

مدل‌سازی عددی خواص فیزیکی، جریان‌ها و پیچک‌های دریای خزر جنوبی

جواد باباگلی متی کلایی^{۱*} و بهزاد لایقی^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ دانش‌آموخته دکتری، مرکز علوم جوی و اقیانوسی سازمان هواشناسی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴)

چکیده

پژوهش حاضر به مطالعه تغییرات فصلی فرایندهای فیزیکی خزر جنوبی با استفاده از مدل اقیانوسی ROMS می‌پردازد. این مدل عددی برای هفت سال اجرا شد و خروجی‌های آن در سال آخر (۲۰۱۸) برای این پژوهش به‌کاررفت. در این شبیه‌سازی از داده‌های سه‌ساعته ERA-Interim (ERA) برای واداشت‌های جوی استفاده شده است. با توجه به قرار گرفتن دو رودخانه مهم کورا و سپیدرود در منطقه مورد مطالعه، ورودی این دو رود به مدل اعمال شده است. نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی قبلی در دریای خزر اعتبارسنجی شده‌اند. بررسی‌ها نشان داد این مدل با مشاهدات میدانی و مدل‌های عددی اجراشده در گذشته همخوانی خوبی دارد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات فصلی دما نسبت به شوری در این حوزه چشمگیرتر است. متوسط دمایی که مدل برای این حوزه برآورد کرده است، حدود ۱۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است و مقدار میانگین برای شوری حدود ۱۳/۵ واحد شوری است. در بیشتر فصول، الگوهای جریان در این حوزه به‌صورت پادساعت‌گرد هستند. این الگوها که ناشی از وجود بادهای غالبی هستند که به‌صورت شمالی-جنوبی به سمت سواحل ایران می‌وزند، به شکل سواحل خزر جنوبی نیز وابسته‌اند. این جریانات سطحی که به دلیل باد شکل می‌گیرند، با توپوگرافی خزر جنوبی کنترل می‌شوند و در بیشتر فصول، پیچک‌هایی را تشکیل می‌دهند که برخی از آنها دوقطبی هستند. مهم‌ترین نتیجه این تحقیق می‌تواند نوسانات حدود ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری تراز سطحی خزر به دلیل وجود این پیچک‌ها باشد که بسته به چرخندی و واچرخندی بودن، می‌توانند تراز آب را افزایش یا کاهش دهند. بر اساس نتایج، هنگامی که پیچک‌ها چرخندی هستند، مرکز آب سرد تشکیل می‌دهند. این توده آب حدود نیم تا یک درجه سردتر از آب اطراف خود است. در پیچک‌های واچرخندی که مرکز گرم دارند، تراز آب‌های سطحی بیشتر از آب‌های اطراف است؛ از این‌رو این پیچک‌ها دو اثر مهم بر جای می‌گذارند که شامل تغییرات توزیع دمای سطحی و نوسانات سطح خزر است. البته نقش این پیچک‌ها را در پخش آلودگی‌های نفتی نمی‌توان نادیده گرفت.

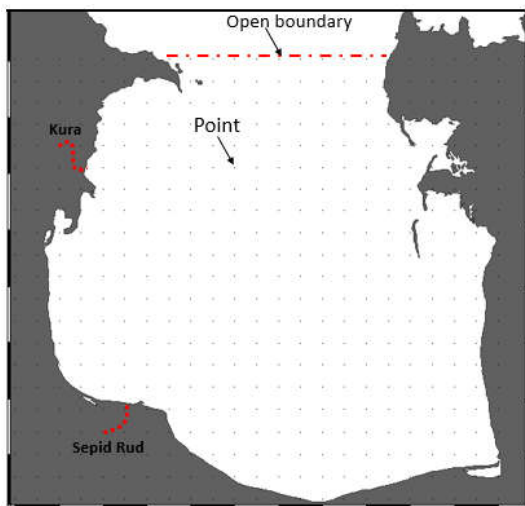
واژه‌های کلیدی: خزر جنوبی، مدل‌سازی عددی، جریانات و پیچک‌ها، مرکز گرم و سرد، تغییرات تراز آب

۱ مقدمه

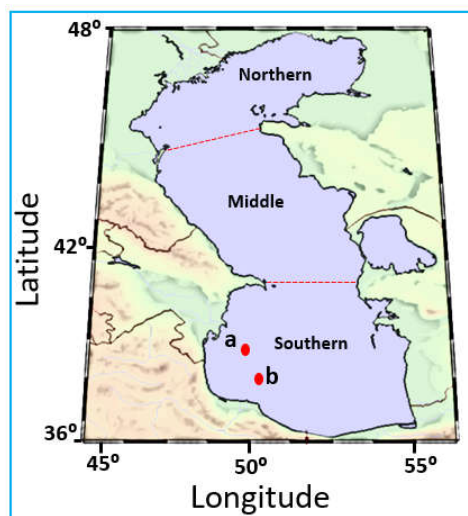
تراز این دریاچه به طور تقریبی ۲۷ متر پایین تر از سطح دریاهاى آزاد برآورد شده است. البته نوسانات تراز دریاچه در سال‌های اخیر بحث‌برانگیز است (چن و همکاران، ۲۰۱۷).

در حدود ۱۳۰ رودخانه وارد دریاچه خزر می‌شوند که سه رودخانه ولگا، اورا و کورا بیشترین سهم را در تأمین آب شیرین آن دارند (کوسارو و یابلونسکایا، ۱۹۹۴)؛ باین‌حال دریاچه خزر دریاچه‌ای با شوری کم فرض می‌شود (کاپلین، ۱۹۹۵). مطالعات در این حوزه نشان می‌دهد جریان‌ها در این دریاچه بیشتر تحت تأثیر باد، تغییرات چگالی و رواناب‌ها هستند. البته باید واداشت‌های جوی را مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری این گردش‌ها دانست (کاستیانوی و کوسارو، ۲۰۰۵). برخی پژوهش‌ها جهت باد در دریای خزر را بیشتر شمالی و شمال غربی بیان کرده‌اند (به سمت سواحل ایران)؛ بنابراین انتظار می‌رود جهت جریان‌های سطحی به سمت سواحل ایران باشد.

دریای خزر، بزرگ‌ترین دریاچه جهان است و اهمیت بسزایی در اقلیم کشورهای مجاورش دارد (مددوف و بالاپور، ۲۰۱۵). این حوزه آبی بزرگ‌ترین پهنه آبی محصور در خشکی است و این ویژگی، تنها یکی از ویژگی‌های بی‌مانند آن است. دریاچه خزر به سه ناحیه شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود و تنگه آپشوران این سه ناحیه را از هم جدا می‌کند (شکل ۱). متوسط عمق خزر شمالی، خزر میانی و خزر جنوبی به ترتیب برابر با ۱۰ متر، ۲۰۰ متر و ۷۸۸ متر (ابری، ۱۹۹۴) و مساحت این سه ناحیه یادشده به ترتیب ۸۰۰۰۰، ۱۳۸۰۰۰ و ۱۶۴۸۴۰ کیلومتر مربع تخمین زده شده است (ابری و همکاران، ۱۹۹۴). محاسبات نشان می‌دهد حجم این حوزه آبی حدود ۶۶۷۸۰ کیلومتر مکعب است که حدود ۴۴ درصد کل آب دریاچه‌های جهان است (اسمیلووا، ۲۰۰۴). با توجه به اینکه دریای خزر یک حوزه بسته فرض می‌شود، تأثیر جزرومد بر آن ناچیز است (بندارنکو، ۱۹۹۳)؛ ترزیف و همکاران، ۱۹۹۲ و مددوف و همکاران، ۲۰۲۰). سطح



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) نقشه دریای خزر که شامل بخش‌های خزر شمالی، میانی و جنوبی است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، خزر جنوبی است. نقاط a و b ایستگاه‌های استفاده‌شده در این پژوهش هستند. (ب) نقاط شبکه استفاده‌شده در خزر جنوبی که شامل مرز باز روی تنگه آپشوران و دو رودخانه مهم کورا و سپیدرود است که در مدل‌سازی لحاظ شده‌اند.

