

مطالعه جت‌های ساحلی خلیج فارس تحت تاثیر ترموکلاين با استفاده از شبیه سازی عددی

حسام الدین مهرفر^۱، مسعود ترابی آزاد^{۲*}، کامران لاری^۳، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۴

^۱ گروه فیزیک دریا/ دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، hmehrfar@gmail.com

^۲ دانشیار/ دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران، m_azad@iau-tnb.ac.ir

^۳ دانشیار/ دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران، k_lari@iau-tnb.ac.ir

^۴ استاد/ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، bidokhti@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

گردش فصلی جریان‌های ساحلی خلیج فارس با تفکیک‌پذیری افقی طول و عرض جغرافیایی ۲ دقیقه، با استفاده از مدل عددی کوهرنس شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که جریان‌های سواحل ایران به سمت شمال غربی در ماه‌های دی تا فروردین گسترش می‌یابد و به بیشترین شدت خود در ماه‌های خرداد تا مرداد، زمانی که جریان درون‌ریز سطحی از طریق تنگه هرمز و با استقرار ترموکلاين فصلی به تدریج قوی‌تر می‌شود، می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده گسترش ترموکلاين با شروع فصل گرما است. تحت این شرایط جریان‌های ساحلی قوی‌تری در تابستان به وجود می‌آید. نتایج شبیه‌سازی وجود جت ساحلی را در ماه‌های اردیبهشت تا مهر با سرعت حدودا ۳۰ cm/s نشان داد. جت ساحلی در مجاورت سواحل ایران تنها محدود به سطح است و به‌طرف جنوب شرقی حرکت می‌نماید، اما جت ساحلی در مجاورت عربستان سعودی در تمامی ستون آب به طور کامل از سطح تا بستر وجود دارد و به سمت جنوب شرقی حرکت می‌کند.

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

کلمات کلیدی:

شبیه سازی عددی

جریان ساحلی

خلیج فارس

مدل کوهرنس

ترموکلاين

Study of the Persian Gulf coastal jets under the influence of thermocline using numerical simulation

Hesameddin Mehrfar¹, Masoud Torabi Azad^{2*}, Kamran Lari³, Abbas-Ali Ali-Akbari Bidokhti⁴

¹ Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; hmehrfar@gmail.com

² Associate Professor, Department of Marine Science & Technology, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran; m_azad@iau-tnb.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Marine Science & Technology, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran; k_lari@iau-tnb.ac.ir

⁴ Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran; bidokhti@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:
Received: 15 Nov. 2019
Accepted: 05 Jan. 2020

Keywords:
Numerical Simulation
Coastal Currents
Persian Gulf
COHERENS Model
Thermocline

Seasonal circulation of coastal currents of the Persian Gulf with a horizontal resolution of 2-minutes of latitude and longitude was simulated using COHERENS numerical model. The currents of the Iranian coasts flew northwestward from January to April, reaching the highest level from June to August, when surface inflow currents through the Strait of Hormuz gradually became stronger with establishment of the seasonal thermocline. The simulation results indicated thermocline expansion with the onset of the heating season. Under the mentioned conditions, stronger coastal currents were generated in summer. The simulation results showed the presence of coastal jet with a speed of approximately 30 cm/s from May to October. The coastal jet near the Iranian coasts is only confined to the surface, moves toward southeast; however, the coastal jet in the vicinity of Saudi Arabia is entirely present at all columns of water from surface to the seabed and moves toward southeast.

۱ - زمینه هدف

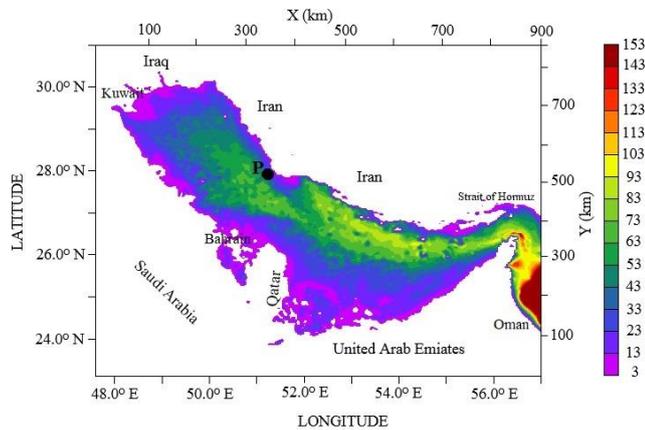
در علم اقیانوس‌شناسی منطقه ساحلی به آب‌های امتداد داده شده به طرف خشکی به میزان یک کیلومتر از بالاترین سطح آب دریا و به طرف دریا تا خط هم‌عمق سی‌متر تعریف شده است. این منطقه شامل آب‌های بستر، ورودی رودخانه‌ها، مصب‌ها، شاخاب‌ها، خلیج‌های کوچک و همچنین بالاترین میزان جزرو مد را شامل می‌شود. مطالعه مناطق ساحلی و فرآیند حرکات در آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طوری که حرکات ساحلی در فرسایش سواحل و تغییر شکل آنها و انتقال آلودگی‌ها و مسائل زیست محیطی، ایجاد و تاسیس سازه‌های زیر دریایی و مطالعات صید و شیلاتی نقش بسیار عمده‌ای دارند. یکی از حرکات ساحلی در مقیاس متوسط جریان‌های قوی در امتداد ساحل است که به جت ساحلی موسوم می‌باشند. جت‌های ساحلی نقش مهمی در آب و هوای مناطق ساحلی دارند. از نظر نظامی و حرکت اجسام در زیر آب، شناخت جریان‌های زیر سطحی کاملاً مهم و ضروری است. جریان‌ها نقش مهمی در انتقال آلودگی‌های ناشی از پس‌آب کشتی‌ها، کارخانه‌ها، آلودگی‌های نفتی و پس‌مانده‌های وارد شده در محیط اقیانوسی را دارند. از آن‌جاکه آبیان در شرایط مناسب اقلیمی خود مثلاً در شوری و دمای ویژه‌ای زندگی می‌کنند؛ بنابراین در بحث مهاجرت آبیان، جریان‌ها نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند، یعنی از لحاظ صنعت شیلاتی نیز، بررسی جریان‌ها حائز اهمیت است.

