

Research Paper

The Effect of Wind Stress on Thermocline Development in Persian Gulf in Summer¹

Seyed Majid Mosaddad²

Received: 2021.04.18

Revised: 2021.08.20

Accepted: 2021.10.20

Abstract

The structural of MgB_2 such as lattice constant, volume modulus, volume modulus derivative and compressibility of different degrees have been calculated. The calculations have been performed using a Full Potential-Linearized Augmented Plane Wave (FP-LAPW) method in the framework of Density Functional Theory (DFT) with various Approximation. The results show that the linear compressibility in direction of c is about twice the compressibility in direction of a . In addition, the electronic properties of the compound, including the structure of the energy bands, the density of the states, and the types of bonds in the MgB_2 Superconductivity have been studied. The results of a double degeneracy above the Fermi level show that it plays an important role in the superconducting property. According to energy bands, it has been determined that the lattice parameters have a large effect on the σ band of boron atoms. The results predict that the constant increase of the lattice along the c -axis has an increase in the density of states at the Fermi level. The results express this fact that the calculation using by GGA has the better agreements with the other theoretical and experimental approximations.

Keywords: MgB_2 , FP-LAPW, Density Functional Theory, GGA, Bulk Module, Density of State, Band Gap.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.35791.1204

² Assistant Professor, Department of Physics, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.
Email: mosaddad5@gmail.com



تأثیر شدت باد بر توسعه ترموکلاين در خليج فارس در

تابستان^۱

سید مجید مسدد^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۶، پاییز ۱۴۰۰

صص ۴۹-۶۷

چکیده

خلیج فارس یک دریای نیمه بسته کم عمق است که از طریق تنگه هرمز به اقیانوس آزاد متصل می شود. ترموکلاين به صورت کاهش شدید دما با عمق در لایه زیر سطحی در نتیجه طبقه بندی ستون آب در خلیج فارس به صورت فصلی روی می دهد. واداشت هایی از جمله باد شمال غربی بر این فرایند تأثیر دارند. در این مقاله، با توجه به نتایج اندازه گیری های گشت تحقیقاتی مونت میشل (۱۹۹۲) و یک مطالعه عددی (مدل اقیانوسی پرنستون *POM*) با تنش باد در دو حالت ثابت و میانگین ماهیانه به بررسی تشکیل و توسعه ترموکلاين تابستانه در خلیج فارس پرداخته می شود. نتایج مدل نشان می دهند که با باد متغیر ماهیانه، ترموکلاين مانند آنچه اندازه گیری های تابستان نشان می دهند، توسعه می یابد. به نظر می رسد تشکیل ترموکلاين، اکسیژن محلول در ستون آب در اثر کمبود اختلاط را، که در نتیجه چینه بندی آب ایجاد شده است، کاهش می دهد. همچنین، تشکیل و توسعه ترموکلاين به صورت یک شیب سریع دما در ستون آب، بر انتشار صوت به کار رفته در ابزار آشکارسازی در دریا تأثیر دارد. براساس نتایج برخی از منابع این تحقیق، رشد ترموکلاين در خلیج فارس از بهار به تابستان با سرعت بیشتری رخ می دهد. ضرایب همبستگی دما و شوری بین نتایج مدل و اندازه گیری ها، به ترتیب، ۰/۸۶ و ۰/۸۰ به دست آمده اند. در این مقاله نتایج تحقیق به دست آمده از مدل *POM* با اندازه گیری ها مقایسه می شود. آهنگ توسعه ترموکلاين در خلیج فارس طی مدت زمان ۶ ماه از زمستان تا اوایل تابستان بین ۰/۱ و ۰/۲ متر در هر روز به دست آمد.

واژگان کلیدی: خلیج فارس، ترموکلاين، مدل عددی، *POM*، تنش باد.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.35791.1204

^۲ گروه فیزیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران. Email: mosaddad5@gmail.com

۱. مقدمه

ترموکلاین محل لایه‌بندی شدید ستون آب است که می‌تواند مکان مناسبی برای ایجاد امواج داخلی و انتشار آن‌ها باشد. در واقع ترموکلاین یا دماشیب، لایه‌ای با شیب سریع دما بین لایه گرم سطحی و لایه سرد عمقی است. در فصل زمستان، تغییر دمای آب‌های قسمت مرکزی خلیج فارس قابل ملاحظه نیست (تقریباً ۱ درجه). تغییر دمای این قسمت از خلیج فارس تا تنگه هرمز از ۲ درجه تجاوز نمی‌کند. محدوده تغییرات چگالی در لایه عمقی می‌تواند تا یک کیلوگرم در مترمکعب باشد. در بهار، آب گرم اقیانوس هند از طریق تنگه هرمز به خلیج راه می‌یابد و همراه با لایه‌بندی ستون آب، تغییرات دما از سطح آزاد تا بستر به ۶ تا ۷ درجه می‌رسد. محدوده تغییرات شوری در سطح آزاد در این فصل، ۳۸ تا ۳۹ جزء در هزار است. در تابستان، لایه‌بندی ستون آب بیشتر می‌شود، به طوری که شیب عمودی (قائم) دما تا ۱۴ درجه و دمای سطح آزاد برابر با ۳۲ درجه می‌شود. اختلاط در خلیج فارس به‌طور عمده بین سه توده آب صورت می‌گیرد [۱]:

۱- جریان ورودی آب دریای عمان با شوری کم

۲- آب با شوری بالا در مناطق جنوبی خلیج فارس

۳- آب سرد و شور در لایه عمیق خلیج فارس

در فرایند اختلاط نسبتاً زیاد توده‌های آب فوق در فصل پاییز، چگالی آب یکنواخت‌تر می‌شود. اختلاط جزر و مدی اغلب در منطقه‌های ساحلی و در راستای خطوط ساحلی خلیج فارس روی می‌دهد و از شدت زیادی برخوردار است. خصوصیات فیزیکی و سازوکار امواج و جریانات در لایه بالایی ستون آب در خلیج فارس و در دو فصل تابستان و زمستان به دلیل تغییرات در پایداری متفاوت است. در فصل تابستان، چینه‌بندی ستون آب شکل می‌گیرد و ترموکلاین تشکیل می‌شود و لایه عمقی دارای شیب پایدار چگالی است. شوری بالاتر آب‌های خلیج فارس نسبت به دریای عمان باعث تبادل آب با دریای آزاد می‌شود [۲]. مسدود و همکاران با مطالعه تغییرات دما در ستون آب در خلیج فارس به این نتیجه رسیدند که ترموکلاین در این منطقه فقط در فصل تابستان تشکیل می‌شود. البته از زمستان به تابستان، به دلیل وجود واداشت‌ها در منطقه، یک روند پیشروی در تشکیل ترموکلاین وجود دارد [۳]. براساس اندازه‌گیری‌های مستمر از زمستان تا تابستان توسعه ترموکلاین در خلیج فارس صورت می‌گیرد و ترموکلاین فصلی تشکیل می‌شود. ترموکلاین از بهار تا تابستان با سرعت بیشتری توسعه می‌یابد [۴ و ۱]. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده جدید و مطالعه میدانی تأثیر جزر و مد بر ترموکلاین فصلی در خلیج فارس به‌عنوان یک واداشت