باباگلی و همکاران (۲۰۱۹) با مدل عددی کوهیرنس، که شیعه و همکاران (۲۰۱۶) آن را اجرا کرده‌اند، به مطالعه گردش‌های آب عمیق خزر جنوبی پرداختند. ایشان برای بررسی دینامیک این جریان چگال، از مدل‌های تحلیلی و دینامیکی هم بهره جستند. نتایج، حاکی از وجود جریان گرانی خزر شمالی بود که به سمت خزر جنوبی حرکت می‌کرد. در تحلیل نتایج پژوهش مذکور، وجود فرایند فروریزش (sinking) در خزر شمالی، که در فصول سرد سال اتفاق می‌افتد، دلیل شکل‌گیری جریان چگال معرفی شده است. پس از آن، باباگلی و بیدختی (۲۰۱۹) رفتار این جریان گرانی در مجاورت سواحل ایران را در محیط آزمایشگاه دینامیک شاره‌های ژئوفیزیکی (مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) مطالعه و شرایط شکل‌گیری پیچک‌های خزر جنوبی (در نزدیکی بستر) را مشخص کردند.

با توجه به اهمیت خزر جنوبی برای آب‌های ایران، برخی از پژوهش‌ها به بررسی آب‌های خزر جنوبی پرداخته‌اند. غفاری و چگینی (۲۰۱۰) و غفاری و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات جریان و اثر توپوگرافی بر جریانات خزری را با استفاده از داده‌های مشاهداتی بررسی کردند. بهمن‌زادگان و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی دمای سطحی آب و میزان کلروفیل خزر جنوبی به کمک داده‌های ماهواره‌ای و مدل SOM مبادرت ورزیدند و بیان کردند که بیشترین میزان کلروفیل در سواحل خزر جنوبی یافت شده است. گفتنی است پژوهش باباگلی و همکاران (۲۰۱۸) که در آن خواص فیزیکی آب‌های خزر جنوبی را با استفاده از مشاهدات میدانی بررسی کرده بودند، نشان می‌دهد ترموکلاین در برخی ماه‌های سرد سال (مانند فوریه) از بین می‌رود. تحقیق کشکولی و همکاران (۲۰۱۹) حاکی از این است که داده‌های ماهواره‌ای روند رو به رشد دمای سطح آب را در خزر جنوبی نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند نمونه‌ای از گرمایش زمین

این دریا در سال‌های اخیر با چالش‌های متفاوتی روبه‌رو شده است که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به آلودگی، تغییرات اقلیمی و تغییرات تراز آب اشاره کرد. امروزه، یکی از این آلودگی‌ها مربوط به زباله‌های پلاستیکی است که سواحل ایران را بیش از پیش تهدید می‌کند (مهدی‌نیا و همکاران، ۲۰۲۰ و پتروودی و همکاران، ۲۰۲۰). این نگرانی‌ها سبب شد پژوهشگران حوزه‌های اقلیمی، اقیانوسی و زیست‌محیطی با نگرشی جدیدتر و دغدغه‌ای بیشتر به این پهنه آبی بنگرند و از منظرهای مختلف، این حوزه آبی را بررسی کنند. این بررسی بیشتر با استفاده از مدل‌های عددی انجام شده است. البته نبود داده‌های میدانی یکی از مشکلات محققان است که کار در این حوزه آبی را کمی دشوار می‌کند.

در یک دهه اخیر، پژوهشگران بسیاری به مطالعه این حوزه آبی پرداخته‌اند که نگاه آنها نشئت گرفته از دید اقیانوس‌شناسی فیزیکی است. در این بین پژوهش‌های متعددی درباره خواص فیزیکی و جریانات دریایی انجام شده است که اهمیت این دریاچه را نشان می‌دهد. کارا و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل سه‌بعدی هایکام، گردش‌های فصلی و شکل‌گیری توده‌های آبی را مطالعه کردند. یکی از یافته‌های مهم آن پژوهش، وجود پیچک‌ها در خزر جنوبی است. ساختار ترموهالینی دریای خزر در پژوهش گوندوز و اوزی (۲۰۱۴) بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در خزر میانی، گردش چرخندی وجود دارد، ولی گردش‌های خزر جنوبی می‌تواند هم چرخندی و هم واچرخندی باشد. رهنمایا و همکاران (۲۰۱۸) با مدل‌سازی یخ با استفاده از مدل عددی هایکام، این پژوهش‌ها را ادامه دادند. در آن مدل‌سازی، ضخامت یخ‌هایی که در خزر شمالی شکل می‌گیرند، حدود ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر برآورد شد که در ماه ژانویه، بیشترین ضخامت خود را داشتند.

در این حوزه باشد.

(وارنر و همکاران، ۲۰۰۸ و کمیجانی و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\frac{\partial(HZu)}{\partial t} + \frac{\partial(uHZu)}{\partial x} + \frac{\partial(vHZu)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega HZu)}{\partial s} - fHZu$$

$$= -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial s} \left(u'w' - \frac{v}{H_z} \frac{\partial u}{\partial s} \right) -$$

$$\frac{\partial(H_z S_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H_z S_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{px}}{\partial s} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(HZv)}{\partial t} + \frac{\partial(uHZv)}{\partial x} + \frac{\partial(vHZv)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega HZv)}{\partial s} - fHZv$$

$$= -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial s} \left(v'w' - \frac{v}{H_z} \frac{\partial v}{\partial s} \right) -$$

$$\frac{\partial(H_z S_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H_z S_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{py}}{\partial s} \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial s} - H_z \rho \frac{g}{\rho_0} \quad (3)$$

که s مختصات سیگما، z مختصات عمودی و η نوسانات سطح آزاد هستند. u ، v و Ω مؤلفه‌های سرعت را نشان می‌دهند. f پارامتر کوریولیس و H_z ضخامت سلول‌های شبکه است. P ، ρ و ρ_0 به ترتیب فشار، چگالی آب و چگالی مرجع را نشان می‌دهند.

معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HZu)}{\partial x} + \frac{\partial(HZv)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega HZ)}{\partial s} = 0 \quad (4)$$

۲-۲ منطقه مورد مطالعه و شرایط اجرای مدل

در این پژوهش مدل ROMS در خزر جنوبی اجرا شده است. نسخه‌های مختلفی از این مدل موجود است و مؤلفان این مقاله از نسخه دانشگاه راتگرز (Rutgers) استفاده کرده‌اند. در این شبیه‌سازی، به ترتیب ۱۸۱ و ۱۸۳ گرید افقی در راستای طول و عرض جغرافیایی فرض شد که تفکیک‌پذیری (رزولوشن) حدود ۰/۰۳ درجه را به مدل می‌دهد. این تفکیک مکانی با توجه به روش مرکاتور، حدود ۲/۶ کیلومتر تخمین زده می‌شود که نسبت به دیگر پژوهش‌ها در این حوزه دقت به نسبت زیادی دارد (شکل ۱-ب). برای ساخت فایل گرید از داده‌های GEBCO (www.gebco.net) با تفکیک ۳۰ ثانیه استفاده شده است. داده‌های عمق‌سنجی تا حدودی هموارسازی شدند تا برای شبیه‌سازی بهتر آماده شوند. علاوه بر این، ابتدا برخی نقاط خط ساحلی اصلاح شدند و

پژوهش حاضر به مطالعه تغییرات خواص فیزیکی، گردش‌های خزر جنوبی و پیچک‌های آن با استفاده از مدل عددی اقیانوسی می‌پردازد؛ بنابراین در ابتدا ساختارهای دما، شوری و جریان‌های سطحی بررسی می‌شوند و در ادامه سعی بر آن است که با عمق بیشتری به رفتارهای پیچک‌های خزری پرداخته شود و به این پرسش مهم پاسخ داده شود که این پیچک‌ها چه تأثیری بر این حوزه آبی و آب‌های ایران خواهند گذاشت.

