

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.1.2.0](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1401.8.1.2.0)

درصد همانندی: ۲۳٪

شبیه‌سازی عددی گردش و پیچک‌های میان‌مقیاس اقیانوسی در خلیج فارس و دریای عمان

مینا عاشوری رودپشتی^۱، سارا الهیاری بیک^{۲*}، مجید قدسی حسن آباد^۳، امیرحسین جاوید^۴^۱ دانشجوی گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهرانmina.ashuri@srbiau.ac.ir^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهرانs.allahyari@srbiau.ac.ir^۳ استادیار گروه صنایع دریایی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهرانm.ghodsi@srbiau.ac.ir^۴ استاد گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهرانa.javid@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

چکیده

پیچک‌ها از پدیده‌های مهم اقیانوسی هستند که نقش زیادی در انتقال سیال در اقیانوس دارند. پیچک‌های مهم و اصلی در خلیج فارس به طور عمده ناشی از عواملی مانند وزش باد، جزر و مد و اختلاف چگالی است. در این پژوهش از مدل HD از بسته‌های سه‌بعدی مایک ۳ استفاده شده است. برای انجام دادن شبیه‌سازی‌ها، ابتدا مدل بزرگ‌مقیاس جریان برای کل محدوده دریای عمان و خلیج فارس اجرا شد و در ادامه تشکیل پیچک‌های میان‌مقیاس در خلیج فارس و دریای عمان توسط خروجی مدل مایک ۳ با وضوح ده کیلومتر و برای سال ۲۰۱۳ اجرا و در ۳۰ لایه تراز سیگما و Z شبیه‌سازی شده است. در تمام طول سال جریان ترموهالاینی از بستر کم‌عمق خلیج فارس وارد دریای عمان می‌شود و به مناطق عمیق‌تر نفوذ می‌کند و باعث نوساناتی در دما و شوری دریای عمان می‌شود. این جریان ترموهالاینی که به دریای عمان وارد می‌شود موجب تغییرات دمایی شده و این تغییرات سبب پیدایش پیچک‌هایی در دریای عمان می‌شود. یک جریان ساحلی در جهت شمال غربی از شمال تنگه هرمز وارد خلیج فارس شده و یک جریان جنوب غربی در قسمت جنوبی تنگه وجود دارد که این جریان ساحلی به سمت شمال در اواخر تابستان به صورت مجموعه‌ای از ادی‌های میان‌مقیاس تغییر شکل می‌دهد. اصلی‌ترین جریان در خلیج فارس چرخندی است و شکل کلی پیچک در خلیج فارس چرخندی است و پیچک‌های و اچرخندی در مرکز خلیج فارس از آوریل تا جولای قوی‌تر می‌شوند و در ماه آگوست به بیشترین وضوح خود می‌رسند. به همین دلیل در این پژوهش بیشتر، ماه‌هایی بررسی شده که پیچک‌ها وضوح بیشتری دارند.

واژه‌های کلیدی: پیچک میان‌مقیاس، دما، شوری، خلیج فارس، دریای عمان

۱. مقدمه

شناخت محیط پیچیده دریا و بهره‌برداری بهینه از آن موضوع گسترده‌ای است که مورد توجه بسیاری از متخصصان، پژوهشگران صنایع مرتبط و سازمان‌های وابسته قرار گرفته است. کشور ایران نیز با داشتن مرزهای آبی طولانی در جنوب و شمال نیاز به پیشرفت در زمینه دانش و فناوری علوم و تجهیزات دریایی دارد. پیچک‌ها نقش زیادی در انتقال سیال در اقیانوس دارند [۱].

از این رو به دلیل اهمیت موضوع، در این تحقیق به مدل‌سازی و بررسی پیچک‌های منطقه با هدف شناخت هرچه بیشتر آن‌ها پرداخته شد. پیچک‌ها حلقه‌هایی هستند که در حاشیه جریان اصلی در اثر ناپایداری شکل می‌گیرند. از عوامل ایجاد پیچک‌ها، ناپایداری باروکلینیک - باروتروپیک ناشی از جبهه‌ها و جریان‌ها، برهم‌کنش با توپوگرافی بستر و نیروی جوی می‌باشد. نمونه بارز پیچک‌ها را می‌توان در گلف استریم مشاهده نمود که در اثر اختلاف چگالی (ناشی از اختلاف دما و شوری) به وجود آمده‌اند [۲].

پیچک‌ها در مقیاس‌ها و ابعاد افقی مختلف دیده می‌شوند. ابعاد آن‌ها ممکن است از چند ده کیلومتر تا ۱۰۰ کیلومتر نیز گسترش یابد. پیچک‌ها در انتقال جرم در راستای قائم، گرما، شوری، اکسیژن و نیتروژن نقش به‌سزایی را ایفا می‌کنند [۳].

تحقیقات بسیاری در منطقه مورد مطالعه انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق سمقی و همکاران در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد که با استفاده از مدل مایک ۳ به مدل‌سازی خلیج فارس و سپس مطالعه جریانات جزرومدی پرداخته‌اند که نتایج نشان داد که از وضوح خیلی خوبی برخوردار نبوده است [۴].

همچنین رهنمایا و همکاران در سال ۱۳۹۶ به مطالعه عددی گردش در خلیج فارس با تأکید بر ساختار جبهه‌ای بین آب‌های ورودی و خروجی پرداخته‌اند. در این تحقیق با

