

تغییرات فصلی پایداری و لایه‌بندی ستون آب در بخش عمیق جنوب دریای خزر

سیامک جمشیدی

عضو هیات علمی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: jamshidi@inio.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۰

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۴، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

هدف از این تحقیق، مطالعه تغییرات پایداری و لایه‌بندی ستون آب دریا در محدوده عمیق جنوب دریای خزر است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در لایه ۱۰۰ متر بالایی از سطح دریا و به‌ویژه در لایه ترموکلاین فصلی رخ داده است. بیشینه گرادیان عمودی دما ۰/۴۸۱۵ سانتی‌گراد بر متر بین اعماق ۲۸-۴۵ متر در آبان ماه (نوامبر) و کمینه گرادیان عمودی دما ۰/۰۵ سانتی‌گراد بر متر در اعماق ۰-۲۵ متر در اسفند ماه (مارس) محاسبه شد. بیشینه گرادیان عمودی چگالی در آبان ماه (نوامبر) ۰/۱۲۱۸ واحد بر متر در لایه پیکنوکلاین بین اعماق ۲۸-۴۵ متر و کمینه آن ۰/۰۰۹ سانتی‌گراد بر متر در اسفند ماه (مارس) بین اعماق ۰-۲۵ متر مشاهده شد. گرادیان شوری در حدود ۰/۱۳۸ در هزار بر متر در مرداد ماه (آگوست) و ۰/۲۱۵ در هزار بر متر در آبان ماه (نوامبر) را داشته است. نکته قابل توجه اینکه، روند افزایشی تغییرات عمودی شوری در ماه‌های اسفند و فروردین (مارس و آوریل) و روند کاهشی مقدار شوری در لایه هالوکلاین در ماه‌های مرداد و آبان (آگوست و نوامبر) بوده است. بیشینه مقدار فرکانس پایداری در بین زمان‌های مختلف اندازه‌گیری در ماه فروردین (آوریل) در لایه ترموکلاین $10^{-2} \times 1/462$ بر مجذور ثانیه مشاهده شد. مقدار کمینه نیز مربوط به اسفند ماه (مارس) در حدود $10^{-8} \times 4/163$ بر مجذور ثانیه محاسبه شد.

کلمات کلیدی: پایداری ستون آب، لایه بندی حرارتی، توده های آب، ساختار عمودی، دریای خزر.

۱. مقدمه

است. منابع عظیم و منحصربه‌فرد ماهی استروژن (خاویاری) دریای خزر ۸۵٪ خاویار سیاه جهان را تامین می‌کند (Zaker et al., 2007; Zonn, 2005(a); Dumont, 1998). در عصر حاضر مقادیر زیادی از مواد آلاینده انسانی، صنعتی و فاضلاب‌های شهری که حاوی هیدروکربن‌ها، نیترات‌ها، فسفات‌ها و مواد شوینده هستند، وارد دریای خزر می‌شود و محیط‌زیست و زندگی جانداران آن را تهدید می‌کند. به‌علاوه، آلاینده‌ها و پسماندهای صنعتی، کشاورزی و شهری و چاه‌های استخراج نفت و گاز در

دریای خزر بزرگترین توده آبی بسته دنیا است که به واسطه دارا بودن ویژگی‌ها و شرایط منحصربه‌فردی همچون منابع غنی زیستی و هیدروکربنی جایگاه و نقش ویژه‌ای در توسعه کشورهای حاشیه‌ای خود دارد (Dumont, 1998; Kosarev and Kostianoy, 2005; Zonn, 2005(b)). صنایع نفت و گاز و شیلاتی مهمترین محوره‌های اقتصادی کشورهای اطراف این دریا

فلات قاره در ناحیه بابلسر انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که یک لایه ترموکلاین در فصل تابستان در عمق ۲۰ تا ۵۰ متری وجود دارد که در میان این لایه دما تا 15°C کاهش می‌یابد. در ابتدای فصل پاییز، ضخامت لایه ترموکلاین تا ۱۵ متر کاهش می‌یابد و بین اعماق ۳۰ تا ۴۵ متری قرار می‌گیرد. دمای روزانه آب در لایه آمیخته سطحی در تابستان بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد متغیر ثبت شده است و در اواخر فصل پاییز تا 20°C کاهش یافته است. در پایین لایه ترموکلاین، در عمق ۱۱۰ متری دما بین $7/5$ تا $10/5$ درجه سانتی‌گراد متغیر و با تغییرات اندک فصلی همراه بوده است. در فصل تابستان، در خارج از منطقه فلات قاره، میانگین شوری در بالا و پایین لایه ترموکلاین به ترتیب $12/2$ و $12/3$ اندازه‌گیری شده است. تغییرات شوری از سطح دریا تا عمق ۱۱۰ متری کمتر از $0/25$ بوده است. در منطقه فلات قاره، شوری بین $12/10$ – $12/05$ متغیر است که این اندکی کمتر از عمق مشابه در خارج از منطقه فلات قاره است. تغییرات عمودی چگالی، بیشتر به تغییرات عمودی دما و به میزان کمتر به تغییرات عمودی شوری وابسته است (Zaker et al., 2007). در اندازه‌گیری‌های انجام گرفته توسط Jamshidi (2009) در آب‌های ساحلی بابلسر، ترموکلاین فصلی در عمق بیشتر از ۳۰ متر مشاهده شده است، که با کاهش بیش از ۸ درجه‌ای دما در عرض آن همراه بوده است. شیب عمودی کاهش چگالی در میان لایه ترموکلاین بیشتر از لایه آمیخته سطحی است. Nasrollahzadeh و همکاران (۲۰۰۸) اندازه‌گیری‌هایی در بخش سطحی آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر انجام دادند. بر اساس اندازه‌گیری‌های آنها، درجه حرارت آب سطحی بین $9/9^{\circ}\text{C}$ در زمستان تا $28/6^{\circ}\text{C}$ در تابستان در سال‌های ۹۷–۱۹۹۶ و بین $9/2^{\circ}\text{C}$ در زمستان و $28/8^{\circ}\text{C}$ در تابستان در طی سال ۲۰۰۵ بوده است. Roohi و همکاران (۲۰۰۸) در بخشی از یک پژوهش، تغییرات درجه حرارت و شوری آب دریا را تا عمق ۱۰۰ متری در بخش جنوبی دریای خزر گزارش نمودند. بر اساس این گزارش بیشینه درجه حرارت آب دریا در حدود 30°C در تابستان بوده است.

در تحقیق دیگری که توسط Jamshidi (2010) انجام شد، پارامترهای دما، شوری و چگالی آب‌های ساحلی دریای خزر در ناحیه رودسر مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های حاصل از کاربرد دستگاه CTD در آب‌های ساحلی رودسر در فصل تابستان به منظور تعیین لایه‌های هم‌دما، عمق ترموکلاین و ساختار عمودی ویژگی‌های آب دریا، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در طی

مناطق نزدیک و دور از ساحل، منابع زنده و شیلاتی را می‌تواند نابود کند (Zonn, 2005(a); Zaker et al., 2007).

رژیم طبیعی پارامترهای فیزیکی دریای خزر تحت تاثیر عوامل خارجی نظیر خروجی رودخانه‌ای و شرایط جوی شکل می‌گیرد. ساختار هیدرولوژیک و چرخش آب دریای خزر، تغییرپذیری سریع پارامترهای آب این دریا را در مقایسه با دیگر آب‌های آزاد جهان نشان می‌دهد. که این مهم نیاز مبرم برای پیش‌شرایط محیطی و فیزیکی دریای خزر و تغییرات پارامترهای اصلی دریا را بیان می‌کند. لازم است نتایج چنین تحقیقاتی به‌طور پیوسته منتشر شود تا امکان مطالعه تغییرات پارامترهای گوناگون دریای خزر مهیا شود (Kosarev and Kostianoy, 2005) تا بتوان از به‌وجود آمدن خسارات جدی و جبران‌ناپذیر به گونه‌های نادر جانداران و محیط‌زیست دریایی آن جلوگیری کرد. به عبارتی دیگر در شرایط فعلی مطالعات اقیانوس‌شناسی فیزیکی در دریای خزر، کاملاً ضروری است. از این‌رو این تحقیق به منظور بررسی پایداری و لایه‌بندی ستون آب دریا در بخش عمیق جنوب دریای خزر انجام شده است. همچنین تغییرات پارامترهای مختلف آب دریا نظیر فشار، دما، شوری، چگالی، ساختار لایه‌بندی شامل ترموکلاین، هالوکلاین و پیکنوکلاین در زمان‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است.