خلیج فارس یک حوضه نیمه‌بسته و کم عمق با میانگین ۳۵ متر است که از طریق تنگه هرمز به خلیج عمان متصل می‌شود. 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. [۱]. نتایج با استفاده از شبیه سازی با تفکیک پذیری بالا (۳ کیلومتر) در خلیج فارس نشان می‌دهد، تبدلات قابل ملاحظه در مقیاس درون فصلی در ساختارهای ترموهالاین و جریان‌ها نیز اتفاق می‌افتد، که توسط نیروهای کشندی با فرکانس بالا و نیروهای اتمسفری تشدید می‌شود، که می‌تواند شکل و شدت گردش چرخندی، موقعیت شاخه رودخانه، میزان توسعه یک فراجوشی در طول سواحل شمال غربی ایران، جریان‌های برگشتی از ساحل در طول سواحل غربی و پراکنش پیچک‌های میان مقیاس را تحت تاثیر قرار دهد [۲]. جریان آب در خلیج فارس فصلی است و به میزان زیادی به اختلاف چگالی و بادهای بستگی دارد. در تابستان جریان از لحاظ پهنا گسترده‌تر است و به خیلی دورتر به طرف شمال تا نزدیکی راس خلیج فارس می‌رسد. همچنین یک جت ساحلی قوی به سمت جنوب، در شرق قطر که عمدتاً ناشی از باد است، پیش‌بینی شده است [۳]. انتقال توده‌های آب در اثر تعادل ژئوستروفیک در ناحیه برخورد دو توده آب با چگالی‌های متفاوت در مناطق ساحلی ایران و عربستان سعودی و

وزش بادهای غالب شمال غربی سبب ایجاد جریان‌های سطحی و قوی در مجاورت سواحل ایران و عربستان سعودی در قسمت شمالی خلیج فارس می‌گردد که آنرا جت ساحلی می‌نامند [۴]. تاپیل و هوگان (۲۰۱۰) اثر باد شمال زمستانه بر خلیج فارس را مطالعه و شبیه‌سازی 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 شدیدنه تنها گردش کل خلیج فارس را تقویت می‌کند، بلکه یک جریان به سمت شمال غرب، در سواحل ایران، به شدت (۲۵-۳۰ cm/s) از تنگه هرمز تا طول ۵۲ درجه شرقی که متمایل به سمت ساحل است، ایجاد می‌کند [۵]. کمف و همکاران (۲۰۰۶) گردش آب در خلیج فارس را مطالعه و شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که در طول پاییز و زمستان، شبیه سازی‌ها برقراری یک الگوی جریان پایدار در جهت عقربه‌های ساعت را در شمال خلیج فارس نشان می‌دهد، که شامل یک جت ساحلی پایدار در امتداد ساحل ایران است که با حداکثر سرعت ۱۰ cm/s در جهت جنوب شرق حرکت می‌کند [۶]. حسینی بالام و همکاران (۲۰۱۱)، گردش خلیج فارس را تحت تاثیر تنش باد و شار سطحی ترموهالاینی با استفاده از مدل عددی هیدرودینامیکی کوهیرنس^۱ بررسی کردند. آنها نشان دادند شارهای گرمایی نقشی اساسی در گردش عمومی خلیج فارس بازی می‌کنند. در بهار و تابستان تنش باد، جریان‌های سطحی جنوب شرقی با سرعت حدود ۵ cm/s در طول سواحل ایرانی و عربستان سعودی در خلیج فارس ایجاد می‌کند [۷]. مهندسی‌نمین و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل عددی هیدرودینامیک یک حوضه نیمه‌بسته مانند خلیج فارس را بررسی کردند. آزمایش مدل با طرحواره‌های بستار تلاطمی $k - l$ و $k - \varepsilon$ نشان می‌دهد که طرحواره $k - \varepsilon$ در آب‌های ورودی خلیج فارس اختلاط کمتری را نشان می‌دهد. جریانات برای آزمایشی که طرحواره $k - l$ اعمال می‌شود دارای سرعت بیشتری هستند که باید با اختلاط بیشتر همراه باشند و با الگوهای شوری نیز مطابقت دارند [۸]. ترابی آزاد و مهرفر (۲۰۱۷) تغییر پذیری جت‌های ساحلی خلیج فارس را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند و مشخص شد شکل گیری جت‌های ساحلی مرتبط با گرایان فشار است. دینامیک چنین حرکتی غیر خطی و غیر شبه ژئوستروفیک و برای آنها عدد بدون بعد راسبی تقریباً از مرتبه یک است. همچنین انتقال توده آب در اثر تعادل ژئوستروفیک به مناطق ساحلی ایران و عربستان سعودی و وزش بادهای غالب شمال غربی سبب ایجاد دو جت قوی در مجاورت این مناطق می‌شود [۹].

گردش و تشکیل توده‌آب در خلیج فارس موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. برخی از این مطالعات از مدل‌های عددی هیدرودینامیک استفاده و جریان‌های تشکیل شده در خلیج فارس را شبیه‌سازی

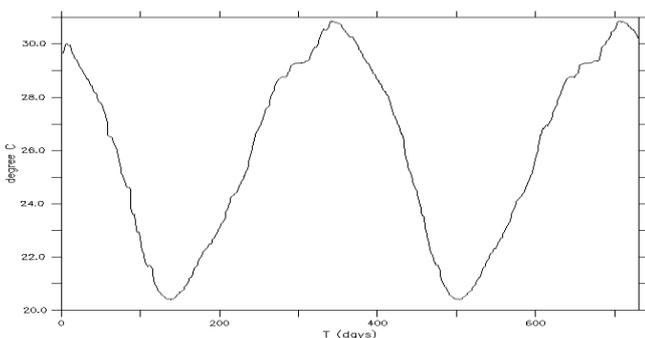
استفاده شده است. شوری مرجع ۳۸، دمای مرجع ۲۲ درجه سانتی‌گراد و چگالی مرجع ۱۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است [۱۴ و ۱۵]. تحت شرایط اعمال شده فوق، مدل بعد از ۱۰ سال اجرا به پایداری اقلیمی رسید و نتایج استخراج شده در سال دهم برای بررسی تغییرات فصلی جریان‌های خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفت.



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

۳ - صحت سنجی مدل و نتایج شبیه‌سازی

برای حصول نتایج قابل اعتماد جهت تحلیل، ابتدا مدل باید به پایداری اقلیمی برسد. برای رسیدن به مرحله پایداری، مدل برای ۱۰ سال اجرا شد. طی این فرایند، رژیم گردش آب به همراه دیگر خواص توده آب باید در خلیج فارس در مدت مورد نظر به یک چرخه پایدار برسند. بعد از رسیدن به حالت پایدار اگر برای هر نقطه از شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی، نمودار دما یا شوری نسبت به زمان رسم شود، یک شکل تکرارپذیر خواهد داشت. نقطه شاهد P در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نمودار دما در دو سال آخر شبیه‌سازی است. همان‌گونه که دیده می‌شود، دما و شوری بعد از ۱۰ سال اجرای مدل به یک حالت تکرارپذیر رسیده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق مربوط به آخرین سال شبیه‌سازی است.