بررسی و توسعه ترموکلاين در بهار نیز نتیجه شده است [۵]. بنابراین، با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. با اجرای مدل COHERENS، گردش آب در خليج فارس مورد مطالعه عددی قرار گرفت. این مدل، یک مدل سه‌بعدی است که عوامل فیزیکی عمده واداشت در محیط مورد مطالعه آن، تبخیر، بارش، ورودی رودخانه‌ها و جزر و مد هستند. جریان ورودی رودخانه که در گردش آب و اختلاط مؤثر است، در این مدل به صورت سینوسی در نظر گرفته شد. معادلات حاکم در این مدل، معادلات ناویر استوکس یا اندازه حرکت در دستگاه مختصات سیگما در نظر گرفته شد. محدوده عمق خليج فارس که در مدل مورد بررسی قرار گرفت، به ترتیب، ۵ و ۱۴۰ متر بود. ابعاد شبکه مدل در جهت‌های X و Y، به ترتیب، ۷/۴ و ۶/۶ کیلومتر است. گسسته‌سازی معادلات اندازه حرکت در شبکه آراکاواي C (Arakawa C) انجام، و مدل در گام‌های زمانی ۱۰ و ۸۰ ثانیه اجرا شد. اجرای مدل از فصل زمستان شروع شد که دما و شوری ثابت حدود ۲۰ درجه سانتیگراد و ۳۸ جزء در هزار برای ستون آب بود. این مقادیر از مقادیر مربوط به دما و شوری میانگین در خليج فارس در فصل زمستان دور نیست. برای تعیین موقعیت خط ساحلی و مقادیر توپوگرافی در این مدل، از داده‌های ETOPO-2 استفاده شد و با درون‌یابی و هموارسازی، دقت شبکه به ۴ دقیقه رسید. تنش در سطح آزاد آب و تنش بستر به‌عنوان دو عامل مؤثر در شکل‌گیری گردش آب در خليج فارس در مدل اعمال شد [۶]. در خليج فارس و در زمستان، یکنواختی بالایی در دمای ستون آب از سطح تا بستر وجود دارد و میزان اکسیژن محلول در آب در این زمان زیاد است. زیرا در فصل زمستان همراه با وزش باد با سرعت بیشتر، اکسیژن بیشتری از بالا وارد ستون آب می‌شود و همرفت عمودی (قائم) نسبت به تابستان بیشتر خواهد بود. تشکیل ترموکلاين تابستانه در نمودارهای دما در این فصل به‌وضوح مشاهده می‌شود و میزان اکسیژن محلول در ستون آب نسبت به فصل زمستان کمتر است، چون با تشکیل ترموکلاين در تابستان، به‌علت پایداری ایجاد شده در ستون آب، اکسیژن موجود در ستون آب کمتر می‌شود. علت این است که لایه ترموکلاين که با شیب کاهشی شدید دما همراه است، مانع انتقال اکسیژن و گرما بین لایه‌های سطحی و عمقی می‌شود. اکسیژن محلول در ستون آب بر تجمع و فعالیت بیولوژیکی آبزبان تأثیرگذار است و بنابراین در فصل تابستان دسته‌های ماهیان و توده‌های آبزبان دیگر، در لایه‌های سطحی و بستر جمع می‌شوند [۷]. از آنجا که در ترموکلاين ستون آب با کاهش شدید دما در زیر لایه سطحی همراه است و سرعت انتشار صوت بیشتر از شوری و فشار به دما بستگی دارد، سرعت صوت در ستون آب کاهش می‌یابد [۸ و ۹]. در ستون آب در خليج

فارس که ترموکلاین فصلی وجود دارد، از امواج صوتی حاصل از ابزارهایی مانند سونار، CTD و پژواکه جهت آشکارسازی اهداف و موانع از جمله مین کارگذاری شده، زیردریایی، صخره‌های زیر دریا و توده‌های ماهیان و نیز تصویربرداری از بستر دریا استفاده می‌شود. منطقه مورد مطالعه، یعنی خلیج فارس و ایستگاه‌های اندازه‌گیری، طی گشت تحقیقاتی ROPME به صورت شکل ۱ هستند.



شکل ۱ منطقه خلیج فارس و ایستگاه‌های اندازه‌گیری ROPME [۹].

مقدار پارامتر کوریولیس ($f = 2 \Omega \sin \varphi$)، که φ ، عرض جغرافیایی و $\Omega = 7/29 \times 10^{-5}$ سرعت زاویه‌ای چرخش زمین به دور محور شمالی - جنوبی است، متناسب با عرض جغرافیایی میانی خلیج فارس (۲۷ درجه) و برابر با $(s^{-1}) 10^{-4} \times 0.7$ به مدل داده شده است. ضرایب دراگ در سطح آزاد دریا و روی بستر در این مدل، به ترتیب، به صورت روابط زیر در نظر گرفته شدند [۱۰].

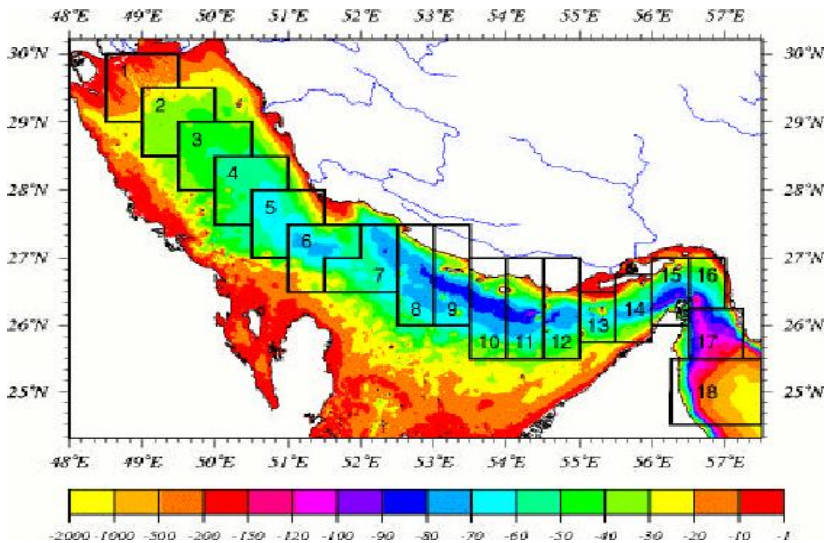
$$C_D^s = 10^{-3} (0.43 + 0.097 |U_{10}|) \quad (1)$$

$$C_D^b = \left\{ k / \ln \left(z_r / z_0 \right) \right\}^2 \quad (2)$$

متغیرهای اصلی در روابط تنش سطح آزاد و بستر، سرعت وزش باد در ارتفاع ۱۰ متر بالای سطح آزاد آب دریا، (U_{10}) و زبری بستر، (z_0) است. k در رابطه تنش بستر، ضریب ون کارمن و در مدل، برابر با ۰/۴ است. شرایط مرز باز در شرق منطقه مورد مطالعه که تنگه هرمز است، دو لایه‌ای