بر اساس نتایج مطالعات انجام شده توسط Tuzhilkin و Kosarev (۲۰۰۵)، تشکیل ترموکلاین فصلی اثرات زیادی بر پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی آب دریا و همچنین اختلاط و فرآیندهای گردش آب دریا به ویژه در مناطق ساحلی دارد. به دلیل ایزوله بودن دریای خزر از دیگر دریاهای آزاد، فرآیند تشکیل و اضمحلال لایه‌بندی ستون آب در آن تحت تاثیر شرایط جوی منطقه و ورودی آب شیرین رودخانه‌ها است. عوامل ذکر شده فوق به همراه عواملی نظیر شارش حرارتی و تبخیر، باعث تغییرات عمده فصلی در رژیم گرمایی ستون آب از سطح تا عمق ۱۰۰ متر در این دریا می‌شود (Tuzhilkin and Kosarev, 2005). بر اساس مطالعات انجام شده در دریای خزر، ترموکلاین فصلی از سطح تا عمق ۸۰ متری در ستون آب به سمت پایین گسترش می‌یابد (Dumont, 1998). در مطالعه صورت گرفته توسط حاجی‌زاده ذاکر و همکاران (۱۳۸۲)، پارامترهای فیزیکی (دما، شوری و چگالی) در بخش شرقی ساحل جنوبی دریای خزر مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های میدانی مذکور با استفاده از دستگاه CTD در سراسر منطقه

در این تحقیق تغییرات فصلی پارامترهای فیزیکی در آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر در بازه زمانی مارس، آوریل، آگوست و نوامبر ۲۰۰۸ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه در محدوده آب‌های مجاور بندر انزلی را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها از سطح تا عمق دربرگیرنده آب‌های سطحی، میانی و عمیق در راستای ایستگاه‌های مورد نظر طراحی و اجرا شده است. بدین منظور یک دستگاه CTD ایدروانات ساخت کشور ایتالیا در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به کمک وینچ و کابل مستقر روی عرشه شناور مورد استفاده از سطح تا بستر دریا فرستاده شد. به منظور تطابق خوب سنسورهای دستگاه با محیط اطراف و بهترین برداشت داده، سرعت ارسال دستگاه در ستون آب یک متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. داده‌ها در راستای مقاطع عرضی عمود و موازی ساحل شامل ایستگاه‌های اندازه‌گیری برداشت و در انتهای عملیات‌ها تخلیه شدند.

با توجه به مشخصات و ترکیبات منحصربه‌فرد آب دریای خزر و تفاوت شوری و در نتیجه چگالی آن با دیگر دریاهای آزاد دنیا، نیاز بود داده‌های شوری و چگالی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه CTD اصلاح شود، که روند محاسبه آن در فرمول‌بندی ارائه شده توسط UNESCO به صورت فرمول‌های ۱ و ۲ است. بنابراین لازم است به منظور دستیابی به اعداد دقیق، ضرایب تصحیح در روابط و نحوه محاسبه پارامترهای شوری و چگالی مورد استفاده قرار گیرند. چندین رابطه حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، تجربی و شیمیایی برای محاسبه شوری و چگالی آب دریا وجود دارد. Millero و Chetarkin (۱۹۸۰) اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را با استفاده از چندین نمونه آب برداشت شده از سطح دریا در نزدیکی بندر نوشهر در بخش جنوبی دریای خزر انجام دادند و روابطی را ارائه نمودند. در راستای تکمیل و تدقیق این روابط، Peeters و همکارانش (۲۰۰۰) با استفاده از داده‌های برداشت شده از دریای خزر توسط سازمان انرژی اتمی (IAEA, 1996) روابطی را برای کالیبراسیون مقادیر داده‌های شوری و چگالی آب دریای خزر را ارائه نمودند که در روابط ۱ و ۲ آورده شده است. در تحقیق حاضر نیز از این روابط ۱ و ۲ که دقیق‌تر از موارد قبلی بیان گردیده، استفاده شده است.

$$S_{Caspian} = 1.1017S_{CTD} \quad (1)$$

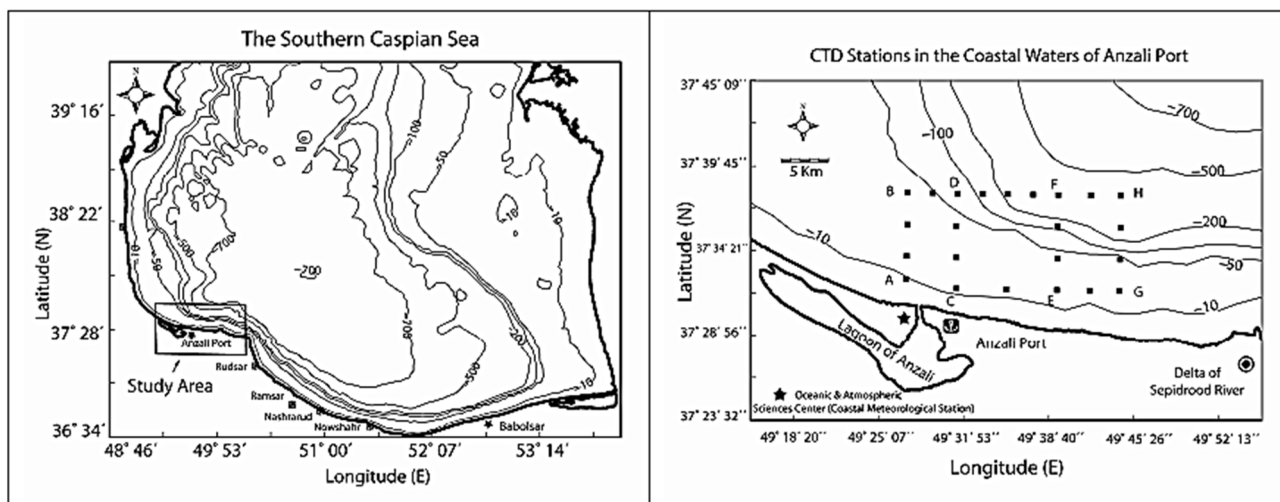
$$\rho_{Solution}(T, S, p) = \rho_{Sea}(T, 0, p) + f(T, p)(\rho_{Sea}(T, S, p) - \rho_{Sea}(T, 0, p)) \quad (2)$$

این بررسی، CTD در ستون آب تا عمق ۱۱۷ متری به عمق فرستاده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده تغییرات دما از ۲۹°C در سطح دریا و کمتر از ۸°C در عمق ۱۱۷ متری بود. در آب‌های ساحلی بخش جنوبی دریای خزر، فرآیند لایه‌بندی آب دریا در میانه تابستان کامل می‌گردد. در زمان اندازه‌گیری‌ها، یک ترموکلاین قوی بین اعماق ۱۰ متر و ۴۰ متر با کاهش ۱۸ درجه-ای دما در میان آن، مشاهده شد. در زیر ترموکلاین، دما به تدریج کاهش یافت و به کمتر از ۸°C در عمق ۱۱۷ متری رسید.

بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های محققین روسی در دریای خزر، ساختارهای عمودی و افقی لایه ترموهالاین توسط یک عدم یکنواختی مکانی به ویژه در مناطق دهانه رودخانه‌ها و مناطقی که در سواحل شرقی خزر میانی پدیده فراجوشی اتفاق می‌افتد مشاهده شده است. تغییرپذیری فصلی دما و شوری آب دریای خزر به ترتیب در ۱۰۰ و ۲۰ متر بالایی رخ می‌دهد. ترموهالاین فصلی در دریای خزر تحت تاثیر تغییرات با طول مدت کمتر از یک سال و روندهای چند ساله (و همچنین تغییرات سینوپتیک و فصلی) در لایه آب میانی و آب عمیق دریا رخ می‌دهد. به دلیل افزایش خروجی رودخانه‌ها در دهه‌های اخیر، یک پایداری هیدرواستاتیک در لایه‌بندی شوری در مناطق آب عمیق دریای خزر مشاهده می‌شود. لایه‌بندی مذکور جایگزین الگوی شوری در ستون آب و تغییر ساختار دمایی در فصل تابستان شده است (Tuzhilkin and Kosarev, 2005).

