

مطالعه جریان های ساحلی خلیج فارس تحت تاثیر نفوذ آب اقیانوس هند با استفاده از شبیه سازی عددی

حسام الدین مهر فرا^۱، مسعود ترابی آزاد^{۲*}، کامران لاری^۲، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۲

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ دانشیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

^۳ استاد موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۴ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۳

چکیده

جریان های ساحلی خلیج فارس با تفکیک پذیری افقی طول و عرض جغرافیایی ۲ دقیقه و تعداد ۱۰ لایه عمودی سیگما، با استفاده از مدل عددی کوهیرنس شبیه سازی شد. خطوط ساحلی خلیج فارس و عمق آن بر اساس داده های ETOPO2 و داده های جوی برگرفته از سایت NOAA به مدل اعمال شد. جهت صحت سنجی نتایج شبیه سازی مدل، میدان شوری در زمستان و تابستان از سطح تا عمق ۱۵ متری استخراج و با نتایج رینولدز (۱۹۹۳) مقایسه شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که نفوذ آب سطحی اقیانوس هند به خلیج فارس از ژانویه تا ژوئن به تدریج افزایش می یابد و در ژوئن به بیشترین مقدار می رسد. پس از آن در جولای و آگوست شروع به کاهش می کند. متناسب با نفوذ شار شوری، به ویژه در بخش سواحل ایران، سرعت جریان ها نیز افزایش می یابد. سرعت جریان ها از ژانویه تا مارچ کم و از می، شروع به افزایش می کند. این روند تا ژوئن و جولای ادامه داشته و سپس در آگوست شروع به کم شدن می کند. نتایج مدل نشان داد که جریان به سمت جنوب شرق در طول سواحل کویت و عربستان سعودی در بهار و تابستان قوی تر از دیگر فصل ها است. این جریان در زمستان به دلیل ترموهالاین و جریان های ناشی از باد کاملاً تضعیف می شود. نتایج شبیه سازی، سه پیچک چرخندی در ماه سپتامبر، به قطر حدوداً ۱۰۰ کیلومتر را نشان داد که با تصاویر سنجنده مودیس و سایت داده های ماهواره ای آویسو مطابقت خوبی دارد. پیچک های تشکیل شده تمام ستون آب را در برمی گیرند. پیچک های کاملاً گسترش یافته در ماه های تابستان تشکیل می شوند.

کلمات کلیدی: شبیه سازی عددی، جریان ساحلی، خلیج فارس، مدل کوهیرنس، نفوذ آب اقیانوس هند

شرقی که متمایل به سمت ساحل است، ایجاد می کند. یائو و جونز⁴ (۲۰۱۰)، گردش و فرآیند تغییر توده آب در خلیج فارس و تبادل آب آن با اقیانوس هند، از طریق تنگه هرمز را با استفاده از مدل عددی هایکام⁵ مطالعه کردند. نتایج نشان می دهد آب سطحی نفوذ یافته ی اقیانوس هند به خلیج فارس تبدیل به آب های بسیار شور با شوری بیشتر از 41 psu می شود. در تابستان شناوری افزایش می یابد و آب گرم همچنان شور جاری در عمق میانی از طریق تنگه هرمز خارج می شود. آنها نشان دادند دو شاخه گردش معکوس فصلی در میدان چگالی وجود دارد: شاخه شمالی با شدت ۰/۱۳ سوردراپ که در مرداد به بیشترین مقدار خود می رسد و شاخه جنوبی که در دسامبر و فوریه به بیشترین مقدار خود به شدت ۰/۰۸ سوردراپ می رسد. کامف و صدی⁶ (۲۰۰۶) گردش آب در خلیج فارس را مطالعه و شبیه سازی کردند. نتایج نشان می دهد که در فصل بهار و زمستان، رژیم جریان خروجی بستر به بخش شرقی خلیج محدود می شود. تشدید جریان خروجی بستر باعث افزایش ورود آب های سطحی اقیانوس هند به درون خلیج فارس می شود. حسینی بالام⁷ و همکاران (۲۰۱۱)، گردش خلیج فارس را تحت تاثیر تنش باد و شار سطحی ترموهالاینی با استفاده از مدل عددی هیدرودینامیکی کوهیرنس⁸ بررسی کردند. نتایج مدل حاکی از همبستگی بین شدت جریان خروجی بستر از خلیج فارس و جریان آب ورودی سطحی اقیانوس هند به خلیج است. مهندسی نمین⁹ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل عددی کوهیرنس، عملکرد چند طرح واره تلاطمی در شبیه سازی عددی هیدرودینامیک یک حوضه نیمه بسته مانند خلیج فارس را بررسی کردند. آزمایش مدل با طرحواره های بستر تلاطمی $k - \epsilon$ و $k - l$ نشان داد که طرحواره $k - \epsilon$ در آب های ورودی خلیج فارس اختلاط کمتری را نشان می دهد.

4 Yao and Johns

5 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)

