

شبیه‌سازی عددی گردش سالیانه جریان آب در منطقه خلیج فارس

امیرحسین جلائیان حسن‌پور^۱، سیدمصطفی سیادت‌موسوی^{۲*}^۱ کارشناسی‌ارشد سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، a_jalaeianhassanpour@civileng.iust.ac.ir^۲ هیات‌علمی گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، Siadatmousavi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
ناریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸	منطقه خلیج فارس منطقه‌ای مهم در جهان از لحاظ تامین انرژی، حمل و نقل دریایی، کشتیرانی، توریسم، صنعت شیلات و نظامی است. بنابراین، مطالعه گردش سالیانه جریان آب در خلیج فارس به عنوان عامل موثر بر جنبه‌های فوق، برای متخصصین علوم دریایی اهمیت بسزایی دارد. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل عددی ROMS و مشاهدات میدانی به شبیه‌سازی گردش جریان در منطقه خلیج فارس پرداخته شده است. نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های TMD و نیز داده‌های میدانی تطابق خوبی داشته است. علاوه بر این، الگوی گردش جریان در فصول تابستان و زمستان به خوبی شبیه‌سازی شده است. با این حال، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داده است که دقت مدل‌سازی در تابستان کم‌تر از زمستان بوده است که احتمالاً دلیل آن نیز ناشی از کیفیت داده‌های مرزی مدل بوده است.
کلمات کلیدی: شبیه‌سازی عددی ROMS خلیج فارس گردش جریانات سالانه	

Numerical simulation of the annual circulation of water current in the Persian Gulf

Amirhossein Jalaeian Hasanpour¹, Seyed Mostafa Siadatmousavi^{2*}¹ Graduate Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, a_jalaeianhassanpour@civileng.iust.ac.ir² Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Siadatmousavi@iust.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 31 Oct 2022

Accepted: 17 Apr 2023

Keywords:

Numerical simulation

ROMS

The Persian Gulf

Annual flow circulation

ABSTRACT

The Persian Gulf is an important region in the world regarding energy supply, transportation, shipping, and military missions. Therefore, studying the annual circulation of water current in the Persian Gulf is very important for marine experts. In the present study, the simulation of current circulation in the Persian Gulf has been studied using ROMS numerical model and field observations. The numerical model results are in good agreement with TMD dataset as well as field data. In addition, the circulation patterns in the summer and winter seasons are well simulated. However, the numerical simulation results showed that the modeling accuracy in summer was lower than in winter, probably due to the model's boundary data quality.

۱ - مقدمه

روش‌های عددی و بالارفتن قابلیت محاسباتی کامپیوترها، کاربرد مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی پارامترهای مختلف مرتبط با محیط‌های آبی در دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها بهبود و توسعه زیادی یافته است [۲-۶].

خلیج فارس با داشتن منابع غنی نفت و گاز، منطقه‌ای مهم و حساس از نظر اقتصادی، حمل و نقل، نظامی و سیاسی است و از

در مهندسی دریا و اقیانوس، گردش جریان‌های دریایی با توجه به تاثیر آنها بر سازه‌های فراساحلی، طراحی ابزارهای دریایی و انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت فراوانی دارد [۱]. دریاها و اقیانوس‌ها از جمله مخازن اصلی برای کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند که بسیاری از اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این‌رو، مدل‌سازی جریان‌های اقیانوسی بخشی مهم از مدل‌سازی سیستم کلی زمین است. در سالیان اخیر، با پیشرفت و توسعه