۲ روش تحقیق

۲-۱ ویژگی‌های مدل

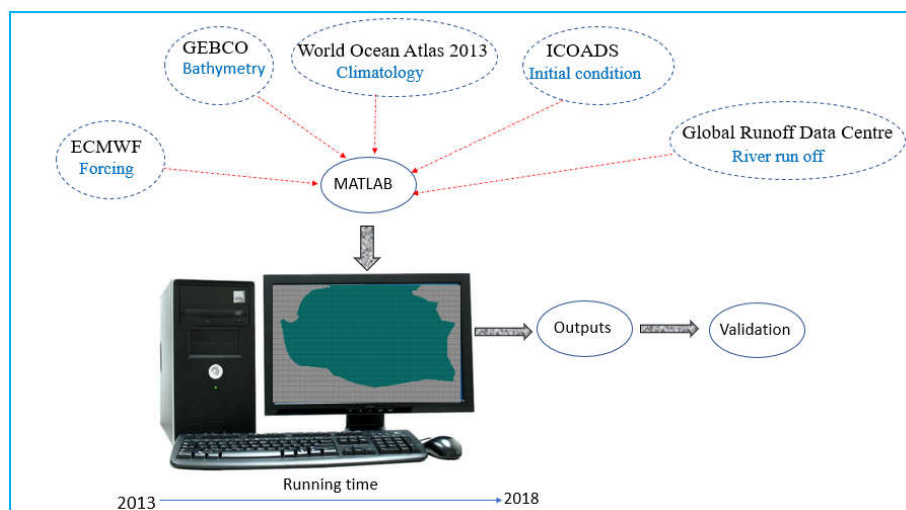
مدل عددی (Regional Ocean Modeling ROMS System) یک مدل اقیانوسی سطح آزاد، هیدروستاتیک و سه‌بعدی است که توانایی‌های متنوعی در شبیه‌سازی فرایندهای اقیانوسی و ساحلی دارد. این مدل عددی معادلات ناویر-استوکس را با در نظر گرفتن تقریب هیدروستاتیک و بوزینسک حل می‌کند (هایدوگل و همکاران، ۲۰۰۸). مدل یادشده می‌تواند با مدل‌های دیگر مانند مدل‌های اتمسفری و موج و یخ جفت شود. این مدل در راستای قائم از دستگاه مختصات عمودی، زمینی و تعمیم‌یافته استفاده می‌کند (لایقی و همکاران، ۲۰۱۹). ROMS این توانایی را دارد که شبکه‌های قائم را در سطح یا در نزدیکی بستر فشرده کند تا به درک بهتر خواص فیزیک اقیانوسی منجر شود (شپتکین و مک‌ویلیامز، ۲۰۰۵).

در این مدل، شماره‌های لایه از بستر به سمت سطح است؛ یعنی کمترین شماره لایه، مربوط به بستر است. مدل در راستای افقی یک مدل ساختاریافته بر اساس Arakawa-C grid (آراکاوا و سوارز، ۱۹۸۳) است. مدل از گام‌های ناهمگن در گام‌های زمانی استفاده می‌کند.

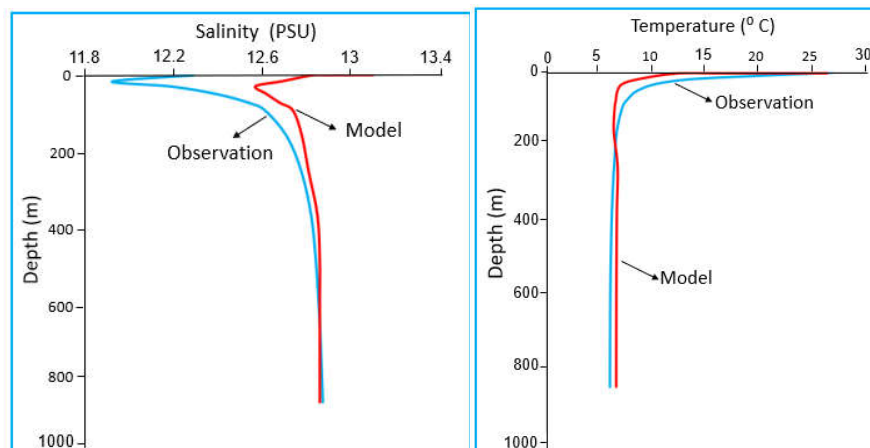
معادلات حاکم در این مدل اقیانوسی عبارت‌اند از

رودخانه کورا و سپیدرود از اهمیت زیادی برخوردار هستند و در مدل لحاظ شده‌اند. داده‌های مربوط به ورودی رودخانه‌ها از داده‌های Global Runoff Data Centre استخراج شده است که داده‌های میانگین ماهانه بودند. مدل برای حدود هفت سال از ژانویه ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۱۸ اجرا شده است. گام‌های زمانی باروتروپیک و باروکلینیک حدود ۳۰ و ۱۵۰ ثانیه فرض شده‌اند. البته گام زمانی برای سال‌های اولیه در حالت باروکلینیک حدود ۱۰۰ ثانیه بود تا مدل پایدارتر شود. به‌طور کلی برای ارضای شرط CFL این شرایط مناسب بودند و حالت بهینه‌ای برای اجرای مدل محسوب می‌شدند. تخمین‌ها نشان می‌دهد مدت زمان اجرا حدود ۲۰۰ ساعت بود که برای آن، یک رایانه پنج هسته‌ای با حافظه حدود شش گیگابایت اختصاص داده شده بود. شکل ۲ مراحل این شبیه‌سازی را خلاصه‌وار نشان می‌دهد. گفتنی است برای در نظر گرفتن شارها از مدل بالک و برای اختلاط عمودی شوری، دما و جریان از مدل GLS_MIXING استفاده شده است. تمام بحث‌ها در این پژوهش بر اساس خروجی سال ۲۰۱۸ (سال آخر) است. برخی از جزئیات روش‌های استفاده شده برای اجرای مدل در جدول پ در پیوست آورده شده است.

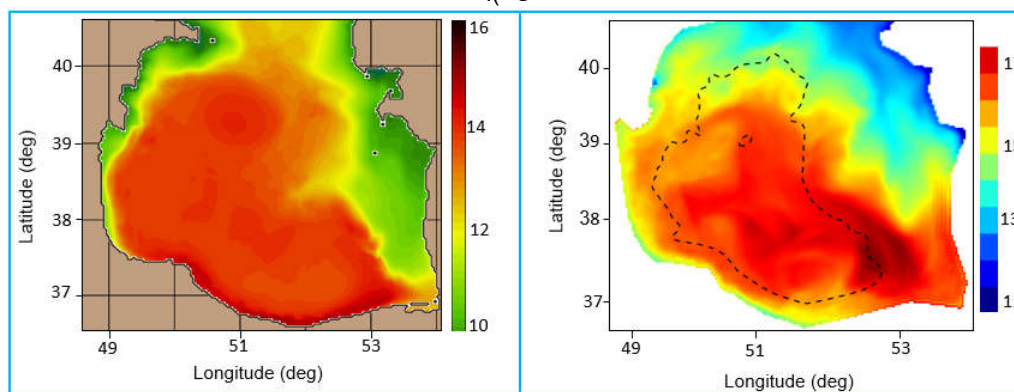
پس از آن فایل گرید ساخته شد. در راستای قائم از شانزده لایه سیگما استفاده شده که لایه اول مربوط به بستر است و لایه شانزدهم، سطح را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی مرز شمالی مرز باز فرض شده و داده‌های اقلیمی بر آن اعمال شده است؛ از این رو از روش‌های گرادیان برای تعریف و اعمال شرایط فیزیکی مرز باز استفاده شد. برای اعمال واداشت‌های جوئی از داده‌های سه‌ساعته ECMWF-ERA Interim (www.ecmwf.int) استفاده شده است. تفکیک‌پذیری این داده‌ها 0.125×0.125 است. برای شروع مدل از داده‌های اولیه از مرکز اقلیمی ICOADS (www.icoads.noaa.gov) و برای داده‌های اقلیمی از داده‌های World Ocean Atlas 2013 (www.nodc.noaa.gov) استفاده شده است. شایان ذکر است یکی از مشکلات در اعمال شرایط اولیه، داده‌های شوری بود که برخی از آنها اصلاح شدند؛ چون شوری را بیشتر نشان می‌دادند. به‌طور کلی باید در نظر داشت که داده‌های اقلیمی و واداشت‌ها ابتدا بازنگری و سپس به مدل اعمال شدند. این اعتبارسنجی ورودی‌های مدل برای دریاچه خزر بسیار مهم است؛ زیرا برخی از داده‌ها با واقعیت همخوانی ندارند. نکته مهم دیگر این است که مدل در محدوده خزر جنوبی اجرا شده است که در آن دو



شکل ۲. روند مراحل پژوهش، داده‌های استفاده‌شده و مدت زمان اجرای مدل.