استفاده از مدل عددی هایکام^۱، ویژگی‌های دینامیکی جبهه شوری بین آب‌های ورودی خلیج فارس و خروجی دریای عمان بررسی شد. نتایج مدل به وضوح تغییرات فصلی جبهه شوری را نشان می‌دهد که بیشترین پیشروی را به داخل خلیج فارس در تابستان دارد. دمای سطحی در خلیج فارس در تابستان در حدود ۲۵ درجه سلسیوس و در تنگه هرمز ۳۰ درجه سلسیوس است. در زمستان دمای سطح خلیج فارس حدود ۱۵ درجه سلسیوس و در تنگه هرمز حدود ۲۲ درجه سلسیوس است، یعنی هر چه از تنگه هرمز به سمت شمال غرب می‌رویم دما کم می‌شود که کاهش دما در مناطق شمال غرب به دلیل ورود آب‌های اروندرود به خلیج فارس و نزولات جوی بیشتر در منطقه می‌باشد. در اعماق نیز تغییرات به همین شکل است، دمای آب‌های عمقی در نواحی دور از شمال بین ۱۸ درجه در زمستان تا ۲۵ درجه در تابستان متغیر است. در آب‌های سطحی شوری در تنگه هرمز در زمستان ۳۷ جزء در هزار است که هر چه به سمت سواحل جنوبی نزدیک می‌شویم شوری آب‌های سطحی افزایش می‌یابد و در سواحل عربستان به ۴۲ جزء در هزار و سواحل امارات به ۴۴ جزء در هزار می‌رسد. علت این افزایش تبخیر زیاد و سکون آب است. در سواحل ایران شوری در حدود ۳۸ جزء در هزار است. عمق کم خلیج و تبخیر شدید از عوامل اصلی شوری زیاد محسوب می‌شوند. آب‌های ورودی به خلیج فارس در امتداد سواحل ایران به طرف شمال حرکت می‌کنند و به علت تبخیر شوری آن‌ها افزایش یافته و به عمق می‌روند و همین مسئله در خلیج فارس موجب بروز یک جریان سطحی با آب شیرین‌تر به سوی شمال غربی و خروج جریان بستر با آب شورتر از سمت دیگر می‌شود [۵].

رئسی و همکاران در سال ۱۳۹۸ به مطالعه پیچک‌های میان‌مقیاس تحت تأثیر جریان‌های ساحلی در خلیج فارس و نقش آن در اقلیم منطقه پرداخته‌اند و پیچک‌های میان‌مقیاس را با نرم‌افزار Arc Gis شناسایی و ردیابی کردند. بیشترین محدوده فعالیت پیچک‌ها در بخش ورودی و شمال غربی

خلیج فارس است. قوی‌ترین پیچک‌ها در تابستان مشاهده شده است که مطابق با نتایج شبیه‌سازی بیشترین شدت جریان‌ها نیز در ماه‌های جون تا آگوست می‌باشد [۶].

لگرت و همکاران (۲۰۱۳) در مورد پیچک‌های میان‌مقیاس و ساختارهای کوچک‌مقیاس آب‌های خلیج فارس و دریای عمان مطالعه کرده و بیان کردند، آب‌های با شوری زیاد خلیج فارس از طریق تنگه هرمز به دریای عمان جاری می‌شوند و در آنجا تحت تأثیر پیچک‌های میان‌مقیاس پرنرژری گسترش می‌یابند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک پیچک غیرچرخشی در دهانه دریای عمان، دو پیچک پرنرژری در طول ساحل جنوبی عمان در دریای عرب و یک پیچک میان‌مقیاس قوی غیرچرخشی در قسمت غربی دریای عمان وجود دارد. دیگر مشخصه این مشاهدات، پیچک‌های میان‌مقیاس دوقطبی قوی در جهت رأس‌الاحد می‌باشد. خلیج فارس به عنوان سومین خلیج جهان یک حوضه آبی شور، نیمه بسته و کم‌عمق با میانگین عمق ۳۵ متر است که از شرق از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به اقیانوس هند و دریای عرب و از غرب به دلتای رودخانه اروندرود که حاصل پیوند دو رودخانه دجله و فرات و پیوستن رود کارون به آن است، ختم می‌شود [۷].

توپیل و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از مدل عددی هایکام و با وضوح یک کیلومتر، به شبیه‌سازی گردش و پیچک‌های میان‌مقیاس در خلیج فارس پرداخته‌اند. نتایج مدل پیشرفت یک سلول گردشی ساعت‌گرد در طی ماه‌های مارس تا جولای در نیمه شرقی خلیج فارس (۵۲ تا ۵۵ درجه شرقی) را نشان می‌دهد. همچنین نتایج مدل بیانگر وجود سه پیچک ساعت‌گرد در دوره آگوست تا سپتامبر بود که سازگاری خوبی با مشاهدات دمای سطحی دریا را نشان می‌داد [۸].

گردش آب در خلیج فارس به طور عمده ناشی از سه عامل اثر باد، تغییر چگالی (جریان‌های ترموهالاینی^۲) و جزر و مد است [۹].

اصلی‌ترین جریان در خلیج فارس (چرخندی^۳) در اثر اختلاف چگالی ایجاد می‌شود. شوری بیشتر آب‌های خلیج فارس نسبت به شوری اقیانوس، موجب پیدایش جریان از اقیانوس هند به خلیج فارس شده است. آب با شوری معمول اقیانوسی از تنگه هرمز وارد خلیج فارس شده و به سمت شمال غرب به موازات سواحل ایران حرکت نموده و در بخش غربی حوضه به سمت جنوب تغییر مسیر می‌دهد. در طی پیمودن این مسیر در اثر فرایند تبخیر، آب چگال‌تر می‌شود و شوری آن بیشتر می‌شود و در نهایت این جریان آب پس از پیمودن بخش‌های جنوبی چگال‌تر شده و از بستر تنگه هرمز خارج می‌شود. تبادل آب بین خلیج فارس و دریای آزاد باعث می‌شود، آب حالت دو لایه داشته باشد. اختلاط افقی باعث شکل‌گیری زبانه‌های شور ترموهالاینی می‌شود. در حاشیه توده‌های آب جریان ترموهالاینی با نفوذ جانبی یک توده آب در توده دیگر (با ویژگی‌های متفاوت ترموهالاینی) در عمقی مشخص جبهه ترموهالاینی ایجاد می‌شود که با گرادیان‌های افقی دما و شوری همراه هستند، در مجموع به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که در راستای قائم ستون آب پایدار باشد [۱۰]. همچنین، نوسانات در نیروی تنش باد باعث ایجاد جریانی متغیر در تنگه هرمز می‌شود. این چرخش تبدالی، باعث ایجاد ناپایداری محلی و تولید پیچک‌های^۴ چرخندی می‌شود [۱۱].