6 Kampf and Sadrinasab

7 Hosseinibalam

8 COupled Hydrodynamical Ecological model for REgioNal Shelf seas (COHERENS)

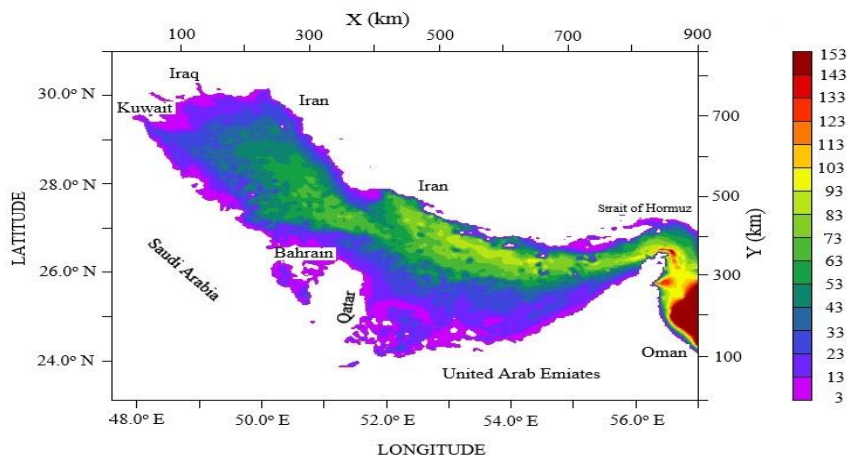
9 Mohandesi namin

خلیج فارس یک حوضه نیمه بسته و کم عمق با میانگین ۳۵ متر است که از طریق تنگه هرمز به خلیج عمان متصل می شود. گردش در خلیج فارس اول ناشی از بادهای غالب شمال غربی، شار شناوری و تکانه وابسته به آن، پس از آن نیروهای ترموهالاینی و سوم ناشی از نیروی جزر و مد است (تاپیل و هوگان¹، ۲۰۱۰). آب شور و چگال در زمستان در قسمت شمال غربی و کناره های جنوبی خلیج فارس شکل می گیرد. یک کاهش فصلی شوری در خلیج فارس مشاهده می شود که مربوط به افزایش جریان ورودی آب سطحی اقیانوس هند و از طریق تنگه هرمز است. انتقال جریان خروجی از تنگه هرمز نشان دهنده انباشتگی آب چگال در مجاورت بستر خلیج فارس در نزدیکی تنگه هرمز است. این امر موجب افزایش گرادیان فشار در عمق در عرض تنگه می شود که در نتیجه آن جریان خروجی موجب تداوم جریان ورودی خواهد شد. با این وجود هیچ رابطه خاصی بین شوری در عمق و جریان های در عمق بیشتر مشاهده نمی شود. (پاوز² و همکاران، ۲۰۱۵). جریان آب در خلیج فارس فصلی است و به میزان زیادی به اختلاف چگالی و بادهای بستگی دارد. جریان آب در قسمت جنوبی خلیج فارس در مجاور تنگه هرمز غالباً ناشی از اختلاف چگالی است به طوری که در تمامی روزهای سال به صورت نسبی آب با شوری کم از دریای عمان از مسیر تنگه هرمز وارد خلیج فارس شده و در جهت مخالف بادهای غالب به طرف شمال غربی جریان می یابد (چائو³ و همکاران، ۱۹۹۲). تاپیل و هوگان (۲۰۱۰) اثر باد شمال زمستانه بر خلیج فارس را مطالعه و شبیه سازی کردند. آنها بازه زمانی ۲۰ نوامبر تا ۵ دسامبر ۲۰۰۴، یک دوره مناسب برای رخداد باد شمال، را بررسی کردند. نتایج مدل حاکی از این است که باد شدید نه تنها گردش کل خلیج فارس را تقویت می کند، بلکه یک جریان به سمت شمال غرب، در سواحل ایران، به شدت (30-25cm/s) از تنگه هرمز تا طول جغرافیایی ۵۲ درجه

1 Thoppil and Hogan

2 Pous

3 Chao



شکل ۱. هندسه و موقعیت خط ساحلی بر اساس داده‌های ETOPO-2

مدل عددی با ابعاد شبکه مناسب تا کنون انجام نشده است.

مواد و روش‌ها

برای شبیه سازی جریان ها از مدل عددی کوهرینس استفاده شده است. محدوده محاسباتی، شامل خلیج فارس و بخشی از دریای عمان در عرض ۲۳،۱ تا ۳۱ درجه شمالی و ۴۷،۶ تا ۵۷ درجه شرقی است. هندسه و موقعیت خط ساحلی بر اساس داده های ETOPO-2¹¹ با تفکیک پذیری افقی طول و عرض جغرافیایی ۲ دقیقه هموار شده است. برای رفع ناپایداری عددی، کمترین عمق به ۳ متر، در خطوط ساحلی، و بیشینه عمق به ۱۵۰ متر، در دریای عمان که تاثیر معنی داری بر نتایج ندارد، هموار شد (شکل ۱). برای استفاده در مدل های چند لایه که دارای کف ناتراز می باشد، نیاز به آرایه ی قائمی است که در تمامی پهنه ی اقیانوسی تعداد لایه ها را یکسان در نظر گیرد، بنابراین از آرایه ی قائم سیگما استفاده شده است. در سیستم مختصات سیگما تعداد ترازهای عمودی در ستون آب، در هر مکان از محدوده مدل بدون در نظر گرفتن عمق آب، یکسان است. همچنین، در این سیستم مختصات هیچ نقطه شبکه در جهت عمودی از بین

جریان ها برای آزمایشی که طرحواره $k-l$ اعمال شد دارای سرعت بیشتری هستند که باید با اختلاط بیشتر همراه باشند و با الگوهای شوری نیز مطابقت دارند. توسط رضوی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵) یک برنامه جامع اندازه گیری طراحی گردید که هدف اصلی آن جمع آوری داده های ورودی کافی و قابل اعتماد برای شبیه سازی پیش بینی جریان در خلیج فارس است و با استفاده از مدل سازی هیدرودینامیکی سه بعدی، پارامترهای قابل اعتماد و واقع بینانه را ارائه می دهد. هدف از این تحقیق بررسی عوامل تاثیرگذار بر جریان های ساحلی خلیج فارس، اثر ترموهالاین و گسترش آب سطحی اقیانوس هند، با استفاده از مدل کوهرینس است. همچنین تاثیر میانگین روزانه داده های بلند مدت اقلیمی بر جریان های ساحلی خلیج فارس شبیه سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. جریان های ساحلی در فرسایش سواحل و تغییر شکل آنها، انتقال آلودگی ها و مسائل زیست محیطی، ایجاد و تاسیس سازه های دریائی و مطالعات صید و شیلاتی نقش بسیار با اهمیتی دارند. یکی از حرکات در مقیاس متوسط جریان های قوی در امتداد ساحل است که نقش مهمی در آب و هوای مناطق ساحلی دارند. شناخت تغییر پذیری جریان های ساحلی غرب خلیج فارس تحت تاثیر نفوذ آب اقیانوس هند توسط یک

