دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ چهارم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۳۹۷)

مقالهٔ پژوهشی

نقش اثر اصطکاک بستر بر تغییرپذیری جبهه شوری در خلیج فارس

عبدالصمد رهنمانیا[۱]، عباسعلی علی اکبری بیدختی[۲*]، مجتبی عظام[۳]، کامران لاری[٤]، سرمد قادر[٥]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران a.rahnemania@srbiau.ac.ir

[۲*] نویسندهٔ 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

[٤]دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال ،تهران k_lari@iau-tnb.ac.ir

[٥] دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران sghader@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۲٤ **تاریخ پذیرش:** ۹۷/۱۱/۸

چکیده

در این تحقیق با استفاده از مدل هیبریدی های‌کام، به بررسی نقش اصطکاک بستر در جبهه شوری پرداخته شده است. های‌کام 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 گرفته‌شده است ومحدوده شبیه‌سازی شامل کل خلیج‌فارس وبخش 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 وگام 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) به‌صورت پیچک‌های سیکلونی (مرکز شوری بیشتر) و آنتی‌سیکلونی(مرکزشوری 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 به‌وضوح نشان می‌دهد که پیشروی جبهه شوری به داخل خلیج‌فارس 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 مشاهد 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 اصطکاکی متفاوت، تلاطم تقریباً دوبعدی است.

واژه‌های کلیدی: جبهه شوری، ناپایداری باروکلینیکی، اصطکاک بستر، خلیج‌فارس

۱. مقدمه

آب‌های خلیج‌فارس 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 خلیج‌فارس، 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 و ج) شارش خروجی سطحی با شوری متوسط در قسمت جنوبی تنگه هرمز که به‌طور فصلی تغییر می‌کند [۱]. عوامل مؤثر گردش در خلیج‌فارس به ترتیب توسط بادهای غالب شمال غربی و شارش‌های شناوری و تغییر اندازه حرکت، واداشت ترموهالاینی 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 ترموهالاینی و گردش در خلیج فارس، تغییرات فصلی و بین سالی را نشان می‌دهد [۸]. خلیج‌فارس به دلیل عمق کم ، تنگه پهن‌تر به اقیانوس باز و عدم وجود پشته[1] قابل‌توجه و اختلاف شوری زیاد با دریای عمان دارای خصوصیات دینامیکی منحصربه‌فرد 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]. هرچند طبیعت سیکلونی گردش در خلیج فارس به‌خوبی تخمین زده‌شده است، ولی جزئیات دینامیکی آن بدون شناخت باقی‌مانده 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 خلیج‌فارس نیاز است. بین آب‌های شور خلیج‌فارس و آب‌های کم شورتر ورودی از دریای عمان، جبهه شوری در درون خلیج‌فارس شکل می‌گیرد که به‌طور فصلی تغییر می‌کند. این جبهه نسبت به واداشت‌ها درفصل های 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 مدل های‌کام[2] که مدل عددی هیبریدی است به بررسی اثر اصطکاک بستر به 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 خلیج‌فارس به‌استثنای مناطق ساحلی ناچیز است[۱۱] و در این تحقیق در نظر گرفته

نشده است. اثرات رودخانه‌های ورودی در جریان مرزی آب‌های ورودی و خروجی خلیج‌فارس درمنطقه تنگه هرمز ناچیز است و صرف‌نظر شده است. داده‌های مورداستفاده در مدل با توجه به‌وضوح آن‌ها هم ازنظر مکانی و ازنظر زمانی و همچنین ازنظر 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 مورداستفاده داده‌شده است.

داده‌های توپوگرافی بکار رفته در این تحقیق ازجبکو[۳] استخراج شده است. جبکو تحت نظارت سازمان بین‌المللی هیدروگرافی و کمسیون بین‌المللی اقیانوس‌شناسی فعالیت می‌کند. جبکو توسط یک گروه بین‌المللی کارشناسان در نقشه‌برداری در فضای دریایی انجام می‌شود که مجموعه داده‌های ژرفاسنجی و محصولات داده‌ها را توسعه می‌دهند.جبکو یک مدل زمینی برای اقیانوس و زمین است و دارای وضوح ۳۰ ثانیه می‌باشد که شامل ترکیبی از داده‌های اندازه گیری شده توسط شناورها و ماهواره‌ها است. جبکو یک جدول عموماً در دسترس برای داده‌های توپوگرافی اقیانوس و زمین است که در فرمت نت سی‌دی‌اف[۴] می‌باشند[۱۲]. برای درون‌یابی به شبکه‌های کام باید از کدهای برنامه نویسی فورترن استفاده شود.

