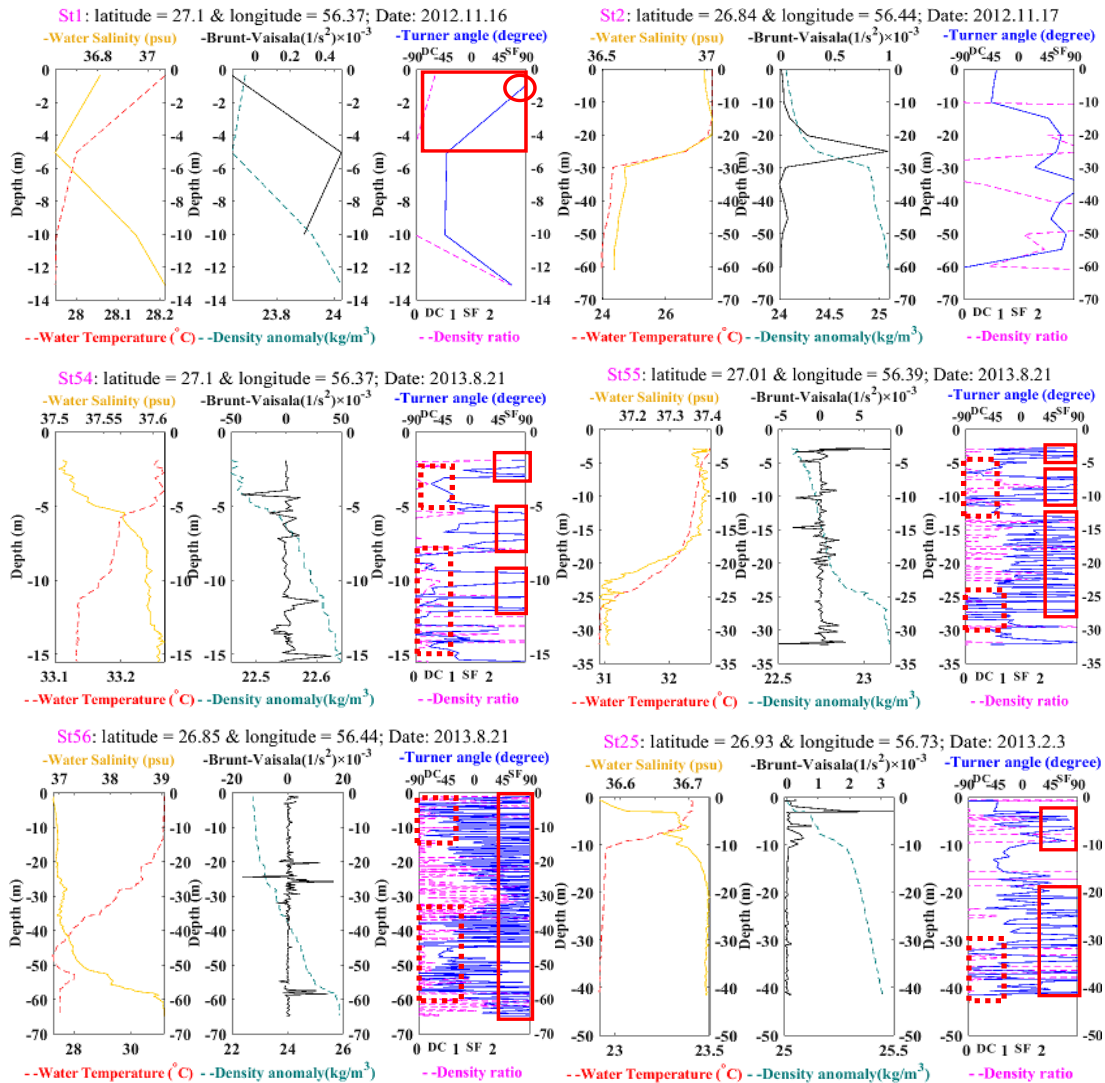
موجب افزایش نسبی شوری در سطح شده و شرایط را برای ریزش بسته آب در مرز دو لایه گرم و سرد فراهم نماید. اما در شکل‌گیری همرفت پخش، در عمق و یا در روزهای سرد سال شرایط برای ریزش توده سرد در مرز دو لایه و دریافت انرژی از لایه زیرین و جابه‌جایی متناوب در راستای قائم فراهم می‌شود. در تمام حالت‌ها، یکی از عوامل چگالی در جابه‌جایی بسته آب و دیگری در تعدیل چگالی برای حفظ پایداری لایه بندی نقش دارد و همواره در زمان شکل‌گیری ساختارهای پخش دوگانه، لایه بندی آب از نظر چگالی پایدار است. تغییرات قائم نسبت چگالی و زاویه ترنر متناسب با تغییرات دما و شوری در تنگه هرمز در شکل‌های ۳ الف و ب، نمایش داده شده است، بطوریکه در هر ایستگاه سه نمودار به ترتیب دما (نقطه چین قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی) ارائه شده است. با توجه به نمودارها، شکل‌گیری پخش دوگانه و به ویژه انگشت نمک در تنگه هرمز قابل توجه است و رشد آنها بطور میانگین از شرق به غرب و شمال به جنوب تنگه تقویت می‌شود. بطوریکه بیشینه انگشت نمک در روزهای گرم و در ایستگاه‌های ۵۵، ۵۶، ۲۷ و ۲۹ مشاهده می‌شود. اما لایه بندی توده‌های سرد و گرم در عمق‌های مختلف موجب می‌شود تا رشد ساختارهای همرفت پخش نیز در این ایستگاه‌ها تقویت شود. با کاهش دما، شرایط برای انگشت نمک تعدیل می‌شود. با این وجود کاهش جریان ورودی به تنگه در پائیز و زمستان موجب می‌شود تا در بخش‌هایی شوری در لایه سطحی افزایش



شکل ۱. الف) عمق سنجی تنگه هرمز؛ استخراج شده از Etop02. ب) ایستگاه‌های انتخاب شده (حلقه‌های مشکی) در تنگه هرمز از داده‌های (PG-GOOS) جمع‌آوری شده توسط سازمان ملی اقیانوس‌شناسی.

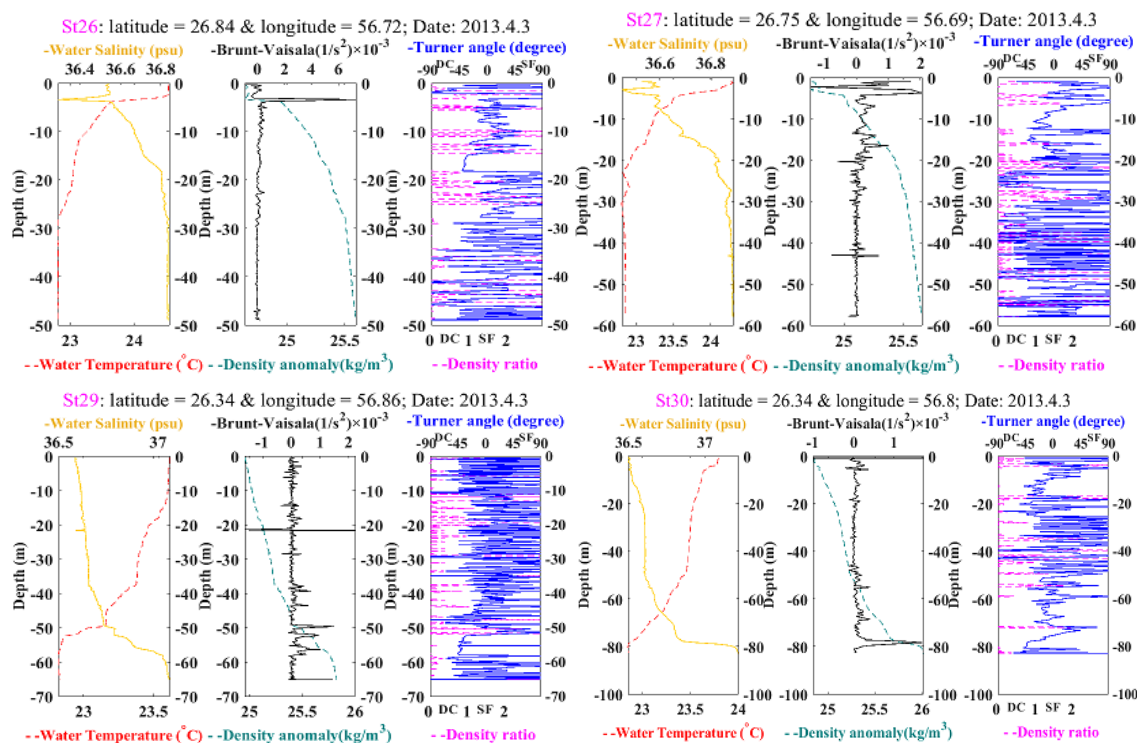


شکل ۲. شماتیک لایه بندی مناسب برای شکل گیری ساختارهای (الف) انگشت نمک (ب) همرفت پخش و نوسان قائم بسته آب و تبادل گرما و شوری با محیط در هر دو ساختار (زادکو، ۲۰۱۳).