¹¹ <https://sos.noaa.gov/datasets/etopo2-topography-and-bathymetry-natural-colors/>

10 Razavi Arab

جدول ۱. دامنه و فاز مولفه های اصلی جزر و مدی استفاده شده در مدل

O1	K1	S2	M2	مولفه جزر و مدی
۰/۳۳۷۸	۰/۶۳۲۶	۰/۴۴۱۶	۱/۱	دامنه (متر)
۵/۰۴۹۲۴۱	۳/۳۵۴۵۲۳	۴/۳۴۴۱۲۳	۵/۲۷	فاز (رادیان)

شده و در مدل استفاده شده است. شوری مرجع 38 psu، دمای مرجع ۲۲ درجه سانتی گراد، چگالی مرجع ۱۰۲۷ کیلوگرم بر متر مکعب و جریان جزر و مدی با چهار مولفه اصلی در مرز باز شرقی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است (السی^{۱۷} و همکاران، ۱۹۹۹). تحت شرایط اعمال شده ی فوق، اجرای مدل برای یک دوره ۱۰ ساله یک نتیجه پایدار ارائه داد و نتایج استخراج شده در سال دهم برای بررسی تغییرات جریان های خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفت.

صحت سنجی نتایج شبیه سازی مدل

جهت صحت سنجی مدل، میدان شوری در زمستان و تابستان از سطح تا عمق ۱۵ متری استخراج و با نتایج رینولد^{۱۸} (۱۹۹۳) مقایسه شد (شکل های ۲ تا ۵). گرچه مدل، شوری بیشینه را کمتر برآورد می کند، اما الگوی توزیع شوری با نتایج مطابقت دارد. مهندسی نمین و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند انتخاب طرح واره تلاطمی بر برآورد شوری موثر است و همچنین طرح واره k-1، میدان شوری در خلیج فارس را بهتر از دیگر طرح واره های تلاطمی در مدل کوهیرنس برآورد می کند که در این پژوهش از این طرح واره استفاده شده است.

نتایج و بحث

الف: نفوذ آب سطحی اقیانوس هند

گردش در خلیج فارس طبیعت سه بعدی دارد و می تواند به چرخاب^{۱۹} های افقی و سلول های چرخشی تجزیه شود. میدان جریان های افقی به شدت وابسته

17 Alessi

18 Reynolds

19 gyres

نمی رود و امکان نمایش بهتر لایه مرزی بستر در هر مکان از منطقه مدل را میسر می سازد (یائو و جونز، ۲۰۱۰). برای تعیین تعداد لایه های سیگما، از نتایج کار کمف و صدری نسب (۲۰۰۶) و مهندسی نمین (۲۰۱۶) استفاده شد. کمف و صدری نسب (۲۰۰۶) برای شبیه سازی گردش در خلیج فارس از تفکیک پذیری ۴ دقیقه و ۵ لایه سیگما استفاده کردند و مدل پس از ۲۰ سال شبیه سازی به پایداری اقلیمی رسید. آنها اذعان کردند با ۱۰ لایه سیگما و مدت زمان کمتر، مدل به نتایج مشابه دست می یابد. اما مهندسی نمین (۲۰۱۶)، نشان داد که بهترین تعداد لایه سیگما و تفکیک پذیری افقی برای مطالعه تلاطم، انرژی جنبشی تلاطمی، دما و شوری به ترتیب ۱۰ لایه و ۲ دقیقه است. بنابراین تعداد لایه های عمودی سیگما، ۱۰، انتخاب گردید. برای برقراری شرط پایداری CFL، گام زمانی دو بعدی و سه بعدی به ترتیب ۲۰ ثانیه و ۶۰۰ ثانیه انتخاب شده است. طرح واره بستار تلاطم^{۱۲} k-1 (ملور و یامادا^{۱۳}، ۱۹۸۲) به دلیل بالاتر بودن درجه آن نسبت به مدل k-e، همچنین با توجه به نتایج کمف و صدری نسب (۲۰۰۶)، مهندسی نمین و همکاران (۲۰۱۶) و لویتن^{۱۴} و همکاران (۱۹۹۶) برای تلاطم استفاده شده است. فرمول بندی اسماگورینسکی برای طرح واره پخش افقی استفاده شده است (اسماگورینسکی^{۱۵}، ۱۹۶۳). نیروهای میانگین روزانه اتمسفری اقلیمی (مولفه های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر، بارش و دبی رودخانه) برای یک دوره ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۰) از