داده‌های واداشت بکار رفته در این تحقیق ان سپ سی اف اس[۵]نسخه دوم است که شامل دمای هوا، دمای سطح دریا، رطوبت ویژه، سرعت و جهت باد است.ان سپ 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 یک‌بار در روز در مقیاس‌های زمانی چندگانه اجرا می‌شود. با محدوده متوسط برای یک هفته تا ۴ هفته و برای مدت طولانی‌تر 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].

داده‌های اقلیمی در این تحقیق از اطلس اقیانوس شناسی جهانی دابیلیو او آ[۷]استفاده شده است. دابیلیو او آ یک مجموعه از داده‌های طولانی‌مدت دما، شوری، اکسیژن، فسفات، سیلیکات و نیترات برای دوره‌های سالیانه ، فصلی و ماهیانه برای اقیانوس‌های جهان است دابیلیو 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 دابیلیو او آ با همکاری هم نگارش‌های قدیمی داده‌های اقلیمی را به‌وضوح 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 درمطالعاتی از قبیل تغییرات عمق لایه اختلاط شود. علاوه برافزایش وضوح قائم، نسخه ۲۰۱۳ دارای وضوح‌های افقی ۱و ۰/۲۵ درجه در دسترس برای دما وشوری 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 کم‌عمق همانند اقیانوس عمیق بکار رود[۱۵]. انتخاب سیستم مختصات قائم معمول ژئوپتانسیل و سیگما و ایزوپیکنال هیچ‌کدام به‌تنهایی در هر جای اقیانوس مناسب نیستند، همان‌طور که در آزمایش‌های مقایسه مدل‌ها در اروپادانامو[۱۱] و در آمریکا دامیی[۱۲] صورت گرفته است. به‌طور ایده‌ال 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)

مختصات هیبریدی در اقیانوس باز چینه‌بندی شده، بصورت هم چگالی است ولی به‌آرامی به مختصات سیگما در مناطق کم‌عمق تبدیل می‌شود و به مختصات ژئوپتانسیل در لایه اختلاط ویا دریاهای بدون چینه‌بندی می‌تواند تبدیل گردد. مختصات هیبریدی محدوده جغرافیایی کاربرد مدل گردش اقیانوسی را گسترش می‌دهد (با توجه به کدهای هیبریدی موجود). همانند می کام [۱۳]و ان آل او ام[۱۴] اساس تئوری برای بکارگیری این‌چنین مدل‌هایی 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 به‌صورت مرجع هم‌چگالی تعریف می‌شود. این مدل به‌طور پیوسته بررسی می کند که نقاط شبکه بر روی مرجع هم‌چگالی هستند یا نه، در غیر این صورت تلاش می کند که آن‌ها را بازگرداند. بنابراین در آب کم‌عمق، نقاط عمودی به‌طور هندسی محدود به باقی ماندن در اعماق ثابت هستند درحالی‌که اجازه دارند به هم ملحق و مرجع هم‌چگالی آن‌ها بر روی اعماق اقیانوس مجاور دنبال شوند.

در لایه اختلاط، نقاط شبکه به‌طور عمودی واقع‌شده‌اند بنابراین به‌آرامی هر لایه فصل مشترک از هم‌چگالی به سطوح سطحی عمق ثابت تبدیل می‌شوند، جایی که فصل مشترک‌ها از لایه اختلاط خارج می‌شوند. بنابراین های کام شبیه مدل سیگما در مناطق اقیانوسی خیلی کم‌عمق و یا بدون چینه‌بندی و مانند مدل z در لایه اختلاط یا دیگر مناطق بدون چینه‌بندی و مانند مدل مختصات هم‌چگالی در مناطق چینه‌بندی عمل می کند. درنتیجه، این مدل سودمندی انواع مختلف مختصات در شبیه‌سازی ویژگی‌های ساحلی و گردشی اقیانوسی باز را دارا می‌باشد. مدل اقیانوسی مختصات هیبریدی (های کام) برای تعیین نقایص شناخته‌شده در الگوی مختصات عمودی می کام توسط رینربلک و همکاران توسعه‌یافته است.های‌کام معادله اولیه، مدل گردشی عمومی با مختصات عمودی است که در اقیانوس باز چینه‌بندی شده هم‌چگالی می‌ماند با این‌وجود مختصات عمودی هم‌چگالی به‌آرامی به مختصات z در لایه اختلاط بالای اقیانوس با چینه‌بندی شده ضعیف و مختصات سیگما در مناطق آب کم‌عمق تبدیل می‌شود و به مختصات ژئوپتانسیل در آب خیلی کم‌عمق برمی‌گردد. انتقال آخری لایه‌ها از خیلی نازک شدن ضخامت آن هاجلوگیری می کند.