شکل ۳. الف. پروفایل قائم دما (خط قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی)؛ در ایستگاه های انتخاب شده در تنگه هرمز.





شکل ۳. ب. پروفایل قائم دما (خط قرمز) و شوری (خط نارنجی)، چگالی (نقطه چین سبز) و فرکانس شناوری (خط مشکی)، نسبت چگالی (نقطه چین صورتی) و زاویه ترنر (خط آبی)؛ در ایستگاه‌های انتخاب شده در تنگه هرمز.

در شکل‌های ۳ و ۴، محل شکل‌گیری و اثر ساختارهای انگشت نمک با کادر و خطوط قرمز پررنگ و محل شکل‌گیری و تاثیر همرفت پخش با کادر و نقطه چین قرمز مشخص شده است. تغییرات دمایی، ضریب انبساط گرمایی و انتقال گرما به خوبی با هم مطابقت دارند، اما نوساناتی که در این نمودارها و به ویژه اختلاف آنتالپی مشاهده می‌شود، بیانگر اثرات ساختارهای پخش دوگانه است، بطوریکه نوسان قائم بسته آب موجب تبادل گرما و تغییر دما در عمق‌های مختلف می‌شود و این تغییرات پله‌ای بخوبی در نمودارها مشخص است.

با مقایسه نمودارهای شکل ۳ و ۴ مشخص است که تغییرات حاصل از ساختارهای پخش دوگانه در توزیع دما و انرژی در ستون آب با وجود اثرات کوچک مقیاس آنها، قابل توجه بوده و در طول چندین ایستگاه و ابعاد کیلومتری می‌تواند نقش موثری در تغییرات دما و انتقال انرژی گرمایی در لایه آب داشته باشد. این اثرگذاری در فصول سرد سال به دلیل کاهش تبادل از تنگه، پایداری ستون آب و سرمایش هوا در گرمادهی

در اکثر بخش‌های تنگه، همرفت پخش در عمق تنگه تشکیل می‌شود بطوریکه بیشترین ساختار همرفت در ایستگاه ۲۷ در بخش جنوبی تنگه ایجاد می‌شود. اما رشد همرفت پخش در بخش‌های میانی تنگه در ایستگاه‌های ۵۵ و ۵۶ نیز قابل توجه است و تعدادی ساختار همرفت در عمق ۱۰-۲ m تشکیل می‌شود که می‌تواند ناشی جریان برگشتی از تنگه و آمیختگی جریان‌های ورودی و خروجی از تنگه در این ناحیه باشد. ساختارهای انگشت نمک و همرفت پخش با جابه‌جایی قائم بسته آب و تبادل دما و شوری با محیط می‌تواند در تغییر خواص فیزیکی ستون آب موثر باشند. با توجه به پخش سریع دما با محیط، انتقال گرمایی در هر دو ساختار می‌تواند نقش قابل توجهی در توزیع دما و انرژی گرمایی آب داشته باشد. بنابراین، تغییرات قائم ضریب انبساط گرمایی آلفا (نقطه چین قرمز) و اختلاف آنتالپی (خط نارنجی)، نرخ تغییر دما در واحد عمق یا فشار (خط آبی)، انرژی درونی (نقطه چین سبز) و گرمای نهان تبخیر (خط صورتی)؛ در ایستگاه‌های انتخاب شده در تنگه هرمز به ترتیب در شکل ۴ الف و ب، ارائه شده است.

پروفایل دما دارد و از سطح تا عمق کاهش می‌یابد اما گرمای نهان تبخیر مطابق با تبادل انرژی گرمایی و انتقال جرم بسته آب، در عمق ۱۵ تا ۳۰ متر تحت تاثیر بسته گرم و شور قرار دارد.

در ایستگاه‌های مشابه در فصل گرم و یا در سایر ایستگاه‌ها به مراتب ساختار نمکی و همرفت پخش رشد بیشتری دارند و با توجه به مقادیر کوچک تبادل انرژی گرمایی توسط آب، اثر ساختارهای پخش بر توزیع دما و انرژی دورنی و گرمای نهان تبخیر افزایش می‌یابد. در ایستگاه ۵۴ در سطح و عمق چندین ساختار SF و DC تشکیل شده است که با توجه به نمودارهای دما (شکل ۳) و انتقال انرژی (شکل ۴)، مشخص است که در محل ساختارهای انگشت نمک، بسته آب انرژی گرمایی از دست می‌دهد و شیب تغییرات آنتالپی مثبت و در محل همرفت پخش، انرژی دریافت می‌شود، بطوریکه جهت نمودار به سمت کاهش مقدار گرمادهی است و ضریب انبساط گرمایی در محل انگشت نمک (خط قرمز افقی) افزایشی و در محل ساختار همرفت (نقطه چین قرمز افقی) کاهش می‌یابد. نرخ کاهش دما با عمق (شکل ۴ الف، نمودار وسط) تحت تاثیر ساختار نمکی تعدیل می‌شود و تحت تاثیر ساختار همرفت پخش رشد می‌کند. این اثرگذاری موجب می‌شود تا نمودار دما و شوری در عمق‌های مختلف ساختار پله‌ای و متغیری داشته باشد که ناشی از جابه‌جایی قائم بسته آب در ساختارهای نمکی و همرفت پخش در عمق‌های مختلف است. اثرگذاری ساختارهای پخش در فصل گرم سال مشهود است و تاثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع دما و انرژی در ستون آب دارند اما این اثر در روزهای سرد سال کاهش می‌یابد. بطوریکه مطابق با نمودارهای شکل ۳ و ۴، کمترین تغییرات در پائیز مشاهده می‌شود و به مراتب در زمستان و بهار تغییرات بیشتر شده و در اواخر بهار و تابستان نوسانات قابل توجهی در عمق‌های مختلف ایجاد می‌شود. این تغییرات در انرژی دورنی و گرمای نهان تبخیر بسته آب موثر بوده و بطور میانگین در روزهای گرم، ۵-۲ درصد تغییر در انرژی در بسته آب ایجاد می‌شود. فراوانی انگشت نمک در ایستگاه‌های ۲۶ و ۵۶ و همرفت پخش در