نشان داده شده است که ساختار عمودی این گردابه‌ها به رزولوشن مکانی مدل حساس است. علاوه بر این، آنها متوجه شدند که تفکیک مکانی مدل عددی می‌تواند بر مکانیسم انتقال حرکت و ساختار عمودی گردابه‌ها تأثیرگذار باشد [۱۲]. استغن و بویر گردش جریان در خلیج فارس را با استفاده از مشاهدات تاریخی هیدروگرافی مطالعه کردند. آنها نشان دادند که آب با شوری زیاد در امتداد سواحل غربی و جنوبی عربستان تشکیل شده است [۱۳]. شرآبرای مدلسازی گردش جریان در دریاچه انتاریو^۴ از شبکه سه‌بعدی با روش FVCOM^۵ برای شبیه‌سازی عددی استفاده کرد. مدل توسعه یافته وی با زمان سرما شروع شده و توانسته الگوی گردش جریان را در بدنه اصلی دریاچه به طور دقیق ارائه دهد. همچنین، سرعت مدل در حوضه دریاچه با الگوی گردش جریان مشاهداتی در طی سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ سازگاری مناسبی داشته است [۱۴]. عظام و همکاران با موفقیت ساختار خروجی جریان به خلیج فارس و مسیرهای توسعه آن را با استفاده از مدل عددی سه بعدی POM (مدل اقیانوس پرینستون) در طول سال ۱۹۹۲ شبیه‌سازی کردند [۱۵].

کمیجانی و همکاران با کاربرد مدل عددی ROMS در منطقه دریای خزر نشان دادند که در منطقه آب عمیق یک چرخش ساعتگرد قوی وجود داشته و نیز در شمال غربی یک ساختار دو قطبی ساعتگرد و در جنوب غربی نیز یک ساختار دو قطبی پادساعتگرد تقریباً در تمام طول سال وجود دارد [۱۶]. فنگ چائو و همکاران با استفاده از مدل HYCOM، جریانات سطحی خلیج فارس را شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل آنها نشان دهنده انتشار آب‌های سطحی اقیانوس هند در امتداد سواحل ایران به سمت شمالی خلیج فارس و نیز در سواحل جنوبی به دلیل بادهای غالب شمال غربی است [۱۷]. الاعصاری و پاکناویچ گردش جریان آب به صورت فصلی را در خلیج فارس با استفاده از یک مدل عددی شبیه‌سازی کردند. در مطالعه آنها از اندازه‌گیری‌های میدانی شمال خلیج فارس برای مشخص کردن گردش فصلی جریان استفاده شده است. آنها گردش جریان را در فصول مختلف با در نظر گرفتن اثرات باروکلینیک و هواشناسی و یک مدل سه‌بعدی بررسی کردند [۱۸]. حسن‌زاده و همکاران پخش شوری توسط نیروی باد و ترموهالین^۶ را در خلیج فارس شبیه‌سازی عددی کردند. آنها دریافتند که در منطقه خلیج فارس تغییرات مکانی و زمانی تاثیر قابل توجهی روی شوری داشته است. علاوه بر این دریافتند که دو عامل جریان حرارتی و تنش باد نقش مهمی در چرخه فصلی

پرتددترین آبراه‌های جهان است [۷]. خلیج فارس دریایی کم‌عمق و نیمه‌بسته است که عملکرد آن نوعاً به صورت یک مصب معکوس در نظر گرفته می‌شود. آب خلیج فارس از جمله شورترین توده‌های آبی جهان است که به دلیل تبخیر زیاد و ایجاد تبادل آبی محدود با اقیانوس باز از طریق تنگه هرمز در این منطقه تشکیل شده است. گردش جریان در خلیج فارس به دلیل عمق کم حوضه، حالت منحصر به فرد دارد. فرآیندهای فیزیکی کنترل گردش و خصوصیات جرم آب در خلیج فارس عوامل پیچیده و پویا هستند که در مقیاس‌های زمانی و مکانی به صورت مختلف عمل می‌کنند [۸]. همانند سایر محیط‌های آبی، خلیج فارس تحت تأثیر جزر و مد، باد، گرما و شار آب شیرین (از جمله رودخانه‌ها) است. تأثیر مستقیم نیروهای تولیدکننده جزر و مد در خلیج فارس بسیار ضعیف است، اما جزر و مد از اقیانوس هند به گسترش آن کمک می‌کند. علاوه بر این، توده آب در خلیج فارس تحت تاثیر بادهای غالب شمال غربی به نام شمال حرکت می‌کند. بادهای دیگر، به نام‌های قوس یا سهیلی از جنوب می‌وزند، و باد دیگری به نام نشی از شمال شرقی می‌وزد که بیش‌تر محلی بوده و نوسانات فصلی دارد و اغلب به طور ناگهانی رخ می‌دهد.