داده های سازمان ملی اقیانوسی و جوی^{۱۶} میانگین گیری

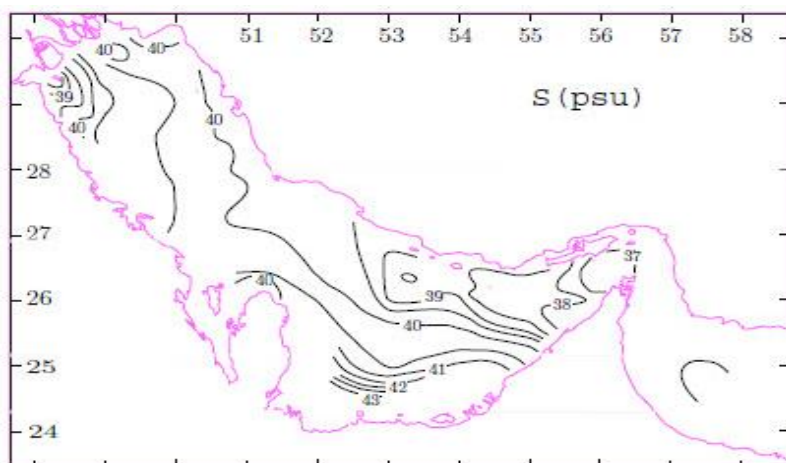
12 Turbulence Closure pattern

13 Mellor and Yamada

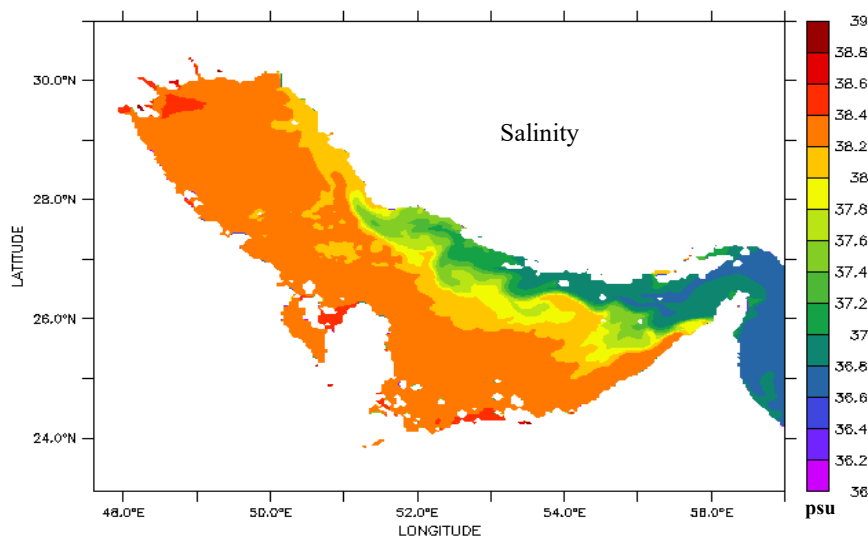
14 Luyten

15 Smagorinsky

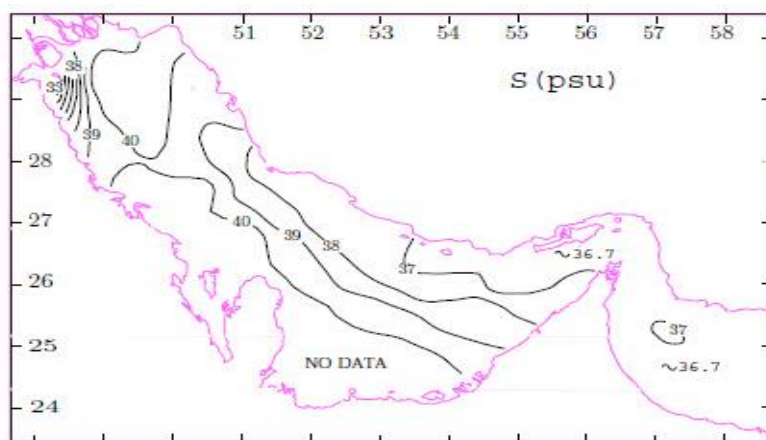
16 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)



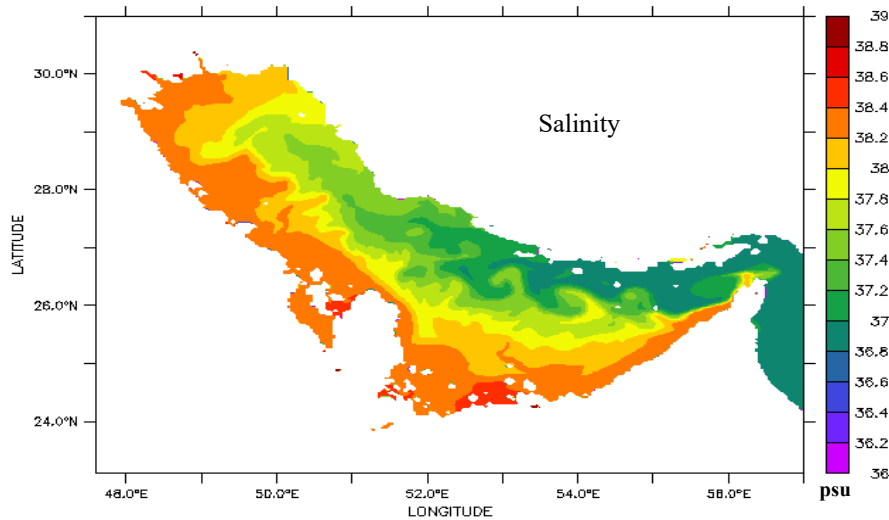
شکل ۲. توزیع شوری سطحی خلیجفارس در گشت تحقیقاتی راپمی زمستان (رینولدز، ۱۹۹۳)