شکل ۳. اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی در ایستگاه b. نمودار سمت راست مقطع دما نسبت به عمق حاصل از مشاهدات و مدل‌سازی و نمودار سمت چپ، مقطع شوری نسبت به عمق حاصل از مدل‌سازی و مشاهدات است. ایستگاه نقطه b در نزدیکی سواحل ایران واقع است (ر.ک. شکل ۱).



شکل ۴. مقایسه دمای سطحی میانگین فصل زمستان حاصل از شبیه‌سازی در پژوهش حاضر (سمت راست) و مدل هایکام (سمت چپ) در پژوهش رهنمایا و همکاران (۲۰۲۱)

۳-۲ اعتبارسنجی مدل

از این رو امکان ارزیابی نتایج مدل در آب‌های عمیق نیز فراهم است. در شکل ۳، مقاطع دما و شوری ترسیم و خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی دما بهتر عمل می‌کند و تا حد زیادی موفق است، اما در شوری کمی تفاوت محسوس بین مدل و مشاهدات وجود دارد. به‌طور کلی مدل در لایه‌های نزدیک سطح، شوری را حدود ۰/۸ واحد شوری بیشتر از مشاهدات میدانی برآورد کرده است که جای بحث دارد. این تفاوت بیشتر در عمق‌های کمتر از ۲۰۰ متر اتفاق می‌افتد و بیشترین این ناهمخوانی در لایه سطحی است. در گام بعدی،

برای اعتبارسنجی مدل دو روش مختلف به کار رفته است. در گام اول از داده‌های مشاهداتی مربوط به گشت تحقیقاتی ۱۹۹۶ در دریای خزر (در ماه سپتامبر) استفاده شد. این داده‌ها را یونسکو جمع‌آوری کرده بود. اندازه‌گیری‌ها که در راستای شمالی و جنوبی هستند و تقریباً بیشتر خزر را شامل می‌شوند، در مجموع از ۲۷ ایستگاه جمع‌آوری شده‌اند؛ برای نمونه، جهت اعتبارسنجی از نقطه b (شکل ۱) با مختصات $(50^{\circ}69'21''E, 37^{\circ}54'95''N)$ استفاده شده است که در نزدیکی سواحل ایران است. بیشترین عمق این داده‌ها ۹۰۰ متر است؛

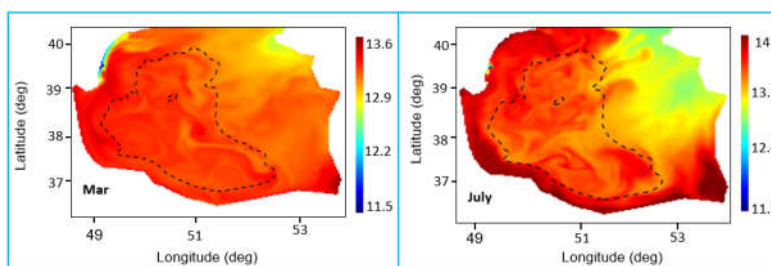
می‌توان گفت دمای میانگین در خزر جنوبی، ۱۸-۱۶ درجه سانتی‌گراد است.

در آب‌های عمیق (زیر ترموکلاین) تغییرات کمتری دیده می‌شود که محدود آن ۵ تا ۸ درجه سانتی‌گراد است. دلیل این موضوع، وجود واداشت‌های جوی کمتر است. نکته جالب این است که ساختار ترموکلاین خزر (دماشیب) در زمستان تا حدودی ناپدید می‌شود یا حداقل شیب آن به کمترین مقدار خود می‌رسد، اما به‌طور کلی تغییرات شوری محدودتر و بین ۱۱ تا ۱۴ واحد شوری در نوسان است (شکل ۵). در فصول گرم سال (به‌ویژه در تابستان) شوری بیشتری مشاهده می‌شود. شوری حدود ۱۳/۵ واحد شوری را می‌توان شوری میانگین خزر جنوبی در نظر گرفت. با مطالعه تغییرات چگالی و استفاده از رابطه خطی دما و شوری می‌توان نتیجه گرفت چگالی آب‌های خزر جنوبی در بیشترین حالت به حدود ۱۰۱۲-۱۰۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب می‌رسد. به‌طور کلی ساختار دمایی نسبت به شوری نقش پررنگ‌تری در ساختار قائم آب‌های خزر جنوبی دارد که نشان می‌دهد تغییرات فصلی برای این دریاچه مهم است و بر ساختار فیزیکی آن تأثیر می‌گذارد.

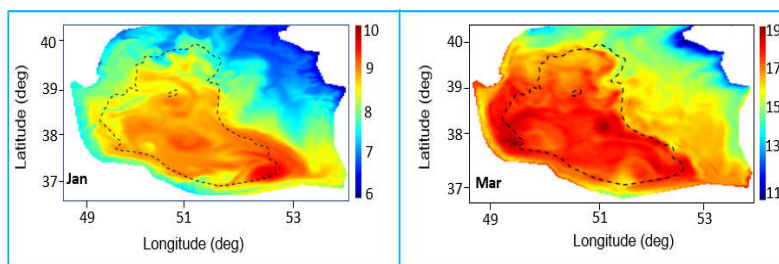
خروجی‌های مدل عددی با پژوهش‌های قبلی اعتبارسنجی شده است. در این بخش داده‌های مدل با خروجی مدل هایکام (رهنمانیا و همکاران، ۲۰۱۸) مقایسه شدند. در شکل ۴ دمای سطح حاصل از این پژوهش و خروجی مدل هایکام نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت مدل، همخوانی خوبی با مشاهدات میدانی و دیگر مدل‌های عددی اجراشده در خزر جنوبی دارد.

۳ نتایج

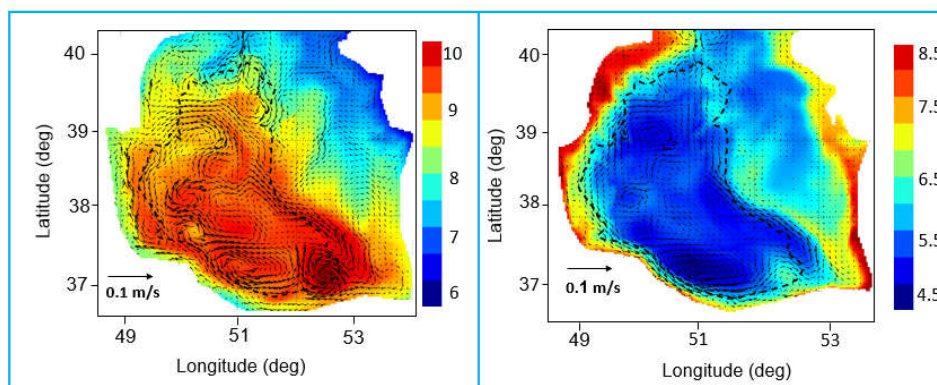
برای مطالعه ساختار فیزیکی آب‌های خزر جنوبی شکل‌های مختلفی ترسیم شده است. در ابتدا تغییرات فصلی دما، شوری و چگالی مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد آب‌های خزر جنوبی تحت تأثیر واداشت‌های جوی و تغییرات فصلی هستند. به‌طور کلی آب‌های نزدیک سواحل ایران گرم‌تر از آب‌های نزدیک تنگه آپشوران است (اگرچه انتظار هم همین بوده است). دمای آب‌های سطحی در نزدیکی سواحل ایران از حدود ۹ درجه سانتی‌گراد در ژانویه به حدود ۳۲ درجه سانتی‌گراد در فصل تابستان می‌رسد (شکل ۶). با توجه به این مهم



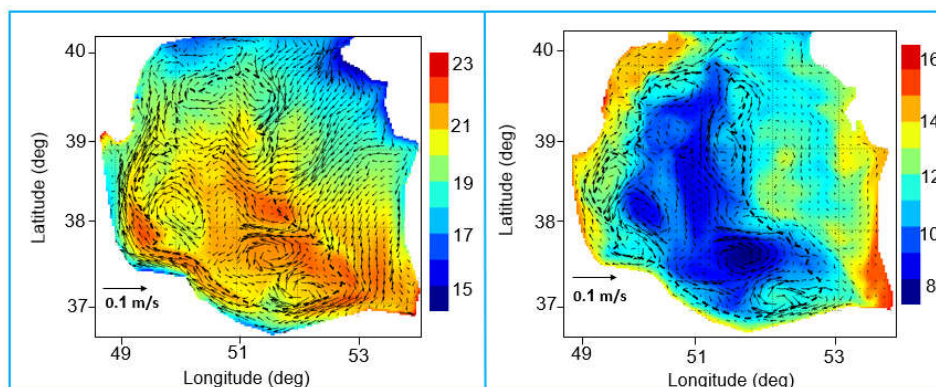
شکل ۵. شوری سطحی خزر جنوبی حاصل از شبیه‌سازی مدل در ماه‌های مارس و جولای.