در ادامه مروری بر برخی مطالعات مرتبط با شبیه‌سازی عددی گردش جریان آب در محیط‌های آبی در مناطق مختلف دنیا و به‌ویژه در منطقه خلیج فارس و دریای عمان شده است. لیم هاک سو و همکارانش برای آب‌های ساحلی کشور کره، سیستم مدل‌سازی اقیانوس منطقه‌ای (ROMS) را با کوپل موج و ماژول‌های کیفیت آب به منظور مدلسازی گردش جریان، دما، شوری، ارتفاع موج طوفان و اطلاعات موج توسعه دادند. در نهایت آنها سیستم ROMS با مقیاس پایین را به عنوان یک سیستم پیشرفته برای اقیانوس‌شناسی آب‌های کره مدلسازی کردند که هر ۷۲ ساعت یکبار توانایی انتقال اطلاعات به عموم و کارشناسان را دارد [۹]. ایساکنس مطالعه‌ای را به منظور بررسی بی‌ثباتی باروکلینیک جریان آتلانتیک نوژ بر اساس سیستم مدل‌سازی منطقه‌ای اقیانوس اجرا کرده است. مدل آنها دارای تفکیک شبکه افقی ۴ کیلومتر و ۳۵ لایه با افزایش تفکیک در نزدیکی سطح بوده است [۱۰]. کالین مارتین تحقیقی را در خصوص اثرات گردابی آب و نحوه اثرگذاری آن بر روی گردش آب در مقیاس بزرگ و درباره‌ی اثرات جزر و مدی و تاثیر آن انجام داده است [۱۱]. مارسلا کنتراس فرآیند ایجاد گردابه‌های پادساعتگرد زیرسطحی در منطقه شیلی-پرو را با استفاده از یک مدل اقیانوسی با وضوح بالا و رزولوشن پایین شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها در مطالعه‌شان به تجزیه و تحلیل چرخش و انرژی جنبشی گردابی در شبیه‌سازی پرداخته‌اند. در تحقیق آنها

² hydrography

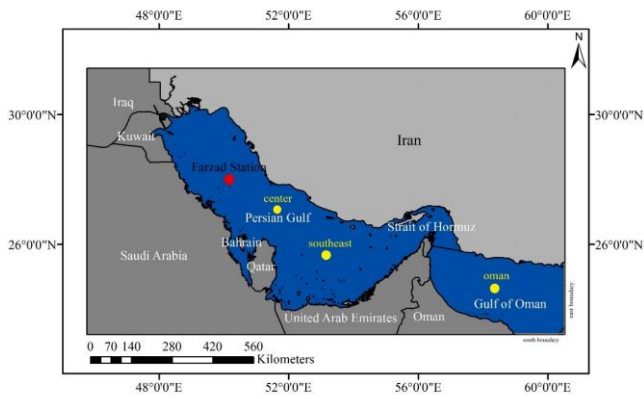
³ Shore

⁴ Antario

⁵ Finite Volume Community Ocean Model

⁶ Thermohaline

¹ Regional Ocean Modeling System (ROMS)



شکل ۱- موقعیت خلیج فارس به عنوان منطقه مورد مطالعه، به همراه ایستگاه فرزاد (دایره قرمز) و سه ایستگاه انتخابی برای صحت‌سنجی (دایره زرد)

آب و هوای منطقه مورد مطالعه گرم و مرطوب و با نوسانات دمایی کم بین شب و روز است. عمده نیروی حاکم در منطقه، جزر و مد است که مولفه‌های جزر و مدی غالب منطقه M2، K1 و O1 هستند. همچنین، جهت باد غالب در راستای شمال-جنوب است. علاوه بر این، در این پژوهش برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی از ۱ ایستگاه استفاده شده است. از ایستگاه فرزاد برای مقایسه سرعت جریان و برای مقایسه تراز استفاده شده است.