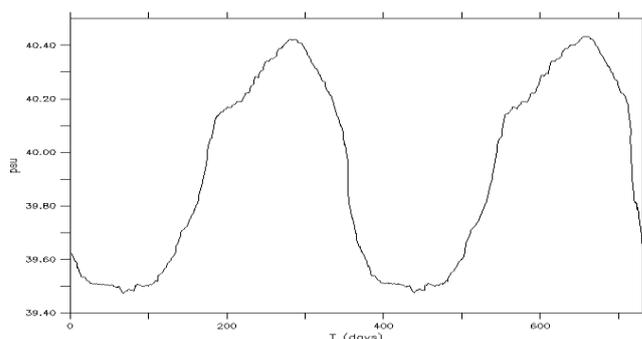
شکل ۲- سری زمانی مربوط به میانگین دما برای ۲ سال آخر از کل مدت شبیه‌سازی در نقطه دلخواه P، که از سطح تا عمق میان‌گیری شده است.

کرده‌اند [۱، ۳، ۶، ۷ و ۸]. در این پژوهش از مدل عددی کوهیرنس استفاده شد. کوهیرنس یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی است که دارای کاربردهای متنوعی در سواحل و نواحی فلات قاره می‌باشد. این مدل با مدل‌های بیولوژیکی و مدل‌های آلودگی جفت شده است و قادر به حل فرآیندهای میان‌مقیاس تا فرآیندهایی با مقیاس فصلی می‌باشد. با استفاده از این مدل و اعمال میانگین داده‌های بلندمدت اقلیمی در یک دوره ۱۰ ساله، با تفکیک افقی ۲ دقیقه و ۱۰ لایه قائم سیگما، گردش کلی و جریان‌های خلیج فارس شبیه‌سازی شد. جهت حل معادلات فرارفت تکانه و اسکالر از طرح‌واره TVD^۲ استفاده شد. طرح‌واره تلاطمی ملور-یامادا، به دلیل درجه بالاتر نسبت به سایر مدل‌های تلاطمی و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از کارهای کمف [۶] و مهندسی [۸] به مدل اعمال شد. سپس نتایج شبیه‌سازی جریان‌های ساحلی خلیج فارس، تشکیل ترموکلاين و تاثیر آن روی جت‌های ساحلی در ماه‌ها و فصل‌های مختلف در مقیاس حوضه نشان داده شد.

۲ - روش بررسی

برای شبیه‌سازی جریان‌ها از مدل عددی کوهیرنس 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 داده‌های ETOPO-2 با تفکیک‌پذیری 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 معنی‌داری بر نتایج ندارد، هموار شد (شکل ۱). برای استفاده در مدل‌های چند لایه که دارای کف ناتراز می‌باشد، نیاز به آرایه‌ی قائمی است که در تمامی پهنه‌ی اقیانوسی تعداد لایه‌ها را یکسان در نظر گیرد، بنابراین از آرایه‌ی قائم سیگما استفاده شده است. این کار کمک می‌کند که همه‌ی محیط ما دارای یک تعداد لایه باشد [۱۰]. در یک دستگاه مختصات با آرایه‌ی قائم سیگما، تعداد سطوح قائم ستون آب در هر عمقی از ستون آب یکسان است. تعداد لایه‌های عمودی سیگما، ۱۰، انتخاب گردید. برای برقراری شرط پایداری CFL^۳، گام زمانی دو بعدی و سه بعدی به ترتیب ۲۰ ثانیه و ۶۰۰ ثانیه انتخاب شده است. طرح‌واره بستار تلاطم k-l (ملور-یامادا) [۱۱] به دلیل بالاتر بودن درجه آن نسبت به مدل k-e، همچنین با توجه به نتایج [۶ و ۱۲] برای تلاطم استفاده شده است. فرمول‌بندی اسماکورینسکی برای طرح‌واره پخش افقی استفاده شده است [۱۳]. نیروهای میانگین روزانه اتمسفری اقلیمی (مولفه‌های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر، بارش و دبی رودخانه) برای یک دوره ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۰) از داده‌های سازمان ملی اقیانوسی و جوی^۴ میانگین‌گیری شده و در مدل

