

نقش اثر اصطکاک بستر بر تغییرپذیری جبهه شوری در خلیج فارس

عبدالصمد رهنمانیا^۱، عباسعلی علی اکبری بیدختی^{۲*}، مجتبی عظام^۳، کامران لاری^۴، سرمد قادر^۵

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران a.rahnemania@srbiau.ac.ir
^{۲*} نویسنده مسئول، استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران bidokhti@ut.ac.ir
^۳ استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران ezam@srbiau.ac.ir
^۴ دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران k_lari@iau-tnb.ac.ir
^۵ دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران sghader@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۲۴

چکیده

در این تحقیق با استفاده از مدل هیبریدی های کام، به بررسی نقش اصطکاک بستر در جبهه شوری پرداخته شده است. های کام یک مدل عددی اقیانوسی است که از سیستم مختصات عمودی هیبریدی (شامل دستگاه‌های مختصات عمودی ژئوپتانسیل، سیگما و ایزوپیکنال) بهره می‌گیرد. در این تحقیق از وضوح ۰/۰۵ درجه افقی و ۲۹ لایه هیبریدی برای انجام شبیه‌سازی بکار گرفته شده است و محدوده شبیه‌سازی شامل کل خلیج فارس و بخش زیادی دریای عمان (تا ۵۹/۹ درجه شرقی) هست؛ مدل با استفاده از شرایط اولیه از داده‌های با وضوح ۰/۲۵ درجه، شرط مرزی اسفنجی در شرق دریای عمان با زمان تنظیم ۷۸ روز و منطقه بافر به عرض ۵۰ کیلومتر و داده‌های واداشت جوی سی اف اس وی دو (نسخه دوم سی اف اس آر) با وضوح ۰/۲ درجه مکانی و گام زمانی یک‌ساعته می‌باشد. گام زمانی باروتروپیکی (مد سریع) و بارو کلینیکی به ترتیب ۱۵ و ۱۲۰ ثانیه بوده و مدل به مدت ۵ سال از ابتدای سال ۲۰۱۱ تا انتهای سال ۲۰۱۵ اجرا گردید، سپس نتایج سال ۲۰۱۵ برای بحث و بررسی انتخاب شد. جبهه شوری، محل ناپایداری بارو کلینیکی است و در ماه‌های تابستان (با چینه‌بندی قوی چگالی) به صورت پیچک‌های سیکلونی (مرکز شوری بیشتر) و آنتی سیکلونی (مرکز شوری کمتر) ظاهر می‌شود که در ماه آگوست بیشترین فعالیت پیچکی وجود دارد. در این ناپایداری علاوه بر تغییر فصل و چینه‌بندی چگالی، نقش اصطکاک بستر نیز مهم هست. یک‌بار اصطکاک بستر را نصف و بار دیگر دو برابر می‌کنیم، نتایج به وضوح نشان می‌دهد که پیشروی جبهه شوری به داخل خلیج فارس با ضریب درگ بستر رابطه عکس دارد. همچنین در اصطکاک بستر کمتر، پیچک آنتی سیکلونی مشاهده نمی‌شود ولی در حالت اصطکاک بیشتر از هر دو نوع طیف پیچکی سیکلونی و آنتی سیکلونی مشاهده است. تحلیل توان طیفی و سری‌های زمانی نشان می‌دهد که تغییر ضریب درگ بستر سبب غیر واقعی شدن نتایج مدل می‌شود. همچنین از تحلیل طیفی نتیجه می‌شود که در ضرایب اصطکاک متفاوت، تلاطم تقریباً دوبرابری است.

واژه‌های کلیدی: جبهه شوری، ناپایداری بارو کلینیکی، اصطکاک بستر، خلیج فارس

۱. مقدمه

آب‌های خلیج فارس یکی از شورترین توده‌های آب در اقیانوس‌های جهان هست که به دلیل آب شیرین ازدست‌رفته خالص اضافی در اثر تبخیر به جو و تبادل آب محدودشده با اقیانوس آزاد از طریق تنگه هرمز است. مشاهدات در خلیج فارس، ساختار تبادل سه مؤلفه از آب را نشان می‌دهد (که شامل الف) شارش ورودی سطحی با شوری کمتر در قسمت شمالی تنگه هرمز (ب) شارش خروجی عمیق در قسمت جنوبی تنگه هرمز با شوری بیشتر (ج) شارش خروجی سطحی با شوری متوسط در قسمت جنوبی تنگه هرمز که به‌طور فصلی تغییر می‌کند [۱]. عوامل مؤثر گردش در خلیج فارس به ترتیب توسط بادهای غالب شمال غربی و شارش‌های شناوری و تغییر اندازه حرکت، واداشت ترموها لاینی و جزر و مد است [۲]. گردش در کل خلیج فارس سیکلونی می‌باشد و شامل جریان شمال غربی ساحل ایرانی از تنگه هرمز در امتداد قسمت شمالی و با سرعت بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه [۳] و جریان جنوب شرقی در قسمت جنوبی می‌باشد [۴]. شارش جریان شمال غربی برخلاف جهت بادهای غالب شمال غربی است، که اساساً توسط گرادیان فشار ایجاد می‌شود [۵-۷]. ساختار ترموها لاینی و گردش در خلیج فارس، تغییرات فصلی و بین سالی را نشان می‌دهد [۸]. خلیج فارس به دلیل عمق کم، تنگه پهن‌تر به اقیانوس باز و عدم وجود پشته^۱ قابل توجه و اختلاف شوری زیاد با دریای عمان دارای خصوصیات دینامیکی منحصر به فرد است و برخلاف دیگر دریاها، در اینجا تغییرات شوری تعیین‌کننده وضعیت دینامیکی است. بر اساس نتایج سیوف جهرمی پیچک‌های سیکلونی میان مقیاس در دریای عمان و پیچک‌های آنتی سیکلونی در تنگه هرمز مشاهده شد [۹]. هر چند طبیعت سیکلونی گردش در خلیج فارس به خوبی تخمین زده شده است، ولی جزئیات دینامیکی آن بدون شناخت باقی مانده است. مشاهدات محدود فصلی موجود برای توصیف جزئیات ناپایداری‌ها و پیچک‌ها کافی نیستند و به مطالعه عددی با وضوح مناسب برای بررسی جزئیات جبهه اصلی خلیج فارس نیاز است. بین آب‌های شور خلیج فارس و آب‌های کم شورتر ورودی از دریای عمان، جبهه شوری در