رابطه تنگاتنگی بین تلاطم و ایجاد پیچک‌ها وجود دارد، هرچه جریان تلاطمی‌تر، پیچک‌ها بزرگ‌تر. پیچک‌ها سائز و اندازه مختلف دارند (دارای طیفی از سائز از چند سانتی‌متر تا چند هزار کیلومتر)، همچنین جهت چرخش و حرکت آن‌ها متفاوت و تصادفی است (واچرخندی و چرخندی) و در راستای افقی^۸ برابر بهتر می‌توانند انرژی را منتقل کنند زیرا در راستای قائم پایداری وجود دارد و مانع حرکت پیچک می‌شود [۱۲].

یک ادی جهت چرخش آن است که در این پژوهش، با اجرای مدل مایک ۳، چگونگی تشکیل این پیچک‌های میان‌مقیاس در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است.

۲-۱. معرفی مدل

اولین قدم در مدل‌سازی هر پدیده شناخت آن به لحاظ دوبعدی و یا سه‌بعدی بودن آن است. مدل مورد استفاده در این مقاله، مدل مایک ۳ بوده و در مدل‌سازی‌های مربوط به اقیانوس‌ها، مناطق ساحلی و خورها استفاده می‌شود. این مدل قادر به مدل‌سازی جریان غیردائمی با در نظر گرفتن تغییرات بستر، تغییرات چگالی و همچنین تغییرات جزرومدی است.

۲-۲. معادلات حاکم بر مدل

معادلات مورد استفاده در حالت سه‌بعدی به صورت معادلات ناویر-استوکس^۵ با فرض فشار هیدرواستاتیک هستند. شبکه‌بندی مورد استفاده در راستای افقی به صورت نامنظم^۶ است. شبکه‌های نامنظم برای پوشش دادن مرزهای پیچیده مانند خطوط ساحلی و مرزهای اطراف جزیره مناسب‌تر از شبکه‌های منظم^۷ مستطیلی هستند. علاوه بر این، استفاده از شبکه‌های نامنظم مثلثی برای کوچک کردن شبکه‌ها به منظور به دست آمدن دقت بیشتر در مناطق دلخواه که امکان استفاده از مش‌های منحنی‌الخط^۸ نباشد، راه‌حل مناسبی به نظر می‌رسد؛ بنابراین با وجود شبکه‌های نامنظم نیازی به استفاده از شبکه‌های تودرتو^۹ نیست. استفاده از شبکه‌های نامنظم علاوه بر منجر شدن به دقت بیشتر در نتایج، به صرفه‌جویی در زمان و هزینه اجرای برنامه نیز منجر خواهد شد. علاوه بر شبکه‌بندی افقی نامنظم، لایه‌بندی در راستای قائم نیز به صورت ترکیبی از سیگما و تراز^{۱۰} بوده و روش عددی مورد استفاده برای حل معادلات به صورت حجم محدود است.

چگالی تابع سه پارامتر دما، شوری و فشار است و به دلیل کم بودن عمق خلیج فارس از تأثیر فشار صرف نظر می‌شود. میزان چگالی از سواحل ایران به سمت سواحل امارات افزایش می‌یابد [۱۳].

هرچه از تنگه هرمز به طرف مرکز خلیج پیشروی کنیم اختلاف چگالی بین آب‌های سواحل ایران و سواحل جنوبی کاهش می‌یابد (البته در سواحل غربی باید تأثیر رودها را بر کاهش چگالی در نظر گرفت). در فصل گرما تغییرات چگالی سطحی آب‌ها بیشتر تحت تأثیر دماست و در تابستان یک ترموکلاين فصلی ایجاد می‌شود. مقدار چگالی آب‌های سطحی خلیج فارس از ۲۲ در تابستان تا ۲۸/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در زمستان متغیر است و میزان چگالی آب‌های عمقی نیز از ۲۲ در تابستان تا ۲۹/۹ کیلوگرم بر مترمکعب در زمستان تغییر می‌کند.

با توجه به اینکه برخی از پژوهش‌های مشابه قبلی دقت خوبی نداشته است در این پژوهش از نرم‌افزار مایک ۳ با وضوح بیشتر استفاده شده تا بررسی شود که آیا با این دقت اندازه‌گیری می‌توان به جواب درست رسید یا نه. در این راستا نتایج منتج از این مدل با نتایج دو تحقیق توپیل و همکاران در سال ۲۰۱۰ و رهنمایا در سال ۱۳۹۶ مقایسه شد.

۲. مواد و روش‌ها

امروزه ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مهم‌ترین وسیله‌ای است که استفاده‌کنندگان، طراحان سامانه سوناری و پژوهشگران می‌توانند با آن، پارامترهای طراحی سیستم‌های مورد نظر را در شرایط محیطی مختلف بررسی نمایند. ضمن اینکه، مدل‌سازی عددی (در مقایسه با انجام آزمایش‌های تجربی در دریا) هزینه بسیار کمتر و بازدهی بیشتری دارد. پیچک‌هایی که در اقیانوس مشاهده می‌شوند، به صورت یک پدیده فیزیکی مطالعه می‌شوند و به‌طور عمومی اولین مشخصه

۲-۲-۱. معادلات سه‌بعدی در مختصات سیگما

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} = \quad (5-2)$$

در این مطالعه به دلیل اینکه مختصات سیگما در نظر گرفته شده است از بیان معادلات در مختصات کارتزین صرف نظر نمودیم.

$$\begin{aligned} fvh - gh \frac{\partial \eta}{x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} \\ - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ + hu_s s \end{aligned}$$

معادلات مورد استفاده معادلات در حالت سه‌بعدی برای جریان، معادلات ناویر-استوکس با فرض بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک می‌باشند که عبارت‌اند از:

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (1-2)$$

که σ بین ۰ و ۱ از بستر تا سطح تغییر می‌کند. این تبدیل، روابط بیان‌شده بین متغیرها را به معادلاتی که در ادامه ارائه شده، تبدیل می‌نماید:

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial y'} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} = \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} \\ - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ + hv_s s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x'}, \frac{\partial}{\partial y'} \right) &= \left(\frac{\partial}{\partial x'} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma'}, \frac{\partial}{\partial y'} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega T}{\partial \sigma} \\ = hF_T \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \\ + hH + hT_s S \end{aligned}$$

در این مختصات جدید، معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم به صورت معادلات زیر تبدیل خواهند شد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega T}{\partial \sigma} \\ = hF_s \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) \\ + hS_s S \end{aligned} \quad (7-2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hS \quad (4-2)$$

$$h(F_T, F_S, F_K, F_\varepsilon, F_C) \\ \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, S, K, \varepsilon, C)$$

شرایط مرزی در سطح و بستر:

$$At\sigma = 1$$

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

$$At\sigma = 0:$$

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

که در آن‌ها متغیرهایی که وارد شده را به صورت جدول ۱ خواهیم داشت.