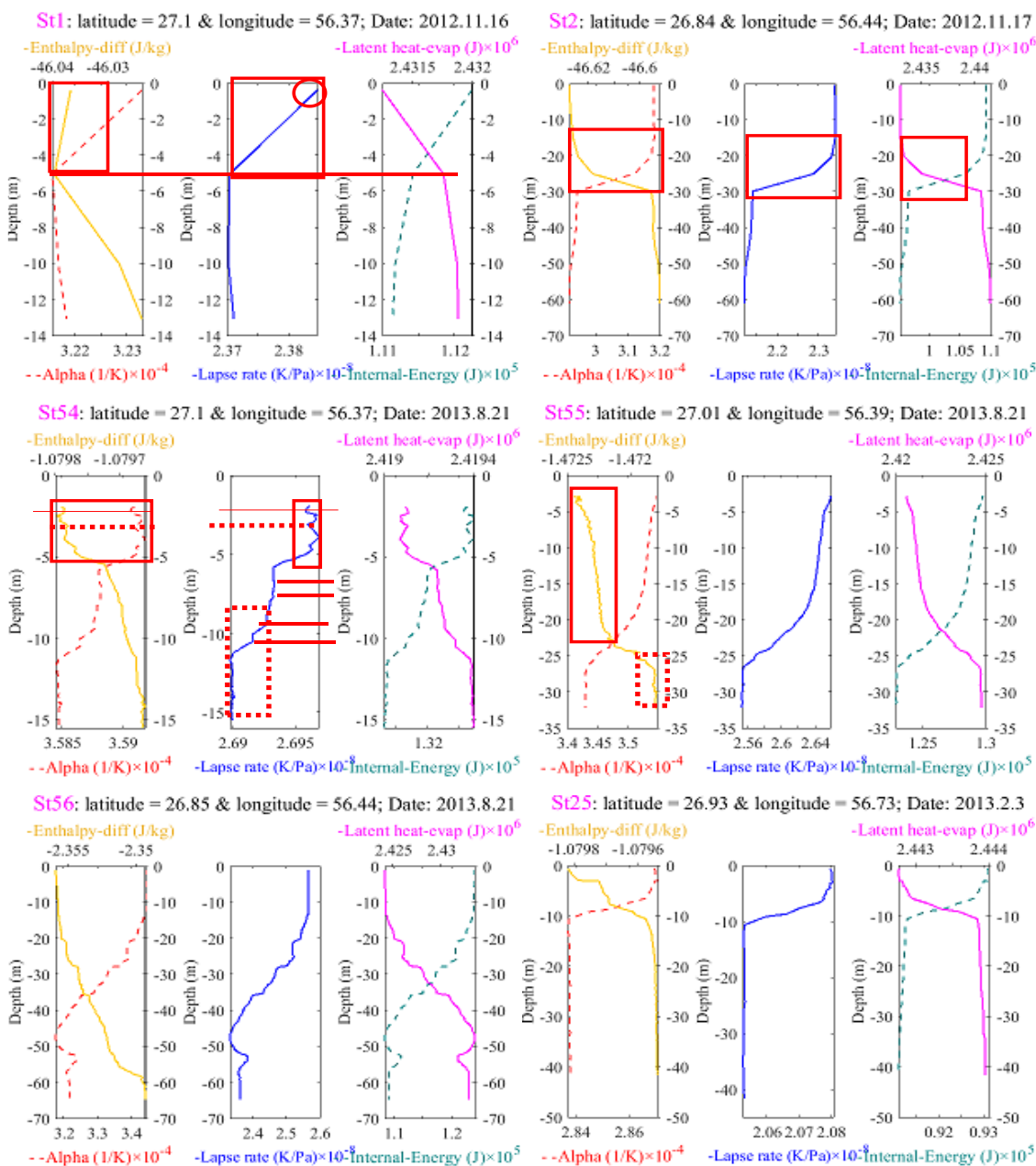
ستون آب، کاهش می‌یابد اما در فصل بهار و تابستان نقش ساختارهای پخش دوگانه در نوسانات دمایی و توزیع انرژی گرمایی در عمق‌های مختلف آشکارتر می‌شود. بطوریکه مطابق با نمودارهای شکل ۵، بیشترین مقادیر گرمادهی و تبادل انرژی توده آب در ایستگاه‌های ۱ و ۲ و کمترین تبادل در انرژی گرمایی در فصل بهار و در ایستگاه‌های شرقی تنگه به ویژه در ایستگاه ۳۰ مشاهده می‌شود و بطور متناظر نوسانات ایجاد شده در این تبادل گرمایی و توزیع دما در ایستگاه‌های ۱ و ۲ کمتر و در سایر ایستگاه‌ها به ویژه ایستگاه‌های ۵۶ و ۲۷ قابل توجه و مشهودتر است. از طرف دیگر در نواحی مستعد شکل‌گیری انگشت نمک با توجه به جابه‌جایی قائم بسته گرم و شور، قدرمطلق مقادیر اختلاف آنتالپی افزایش و با تضعیف اثر ساختار پخش، اثر پله‌ای و نرخ کاهش دما تعدیل می‌شود. همچنین در عمق شکل‌گیری همرفت پخش به دلیل نوسان بسته سرد، انتقال گرما از ستون آب به محیط تعدیل می‌شود و رشد پله‌ای به سمت کاهش قدرمطلق اختلاف آنتالپی است.

در ایستگاه ۱، مطابق با نمودار زاویه ترنر، انگشت نمک در سطح تشکیل می‌شود و تا عمق ۲ متر ضعیف شده و سپس تا عمق ۵ متر مطابق با مقادیر زاویه ترنر، ستون آب در حالت پایدار قرار دارد. بر اساس نمودار اختلاف آنتالپی در شکل ۴ الف و ایستگاه ۱، ستون آب بطور قابل ملاحظه‌ای انرژی از دست می‌دهد که این تبادل انرژی تا عمق ۵ متر افزایش می‌یابد و سپس با تابعیت از لایه بندی آب و ساختار پایدار آن کاهش می‌یابد. اما بیشینه نرخ گرادیان قائم دما (شکل ۴ الف، ایستگاه ۱، نمودار دوم)، در سطح و در محل شکل‌گیری انگشت قوی مشاهده می‌شود ولی با توجه به شدت تبادل گرمایی در زمان و مکان ایستگاه انتخابی، اثر کوچک مقیاس ساختار نمکی تاثیر قابل توجهی در تبادل گرمایی ستون آب ندارد. در ایستگاه ۲، از سطح تا عمق تقریبی ۱۵ متر، ستون آب پایدار بوده و تبادل گرمایی نیز با مقدار ثابتی انجام می‌شود اما تحت تاثیر ساختارهای نمکی در عمق ۱۵ تا ۳۰ متر، تغییراتی در توزیع دما و تبادل انرژی گرمایی مشاهده می‌شود. در این تغییرات، انرژی دورنی آب بعنوان تابعی از دما، تغییراتی منطبق بر