بودن دما و شوری است، که با مقادير اندازه‌گيري شده هيدروگرافي مطابقت دارد. يکی از بخش‌های مهم اين مدل، بخش تلاطمی است که محاسبه مقادير پارامترهای تلاطم، يعنی ضرايب بخش پيچکی را انجام می‌دهد. هدف اصلی از اجرای مدل COHERENS، مطالعه و شبیه‌سازی گردش آب و پيش‌بینی پارامترهای فیزیکی آب در خليج فارس بود. از اجرای مدل برای تبخیر میانگين، مقدار $(\frac{m}{yr})$ $1/8$ [۱ و ۳] و برای میانگين تغييرات چگالی آب خليج فارس در يك سال، $2/4$ واحد به دست آمد که با مقادير اندازه‌گيري شده چگالی همخوانی دارد. همچنين با استفاده از اين مدل برای سواحل کشور امارات، شوری زياد و بیش از ۴۵ جزء در هزار به دست آمد که به علت کم عمقی نسبی و تبخیر زياد روی می‌دهد. سرعت جريانات سطحی در خليج فارس با اجرای مدل، $(\frac{cm}{s})$ 10 تا $(\frac{cm}{s})$ 20 به دست آمد. شبیه‌سازی‌های انجام شده در مدل نشان داد که در دوره زمانی زمستان - بهار جريان ورودی دریای عمان به خليج فارس در حال شدت گرفتن است. همچنين در مدت پاییز و زمستان، سرعت جريان‌ها ساعتگرد و در نزدیکی سواحل ایران، $(\frac{cm}{s})$ 10 است. سوویفت و باور به مطالعه گردش آب و همچنين رفتار تلاطمی حرکت آب در خليج فارس به‌خصوص در حوالی تنگه هرمز پرداختند [۱۱]. در اين تحقيق، گردش توده‌های آب در خليج فارس با اندازه‌گيري‌هایی طی دهه ۱۹۹۰ و به‌ویژه سال ۱۹۹۲، توسط گشت تحقیقاتی مونت میشل (ROPME ۱۹۹۲) بررسی شد. آن‌ها نشان دادند که در انتهای شمالی خليج فارس، در زمستان، چگال‌ترین آب و در سواحل غربی و جنوبی، آب گرم‌تر به وجود می‌آید. اين تحقيق، همچنين نشان می‌دهد که انتقال توده‌های آب دریای عمان با چگالی متفاوت نسبت به خليج فارس، بر شکل ترموکلاين در اين حوضه تأثیر می‌گذارد و پایداری آب را کاهش می‌دهد. در مطالعه حاضر، مقادير میانگين تبخیر، بارش و ورودی آب رودخانه، به‌ترتیب، $1/4$ m، $0/1 - 0/07$ و $15/46 - 0/0$ در سال تخمین زده شده، که نشان می‌دهد جو منطقه خليج فارس خشک و نتیجه‌اش، تبخیر زياد است. شناورهای اندازه‌گيري سرعت جريانات به سمت شمال را $(\frac{cm}{s})$ $5 - 4$ اندازه‌گيري کرده‌اند. ورودی خالص آب از طريق تنگه هرمز به اين حوضه، دارای مقادير بیشینه SV $0/17$ در ماه مارس و کمینه SV $0/03$ در ماه‌های اوت - سپتامبر است. برای مطالعه پارامترهای فیزیکی آب در اين حوضه، هجده جعبه شامل ایستگاه‌های عمده اندازه‌گيري CTD در نظر گرفته شده بود (شکل ۲).



شکل ۲ توپوگرافی حوضه خلیج فارس و تنگه هرمز [۱۱].

در غیاب گرما و تابش خورشید، تنش باد عمق لایه اختلاط را افزایش می دهد و می تواند بر روند موضعی ترموکلاین تأثیر داشته باشد [۱۲]. تنش باد یکی از عوامل مهم مربوط به واداشتهای سطحی دریاست. وزش باد بر سطح آزاد دریا نقش مهمی در شکل گیری و انتشار امواج سطحی دارد. شکست این امواج می تواند باعث اختلاط و تضعیف پایداری ستون آب شود. درحقیقت، همبستگی عمده ای بین میانگین ماهیانه سرعت وزش باد بر سطح آزاد آب و تغییر ترموکلاین، از نظر مکانی - زمانی وجود دارد. اکثر امواج بادی در لایه سطحی آب با تنش سطحی باها با سرعت های بیشتر از $10 \left(\frac{m}{s}\right)$ تشکیل می شوند. البته بادهای شمالی در خلیج فارس در فصل زمستان سرد هستند و باعث همرفت در ستون آب و تضعیف ترموکلاین فصلی در خلیج فارس می شوند [۲]. شدت وزش باد بر تشکیل لایه بندی ستون آب و ترموکلاین تأثیر دارد [۱۳]. جدول ۱ شامل مقادیر میانگین ماهیانه مؤلفه های سرعت باد در خلیج فارس است.

جدول ۱ مؤلفه‌های افقی و عمودی (قائم) سرعت وزش باد بر سطح آزاد خليج فارس [۱۴]

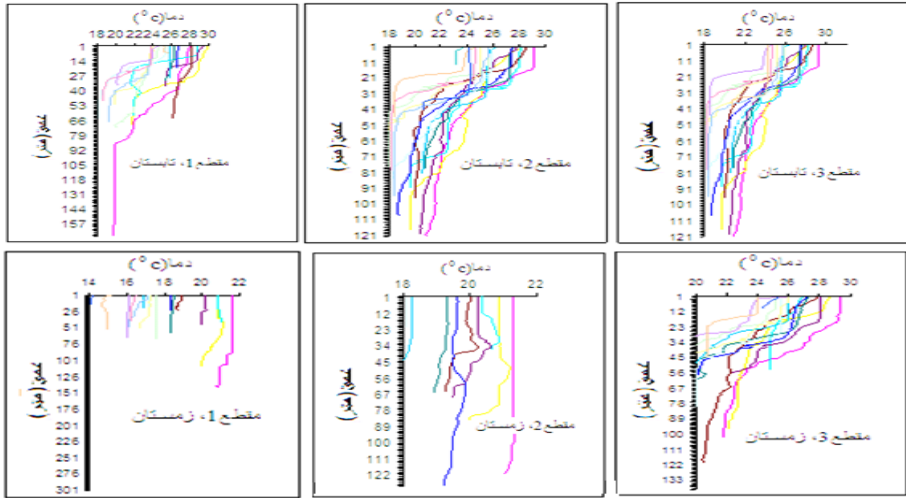
ماه	Jan	Feb	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar	Mar
U(m/s)	۱/۸۲	۱/۷۵	۱/۸۶	۱/۸۹	۱/۹۴	۲/۰۳	۱/۴	۱/۳۷	۱/۲۳	۱/۵۱	۱/۸۸	۲/۵
V(m/s)	-۲/۹۸	-۳/۱۳	-۳/۸۶	-۴/۸۲	-۵/۴۷	-۴/۸۷	-۴/۵	-۴/۲۱	-۳/۵۵	-۳/۱۲	-۲/۹	-۲/۹۴

تنش باد از طريق ايجاد اختلاط سطحی و جريان‌های ساحلی (در مناطق کم‌عمق) بر تشکیل ترموکلاين تأثیر دارد [۱۵]. یک عامل مهم اثرگذار بر اندرکنش‌های بين لایه اختلاط و ترموکلاين، تغییرات سالانه بادهای موسمی است. تنش باد وارد بر خليج فارس به همراه تغییر دمای سطحی در اثر وزش بادهای سرد و در نتیجه، ايجاد ناپایداری در قسمت‌های فوقانی (لایه آمیخته) به همراه همرفت، عمق ترموکلاين را تغییر خواهد داد. درحقیقت، نیروی تنش باد در حوضه‌های آبی از جمله خليج فارس، از طريق مراحل زیر، بر سطح آزاد تأثیر گذار است:

- ۱- یک اغتشاش اتمسفری که سبب ايجاد امواج می‌شود.
- ۲- ايجاد تلاطم بر اثر شکست امواج سطحی
- ۳- یک عدم توازن جاذبه‌ای در جهت افقی که ممکن است اغتشاش ايجاد کند.
- ۴- امواج داخلی در محل عدم توازن تشکیل و در قسمت ترموکلاين منتشر می‌شوند [۱۶].