جدول ۱. معرفی متغیرهای مدل

متغیر	شرح
H	تراز سطح آب
$h = \eta + d$	عمق آب کل
pa	فشار اتمسفریک
v_t	ویسکوزیته گردابی قائم
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$	مؤلفه‌های تانسور تنش تشعشی
ρ_0	چگالی مرجع آب
ρ	چگالی آب
g	شتاب ثقلی زمین
t	زمان
ϕ	عرض جغرافیایی
Ω	سرعت زاویه‌ای زمین
$f = 2\Omega \sin\phi$	پارامتر کوریولیس
u, v, w	مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x, y, z
D	عمق آب ساکن

۳-۲. پایداری مدل

از عوامل مؤثر در مدل‌سازی ابعاد شبکه، دقت عمق سنجی، گام زمانی و شرط (CFL معیار پایداری)، نیروهای واداشت سطحی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، ضرایب چسبندگی

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma} \quad (۸-۲) \\ = hF_K \\ + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_t \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) \\ + h(P + B - \varepsilon)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma} \quad (۹-۲) \\ = hF_S \\ + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) \\ + h \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P \\ + C_{3\varepsilon} B \\ - C_{2\varepsilon} \varepsilon)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega C}{\partial \sigma} \quad (۱۰-۲) \\ = hF_C \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) \\ + hk_p C + hC_s$$

سرعت قائم تغییر کرده و از رابطه زیر حاصل می‌شود.

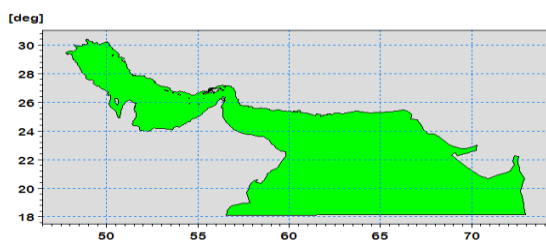
$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (۱۱-۲)$$

ترم‌های پخش افقی عبارت‌اند از:

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (۱۲-۲)$$

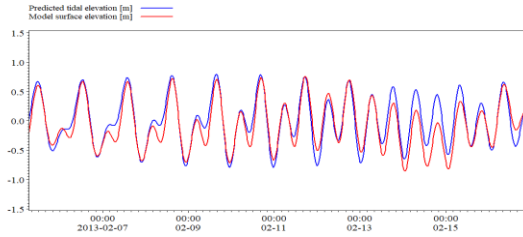
$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

تا بستر دریا از ۲۰ لایه با ضخامت ثابت (z level) با ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. در مدل جریان اجرا شده بر اساس مشخصات حل عددی معادلات، مقدار گام زمانی محاسبات بین ۰/۰۱ تا ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل عددی توانایی این را دارد که بزرگ‌ترین گام زمانی ممکن را با در نظر گرفتن شرایط پایداری انتخاب نماید. آنالیز حساسیت به ترتیب برای پارامترهای مختلفی همچون زبری بستر ۱۴، ضریب زبری باد ۱۵، اثر لزجت گردابه افقی ۱۶ و ضریب لزجت گردابه قائم ۱۷ انجام شده است. بررسی انجام شده در این مطالعه نشان داده است که بهترین مقدار برای زبری ۰/۰۰۲ متر است. همچنین بهترین ضریب زبری باد، ۰/۰۱۲ برای سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه و ۰/۰۲۴ برای سرعت باد بالای ۱۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است. برای محاسبه لزجت افقی از ضریب اسموگرینسکی و ضریب لزجت قائم از مدل K-ε استفاده شده است. مدل به مدت یک سال و برای سال ۲۰۱۳ اجرا شده است. در شکل ۳ مقایسه سرعت جریان اندازه‌گیری شده در محدوده ایستگاه بوشهر با موقعیت جغرافیایی ۲۸,۹۷۷۸۰۴ و ۵۰,۶۶۰۴۵۳ را با سرعت جریان منتج شده از مدل نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ تا ۶ نیز به ترتیب مقایسه تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در محدوده جاسک، بندر چابهار و بندر بوشهر را با مقادیر منتج شده از مدل نشان می‌دهد. مکان ایستگاه‌های مورد مطالعه روی نقشه در شکل‌های زیر نشان داده شده است:

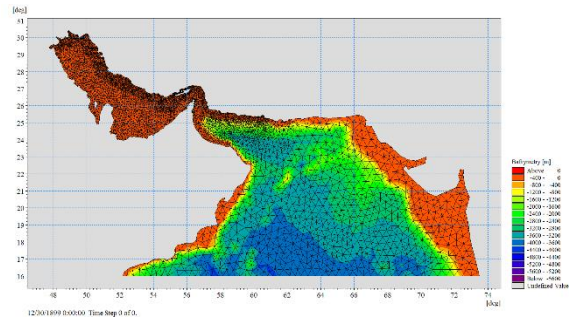


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

پیچکی ۱۱ و پخش پیچکی ۱۲ (مربوط به دما و شوری) می‌باشد. انتخاب شرایط اولیه واقعی علاوه بر اینکه بر دقت نتایج می‌افزاید، سبب زودتر رسیدن مدل به حالت مانا ۱۳ می‌شود در این تحقیق از داده‌های باد ECMWF و WOA و همچنین داده‌های دریایی ROPME که یک مجموعه داده‌های طولانی مدت از اقلیم‌های دما، شوری، اکسیژن، فسفات، سیلیکات و نترات برای دوره‌های سالیانه، فصلی و ماهیانه برای اقیانوس‌های جهان و مربوط به سال ۲۰۱۳ با دقت مکانی یک‌دهم درجه استفاده شده است. این داده‌ها شامل پارامترهای مختلف اقیانوسی از جمله دما، شوری، تابش خورشید، رطوبت هوا، عمق و ... است که با دقت مکانی یک‌دهم درجه در دسترس است. همچنین از نظر زمانی این داده‌ها به صورت میانگین سالانه، فصلی و ماهانه وجود دارند. عمق اندازه‌گیری این داده‌ها در اعماق استاندارد اقیانوس‌شناسی تعریف شده است. در این پژوهش از مدل HD از بسته‌های سه‌بعدی مایک ۳ استفاده شده است و برای اعمال شرایط اولیه داده‌های میانگین سالیانه با دقت یک‌دهم درجه برای منطقه مورد مطالعه استخراج و روی شبکه حل عددی درون‌یابی شد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها، ابتدا مدل بزرگ‌مقیاس جریان برای کل محدوده دریای عمان و خلیج فارس اجرا شده است. محدوده شبکه محاسباتی بین عرض جغرافیایی ۱۶ درجه شمالی تا ۳۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه شرقی تا ۷۴ درجه شرقی در نظر گرفته شده است. شکل (۲) محدوده محاسباتی به همراه شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. شبکه محاسباتی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تعداد ۸۶۰۰ المان کل محدوده را پوشش دهد. برای لایه‌بندی قائم مدل، از سیستم ترکیبی سیگما-تراز (z) sigma and z (level) با ۳۰ لایه قائم استفاده شده است که از تراز سطح تا تراز ۱۰۰- متری از ده لایه سیگما با عرض برابر و از تراز ۱۰۰-



شکل ۶. مقایسه تراز سطح آب اندازه گیری شده در محدوده بندر بوشهر با مقادیر منتج شده از مدل



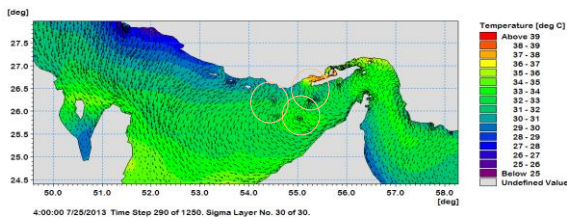
شکل ۲. محدوده محاسباتی و شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده در این مطالعه

۳. نتایج

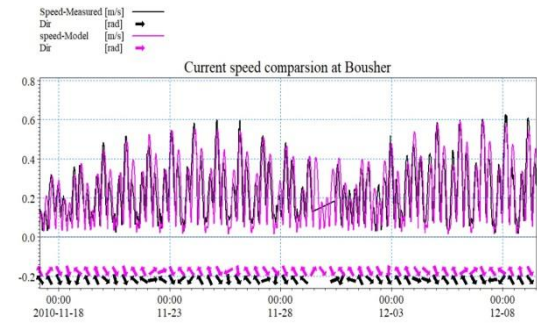
از آنجاکه بیشترین تغییرات جبهه شوری در فصل تابستان دیده می شود و در فصل زمستان کمترین پیشروی جبهه شوری به داخل خلیج را شاهد خواهیم بود [۱۰] در این تحقیق فعالیت پیچک ها، تنها در فصل تابستان بررسی شده است.

۳-۱. نحوه تشکیل پیچک ها در فصل تابستان در منطقه خلیج فارس و دریای عمان

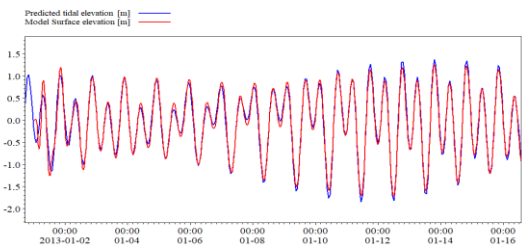
در شکل های زیر خروجی دما و شوری مدل مایک ۳ از خلیج فارس در فصل تابستان سال ۲۰۱۳ شبیه سازی شده است که چگونگی شکل گیری پیچک ها در این ماه ها قابل ملاحظه است. پیچک های واچرخندی در مرکز خلیج فارس در تابستان قوی تر می شوند و بیشترین وضوح در شکل گیری پیچک های میان مقیاس در ماه آگوست خواهد بود. که موقعیت این پیچک ها در شکل های ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ در ماه های آگوست، جولای و سپتامبر نشان داده شده است.



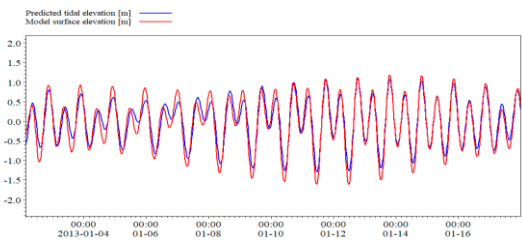
شکل ۷. شبیه سازی میانگین دمای ماهانه در ماه جولای



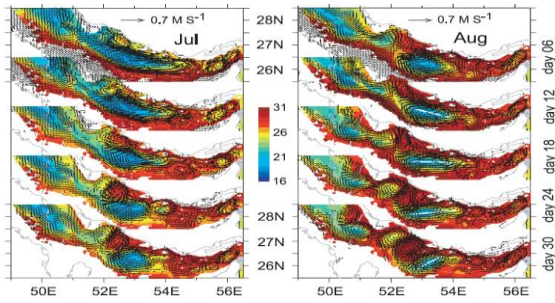
شکل ۳. مقایسه سرعت جریان اندازه گیری شده در محدوده ایستگاه بوشهر با سرعت جریان منتج شده از مدل



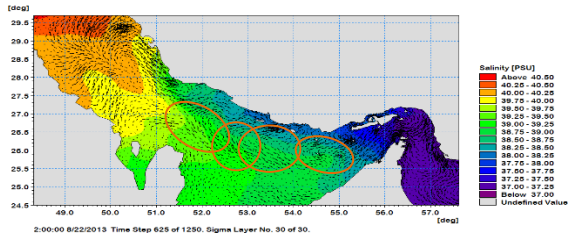
شکل ۴. مقایسه تراز سطح آب اندازه گیری شده در محدوده جاسک با مقادیر منتج شده از مدل