۲. مواد و روش‌ها

سواحل جنوبی دریای خزر دارای آب و هوای (اقلیم) نیمه گرمسیری است. معمولاً بیشترین و کمترین میزان دما به ترتیب در ماه‌های میانی تابستان و زمستان ثبت می‌شود. در این منطقه سرعت باد معمولاً به ۳ تا ۴ متر بر ثانیه می‌رسد و بادهای ضعیف نرخی حدود ۹۰٪ کل بادهای این منطقه را تشکیل می‌دهد. در فصل زمستان دمای هوا حدود ۸-۱۲ درجه سانتی‌گراد و در تابستان حدود ۲۴-۲۶ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به عدم اتصال دریای خزر به آب‌های آزاد دنیا، تشکیل لایه شیب دما-شوری (ترموهالاین) تحت تاثیر شرایط جوی روی دریا و میزان ورودی آب شیرین به آن است. از منظر بزرگ مقیاس تغییرات ساختار شیب دما-شوری (ترموکلاین) تا حد زیادی توسط خروجی رودخانه‌ها، شارش گرما و آب شیرین در سطح دریا کنترل می‌شود.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری در آب‌های جنوبی دریای خزر

پایداری مقیاسی برای درک مقدار کار مورد نیاز برای جابجا کردن یک ذره به سمت بالا و یا پایین در ستون آب دریا است. اقیانوس‌شناسان اغلب پارامتر دیگری را برای بررسی پایداری استفاده می‌کنند که به فرکانس شناوری Brant-Vaisala معروف است و با N نمایش داده می‌شود. پایداری به تعبیر دیگر می‌تواند به جابجایی در ستون آب به سمت بالا و پایین و بازگشت به حالت قبل نیز بیان شود. این حرکت رو به بالا و پایین را می‌توان به یک نوسان تشبیه کرد که فرکانس این حرکت با فرکانس شناوری N نمایش داده می‌شود.

$$N = (gE)^{1/2} \quad (5)$$

۳. نتایج

در مطالعه حاضر تغییرات پارامترهای مختلف آب دریا و نحوه لایه‌بندی ستون آب در منطقه فلات‌قاره و آب‌های عمیق نواحی جنوب غربی دریای خزر بررسی شد. در شکل ۲ تغییرات پارامترهای مورد نظر و لایه‌بندی بر اساس داده‌های برداشت شده ارائه شده است. اندازه‌گیری‌های زمستان: در این زمان تغییرات عمودی درجه حرارت در منطقه فلات قاره حدود ۲ واحد و بین ۹-۱۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. تغییرات افقی درجه حرارت آب دریا هم در منطقه فلات‌قاره و هم روی منطقه آب عمیق کم بود. در ایستگاه‌های آب عمیق تغییرات عمودی بیشتر بود و به حدود ۷°C در زیر لایه ۲۲۰ متر یعنی آب‌های میانی رسید و با

که در آن چگالی آب با استفاده از فرمول‌های یونسکو (UNESCO, 1981a; UNESCO, 1981b) با جایگذاری دما، شوری و فشار اندازه‌گیری شده درجا است و $f(T, p)$ ضریب تصحیح است. $\rho_{Sea}(T, 0, P)$ چگالی آب با استفاده از فرمول‌های یونسکو (UNESCO, 1981a; UNESCO, 1981b) و با استفاده از اندازه‌گیری‌های دما و فشار و با احتساب شوری صفر است.

بزرگترین اثر روی چگالی آب دریا تراکم پذیری است، ولی حتی با اغماض از اثر تراکم‌پذیری، چگالی آب دریا تحت تاثیر توزیع دما و شوری با عمق افزایش می‌یابد. نیمی از افزایش چگالی در ۲۰۰ متر بالایی سطح دریا رخ می‌دهد. بنابراین یکی از موارد خیلی مهم در علم اقیانوس‌شناسی فیزیکی، بررسی تغییرات عمودی چگالی ستون آب، نحوه اختلاط، لایه‌بندی و پایداری لایه‌های مختلف آب دریا است. نرخ نرمال شده افزایش چگالی را می‌توان با پارامتر پایداری به صورت رابطه ۳ نمایش داد (Knauss, 1997).

$$E = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (3)$$

در تحقیق حاضر نیز در نظر است با توجه به تغییرات دما، شوری و چگالی آب دریا، تغییرات پایداری ستون آب در زمان‌های اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گیرد. برای محاسبه پایداری ستون آب دریا می‌توان به روابط ۴ و ۵ اشاره نمود.

$$E = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) - \frac{g}{c^2} \quad (4)$$

کم عمق ۱۲/۲۵-۱۲/۳۵ بود. در ایستگاه‌های عمیق شوری در لایه سطحی حدود ۱۲/۳ بود، اما با یک کاهش کم به ۱۲/۲-۱۲/۱ در عمق بین ۵۰-۳۰ رسید و دوباره با یک افزایش محسوس به ۱۲/۴ در عمق ۱۷۵ متری رسید. چگالی در نواحی با عمق کم بین ۱۰۰۷/۲-۱۰۰۵/۹ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده شد و به ۱۰۱۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در عمق ۲۷۵ متری رسید. لایه پیکنوکلاين در محل قرارگیری لایه ترموکلاين مشاهده شد.

۳-۳. اندازه‌گیری‌های پاییز

الگوی تغییرات پارامترهای فیزیکی آب دریا در نوامبر نشان‌دهنده یک لایه اختلاط سطحی کاملاً واضح در لایه ۳۵ متر بالایی با درجه حرارت ۲۰-۱۹ درجه سانتی‌گراد بود. افزایش ضخامت لایه اختلاط سطحی باعث اضمحلال ترموکلاين از مرز بالایی آن گردید. در نزدیکی مرداب انزلی در مقاطع عمود و موازی ساحل، ورودی حجم عظیم آب با اختلاف دمایی ۱ تا ۲ درجه (حدود ۱۹-۱۸ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. لایه ترموکلاين بین اعماق ۳۵ تا ۵۰ متر با ضخامت کمتر نسبت به ماه آگوست و با اختلاف عمودی حدود ۱۰-۹ درجه بین (۱۹-۱۰) درجه سانتی‌گراد قرارداداشت و در زیر لایه ترموکلاين دما از ۹°C به کمتر از ۷°C رسید. اختلاف سطحی شوری در منطقه فلات‌قاره قابل توجه بود و در مناطق دور از ساحل در لایه اختلاط سطحی به عدد ۱۲/۴ رسید. شوری آب دریا در عرض ترموکلاين به عدد ۱۲/۲ و با افزایش دوباره به ۱۲/۴ در اعماق بیش از ۲۰۰ متر رسید. لایه پیکنوکلاين در محل لایه ترموکلاين قرار گرفته است. نمودارها و نتایج داده‌های برداشت شده نشان می‌دهد که ترموکلاين (و در نتیجه پیکنوکلاين) در نوامبر دارای ضخامت کمتری نسبت به زمان اندازه‌گیری‌ها در آگوست دارا بوده و مرز بالایی آن (ترموکلاين) در عمق‌های بیشتر قرار گرفته است. در منطقه فلات‌قاره و مقاطع نزدیک دهانه مرداب، چگالی آب دریا از ۱۰۰۷/۱ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۱۰۰۸/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. چگالی در ایستگاه‌های دور از ساحل در عرض لایه پیکنوکلاين بین ۱۰۰۸/۶ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۱۰۱۰/۱ کیلوگرم بر مترمکعب ثبت شد. در زیر لایه پیکنوکلاين چگالی افزایش یافته و به ۱۰۱۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در عمق ۲۰۰ متری رسید و تا نزدیک بستر دریا نیز افزایش یافت.

افزایش عمق تا نزدیکی بستر باز هم کاهش یافت. در نواحی نزدیک دهانه خروجی مرداب انزلی ورودی آب شیرین در سطح مشاهده شد که باعث برهم خوردن ساختار فیزیکی طبیعی ستون آب شده و با افزایش عمق شوری افزایش یافت. این روند در نواحی دور از ساحل هم ادامه یافت و در آب عمیق، شوری از ۱۲/۲ در زیر لایه سطحی به ۱۲/۳ در عمق ۱۰۰ متر و به ۱۲/۴ در عمق ۲۷۵ متری رسید. با توجه به دامنه تغییرات عمودی شوری در نواحی نزدیک دهانه مرداب انزلی، تغییرات عمودی چگالی زیاد بود. تغییرات عمودی چگالی از حدود ۱۰۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب به بیش از ۱۰۱۰/۶ در عمق ۳۰۰ متری رسید. لایه‌بندی حرارتی و چگالی محسوسی در ستون آب دریا مشاهده نشد.