وزش بادهای سرد بر سطح آب‌های گرم اغلب در حوضه‌های کم‌عمق باعث ناپایداری شدید می‌شود و ستون آب را در اثر همرفت گرمایی به هم می‌زند. این وضعیت در زمستان کاملاً محسوس است [۱۳].

برای مطالعه تغییرات عمقی دما در خليج فارس و تفاوت این تغییرات در دو فصل تابستان و زمستان، براساس نتایج اندازه‌گیری‌های سال ۱۹۹۲ (با استفاده از اکسل)، نمودارهای تغییرات عمقی دما در ایستگاه‌های مختلف خليج فارس در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳ نمودارهای تغییرات عمقی دما در ایستگاه‌های اندازه‌گیری (سال ۱۹۹۲) واقع بر مقاطع ۱، ۲ و ۳ در زمستان و تابستان.

همان‌طور که در نمودارهای فوق (مربوط به خلیج فارس) دیده می‌شود، افت عمودی (قائم) دما در لایه زیر سطحی در همه ایستگاه‌ها و در فصل تابستان وجود دارد. زیرا در اثر اعمال نیروی تنش باد کمتر و تابش خورشیدی بیشتر در این فصل نسبت به زمستان، در خلیج فارس ترموکلاین فصلی تشکیل می‌شود. با دقت در نمودارهای تغییرات عمقی دما در مقاطع ۱، ۲ و ۳ در خلیج فارس، درمی‌یابیم که تغییرات عمقی دما و شیب عمودی (قائم) دما در ستون سیال در فصل تابستان چشمگیر است. کسری از تابش خورشیدی که وارد ستون آب می‌شود، ضریب آلبدو نامیده می‌شود که در مدل به کار رفته در این تحقیق در نظر گرفته شده است. این نمودارها همچنین نشان می‌دهند که در فصل تابستان، علاوه بر تشکیل ترموکلاین در بیشتر ایستگاه‌ها، تغییرات عمق ترموکلاین فصلی نیز دیده می‌شود. در نتیجه تابش خورشیدی بیشتر در فصل تابستان و سرعت کمتر بادهای در این فصل، تشکیل ترموکلاین در خلیج فارس از فصل زمستان به تابستان گسترش می‌یابد. در فصل زمستان، در این حوضه ترموکلاین فقط در تنگه هرمز به دلیل تبادل آب با دریای عمان تشکیل می‌شود.

از فصل زمستان تا اوایل تابستان، در مدت شش ماه از سال، ترموکلاین در تنگه هرمز به سایر نواحی گسترش می‌یابد. برقراری وسیع گردش آب در خلیج فارس، به‌خصوص در فصل‌های بهار و تابستان، با لایه‌بندی گرمایی و تشدید گردش باروکلینیکی آب در تنگه هرمز همزمان است. آب



چگال‌تر در خليج فارس در قسمت‌های کم‌عمق امارات متّحدهٔ عربي و بحرين در زمستان شکل می‌گیرد. اين پديده در توده‌های آب خيلي شور مناطق کم‌عمق با سرد شدن جو همراه است [۱۷]. نتیجهٔ اين مدل، با استفاده از نرم‌افزار HYCOM، داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ ROPME، و مقایسه با مطالعات داده‌ای اخير، وجود ترموکلاين تابستانه در خليج فارس با توسعهٔ تدريجي در زمستان و بهار و تأثیرپذيري از باد شمال‌غربي است [۴].

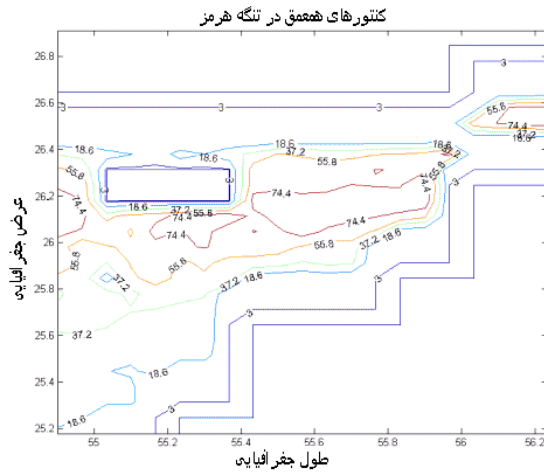
۲. روش تحقيق

در اين تحقيق، با استفاده از معادلات آب کم‌عمق و حلّ معادلات حاکم بر حوضهٔ مورد مطالعه از روش حلّ عددي با به‌کارگيري مدل POM (Princeton Ocean Model)، مقادير دما و شوري در نقاط يک شبکه و در فصل تابستان، با شروع از مقادير دما، شوري و شرايط مرزي در زمستان به دست می‌آيد. روش‌های متفاوت حلّ عددي معادلات دارای خطا و تقريب هستند. در اين پژوهش، با حلّ عددي معادلات ناویر- استوکس در شبکهٔ آراکاوای سي، در دستگاه مختصات سيگما، به مدل‌سازي و تحليل توسعهٔ تدريجي ترموکلاين از زمستان به اوایل تابستان در خليج فارس می‌پردازيم. ابعاد شبکهٔ مدل‌شده به خليج فارس در اين تحقيق، $11 \times 126 \times 101$ فاصله شبکه ای در جهات x ، y و z (تعداد لایه‌ها در راستای سطح آزاد تا بستر در ستون آب) است. POM، يک کد به زبان برنامه‌نويسی فرترن است که توسط ملور و بلامرگ نوشته شده است [۱۸] و برای شبیه‌سازي دما، شوري، جريانات، امواج و ديگر پارامترها و پديده‌های فيزيکی در ستون سيال در محيط آبی دريا به کار می‌رود. مبنای شکل‌گيري اين کد، معادلات سه بعدی ناویر استوکس است و مؤلفهٔ سوم سرعت بر حسب u و v به دست می‌آيد. در اجرای مدل POM در منطقهٔ خليج فارس، جريان اوليه با سرعت ثابت که در کانالی مستقيم و محصور وجود داشت، صفر در نظر گرفته شد و مرزهای خليج فارس به مدل معرفی شدند. پرندهای دما و شوري با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از اجرای مدل POM برای شش ماه، از زمستان تا تابستان، و با کمک نرم‌افزار سرفر رسم شده‌اند. در ابتدا، برای اطمینان از خنثی شدن تنش‌ها برای کانال آبی که در مدل POM اوليه وجود داشت، برنامه برای چند روز و بدون تنش‌ها (باد، تابش، رودخانه و تبخیر) اجرا شد. برای پرهيز از خطای محاسباتی در حلّ عددي معادلات ناویر استوکس در کد مربوطه در خليج فارس، عمق بر روی همهٔ خطوط ساحلی خليج فارس برابر با ۳ متر در نظر گرفته شد. همچنين، عمق موضعی آب در محل دلتای رودخانهٔ اروند تا چند كيلومتر به‌صورت خطوط

عمقی ۳ متری تغییر یافت. تصویر هوایی ورودی رودخانه اروند به خلیج فارس به صورت شکل ۴ است. پریند هم عمق در اطراف تنگه هرمز، به عنوان مرز باز مدل به صورت شکل ۵ به دست آمد.