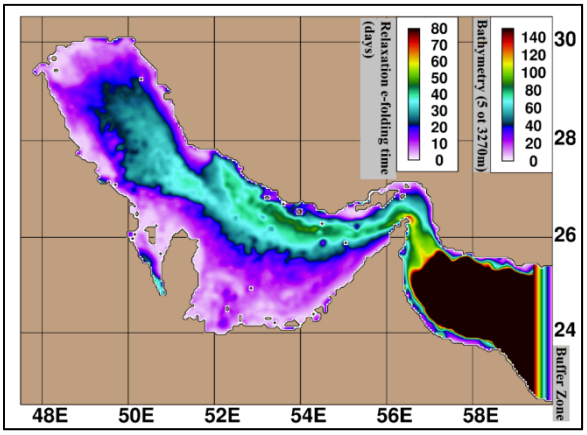
کاربر های‌کام بر روی تنظیم منطقه مدل ، ایجاد میدان‌های واداشت وجذب هردوی میدان‌های خروجی و اقلیمی از دیگر مدل‌های شبیه‌سازی برای واهلش درونی و مرزی کنترل دارد. مدل برای دستگاه‌های بر پایه یونیکس طراحی‌شده است. نرم‌افزار های‌کام از طریق یک سری ماژول‌ها و فایل‌های ورودی و اسکریپت‌ها اجرا می‌شود. هدف مهم در توسعه، های‌کام به دست آوردن قابلیت انتخاب از چندین طرح‌واره اختلاط قائم برای لایه اختلاط سطحی و نیز اختلاط نسبتاً ضعیف‌تر دیاپیکنال درونی می‌باشد[۱۴-۱۶] .

پنج الگوریتم اختلاط عمودی اصلی وجود دارد که سه تای آن‌ها مدل تفاضلی پیوسته و دو تای آن‌ها از نوع مدل بالک هستند. سه مدل تفاضلی عبارت‌اند از : کاپی‌پی[۱۵]، جی آی اس اس[۱۶]و ملور یامادا [۱۷]تراز ۲/۵. این مدل‌ها اختلاط عمودی را در سراسر ستون آب به دست می‌دهند. مدل‌های بالک شامل ناپایداری دینامیکی پی دابلیو پی [۱۸]و مدل کراس ترنر[۱۹]می‌باشند. دیگر مدل‌های لایه اختلاط مانند مدل تلاطم توسعه‌یافته توسط کانتو در آینده نزدیک در مدل گنجانده خواهد شد[۱۷].

۲-۲. پیکربندی مدل

برای شبیه‌سازی کل خلیج‌فارس و بخش زیادی از دریای عمان (تا ۵۹/۹ درجه شرقی) در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی 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 پیچک‌های منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد (شکل ۱). وضوح افقی بکار رفته در مدل ۰/۰۵درجه (حدود ۵ کیلومتر) است. برای توپوگرافی از داده‌های ۳۰ ثانیه جبکو استفاده شد، که به درون مدل با استفاده از تکنیک مکعبی درون‌یابی شده است. تصحیح توپوگرافی در مناطق ساحلی

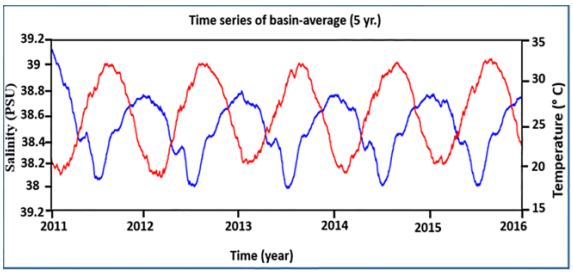
بدین‌صورت انجام شده است که از اعماق کمتر از ۰/۵ متر صرف‌نظر شده و اعماق کمتر از ۵ متر به‌مقدار ۵ متر در نظر گرفته‌شده است تا از خطا در انتگرال‌گیری مدل جلوگیری شود. داده‌های واداشت جوی از سی‌اف‌اس با وضوح مکانی ۰/۲ درجه و وضوح زمانی ۱ ساعته بکار رفته که برای شارش‌های تابشی طول‌موج بلند و کوتاه و دما و رطوبت به‌صورت مکعبی به درون مدل درون‌یابی شده است. این داده‌ها برای باد با تکنیک شبه مکعبی[۲۰] 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 مدل های کام در این تحقیق ۲۹ لایه هیبریدی در نظر گرفته‌شده است. گام‌های زمان باروتروپیکی (مد سریع) و باروکلینیکی به ترتیب ۱۵ و ۱۲۰ ثانیه می‌باشد که از شرط کورنت[۲۲] بدست آمده است. ازمعادله حالت یونسکو با ۱۷ ترم در این تحقیق استفاده شده است. طرح‌واره تلاطمی بکار رفته در مدل، ملور ویاماداا با تراز ۲/۵ است. انتگرال‌گیری مدل از ۱ ژانویه ۲۰۱۱ شروع و تا آخر ۲۰۱۵ ادامه یافته (به مدت ۵ سال) است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه شامل عمق سنجی دربرهم‌نهی با منطقه بافر