۳-۱. اندازه‌گیری‌های بهار

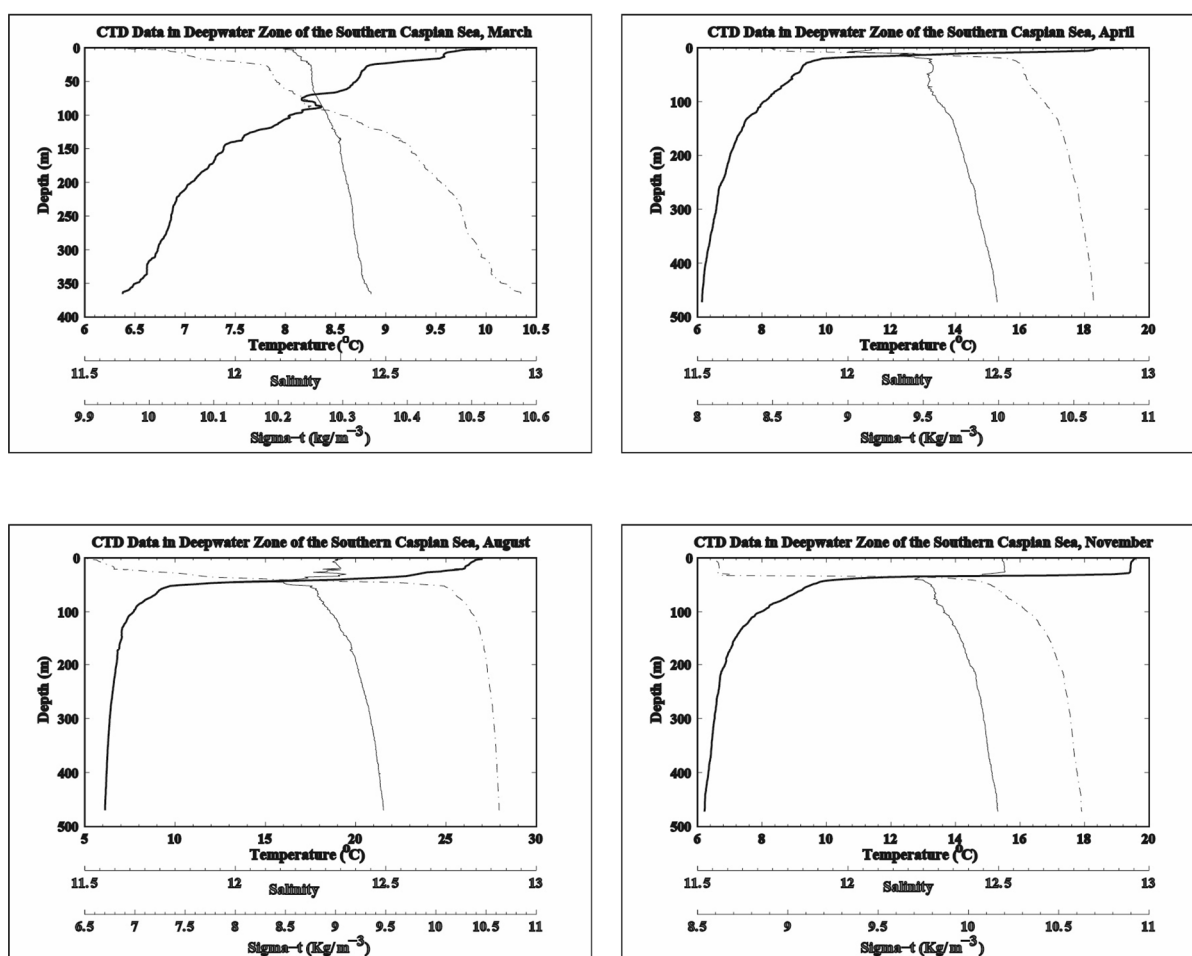
با گرم شدن هوا و در نتیجه گرم شدن آب‌های سطحی، تغییرات عمودی درجه حرارت افزایش یافت. در منطقه فلات‌قاره دما از ۱۹°C در سطح به ۱۱°C در نزدیکی بستر رسید. در لایه آب عمیق دما به ۷°C در عمق ۲۰۰ متری رسید و روند کاهشی آن ادامه یافت. روند ایجاد لایه‌بندی در نیم‌رخ‌های عرضی و عمودی قابل مشاهده است. ضخامت قرارگیری آب کم شور در لایه سطحی کمتر از نتایج بدست آمده در ماه مارس است. در لایه‌های پایین‌تر در منطقه فلات‌قاره شوری آب دریا حدود ۱۲/۱-۱۲/۱۵ بود. در ایستگاه‌های دور از ساحل شوری از ۱۲/۱ در لایه سطحی به ۱۲/۴ در عمق ۲۲۵ متر رسیده است. تغییرات عمودی چگالی در منطقه فلات‌قاره حدوداً بین ۱۰۰۸-۱۰۰۹/۹ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. که در ایستگاه‌های آب عمیق به ۱۰۱۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در عمق ۲۲۵ متری رسیده و با افزایش عمق بازهم افزایش یافت.

۳-۲. اندازه‌گیری‌های تابستان

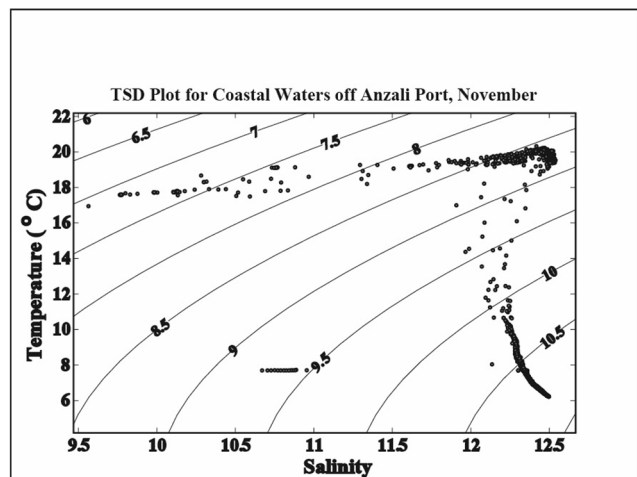
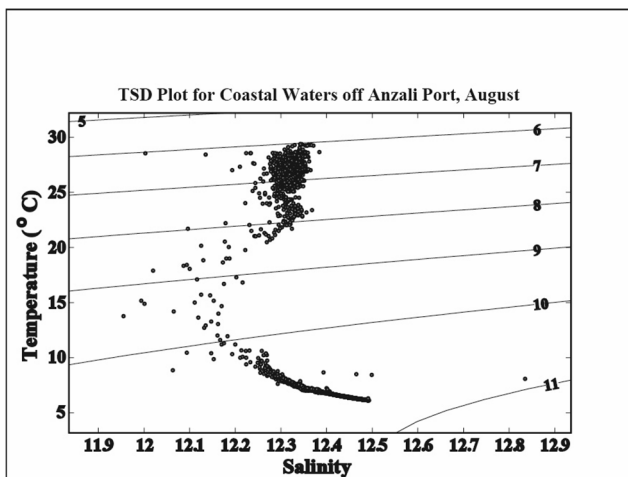
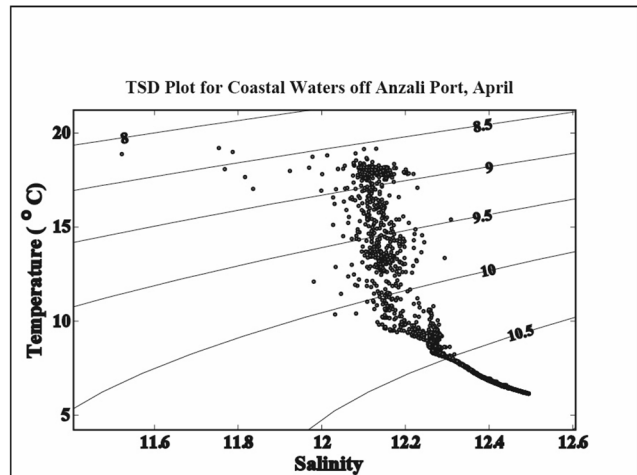
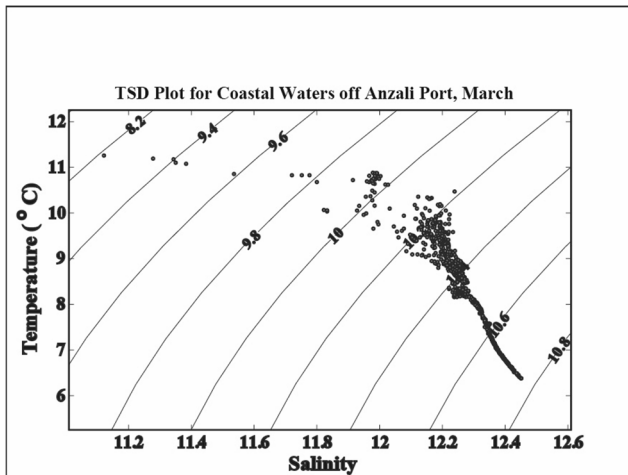
در منطقه فلات‌قاره درجه حرارت بین ۲۹-۲۵ درجه سانتی‌گراد بود و با افزایش عمق در مناطق آب میانی و آب عمیق درجه حرارت کاهش یافت و با یک شیب دمایی تند به ۹ درجه در عمق ۵۰ متر و با کاهش به ۷ درجه در عمق ۱۲۰ متر رسید. در ستون آب لایه‌بندی قوی با سه لایه اختلاط سطحی و ترموکلاين و عمیق مشاهده شد. تغییرات شوری در منطقه آب