مختصات ایستگاه فرزاد همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است در ۲۸،۰۷ درجه شمال و ۵۰،۰۲ درجه شرق است. لازم به ذکر است از داده‌های TMD برای ورودی‌های مربوط به تراز در مرز باز در مدل استفاده شده و برای کالیبره کردن داده‌های خروجی از همان داده‌های TMD استفاده شده است. همچنین به منظور صحت‌سنجی ۳ ایستگاه زرد رنگ در شکل ۱ در نظر گرفته شده است. قسمت مرز باز مدل در محدوده جنوبی (boundary south) و شرقی (west boundary) دریای عمان در شکل ۱ مشخص و نام‌گذاری شده است. همچنین، اندازه‌گیری سرعت جریان برداشت شده توسط پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی با استفاده از دستگاه ADCP که قادر به ثبت مقدار سرعت و جهت آن بوده انجام شده است. بازه‌ی اندازه‌گیری شده برای سرعت جریان در ماه‌های آگوست (باد ضعیف) و ژانویه (باد قوی) سال ۲۰۱۳ صورت پذیرفته است.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه فرزاد در خلیج فارس

شوری داشته و سبب شده‌اند که آب سطحی خلیج فارس در فصل زمستان شورتر از آب در فصل بهار و اوایل فصل تابستان باشد [۱۹]. اکبرپور جنت و نوارانیان اصفهانی با استفاده از مدل جفت شده موج- جریان شامل ترکیب مدل عددی SWAN با ROMS به بررسی نقاط پرخطر ناشی از جریانهای شکافنده در سواحل انزلی پرداختند [۲۰]. علاوه بر این، در مطالعه دیگری نیز نورانیان اصفهانی و همکاران از مدل تلفیقی ROMS-SWAN برای مدلسازی جریانهای حوزه جنوبی دریای خزر استفاده کردند [۲۱]. کریسپین و همکاران از مدل اقیانوس‌شناسی منطقه‌ای برای شبیه‌سازی الگوی گردشی جریان در دریاچه ویکتوریا از ۱ ژانویه ۲۰۰۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۴ استفاده کردند [۲۲].

مروری بر ادبیات موضوع نشان داده است که با توجه به دشواری‌های اندازه‌گیری‌های میدانی برای ثبت مشخصه‌های دریایی از سطح تا بستر به صورت همزمان، یکی از روش‌های رایج برای حل این مشکل، استفاده از مدل‌های عددی اقیانوس‌شناسی برای شناخت وضعیت دریا است. در روشهای عددی بر اساس مقادیر اولیه و معادلات حاکم، مشخصه‌های اقیانوس‌شناسی محیط آبی موردنظر برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌شود [۲۳]. از آنجایی که مطالعه و بررسی پدیده‌های اقیانوس‌شناسی در خلیج فارس، موضوعی با اهمیت فراوان برای محققان کشور در حوزه مهندسی دریا و اقیانوس است. از این‌رو، در پژوهش حاضر، به بررسی چگونگی گردش جریانات در خلیج فارس و دریای عمان با تفکیک‌پذیری بالا و با دید یک ساله با استفاده از مدل عددی ROMS پرداخته شده است. انجام این مطالعه با توجه به قابلیت‌های مدل عددی مورد استفاده، می‌تواند زمینه‌ساز پیش‌بینی جریان‌های دریایی در کشور باشد که مورد نیاز بسیاری از نهادها است. علاوه بر شبیه‌سازی پدیده‌هایی که معمولاً در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مد نظر قرار می‌گیرند، این روش می‌تواند زمینه‌ساز شبیه‌سازی پدیده‌های بلندمدت، مانند تغییر اقلیم یا تغییرپذیری اقلیمی باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر، منطقه مورد بررسی، خلیج فارس است که بین شبه‌جزیره عربستان و جنوب غربی ایران واقع شده است. خلیج فارس به واسطه تنگه هرمز با دریای عمان و اقیانوس هند مرتبط است. خلیج فارس در مختصات جغرافیایی بین ۲۴-۳۰ درجه شمال و ۴۸-۵۶ درجه شرق قرار گرفته است و در جهت شمال غربی و جنوب شرقی امتداد دارد (شکل ۱).

۲-۲- مدل عددی ROMS

بالا (GSHH) کمک گرفته شده است. در انتها نیز با کمک ماسکینگ اقدام به بهبود مرز آبی شده است.