شکل ۴ ورودی رودخانه اروند به خلیج فارس [۱۴]



شکل ۵ پریند هم عمق تنگه هرمز [۷]



با استفاده از نرم افزار Google Earth مختصات دهانه ورودی اروند به صورت عرض جغرافیایی (۲۹/۹۰) و طول جغرافیایی (۴۸/۶۵) به دست آمد. نقاط مندرج در جدول ۲ برای شبیه سازی جریان ورودی رودخانه اروند انتخاب شدند، با این توضیح که: عرض دهانه رودخانه اروند در محل ورودی به خلیج برابر با ۲۱ کیلومتر، یعنی حدود ۳۰ برابر واقعیت (که ۷۰۰ متر است)، در نظر گرفته شد تا سه نقطه شبکه‌ای با فاصله شبکه‌ای حدود ۶/۵ کیلومتر را جهت محاسبات عددی شامل گردد. برای این که دبی جریان ورودی از تنگه هرمز به خلیج فارس براساس مقادیر اندازه گیری شده باشد، سرعت جریان ورودی به خلیج یک سی ام برابر مقادیر واقعی در فصل زمستان و همچنین اوایل فصل تابستان به مدل معرفی شد.

جدول ۲ مختصات جغرافیایی سه نقطه شبکه‌ای در دهانه رودخانه اروند [۷]

عمق نقطه (متر)	شماره ستون	شماره سطر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱۱	۱۵	۱۳	۲۹/۷۱	۴۸/۷
۱۱	۱۴	۱۳	۲۹/۷۱	۴۸/۶۳
۷	۱۳	۱۳	۲۹/۷۱	۴۸/۵۷

مشخصات رودخانه اروند و ویژگی های ورودی اروند به خلیج فارس به صورت جدول ۳ و جدول ۴ است.

جدول ۳ مشخصات رودخانه اروند، کارون، دجله و فرات [۷]

۱۵	عمق ورودی (متر)
۵	شیب ورودی (سانتیمتر بر کیلومتر)
۷۰۰	عرض ورودی اروند به خلیج فارس (متر)
۱/۵	ضخامت لایه ورودی اروند به خلیج فارس (متر)
۱۰۶	ایستگاه اندازه گیری خلیج فارس در مجاورت ورودی رودخانه

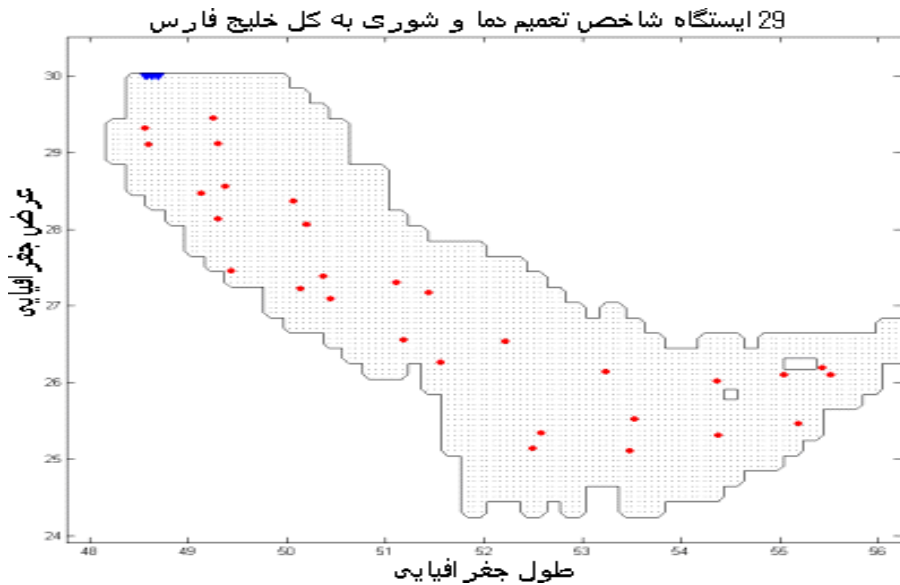
جدول ۴ ویژگی های ورودی اروند به خلیج فارس [۷]

زمستان			تابستان			فصل
کارون	فرات	دجله	کارون	فرات	دجله	رودخانه
۶	۸/۵	۸/۵	۱۵	۳۴/۰۳	۳۱/۴	دما (C)
-	۰/۹۸	۰/۳۸	-	۰/۵۲۵	۰/۱۹	شوری (g/kg)
۵۴۰	۶۰۰	۱۰۳۵	۹۴	۱۶۰	۵۴۰	دبی (m ³ /s)
۱۶			۳۲			دمای متوسط اروند (C)
۷			۶			شوری متوسط اروند (psu)
۶۲۴/۲			۳۰۸			دبی متوسط (m ³ /s)

ورود جریان رودخانه اروند به خلیج فارس و اهمیت باروکلینیسیته در ستون آب در قسمت شمالی خلیج فارس بر تشکیل ترموکلاین تأثیرگذار است. زیرا دو توده مختلف آب با چگالی ها و توابع دمایی متفاوت به هم برخورد می کنند [۵]. درحقیقت، براساس اندازه گیری های موجود، جریان ورودی اروند به خلیج فارس در لایه ای با ضخامت ۱/۵ متر صورت می گیرد. جریان از اروند به خلیج فارس در لایه زیرسطحی با ضخامت ۰/۱ عمق ورودی در مدل معرفی شده است. دبی جریان دریای عمان به خلیج فارس در دو فصل زمستان و تابستان، به ترتیب، SV ۰/۱۷ و SV ۰/۰۳ است [۱۱]، که برای تعریف سرعت جریان از دریای عمان به خلیج فارس در این مدل نیز به کار رفته است. پس به علت تبادل دائمی آب بین دریای عمان و خلیج فارس، شیب عمودی (قائم) دما، چگالی و شوری در تنگه هرمز در دو فصل زمستان و تابستان ایجاد می شود. با استفاده از رابطه بین دبی و سرعت جریان، مقدار سرعت جریان ورودی به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز در دو فصل سرد و گرم سال، به ترتیب، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۰۴ متر بر ثانیه به مدل داده شد. جریان ورودی دریای عمان به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز در لایه ای با ضخامت ۶۰ متر از سطح



براساس دیده‌بانی (ROPME 1992) از سرعت $0/022$ متر در ثانیه در زمستان تا $0/004$ متر در ثانیه در تابستان، طی گام‌های زمانی 300 ثانیه تغییر (کاهش) می‌یابد. جریان آب در زیر این لایه 60 متری از طریق معادلات موجود در مدل تعیین گردیده و ستون دو لایه‌ای سیال در تنگه‌هرمز شکل می‌گیرد. در تحقیق حاضر، مقادیر میانگین تبخیر، بارش و ورودی آب رودخانه در POM براساس معادلات آب کم‌عمق که در مقدمه این مقاله آمد، مقدارگذاری شده است. برای تعیین شرایط اولیه در مدل، داده‌های دما و شوری در فصل زمستان در 29 ایستگاه به صورت نقاط مشخص شده در شکل ۶ را با روش کرسمن (Cressman) به تمام نقاط شبکه (با استفاده از داده‌های توپوگرافی خلیج فارس براساس مشاهدات مرکز ملی اقیانوس‌شناسی امریکا (Etopo2)) با ابعاد شبکه‌ای حدود $6/5$ کیلومتر در $6/5$ کیلومتر تعمیم می‌دهیم.