شکل ۳. میانگین شوری سطحی شبیهسازی شده خلیج فارس برای فصل زمستان



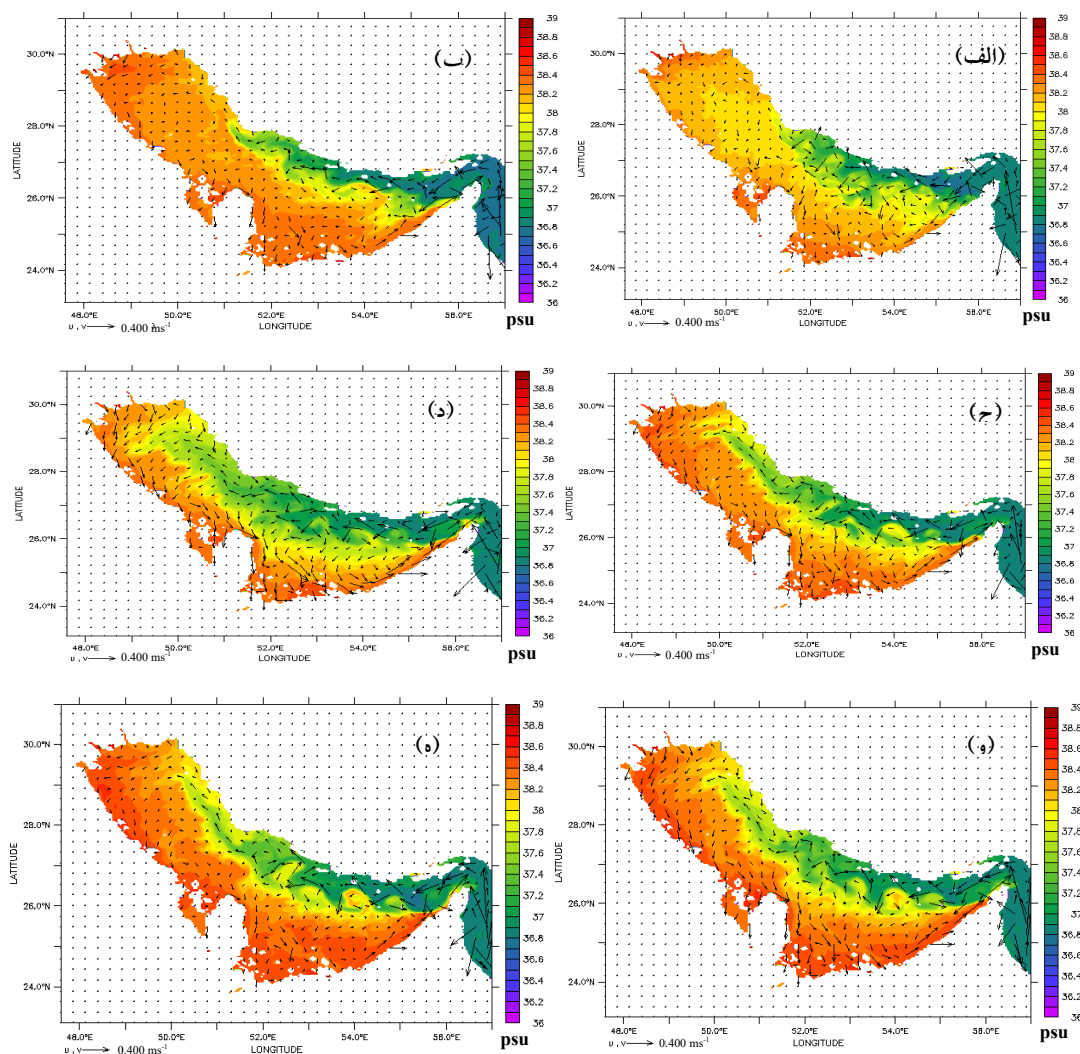
شکل ۴. توزیع شوری سطحی خلیج فارس در گشت تحقیقاتی راپمی اوایل تابستان (رینولدز، ۱۹۹۳)



شکل ۵. میانگین شوری سطحی شبیهسازی شده خلیج فارس برای فصل تابستان

باد، جریان شاخه شمالی نمی تواند به بیشتر از $27^{\circ}N$ نفوذ کند (شکل ۶، الف و ب). وقتی در تابستان و بهار باد آرام می شود و ترموکلاین فصلی تشکیل می شود، جریان در ساحل قوی تر می شود و می تواند تقریباً به انتهای شمالی خلیج برسد و یک زبانه کم شوری آب را تا عرض $28^{\circ}N$ بیاورد (شکل ۶، ج و د). شاخه جنوبی در زمستان قوی تر است، بخشی ناشی از بادهای قوی تر و بخشی ناشی از نشست آب چگال در جنوب خلیج. از آنجا که هر دو شاخه جریان به داخل خلیج گسترش می یابد، آب سطحی اقیانوس هند دستخوش افزایش شوری قابل توجهی به دلیل تبخیر و اختلاط با آب شورتر محیط می شود. مطابق با مشاهدات رینولدز (۱۹۹۳)، دو جز بسیار شور وجود دارد؛ یکی در شمال خلیج و دیگری در جنوب خلیج در امتداد سواحل امارات متحده عربی. نتایج شبیه سازی، شکل ۶ (الف - و)، نشان داد شوری کمتر از 37 از سمت شرق خلیج فارس از ماه ژانویه وارد می شود. نفوذ آب سطحی اقیانوس هند به خلیج فارس از ژانویه تا ژوئن به تدریج افزایش می یابد، به طوری که در ژوئن به بیشترین مقدار خود می رسد (شکل ۶، د). در ماه می و ژوئن، شار آب سطحی اقیانوس هند بیشترین نفوذ را به سمت شمال خلیج فارس دارد و کیلومترها