جدول ۱- تنظیمات در نظر گرفته شده در مدل ROMS

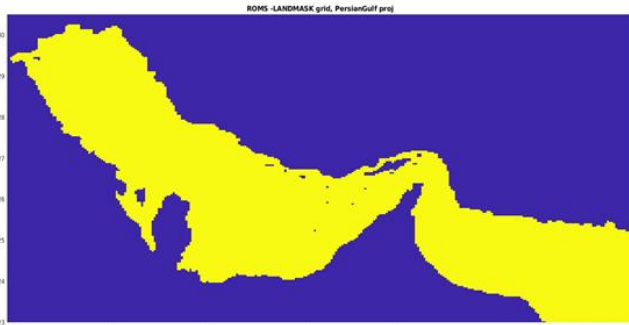
اجزای مدل	اعداد و روش‌های مورد استفاده
شرایط مرزی	مرز بسته در شمال و غرب، مرز باز در شرق و جنوب
معادله تکانه	UV_ADV (عبارت همرفت)، UV_VIS2 (اختلاط افقی منظم)، UV_LOGDROG (اصطکاک بستر لگاریتمی)
معادله حالت	MIX_GEO_TS
تنظیم مدل	SOLVE3D (معادله پیشرو سه بعدی)، SPLINES (بازسازی برازش سهموی مشتقات قائم)
تنظیمات تحلیلی	ANA_STFLUX (شار دمای سطح آب) ANA_SSFLUX (شار شوری سطحی) ANA_BTFLUX (شار دمای بستر) ANA_BSFLUX (شار شوری بستر)
اختلاط قائم تکانه و دما و شوری	GLS_MIXING (اختلاط مقیاس طولی کلی)
گزینه‌های بستر مقیاس طولی کلی	KANTHA_KLAYSON (تابع پایداری کانتا-کلیسون) N2S2_HORAVG (هموارسازی افقی شناوری-تنش برشی)

مدل عددی ROMS، یک مدل اقیانوسی سطح آزاد^۷ با دستگاه مختصات وابسته به زمین^۸ و دارای ویژگی‌ها و دقت‌های خاص برای مدل‌سازی گردش جریان آب است. در این مدل از معادلات پایه اقیانوسی استفاده شده است. این مدل دارای دقت و کارآمدی فیزیکی بالایی است که قابلیت کاربرد آن در مناطق اقیانوسی عمیق و مناطق ساحلی (کم عمق) را امکان‌پذیر ساخته است. مدل ROMS از جمله مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی گردش جریان آب است و تغییرات مربوط به پارامترهای گشتاور، شوری، دما، باد و ... را بر اساس گام زمانی و مکانی محاسبه می‌کند [۴]. در مدل ROMS، معادلات پایه بر اساس متغیر توپوگرافی و با کاربرد مختصات وابسته به زمین در راستای قائم گسسته‌سازی می‌شوند. در راستای افقی نیز، معادلات پایه با کاربرد مختصات منحنی‌الخط قائم مناسب با مرز روی شبکه‌بندی شطرنجی آراکاو C گسسته‌سازی می‌شوند. در این مدل، در راستای افقی از تفاضل متناهی درجه دوم مرکزی و نیز، از تفاضل محدود مرتبه دوم مرکزی بر روی شبکه قائم شطرنجی استفاده می‌شود.

۳- پیاده‌سازی مدل عددی ROMS

برای شبکه‌بندی مدل از ROMS_Tools کمک گرفته شده است. همچنین، از مجموعه کدهای متلبی که در سایت ROMS ارائه شده که برای راه‌اندازی آن و اتصال به نرم افزار متلب و افزونه‌های متلب از قبیل MexCDF (یک رابط فایل بین NetCDF و MATLAB است که از رابط کامل NetCDF به زبان C استفاده می‌کند) و SNCTOOLS (مجموعه‌ای از کدهای MATLAB که برای دسترسی خواندن و نوشتن به فایل‌های NetCDF نوشته شده است) استفاده می‌شود. برای اجرای مدل ROMS، داده‌های عمق‌سنجی از مجموعه داده‌های GEBCO، داده‌های مقادیر اولیه و مرزها از مجموعه داده‌های WOA و TMD، و ورودی واداشت جوی از اطلاعات ERA5 استفاده شده است. تنظیمات در نظر گرفته شده برای مدل ROMS در جدول ۱ آورده شده است.