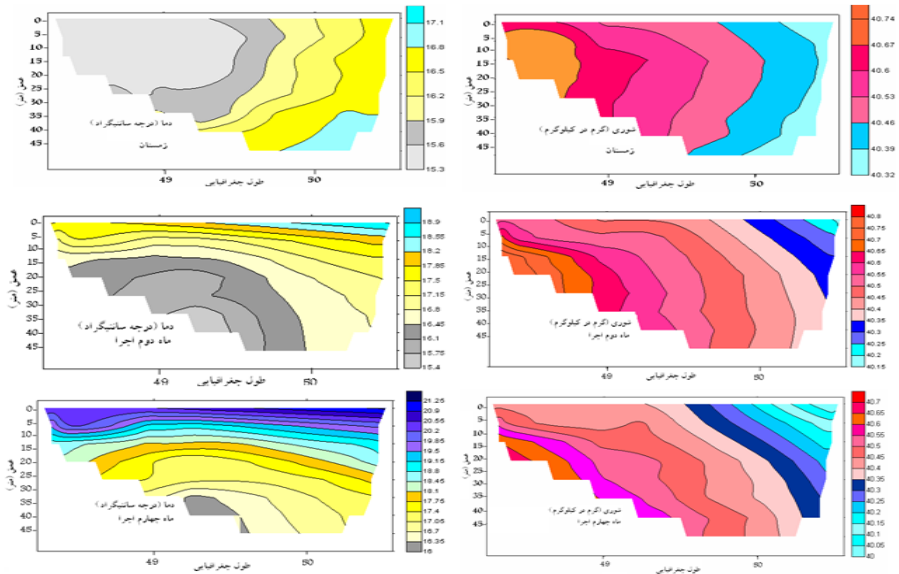


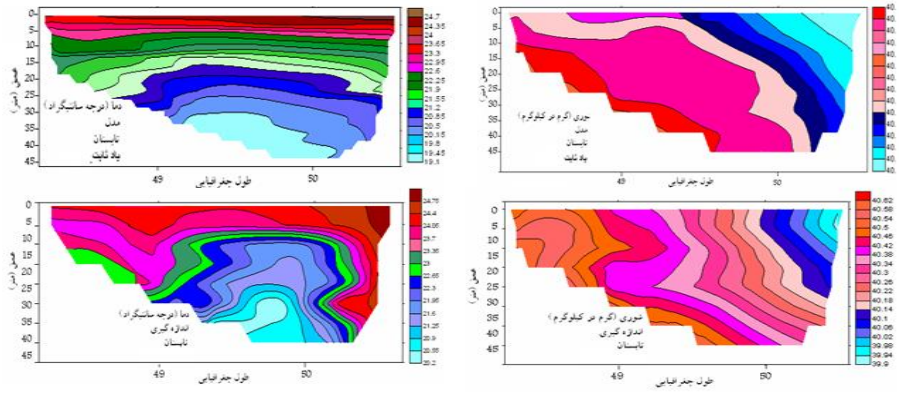
درحقیقت، محدوده خلیج فارس با در نظر گرفتن 29 ایستگاه شاخص به صورت اختیاری و تعمیم به کل خلیج فارس (از تنگه‌هرمز تا قسمت‌های شمالی خلیج فارس) از طریق درون‌یابی مشخصات فیزیکی اولیه اجرا (در فصل زمستان) در سیستم مختصات طول و عرض جغرافیایی به صورت شکل

فوق در این تحقیق در نظر گرفته شده است. در واقع، هدف کلی این مقاله، تشخیص میزان تأثیر تنش باد بر تشکیل ترموکلاین فصلی در خلیج فارس است. نتایج این تحقیق که از جنبه علمی حائز اهمیت است، در مطالعه زیست آبریان و شیلات و همچنین آشکارسازی افقی و عمودی اهداف و موانع در محیط آبی دریا با استفاده از ابزار صوت‌نگاری دریایی در صنایع دریایی و نیروی دریایی کاربرد دارند.

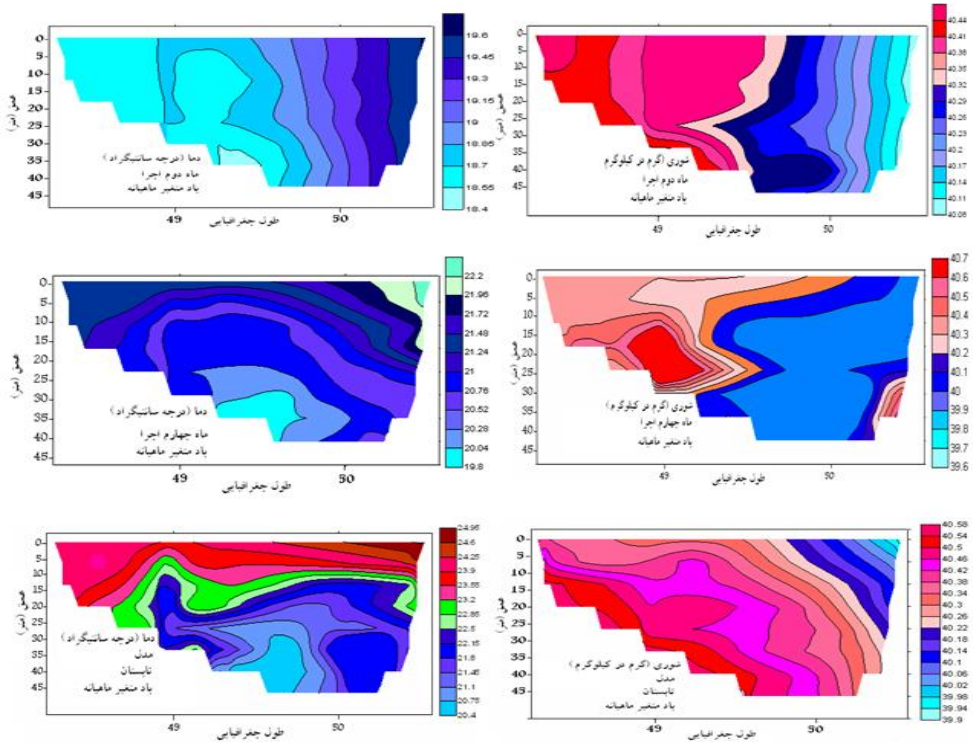
۳. نتایج اجرای مدل

نتایج حاصل از اجرای مدل در دو حالت با باد ثابت (با سرعت ۴ متر بر ثانیه در جهت محور X) در شکل ۷، و باد میانگین ماهیانه متغیر (مقادیر سرعت باد در هر ماه، میانگین سرعت باد در آن ماه در نظر گرفته شد که در ماه‌های مختلف، متغیر است) در شکل ۸، به صورت پربندهای دما و شوری از فصل زمستان تا اوایل فصل تابستان با استفاده از سرفر رسم شد و در عرض جغرافیایی ۲۹/۳ به صورت زیر نتیجه شدند:





شکل ۷ پربندهای ماهیانه دما و شوری در عرض جغرافیایی ۲۹/۳ درجه با باد ثابت (ثبت شده در انتهای هر ماه).