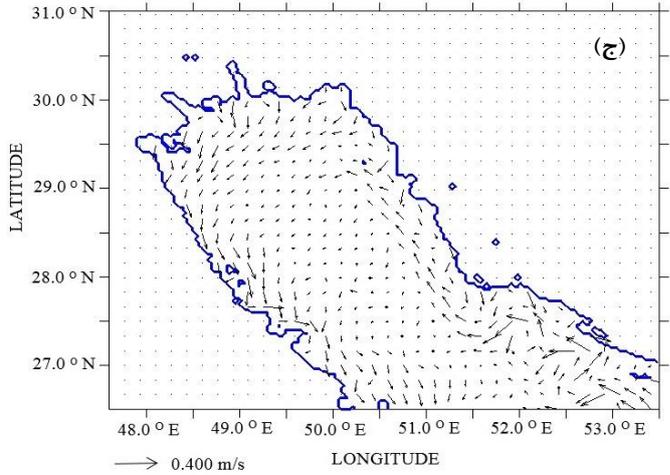
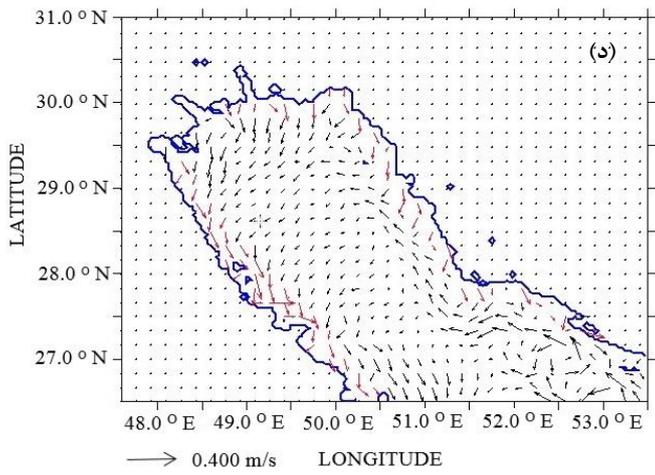
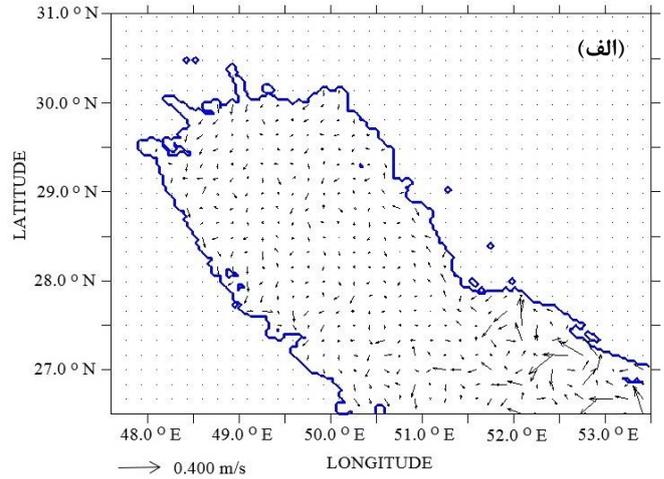
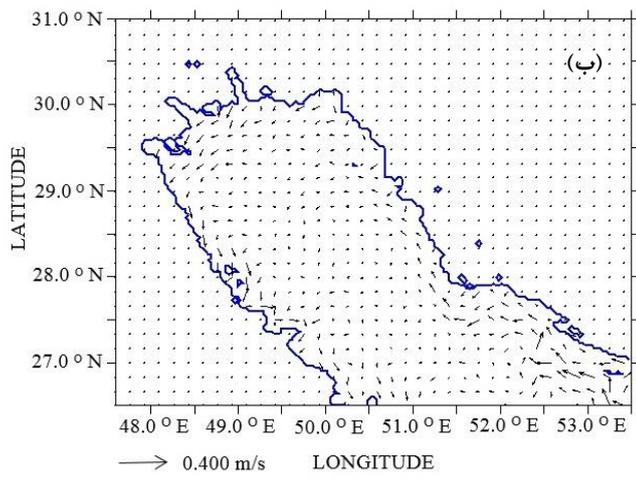
سواحل ایرانی رفته‌رفته قویتر می‌شود و به سمت شمال خلیج فارس نفوذ می‌کند. نتایج شبیه‌سازی بردارهای جریان نشان‌دهنده شروع افزایش سرعت جریانات با شروع فصل گرماست (شکل ۴ و ۵). وقتی که اقیانوس از جو گرما می‌گیرد و ستون آب چینه‌بندی شده قوی را به وجود می‌آورد، ترموکلاین گسترش می‌یابد (شکل ۹ و ۱۰). این موضوع سبب می‌شود، اختلاط عمودی در شرایط باد ضعیف غالب در این فصل، محدود شود. سپس به‌وسیله آب چگال‌تر (کم‌شورتر) ساکن در انتهای شمالی (جنوبی) خلیج، گرادیان فشار تولید می‌شود و جریان آب کم‌شورتر را از خلیج عمان به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز می‌راند. تحت این شرایط جت‌های ساحلی به وجود می‌آید. براساس نتایج بدست آمده از حرکات آب در خلیج فارس و اندازه‌گیری به‌عمل آمده مشخص شده است که جت ساحلی نیز در سواحل ایران و عربستان سعودی وجود دارد ۹ و ۱۶. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، جریان آب در خلیج فارس فصلی است و به‌طور زیادی به رانش چگالی بستگی دارد. از برخورد جریان آب ورودی از تنگه هرمز با شوری بیشتر با آب با شوری کمتر رودخانه‌های شمالی خلیج فارس در ناحیه‌ی میانی آن ناحیه جبهه‌ای بوجود می‌آید که با ناپایداری باروکلینیکی همراه است. انتقال توده‌آب بر اثر تعادل ژئوستروفیک به مناطق ساحلی ایران و عربستان سعودی و وزش بادهای غالب شمال غربی سبب ایجاد جت ساحلی در این مناطق می‌شود. شکل ۵ بردارهای جریان سطح و کف، در سواحل شمالی ایران و عربستان در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر را نشان می‌دهد. جت ساحلی در مجاورت سواحل ایران تنها محدود به سطح است و به‌طرف جنوب شرقی حرکت می‌نماید و در بستر جریان برگشتی به طرف شمال غربی داریم، اما جت ساحلی در مجاورت عربستان سعودی در تمامی ستون آب به‌طور کامل از سطح تا بستر وجود دارد و به‌طرف جنوب شرقی حرکت می‌نماید که در شکل ۴-د و شکل ۵ (ج-۱) با رنگ قرمز نشان داده شده است. با کاهش سرعت بادهای غالب شمال غربی خلیج فارس جریان‌های جت ساحلی در مجاورت سواحل ایران ناپدید و در مجاورت سواحل عربستان سعودی کاملاً تضعیف می‌گردد.



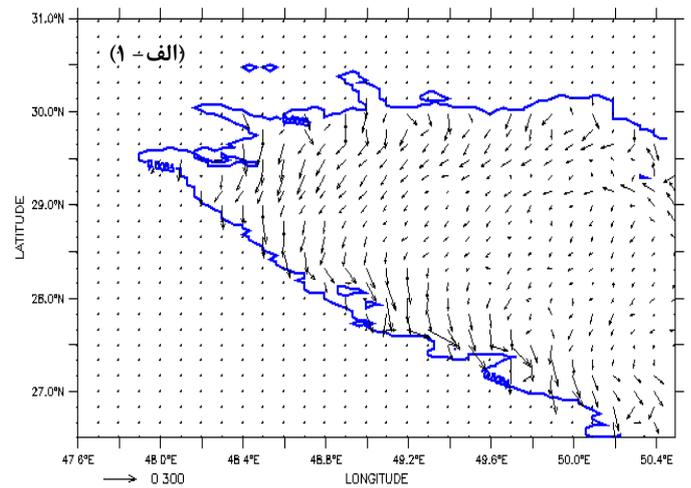
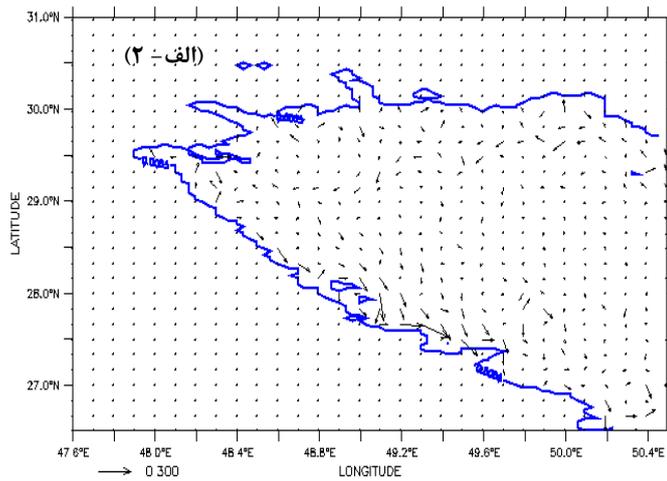
شکل ۳- سری زمانی مربوط به میانگین شوری برای ۲ سال آخر از کل مدت شبیه‌سازی در نقطه دلخواه P، که از سطح تا عمق میان‌گیری شده است.