درون خلیج فارس شکل می‌گیرد که به‌طور فصلی تغییر می‌کند. این جبهه نسبت به واداشت‌ها در فصل‌های مختلف و شرایط متفاوت هواشناسی منطقه تغییرات زیادی را نشان می‌دهد [۴]. با مطالعه عددی این جبهه با جزئیات مناسب می‌توان به نحوه تغییرپذیری آن در طول سال پی برد. مهم‌ترین ویژگی تغییرپذیری جبهه شوری ایجاد ناپایداری‌های میان‌مقیاس و پیچک‌ها می‌باشد. پیچک‌ها تحت تأثیر واداشت‌های متفاوت هواشناسی می‌باشند [۱۰]. پیچک‌ها نقش مهمی را در انتقال انرژی، تکانه، اکسیژن، انتقال آلودگی، مواد مغذی و همچنین اختلاط در دریاها و اقیانوس‌های جهان ایفا می‌کنند. جدا از اهمیت علمی این تحقیق، درک بهتر پیچک‌ها به مطالعه آلودگی ناشی از ریزش نفت و دیگر آلودگی‌ها و در حفظ اکوسیستم دریایی خلیج فارس کمک می‌نمایند. این تحقیق اهمیت دارد زیرا در خصوص جبهه شوری خلیج فارس کار دقیقی صورت نگرفته است، اینکه جبهه شوری چگونه تغییر می‌کند؟ تغییرات فصلی این جبهه به چه صورت است؟ و ناپایداری‌های بارو کلینیکی در طول جبهه شوری چگونه شکل می‌گیرند؟ سؤال مهم تحقیق نقش اثر اصطکاک بستر بر تغییرپذیری جبهه شوری است. این تحقیق با استفاده از مدل‌های کام^۲ که مدل عددی هیبریدی است به بررسی اثر اصطکاک بستر بر تغییرپذیری جبهه شوری می‌پردازد. منحنی‌های تحلیل طیفی از خروجی مدل می‌تواند به درک بیشتر این موضوع کمک کند.

۲. داده‌ها و روش‌ها

مدل‌های اقیانوسی برای اقیانوس شناسان در درک بهتر فرایندها در گردش آب کمک می‌کنند. برای پیکربندی مدل‌های اقیانوسی نیاز به شرایط اولیه که از داده‌های اقلیمی به دست می‌آید، همچنین به واداشت‌های جوی شامل باد و شارش‌های گرما از هر دو نوع طول‌موج بلند و کوتاه، رطوبت ویژه و دما و سرعت باد (برای محاسبه تبخیر از مدل بالک) بارش و تنش‌های باد، همچنین به داده‌های توپوگرافی احتیاج دارند. اثر جزر و مد در گردش خلیج فارس به‌استثنای مناطق ساحلی ناچیز است [۱۱] و در این تحقیق در نظر گرفته

داده‌های اقلیمی در این تحقیق از اطلس اقیانوس شناسی جهانی دایلیو او آ^۲ استفاده شده است. دایلیو او آ یک مجموعه از داده‌های طولانی مدت دما، شوری، اکسیژن، فسفات، سیلیکات و نترات برای دوره‌های سالیانه، فصلی و ماهیانه برای اقیانوس‌های جهان است دایلیو او آ، ۴۰ سال تلاش برای محاسبه مشخصات جهانی اقیانوس از سال ۱۹۸۲ توسط لویتوس^۸ تا کنون داشته است. نوآ^۹، او سی آل^{۱۰} و دایلیو او آ با همکاری هم نگارش‌های قدیمی داده‌های اقلیمی را به وضوح بالاتر تمام متغیرها از ۳۳ تراز به ۱۰۲ تراز افزایش داده‌اند. این وضوح بالاتر می‌تواند انجام مدل‌های با دقت بیشتر را تسهیل کند و سبب کاهش خطا در مطالعاتی از قبیل تغییرات عمق لایه اختلاط شود. علاوه بر افزایش وضوح قائم، نسخه ۲۰۱۳ دارای وضوح‌های افقی ۰/۲۵ درجه در دسترس برای دما و شوری سالیانه و فصلی و ماهیانه می‌باشد [۱۴].

۲-۱. معرفی مدل‌های کام

مدل اقیانوسی‌های کام که در این تحقیق بکار رفته است دارای قابلیت سازگاری هر سه سیستم مختصات قائم، ژئو پتانسیل و سیگما و ایزوپیکنال می‌باشد. های کام می‌تواند در دریاهای کم عمق همانند اقیانوس عمیق بکار رود [۱۵]. انتخاب سیستم مختصات قائم معمول ژئوپتانسیل و سیگما و ایزوپیکنال هیچ کدام به تنهایی در هر جای اقیانوس مناسب نیستند، همان‌طور که در آزمایش‌های مقایسه مدل‌ها در اروپا داینامو^{۱۱} و در آمریکا دامی^{۱۲} صورت گرفته است. به‌طور ایده‌آل یک مدل گردش عمومی اقیانوسی باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- (الف) حفظ ویژگی‌های توده آب برای قرن‌ها (ویژگی مختصات هم‌چگالی)
- (ب) وضوح قائم خیلی بالا در لایه اختلاط سطحی (ویژگی مختصات ژئوپتانسیل) برای بیان صحیح فرایندهای ترمودینامیکی و بیوشیمیایی
- (ج) حفظ وضوح قائم مناسب در مناطق بدون چینه‌بندی یا با چینه‌بندی ضعیف
- (د) وضوح قائم خیلی بالا در مناطق ساحلی (ویژگی مختصات سیگما)

نشده است. اثرات رودخانه‌های ورودی در جریان مرزی آب‌های ورودی و خروجی خلیج فارس در منطقه تنگه هرمز ناچیز است و صرف نظر شده است. داده‌های مورد استفاده در مدل با توجه به وضوح آن‌ها هم از نظر مکانی و از نظر زمانی و همچنین از نظر معتبر بودن آن‌ها در مدل‌سازی اقیانوسی از اهمیت بسزایی برخوردار است و می‌تواند در نتایج مدل تأثیر بسزایی داشته باشد. در زیر توضیحات کلی در مورد داده‌های مورد استفاده داده شده است.

داده‌های توپوگرافی بکار رفته در این تحقیق از جکوکو^۲ استخراج شده است. جکوکو تحت نظارت سازمان بین‌المللی هیدروگرافی و کمسیون بین‌المللی اقیانوس شناسی فعالیت می‌کند. جکوکو توسط یک گروه بین‌المللی کارشناسان در نقشه‌برداری در فضای دریایی انجام می‌شود که مجموعه داده‌های ژرفاسنجی و محصولات داده‌ها را توسعه می‌دهند. جکوکو یک مدل زمینی برای اقیانوس و زمین است و دارای وضوح ۳۰ ثانیه می‌باشد که شامل ترکیبی از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط شناورها و ماهواره‌ها است. جکوکو یک جدول عموماً در دسترس برای داده‌های توپوگرافی اقیانوس و زمین است که در فرمت نت سی دی اف^۴ می‌باشند [۱۲]. برای درون‌یابی به شبکه‌های کام باید از کدهای برنامه نویسی فورترن استفاده شود.

داده‌های واداشت بکار رفته در این تحقیق ان سب سی اف اس^۳ نسخه دوم است که شامل دمای هوا، دمای سطح دریا، رطوبت ویژه، سرعت و جهت باد است. ان سب سی اف اس یک مدل کاملاً جفت شده است که برهم‌کنش بین جو، اقیانوس، زمین و یخ را بیان می‌کند و از ابتدای مارس ۲۰۱۱ داده‌های خروجی سی اف اس عملیاتی شده است. سی اف اس خروجی‌هایی را می‌دهد که از اعتبارسنجی کافی برخوردار هستند. سی اف اس یک بار در روز در مقیاس‌های زمانی چندگانه اجرا می‌شود. با محدوده متوسط برای یک هفته تا ۴ هفته و برای مدت طولانی تر سه تا نه ماه پیش‌بینی می‌نماید. نتایج این مدل برای مدت‌های زمانی کوتاه‌تر با مدل‌های سیستم پیش‌بینی جهانی، ناوگم^۶ و اف آی ام هم‌پوشانی دارد [۱۳].