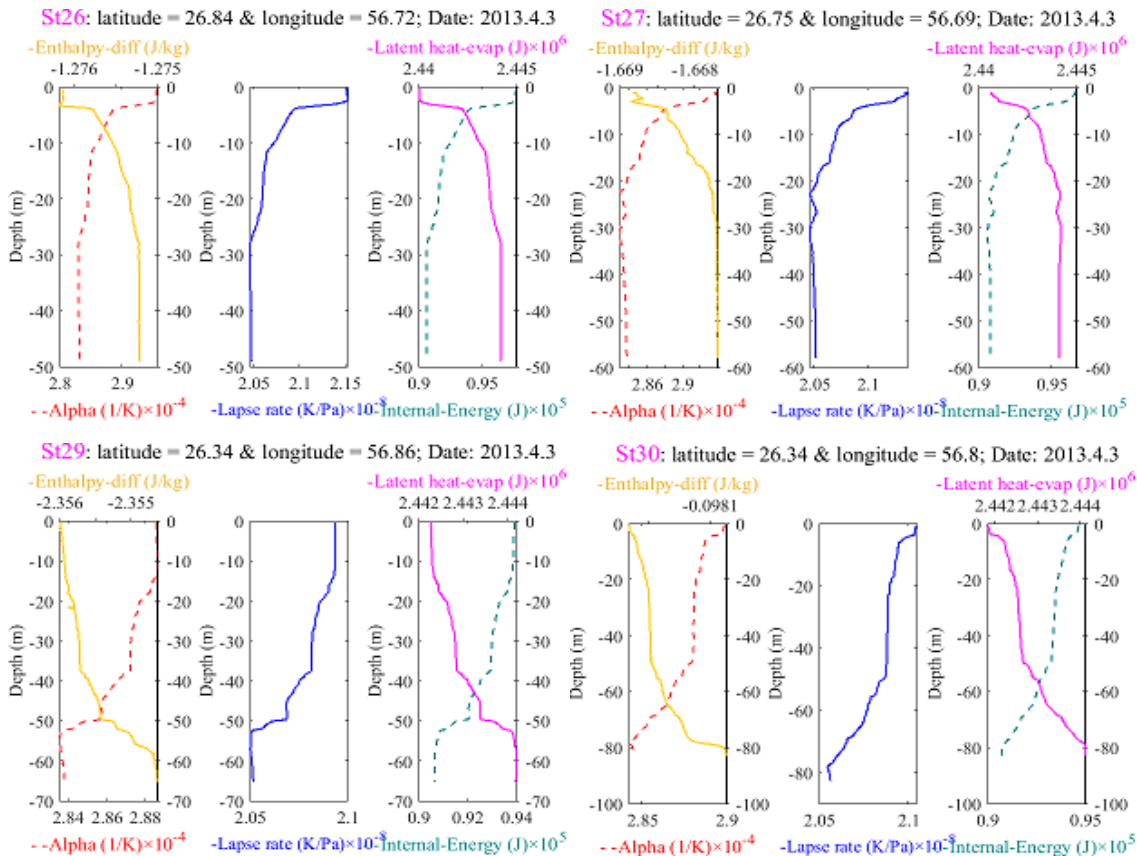


ایستگاه ۳۰ موجب می‌شود تا تغییرات در دما و انرژی تا ۵ درصد افزایش یافته و در فواصل عمقی بیشتری گسترش یابد. با مقایسه اثر ساختارها در تبادل انرژی در بخش‌های مختلف تنگه، نقش ساختارهای پخش دوگانه در ایستگاه‌های جنوبی و غربی بیشتر از سایر ایستگاه‌هاست و نوسانات دمایی و انرژی ناشی از انگشت نمک و همرفت پخش از شمال به جنوب و

شرق به غرب تنگه افزایش می‌یابد و این تابع شرایط شکل‌گیری و قدرت ساختارهای پخش دوگانه و بزرگی انتقال انرژی گرمایی در مقایسه با اثرات کوچک مقیاس ساختارهای پخش دوگانه است که در مقیاس‌های دریایی و بلند مدت می‌تواند اثرات پیوسته و بزرگ مقیاسی در توزیع دما در ستون آب داشته باشد.



شکل ۴. الف. تغییرات قائم ضرب انبساط گرمایی آلفا (نقطه چین قرمز) و اختلاف آنتالپی (خط نارنجی)، نرخ تغییر دما در واحد عمق یا فشار (خط آبی)، انرژی درونی (نقطه چین سبز) و گرمای نهان تبخیر (خط صورتی)؛ در ایستگاه‌های انتخاب شده در تنگه هرمز



شکل ۴. ب. تغییرات قائم ضریب انبساط گرمایی آلفا (نقطه چین قرمز) و اختلاف آنتالپی (خط نارنجی)، نرخ تغییر دما در واحد عمق یا فشار (خط آبی)، انرژی درونی (نقطه چین سبز) و گرمای نهان تبخیر (خط صورتی)؛ در ایستگاه های انتخاب شده در تنگه هرمز

افزایش دمایی ۲۸ تا ۲۹ درجه وجود دارد که نشان دهنده قرارگیری یک لایه سرد بر لایه گرم با اختلاف دمایی اندک است. همچنین دما در بخش شمالی تا ۲۳ درجه کاهش می یابد درحالیکه یک نفوذ گرمایی ۲۸ درجه در آن مشاهده می شود که می تواند ناشی از جابه جایی توده گرم در فرآیند پخش دوگانه باشد. در مقابل شوری آب در بخش شمالی با عمق کاهش می یابد (شکل ۵ ب) بطوریکه یک لایه سطحی شور (۳۸.۵ psu) تا عمق ۲۰ متر تشکیل می شود که در بخش شمالی تنگه تا عمق ۳۰ متر امتداد یافته است. ولی در بخش جنوبی تنگه متاثر از جریان شور خروجی از تنگه شوری تا ۴۰ psu افزایش می یابد. لایه بندی گرم و شور بر سرد و کم شور در لایه سطحی بیانگر شرایط شکل گیری ساختار انگشت نمک است و با وجود افزایش شوری لایه سطحی، کاهش دما موجب کاهش چگالی و پایداری لایه سطحی می شود (شکل ۶ ب) ولی چگالی توده شور موجب می شود تا جابه جایی قائم

برای بررسی بهتر اثر ساختارهای پخش دوگانه بر لایه بندی دمایی و انرژی گرمایی؛ محل و عمق ساختارهای پخش دوگانه در اواسط بهار و پائیز ۱۳۹۴ (می و نوامبر ۲۰۱۵) در طول مقطع عرضی انتخاب شده در تنگه هرمز (خط قرمز در شکل ۱ ب) استخراج شدند، و تغییرات دما، شوری، چگالی، ضرایب انبساط گرمایی، افت دما با عمق و شار و انرژی گرمایی در زمان شکل گیری هر دو ساختار در شکل های ۶ تا ۹ ارائه شده اند. مطابق با شکل ۵ الف، در اواسط بهار دمای آب با عمق کاهش می یابد بطوریکه توده آب با بیشینه دمای ۳۳-۳۲ °C در سطح تا عمق میانگین ۲۰ متر تشکیل شده است. لایه مرزی دمایی یک شیب دمایی در سطح را نشان می دهد که عمق آن در بخش شمالی تنگه افزایش یافته است و این جریان گرم می تواند ناشی از جریان گرم ورودی از دریای عمان باشد در حالیکه دمای آن در بخش جنوبی تنگه تا ۳۳ °C افزایش می یابد. در عمق مقطع در فاصله ۲۶.۵ تا ۶.۶ درجه شمالی یک

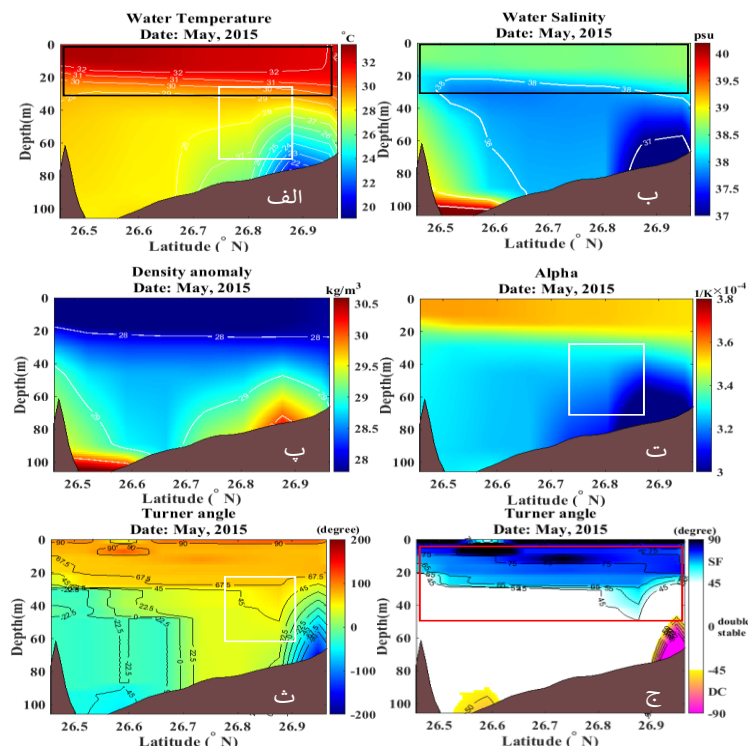
قابل مشاهده است. بیشه شار گرمایی (بیش از ۲.۵ وات بر متر مربع) در محل انگشتان قوی و توده پایدار رخ می دهد. در محل انگشتان قوی دمای توده آب بیشه مقدار را دارد و بنابراین بیشه شار گرمایی با محیط می تواند رخ دهد و با رشد انگشتان نمک در محل انگشتان ضعیف، دمای بسته آب کاهش یافته و شار گرمایی نیز کاهش می یابد. در مقابل در محل ساختار همرفت با اثرگذاری توده سرد و کم شور، مقادیر انرژی گرمایی کمینه است و با تبادل انرژی گرمایی با محیط، ساختار همرفت ضعیف شده و شار گرمایی در محل ساختار ضعیف و در مجاورت آن افزایش می یابد. تغییرات دمایی ناشی از ساختارهای پخش دوگانه موجب می شود تا انرژی درونی آب بعنوان تابعی از تغییرات دما، در محل رشد انگشت نمک بیشه و در محل ساختار همرفت پخش کمینه مقدار را داشته باشد (شکل ۶، پ). بنابراین با افزایش انرژی درونی آب گرمای نهان تبخیر آب در لایه سطحی کاهش می یابد و این لایه بندی تحت تاثیر ساختار نمکی تا عمق ۳۰ متر در بخش شمالی امتداد می یابد. در حالیکه در محل ساختار همرفت، گرمای نهان تبخیر بیشه مقدار را دارد (شکل ۶، ت).