۳. نتایج و بحث

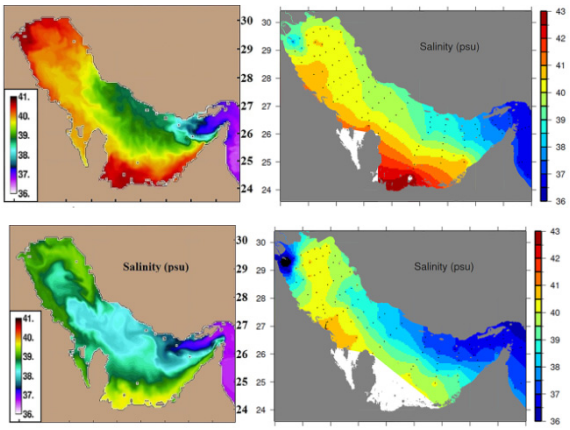
برای هماهنگی بهتر بین واداشت جوی و دریا، نتیجه سال آخر اجرا برای بررسی و تحلیل انتخاب‌شده است. شکل ۲ سری زمانی دما و شوری میانگین حوزه را برای ۵ سال اجرا نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که دما و شوری در یک سال اول اجرا به حالت پایدار رسیده اندو بیانگر این است که مدل در مدت‌زمان کوتاه پایدار شده است.



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

۳-۱. مقایسه با مشاهدات

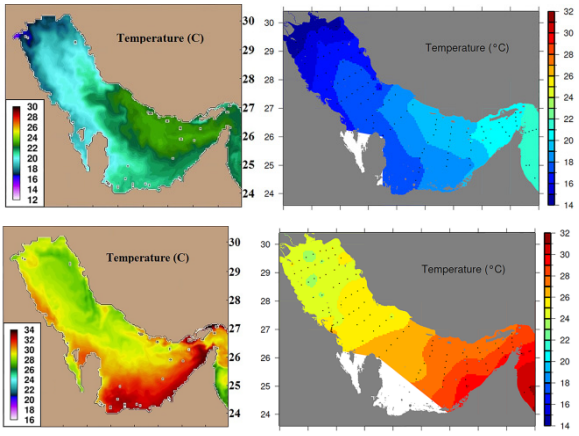
نتایج اولیه اجرای مدل، تغییر فصلی جبهه شوری بین جریان‌های مرزی آب‌های ورودی و خروجی خلیج‌فارس را نشان می‌دهد. مشاهدات میدانی در خلیج‌فارس به‌طور پراکنده از نظر زمانی و مکانی صورت گرفته همچنین برخی از آن‌ها قابل‌اعتماد نیستند. تنها اندازه‌گیری میدانی جامع در خلیج‌فارس، گشت مونت میشل در سال ۱۹۹۲ می‌باشد 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 به‌طورکلی با نتایج رینولدز مقایسه شده است. در شکل ۳ میدان شوری به‌دست‌آمده از اجرای مدل و مشاهدات رینولدز برای دو فصل تابستان و زمستان نشان داده شده است.



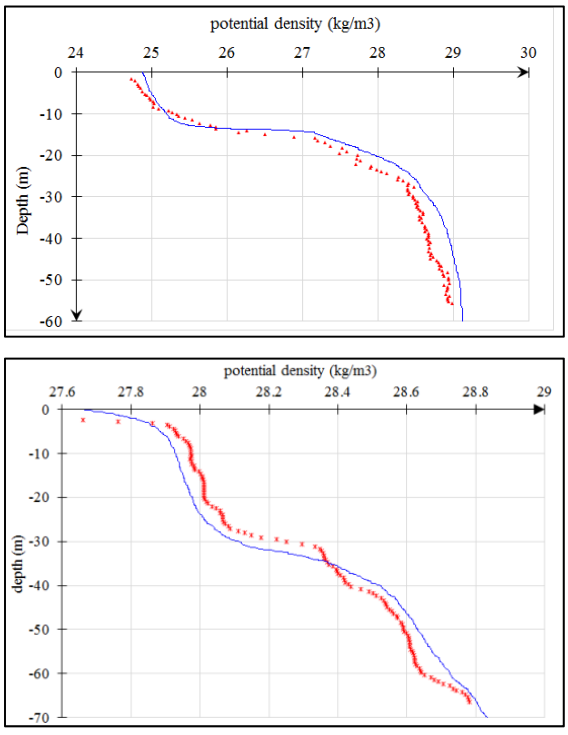
شکل ۳. میدان شوری سطحی از مشاهدات رینولدز (شکل راست) و نتایج اجرای مدل (شکل چپ) در اوایل زمستان (شکل‌های بالا) واوایل تابستان (شکل‌های پایین).