شکل ۶. دمای سطحی خزر جنوبی حاصل از شبیه‌سازی مدل در ماه‌های ژانویه و مارس.



شکل ۷. جریانات سطحی میانگین در عمق ۳۰ متری (سمت راست) و در لایه سطحی (سمت چپ) در ماه ژانویه حاصل از مدل‌سازی. رنگ‌ها نشان‌دهنده دما هستند و مقیاس جریان برحسب متر بر ثانیه است.



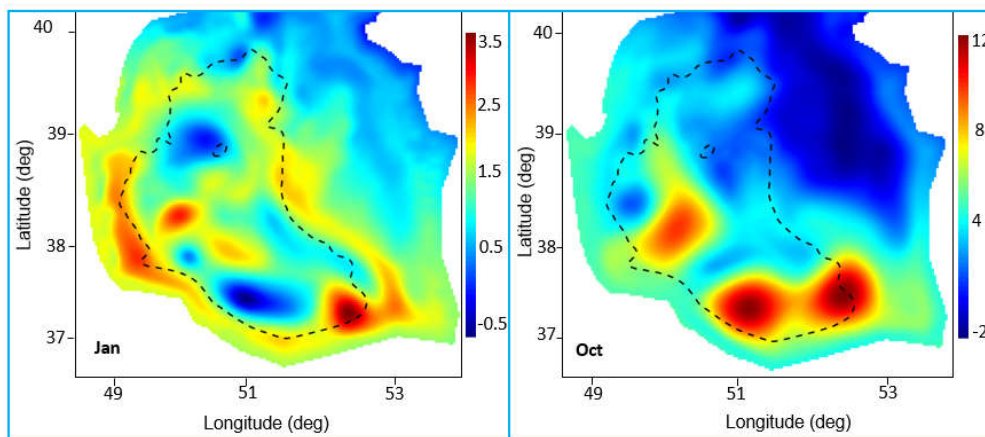
شکل ۸. جریانات سطحی میانگین در عمق ۳۰ متری (سمت راست) و در لایه سطحی (سمت چپ) در ماه آوریل حاصل از مدل‌سازی. رنگ‌ها نشان‌دهنده دما هستند و مقیاس جریان برحسب متر بر ثانیه است.

حیث تاوایی سیال، یک چرخش ساعت‌گردی (واچرخندی) در پایین تنگه آپشوران وجود دارد که به نظر ثابت است و به احتمال زیاد همان چیزی است که پیش از این، دیگران پیش‌بینی کرده بودند (برای مثال، کارا و همکاران، ۲۰۱۰ و تورونکوگلو و همکاران، ۲۰۱۳). نکته حائز اهمیت در خزر جنوبی، شکل‌گیری پیچک‌هایی است که در ماه‌های مختلف سال وجود دارند. برخی از این پیچک‌ها دوقطبی تشکیل می‌دهند. منظور از دوقطبی، پیچک‌هایی هستند که فاصله کمی از هم دارند ولی جهت چرخش آنها متفاوت است یا به‌اصطلاح، علامت تاوایی متفاوتی دارند. این پیچک‌ها در خزر جنوبی در ماه‌های فصل پاییز به‌ویژه در ماه دسامبر

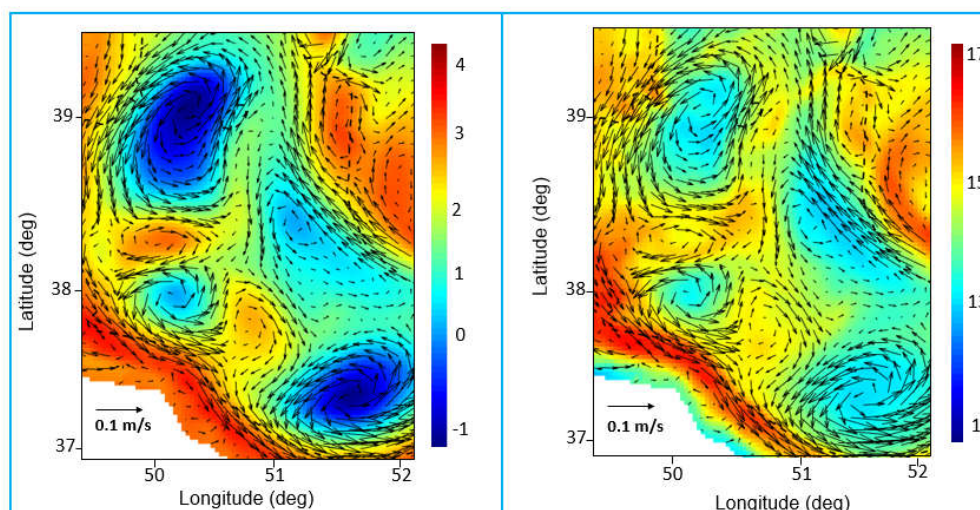
نتایج مربوط به جریانات خزر نشان می‌دهد الگوی جریانات خزر به‌طور کلی پادساعت‌گرد است و قدرت جریانات نیز در فصول مختلف سال تغییر می‌کند (شکل‌های ۷ و ۸). در ژانویه متوسط جریان در کل لایه‌ها ۶ سانتی‌متر بر ثانیه است، ولی این مقدار برای ماه‌هایی مانند دسامبر به حدود ۰/۱ متر بر ثانیه می‌رسد که ناشی از میدان بادی است که در فصل پاییز قوی‌تر می‌شود. بیشترین مقدار جریان سطحی ثبت شده در آب‌های سطحی حدود ۰/۵ متر بر ثانیه و در ماه سپتامبر است. با مقایسه همه ماه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که قدرت جریان در خزر جنوبی در ماه‌هایی مانند دسامبر و اوت تقویت می‌شود و حتی می‌توان گفت این جریانات ناپایدارتر هم می‌شوند. از

آنها وجود دارد. در نقاطی که پیچک‌ها چرخندی هستند، تغییرات تراز آب منفی است و آب‌های محصور در پیچک‌ها سردتر هستند (به اصطلاح اقیانوس‌شناسان، پیچک هسته سرد دارد)، اما هر جا که پیچک‌ها واچرخندی هستند، تغییرات تراز آب مثبت است و آب‌های محصور در این پیچک‌ها گرم‌تر (پیچک با مرکز گرم) از آب‌های اطراف خود هستند؛ برای نمونه برای پیچک‌های شکل ۹ می‌توان دریافت که آب سرد محصور در پیچک چرخندی حدود 0.8 درجه سردتر از آب اطراف خود است و تراز آن هم حدود $4-5$ سانتی‌متر پایین‌تر است. برای بهتر نشان دادن رفتار پیچک‌های خزر، در شکل ۹ بخشی از خزر جنوبی انتخاب شده است که بیشتر پیچک‌ها در آن شکل می‌گیرند. برای درک بهتر، تغییرات فصلی تراز سطحی در ایستگاه a (شکل ۱) نسبت به زمان ترسیم شده است. با توجه به شکل، تغییرات تراز فصلی 10 سانتی‌متر است و در فصول مختلف سال، الگوی متفاوتی دارد. به نظر می‌رسد تراز آب در انتهای پاییز و اوایل زمستان به کمترین و در تابستان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت هرچه پیچک‌ها قوی‌تر باشند، تغییراتی که روی تراز آب خزر جنوبی بر جای می‌گذارند نیز بیشتر خواهد بود.