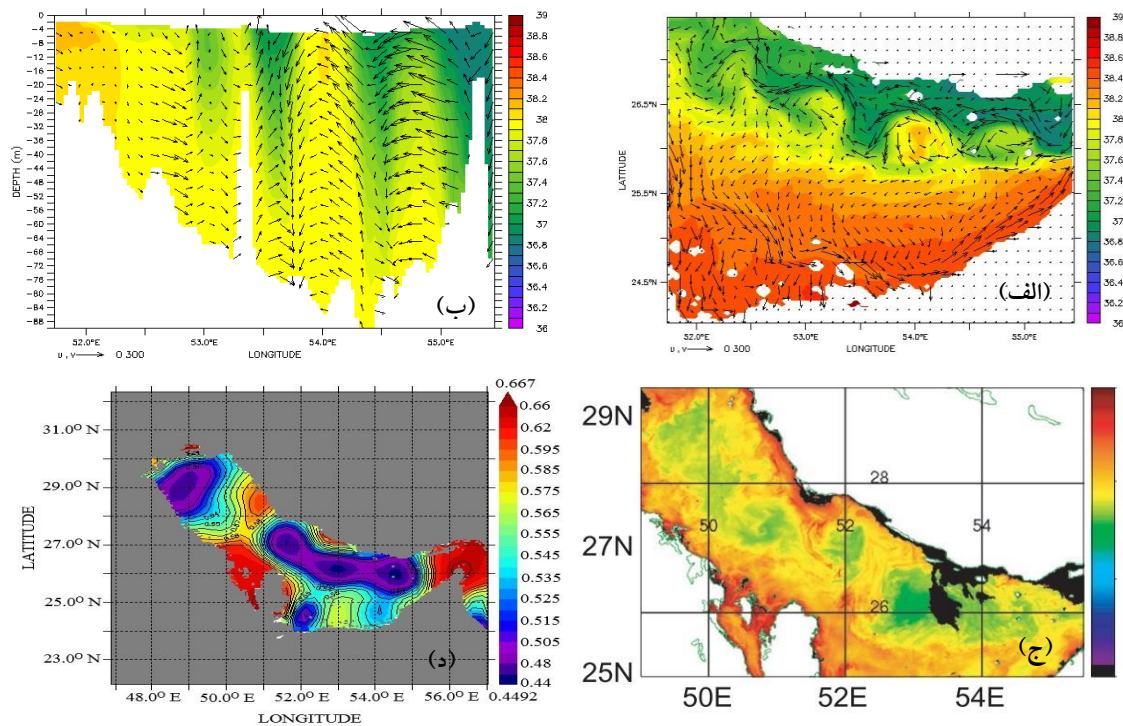
به میدان های هیدروگرافی، مخصوصاً میدان شوری است. شکل ۶ (الف - و) میدان جریان های سطحی، بر روی میدان شوری (15 متر بالایی)، برای شش ماه را نشان می دهد. میدان های سطحی، تغییرات فصلی نفوذ آب سطحی اقیانوس هند و تبدیل آن به آب های شور را به وضوح نشان می دهد. علیرغم تغییرات فصلی متمایز گردش سطحی، الگوی معمول گردش کلی برای تمامی فصول می تواند به شرح زیر باشد: آب کم شور آب سطحی اقیانوس هند، پس از ورود به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز در دو مسیر کلی گسترش می یابد: یک شاخه (شاخه شمالی)، در طول سواحل ایران انتشار می یابد و در تابستان تا حوضه غرب قطر می رسد و گردش چرخندی به وجود می آورد، همچنین یک جریان ساحلی برگشتی در طول سواحل عربی شمال قطر تشکیل می شود. شاخه دیگر (شاخه جنوبی)، به سمت جنوب منحرف می شود و به سواحل جنوبی امارات متحده عربی رسیده و گردش سیکلونی را در سراسر بخش جنوبی خلیج ایجاد می کند. گردش کلی در تمام طول سال همچنان ادامه دارد، اما تغییرات فصلی قوی نیز وجود دارد؛ بنابراین گردش به صورت گذرا با شرایط سینوپتیکی تغییر می کند. در زمستان تحت فشار نیروی



شکل ۶. میانگین ماهانه جریان‌ها روی زمینه شوری در ۱۵ متر بالای در (الف) ژانویه، (ب) مارچ، (ج) می، (د) ژوئن، (ه) آگوست، (و) سپتامبر، بهدست‌آمده از شبیه‌سازی دوره ۵۰ ساله

آب های کم شور آب سطحی اقیانوس هند و آب های بسیار شور خلیج راه، که در تابستان بیشتر از زمستان به داخل خلیج فارس نفوذ می کند، از هم جدا می کند. از بهار تا پاییز، نیروی ترموهالاین یک جریان سطحی به سمت جنوب شرقی را در طول سواحل عربستان سعودی و کویت تولید می کند که در تابستان قوی تر از بهار و پاییز است. در بهار و تابستان به دلیل افزایش نرخ تبخیر در مناطق کم عمق جنوبی، ترموهالاین سطحی جریان یافته از تنگه هرمز به سمت این منطقه قوی تر از زمستان و پاییز است (شکل ۶).

افزایش می یابد. علی رغم گسترش شوری در خلیج، آب کم شورتر در سواحل ایرانی باقی می ماند. پس از آن، نفوذ آب سطحی اقیانوس هند در جولای و آگوست شروع به کاهش می کند. متناسب با نفوذ شار شوری، به ویژه در بخش سواحل ایران؛ جایی که نفوذ آب کم شورتر بیشتر است، سرعت جریانات نیز افزایش می یابد. سرعت جریان ها از ژانویه تا مارچ کم و از می، شروع به افزایش می کند. این روند تا ژوئن و جولای ادامه داشته و سپس در آگوست شروع به کم شدن می کند که مطابق با نتایج حسینی بالام و همکاران (۲۰۱۱) است. جبهه شوری،



شکل ۷- (الف) جریان های شبیه سازی شده در سطح در سپتامبر، (ب) برش روی پیچکها در عرض ۲۶.۳ درجه شمالی در ماه سپتامبر، (ج) تصویر استخراج شده از سنجنده مودیس (د) نقشه خطوط هم تراز ارتفاع سطح دریا (متر) برگرفته از سایت داده های ماهواره های آویسو

را نشان داد. پیچک های تشکیل شده تمام ستون آب را در برمی گیرند (۷، ب). حرکات فصلی جبهه شوری همراه با تشکیل پیچک های انرژی تیک است. در بهار، جریان درون ریز، پیچ و خم های ناپایدار در جبهه های شوری ایجاد می کند. پیچک های کاملاً گسترش یافته در ماه های تابستان تشکیل می شوند. تشکیل پیچک ها، مطابق با فرآیند ناپایداری باروکلینیک اتفاق افتاده در جبهه است.