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

میدان دما و مشاهدات رینولدز را در دو فصل زمستان و تابستان مقایسه می‌کند. جبهه شوری در اوایل تابستان تا ۵۳ شرقی پیشروی می‌کند درحالی‌که در زمستان تا ۵۵ درجه 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) واوایل تابستان (شکل‌های پایین).



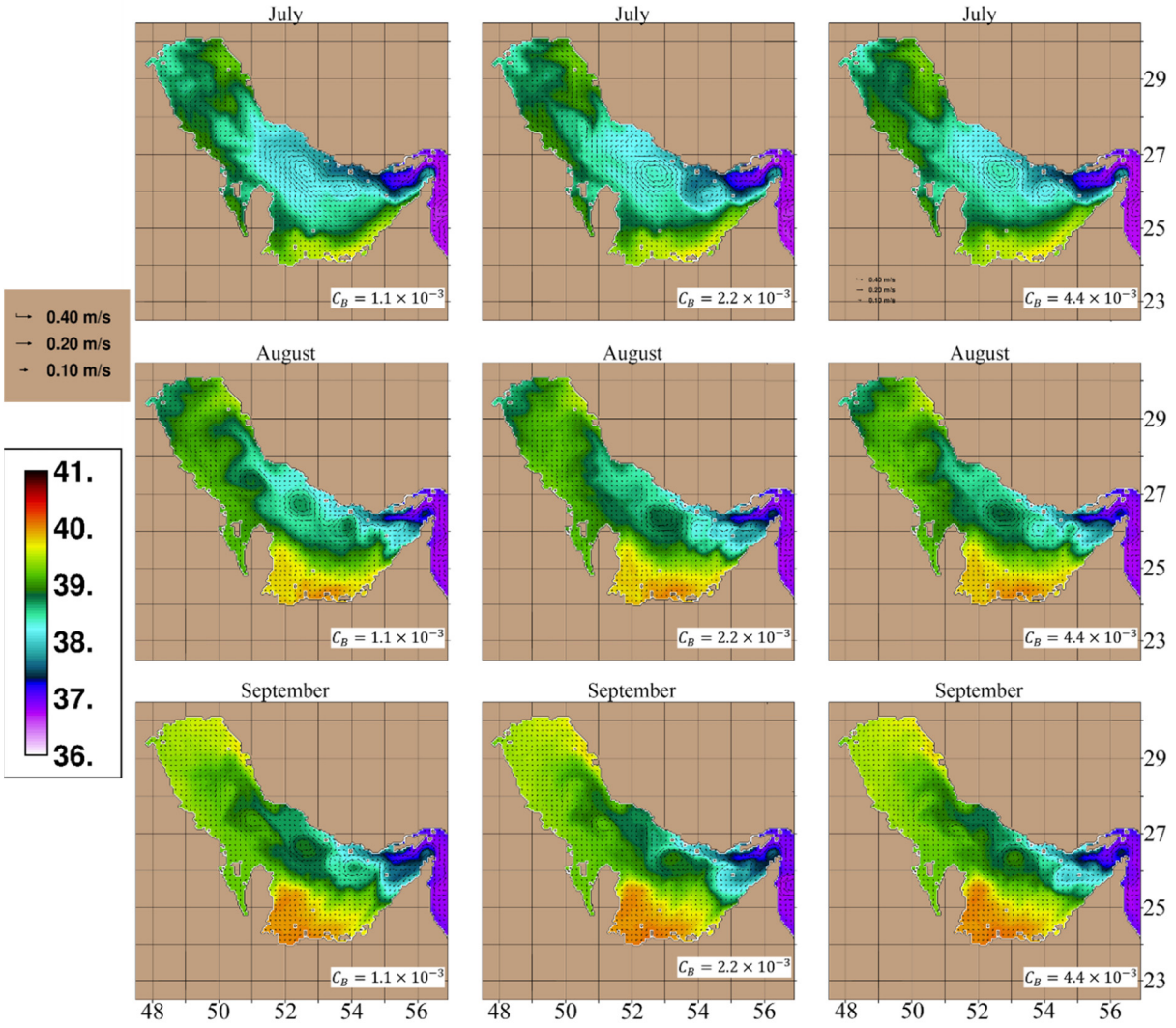
شکل ۵. پروفایل چگالی پتانسیل در (۵۳E و۲۶N) ناشی از مشاهدات رینولدز (قرمز)، اجرای مدل (آبی). شکل بالا برای ماه ژانویه و شکل پایین برای ماه جولای است.