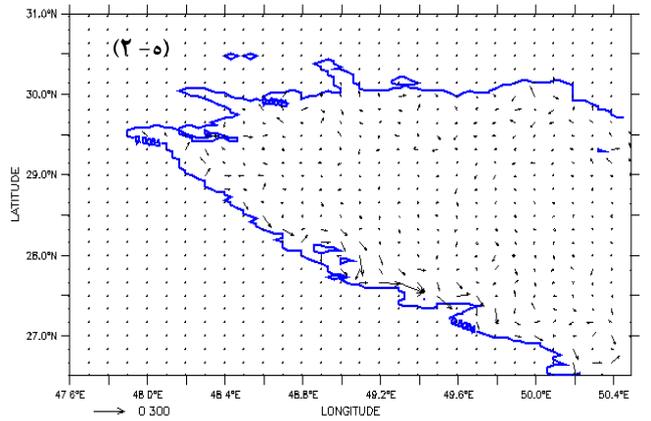
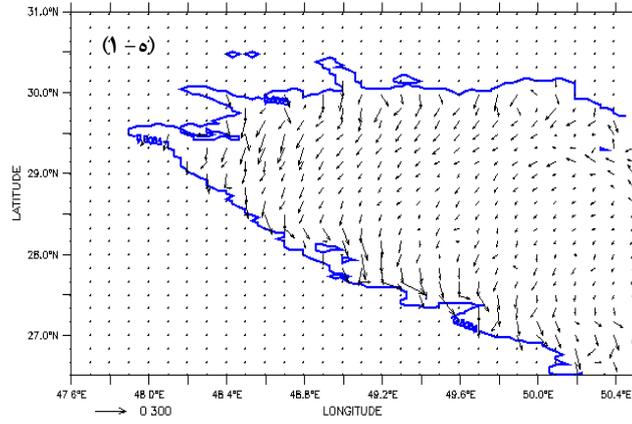
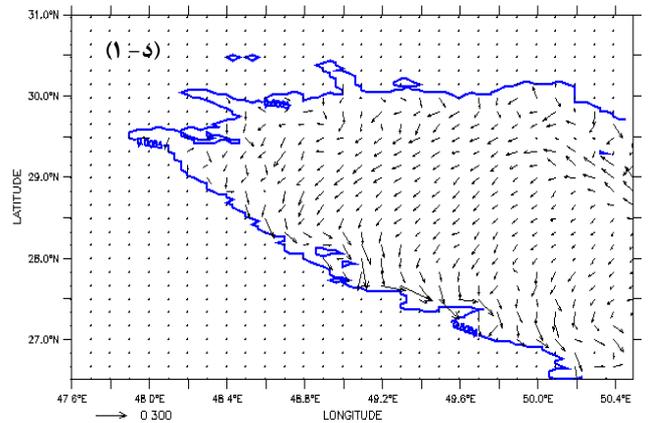
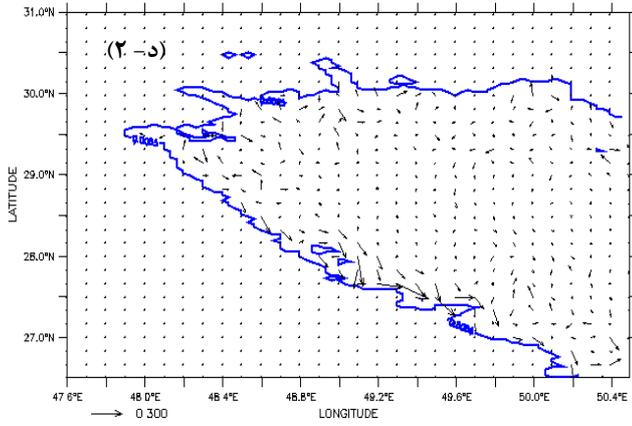
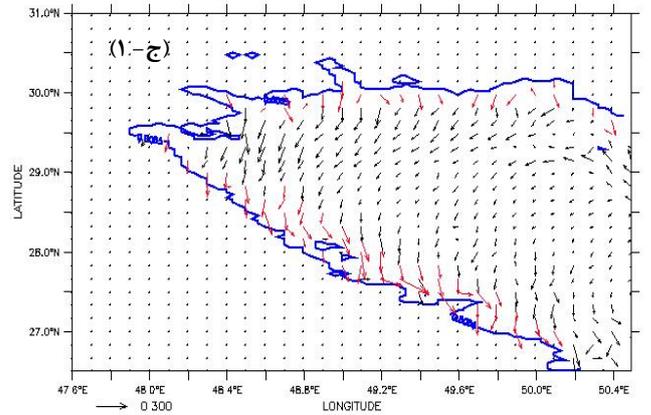
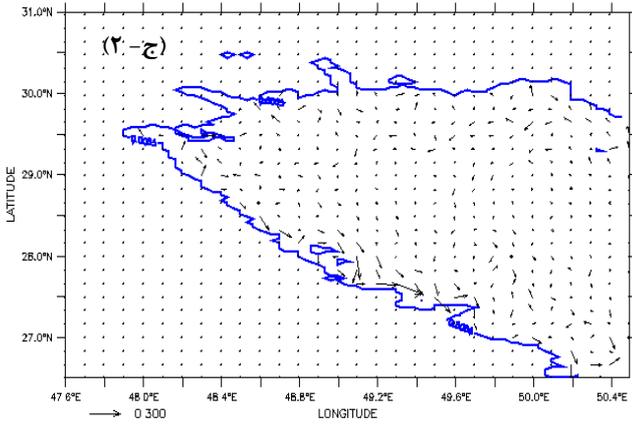
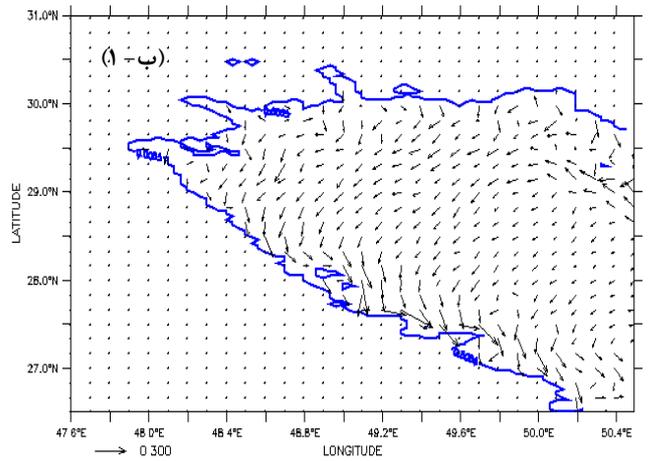
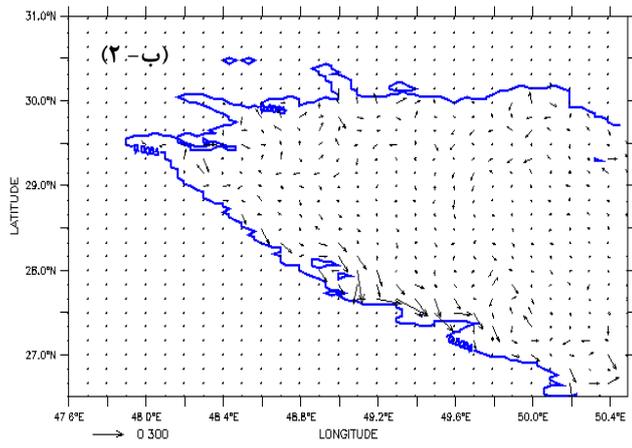
۴ - یافته‌ها