با استفاده از مدل کوهیرنس و اعمال میانگین روزانه داده های بلند مدت اقلیمی ۵۰ ساله، با تفکیک افقی ۲ دقیقه گردش کلی، جریان های ساحلی و پیچک های میان مقیاس در خلیج فارس شبیه سازی شد. میدان جریان های افقی به شدت وابسته به میدان های هیدروگرافی، مخصوصاً میدان شوری است. آب کم شور آب سطحی اقیانوس هند، پس از ورود به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز در دو مسیر کلی گسترش می یابد: یک شاخه (شاخه شمالی)، در طول سواحل ایران انتشار

ب: پیچک ها^{۲۰}
یک جنبه جذاب گردش در خلیج فارس تغییر شکل جریان های سواحل ایران به چندین پیچک میان مقیاس است. جریان های سواحل ایران به دلیل ناپایداری باروکلینیکی تبدیل به پیچک هایی در سطح میان مقیاس می شوند. شکل پیچک ها دایره ای و بیضوی است و به وسیله میدان شوری و بردارهای جریان به خوبی مشخص می شوند. شکل ۷ (الف) سه پیچک چرخندی شبیه سازی شده در ماه سپتامبر، به قطر حدوداً ۱۰۰ کیلومتر را نشان می دهد که دارای بیشینه سرعت در بخش شمالی آن است. نتایج شبیه سازی در این ماه با تصویر استخراج شده از سنجنده مودیس^{۲۱} (شکل ۷، ج) و نقشه خطوط هم تراز ارتفاع سطح دریا برگرفته از سایت داده های ماهواره ای آویسو^{۲۲} (شکل ۷، د) تطابق خوبی

20 Eddy

21 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

22 Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanography data (AVISO)

کم و از ماه می، شروع به افزایش می کند. این روند تا ژوئن و جولای ادامه داشته و سپس در آگوست شروع به کم شدن می کند

- جبهه شوری، آب های کم شور آب سطحی اقیانوس هند و آب های بسیار شور خلیج را، که در تابستان بیشتر از زمستان به داخل خلیج نفوذ می کند، از هم جدا می کند. از بهار تا پاییز، نیروی ترموهالاین یک جریان سطحی به سمت جنوب شرقی را در طول سواحل عربستان سعودی و کویت تولید می کند که در تابستان قوی تر از بهار و پاییز است. در بهار و تابستان به دلیل افزایش نرخ تبخیر در مناطق کم عمق جنوبی، ترموهالاین سطحی جریان یافته از تنگه هرمز به سمت این منطقه قوی تر از زمستان و پاییز است.

- نتایج مدل، جریان به سمت جنوب شرق را در طول سواحل کویت و عربستان سعودی، که در بهار و تابستان قوی تر از دیگر فصل هاست، نشان داد. این جریان به طرز معنی داری در زمستان به دلیل ترموهالاین و جریان ناشی از باد، تضعیف می شود.

- خروجی های مدل نشان داد جریان سطحی به سمت جنوب، از مرکز خلیج به سمت فلات قاره بحرین، قطر و سواحل کم عمق امارات متحده عربی جریان دارد. این جریان در طول بهار و تابستان قوی تر و در زمستان ضعیف تر است.

- نتایج شبیه سازی، سه پیچک چرخندی در ماه سپتامبر، به قطر حدوداً ۱۰۰ کیلومتر را نشان داد که دارای بیشینه سرعت در بخش شمالی آن است. تشکیل شده تمام ستون آب را در برمی گیرند. پیچک های کاملاً گسترش یافته در ماه های تابستان تشکیل می شوند.

- عمق پیچک های واچرخندی نسبت به پیچک های چرخندی بیشتر است و حاکی از نفوذ این پیچک ها تا مجاورت بستر و تاثیر ناپایداری باروکلینیکی در سرتاسر ستون آب است.

مراجع

Alessi, C. A., H. D. Hunt, A. S. Bower., "Hydrographic data from the U.S. Naval oceanographic office:

می یابد و در تابستان تا حوضه غرب قطر می رسد و گردش چرخندی به وجود می آورد، همچنین یک جریان ساحلی برگشتی در طول سواحل عربی شمال قطر تشکیل می شود. شاخه دیگر (شاخه جنوبی)، به سمت جنوب منحرف می شود و به سواحل جنوبی امارات متحده عربی رسیده و گردش سیکلونی را در سراسر بخش جنوبی خلیج ایجاد می کند. شاخه جنوبی در زمستان قوی تر است، بخشی ناشی از بادهای قوی تر و بخشی ناشی از نشست آب چگال در جنوب خلیج. از آنجا که هر دو شاخه جریان به داخل خلیج گسترش می یابد، آب سطحی اقیانوس هند دستخوش افزایش شوری قابل توجهی به دلیل تبخیر و اختلاط با آب شورتر محیط می شود. در بهار و تابستان به دلیل افزایش نرخ تبخیر در مناطق کم عمق جنوبی، ترموهالاین سطحی جریان یافته از تنگه هرمز به سمت این منطقه قوی تر از زمستان و پاییز است. سرعت جریان ها در مجاورت بستر کمتر است. جریان سطحی ورودی به خلیج فارس از بستر، از طریق تنگه هرمز خارج می شود. بیشینه جریان در فصل بهار رخ می دهد، زمانی که جریان ورودی به خلیج از طریق تنگه هرمز به بیشترین مقدار خود می رسد. بنابراین به نظر می رسد که ارتباط مستقیم بین قدرت جریان مجاور بستر و جریان ورودی آب سطحی اقیانوس هند وجود دارد، به طوری که جریان خروجی کف، شار ورودی آب سطحی اقیانوس هند به خلیج فارس را تشدید می کند.