با کاهش دمای هوا و تبخیر در فصل سرد سال، دما و شوری لایه سطحی کاهش می یابد. بطوریکه در بخش هایی با چینه بندی توده آب گرم و شور ناشی از تبادل ترموهالین در زیر لایه سرد و کم شور، شرایط برای شکل گیری گسترده ساختار همرفت پخش مساعد می شود. در شکل های ۸ و ۹، شرایط فیزیکی در زمان شکل گیری ساختار همرفت پخش در فصل پائیز در تنگه ارائه شده است. با مقایسه شکل های ۵ و ۷ مشاهده می شود که در اواسط پائیز، ساختار همرفت پخش نقش غالب در ستون آب را دارد و در لایه سطحی گسترش یافته است (شکل ۷، ج). ریزش توده سرد و کم شور در فاصله ۲۶.۶-۲۶.۸ درجه شمالی با یک ساختار همرفت قوی تا عمق ۲۰ متر امتداد یافته است. در این عمق، رشد محدودی از انگشتان نمکی قوی هم مشاهده می شود که در فاصله تقریبی ۱۰ متر محدود شده است (کادر مستطیل مشکی). اما رشد قابل توجه همرفت پخش در بخش جنوبی تنگه و در عمق ۱۰۰-۲۰۰ متر رخ داده است که ناشی از شکل گیری توده سرد و کم شور

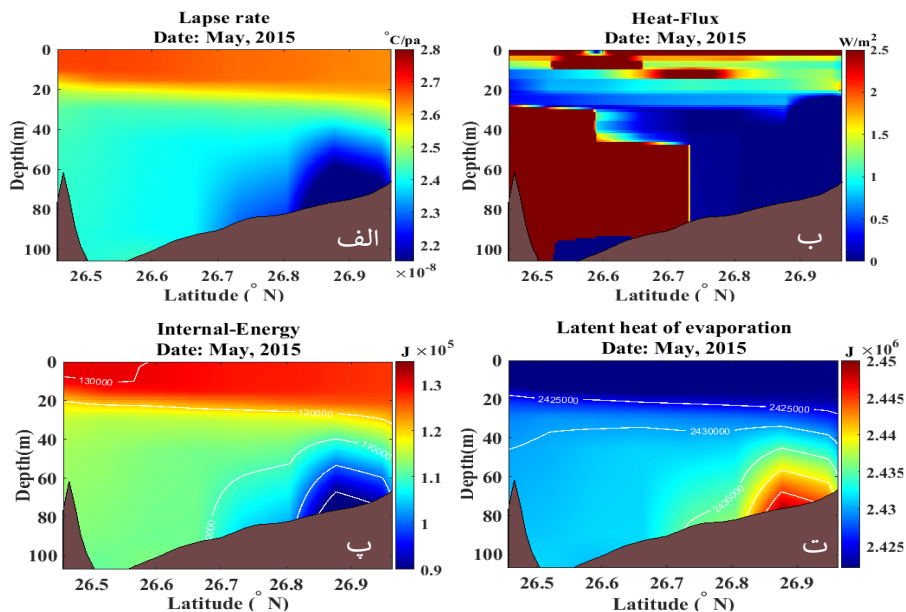
بسته گرم و شور رخ دهد، بطوریکه بسته گرم به دلیل شناوری نسبت به لایه زیرین با تبادل گرمایی با محیط صعود می کند و موجب افزایش شوری و ریزش انگشت نمک در لایه زیرین می شود (شکل ۶ ت و ث). و باتوجه به اختلاف دمای بیشه میان دو لایه در بخش شمالی، ریزش انگشتان نمک در بخش شمالی عیق تر است. این ریزش نمکی موجب می شود تا توده گرم و شور به درون لایه سرد و کم شور زیرین نفوذ کند و بنابراین یک لایه بندی محدود سرد و کم شور بر گرم و شور ایجاد می شود و شرایط برای شکل گیری ساختار همرفت در این ناحیه فراهم می شود (شکل ۵، ت و ث). این اختلاط دمایی و شوری با نفوذ دمایی  $28^{\circ}\text{C}$  در نمودار دما و ضریب انبساط گرمایی آلفا تا حدودی مشخص است (کادر مستطیل سفید). همچنین در بخش جنوبی لایه بندی کم شور بر توده شور خروجی از جنوب تنگه موجب می شود تا یک ساختار همرفت پخش در عمق ۹۰ متری تشکیل شود (شکل ۵، ث). بنابراین شکل گیری ساختارهای پخش دوگانه (به دلیل تبادل ترموهالینی از تنگه) و اختلاط ناشی از آنها علاوه بر تغییر لایه مرزی دمایی و شوری می تواند موجب چینه بندی های پراکنده (به دلیل آمیختگی توده های گرم و شور و سرد و کم شور) شود و این امر موجب می شود تا ساختارهای پخش دوگانه در عمق های مختلف تنگه در کنار هم تشکیل شوند و تناوب در شکل گیری ساختارهای پخش دوگانه موجب تغییر در توزیع دما و شوری در ستون آب می شود. نمودار نرخ تغییر دما با عمق (شکل ۶، الف) به خوبی با نمودارهای دمایی و ضریب آلفا مطابقت دارد و نوسان دما در لایه مرزی، شکل گیری ساختارهای انگشت نمک و همرفت پخش را نشان می دهد. بطوریکه بیشترین تغییر دما در لایه سطحی به دلیل جابه جایی توده گرم و پخش سریع دما رخ می دهد و تغییرات دمایی در لایه عمیق کمتر بوده و یک افزایش در تغییرات دما در محل ریزش انگشت نمک در محل شکل گیری ساختار پخش مشاهده می شود. همچنین تبادل انرژی گرمایی در محل شکل گیری انگشت قوی بیشتر بوده و این تبادل در محل ساختار ضعیف، کاهش می یابد. امتداد شار گرمایی ناشی از جابه جایی بسته گرم در ساختار انگشت نمک در شکل ۶ ب،

(کادر صورتی معرف توده سرد DC و کادر زرد معرف توده گرم است). با مقایسه شار گرمایی در فصل بهار و پائیز مشخص است که مقیاس تبادل گرمایی با محیط در فرآیند همرفت بسیار بزرگ تر (بیش از ۱۰ برابر) از شارش گرمایی در فرآیند انگشت نمک است. مقدار شار گرمایی در محل ساختار همرفت قوی در حال رشد کمینه است (و در توده گرم مجاور آن بیشینه است) اما در محل ساختار ضعیف شده به دلیل تبادل گرمایی انجام شده، شار گرمایی افزایش می‌یابد (در حالیکه در توده گرم مجاور، شار گرمایی کاهش یافته و این نشان دهنده شارش گرما میان دو محیط است). در محل شکل‌گیری انگشتان نمک در عمق ۱۵ تا ۲۰ متر (کادر مشکی) شارش گرمایی به سمت توده سرد زیرین رخ می‌دهد، اما تبادل گرمایی در فرآیند انگشت نمک نسبت به همرفت پخش کمتر است (و تبادل شوری در همرفت کمتر از انگشت نمک است)، بنابراین شار گرمایی در محل ساختار نمکی نسبت به شار گرمایی محیط با توده ریزشی ناشی از همرفت، خیلی کمتر بوده و در بازه کمتر از ۱۰۰ وات بر متر مربع قرار دارد.