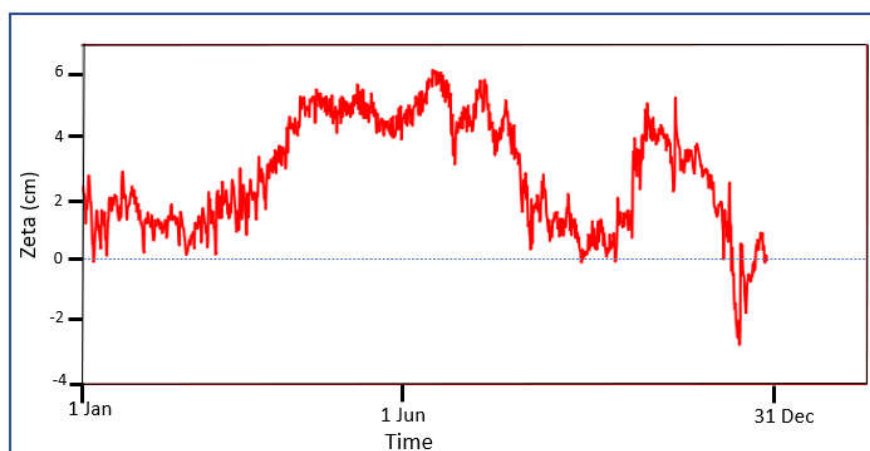
بسیار قوی می‌شوند. پهنای این پیچک‌ها به حدود 50 تا 100 کیلومتر هم می‌رسد و می‌توان آنها را در زمره پیچک‌های میان‌مقیاس دسته‌بندی کرد (رهنمایا و همکاران، ۲۰۲۱). نکته جالب این است که این پیچک‌ها سبب تغییراتی در تراز آب می‌شوند که می‌تواند حدود 10 تا 12 سانتی‌متر نسبت به آب‌های مجاورشان باشد؛ بنابراین با توجه به تغییرات ایجادشده در سطح آب، شناسایی پیچک‌ها به راحتی ممکن است (شکل‌های ۹ و ۱۰). منظور از تغییرات تراز سطحی در این پژوهش، ارتفاع سطحی دریا (SSH) است که با Zeta نشان داده شده است و مدل آن را محاسبه می‌کند و به نوعی مفهوم ارتفاع سطحی دریا را در دل خود دارد. به طور کلی یک مدل سطح آزاد است و توانایی مدل‌سازی تغییرات سطحی را دارد. باید به این نکته توجه شود که مدل، ارتفاع سطح مطلق را محاسبه می‌کند؛ یعنی تغییرات ارتفاع سطح را نسبت به یک مبدأ که همان سطح ژئوپتانسیل است (برای مثال $Zeta=0$) محاسبه می‌کند. علاوه بر این، بیشتر این پیچک‌ها در مجاورت نقاط عمیق خزر (فلات قاره) دیده می‌شوند که نشان می‌دهد توپوگرافی سواحل ایران نقش بسزایی در کنترل و شکل‌گیری آنها دارد. نکته جالبی که با مقایسه کردن الگوهای جریان‌ات، تغییرات دما و تغییرات تراز سطحی می‌توان دریافت این است که رابطه معناداری بین



شکل ۹. تغییرات تراز سطحی در دو ماه ژانویه و اکتبر در خزر جنوبی حاصل از شبیه‌سازی



شکل ۱۰. الگوی جریان و پیچک‌ها در بخشی از خزر جنوبی. رنگ‌ها در سمت راست نشان‌دهنده دما برحسب درجه سانتی‌گراد و در شکل سمت چپ، نشان‌دهنده تغییرات سطح برحسب سانتی‌متر هستند.



شکل ۱۱. تغییرات تراز سطحی در نقطه a (ر.ک. شکل ۱) در خزر جنوبی برحسب درجه سانتی‌گراد مربوط به سال ۲۰۱۸

۴ نتیجه‌گیری و بحث

در پژوهش حاضر از مدل عددی ROMS برای مطالعه خواص فیزیکی آب در خزر جنوبی استفاده شده است. هم‌زمان با مطالعه جریانات و پیچک‌ها، توزیع دما، شوری و تغییرات فصلی آب‌های خزر جنوبی نیز بررسی شده است تا تأثیر این پیچک‌ها بر توزیع دما و شوری آب‌های خزر جنوبی نیز مشخص شود. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد این مدل اقیانوسی با دقت خوبی فرایندهای مهم

فیزیکی خزر جنوبی را شبیه‌سازی می‌کند. در این شبیه‌سازی، نتایج دما و جریانات با تقریب خوبی با مشاهدات همخوانی دارد، ولی شوری کمی بیشتر برآورد شده است. حال این سؤال به ذهن متبادر می‌شود که چرا نتایج شوری با واقعیت خزر جنوبی کمی متفاوت است؟ باید به این نکته توجه کرد که نویسندگان مقاله سعی کرده‌اند رودخانه‌های مهم در خزر جنوبی را در شبیه‌سازی لحاظ کنند. پس دلیل آن نمی‌تواند رواناب‌های خزر

پیچک‌ها نقش پررنگی در فرایندهای اختلاط بازی کنند (لو و اسپیر، ۲۰۱۰؛ بریرلی و همکاران، ۲۰۱۳ و استنلی و سانکو، ۲۰۱۴). گفتنی است بیشتر پیچک‌های خزر میان‌مقیاس هستند. پیچک‌های میان‌مقیاس می‌توانند پارامترهای فیزیکی جوّ پایین نظیر سرعت باد سطحی دریا، آب مایع ابرها (cloud liquid water) و میزان بارش را تحت تأثیر قرار دهند (چلتون، ۲۰۱۰؛ کاردونا و براکو، ۲۰۱۲ و سان و همکاران، ۲۰۱۹). مسئله زمانی جالب می‌شود که این کارکرد مهم پیچک‌ها با در نظر گرفتن آلودگی‌های نفتی خزر بررسی شود. کشور ایران سهم کمی از استخراج نفت دارد ولی هر ساله حجم وسیعی از آلودگی نفتی در سواحل ایران دیده می‌شود؛ برای نمونه باباگلی (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های راداری نشان داد در سواحل غربی ایران که پیچک‌ها بیشتر در آنها شکل می‌گیرند، آلودگی نفتی بیشتری مشاهده می‌شود. این داده‌ها نشان می‌دهند اندازه لکه‌های نفتی که از تنگه آپشوران وارد خزر جنوبی می‌شوند، کوچک‌تر می‌شود که یکی از دلایل اصلی آن می‌تواند باد و همین پیچک‌های خزر جنوبی باشد. این موضوع مبین آن است که نویسندگان با هدف از پیش تعیین شده سعی داشته‌اند با دقت بیشتری الگوهای خزر جنوبی را ارزیابی کنند. همچنین نکته مهم اشاره‌شده در این پژوهش که جای بحث هم دارد آن است که چرا این پیچک‌ها سطح آب خزر را تغییر می‌دهند. از نظر دینامیکی، عامل اصلی پیدایش این پیچک‌ها نیروی حاصل از چرخش (کرل) تنش باد، جدایش پیچ‌درپیچ، ناپایداری باروکلینیکی و تعادل گرادیان میدان باد است (بسیردی و همکاران، ۲۰۱۹)؛ از این رو دینامیک این پیچک‌ها سبب تشکیل نقاط همگرایی و واگرایی می‌شود و سطح آب را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. باید به این نکته توجه کرد که اثر جزرومد در خزر کم است، پس این نوسانات سطحی می‌تواند مهم باشد و از طرف دیگر، همه این تغییرات به