منطقه شبیه‌سازی شامل حوضه‌ی آبی خلیج فارس در محدوده جغرافیایی ۲۳-۳۲ درجه شمال و ۴۷-۵۷٫۸ درجه شرق است و از شبکه با مشخصات (شکل ۳) بیان شده ایجاد شده است. از شبکه با دقت ۳٫۵ کیلومتر استفاده شده است که ۵۰۰ شبکه در راستای افق و ۳۰۰ شبکه در راستای قائم (۳۰۰*۵۰۰) داریم. علاوه بر این، ۱۰ لایه قائم در نظر گرفته شده و برای خط ساحلی از مجموعه داده‌های خطوط ساحلی سلسله مراتبی با وضوح جهانی



شکل ۳- شبکه‌بندی مدل برای منطقه خلیج فارس با مرز باز در دریای عمان

برای اطلاعات مربوط به جزر و مد از پایگاه اطلاعاتی TPXO استفاده شده است که با استفاده از تحلیل داده‌های تراز به دست آمده از ماهواره، هارمونیک‌های جزر و مدی و نوسانات تراز را در هر نقطه پیش‌بینی می‌نماید. اجرای مدل برای کل سال ۲۰۱۳ است. همچنین سرعت‌های اولیه در مدل از طریق فایل مرزی که در قسمت دریای عمان قرار دارد به مدل داده شده است. مدل به صورت cold start اجرا می‌شود و از آنجا که جریان‌ات چگال در مقایسه با جریان‌ات جزر و مدی در این منطقه (مخصوصاً خلیج فارس) ناچیز هستند، فرضیات فوق خطای زیادی در محاسبات وارد نکرده است.

⁷ Free surface

⁸ terrain-following

مورد بررسی قرار گرفتند. دو شاخص آماری به شکل زیر تعریف شده‌اند.

(۱)

$$R = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2)(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2)}};$$

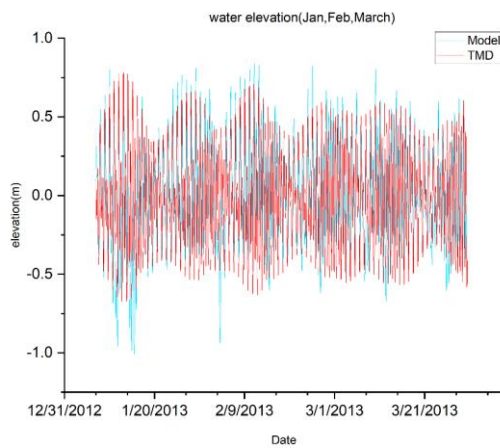
(۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

در معادلات (۱) و (۲) حروف x و y به ترتیب بیانگر، مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده پارامترهای مورد مطالعه هستند. x و y نشان‌دهنده مقادیر میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسباتی هستند. n نیز تعداد نقاط مورد مقایسه است.

۱-۱-۴ کالیبراسیون تراز سطح آب

برای صحت‌سنجی و کالیبراسیون تراز سطح آب در حالت اجرای سه بعدی از شرط مرزی Chapman_implicit استفاده شد که نمونه‌ای از نتایج حاصل از مدل عددی با این شرط مرزی در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به ایستگاه‌های زرد رنگ در شکل ۱، کالیبراسیون داده‌های TMD با خروجی مدل در فصل زمستان صورت گرفته است.



شکل ۵- مقایسه نتایج حاصل از مدل ROMS با داده‌های TMD در خلیج فارس در نزدیک ایستگاه فرزاد در شرط مرزی Chapman_implicit

سری زمانی شکل ۵ نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج مدل عددی با داده‌های TMD در مدت مه‌کشدن و که‌کشدن است. در این حالت، ضریب همبستگی میان داده‌ها و مدل برابر ۰/۶۵۱ و RMSE آن برابر ۰/۲۷۳ متر است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل عددی است. با توجه به خروجی مدل و داده‌های TMD در ایستگاه‌های زرد رنگ موجود در شکل ۱، سری‌های زمانی زیر حاصل شدند.