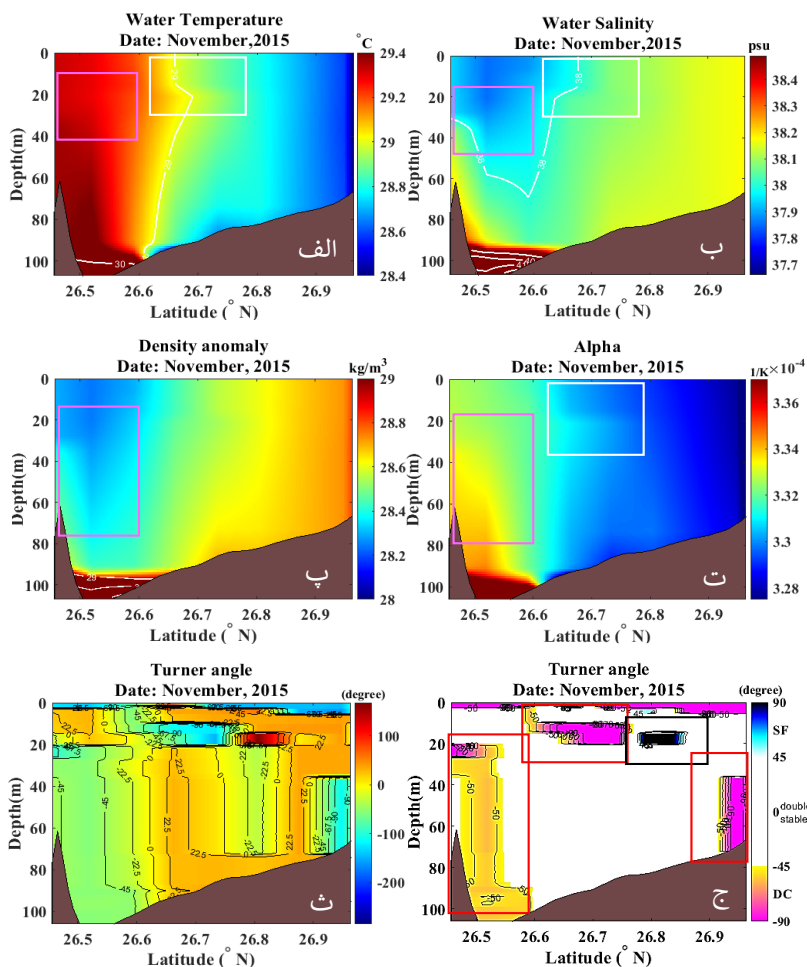
بر توده آب گرم و شور خروجی از تنگه در این فصل می‌باشد (کادر مستطیل قرمز). ریزش توده سرد و کم شور در هنگام رشد ساختار DC موجب آمیختگی لایه دمایی و شوری آب و افزایش عمق لایه سرد و کم شور می‌شود. بطوریکه در بخش جنوبی، دما و شوری آب در عمق ۲۰-۲۵ متر تا حدود ۰.۲ واحد کاهش یافته است و این تعدیل دما و شوری تا عمق ۹۰ متر امتداد می‌یابد و موجب تعدیل چگالی در این عمق می‌شود (شکل ۷، پ). همچنین تحت تاثیر ساختار DC در لایه سطحی، شوری و دما در طول مقطع و در محل رشد ساختار پخش تغییر می‌کند (کادر مستطیل سفید). این تغییرات دمایی در نمودار انبساط گرمایی و نرخ تغییر دما نیز مشهود است، بطوریکه مقدار آلفا در محل ساختار پخش افزایش می‌یابد (شکل ۷، ت) و تغییرات دمایی در اثر ریزش توده سرد یک کاهش در عمق ۲۰ متر در محل توده گرم را نشان می‌دهد (شکل ۸، الف). مطابق با نمودار شار گرمایی (شکل ۸، ب)، بیشترین مقدار شار گرمایی در توده‌های مجاور ساختار همرفت رخ می‌دهد. این توده‌ها گرم تر از توده‌های ریزشی در فرآیند همرفت هستند، و میان هر دو توده تبادل گرمایی رخ می‌دهد



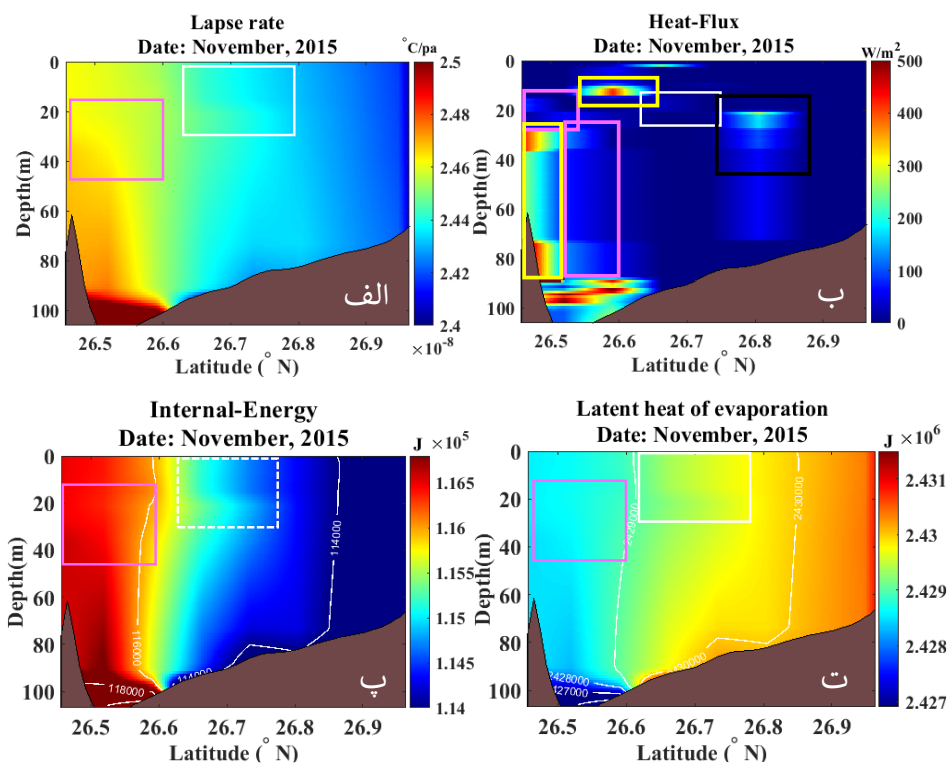
شکل ۵. تغییرات (الف) دمای آب، (ب) شوری، (پ) چگالی، (ت) ضریب انبساط گرمایی، (ث) زاویه ترنر و (ج) محدوده شکل‌گیری ساختارهای انگشت نمک و همرفت پخش، در اردیبهشت ماه (می ۲۰۱۵) در مقطع عرضی در تنگه هرمز.



شکل ۶. الف) نرخ تغییر دما با عمق، ب) شار گرمایی، پ) انرژی درونی، ت) گرمای نهان تبخیر، در اردیبهشت ماه (می ۲۰۱۵) در مقطع عرضی در تنگه هرمز.



شکل ۷. تغییرات الف) دمای آب، ب) شوری، پ) چگالی، ت) ضریب انبساط گرمایی، ث) زاویه ترنر و ج) محدوده شکل گیری ساختارهای انگشت نمک و همرفت پخش، در آبان ماه (نوامبر ۲۰۱۵) در مقطع عرضی در تنگه هرمز.



شکل ۸. الف) نرخ تغییر دما با عمق، ب) شار گرمایی، پ) انرژی درونی، ت) گرمای نهان تبخیر، در آبان ماه (نوامبر ۲۰۱۵) در مقطع عرضی در تنگه هرمز.

عمق توده سرد در فرآیند همرفت پخش است (کادر نقطه چین).