جمع بندی

- نفوذ آب سطحی اقیانوس هند به خلیج فارس از ژانویه تا ژوئن به تدریج افزایش می یابد و در ژوئن به بیشترین مقدار خود می رسد. در ماه می و ژوئن، شار آب سطحی اقیانوس هند بیشترین نفوذ را به سمت شمال خلیج فارس دارد و کیلومترها افزایش می یابد. پس از آن، نفوذ آب سطحی اقیانوس هند در جولای و آگوست شروع به کاهش می کند. متناسب با نفوذ شار شوری، به ویژه در بخش سواحل ایران؛ سرعت جریان ها نیز افزایش می یابد. سرعت جریان ها از ژانویه تا مارچ

- Geodesy, Vol. 39, no. 2, pp. 141-164, 2016
- Pous S. , P. Lazure, X. Carton, "A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability", *Continental Shelf Research*, Vol. 94, pp. 55-70, 2015
- Razavi Arab, A., Haghshenas, S. A., Zaker, H. "Deep water current velocity data in the Persian Gulf", *Book of abstracts, European Geosciences Union General Assembly, EGU2015, Vienna, Austria. 2015*
- Reynolds. R.M., "Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 27, pp.35 – 59, 1993
- Smagorinsky J., "General circulation experiments with the primitive equations – I. The basic experiment", *Monthly Weather Review*, Vol. 91(3), pp. 99–165, 1963
- Thoppil, P. G., and P. J. Hogan, "A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf", *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 40(9), pp. 2122–2134, 2010
- Thoppil, P. G., and P. J. Hogan, "Persian Gulf response to a wintertime Shamal wind event", *Deep Sea Res., Part A*, Vol. 57(8), pp. 946–955, 2010
- Yao, F., and W. E. Johns, "A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation", *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, C11017, pp. 1-17, 2010.
- Persian Gulf, southern Red sea and Arabian Sea", *Woods Hole Oceanog. Institution Technical Report WHOI-99-02.*, 1999
- Chao, S-Y., T. W. Kao, and K. R. Al-Hajri, "A numerical investigation of circulation in the Persian Gulf?" *J. Geophys. Res.*, Vol. 97(c7), pp. 11219–11236 ,1992
- Hosseinibalam, F., Hassanzadeh, S., Rezaei-Latifi, a., "Three-dimensional numerical modeling of thermohaline and wind-driven circulations in the Persian Gulf". *Appl. Math. Model.* Vol. 35, pp. 5884–5902, 2011
- Kampf J. and M. Sadrinasab, "The circulation of the Persian Gulf: a numerical study", *Ocean Sci.*, Vol. 2(1), pp. 27–41, 2006
- Luyten P. J., E. Deleesnijder, J. Ozer, K. G. Ruddick., "Presentation of a family of turbulence closure models for stratified shallow water flows and preliminary application to the Rhine outflow region", *Continental Shelf Research*, Vol. 16, pp.101–130, 1996
- Mellor G.L. and Yamada T., "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems", *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 20(4), pp. 851–875, 1982
- Mohandesi M., Bidokhti, A.A., Khaniki A.K., Hasan Zadeh, I and Azad, M.T. "A Study of the Performances of Different Turbulence Schemes in Numerical Simulation of Hydrodynamics of a Semi-Closed Sea (Persian Gulf)." *Marine*

A numerical simulation study on coastal currents of the Persian Gulf under the influence of the Indian Ocean surface water

Hesameddin Mehrfar¹, Masoud Torabi Azad^{2*}, Kamran Lari², Abbas-Ali Ali-Akbari Bidokhti³

¹ PhD candidate, Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Marine Science & Technology, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran

³ Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: m_azad@iau-tnb.ac.ir

Received: 5 December 2018, accepted: 2 April 2019

ABSTRACT

The coastal currents of the Persian Gulf were simulated using a Coupled Hydrodynamical Ecological model for Regional Shelf Sea (COHERENS) numerical model with horizontal resolution of 2 min latitude and 10 sigma vertical layers. Persian Gulf coast line and bathymetry data based on ETOPO2 and also atmospheric data extracted from NOAA were applied to the model. To validate the model simulation results, salinity field in winter and summer was extracted from the surface to 15 meter depth and compared with Reynolds (1993) results. The simulation results showed that the intrusion of Indian Ocean surface water into the Persian Gulf gradually increased from January to June and it is the highest in June. It then in July and August began to decrease. Due to the influence of salinity flux, especially in the coastal part of Iran, the velocity of currents increases as well. The velocity of currents decreases from January to March and begins to increase from May. This trend continues until June and July and then began to decrease in August. The model results showed that south-eastward current along the coasts of Kuwait and Saudi Arabia was stronger in spring and summer than in other seasons. This current is completely weakened in winter due to the thermohaline and wind-induced currents. The simulation results showed three cyclonic eddies in September, approximately 100 kilometers in diameter, which is in good agreement with the MODIS sensor and AVISO satellite images. This cyclonic eddies cover the entire water column. Fully expanded of this eddies formed in the summer months.

Keywords: Numerical simulation, Coastal currents, Persian Gulf, COHERENS model, Indian Ocean Surface Water (IOSW)

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mehrfar H.; Torabi Azad M.; Lari K.; Ali-Akbari Bidokhti AA. (2019). A numerical simulation study on coastal currents of the Persian Gulf under the influence of the Indian Ocean surface water. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 2(1): 83-92.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