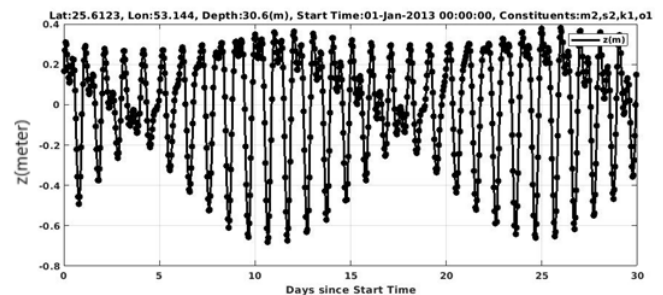
۱-۳ اعمال داده‌های مرزی جزر و مدی به مدل ROMS

همان‌طور که ذکر شد اطلاعات جزر و مد منطقه با استفاده از پایگاه اطلاعات TPXO از طریق کد متلب‌های ROMS در مدل اعمال شده است. مولفه‌های اصلی در نظر گرفته شده برای مرز باز شرقی و جنوبی (دریای عمان) شامل O1, K1, M2 است. به طور خلاصه اطلاعات ورودی به مدل بزرگ مقیاس شامل موارد مندرج در جدول ۲ است.

جدول ۲- اطلاعات کلی ورودی به مدل ROMS

سری زمانی جزر و مد (TPXO)	شرایط مرزی	اطلاعات ورودی به مدل
سری زمانی باد (ECMWF)		
شرایط cold start	شرایط اولیه	

با کاربرد TMD، به منظور صحت‌سنجی جزر و مد، پارامتر تراز آب در دو ایستگاه واقع در خلیج فارس و ایستگاه دیگر در عمان (نزدیک مرز) در نظر گرفته شده است. تصویر نوسانات در خلیج فارس در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ - اطلاعات در طول ماه ژانویه سال ۲۰۱۳ مربوط به تراز آب خروجی از TMD

در نهایت با توجه به نوسانات پارامتر zeta در خلیج فارس، اطلاعات خروجی از مدل را می‌توان با اطلاعات خروجی از TMD مقایسه کرد و اقدام به کالیبراسیون مدل عددی نمود.

۴- نتایج و بحث

۱-۴ کالیبراسیون مدل عددی

همانند هر مدل هیدرودینامیکی دیگر ابتدا بایستی به کالیبراسیون مدل برای منطقه مورد مطالعه پرداخت. از این‌رو، برای صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی ROMS از داده‌های سرعت و تراز سطح آب در ایستگاه فرزاد استفاده گردیده است. برای صحت‌سنجی عملکرد مدل از دو شاخص آماری ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا برای پارامترهای سرعت و تراز آب

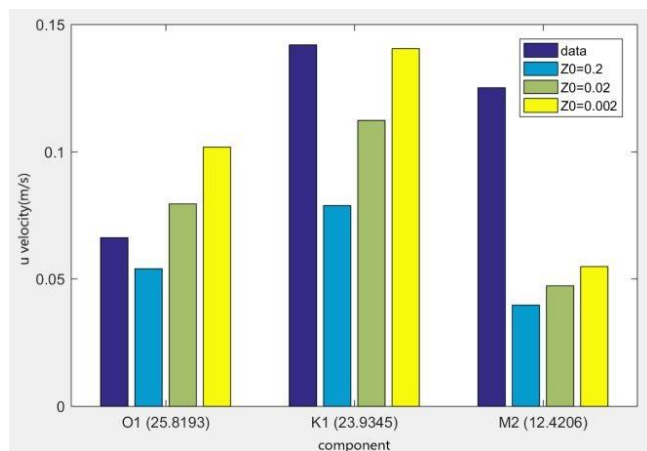
جدول ۳- برآوردهای آماری برای تراز سطح در فصل زمستان ۲۰۱۳

Water elevation	center	Southeast	Oman
RMSE(m)	0.170	0.085	0.033
R	0.907	0.953	0.999

با توجه به R و RMSE حاصل از شکل‌های ۶، ۷ و ۸ که در جدول بالا آورده شده است، می‌توان این نتیجه را گرفت که تطابق خوبی صورت گرفته است. علت بهتر بودن نتایج در سه نقطه زرد در مقایسه با ایستگاه فرزاد، احتمالاً به همسان بودن پایگاه داده مرز باز مدل و نقاط مورد استفاده برای صحت‌سنجی برای نقاط زرد برمی‌گردد.