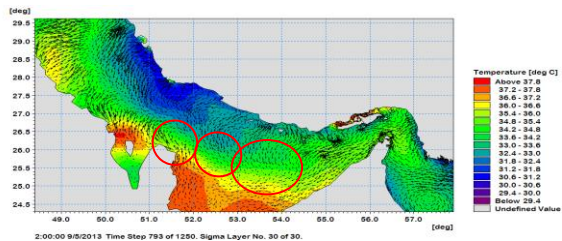
شکل ۵. مقایسه تراز سطح آب اندازه گیری شده در محدوده بندر چابهار با مقادیر منتج شده از مدل



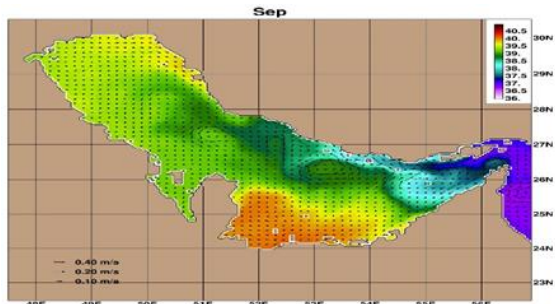
شکل ۱۳. شبیه‌سازی میانگین ماهانه جریان در خلیج فارس و نحوه تشکیل پیچک‌ها در دو ماه جولای و آگوست [۸]



شکل ۱۴. شبیه‌سازی میدان شوری میانگین ماهانه در ماه سپتامبر

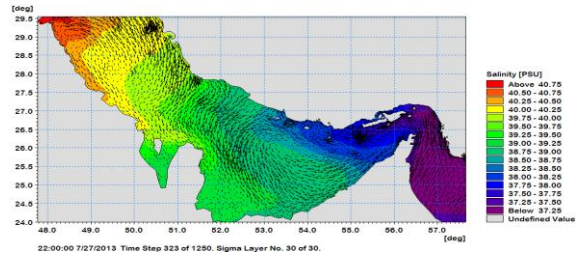


شکل ۱۵. شبیه‌سازی دمای میانگین ماهانه در ماه سپتامبر

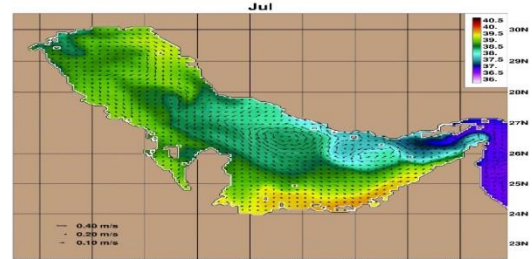


شکل ۱۶. شوری میدان سطحی در هم‌پوشانی با بردار سرعت میانگین ماهیانه از نتیجه اجرای مدل هایکام در ماه سپتامبر ۲۰۱۵ [۵]

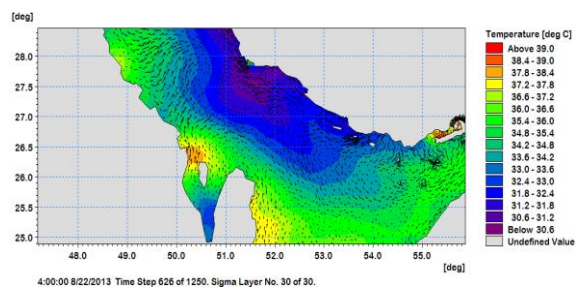
در شکل‌های ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ برش افقی میدان دما و شوری در ماه جولای نشان داده شده است.



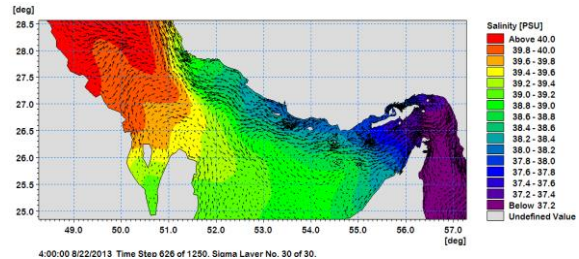
شکل ۸. شبیه‌سازی میدان شوری میانگین ماهانه در ماه جولای



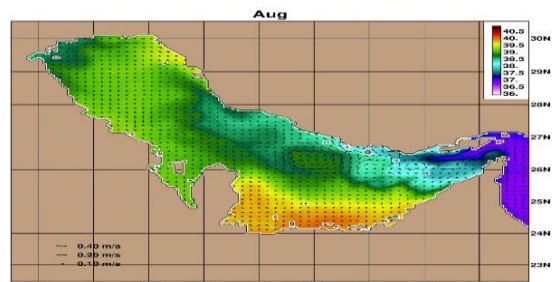
شکل ۹. شوری میدان سطحی در هم‌پوشانی با بردار سرعت میانگین ماهیانه از نتیجه اجرای مدل هایکام در ماه جولای ۲۰۱۵ [۵]



شکل ۱۰. شبیه‌سازی دمای میانگین ماهانه در ماه آگوست



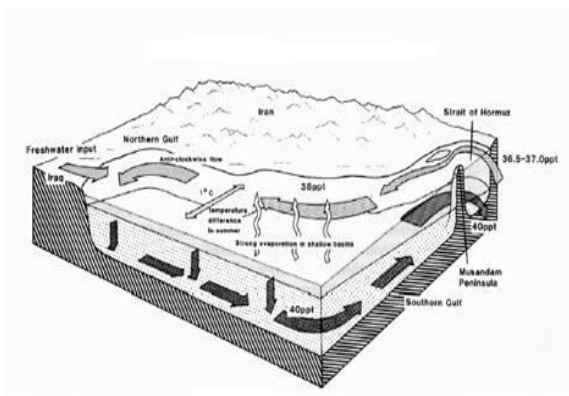
شکل ۱۱. شبیه‌سازی میدان شوری میانگین ماهانه در ماه آگوست