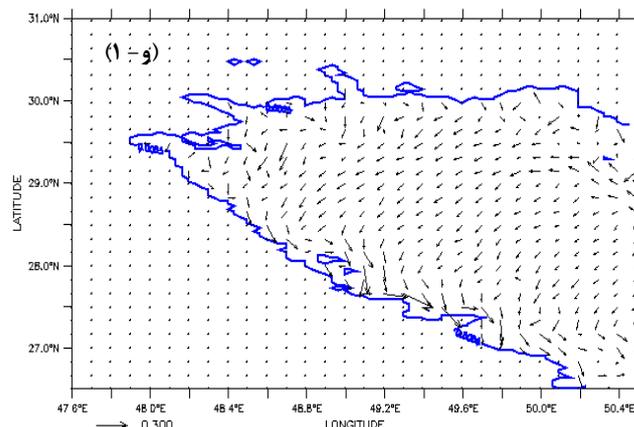
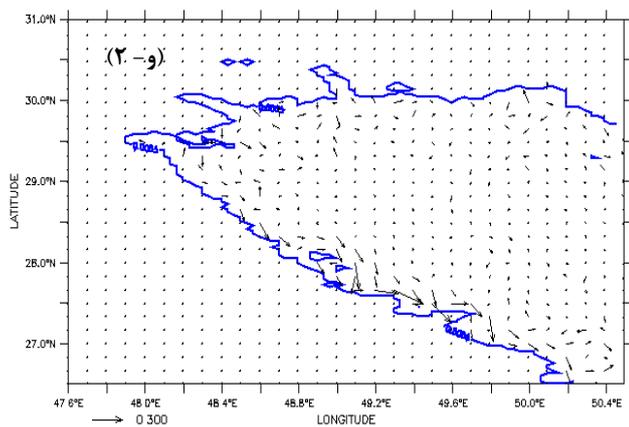
شکل‌های ۴ و ۵ نتایج شبیه‌سازی شده بردارهای جریان را در خلیج فارس نشان می‌دهد. داده‌های باد در یک دوره اقلیمی ۵۰ ساله به صورت میانگین روزانه به مدل اعمال شده است. نتایج این شبیه‌سازی، در مقیاس حوضه به گردش کلی شبیه است و با مشاهدات رینولدز [۴] و نتایج مدل‌سازی تاپیل و همکاران [۱۱] و مهندسی و همکاران [۸] مطابقت دارد. جریان‌های سواحل ایرانی به سمت شمال غربی در ماه‌های دی تا فروردین گسترش می‌یابد (شکل ۴، الف و ب) و به بیشترین شدت خود در ماه خرداد تا مرداد (شکل ۴، ج و د)، زمانی که جریان درون‌ریز سطحی از طریق تنگه هرمز و با استقرار ترموکلاین فصلی به تدریج قوی‌تر می‌شود، می‌رسد. همان‌گونه که از این شکل‌ها برمی‌آید، به‌طور کلی، جریان‌های سطحی در تابستان (تقریباً ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه)، قوی‌تر و در زمستان ضعیف‌تر است. شکل ۶، میانگین دمای سطحی را در ماه مرداد نشان می‌دهد. چینه‌بندی قائم در طول برش AA' و BB' در ماه‌های بهمن و مرداد در شکل‌های ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است. گردش ضعیف‌تر در زمستان در نتیجه کاهش گرادیان چگالی بین خلیج فارس و دریای عمان و همچنین چینه‌بندی ضعیف (شکل ۷ و ۸) به دلیل سرمای زمستان است. در تابستان به دلیل افزایش جریان ورودی به خلیج فارس از دریای عمان، قوی‌تر شدن چینه‌بندی و کاهش سرعت باد، جریان‌های