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 درصورتی‌که 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 ۰/۰۰۳ و گریتون وسنفورد ۲۰۰۳ ضریب درگ بستر را بین ۰/۰۰۲۹ تا ۰/۰۰۴ برای تنگه دانمارک در نظر گرفتند. چنگ و همکاران ۱۹۹۹ ضریب دراگ روزانه را برای خلیج سانفرانسیکو به‌طور میانگین روزانه از ۰/۰۰۲ تا حدود ۰/۰۰۶ 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 درحالی‌که مدل‌های اقیانوسی تنها قادرند یک مقدار میانگین را به‌عنوان ورودی برای مدل در نظر بگیرند. مشاهدات در خلیج‌فارس برای تعیین ضریب اصطکاک بستر صورت نگرفته است. جریان‌های خروجی عمیق و ورودی سطحی خلیج‌فارس 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

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

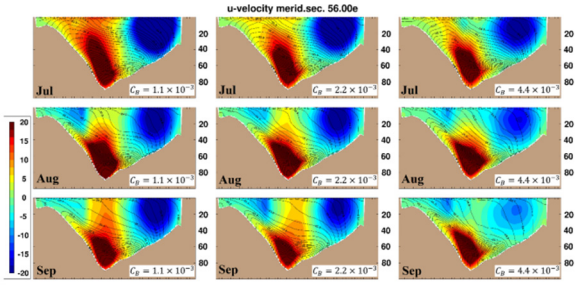


شکل ۶. بردار جریان در همپوشانی با شوری سطحی برای ماه‌های تابستان با ضرایب اصطکاکی متفاوت از نتایج اجرای مدل برای سال ۲۰۱۵

اصطکاک بستر، شارش خروجی نزدیک بستر در خلیج‌فارس را تحت تأثیر قرار داده و تغییر شارش خروجی باعث تغییرات در گرادیان فشار بین دو منطقه خلیج‌فارس و دریای عمان می‌گردد. این افت وخیز سطح آب در خلیج‌فارس و تغییر در گرادیان فشار می‌تواند به تغییرات در شارش ورودی منجر شود و درنتیجه 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 موردبررسی 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 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 خلیج‌فارس وجود دارد درحالی‌که 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

سیکلونی وجود دارند با این تفاوت که مکان و شدت پیچک‌ها اندکی باهم فرق دارد. ولی در حالت ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ چهار پیچک سیکلونی مجزا مشاهده می‌شود که باحالت ۲/۲و ۴/۴ متفاوت است. در ماه سپتامبر بیشترین فعالیت پیچکی مربوط به ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ است و حالت‌های ۲/۲ و ۴/۴ مشابه‌اند با این تفاوت که در ۴/۴ سه پیچک سیکلونی و در ۲/۲ دوپیچک سیکلونی وجود دارد.

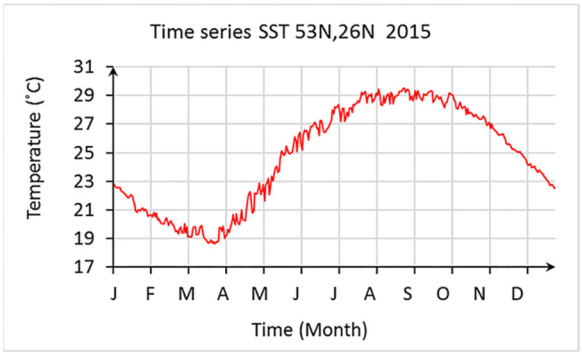
در این ماه از سال برای ضریب اصطکاک بستر ۱/۱ پیچک‌هایی از هر دو نوع سیکلونی و آنتی سیکلونی وجود دارد. همان‌طورکه در شکل ۶ مشخص‌شده است در ضرایب ۱/۱ و ۴/۴ پیچک‌هایی ظاهر می‌شود که در ضریب اصطکاک ۲/۲ وجود نداشت با توجه به اینکه چینه‌بندی چگالی نقش مهمی در بقای فعالیت پیچکی و تلاطم دوبعدی دارد. همچنین در ماه فوریه چینه‌بندی چگالی وجود ندارد بنابراین وجود این پیچک‌ها با مبانی نظری سازگاری ندارد می‌توان 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 ماه‌های تابستان ازاجرای مدل(۲۰۱۵).