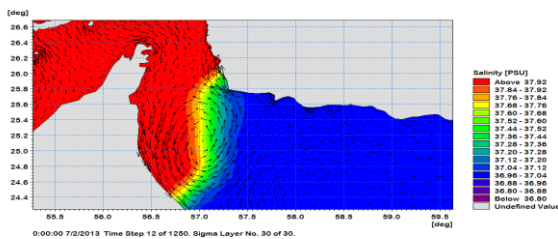
شکل ۱۲. میدان شوری سطحی در هم‌پوشانی با بردار سرعت میانگین ماهیانه از نتیجه اجرای مدل هایکام در ماه آگوست ۲۰۱۵ [۵]

سمت شمال در اواخر تابستان به صورت مجموعه‌ای از ادی‌های میان‌مقیاس تغییر شکل می‌دهد. ورود یک جریان سطحی گرم از دریای عمان با دمایی بیش از دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و شوری کم در حدود ۳۷ppt از طریق تنگه هرمز به خلیج فارس در طول تابستان و خروج آب‌های با شوری بیشتر از خلیج فارس به سمت دریای عمان را به همراه دارد. به دلیل میزان بالای تبخیر سطحی در خلیج فارس، آب کم‌شورتر و سبک‌تر دریای عمان برای جبران میزان آب تبخیر شده، از سطح و از ناحیه شمالی تنگه هرمز وارد خلیج فارس می‌شود که از سمت سواحل ایران در جهت بالادست خلیج فارس جریان پیدا می‌کند. همچنین خروجی آب شور و سنگین شده خلیج فارس از قسمت جنوبی تنگه هرمز به دریای عمان می‌ریزد [۱۴].

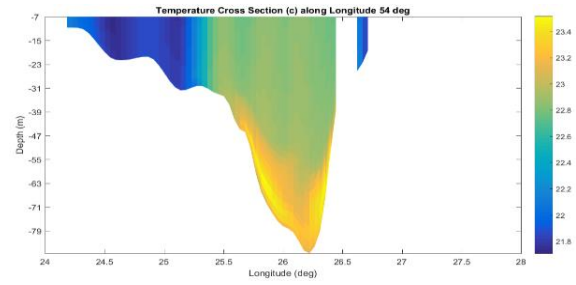
در تمام طول سال جریان ترموهالین از روی بستر کم‌عمق خلیج فارس وارد دریای عمان می‌شود و به مناطق عمیق‌تر نفوذ می‌کند و باعث نوساناتی در دما و شوری (چگالی) در دریای عمان از تنگه هرمز تا نزدیک اقیانوس هند می‌شود که این تغییرات در سال‌ها و فصل‌های مختلف متفاوت است.



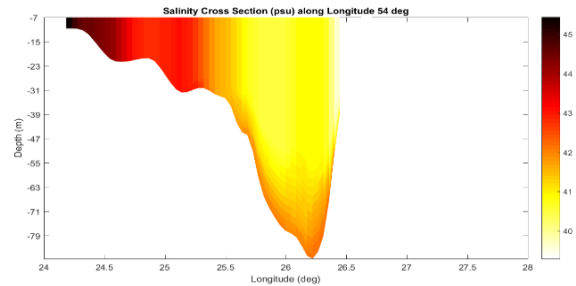
شکل ۲۱. نحوه ورود و خروج آب از دریای عمان به خلیج فارس [۱۵]



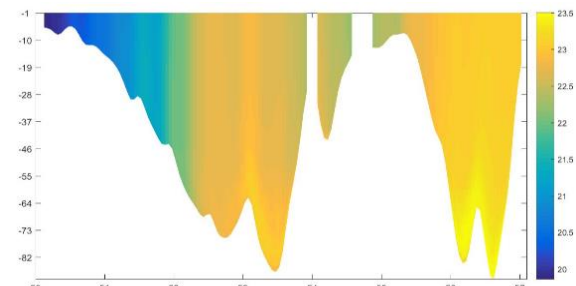
شکل ۲۲. شبیه‌سازی میدان شوری میانگین ماهانه دریای عمان در ماه جولای



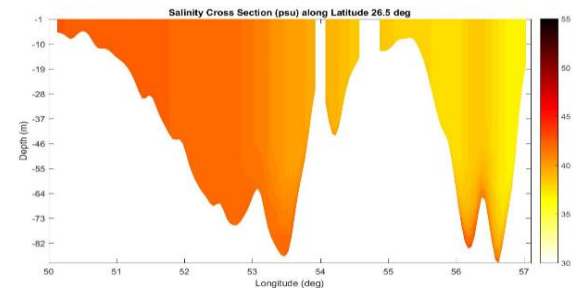
شکل ۱۷. برش افقی میدان دما در ۲۷ جولای در طول جغرافیایی ۵۴ درجه



شکل ۱۸. برش افقی میدان شوری در ۲۷ جولای در طول جغرافیایی ۵۴ درجه



شکل ۱۹. برش افقی میدان دما در ۲۷ جولای در عرض جغرافیایی ۲۶/۵ درجه



شکل ۲۰. برش افقی میدان شوری در ۲۷ جولای در عرض جغرافیایی ۲۶/۵ درجه

شکل کلی پیچک در خلیج فارس چرخندی است و از یک جریان ساحلی در جهت شمال غربی که از شمال تنگه هرمز وارد خلیج فارس شده و یک جریان جنوب غربی در قسمت جنوبی تنگه به وجود آمده است که این جریان ساحلی به

پژوهش رهنمانیا، جریان ورودی از تنگه هرمز با یک گرادیان چگالی افقی شدید در این منطقه، باعث ایجاد جریان‌های دور (رو به جنوب) از ساحل می‌شود که به جریان خروجی ملحق می‌شود. این جریان فراساحلی منطقه مناسبی برای توسعه و انتشار پیچک‌ها ایجاد می‌کند. پیچک‌های چرخندی با اندازه و شعاع متفاوت به سمت شمال شرقی حرکت می‌کنند و سبب انتقال گرما و شوری از تنگه هرمز به دریای عمان می‌شوند.