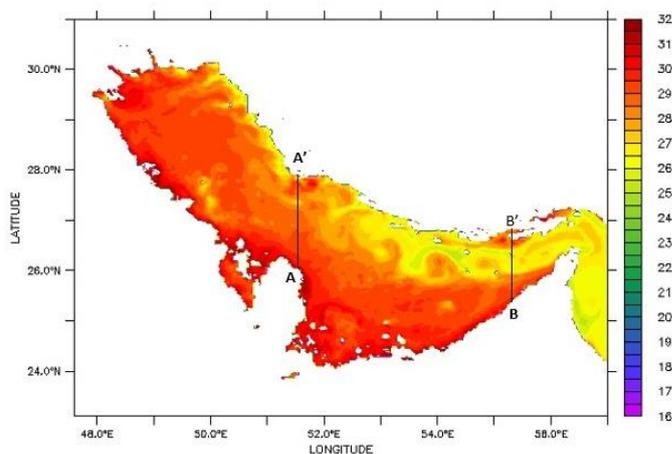
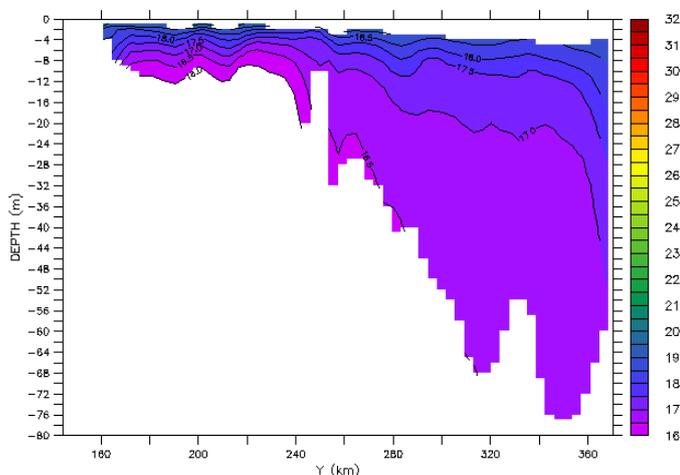
شکل ۴- بردارهای جریان در سطح، (الف) دی، (ب) فروردین، (ج) خرداد، (د) مرداد





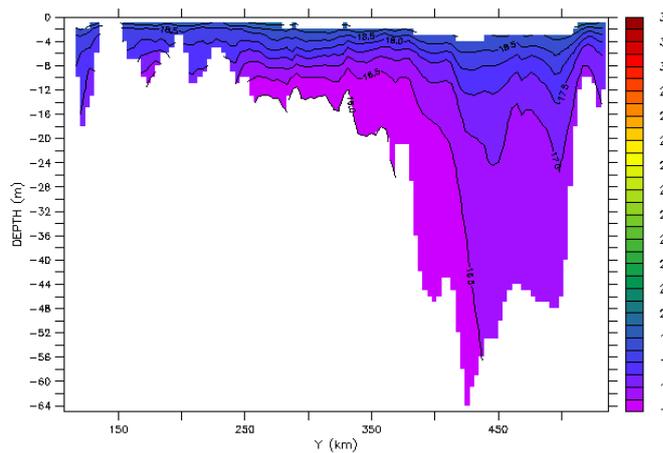
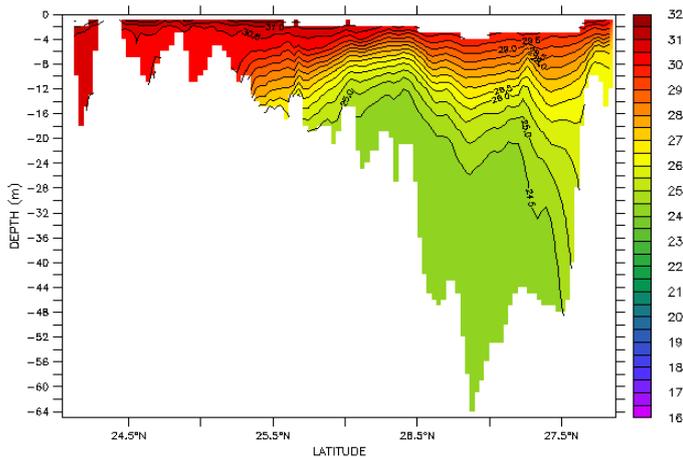


شکل ۵- بردارهای جریان سطح (۱) و کف (۲)، و جت ساحلی در بخش شمالی خلیج فارس در ماه‌های (الف) اردیبهشت، (ب) خرداد، (ج) تیر، (د) مرداد، (ه) شهریور و (و) مهر



شکل ۶- میانگین ماهانه دمای سطحی در ۱۵ متر بالایی در ماه مرداد

شکل ۸- نیمرخ قائم دما (ترموکلاین) در طول خط BB' در ماه بهمن



شکل ۷- میانگین ماهانه دمای سطحی در ۱۵ متر بالایی در ماه مرداد

شکل ۹- نیمرخ قائم دما (ترموکلاین) در طول خط AA' در ماه مرداد

خلیج فارس از دریای عمان، قوی‌تر شدن چینه‌بندی و کاهش سرعت باد، جریان‌های سواحل ایرانی رفته‌رفته قوی‌تر می‌شود و به سمت شمال خلیج فارس نفوذ می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

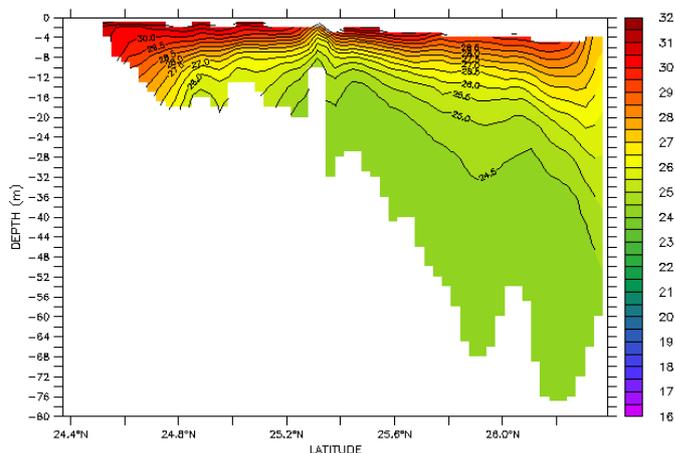
نتایج شبیه‌سازی بردارهای جریان نشان‌دهنده شروع افزایش سرعت جریان‌ها با شروع فصل گرما است. گسترش ترموکلاین سبب می‌شود، اختلاط عمودی در شرایط باد ضعیف غالب در این فصل، محدود شود. سپس به وسیله آب چگال‌تر (کم‌شورتر) ساکن در انتهای شمالی (جنوبی) خلیج گرادیان فشار تولید می‌شود و جریان آب کم-شورتر را از خلیج عمان به خلیج فارس از طریق تنگه هرمز می‌راند. تحت این شرایط جریان‌های ساحلی قوی‌تری به وجود می‌آید. جت ساحلی در مجاورت سواحل ایران تنها محدود به سطح است و به طرف جنوب شرقی حرکت می‌نماید و در بستر جریان برگشتی به طرف شمال غربی داریم، اما جریان جت ساحلی در مجاورت عربستان سعودی در تمامی ستون آب به طور کامل از سطح تا بستر وجود دارد و به طرف جنوب شرقی حرکت می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی وجود جت ساحلی در ماه‌های اردیبهشت تا مهر را نشان داد. با کاهش سرعت بادهای غالب شمال غربی خلیج فارس جت ساحلی در مجاورت سواحل ایران ناپدید و در مجاورت سواحل عربستان سعودی کاملاً تضعیف می‌گردد.