قوی‌ترین حالت در طول سال قرار دارد. در این زمان داده‌ها وجود سه لایه مجزا، لایه سطحی، ترموکلاین و آب عمیق را در ستون آب نشان می‌دهند. داده‌های آب عمیق با دمای کم و شوری زیادتر در بخش پایین نمودار، و داده‌های لایه‌های سطحی و ترموکلاین با دمای بیشتر در بخش بالایی در نمودار به‌خوبی مشهود است. داده‌های اندازه‌گیری شده در فصل پاییز نشان می‌دهد که لایه‌بندی ستون آب قابل توجه ولی رو به زوال و اضمحلال بوده است. داده‌های آن زمان وجود سه لایه مجزا لایه سطحی، ترموکلاین و آب عمیق را در ستون آب نشان می‌دهند. داده‌های آب عمیق با دمای کم و شوری زیادتر در بخش پایین نمودار، و داده‌های لایه‌های سطحی و ترموکلاین با دمای بیشتر در بخش بالایی در نمودار به‌خوبی قابل رویت است. پراکندگی داده‌های آب عمیق کم ولی داده‌های آب لایه ترموکلاین بیشتر بوده است. همچنین داده‌های ورودی آب کم شور مرداب انزلی به صورت پراکنده تر در بخش‌هایی از این نمودار مشخص است.

در شکل ۳ نمودارهای TSD دیاگرام به خوبی توده‌های آبی متفاوت را در هر ماه اندازه‌گیری مجزا نشان می‌دهد. داده‌های اندازه‌گیری شده در مارس نشان می‌دهد که با توجه به دامنه کم چگالی، ستون آب دارای لایه‌بندی ضعیفی بوده است. در این زمان داده‌ها نشان‌دهنده لایه آب عمیق و آب سطحی است. داده‌های آب عمیق با دمای کم و شوری زیادتر، و داده‌های لایه‌های سطحی با دمای بیشتر و شوری نسبتاً کمتر در نمودار به‌خوبی مشهود است. داده‌های اندازه‌گیری شده در فصل بهار نشان می‌دهد که لایه‌بندی ستون آب نسبت به ماه مارس قوی‌تر بوده است. در آن زمان داده‌ها به تدریج تشکیل سه لایه را در ستون آب نشان می‌دهند. داده‌های آب عمیق با دمای کم و شوری زیادتر، و داده‌های لایه‌های سطحی با دمای بیشتر و شوری نسبتاً کمتر در نمودار TSD دیاگرام به‌خوبی مشهود است. پراکندگی داده‌های آب عمیق کم ولی داده‌های آب سطحی پراکنده دارای پراکندگی بوده است. داده‌های اندازه‌گیری شده در فصل تابستان نشان می‌دهد که لایه‌بندی ستون آب در



شکل ۲: تغییرات فصلی نیمرخ عمودی دما، شوری و چگالی و لایه‌بندی در بخش آب عمیق جنوب دریای خزر



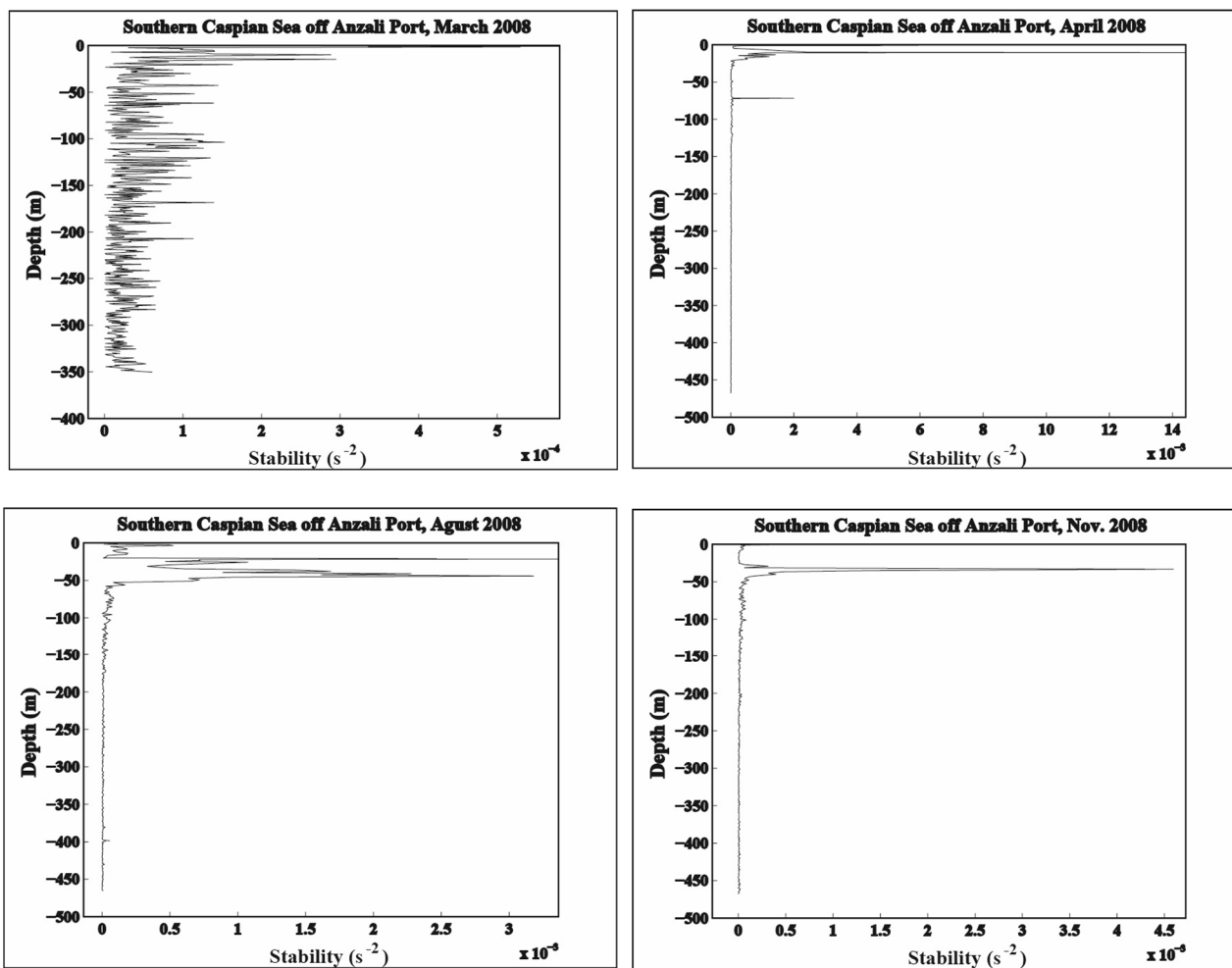
شکل ۳: دیاگرام دما، شوری و چگالی و آب توده‌ها در فصول مختلف سال در بخش عمیق جنوب دریای خزر

که می‌تواند در بررسی خصوصیات و ساختار فیزیکی آب دریا مفید باشد، انرژی پتانسیل ستون آب دریا است. جدول ۱ مقادیر پایداری ستون آب در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر پایداری در ستون آب در بخش عمیق جنوب دریای خزر