کم عمق تبدیل می شود و به مختصات ژئوپتانسیل در آب خیلی کم عمق برمی گردد. انتقال آخری لایه ها از خیلی نازک شدن ضخامت آن ها جلوگیری می کند.

کاربر های کام بر روی تنظیم منطقه مدل، ایجاد میدان های واداشت و جذب هردوی میدان های خروجی و اقلیمی از دیگر مدل های شبیه سازی برای واهلس درونی و مرزی کنترل دارد. مدل برای دستگاه های بر پایه یونیکس طراحی شده است. نرم افزار های کام از طریق یک سری ماژول ها و فایل های ورودی و اسکرپت ها اجرا می شود. هدف مهم در توسعه، های کام به دست آوردن قابلیت انتخاب از چندین طرح واره اختلاط قائم برای لایه اختلاط سطحی و نیز اختلاط نسبتاً ضعیف تر دیاپیکنال درونی می باشد [۱۴-۱۶].

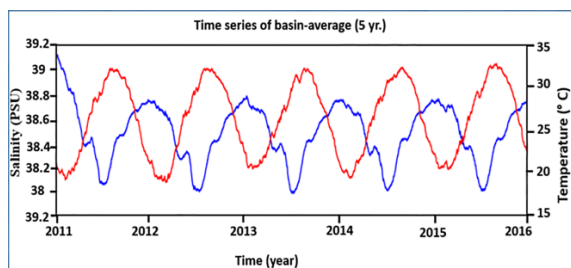
پنج الگوریتم اختلاط عمودی اصلی وجود دارد که سه تای آن ها مدل تفاضلی پیوسته و دو تای آن ها از نوع مدل بالک هستند. سه مدل تفاضلی عبارت اند از: کاپی پی^۵، جی آی اس اس^۶ و ملور یامادا^۷ تراز ۲/۵. این مدل ها اختلاط عمودی را در سراسر ستون آب به دست می دهند. مدل های بالک شامل ناپایداری دینامیکی پی دابلیو پی^۸ و مدل کراس ترنر^۹ می باشند. دیگر مدل های لایه اختلاط مانند مدل تلاطم توسعه یافته توسط کانتو در آینده نزدیک در مدل گنجانده خواهد شد [۱۷].

۲-۲. پیکربندی مدل

برای شبیه سازی کل خلیج فارس و بخش زیادی از دریای عمان (تا ۵۹/۹ درجه شرقی) در نظر گرفته شده است. شبکه بندی با توجه به تغییر اندازه شبکه با عرض جغرافیایی از پروژه مرکاتور استفاده شده است. منطقه بافر (منطقه مرزی حائل بین دو حوضه اقیانوسی) در مرز شرقی دریای عمان قرار گرفته شده با زمان بازگشت ۱ تا ۷۸ روز و عرض منطقه بافر ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است که برای مطالعه پیچک های منطقه مورد مطالعه مناسب می باشد (شکل ۱). وضوح افقی بکار رفته در مدل ۰/۰۵ درجه (حدود ۵ کیلومتر) است. برای توپوگرافی از داده های ۳۰ ثانیه جیکو استفاده شد، که به درون مدل با استفاده از تکنیک مکعبی درون یابی شده است. تصحیح توپوگرافی در مناطق ساحلی

مختصات هیبریدی در اقیانوس باز چینه بندی شده، بصورت هم چگالی است ولی به آرامی به مختصات سیگما در مناطق کم عمق تبدیل می شود و به مختصات ژئوپتانسیل در لایه اختلاط و یا دریا های بدون چینه بندی می تواند تبدیل گردد. مختصات هیبریدی محدوده جغرافیایی کاربرد مدل گردش اقیانوسی را گسترش می دهد (با توجه به کدهای هیبریدی موجود). همانند می کام^۳ و ان آل او ام^۴ اساس تئوری برای بکارگیری این چنین مدل هایی توسط بلک و بدرا و بلک و بنیامین در سال ۱۹۸۱ و در سال ۱۹۹۳ صورت گرفته است [۱۲-۱۳]. درهای کام هر سطح مختصات به صورت مرجع هم چگالی تعریف می شود. این مدل به طور پیوسته بررسی می کند که نقاط شبکه بر روی مرجع هم چگالی هستند یا نه، در غیر این صورت تلاش می کند که آن ها را بازگرداند. بنابراین در آب کم عمق، نقاط عمودی به طور هندسی محدود به باقی ماندن در اعماق ثابت هستند در حالی که اجازه دارند به هم ملحق و مرجع هم چگالی آن ها بر روی اعماق اقیانوس مجاور دنبال شوند.

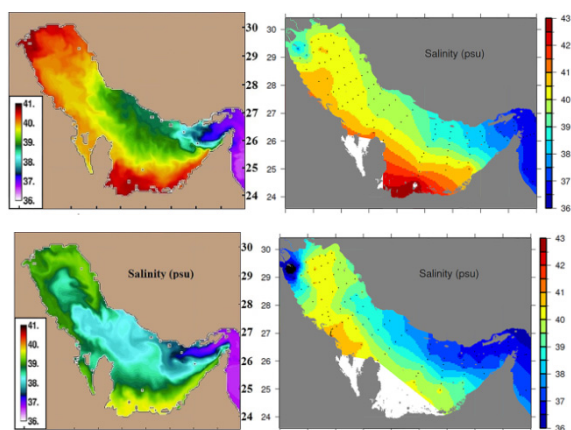
در لایه اختلاط، نقاط شبکه به طور عمودی واقع شده اند بنابراین به آرامی هر لایه فصل مشترک از هم چگالی به سطوح سطحی عمق ثابت تبدیل می شوند، جایی که فصل مشترک ها از لایه اختلاط خارج می شوند. بنابراین های کام شبیه مدل سیگما در مناطق اقیانوسی خیلی کم عمق و یا بدون چینه بندی و مانند مدل Z در لایه اختلاط یا دیگر مناطق بدون چینه بندی و مانند مدل مختصات هم چگالی در مناطق چینه بندی عمل می کند. در نتیجه، این مدل سودمندی انواع مختلف مختصات در شبیه سازی ویژگی های ساحلی و گردش اقیانوسی باز را دارا می باشد. مدل اقیانوسی مختصات هیبریدی (های کام) برای تعیین نقایص شناخته شده در الگوی مختصات عمودی می کام توسط رینر بلک و همکاران توسعه یافته است. های کام معادله اولیه، مدل گردش عمومی با مختصات عمودی است که در اقیانوس باز چینه بندی شده هم چگالی می ماند با این وجود مختصات عمودی هم چگالی به آرامی به مختصات Z در لایه اختلاط بالای اقیانوس با چینه بندی شده ضعیف و مختصات سیگما در مناطق آب