کلید واژگان

- 1- Hydrodynamic-Ecological Model for Regional and shelf seas (COHERENS)
- 2- Total Variation Diminishing
- 3- Courant-Fredrechs-Lewy (CFL)
- 4- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

۷- مراجع

- 1- Thoppil, P.G., and Hogan, P.J., (2010a), *A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf*. Journal of Physical Oceanography, Vol. 40, p.2122-2134.
- 2- Pous, S., Lazure, P., and Carton, X., (2015), *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, p.55-70.
- 3- Chao, S.Y., Kao, T.W., and Al-Hajri, K.R., (1992), *A numerical investigation of*



شکل ۱۰- نیمرخ قائم دما (ترموکلاین) در طول خط BB' در ماه مرداد

۵- بحث

با استفاده از مدل کوهیرنس و اعمال میانگین روزانه داده‌های بلندمدت اقلیمی ۵۰ ساله، با تفکیک افقی ۲ دقیقه، جریان‌های ساحلی در خلیج فارس شبیه‌سازی شد. میدان جریان‌های افقی به شدت وابسته به میدان‌های هیدروگرافی، مخصوصاً میدان شوری است. در کنار گردش کلی آب در خلیج فارس، تغییرات فصلی قوی نیز وجود دارد؛ وقتی در تابستان و بهار باد آرام می‌شود و ترموکلاین فصلی تشکیل می‌شود، جریان در ساحل قوی‌تر می‌شود و می‌تواند تقریباً به انتهای شمالی خلیج برسد و یک زبان کم‌شوری آب را تا عرض $28^{\circ}N$ بیاورد. در تابستان و بهار جریان‌های به سمت شمال غربی در طول سواحل ایران به رأس خلیج فارس می‌رسد و به پلوم اروندرود ملحق می‌شوند و به سمت جنوب شرق سواحل کویت و عربستان سعودی جریان می‌یابد. مرکز بخش شمالی خلیج فارس یک منطقه نسبتاً ایستا را نشان می‌دهد. این منطقه در زمستان و بهار وسیع‌تر می‌شود. نتایج مدل همچنین جریان به سمت جنوب شرق را در طول سواحل کویت و عربستان سعودی، که در بهار و تابستان قوی‌تر از دیگر فصل‌هاست، نشان داد. این جریان به طرز معنی‌داری در زمستان به دلیل ترموهالاین و جریان ناشی از باد، تضعیف می‌شود. خروجی‌های مدل نشان داد جریان سطحی به سمت جنوب، از مرکز خلیج به سمت فلات قاره بحرین، قطر و سواحل کم‌عمق امارات متحده عربی جریان دارد. این جریان در طول بهار و تابستان قوی‌تر و در زمستان ضعیف‌تر است. جریان‌های سواحل ایرانی به سمت شمال غربی در ماه‌های دی تا فروردین گسترش می‌یابد و به بیشترین شدت خود در ماه خرداد تا مرداد، زمانی که جریان درون‌ریز سطحی از طریق تنگه هرمز و با استقرار ترموکلاین فصلی به تدریج قوی‌تر می‌شود، می‌رسد. گردش ضعیف‌تر در زمستان در نتیجه کاهش گرادیان چگالی بین خلیج فارس و دریای عمان و همچنین چینه‌بندی ضعیف به دلیل سرمای زمستان است. در تابستان به دلیل افزایش جریان ورودی به

- 15- Alessi, C. A., H.D., Hunt, A.S., Bower. (1999), *Hydrographic data from the U.S. Naval oceanographic office: Persian Gulf, southern Red sea and Arabian Sea, Woods Hole Oceanog.* Institution Technical Report WHOI-99-02.
- 16- Lardner, R., Al-Rabeh, A., Gunay, N., Hossain, M., and Reynolds, R., (1993), *Computation of the residual flow in the ROPME Sea Area using the Mt-Mitchell data and KFUPM. RI hydrodynamical models.* Final report of the Mt-Mitchell cruise in the ROPME Sea Area, Vol., p.116-150.
- 4- Reynolds, R.M., (1993), *Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition.* Marine Pollution Bulletin, Vol. 27, p.35-59.
- 5- Thoppil, P.G., and Hogan, P.J., (2010b), *Persian Gulf response to a wintertime shamal wind event.* Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Vol. 57, p.946-955.
- 6- Kämpf, J., and Sadrinasab, M., (2006), *The circulation of the Persian Gulf: a numerical study.* Ocean Science, Vol. 2, p.27-41.
- 7- Hosseinibalam, F., Hassanzadeh, S., and Rezaei-Latifi, A., (2011), *Three-dimensional numerical modeling of thermohaline and wind-driven circulations in the Persian Gulf.* Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, p.5884-5902.
- 8- Namin, M.M., Bidokhti, A., Khaniki, A.K., Zadeh, I.H., and Azad, M.T., (2016), *A Study of the Performances of Different Turbulence Schemes in Numerical Simulation of Hydrodynamics of a Semi-Closed Sea (Persian Gulf).* Marine Geodesy, Vol. 39, p.141-164.
- 9- Azad, M.T., and Mehrfar, H., (2017), *Seasonal variation of coastal jets in the Persian Gulf using field studies.* Journal of Research in Marine Sciences, Vol. 2(2), p.106-111.
- 10- Yao, F., and Johns, W.E., (2010), *A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 1. Model configurations and surface circulation.* Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 115(C11), p.1-17.
- 11- Mellor, G.L., and Yamada, T., (1982), *Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems.* Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 20, p.851-875.
- 12- Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P., and Wild-Allen, K., (1999), *COHERENS A coupled hydrodynamical-ecological model for regional and shelf seas: user documentation, MUMM Rep.* Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea.
- 13- Smagorinsky, J., (1963), *General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment.* Monthly weather review, Vol. 91, p.99-164.
- 14- Ezam, M., Bidokhti, A., and Javid, A., (2010), *Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea.* Ocean Science, Vol. 6, p.887-900.