شکل ۸ پربندهای ماهیانه دما و شوری در عرض جغرافیایی ۲۹/۳ درجه با باد میانگین ماهیانه متغیر (ثبت شده در انتهای هر ماه)

همان‌طور که در پربندهای دما و شوری به‌صورت شکل فوق مشاهده می‌کنیم، شیب دما و شوری قابل توجهی در ستون آب از سطح تا بستر در فصل زمستان دیده نمی‌شود. این نتیجه، بیانگر عدم تشکیل ترموکلاین و ایجاد همرفت عمودی (قائم) در فصل زمستان در منطقه مورد مطالعه است. درحقیقت، براساس پربندهای بالا درمی‌یابیم که شیب دما و شوری در ستون آب در فصل تابستان که معرف تشکیل ترموکلاین تابستانه در خلیج فارس است، به‌صورت تدریجی، به‌خصوص در فصول بهار و تابستان، توسعه می‌یابد. می‌توان به این نتیجه رسید که از فصل زمستان (که دما و شوری شیب قابل ملاحظه‌ای ندارد) به فصل تابستان، با تغییر واداشت‌ها (کاهش تبخیر، افزایش تابش خورشیدی، کاهش تنش باد و ...)، شیب دما و شوری به‌تدریج ایجاد می‌شود. این شیب‌ها در پربندهای دما و شوری در تابستان به‌طور قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شوند. با دقت بیشتر می‌توان این نتیجه را نیز به دست آورد که شیب دما و شوری در حالت اعمال باد متغیر ماهیانه نسبت به حالت اجرای مدل با باد ثابت با واقعیت تطبیق بیشتری دارد. همچنین ضریب آلبدو برای منطقه خلیج فارس برابر با $0/5$ در نظر گرفته شد، یعنی فقط نیمی از تابش خورشیدی بر سطح آب به ستون آب نفوذ می‌کند. با اجرای مدل، در دو حالت وزش باد، تحوّل تدریجی ترموکلاین از فصل زمستان به تابستان و گسترش آن از تنگه هرمز به شمال خلیج فارس و تشکیل ترموکلاین فصلی در همه آب‌های خلیج فارس نتیجه می‌شود. در هر دو حالت، با وجود باد با سرعت ثابت 4 متر بر ثانیه در جهت محور X (با جهت و مقدار ثابت در شش ماه اجرای مدل) و باد میانگین ماهیانه در دو بعد، تحوّل تدریجی ترموکلاین از زمستان تا تابستان مشاهده می‌شود. البته در حالت باد متغیر میانگین ماهیانه، شیب دما با سرعت کمتری ایجاد می‌گردد، در حالی که عمق و میزان شیب دما و شوری تابستانه در لایه زیر سطحی به واقعیت (نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها در تابستان) نزدیک‌تر است. همان‌طور که در پربندهای بالا می‌بینیم، شیب قابل ملاحظه‌ای برای دما و شوری در فصل زمستان مشاهده نمی‌شود، زیرا اثر سردکنندگی باد و همرفت عمودی (قائم) در فصل زمستان بیشتر از تابستان است.

به‌علت تبخیر بیشتر و عمق کمتر در سواحل کشورهای عربی حوزه خلیج فارس، شوری بالاتر است [۱۱]. نکته جالب توجه دیگر در کنتورهای بالا این است که به‌علت گرمای کمتر و متأثر از ورود جریان ارونند به خلیج فارس، در سواحل ایران دمای آب نسبتاً کم است. حال آن‌که در کنتورهای دما و شوری (به‌خصوص دما) در فصل تابستان، در لایه زیرسطحی شیبی وجود دارد که دلیل بر تشکیل ترموکلاین تابستانه و درحقیقت، توسعه ترموکلاین از فصل زمستان تا فصل تابستان



است. در پربندهای دما و شوری و در هر دو فصل زمستان و تابستان، در قسمت شمال غرب خليج فارس، دما و شوری کمتری وجود دارد. این نکته، بیانگر ورود جریان سردتر رودخانه اروند به خليج فارس است که بر لایه‌بندی ستون آب و تشکیل ترموکلاين تابستانه در شمال خليج فارس مؤثر است. پس نتیجه می‌گیریم که ترموکلاين تابستانه در خليج فارس تشکیل می‌شود و تشکیل ترموکلاين دارای تحوّل فصلی از زمستان به تابستان است. همین‌طور در لایه زیرسطحی و در فصل تابستان در منطقه مورد مطالعه، امواج داخلی وجود دارند و منتشر می‌شوند. میانگین ضریب همبستگی (در دو اجرای مدل) بین دماها و شوری‌های حاصل از اندازه‌گیری و نتایج مدل برای اوایل تابستان، در عرض جغرافیایی ۲۹/۳ درجه، به ترتیب، ۰/۷۶۲ و ۰/۸۰۹ است. با استفاده از مقادیر دما و شوری در سال ۲۰۱۱ در خليج فارس، براساس نقشه اقیانوسی جهانی (WOA 13)، با تفکیک جغرافیایی ۰/۲۵ درجه به‌عنوان داده‌های اولیه و مدل‌سازی عددی با HYCOM، مقادیر دما و شوری طی پنج سال در منطقه مورد مطالعه مدل‌سازی شد و این نتیجه به‌دست آمد که تشکیل ترموکلاين در تمام سال در تنگه هرمز به‌دلیل تبادل دائمی آب با دریای عمان روی می‌دهد. توسعه ترموکلاين از فصل زمستان تا فصل تابستان، به‌خصوص در بهار، با کاهش سرعت باد صورت می‌گیرد و به‌طور فصلی در تابستان در همه آب‌های خليج فارس روی می‌دهد [۴].

۴. نتیجه‌گیری و بحث

با اجرای مدل در خليج فارس براساس داده‌های CTD سال ۱۹۹۲، داده‌های توپوگرافی (انتخاب‌شده با دقت ۲ دقیقه از داده‌های مرکز ملی اقیانوس‌شناسی آمریکا)، و همچنین اعمال مقادیر واداشت‌ها براساس داده‌های هواشناسی در دو حالت باد ثابت (با سرعت ۴ متر بر ثانیه در جهت محور X مثبت) و باد میانگین ماهیانه (در دو بعد)، تحوّل تدریجی ترموکلاين از فصل زمستان به اوایل فصل تابستان به‌خصوص در اجرا با باد میانگین ماهیانه محسوس است. البته با توجه به تغییرات ماهیانه دما و شوری به‌صورت نتایج حاصل از اجرای مدل، تحوّل ترموکلاين و تغییر دما و شوری در ستون آب از بهار تا تابستان محسوس‌تر است. ترموکلاين فصلی در خليج فارس از زمستان تا تابستان توسعه می‌یابد، به‌طوری‌که در فصل تابستان ترموکلاين تقریباً در همه مناطق تشکیل می‌شود [۴ و ۱] که با نتایج این تحقیق یکسان است. جزر و مد [۲۰] و ورود رودخانه اروند در قسمت شمالی [۲۱] بر این پدیده اثر می‌گذارد و به‌طور فصلی در تابستان، در همه آب‌های خليج فارس تشکیل می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد که در قسمت شمالی خليج فارس،