شکل ۲. نمودار پایداری دما و شوری برای ۵ سال اجرا از سال ۲۰۱۱ تا انتهای ۲۰۱۵

۳-۱. مقایسه با مشاهدات

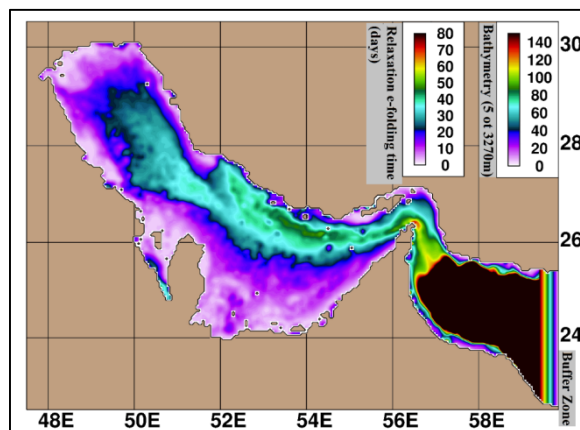
نتایج اولیه اجرای مدل، تغییر فصلی جبهه شوری بین جریان‌های مرزی آب‌های ورودی و خروجی خلیج فارس را نشان می‌دهد. مشاهدات میدانی در خلیج فارس به‌طور پراکنده از نظر زمانی و مکانی صورت گرفته همچنین برخی از آن‌ها قابل اعتماد نیستند. تنها اندازه‌گیری میدانی جامع در خلیج فارس، گشت مونت میشل در سال ۱۹۹۲ می‌باشد که در اوایل تابستان و زمستان انجام شده است. نتایج گشت مونت میشل را می‌توان به‌طور مفصل در مقاله رینولدز ۱۹۹۳ مرور کرد [۴]. در این تحقیق نتایج اجرای مدل به‌طور کلی با نتایج رینولدز مقایسه شده است. در شکل ۳ میدان شوری به‌دست آمده از اجرای مدل و مشاهدات رینولدز برای دو فصل تابستان و زمستان نشان داده شده است.



شکل ۳. میدان شوری سطحی از مشاهدات رینولدز (شکل راست) و نتایج اجرای مدل (شکل چپ) در اوایل زمستان (شکل‌های بالا) و اوایل تابستان (شکل‌های پایین).

تقریباً جبهه شوری بین مشاهدات و نتیجه مدل سازگاری دارند. البته مدل در مقایسه با مشاهده، جزئیات بیشتر و دقیق‌تری از جبهه شوری نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴

بدین صورت انجام شده است که از اعماق کمتر از ۰/۵ متر صرف‌نظر شده و اعماق کمتر از ۵ متر به مقدار ۵ متر در نظر گرفته شده است تا از خطا در انتگرال‌گیری مدل جلوگیری شود. داده‌های واداشت جوی از سی‌اف‌اس با وضوح مکانی ۰/۲ درجه و وضوح زمانی ۱ ساعته بکار رفته که برای شارش‌های تابشی طول‌موج بلند و کوتاه و دما و رطوبت به‌صورت مکعبی به درون مدل درون‌یابی شده است. این داده‌ها برای باد با تکنیک شبه مکعبی درون‌یابی شده است که در آن نقاط خشکی نزدیک دریا از تکنیک برون‌یابی^{۲۱} استفاده شده است تا از خطاهای ناشی از گرادیان‌های زیاد در مرز خشکی-دریا جلوگیری شود. جهت اجرای مدل‌های کام در این تحقیق ۲۹ لایه هیبریدی در نظر گرفته شده است. گام‌های زمان باروتروپیک (مد سریع) و باروکلینیکی به ترتیب ۱۵ و ۱۲۰ ثانیه می‌باشد که از شرط کورنت^{۲۲} بدست آمده است. از معادله حالت یونسکو با ۱۷ ترم در این تحقیق استفاده شده است. طرح‌واره تلاطمی بکار رفته در مدل، ملور و یامادا با تراز ۲/۵ است. انتگرال‌گیری مدل از ۱ ژانویه ۲۰۱۱ شروع و تا آخر ۲۰۱۵ ادامه یافته (به مدت ۵ سال) است.



شکل ۴. منطقه مورد مطالعه شامل عمق سنجی دربرهم‌نهی با منطقه بافر

۳. نتایج و بحث

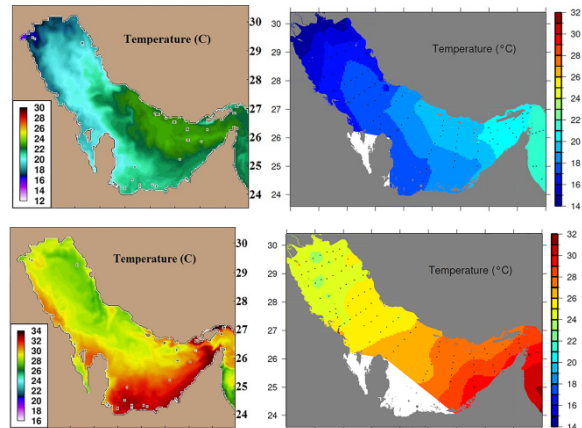
برای هماهنگی بهتر بین واداشت جوی و دریا، نتیجه سال آخر اجرا برای بررسی و تحلیل انتخاب شده است. شکل ۲ سری زمانی دما و شوری میانگین حوزه را برای ۵ سال اجرا نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که دما و شوری در یک سال اول اجرا به حالت پایدار رسیده اند و بیانگر این است که مدل در مدت‌زمان کوتاه پایدار شده است.

شکل ۴ میدان دمای سطحی ناشی از اجرای مدل و مشاهدات رینولدز را برای دو فصل تابستان و زمستان نشان می‌دهد. نتایج از دیدگاه کلی با مشاهدات، سازگاری دارد. میدان دما جبهه‌ای را نشان نمی‌دهد در صورتی که تغییرات فصلی میدان شوری جبهه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵ پروفایل چگالی پتانسیل با عمق ناشی از مشاهدات رینولدز را با نتایج اجرای مدل برای دو فصل تابستان و زمستان در ماههای جولای و آگوست نشان می‌دهد. مدل و مشاهدات توافق خوبی با یکدیگر دارند. شکل ۵ نشان می‌دهد که در تابستان تفاوت چگالی سطح با چگالی مجاور بستر زیاد می‌باشد در حالی که در زمستان تفاوت چگالی سطح با بستر ناچیز است که ناشی از عمیق بودن لایه اختلاط در زمستان است.

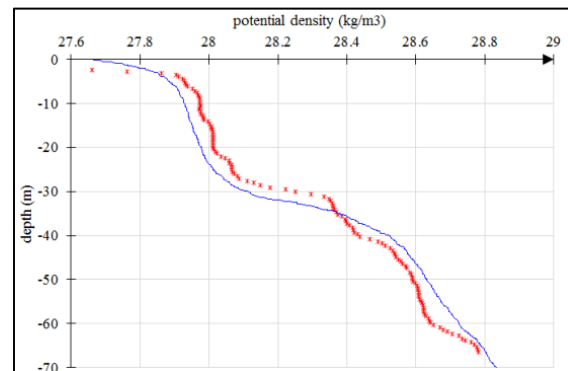
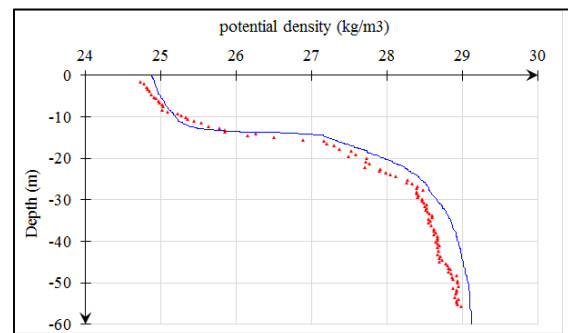
۳-۲. اثر اصطکاک بستر بر جبهه شوری