جنوبی باشد. دلیل دیگری که باید در نظر گرفت این است که بیشتر آب خزر را رودخانه ولگا در خزر شمالی تأمین می‌کند؛ از این رو یک دلیل می‌تواند وجود مرز باز روی تنگه آپشوران باشد، ولی باید به این نکته هم توجه کرد که مرز باز به صورتی لحاظ شده است که این تغییرات را به مدل اعمال کند؛ یعنی مرز باز این شرایط را به کمک داده‌های اقلیمی برای مدل فراهم کرده است. شاید این نظریه در ذهن شکل گیرد که نوع تعریف مرز باز دلیل آن باشد که البته این هم نمی‌تواند درست باشد؛ زیرا حالت‌های مختلف بررسی و بهترین حالت انتخاب شده بود. به احتمال فراوان تفکیک‌پذیری کم در داده‌های اقلیمی سبب شده است که مدل تا حدی شوری را بیشتر نشان دهد. از طرفی، این نتیجه نشان می‌دهد تبخیر در خزر جنوبی بسیار مهم است و حتی اگر با دید اقلیمی به آن نگاه شود، بیانگر آن است که با کاهش دبی رودخانه ولگا (که در حال حاضر با آن روبه‌رو هستیم) به چه میزان شوری خزر جنوبی تغییر خواهد کرد. نکته جالب این است که مدل، جریان را به خوبی نشان داده است که به این نکته برمی‌گردد که بیشتر جریانات سطحی در خزر از روی تنگه آپشوران شکل می‌گیرند و به همین دلیل، مدل بدون مشکل در این شبیه‌سازی موفق بوده است. باید توجه کرد که یک جریان پادساعت‌گرد قوی در خزر میانی وجود دارد (تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر) که جریانی چرخشی را در خزر میانی تشکیل می‌دهد که مانع تأثیرپذیری الگوهای خزر جنوبی می‌شود؛ باین‌حال مدل در شبیه‌سازی جریان موفق است. سؤال دیگر این است که این پیچک‌ها چه نقشی می‌توانند داشته باشند. به‌طور کلی پیچک‌ها یک حلقه جریان هستند که از جریان اصلی می‌توانند جدا شوند و به حرکت خود ادامه دهند. از نظر اقیانوس‌شناسان فیزیکی، پیچک‌ها نقش بسزایی در انتقال گرما، جرم و آلودگی دارند. اغتشاشات و ناپایداری‌هایی که در پیچک‌های میان‌مقیاس اتفاق می‌افتد، سبب می‌شود

پیچک‌ها و چگونگی مرکز این پیچک‌ها ناتوان است. در پژوهش حاضر، نگارندگان باز هم تفکیک مکانی در راستای افقی را بیشتر کرده‌اند (۲/۵ کیلومتر) تا مرکز این پیچک‌ها با دقت بیشتر و تغییرات آن روی تراز آب، بهتر دیده شود. این موضوع تا حد زیادی محقق شد؛ بنابراین در مقاله حاضر، این پیچک‌ها با توجه به تجربیات گذشته مطالعه شده‌اند و از آنجا که رفتارشان در راستای افقی مهم‌تر از راستای قائم می‌تواند باشد، تفکیک افقی افزایش یافته است. نویسندگان پیشنهاد می‌کنند شبیه‌سازی با دقت بیشتر و با در نظر گرفتن گزینه‌های زیستی مدل ROMS اجرا شود تا بتوان کارکرد این پیچک‌ها را در توزیع پلانکتون‌ها یا فیتوپلانکتون‌ها و حتی توزیع اکسیژن و مواد شیمیایی محلول ارزیابی کرد.

قدردانی

از مرکز علوم جوئی و اقیانوسی سازمان هواشناسی سپاسگزاریم که در این پژوهش همکاری‌های لازم را با نویسندگان داشتند.

منابع

- Arakawa, A., and Suarez, M. J., 1983, Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates: *Monthly Weather Review*, **111**, 34-45.
- Aubrey, D. G., 1994, Conservation of biological diversity of the Caspian Sea and its coastal zone: A proposal to the Global Environment Facility, Report to GEF.
- Aubrey, D. G., Glushko T. A., and Ivanov, V. A., 1994, North Caspian Basin: Environmental status and oil and gas operational issue: Report for Mobil-oil.
- Babagoli, J., Aliakbari Bidokhti, A., and Salmani Ghazvini, Z., 2018, Investigation of physical properties and long coastal waves in the Southern Caspian Sea: *Iranian Journal of Geophysics*, **12**(3), 39-52.
- Babagoli Matikolaei, J., and Aliakbari Bidokhti, A. A., 2019, An experimental study of flow regimes of a gravity current over a cape in a stratified environment: *Ocean Dynamics*,

این پیچک‌ها مربوط نمی‌شود.

به‌طور کلی نتیجه مهم این است که وقتی پیچک‌ها چرخندی (پادساعت‌گرد) می‌شوند، مرکزشان سرد و ارتفاع ترازشان کمتر از آب‌های اطراف می‌شود، ولی هنگامی که پیچک‌ها و اچرخندی (ساعت‌گرد) می‌شوند، مرکزشان گرم و ارتفاعشان نیز بیشتر می‌شود (مانند نقاط پرفشار و کم‌فشار در هواشناسی). مدل به‌خوبی این موضوع را نشان می‌دهد؛ چون هرگاه پیچک‌ها چرخندی هستند، تراز سطحی چند سانتی‌متر کمتر از آب‌های اطراف است. در مقایسه با مطالعات دیگران، این مدل به‌خوبی گرم بودن یا سرد بودن مرکز پیچک‌ها را برآورد می‌کند. در اقیانوس‌شناسی پیچک‌هایی با مرکز گرم و سرد نقش‌های متفاوتی می‌توانند داشته باشند. پیچک‌هایی که مرکز گرم دارند، انواع مختلفی از موجودات آبرزی را در خود به دام می‌اندازند و منتقل می‌کنند، ولی پیچک‌هایی که مرکز سرد دارند، توده‌های زیستی بیشتری با خود حمل می‌کنند، اما تنوع گونه‌هایی که جابه‌جا می‌کنند، کمتر است. این پیچک‌ها مواد مغذی و پلانکتون‌های بیشتری را به همراه خود حمل می‌کنند؛ در نتیجه بسیار مهم هستند.

با مرور مطالعات پیشین می‌توان پی برد که پژوهشگران در سال‌های اخیر در حال شناسایی بهتر رفتارهای پیچک‌های خزر جنوبی هستند. در پژوهشی که با مدل کوهرینس و تفکیک مکانی حدود ۵ کیلومتر انجام شده است، پیچک‌های خزری تا حدودی شبیه‌سازی شده‌اند. پس از آن و در مدل هایکام (رهنمانیا و همکاران، ۲۰۲۱) سعی شده است تفکیک مکانی (افقی) بیشتر شود تا این پیچک‌های میان‌مقیاس خزر جنوبی بهتر بررسی شوند. در این پژوهش که تفکیک مکانی به ۳/۲ کیلومتر کاهش پیدا کرده است، به‌وضوح پیچک‌های خزر جنوبی مشاهده می‌شوند. پژوهش رهنمانیا و همکاران (۲۰۲۱) در پاسخ به دو سؤال مهم درباره تغییرات تراز سطحی ناشی از این