شکل ۷ برش مقطع سرعت نرمال را در ۵۶ درجه شرقی نزدیکی تنگه هرمز در ماه‌های فصل تابستان نشان می‌دهد در این شکل خطوط ایزوپیکنال در همپوشانی با بردار سرعت نرمال رسم شده است. همان‌طور که مشخص است اصطکاک بستر بر روی هردوی شارش ورودی و شارش خروجی تأثیر قابل‌توجهی دارد. نکته مهم این است که ماه‌های جولای و آگوست چینه‌بندی قوی چگالی وجود دارد و از ماه سپتامبر تضعیف چینه‌بندی چگالی شروع می‌شود. اثر اصطکاک بستر در ماه سپتامبر نسبت به جولای وآگوست بیشتر است که می‌توان به چینه‌بندی چگالی نسبت داد؛ بدین‌صورت که در چینه‌بندی چگالی برهمکنش لایه‌ها به‌سختی صورت می‌گیرد و بنابراین اثر اصطکاک بستر کاهش می‌یابد. در بخش بعدی سری زمانی شوری و دما و توان طیفی تلاطم بررسی می‌شود و اثر اصطکاک بستر بر آن‌ها بررسی می‌شود.

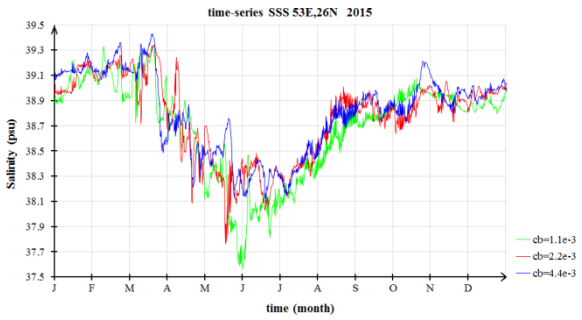
در اینجا به تحلیل سری زمانی و توان طیفی تلاطم در مرکز خلیج‌فارس (۲۶Nو۵۳E) پرداخته می‌شود، جایی که بیشترین فعالیت پیچکی به دلیل ورود و عقب‌نشینی جبهه شوری وجود دارد. خروجی مدل ۶ ساعته است بنابراین فرکانس‌های کمتر از ۱/۶ ساعت قابل‌تحلیل نمی‌باشند. شکل۸ سری زمانی دمای سطحی را نشان می‌دهد سری زمانی دما یک نمودار شبه سینوسی است که به دلیل تغییرات فصلی دما در خلیج‌فارس و افت وخیز با فرکانس بالا مربوط به‌روز و شب ایجاد می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت افت‌وخیز دما رابطه‌ای با فعالیت پیچکی و ناپایداری ندارد. زیرا دما نقشی را در فعالیت پیچکی ایفا نمی‌کند.



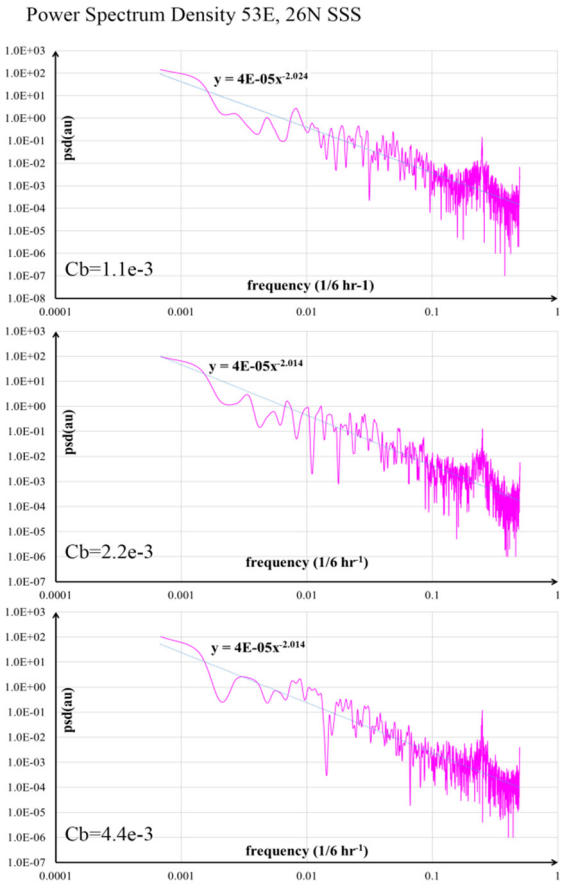
شکل ۸. سری زمانی دما در مرکز خلیج‌فارس (۲۶Nو۵۳E) برای سال آخر اجرا (۲۰۱۵)

برای بررسی اثر اصطکاک بستر بر سری زمانی و توان طیفی تلاطم، ضریب اصطکاک بستر رایک بار نصف و بار دیگر دو برابر در نظر می‌گیریم. شکل ۸ سری زمانی شوری را برای ضرایب متفاوت اصطکاک بستر نشان می‌دهد. به‌وضوح مشخص است که اصطکاک بستر تأثیر قابل‌توجهی را بر سری زمانی شوری دارد. بدین‌صورت که بر فرکانس‌های افت‌وخیز و زمان تشکیل پیچک‌ها تأثیر می‌گذارد. ایجاد پیچک در فصل زمستان در حالت ضرایب درگ ۰/۰۰۱۱و

۰/۰۰۴۴ نمودار می‌توان مشاهده کرد. درحالی‌که با توجه از بین رفتن چینه‌بندی چگالی در فصل زمستان، وجود پیچک غیرمحتمل به نظر می‌رسد می‌توان ضریب درگ ۰/۰۰۲۲ را نزدیک به واقعیت در نظر گرفت.