ضریب اصطکاک بستر همچنان ناشناخته است [۱۸]. جانسون و سنفورد ۱۹۲۶ برای دریای مدیترانه 0.003 و گریتون و سنفورد ۲۰۰۳ ضریب درگ بستر را بین 0.0029 تا 0.004 برای تنگه دانمارک در نظر گرفتند. چنگ و همکاران ۱۹۹۹ ضریب دراک روزانه را برای خلیج سانفرانسیسکو به‌طور میانگین روزانه از 0.002 تا حدود 0.006 در نظر گرفتند [۱۹-۲۱]. اصطکاک بستر به عواملی مانند مشخصات فیزیکی بستر (زبری، تیزی و...) و مشخصات فیزیکی آب بستگی دارد. ضریب اصطکاک بستر معمولاً به‌صورت تجربی به دست می‌آید که با اندازه‌گیری‌های متعدد توسط جریان‌سنج‌ها در نزدیکی بستر و بکار بردن فرمول بالک تعیین می‌شود. از طرف دیگری ضریب اصطکاک بستر نسبت به زمان و مکان متغیر است در حالی که مدل‌های اقیانوسی تنها قادرند یک مقدار میانگین را به‌عنوان ورودی برای مدل در نظر بگیرند. مشاهدات در خلیج فارس برای تعیین ضریب اصطکاک بستر صورت نگرفته است. جریان‌های خروجی عمیق و ورودی سطحی خلیج فارس نسبت به فصل و ماه‌های مختلف تغییرات عمده‌ای را نشان می‌دهد [۲۲-۲۳]. در این تحقیق نشان داده می‌شود جریان‌های ورودی و خروجی، جبهه شوری و فعالیت آن، ناپایداری و پیچک‌ها بشدت تحت تأثیر اصطکاک بستر (ضریب درگ بستر) می‌باشند. اثر اصطکاک بستر در ۱-۲

میدان دما و مشاهدات رینولدز را در دو فصل زمستان و تابستان مقایسه می‌کند. جبهه شوری در اوایل تابستان تا 53° شرقی پیشروی می‌کند در حالی که در زمستان تا 55° شرقی عقب‌نشینی می‌کند. که با مشاهدات رینولدز در توافق است.



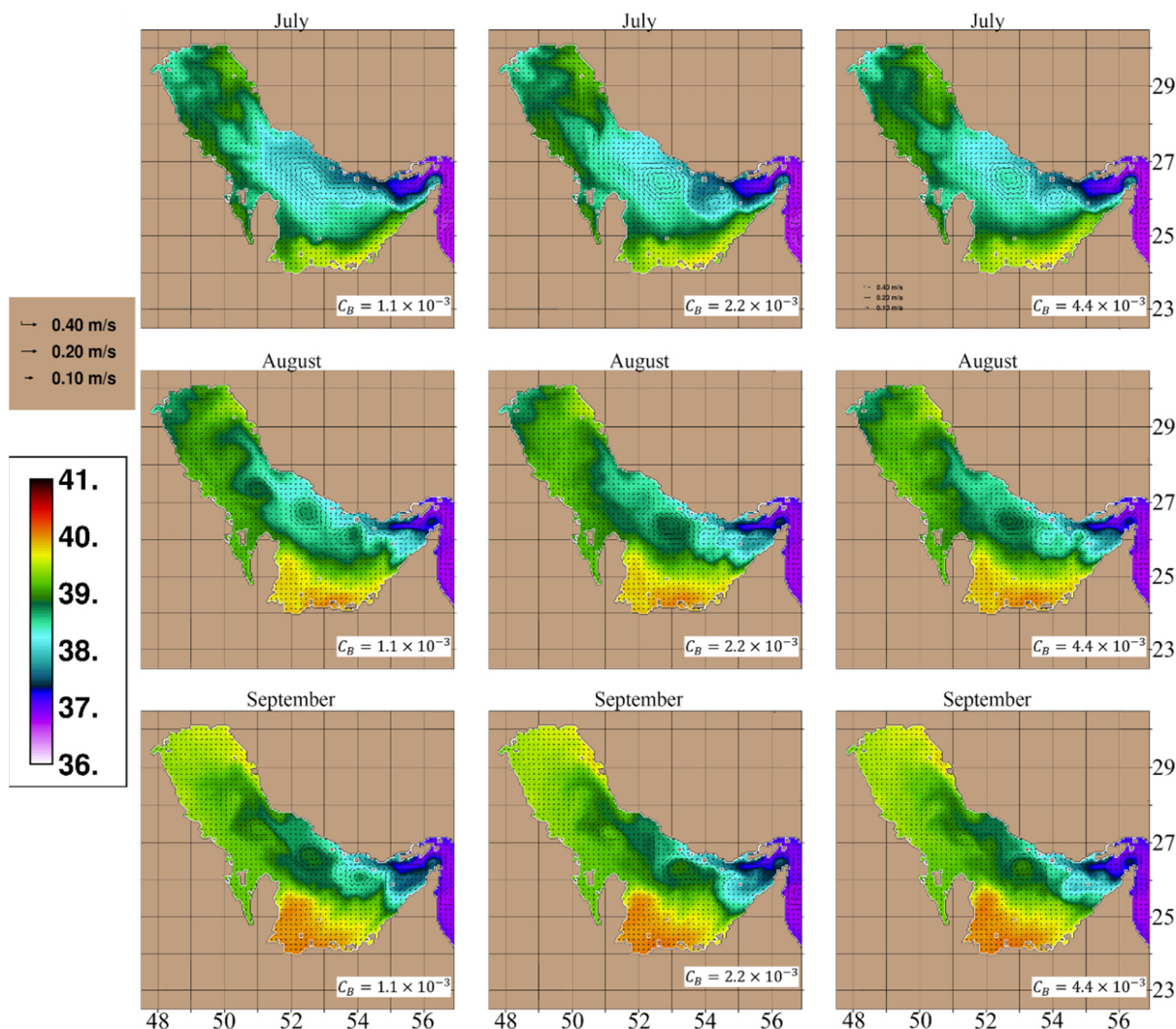
شکل ۴. میدان دمای سطحی از مشاهدات رینولدز (شکل راست) و نتایج اجرای مدل (شکل چپ) در اوایل زمستان (شکل‌های بالا) و اوایل تابستان (شکل‌های پایین).



شکل ۵. پروفایل چگالی پتانسیل در $(26^\circ N$ و $53^\circ E$) ناشی از مشاهدات رینولدز (قرمز)، اجرای مدل (آبی). شکل بالا برای ماه ژانویه و شکل پایین برای ماه جولای است.

بر فعالیت پیچکی امری غیرمعقول به نظر می‌رسد. ولی در این پژوهش مشاهده می‌شود که اصطکاک بستر بشدت فعالیت پیچک‌ها را در سطح تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۶).