## ۲. بحث و نتیجه گیری

شرایط آب و هوایی و گردش ترموهالینی در تنگه هرمز موجب می‌شود تا ساختارهای پخش دو گانه در عمق‌های مختلف در تنگه تشکیل شوند. کاهش جریان ورودی به تنگه در پائیز و زمستان موجب می‌شود تا در بخش‌هایی از تنگه، شوری در لایه سطحی افزایش یابد بطوریکه در ایستگاه‌های میانی تنگه دما و شوری از سطح تا عمق‌های ۵ m و 30 m کاهش می‌یابد.

در ایستگاه شمالی تنگه، فرکانس شناوری در عمق 1.5-2.5 m حداقل مقدار را دارد و شرایط شکل‌گیری محدود و پراکنده انگشت نمک در این عمق را فراهم می‌کند، بطوریکه انگشت نمک قوی در محدوده دمای  $28.12-28.18^{\circ}\text{C}$  و شوری 36.72-36.78 psu رخ می‌دهد اما هیچ ساختار همرفتی در این ایستگاه مشاهده نمی‌شود.

از شمال به جنوب تنگه، انگشتان نمک تقویت شده و چندین

تغییرات انرژی درونی (شکل ۸، پ) نشان می‌دهد که متناسب با تغییرات دما در ستون آب، انرژی درونی آب در اواسط پائیز در بخش جنوبی تنگه بیشینه است و مقدار آن در بخش شمالی متأثر از جریان سرد ورودی از تنگه کاهش می‌یابد. در مقابل گرمای نهان تبخیر در بخش جنوبی کاهش می‌یابد و مقدار انرژی لازم برای تبخیر آب در بخش شمالی تنگه افزایش می‌یابد. اما تبادل گرمایی و تعدیل دمای ناشی از همرفت پخش موجب تعدیل انرژی درونی آب در محل توده گرم می‌شود، بطوریکه انرژی درونی آب در عمق ۲۰ متر کاهش (تا حدود ۲۵۰ ژول، کادر مستطیل) و گرمای نهان تبخیر افزایش می‌یابد و در راستای ریزش توده سرد امتداد می‌یابد (باید توجه شود که ساختار همرفت با قرارگیری توده سرد بر توده گرم و در محل دمای بیشینه تشکیل شده است و مقایسه تغییرات دمایی و انرژی باید با لایه زیرین انجام شود). همچنین در محل ساختار همرفت در طول مقطع بر خلاف پیشرفت اولیه آب با انرژی درونی بیشینه در لایه سطحی، یک کاهش در مختصات  $26.7$  درجه شمالی تا عمق ۲۰ متر مشاهده می‌شود که ناشی از تغییر

بیشترین مقدار گرمادهی و تبادل انرژی توده آب در ایستگاه‌های میانی تنگه در پائیز و کمترین تبادل در فصل بهار و در ایستگاه‌های شرقی تنگه مشاهده می‌شود و بطور متناظر نوسانات ایجاد شده در این تبادل گرمایی و توزیع دما در ایستگاه‌های میانی کمتر و در سایر ایستگاه‌ها به ویژه ایستگاه-های جنوبی تنگه قابل توجه و مشهودتر است.

در نواحی مستعد شکل‌گیری انگشت نمک، قدرمطلق مقادیر اختلاف آنتالپی افزایش و با تضعیف اثر ساختار پخش، اثر پله‌ای و نرخ کاهش دما تعدیل می‌شود و همچنین در عمق شکل‌گیری همرفت پخش به دلیل نوسان بسته سرد، انتقال گرما از ستون آب به محیط کاهش می‌یابد و رشد اثرات پله‌ای به سمت کاهش قدرمطلق اختلاف آنتالپی است.

در ایستگاه میانی تنگه در پائیز، تحت تاثیر ساختارهای نمکی در عمق ۱۵ تا ۳۰ متر، تغییراتی در توزیع دما و تبادل انرژی گرمایی مشاهده می‌شود. در این تغییرات، انرژی درونی آب از سطح تا عمق کاهش می‌یابد اما گرمای نهان تبخیر مطابق با تغییرات آنتالپی و نرخ توزیع دما و انتقال جرم بسته آب، در عمق ۱۵ تا ۳۰ متر تحت تاثیر بسته گرم و شور قرار می‌گیرد. به دلیل نوسانات حاصل از ساختارهای پخش دوگانه در روزهای گرم، ۵-۲ درصد تغییر در دما، انرژی درونی و گرمای نهان تبخیر بسته آب ایجاد می‌شود.

بیشینه اثر ساختارهای پخش دوگانه تا ۵ درصد (تغییر در انرژی) در بخش‌های جنوبی تنگه و در روزهای گرم سال مشاهده می‌شود.

در طول مقطع عرضی در تنگه هرمز، در اواسط بهار دمای آب با عمق کاهش می‌یابد بطوریکه توده آب با بیشینه دمای 32- $^{\circ}\text{C}$  در سطح تا عمق میانگین ۲۰ متر تشکیل می‌شود که عمق آن در بخش شمالی تنگه تحت تاثیر ساختار پخش دوگانه افزایش می‌یابد. شوری آب در بخش شمالی تنگه با عمق کاهش می‌یابد بطوریکه یک لایه سطحی شور (psu 38.5) تا عمق ۲۰ متر تشکیل می‌شود که در بخش شمالی تنگه تا عمق ۳۰ متر امتداد یافته است.

لایه بندی دمایی و شوری در تنگه در فصل بهار موجب می‌شود تا ساختار انگشت نمکی رشد قابل توجهی نسبت به

انگشت نمک در عمق 30-15 m و انگشت نمک قوی در عمق 20 m و 50 m در ستون آب تشکیل می‌شود اما در عمق ۳۰ متر شار متلاطم و اثر پخش دوگانه تعدیل می‌شود.

با افزایش جریان گرم ورودی از دریای عمان در فصل بهار و تابستان و افزایش نرخ تبخیر در اواخر بهار، شکل‌گیری و رشد انگشتان نمک بطور قابل توجهی تقویت می‌شود، بطوریکه ریزش نمکی در تمام ایستگاه‌های شرقی و میانی تنگه رخ می‌دهد و نقش مهمی در آمیختگی و توزیع دما در ستون آب دارد.

در اکثر بخش‌های تنگه، همرفت پخش در عمق تنگه تشکیل می‌شود و رشد آن در بخش جنوبی تنگه بیشتر است اما تعدادی همرفت پخش در بخش میانی تنگه در عمق 10-2 m ایجاد می‌شود که می‌تواند ناشی جریان برگشتی از تنگه و آمیختگی جریان‌های ورودی و خروجی از تنگه در این ناحیه باشد.

با توجه به شدت نوسانات گرمایی در ساختار همرفت پخش نسبت به انگشت نمک، نوسانات دمایی در این نقاط مقیاس کوچکی دارند و تنها در مقادیر کوچک انتقال گرمایی آب، تاثیر قابل توجهی دارند.

نقش ساختارهای پخش دوگانه در ایستگاه‌های جنوبی و غربی بیشتر است و نوسانات دمایی و انرژی ناشی از انگشت نمک و همرفت پخش از شمال به جنوب و شرق به غرب تنگه افزایش می‌یابد.

در محل ساختارهای انگشت نمک، ضریب انبساط گرمایی افزایشی است و بسته آب گرما از دست می‌دهد و شیب تغییرات آنتالپی مثبت و در محل همرفت پخش، ضریب انبساط گرمایی کاهش یافته است و بسته آب، گرما می‌گیرد.

نرخ کاهش دما با عمق با رشد ساختار نمکی تعدیل و با رشد همرفت پخش افزایش می‌یابد بطوریکه دما و شوری در اثر جابه‌جایی قائم بسته آب در ساختارهای نمکی و همرفت پخش، در عمق‌های مختلف ساختار پله‌ای و متغیری دارند.

ساختارهای پخش دوگانه در بهار و تابستان تاثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع دما و انرژی در ستون آب دارند اما این اثر در روزهای سرد سال کاهش می‌یابد.



زیرین رخ می دهد. بطوریکه شار گرمایی در محل ساختار نمکی در مقایسه با شارش گرمایی محیط با توده سرد ناشی از همرفت، خیلی کمتر بوده و در بازه کمتر از ۱۰۰ وات بر متر مربع قرار دارد.