شکل۹. سری زمانی شوری سطحی در مرکز خلیج‌فارس (۲۶Nو۵۳E) از اجرای مدل (۲۰۱۵) با ضرایب اصطکاک بستر متفاوت



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

شکل ۱۰ توان طیفی تلاطم را برحسب فرکانس برای ضرایب اصطکاکی متفاوت نشان می‌دهد . طیف زمانی نیم روز تا چند ماه برای طیف تلاطمی پیچکی در این شکل مشاهده می‌شود. اصطکاک بستر بر طول عمر پیچک‌ها اثر می‌گذارد 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 می‌دهد که تلاطم بیشتر به دوبعدی تا سه‌بعدی شباهت دارد . برای بررسی جزئیات ویژگیهای تلاطم دو بعدی در مقایسه با تلاطم سه بعدی می‌توان 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=۴/۴		cb=۲/۲		cb=۱/۱	
طول عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)	طول‌عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)	طول‌عمر (روز)	فرکانس (1.6hr)
۷۲/۹	۰/۰۰۳	۷۳/۵	۰/۰۰۳	۵۲	۰/۰۰۵
۴۵/۵	۰/۰۰۶	۴۵/۵	۰/۰۰۶	۳۰/۵	۰/۰۰۸
۳۳/۳	۰/۰۰۸	۳۵/۷	۰/۰۰۷	۲۵	۰/۰۱
۲۸/۱	۰/۰۰۹	۲۵	۰/۰۱	۱۸/۲	۰/۰۱۴
۲۵	۰/۰۱	۱۹/۲	۰/۰۱۳	۱۵/۸	۰/۰۱۶
۲۰/۸	۰/۰۱۲	۱۶/۷	۰/۰۱۵	۱۳	۰/۰۱۹
۱۹/۲	۰/۰۱۳	۱۲/۵	۰/۰۲	۱۱/۳	۰/۰۲۲
۱۶/۷	۰/۰۱۵	۹/۳	۰/۰۲۷	۱۰/۹	۰/۰۲۳
۱۴/۷	۰/۰۱۷	۷/۴	۰/۰۳۴	۹/۶	۰/۰۲۶
۱۳/۵	۰/۰۱۹	۶/۴	۰/۰۳۹	۸	۰/۰۳۱
۱۲/۵	۰/۰۲	۶/۳	۰/۰۴	۶/۹	۰/۰۳۶
۱۱/۳۶	۰/۰۲۲	۵/۴	۰/۰۴۶		
۱۰	۰/۰۲۵	۵	۰/۰۵		
۹/۴	۰/۰۲۷	۴	۰/۰۶۳		
۸/۶	۰/۰۲۹				
۸/۳	۰/۰۳				

٤. خلاصه و نتیجه‌گیری

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

کم‌عمق بکار می‌رود. مدل با استفاده از شرط اولیه از داده‌های اقلیمی دابیلیو 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. تغییرپذیری جبهه شوری علاوه بر فصول سال به اصطکاک بستر نیز وابسته است.

پیچک‌ها در مدت طول عمر به‌تدریج 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 خلیج‌فارس رابطه مستقیمی با شدت آب خروجی عمقی دارد بدین‌صورت که وقتی جریان خروجی عمیق ضعیف می‌شود جریان ورودی سطحی نیز تضعیف می‌شود و همین‌طور اگر جریان خروجی عمیق قوی شود جریان ورودی سطحی قوی‌ترمی شود. این به دلیل خروجی آب باشوری بیشتر از خلیج‌فارس و تغییر گرادیان فشار بین خلیج‌فارس و دریای عمان و تغییر جریان ورودی سطحی است. فعالیت پیچک‌ها معمولاً در ماه‌های فصل تابستان است، بااین‌وجود فعالیت پیچکی محسوسی 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 روزبه ۵۲ روز کاهش می‌یابد، ولی در اصطکاک بیشتر تغییر چندانی در طول عمر پیچک‌ها مشاهده نمی‌شود. بااین‌وجود 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 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 به‌طوری که هرچقدر 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).

[۹] 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. 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.

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