متر نزدیک بستر با اهمیت است. در حالی که فعالیت پیچک‌ها و ناپایداری بارو کلینیکی در حدود چند ده متر بالای بستر صورت می‌گیرد. بنابراین در نگاه سطحی اثر اصطکاک بستر



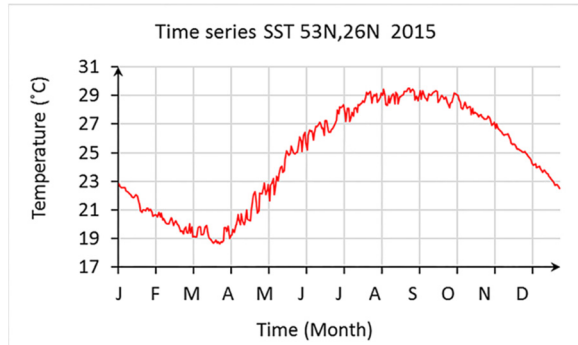
شکل ۶. بردار جریان در همپوشانی با شوری سطحی برای ماه‌های تابستان با ضرایب اصطکاکی متفاوت از نتایج اجرای مدل برای سال ۲۰۱۵

برای سه حالت اصطکاکی نشان می‌دهد. در ماه جولای بیشترین فعالیت پیچکی مربوط به ضریب اصطکاک بستر ۲/۲ است. پیچک‌ها در حالت ۱/۱ کشیده‌تر شده‌اند به دلیل این است که ناپایداری کاملاً به شکل پیچک درنیامده ولی حالت‌های ۲/۲ و ۴/۴ مشابه یکدیگر می‌باشند با این تفاوت که در ضریب اصطکاک بستر ۲/۲ پیچک دوقلو (سیکلونی و آنتی سیکلونی) در شرق خلیج فارس وجود دارد در حالی که با ضریب ۴/۴ فقط یک پیچک سیکلونی با مرکز شور وجود دارد. در ماه آگوست الگوی پیچکی در ضرایب ۲/۲ و ۴/۴ مشابه‌اند و پیچک‌هایی از هر دو نوع سیکلونی و آنتی

اصطکاک بستر، شارش خروجی نزدیک بستر در خلیج فارس را تحت تأثیر قرار داده و تغییر شارش خروجی باعث تغییرات در گرادیان فشار بین دو منطقه خلیج فارس و دریای عمان می‌گردد. این افت و خیز سطح آب در خلیج فارس و تغییر در گرادیان فشار می‌تواند به تغییرات در شارش ورودی منجر شود و در نتیجه فعالیت پیچک‌ها و تلاطم دوبعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش ضریب اصطکاک بستر در سه حالت ۰/۰۰۱۱، ۰/۰۰۲۲ و ۰/۰۰۴۴ مورد بررسی قرار گرفت که برای اختصار به ۱/۱ و ۲/۲ و ۳/۳ اشاره خواهد شد. شکل ۶ شوری سطحی در همپوشانی با بردار سرعت را

در ماه سپتامبر نسبت به جولای و آگوست بیشتر است که می توان به چینه بندی چگالی نسبت داد؛ بدین صورت که در چینه بندی چگالی برهمکنش لایه ها به سختی صورت می گیرد و بنابراین اثر اصطکاک بستر کاهش می یابد. در بخش بعدی سری زمانی شوری و دما و توان طیفی تلاطم بررسی می شود و اثر اصطکاک بستر بر آن ها بررسی می شود.

در اینجا به تحلیل سری زمانی و توان طیفی تلاطم در مرکز خلیج فارس (۲۶N و ۵۳E) پرداخته می شود، جایی که بیشترین فعالیت پیچکی به دلیل ورود و عقب نشینی جبهه شوری وجود دارد. خروجی مدل ۶ ساعته است بنابراین فرکانس های کمتر از ۱/۶ ساعت قابل تحلیل نمی باشند. شکل ۸ سری زمانی دمای سطحی را نشان می دهد سری زمانی دما یک نمودار شبه سینوسی است که به دلیل تغییرات فصلی دما در خلیج فارس و افت و خیز با فرکانس بالا مربوط به روز و شب ایجاد می شود. همان طور که انتظار می رفت افت و خیز دما رابطه ای با فعالیت پیچکی و ناپایداری ندارد. زیرا دما نقشی را در فعالیت پیچکی ایفا نمی کند.

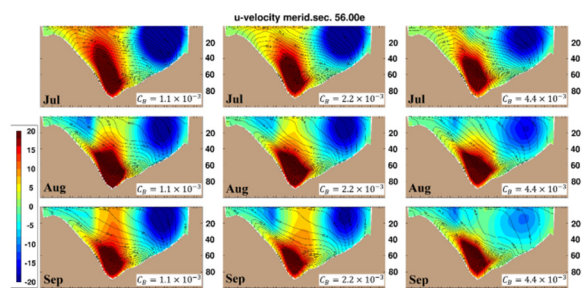


شکل ۸. سری زمانی دما در مرکز خلیج فارس (۲۶N و ۵۳E) برای سال آخر اجرا (۲۰۱۵)

برای بررسی اثر اصطکاک بستر بر سری زمانی و توان طیفی تلاطم، ضریب اصطکاک بستر را یک بار نصف و بار دیگر دو برابر در نظر می گیریم. شکل ۸ سری زمانی شوری را برای ضرایب متفاوت اصطکاک بستر نشان می دهد. به وضوح مشخص است که اصطکاک بستر تأثیر قابل توجهی را بر سری زمانی شوری دارد. بدین صورت که بر فرکانس های افت و خیز و زمان تشکیل پیچک ها تأثیر می گذارد. ایجاد پیچک در فصل زمستان در حالت ضرایب درگ ۰/۰۱۱ و

سیکلونی وجود دارند با این تفاوت که مکان و شدت پیچک ها اندکی باهم فرق دارد. ولی در حالت ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ چهار پیچک سیکلونی مجزا مشاهده می شود که با حالت ۲/۲ و ۴/۴ متفاوت است. در ماه سپتامبر بیشترین فعالیت پیچکی مربوط به ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ است و حالت های ۲/۲ و ۴/۴ مشابه اند با این تفاوت که در ۴/۴ سه پیچک سیکلونی و در ۲/۲ دو پیچک سیکلونی وجود دارد.

در این ماه از سال برای ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ پیچک هایی از هر دو نوع سیکلونی و آنتی سیکلونی وجود دارد. همان طور که در شکل ۶ مشخص شده است در ضرایب ۱/۱ و ۴/۴ پیچک هایی ظاهر می شود که در ضریب اصطکاک ۲/۲ وجود نداشت با توجه به اینکه چینه بندی چگالی نقش مهمی در بقای فعالیت پیچکی و تلاطم دوبعدی دارد. همچنین در ماه فوریه چینه بندی چگالی وجود ندارد بنابراین وجود این پیچک ها با مبانی نظری سازگاری ندارد می توان گفت که ضریب اصطکاک ۲/۲ بیشتر به واقعیت نزدیک است.



شکل ۷. برش مقطع سرعت نرمال در نزدیکی تنگه هرمز (۵۶E) برای ضرایب اصطکاک بستر متفاوت در ماه های تابستان از اجرای مدل (۲۰۱۵).