No.	Date	Layers	Max. E	Min. E
۱	March	Subsurface Thermocline & Pycnocline (0-25m)	5.901×10^{-4}	1.167×10^{-6}
۲		Deep Water	1.525×10^{-4}	4.163×10^{-8}
۳	April	Subsurface Thermocline & Pycnocline (0-22m)	1.462×10^{-2}	3.122×10^{-6}
۴		Deep Water	1.994×10^{-3}	1.049×10^{-6}
۵	August	Surface Mixed (0-20m)	5.24×10^{-4}	9.774×10^{-6}
۶		Thermocline & Pycnocline (20-52m)	3.404×10^{-4}	8.311×10^{-5}
۷	November	Deep Water	1.696×10^{-4}	8.682×10^{-6}
۸		Surface Mixed (0-28m)	3.258×10^{-4}	1.214×10^{-6}
۹	November	Thermocline & Pycnocline (28-45m)	4.595×10^{-4}	2.891×10^{-5}
۱۰		Deep Water	8.153×10^{-5}	1.215×10^{-6}

نمودار تغییرات پایداری در ستون آب دریا در فصول مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. سهم گرادیان عمودی درجه حرارت در پایداری به صورت بسیار مشهود بیشتر از سهم گرادیان شوری در ستون آب مشاهده گردید. نمودارها نشان‌دهنده مقادیر زیاد پایداری استاتیکی در چند ۱۰ متر اول ستون آب هستند، که بیانگر وجود ترموکلاین فصلی در منطقه بوده است. این حالت در نمودارهای پایداری ترسیم شده برای فصول بهار، تابستان و پاییز به وضوح دیده می‌شود، ولی در زمان اندازه‌گیری‌ها در ماه مارس که لایه‌بندی حرارتی قوی وجود نداشته، مشاهده نمی‌شود. در زمان اندازه‌گیری ماه مارس، نمودار پایداری حتی در عمق‌های زیاد هم دارای نوسانات زیاد بوده که می‌تواند به دلیل عدم قرارگیری ستون آب در حالت آرامش و سکون نسبی باشد و یا به عبارتی دیگر در ستون آب دریا تلاطم وجود داشته است. به هر حال پارامتر دیگری



شکل ۴: تغییرات فصلی پایداری ستون آب در بخش عمیق جنوب دریای خزر

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱. تغییرات دما و لایه‌بندی حرارتی

برپایه داده‌ها، دامنه تغییرات دمای آب سطحی در ماه مارس بیش از 9°C در سطح تا کمتر از 7°C در نزدیکی بستر اندازه‌گیری شد. در حالیکه در ماه آوریل دمای آب سطحی 18°C بوده و در زمان اندازه‌گیری در ماه آگوست به کمتر از 3°C در سطح رسیده است. در ماه نوامبر اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده درجه حرارت سطحی حدود 19°C در سطح بوده که به کمتر از 7°C در محدوده آب عمیق کاهش یافته است.

از ماه آوریل (اوایل فصل بهار) با گرم شدن تدریجی هوا لایه‌بندی آغاز شده، در تابستان به قویترین حالت خود رسیده و در ماه نوامبر هم هنوز اثرات لایه‌بندی قوی در ستون آب وجود داشته است. انتظار می‌رود از اواخر فصل پاییز روند اضمحلال لایه‌بندی شروع و در ماه مارس در فصل زمستان به حالت حدی خود یعنی

نتایج روند تغییرات فصلی لایه‌بندی و پایداری ستون آب براساس داده‌های اندازه‌گیری شده ارایه گردید. به علت مجاورت مرداب انزلی و دهانه ورودی سفیدرود در منطقه مورد مطالعه، چگونگی تأثیرات فصلی خروجی آب شیرین مرداب در آب‌های ساحلی جنوب غربی دریای خزر تجزیه و تحلیل شد. به منظور بررسی و مطالعه هر چه دقیق‌تر و رسیدن به اهداف مورد نظر تحقیق، ایستگاه‌های اندازه‌گیری به گونه‌ای جانمایی گردیدند که داده‌های مورد نظر از بخش‌های فلات‌قاره، میاناب و همچنین منطقه آب عمیق برداشت گردد. تجزیه و تحلیل داده‌های برداشت شده به وضوح تغییرات پارامترهای فیزیکی نظیر دما، شوری و چگالی آب دریا را در لایه‌های مختلف نشان داده و الگوی لایه‌بندی ستون آب در ماه‌های مختلف را ارایه نمود.

حدود ۱۲/۴، در ترموکلاين ۱۲/۱ و در بالای ترموکلاين ۱۲/۲۵ ثبت شده است. در فصل پاییز و بهار شوری در زیر ترموکلاين ۱۲/۳ تا ۱۲/۳۵ و در بالای ترموکلاين ۱۲/۲۵ در پاییز و ۱۱/۹۵ در بهار بوده است. در فصل پاییز، شوری در لایه ترموکلاين در محدوده ۱۲/۲۵ تا ۱۲/۳ متغیر بوده و در برخی موارد وجود یک لایه هالوکلاين ضعیف در محل قرارگیری ترموکلاين به سختی قابل تشخیص بود. همچنین گستره آب کم شور ناشی از خروجی رودخانه‌های محلی در لایه‌های سطحی آب مشهود بود و تغییرات عمودی شوری در حدود ۰/۴ در ستون آب به ثبت رسید. روی منطقه فلات قاره اثرات تخلیه آب‌های رودخانه‌های محلی و پلوم رودخانه سفیدرود و مرداب انزلی به‌خوبی مشاهده گردید. در تمام فصول تمرکز آب کم شورتر در کنار ساحل دیده شد، و در برخی موارد آب با شوری کمتر در لایه با عمق ۳۰ متر و در زیر لایه با شوری بیشتر مشاهده شد.

۳-۴. تغییرات چگالی

با توجه به مقدار کم شوری آب دریا، تغییرات چگالی بسیار با تغییرات درجه حرارت منطبق بوده است و قرارگیری لایه پیکنوکلاين در محل تشکیل لایه ترموکلاين مشهود است. در آگوست چگالی در زیر ترموکلاين بین ۱۰۱۰/۲ تا ۱۰۱۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب و در بالای ترموکلاين حدود ۱۰۰۶/۷ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده شد. در پاییز ساختار چگالی در زیر لایه ترموکلاين مشابه با تابستان و در بالای ترموکلاين دانسیته حدود ۱۰۰۷/۱ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد. در ماه آوریل چگالی در بالای ترموکلاين ۱۰۰۹/۶ کیلوگرم بر مترمکعب و در زیر ترموکلاين ۱۰۱۰/۴ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده گردید. بدین ترتیب دامنه تغییرات چگالی آب دریا در زیر لایه ترموکلاين کمتر از یک و در سرتاسر مقطع دارای ماکزیمم ۴/۲ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است.

۴-۴. گرادیان‌های عمودی دما، شوری و چگالی

باتوجه به نتایج، مقادیر بیشتر گرادیان درجه حرارت در لایه ترموکلاين بوده است، که دارای بیشینه مقدار در اندازه‌گیری نوامبر با عدد ۰/۴۸۱۵ سانتی‌گراد بر متر بین اعماق ۲۸-۴۵ متر و کمترین مقدار در اندازه‌گیری ماه مارس با عدد ۰/۰۵ سانتی‌گراد