انرژی درونی آب در اواسط پائیز در بخش جنوبی تنگه بیشینه است و مقدار آن در بخش شمالی متأثر از جریان سرد ورودی از تنگه کاهش می یابد. اما تبادل گرمایی و تعدیل دمای ناشی از همرفت پخش موجب تعدیل انرژی درونی آب در محل توده گرم می شود، بطوریکه انرژی درونی آب در عمق ۲۰ متر (تا حدود ۲۵۰ ژول، کادر مستطیل) کاهش می یابد.

همچنین در محل ساختار همرفت در طول مقطع یک کاهش در تغییرات دما تا عمق ۲۰ متر مشاهده می شود که ناشی از تغییر عمق توده سرد در فرآیند همرفت پخش است.

نوسانات مرزی ناشی ساختارهای پخش بر ویژگی های فیزیکی ستون آب موثر بوده و شکل گیری و آمیختگی ناشی از آنها عمق لایه مرزی دما و شوری را تغییر می دهد، بطوریکه با ایجاد ساختارهای لایه ای پراکنده در آب، موجب تغییر در توزیع دما و انرژی در ستون آب می شوند.

اثر ساختارهای پخش در توزیع دما و انتقال انرژی، تابع شرایط شکل گیری و قدرت ساختارهای پخش دوگانه و بزرگی انتقال انرژی گرمایی در مقایسه با اثرات کوچک مقیاس ساختارهای پخش دوگانه است. اما این اثرات و نوسانات پله ای می تواند در تمام لایه بندی آب و در کنار اثرات مشابه در عمق های مختلف، نقش قابل ملاحظه ای در توزیع دما و انرژی در ستون آب داشته باشد.

### ۳. منابع

۱. انصاری، نیاز و همکاران، (۱۳۹۰)، بررسی همرفت پخش دوگانه در تنگه هرمز با استفاده از مدل سه بعدی کوهرنس، سیزدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش.
۲. اکبری نسب، محمد و همکاران، (۱۳۹۳)، مطالعه ساختار لایه ای خلیج فارس به خلیج عمان و تاثیر آن بر روی انتشار صوت با چشمه های آکوستیکی نزدیک جریان

ساختار همرفت پخش داشته باشد و در سطح تا عمق تقریبی ۳۰ متر گسترده شود. اما در بخش جنوبی تنگه، لایه بندی کم شور بر توده شور خروجی از جنوب تنگه موجب می شود تا یک ساختار همرفت پخش در عمق ۹۰-۲۰ متری تشکیل شود.

بیشترین تغییر دما در لایه سطحی به دلیل جابه جایی توده گرم و پخش سریع دما رخ می دهد و تغییرات دمایی در لایه عمیق کمتر بوده و یک افزایش در تغییرات دما در محل ریزش انگشت نمک و نفوذ در محل شکل گیری ساختار پخش مشاهده می شود.

در تابستان بیشینه شار گرمایی در محل انگشتان قوی (بیش از ۲.۵ وات بر متر مربع) بوده و در مجاورت توده همرفت و محل تبادل گرمایی از محیط به توده سرد مقدار آن بطور قابل توجهی افزایش می یابد. در محل ساختار همرفت پخش با اثرگذاری توده سرد و کم شور، مقادیر انرژی گرمایی کمینه است و با تبادل انرژی گرمایی با محیط، ساختار همرفت ضعیف شده و شار گرمایی در محل ساختار ضعیف و در مجاورت آن افزایش می یابد.

انرژی درونی آب در محل رشد انگشت نمک بیشینه و در محل ساختار همرفت پخش کمینه مقدار را دارد. با افزایش انرژی درونی آب گرمای نهان تبخیر آب در لایه سطحی کاهش می یابد و این لایه بندی تحت تاثیر ساختار نمکی تا عمق ۳۰ متر در بخش شمالی امتداد می یابد. در حالیکه در محل ساختار همرفت، گرمای نهان تبخیر بیشینه مقدار را دارد.

در اواسط پائیز، شرایط برای شکل گیری ساختار همرفت پخش مساعدتر است و ریزش توده سرد و کم شور با یک ساختار همرفت قوی تا عمق ۲۰ متر امتداد می یابد. اما رشد قابل توجه همرفت پخش در بخش جنوبی تنگه و تحت تاثیر توده گرم و شور خروجی از تنگه در عمق ۱۰۰-۲۰ متر رخ می دهد.

مقیاس تبادل گرمایی با محیط در فرآیند همرفت بیشتر از فرآیند انگشت نمک (بیش از ۱۰ برابر) است. در فصل پائیز بیشترین مقدار شار گرمایی در توده های مجاور ساختار همرفت پخش رخ می دهد. در محل شکل گیری انگشتان نمک در عمق ۱۵ تا ۲۰ متر شارش گرمایی به سمت توده سرد

11. Prasad, T. G., Ikeda, M., Kumar, S. P., 2001. Seasonal spreading of the Persian Gulf Water mass in the Arabian Sea, *J. Geophys. Res.*, 106(C8), 17,059–17,071.
12. Privett, D. W., Monthly charts of evaporation from the North Indian Ocean, including the Red Sea and the Persian Gulf. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1959, 85: 424–428.
13. Radko, T., 2013, *Double-Diffusive Convection*. Cambridge University Press, 342 pp.
14. Reynolds. R. M, 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hurmoz, and the Gulf of Oman, results from the Mt.Mitchell expedition” *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 27, pp. 35-59.
15. Ruddick, B., 1983, A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep Sea Res A Oceanogr Res Pap*, 30(10): 1105–1107. doi:10.1016/0198-0149(83)90063-8.
16. Schmitt, R. W., 1981, Form of the temperature-salinity relationship in the Central Water: evidence for double-diffusive mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 1015–1026 .
17. Stern, M. E., 1960, The “salt-fountain” and thermohaline convection. *Tellus*, 12,172–175.
18. Onken, R., Brambilla, E., 2003, Double diffusion in the Mediterranean Sea: observation and parameterization of salt finger convection. *J. Geophys. Res.* 108(C9), 8124–8136. doi: 10.1029/2002JC001349.
19. Williams, A. J., 1974, Salt Fingers observed in Mediterranean outflow. *Science*, 185, 941–943.
20. You, Y., 2002, A global ocean climatological atlas of the Turner angle: Implications for double-diffusion and water mass structure. *Deep-Sea Res.*, 49, 2075-2093.
- نفوذی در فصل بهار. *مجله علوم و فنون دریا*. ۱۱۰-۱۲۰: ۱۲(۴).
3. Al-Hajri, K., 1990, *The Circulation of the Arabian (Persian) Gulf: A Model Study of its Dynamics*. The Catholic University of America, Washington, DC. Ph.D. Dissertation (also available through UMI Dissertation Information Service, Order Number 9106378).
4. Azizpour, J., Chegini, V., Siadatmousavi, S. M., 2017, Seasonal variation of the double diffusion processes at the Strait of Hormuz. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(1): 26–34, doi: 10.1007/s13131-017-0990-6.
5. Bidokhti, A. A. and Ezam, M., 2009, The structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations, *Ocean Sci.*, 5, 1–12, <https://doi.org/10.5194/os> .
6. Caplan, S., 2008, *Microstructure signatures of equilibrium double-diffusive convection*. Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, California.
7. Johns, W. E., Yao, F. D., Olson, B., Josey, S. A., Grist, I. P., and Smeed, D. A., Observations of Seasonal Exchange through the Straits of Hormuz and the Inferred Freshwater Budgets of the Persian Gulf,” *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (C12), 1–18.
8. Magnell, B., 1976, Salt fingers observed in the Mediterranean outflow region (34°N, 11°W) using a towed sensor. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 511-523.
9. Muench, R. D., Fernando, H. J. S., and Stegen, G. R., Temperature and salinity staircases in the northwestern Weddell Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 1990, 20, 295–304.
10. Neal, V. T., Neshyba, S., and Denner, W., Thermal stratification in the Arctic Ocean. *Science*, 1969, 166, 373–374.