شکل ۷ برش مقطع سرعت نرمال را در ۵۶ درجه شرقی نزدیکی تنگه هرمز در ماه های فصل تابستان نشان می دهد در این شکل خطوط ایزوپیکنال در همپوشانی با بردار سرعت نرمال رسم شده است. همان طور که مشخص است اصطکاک بستر بر روی هردوی شارش ورودی و شارش خروجی تأثیر قابل توجهی دارد. نکته مهم این است که ماه های جولای و آگوست چینه بندی قوی چگالی وجود دارد و از ماه سپتامبر تضعیف چینه بندی چگالی شروع می شود. اثر اصطکاک بستر

چند ماه برای طیف تلاطمی پیچکی در این شکل مشاهده می شود. اصطکاک بستر بر طول عمر پیچکها اثر می گذارد که در جدول ۱ تأثیر اصطکاک بر طول عمر پیچکها بر اساس محاسبه فرکانس تلاطمی، ارائه شده است. همچنین روند مربوط به نمودار توان حدود ۲- برای طیف تلاطمی نشان می دهد که تلاطم بیشتر به دوی بعدی تا سه بعدی شباهت دارد. برای بررسی جزئیات ویژگیهای تلاطم دو بعدی در مقایسه با تلاطم سه بعدی می توان به کتاب والیس صفحه ۳۴۷ مراجعه کرد [۲۴].

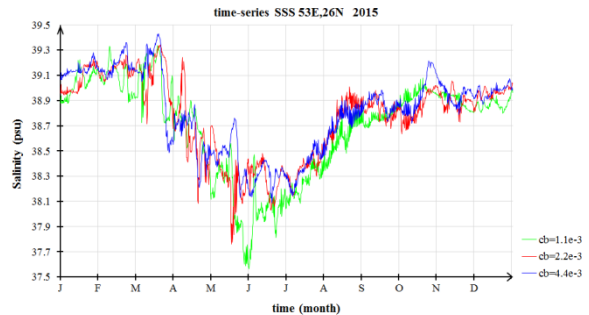
جدول ۱. اثر اصطکاک بستر بر مقیاس زمانی پیچکها با استفاده از تحلیل توان طیفی تلاطم

cb=۱/۱		cb=۲/۲		cb=۴/۴	
طول عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)	طول عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)	طول عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)
۵۲	۰/۰۰۵	۷۳/۵	۰/۰۰۳	۷۲/۹	۰/۰۰۳
۳۰/۵	۰/۰۰۸	۴۵/۵	۰/۰۰۶	۴۵/۵	۰/۰۰۶
۲۵	۰/۰۱	۳۵/۷	۰/۰۰۷	۳۳/۳	۰/۰۰۸
۱۸/۲	۰/۰۱۴	۲۵	۰/۰۱	۲۸/۱	۰/۰۰۹
۱۵/۸	۰/۰۱۶	۱۹/۲	۰/۰۱۳	۲۵	۰/۰۱
۱۳	۰/۰۱۹	۱۶/۷	۰/۰۱۵	۲۰/۸	۰/۰۱۲
۱۱/۳	۰/۰۲۲	۱۲/۵	۰/۰۲	۱۹/۲	۰/۰۱۳
۱۰/۹	۰/۰۲۳	۹/۳	۰/۰۲۷	۱۶/۷	۰/۰۱۵
۹/۶	۰/۰۲۶	۷/۴	۰/۰۳۴	۱۴/۷	۰/۰۱۷
۸	۰/۰۳۱	۶/۴	۰/۰۳۹	۱۳/۵	۰/۰۱۹
۶/۹	۰/۰۳۶	۶/۳	۰/۰۴	۱۲/۵	۰/۰۲
		۵/۴	۰/۰۴۶	۱۱/۳۶	۰/۰۲۲
		۵	۰/۰۵	۱۰	۰/۰۲۵
		۴	۰/۰۶۳	۹/۴	۰/۰۲۷
				۸/۶	۰/۰۲۹
				۸/۳	۰/۰۳

۴. خلاصه و نتیجه گیری

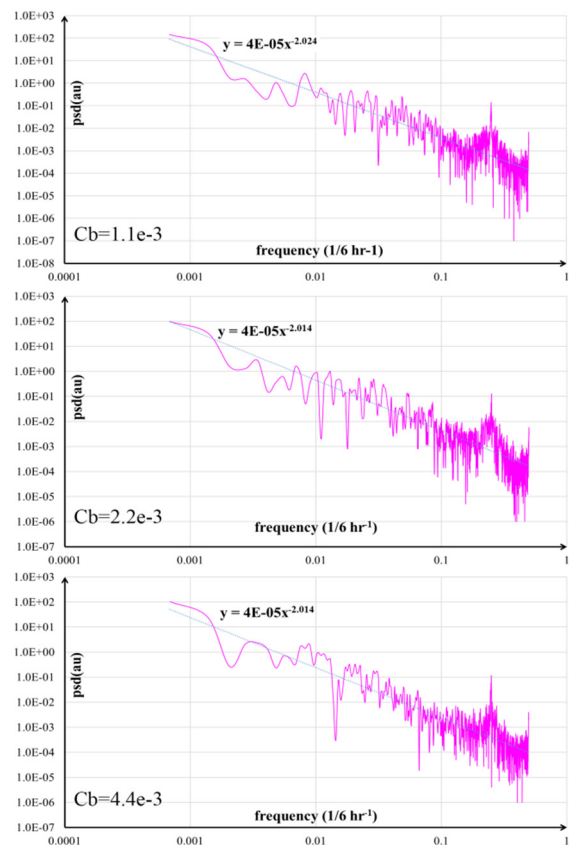
دینامیک جریانهای مرزی بین آبهای ورودی و خروجی خلیج فارس با استفاده از مدل عددی های کام در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. های کام یک مدل عددی هیبریدی است که قابلیت سازگاری با سیستم مختصات ژئوپتانسیل، سیگما و ایزوپیکنال را دارد و در دریای عمیق همانند دریای

۰/۰۰۴۴ نمودار می توان مشاهده کرد. در حالی که با توجه از بین رفتن چینه بندی چگالی در فصل زمستان، وجود پیچک غیرمحمول به نظر می رسد می توان ضریب درگ ۰/۰۰۲۲ را را نزدیک به واقعیت در نظر گرفت.



شکل ۹. سری زمانی شوری سطحی در مرکز خلیج فارس (۵۳E و ۲۶N) از اجرای مدل (۲۰۱۵) با ضرایب اصطکاک بستر متفاوت

Power Spectrum Density 53E, 26N SSS



شکل ۱۰. چگالی توان طیفی تلاطم از سری زمانی شوری با ضرایب اصطکاک متفاوت

شکل ۱۰ توان طیفی تلاطم را برحسب فرکانس برای ضرایب اصطکاک متفاوت نشان می دهد. طیف زمانی نیم روز تا

طیفی تلاطم نتیجه می‌شود که طیف تلاطم در ضرایب اصطکاک بستر متفاوت، بیشتر به تلاطم دوبعدی شباهت دارد.

تحلیل تأثیر اصطکاک بستر بر روی پیچک‌ها نشان می‌دهد که پایداری ستون آب نقش مهمی در تعیین ضریب اصطکاک بستر دارد به طوری که هر چقدر ستون آب پایدارتر باشد اصطکاک بستر کمتر است. همچنین پایداری ستون آب بر جریان‌های ورودی و خروجی تأثیر بسزایی دارد که در تابستان خیلی حساس‌تر به اصطکاک بستر هستند بنابراین چینه‌بندی چگالی نقش مهمی در اصطکاک بستر ایفا می‌کند.