از بین رفتن لایه بندی برسد. در زمان اندازه‌گیری‌ها در ماه آگوست در فصل تابستان ساختار حرارتی آب منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود یک لایه ترموکلاين به پهنای ۳۰ متر بین اعماق ۲۰ تا ۵۰ متری است. در این فصل شیب لایه ترموکلاين و نوسانات آن در مجاورت ساحل مشاهده شد. درجه حرارت زیر ترموکلاين ۱۰°C بوده که با گرادیان کم به ۷/۵°C در اعماق بیش از ۱۰۰ متر کاهش یافته است. ساختار درجه حرارت در زیر ترموکلاين در طی سال تقریباً ثابت بوده است. درجه حرارت لایه مخلوط بالای ترموکلاين در تابستان نزدیک به ۳۰°C بوده و در آخر پاییز به ۱۵°C کاهش یافته، در زمستان عمدتاً بین حدود ۱۰°C قرار گرفته است. در زمان اندازه‌گیری‌ها در فصل پاییز ساختار حرارتی آب منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود یک لایه ترموکلاين به پهنای کمتر از ۱۵ متر مابین اعماق ۳۰ تا ۴۵ متری است، و درجه حرارت بالا و پایین به ترتیب ۱۹ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. در فصل پاییز ضخامت لایه مخلوط سطحی حدود ۳۰ متر مشاهده گردید. با کاهش درجه حرارت لایه مخلوط سطحی، گرادیان درجه حرارت در عرض ترموکلاين کاهش یافته و در اواخر زمستان ترموکلاين تقریباً مستهلک شده است. داده‌های برداشت شده به‌خوبی نشان‌دهنده عمیق شدن لایه سطحی در طی فصل پاییز و زمستان و از بین رفتن کامل ترموکلاين فصلی در حدود نیمه زمستان است. در فصل زمستان ساختار حرارتی نشان‌دهنده از بین رفتن ترموکلاين فصلی است. از اواخر زمستان و ابتدای بهار نوسانات درجه حرارت در لایه بالایی شروع گردید. در فصل بهار مجدداً با گرم شدن آب از سطح و تغییرات فصلی شکل‌گیری مجدد ترموکلاين فصلی رخ داده است. آب دریا به صورت فصلی از سطح گرم شده و سپس با مخلوط شدن آب گرم شده از بالا با لایه‌های زیرین، درجه حرارت لایه مخلوط بالایی افزایش یافته و با تکرار این روند درجه حرارت لایه مخلوط بالایی به حدود ۲۹°C و بیشتر در میانه فصل تابستان رسید، و یک لایه ترموکلاين قوی و کاملاً توسعه یافته در زیر آن ایجاد گردید. نتایج نشان‌دهنده وجود بیشترین تغییرات فصلی در لایه ۱۰۰ متر بالایی از سطح دریا است.

۲-۴. تغییرات شوری

در مجموع تغییرات عمودی و فصلی شوری بسیار کم بوده است. در خارج از فلات قاره شوری در تابستان در زیر ترموکلاين

نمودار پایداری در ماه مارس می‌تواند وجود تلاطم^۱ در ستون آب و عدم پایداری باشد. بیشینه مقادیر فرکانس پایداری در بین زمان‌های مختلف اندازه‌گیری در ماه آوریل در لایه ترموکلاين^۲ $10 \times 1/462$ برمجذور ثانیه مشاهده شد. کمترین دامنه مقدار مربوط به لایه‌های آب عمیق در ماه‌های مختلف بود و مقدار کمینه مربوط به ماه مارس در حدود $10 \times 1/163$ برمجذور ثانیه محاسبه گردید.

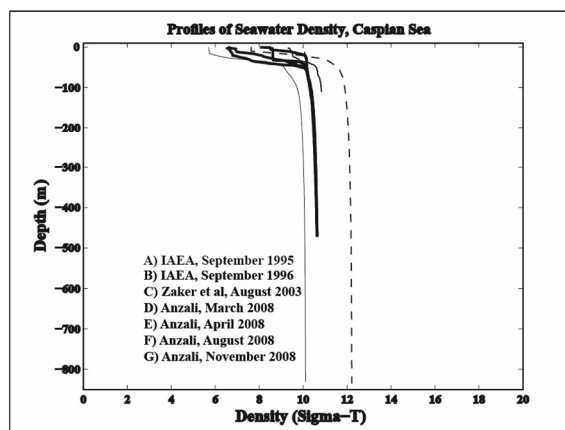
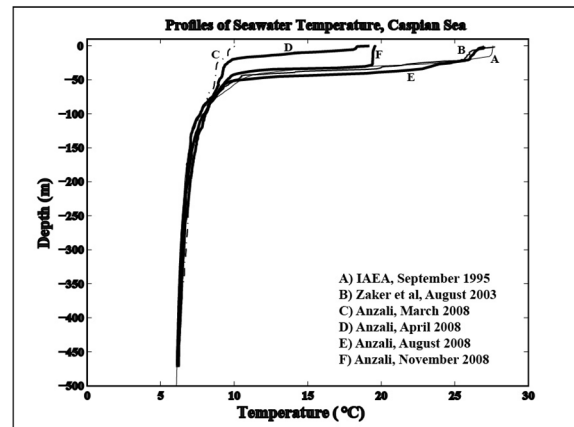
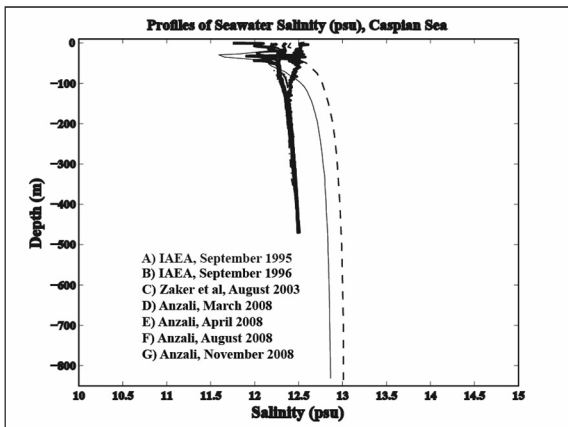
به منظور مقایسه، نتایج نیمرخ‌های عمودی دما بر اساس داده‌های برداشت شده دما در پروژه‌های تحقیقاتی گوناگون در حوضه آب عمیق جنوبی دریای خزر در شکل ۵ ارائه می‌شود. همانگونه که در نمودار مشاهده می‌شود، اغلب تغییرات درجه حرارت در لایه‌های سطحی و شیب گرمایی و به عبارتی در لایه ۱۰۰ متری بالایی رخ داده است. در زیر عمق ۱۰۰ متری تغییرات حرارتی حتی در فصول مختلف ناچیز بوده است. در فصل تابستان آب سطحی دارای درجه حرارتی حدود 28°C درجه و این مقدار در فصل زمستان به 9°C رسیده است. عمق ۱۰۰ متر به عنوان حد تاثیر تغییرات فصلی در درجه حرارت آب دریا در گزارشات ارائه شده توسط Tuzhilkin و Kosarev (۲۰۰۵)؛ Peeters و همکاران (۲۰۰۰)؛ Zaker؛ IAEA (1996) و همکاران (۲۰۰۷) نیز مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با دیگر مطالعات انجام شده، نشان‌دهنده تشابه روند کاهش و تغییرات درجه حرارت در اعداد و مقادیر برداشت شده در مطالعات گوناگون است. تغییرات عمودی درجه حرارت از سطح تا حد (مرز) پایینی ترموکلاين به حدود 20°C در فصل تابستان رسید. نیمرخ‌های عمودی ارائه شده در این نمودار از روند تغییرات عمودی درجه حرارت در آب‌های دریاها و عرض‌های میانی کره زمین تبعیت می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از درجه حرارت نشان می‌دهد که تشکیل لایه ترموکلاين فصلی از بهار آغاز و در قوی‌ترین و گسترده‌ترین حالت در میانه تابستان رسیده و در فصل پاییز لایه ترموکلاين توسط لایه اختلاط سطحی به عمق‌های پایین‌تر فرستاده شده و کم‌کم از مرز بالایی ترموکلاين مستهلک شده است. ضخامت لایه اختلاط سطحی افزوده شده و به تدریج در فصل سرد زمستان لایه‌بندی ضعیف شده و از بین رفته است. تغییرات دما در زیر لایه ترموکلاين در فصول مختلف ناچیز بوده است (شکل ۵).

بر متر در اعماق ۲۵-۰ متر مشاهده شده است. شایان توجه است که در همین زمان‌ها و لایه‌های مذکور بیشترین مقدار گرادیان عمودی چگالی در لایه پیکنوکلاين نیز قابل رویت است. بدین ترتیب که بیشینه مقدار در اندازه‌گیری نوامبر با عدد $0/1218$ واحد بر متر در لایه پیکنوکلاين بین اعماق ۲۵-۲۸ متر و کمترین مقدار در اندازه‌گیری ماه مارس با عدد $0/009$ سانتی‌گراد بر متر در پیکنوکلاين بین اعماق ۲۵-۰ متر قابل مشاهده است. این نتیجه بسیار مهم است که گرادیان بیشتر پارامترهای دما و چگالی در لایه ترموکلاين (پیکنوکلاين) دقیقاً در زمانی رخ داده که قویترین حالات لایه‌بندی در ستون آب برقرار بوده است. لازم به توضیح است که لایه هالوکلاين هم در اغلب موارد از تغییرات عمودی ترموکلاين و پیکنوکلاين تبعیت نموده، به‌ویژه در زمان‌هایی که لایه‌بندی بسیار قوی بوده است، (در ماه‌های آگوست و نوامبر). دقیقاً در همین زمان است که گرادیان شوری هم عدد قابل توجهی داشته است، ($0/0138$ در هزار بر متر در آگوست و $0/0215$ در هزار بر متر در نوامبر). نکته قابل توجه دیگر روند افزایشی تغییرات عمودی شوری در ماه‌های مارس و آوریل و روند کاهشی مقدار شوری در لایه هالوکلاين در ماه‌های آگوست و نوامبر بوده است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که تغییرات شوری در لایه آب عمیق یعنی زیر لایه هالوکلاين در تمام ماه‌های اندازه‌گیری روندی افزایشی تا نزدیکی بستر داشته است (این همان گرادیان منفی و مثبت را تداعی می‌کند).