لایه‌بندی ستون آب به سبب ورود آب رودخانه اروند با چگالی متفاوت بر تشکیل ترموکلاين در فصل تابستان، و ورود جریان اروند بر شدت کاهش دما در لایه ترموکلاين مؤثر است. شیب ایجاد شده در کنتورهای دما و شوری حاصل از اجرای مدل در عرض جغرافیایی $29/3$ درجه نشان می‌دهد که ترموکلاين در فصل تابستان در همه آب‌های خلیج فارس تشکیل می‌شود. از فصل زمستان به فصل تابستان، با تغییر شرایط جوی، ترموکلاين از تنگه هرمز به سمت قسمت شمالی خلیج فارس توسعه می‌یابد. در حقیقت، تغییر واداشت‌های هواشناسی و تغییر تنش‌های سطحی موجود در این دوره زمانی علت این تحوّل است. بر اساس نتایج به دست آمده از اجرای مدل در دو حالت باد ثابت و باد میانگین ماهیانه متغیر، به این نتیجه می‌رسیم که در کنار واداشت‌ها و عوامل دیگر، ساختار گرمایی و تشکیل ترموکلاين متأثر از تنش باد است و تابش خورشیدی (به همراه باد کم) بر سطح خلیج فارس یک عامل مهم در تشکیل و توسعه ترموکلاين در این حوضه است. ضرایب همبستگی بین نتایج اجرای مدل و اندازه‌گیری‌ها در دو حالت اجرا با باد متغیر میانگین ماهیانه و باد ثابت، برای دما $0/88$ و $0/84$ و برای شوری $0/86$ و $0/76$ هستند. در نتیجه، اجرای مدل با باد متغیر میانگین ماهیانه با واقعیت تطبیق بیشتری دارد و از این رو مطلوب‌تر است. همان‌طور که بیان گردید، تشکیل ترموکلاين و توسعه آن به‌طور مستقیم متأثر از شرایط آب و هوایی است. تشکیل ترموکلاين در ستون آب دارای تأثیراتی از جمله افزایش اتلاف انتشار صوت به کاررفته توسط ابزار صوت‌نگاری دریا جهت عکسبرداری از بستر و آشکارسازی اهداف و موانع مثل مین کار گذاشته شده، غواص غرق شده، صخره‌های زیر آب و توده‌های ماهیان و دیگر آبریان در دریا و تغییرات اکسیژن محلول در آب و در نتیجه، تغییر پراکندگی آبریان است.

منابع

- [1] Ibrahimi M., Physical and Chemical Investigation of Iranian Region of the Oman Sea, Ecological Research Center of the Persian Gulf and the Oman Sea, PhD Thesis, Islamic Azad University of Tehran Science and Research Branch, Tehran, Iran, 116, 2013. (in Persian)
- [2] Bidokhti A.A., and Ezam M., The structure of the Persian Gulf outflow subjected to density variations, *Ocean Sci. Discuss*, **5**, 135-161, 2008.
- [3] Mosaddad S.M., Bidokhti A.A., and Basirparsa H., Development of Summer thermocline in the Persian Gulf, *Climate Change: Impacts and Responses*, Melbourn Univ. press, **1**, 8, 2009 .
- [4] Rahnemania A., Bidokhti, A. M. Ezam, K. Lari and S. Ghader A Numerical Study of the Frontal System between the Inflow and Outflow Waters in the Persian Gulf, *Applied Fluid Mechanics*, **12** (5), 1475-1486, 2019.



- [5] Pusparini N., Prasetyo B., Ita Widowati A., The Thermocline Layer and Chlorophyll-a Concentration Variability during Southeast Monsoon in the Banda Sea, *Earth and Environmental Science*, **11**, 55, 2017.
- [6] Huang R.X, Wang W., and Liu L., Decadal variability of wind-energy input to the world ocean, *Deep-Sea research Part II*, **53**, 31-41, 2006.
- [7] Mosaddad S.M., Study of Formation and Development of Seasonal Thermocline and Turbulent Processes in Northern part of the Persian Gulf Using A numerical Model, PhD Thesis, Islamic Azad University of Tehran Science and Research Branch, 2011. (in Persian)
- [8] Zareapoor Z., Allah-yaribeik S., and Ezam M., Effect of Thermocline Formation and change of Its Tickness on Underwater Acoustical Waves Propagation in the Persian Gulf, Proceeding of 17th National conference of Marine Industries, December 22-23, 2015. (in Persian)
- [9] Mohseni Arasteh A., Investigation of Vertical Profiles of Sound Speed and Sound Channel Formation in the Persian Gulf, Ph.D Thesis, Islamic Azad University of Tehran Shomal Branch, 2000. (in Persian)
- [10] Privett D.W., Monthly Charts of evaporation from the N. Indian Ocean (including the Red Sea and the Persian Gulf), *National institute of Oceanography*, **14**, 5, 1959.
- [11] Swift S.A., and Bower A.S., Formation and circulation of dense water in the Persian Gulf, *Geophys. Res*, Woods Hole Oceanographic institution, **108**, 22, 2003.
- [12] MC. Gillicuddy D., Formation of Intrathermocline Lenses by Eddy-Wind Interaction, *Physical Oceanography*, **45**, 7, 2014.
- [13] Fourniotis N.Th., Erosion of the Thermocline in the Gulf of Patras, due to a Severe Wind event. *Global NEST*, **20**, 11, 2018.
- [14] Water and Electricity Organization of Khuzestan Province, Report of Water Level and annual Deby in Different Months of the Arvand River, **70**, 1994. (in Persian)
- [15] Suhhova I., Pavelson J., and Lagemaa P., Variability of Currents over the Southern Slope of the Gulf of Finland, *Oceanologia*, **57** (2), 132-141, 2018.
- [16] Kampf J., and Sadrinassab M., The circulation of the Persian Gulf: a numerical study, *Ocean Science*, **2**, 27-41, 2006.
- [17] Ranaee R., Mosaddad S.M., and Akbari M., Seasonal Influences of Boundary Conditions in Coastal Water Quality Variations (Case Study: Northern Zone of Persian Gulf), *World Applied Sciences*, **19** (6), 894-903, 2012.
- [18] Mellor G.L., and Blumberg A.F., Modeling Vertical and Horizontal Diffusivities with the Sigma Coordinate system. *Mon. Wea. Rev*, **113**, 1380-1383, 1985.
- [19] Rahnemania A., Bidokhti A.A., Ezam M., Lari K., and Ghader S., A Numerical Study of the Frontal System between the Inflow and Outflow Waters in the Persian Gulf, *Applied Fluid Mechanics*, **12** (5), 1475-1486, 2019. (in Persian)
- [20] Ghazi A., Aliakbari Bidokhti A., Ezam M., Zoljoodi M., and Torabiazad M., Study of Tidal Current and Remaining Current in the Persian Gulf, *Hydrophysics Scientific-Research Biseasonal*, **15** (6), 11, 1400. (in Persian)
- [21] Mosaddad S.M., Aliakbari Bidokhti A., and Basirparsa H., Effect of Current of the Arvand River on Summer Thermocline Formation in North of the Persian Gulf, Proceeding of 1st National Conference of Water Resources of Coastal Lands Management, Sari Agricultural and Natural Resources University, December 8-12, **12**, 2010. (in Persian)