منابع

- [1] Johns WE, Yao F, Olson DB, Josey SA, Grist JP, Smeed DA. Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred heat and freshwater budgets of the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003 Dec; 108(C12).
- [2] Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*. 2010 Sep; 40(9):2122-34.
- [3] Hunter JR. Aspects of the Dynamics of the Residual Circulation of the Persian Gulf. In: Gade HG, Edwards A, Svendsen H, editors. *Coastal Oceanography*. Boston, MA: Springer; 1983.p.31-42.(NATO Conference Series, vol 11)
- [4] Reynolds RM. Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*. 1993 Jan 1;27:35-59.
- [5] Chao SY, Kao TW, Al-Hajri KR. A numerical investigation of circulation in the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1992 Jul 15;97(C7):11219-36.
- [6] Lardner RW, Belen MS, Cekirge HM. Finite difference model for tidal flows in the Persian Gulf. *Computers & Mathematics with Applications*. 1982 Jan 1;8(6):425-44.
- [7] Blain CA. Modeling three-dimensional, thermohaline-driven circulation in the Persian Gulf. In: *Estuarine and Coastal Modeling*. 2000:74-93.
- [8] L'Hégaret P, Carton X, Louazel S, Boutin G. Mesoscale eddies and submesoscale structures of Persian Gulf Water off the Omani coast in spring 2011. *Ocean Science*. 2016 May 1;12(3).

کم عمق بکار می‌رود. مدل با استفاده از شرط اولیه از داده‌های اقلیمی دابلیو او آ و شرط مرز باز اسفنجی در شرق دریای عمان به مدت ۵ سال از ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ اجرا شد و نتایج سال ۲۰۱۵ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که پیچک‌ها در راستای جبهه شوری شکل می‌گیرند که نشان می‌دهد جبهه شوری محل ناپایداری بارو کلینیکی است. تغییر پذیری جبهه شوری علاوه بر فصول سال به اصطکاک بستر نیز وابسته است.

پیچک‌ها در مدت طول عمر به تدریج به سمت شرق حرکت می‌کنند. پیچک‌های سیکلونی دارای مرکز باشوری بیشتر هستند و پیچک‌های آنتی سیکلونی دارای مرکز با شوری کمتر می‌باشند. تحلیل طیفی ویژگی‌های آب در جبهه شوری مقیاس زمانی پیچک‌ها را نشان می‌دهد که از چند ساعت تا حدود ۳ ماه است.

یکی از ویژگی‌های دینامیکی جریان‌های مرزی این است که شدت آب ورودی سطحی به خلیج فارس رابطه مستقیمی با شدت آب خروجی عمقی دارد بدین صورت که وقتی جریان خروجی عمیق ضعیف می‌شود جریان ورودی سطحی نیز تضعیف می‌شود و همین‌طور اگر جریان خروجی عمیق قوی شود جریان ورودی سطحی قوی‌تر می‌شود. این به دلیل خروجی آب باشوری بیشتر از خلیج فارس و تغییر گرادیان فشار بین خلیج فارس و دریای عمان و تغییر جریان ورودی سطحی است. فعالیت پیچک‌ها معمولاً در ماه‌های فصل تابستان است، با این وجود فعالیت پیچکی محسوس در ضرایب اصطکاک بستر ۱/۱ و ۴/۴ در فصل زمستان علی‌الخصوص ماه نوامبر وجود دارد.

اصطکاک کمتر باعث کاهش طول عمر پیچک‌ها می‌شود طوری که طول عمر بادوام‌ترین پیچک‌ها از ۷۳ روزه ۵۲ روز کاهش می‌یابد، ولی در اصطکاک بیشتر تغییر چندانی در طول عمر پیچک‌ها مشاهده نمی‌شود. با این وجود طیف پیچک‌ها بشدت تحت تأثیر اصطکاک است. در اصطکاک بستر کمتر، پیچک آنتی سیکلونی مشاهده نمی‌شود ولی در حالت اصطکاک بیشتر از هر دو نوع طیف پیچکی سیکلونی و آنتی سیکلونی مشاهده می‌شود. از منحنی مربوط به توان

- Oceanographic Literature Review. 1995; 8(42):613-4.
- [20] Girton JB, Sanford TB. Descent and modification of the overflow plume in the Denmark Strait. *Journal of Physical Oceanography*. 2003 Jul;33(7):1351-64.
- [21] Cheng RT, Ling CH, Gartner JW, Wang PF. Estimates of bottom roughness length and bottom shear stress in South San Francisco Bay, California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999 Apr 15;104(C4):7715-28.
- [22] Yao F, Johns WE. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010 Nov 1;115(C11).
- [23] Yao F, Johns WE. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 2. Formation and export of Persian Gulf Water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010 Nov 1;115(C11).
- [24] Vallis GK. *Atmospheric and oceanic fluid dynamics*. Cambridge University Press; 2017 Jun 8:347-8.
- [9] سیوف جهرمی مریم. مدل‌سازی عددی اختلاط میان مقیاس چگالی در جبهه‌ها (مطالعه محدوده تنگه هرمز) [رساله دکترا]. خرمشهر: دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛ ۱۳۹۲.
- [10] Pous S, Lazure P, Carton X. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. *Continental Shelf Research*. 2015 Feb 15;94:55-70.
- [11] Blain CA. Barotropic tidal and residual circulation in the Persian Gulf. In: Spaulding ML Butler HL, editors. *Proceedings of the 5th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*; October 22-24, 1997; Alexandria, Virginia. American Society of Civil Engineers; 1998. p. 166-80.
- [12] Bleck R, Boudra DB. Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate. *Journal of Physical Oceanography*. 1981 Jun;11(6):755-70.
- [13] Bleck R, Benjamin SG. Regional weather prediction with a model combining terrain-following and isentropic coordinates. Part I: Model description. *Monthly Weather Review*. 1993 Jun;121(6):1770-85.
- [14] Bleck R, Halliwell GR, Wallcraft AJ, Carroll S, Kelly K, Rushing K. *HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) user's manual: Details of the numerical code*. HYCOM, version. 2002;2(01):1-211
- [15] Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean modelling*. 2002 Jan 1;4(1):55-88.
- [16] Wallcraft AJ, Metzger EJ, Carroll SN. Software design description for the hybrid coordinate ocean model (HYCOM), Version 2.2. Naval Research Lab Stennis Space Center MS Oceanography DIV; 2009 Feb 12:1-155
- [17] Canuto VM, Howard A, Cheng Y, Dubovikov MS. Ocean turbulence. Part I: One-point closure model—Momentum and heat vertical diffusivities. *Journal of Physical Oceanography*. 2001 Jun;31(6):1413-26.
- [18] Stewart RH. *Introduction to physical oceanography*. College Station: Texas A & M University; 2008 Sep.
- [19] Johnson GC, Lueck RG, Sanford TB. Stress on the Mediterranean outflow plume: part II. Turbulent dissipation and shear measurements.

پی‌نوشت

1. Sill
2. Hycom
3. The General Bathymetric Chart Of The Oceans
4. Netcdf
5. Ncep-Cfsr
6. Navgem
7. Woa
8. Levitus
9. Noaa
10. OCL
11. Dynamics Of North Atlantic Models
12. Data Assimilation And Model Evaluation Experiment
13. Micom
14. Navy Layered Ocean Model
15. KPP
16. Giss
17. Mellor-Yamada
18. PWP
19. Kraus Turner
20. Piece Wise Bi-Cubic
21. Extrapolate
22. Courant-Friedrichs-Lewy Condition