۴-۵. پایداری

با توجه به نمودارهای نیمرخ عمودی ارائه شده دما، شوری و چگالی، و همچنین نمودارهای عمودی پایداری، بیشترین تغییرات و نوسانات در فرکانس پایداری در لایه ۵۰ متر بالایی و بعضاً تا نزدیکی عمق ۲۰۰ متری در دریای خزر در زمان اندازه‌گیری‌ها مشاهده شد. نمودارها نشان‌دهنده مقادیر زیاد پایداری استاتیکی در چند ۱۰ متر اول ستون آب بوده که بیانگر وجود ترموکلاين فصلی در منطقه است. این حالت در نمودارهای پایداری ترسیم شده برای فصول بهار، تابستان و پاییز به وضوح دیده می‌شود. ولی در زمان اندازه‌گیری‌ها در ماه مارس که لایه‌بندی حرارتی قوی وجود نداشته، مشاهده نمی‌شود. دلیل نوسانات زیاد در

^۱ Turbulence



شکل ۵: مقایسه نیمرخ‌های دما، شوری و چگالی (سیگماتی) و ساختار عمودی لایه‌بندی در جنوب دریای خزر

توسط Tuzhilkin و Kosarev (۲۰۰۵)؛ Peeters و همکاران (۲۰۰۰)؛ IAEA (۱۹۹۶) و Zaker و همکاران (۲۰۰۷) در عمق‌های نزدیک به ۳۰ متر در حوضه جنوبی دریای خزر، شوری آب دریا کمتر از لایه‌های بالایی است که برخی از مقالات علت آن را ورودی آب کم شور رودخانه‌ها و شناوری منفی^۱ ذکر کرده‌اند. این واقعیت در نمودارهای شوری حاصل نتایج این تحقیق به خوبی قابل مشاهده است و یکدیگر را تایید می‌کنند. مقایسه نیمرخ‌های عمودی چگالی در فصول مختلف منتج از تحقیق حاضر و دیگر پژوهش‌ها نشانگر مشابهت روند و الگوی تغییرات چگالی آب دریا در حوضه جنوبی دریای خزر بوده است. همان‌طوری‌که قبلاً هم اشاره شد، یکی از ویژگی‌های آب دریای خزر مطابقت و هماهنگی تغییرات چگالی و درجه حرارت آب دریا است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که لایه‌بندی چگالی ستون آب دریای خزر

با توجه به گراف‌های تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه، مشاهده می‌شود که ستون آب در منطقه فلات قاره عمدتاً در دو لایه اختلاط سطحی و شیب دمایی قرار گرفته است و پس از منطقه شکست، ستون آب متشکل از سه لایه اختلاط سطحی، شیب دمایی و آب عمیق بوده است. گراف‌ها نشان می‌دهد که خطوط هم‌دما (کانتورهای دمایی) عمدتاً موازی سطح تراز آب دریا و افقی و موازی یکدیگر بودند. با مقایسه این تحقیق و مطالعات پیشین می‌توان چنین نتیجه گرفت که در فصل تابستان لایه‌بندی فصلی قوی‌تری در ستون آب ایجاد شده است. با توجه به همبستگی زیاد چگالی و دمای آب دریا این حالت توازی بین خطوط در کانتورهای چگالی نیز قابل مشاهده و پیش‌بینی است. به نظر می‌رسد در زمان‌هایی که خطوط هم‌دما و هم‌چگالی شیب بیشتری داشته و در ستون آب تلاطم ناشی از اندرکنش جو و دریا بیشتر بوده، باعث ایجاد جریان‌ات قویتری شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق و مقایسه آن با مطالعات انجام شده

¹ Negative Buoyancy

- Knauss, J.A., 1997. Introduction to physical oceanography. United States of America: waveland press Inc., 1-309.
- Kosarev, A.N., 2005. Phsico-Geographical conditions of the Caspian Sea. In: The Caspian Sea Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry, 5: 5-31.
- Kosarev, A.N.; Kostianoy, A.G., 2005. Introduction. In: The Caspian Sea environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry, 5: 1-3.
- Millero, F.J.; Chetirkin, P.V., 1980. The density of the Caspian Sea waters. Journal of Deep-Sea Research, 27A: 265-271.
- Nasrollahzadeh, H.S.; Din, Z.B.; Foong, S.Y.; Makhlogh, A., 2008. Trophic status of the Iranian Caspian Sea based on water quality parameters and phytoplankton diversity. Continental Shelf Research, 28: 1153-1165.
- Peeters, F.; Kipfer, R., 2000. Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers. Journal of Deep-Sea Research, I 47: 621-654.
- Roohi, A.; Yasin, Z.; Kideys, A.E.; Hawaii, A.T.S.; Khanari, A.G.; Eker-Develi, E., 2008. Impact of a new invasive ctenophore (*Mnemiopsis Laiyi*) on the zooplankton community of the Southern Caspian Sea. Marine Ecology, 29: 421-434.
- Safarov, J.T.; Mirzaliyev, A.A.; Shahverdiyev, A.N.; Hassel, E.P., 2008. (p, ρ , T) properties of the Caspian Sea. Conference of ICPWS XV, Berlin, Germany.
- Tuzhilkin, V.S.; Kosarev, A.N., 2005. Thermohaline structure and general circulation of the Caspian Sea waters. In: Caspian Sea Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry, 5: 33-57.
- UNESCO, 1981a. Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978. UNESCO technical papers in marine science, Nr. 37

مشابه لایه‌بندی حرارتی^۱ باشد که این هم با مقایسه نیمرخ‌های عمودی درجه حرارت و چگالی به خوبی مشهود است. لایه پیکنوکلاین در محل تشکیل لایه ترموکلاین، هم در داده‌های تحقیق حاضر و هم در داده‌های دیگر پژوهش‌ها دیده می‌شود. مقایسه محاسبات انجام شده و نمودارهای ترسیم شده برای پایداری در توافق با محاسبات انجام شده توسط Peeters و همکاران (۲۰۰۰) برای دیگر مناطق دریای خزر، و دیگر مطالعات انجام شده در دیگر دریاچه‌های آب شور مجاور دریای خزر نشان می‌دهد که مقادیر پایداری در اغلب موارد مثبت است. سهم گرادیان عمودی درجه حرارت در پایداری به صورت بسیار مشهود بیشتر از سهم گرادیان شوری در ستون آب بوده است.

۵. سپاسگزاری

تحقیق حاضر با استفاده از امکانات و تجهیزات پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی انجام شده است، که بدین وسیله از پشتیبانی انجام شده تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- Dumont, H.J., 1998. The Caspian Lake: History, biota, structure, and function. Limnology and Oceanography, 43(1): 44-52.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1996. Research/Training on the Caspian Sea. Data Report 1995, Vienna, 95P.
- Jamshidi, S., 2009, Distribution of temperature, salinity and density on the southern continental shelf of the Caspian Sea, off Babolsar; during the Fall Season. 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC, 2009), World Scientific Press, Singapore, 3: 13-16.
- Jamshidi, S.; Bakar, N., 2010. Temperature, salinity and density measurements in the coastal waters of Rudsar, South Caspian Sea, Journal of the Persian Gulf (Marine Science) JPG, 1(1): 27-35.

¹ Thermal Stratification

- Zonn, I.S., 2005(a). Environmental issues of the Caspian. In: Caspian Sea Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry, 5: 223-242.
- Zonn, I.S., 2005(b). Economic and international legal dimensions. In: Caspian sea environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry, 5: 243-256.
- UNESCO, 1981b. Background papers and supporting data on the International Equation of state of Sea Water 1980. UNESCO technical papers in marine science, Nr. 38.
- Zaker, N.H.; Ghaffari, P.; Jamshidi, S., 2007. Physical study of the southern coastal waters of the Caspian Sea, off Babolsar, Mazandaran in Iran. Journal of Coastal Research (JCR), SI 50: 564-569.