- 69(7), 769-786.
- Babagoli Matikolaie, J., Aliakbari Bidokhti, A., and Shiea, M., 2019, Some aspects of the deep abyssal overflow between the middle and southern basins of the Caspian Sea: *Ocean Science*, **15**(2), 459-476.
- Babagoli Matikolaie, J., 2021, Impact of physical process on propagating oil spills in the Caspian Sea: *Marine Pollution Bulletin*, **165**, 112-147.
- Bahmanzadegan, A. R., Lari, K., Fatemi, M. R., and Azarsina, F., 2013, The pattern determination of sea surface temperature distribution and chlorophyll a in the Southern Caspian Sea using SOM Model: *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, **12**(1), 105-114.
- Bondarenko, A. L., 1993, Currents of the Caspian Sea and formation of salinity of the waters of the north part of the Caspian Sea, *Nauka, Moscow*, **6**, 3019-3053.
- Brearley, J. A., Sheen, K. L., Naveira Garabato, A. C., Smeed, D. A., and Waterman, S., 2013, Eddy-induced modulation of turbulent dissipation over rough topography in the Southern Ocean: *Journal of Physical Oceanography*, **43**(11), 2288-2308.
- Busireddy, N. K. R., Ankur, K., and Osuri, K. K., 2019, Significance of mesoscale warm core eddy on marine and coastal environment of the Bay of Bengal, in *Coastal and Marine Environments - Physical Processes and Numerical Modelling*, DOI:10.5772/intechopen.86243.
- Cardona, Y., and Bracco, A., 2012, Enhanced vertical mixing within mesoscale eddies due to high frequency winds in the South China Sea: *Ocean Modelling*, **42**, 1-15.
- Chelton, D. B., and Xie, S. P., 2010, Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales: *Oceanography*, **23**(4), 52-69.
- Chen, J. L., Pekker, T., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Kostianoy, A. G., Cretaux, J. F., and Safarov, E. S., 2017, Long-term Caspian Sea level change: *Geophysical Research Letters*, **44**(13), 6993-7001.
- Ghaffari, P., and Chegini, V., 2010, Acoustic Doppler Current Profiler observations in the Southern Caspian Sea: shelf currents and flow field off Feridoonkenar Bay, Iran: *Ocean Science*, **6**(3), 737-748.
- Ghaffari, P., Isachsen, P. E., and LaCasce, J. H., 2013, Topographic effects on current variability in the Caspian Sea: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**(12), 7107-7116.
- Gunduz, M., and Özsoy, E., 2014, Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea: *Ocean Science*, **10**(3), 459-471.
- Haidvogel, D. B., Arango, H., Budgell, W. P., et al., 2008, Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System: *Journal of Computational Physics*, **227**(7), 3595-3624.
- Ismailova, B. B., 2004, Geo-information modeling of wind-induced surges on the northern-eastern Caspian Sea: *Mathematics and Computers in Simulation*, **67**, 371-377.
- Kaplin, P., 1995, The Caspian: Its past, present and future, in Mandych, A. F., ed., *Enclosed Seas and Large Lakes of Eastern Europe and Middle Asia*, SPB, The Hague.
- Kara, A. B., Wallcraft, A. J., Metzger, E. J., and Gunduz, M., 2010, Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea: *Continental Shelf Research*, **30**(10-11), 1211-1225.
- Kashkooli, O. B., Ghadami, M., Amini, M., and Modarres, R., 2019, Spatiotemporal variation of the Southern Caspian Sea surface temperature during 1982-2016: *Journal of Marine Systems*, **193**, 126-136.
- Komijani, F., Chegini, V., Sadrinasab, M., and Siadatmosavi, S. M., 2016, Simulation of 3D current pattern, sea surface temperature and salinity distribution in the south of Caspian Sea: *Marine-Engineering*, **12**(23), 69-80.
- Kosarev, A., and Yablonskaya, E., 1994, *The Caspian Sea*: SPB Academic Publishing, Hague.
- Kostianoy, A. G., and Kosarev, A. N., (eds.), 2005, *The Caspian Sea environment*: Springer Science & Business Media, **5**.
- Layeghi, B., Aliakbari Bidokhti, A., Ghader, S., and Azadi, M., 2019, Numerical simulations of oceanographic characteristics of the Persian Gulf and Sea of Oman using ROMS model: *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, **48**(12), 1978-1989.
- Lu, J., and Speer, K., 2010, Topography, jets, and eddy mixing in the Southern Ocean: *Journal of Marine Research*, **68**(3-4), 479-502.
- Mammadov, T. S., and Balapour, S., 2015, Climate change impacts on Azerbaijan biodiversity in the Caspian Sea: *Procedia Environmental Sciences*, **29**, 4.
- Medvedev, I., Kulikov, E., and Fine, I., 2020, Numerical modelling of the tides in the Caspian Sea: *Ocean Science*, **16**, 209-219,

- 2020.
- Mehdinia, A., Dehbandi, R., Hamzehpour, A., and Rahnama, R., 2020, Identification of microplastics in the sediments of southern coasts of the Caspian Sea, north of Iran: *Environmental Pollution*, **258**, 113738.
- Petroody, S. S. A., Hashemi, S. H., and van Gestel, C. A., 2020, Factors affecting microplastic retention and emission by a wastewater treatment plant on the southern coast of Caspian Sea: *Chemosphere*, **261**, 128179.
- Rahnemania, A., Aliakbari Bidokhti, A., and Babagoli Matikolaie, J., 2018, Study of ice formation in the Caspian Sea using numerical simulations: *Journal of the Persian Gulf*, **9**(33), 25-34.
- Rahnemania, A., Aliakbari Bidokhti, A., and Babagoli Matikolaie, J., 2021, Some physical properties of mesoscale eddies in the Caspian Sea basins based on numerical simulations: *Journal of Earth and Space Physics*, **47**(4), 219-230.
- Shchepetkin, A. F., and McWilliams, J. C., 2005, The regional ocean modeling following coordinates ocean model: *Ocean Modelling*, **9**(4), 347-404.
- Shiea, M., Chegini, V., and Bidokhti, A. A., 2016, Impact of wind and thermal forcing on the seasonal variation of three-dimensional circulation in the Caspian Sea: *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, **45**(5), 671–686.
- Stanley, G. J., and Saenko, O. A., 2014, Bottom-enhanced diapycnal mixing driven by mesoscale eddies: Sensitivity to wind energy supply: *Journal of Physical Oceanography*, **44**(1), 68-85.
- Sun, W., Dong, C., Tan, W., and He, Y., 2019, Statistical characteristics of cyclonic warm-core eddies and anticyclonic cold-core eddies in the North Pacific based on remote sensing data: *Remote Sensing*, **11**(2), 208.
- Terziev, F. S., Kosarev, A., and Kerimov, A. A., 1992, *The Seas of the USSR. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas, Vol. IV: The Caspian Sea, Issue 1: Hydrometeorological Conditions*, Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia.
- Turuncoglu, U. U., Giuliani, G., Elguindi, N., and Giorgi, F., 2013, Modelling the Caspian Sea and its catchment area using a coupled regional atmosphere-ocean model (RegCM4-ROMS): model design and preliminary results: *Geoscientific Model Development*, **6**(2), 283-299.
- Warner, J. C., Sherwood, C. R., Signell, R. P., Harris, C. K., and Arango, H. G., 2008, Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model: *Computers & Geosciences*, **34**(10), 1284-1306.

پوست

جدول پ. برخی از مهم ترین مؤلفه های مدل و روش استفاده شده در مدل

Model Components	Methods
Momentum equations	UV_ADV, UV_VIS2, UV_LOGDROG
Model set up	SOLVE3D, SPLINES
Forcing model	BULK_FLUXES
Vertical mixing	GLS_MIXING
Closure options for generalized length scale	KANTHA_KLAYSON, N2S2_HORAVG

Numerical modeling of physical properties, currents and eddies in the Southern Caspian Sea

Javad Babagoli Matikolaie ^{1*} and Behzad Layeghi ²

¹ *M.Sc. Graduate, Oceanic and Atmospheric Science Centre (OASC), Tehran, Iran*

² *Ph.D. Graduate, Oceanic and Atmospheric Science Centre (OASC), Tehran, Iran*

(Received: 16 August 2021, Accepted: 26 October 2021)

Summary

The Caspian Sea is the greatest lake in the world. This basin plays a significant role in the climate of the countries located in the vicinity of it. This water body is divided into three basins, including the northern, middle, and southern parts. The Iranian coasts are located in the southern part. This paper uses the ROMS model to investigate the seasonal changes in physical oceanography phenomena in the Southern Caspian Sea. To deal with this, the model was run for seven years. The GEBCO data are utilized to make the grid file with the resolution of 30 seconds. Three-hourly ECMWF (ERA Interim) data was applied to the model. Furthermore, the Kura and the Sepidrud rivers were considered for simulation. The climatology and initial conditions data were extracted from World Ocean Atlas 2013 and ICOADS, respectively. In this research, the horizontal resolution of 2.5 km and 16 layers in vertical grids were applied to the model. The model outputs are validated with observation data and other simulations in this basin. The results show that the ROMS can be an appropriate model for simulation in this region, particularly in the southern part, as the outputs are compatible with the observation data. Moreover, the results indicate that the seasonal changes of temperature are remarkable compared to salinity.

While the model has recorded the mean value of 16°-18° C for temperature, this value for salinity is 13.5 PSU. The typical surface currents are counter-clockwise as the dominant winds are from the north to the south towards the Iranian coasts. The topography of the southern part controls these currents because most eddies are formed in the vicinity of the deep part of the south part. Some eddies are dipoles that can be observable in most seasons. The strongest eddies are formed in this basin in the fall, particularly in December. The most important finding of this research can be the fluctuation of the surface water, which varies from 5 to 10 cm, due to these cyclonic and anticyclonic eddies. When eddies are cyclonic, they form the center of cold water. This water mass can be 0.5°-1° C colder than the surrounded water. Herein, we conclude that these eddies can have two considerable effects on sea surface temperature distributions and sea surface height. Thus, this model shows the behaviors of eddies correctly. It should be noted that eddies can play a significant role in the propagation of oil spills in the southern parts, which is discussed in this paper.

Keywords: Southern Caspian Sea, numerical modeling, currents and eddies, warm and cold core, changes in sea surface height

*Corresponding author:

javadbabagoli@ut.ac.ir