همچنین موقعیت جغرافیایی و زمان شکل‌گیری پیچک‌های میان‌مقیاس و نیز جهت چرخش آن‌ها در قسمت‌های مختلف خلیج فارس و در ماه‌های مختلف سال در مقایسه نتایج خروجی‌های هر دو پژوهش از مدل مایک ۳ و مدل هایکام توسط رهنمانیا کاملاً مشابه بود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از داوران و ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک که در بهبود کیفیت مقاله کمک شایانی داشته‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

مراجع

- [1] Ivanov AY, Ginzburg AI. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images. *Journal of Earth System Science*. 2002 Sep 1;111(3):281.
- [2] Ginzburg AI. Nonstationary eddy motions in the ocean. *OCEANOLOGY C/C OF OKEANOLOGIIA*. 1992;32(6):689-94.
- [3] Purkiani K, Haeckel M, Haalboom S, Schmidt K, Urban P, Gazis IZ, de Stigter H, Paul A, Walter M, Vink A. Impact of a long-lived anticyclonic mesoscale eddy on seawater anomalies in the northeastern tropical Pacific Ocean: a composite analysis from hydrographic measurements, sea level altimetry data, and reanalysis model products. *Ocean Science*. 2022 Aug 8;18(4):1163-81.
- [4] Ardalan Samghi H, Hejazi k. modeling of Persian Gulf and tidal combinational studies and its effects on Bandar abbas hydrodynamics. *Ports and maritime organization*; 2008. Available from: <https://sid.ir/paper/908258/en>

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق ابتدا با شبیه‌سازی منطقه خلیج فارس و دریای عمان با مدل مایک ۳، چگونگی شکل‌گیری پیچک‌های میان‌مقیاس در سه‌ماهه فصل تابستان را بررسی کرده و سپس نتایج مدل را با دو تحقیق توپیل و همکاران در سال ۲۰۱۰ و رهنمانیا در سال ۱۳۹۶ در بخش ۳ مقایسه نموده است. همچنین جریان‌های ورودی از دریای عمان (IC)۱۸ نیز شبیه‌سازی شد. در دریای عمان، جریان ترموهالین خلیج فارس که وارد دریای عمان می‌شود موجب تغییر چگالی می‌شود که این پدیده در تمام طول سال اتفاق می‌افتد. بنابراین تغییر چگالی ناشی از تغییر جریان موجب ایجاد پیچک‌ها در دریای عمان می‌شود. در ضمن نتایج نشان دادند که یک پیچک میان‌مقیاس قوی در قسمت غربی دریای عمان وجود دارد. نتایج مدل به‌وضوح تغییرات فصلی جبهه شوری را نشان می‌دهد که در تابستان بیشترین پیشروی را به داخل خلیج فارس نسبت به زمستان دارد. که این نتیجه کاملاً با نتایج پژوهش رئیسی و همکاران یکسان است. جبهه شوری محل ناپایداری باروکلینیکی است و در ماه‌های تابستان (با چینه‌بندی قوی چگالی) به‌صورت پیچک‌های چرخندی (مرکز شور) و واچرخندی (مرکز شیرین) ظاهر می‌شود که در ماه آگوست بیشترین فعالیت پیچکی وجود دارد. در مقایسه خروجی‌های مدل مایک ۳ و خروجی مدل هایکام توسط رهنمانیا در سه ماه جولای، آگوست و سپتامبر، پیچک‌ها در یک طول و عرض جغرافیایی تشکیل شده‌اند و همچنین جهت چرخش پیچک‌ها در خروجی‌های هر دو مدل کاملاً یکسان بود.

همچنین در مقایسه دیگر خروجی مدل مایک ۳ برای میانگین دمای ماهانه در ماه جولای، با خروجی توپیل و همکاران در سال ۲۰۱۰ در ماه جولای به‌طور کامل مطابقت داشت. در نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج به‌دست‌آمده از

Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference; 2012 Jun 17; OnePetro.

پی‌نوشت‌ها:

1. HYCOM
2. Thermohaline
3. Cyclonic
4. Eddy
5. Navier Stokes Equations
6. Unstructured Mesh
7. Structured Mesh
8. Curvilinear Grid
9. Nested
10. Combined Sigma and z-level
11. Eddy Viscosity
12. Eddy Diffusivity
13. Steady State
14. Roughness Height
15. Wind Friction
16. Horizontal Eddy Viscosity
17. Vertical Eddy Viscosity
18. Input Current

[۵] رهنمایا عبدالصمد. بررسی ویژگی‌های دینامیکی جریان مرزی بین آب‌های ورودی و خروجی خلیج فارس [رساله دکتری]. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ ۱۳۹۶.

[۶] رئیسی امین، مهرفر حسام‌الدین، علی اکبری بیدختی عباسعلی، ترابی آزاد مسعود، لاری کامران، ناظم السادات محمد جعفر، عظام مجتبی. مطالعه پیچک‌های میان مقیاس تحت تاثیر جریان‌های ساحلی در خلیج فارس و نقش آن در اقلیم منطقه. جغرافیای طبیعی. ۱۳۹۸؛ ۱۲(۴۶): ۷۵-۹۰.

[7] L'Hégaret P, Lacour L, Carton X, Roulet G, Baraille R, Corréard S. A seasonal dipolar eddy near Ras Al Hamra (Sea of Oman). *Ocean Dynamics*. 2013 Jun;63:633-59.

[8] Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*. 2010 Sep 1;40(9):2122-34.

[۹] محمدی فیروز سمیه، اله یاری بیک سارا، عظام مجتبی، علی اکبری بیدختی عباسعلی، سهیلی فر محمدرضا. شبیه‌سازی گردش و اثر پیچک‌های میان مقیاس اقیانوسی بر پروفایل‌های سرعت صوت در خلیج فارس توسط مدل ROMS. دریا فنون. ۱۳۹۸؛ ۶(۳): ۹۸-۱۱۲.

[10] 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 20;12(3):687-701.

[11] Vic C, Gula J, Roulet G, Pradillon F. Dispersion of deep-sea hydrothermal vent effluents and larvae by submesoscale and tidal currents. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018 Mar 1;133:1-8.

[12] Etter P. *Undewater Acoustic Modeling and simulation*. CRC Press; 2018.

[13] Bower AS, Hunt HD, Price JF. Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2000 Mar 15;105(C3):6387-414.

[14] Sadrinasab M, Kämpf J. Three-dimensional flushing times of the Persian Gulf. *Geophysical research letters*. 2004 Dec;31(24).

[15] Ji L, Lin M. Modeling of Acoustic Propagation across a Warm-Core Eddy in South China Sea. In: *The*