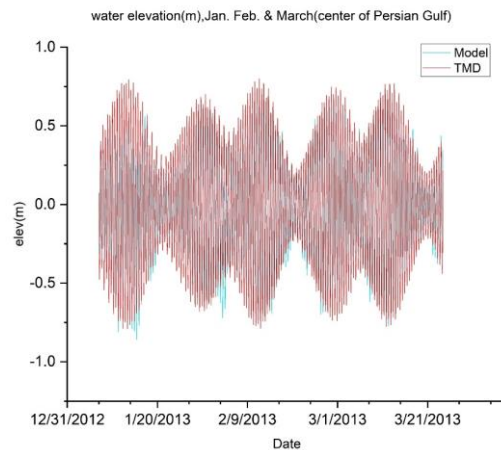
۴-۱-۲ آنالیز هارمونیک مولفه‌های جزر و مدی

پس از انتخاب مرزباز مناسب در شرق و جنوب مدل عددی، به‌طوریکه در مدل انعکاس عددی رخ ندهد، بایستی مدل برای منطقه‌ی مورد نظر کالیبره شود. لذا، داده‌های مدل با سه ضریب زبری بستر $Zob=0.2$ ، $Zob=0.02$ ، و $Zob=0.002$ متر اجرا شده و نتایج در شکل ۹ آورده شده است.

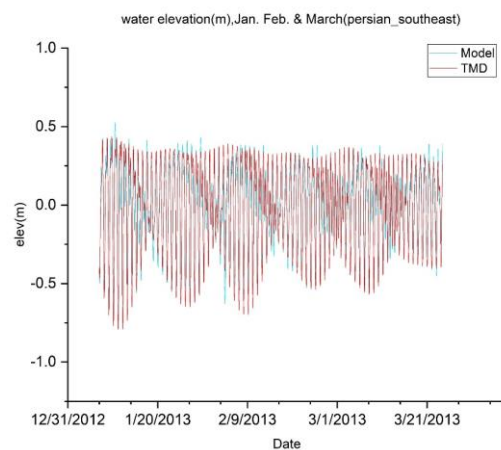


شکل ۹ - دامنه مولفه سرعت افقی جزر و مدی با سه ضریب بستر متفاوت و مقایسه با ایستگاه فرزاد

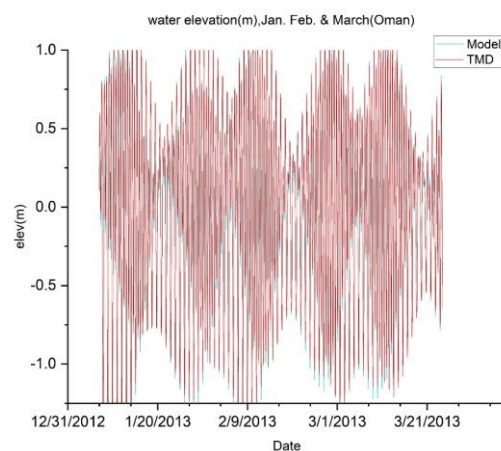
بر اساس نتایج t_tide (تحلیل هارمونیک سری زمانی) که دامنه جزر و مدی را فقط بر اساس سرعت افقی یا قائم نشان می‌دهد. مهم‌ترین عامل در قسمت کالیبراسیون سرعت‌ها تعیین مقدار ضریب بستر (Zob) است. با توجه به دامنه مولفه‌های جزر و مدی در شکل ۹ مشخص شد که بهترین نتایج نزدیک به داده‌های ایستگاه مشاهداتی فرزاد، بر اساس $Zob=0.002$ بوده است. در نهایت مقایسه‌ای از نتایج مدل با ضریب زبری مذکور، داده‌های TMD و داده‌های ایستگاه فرزاد پس از آنالیز هارمونیک برای کل دوره سال ۲۰۱۳ در شکل ۱۰ ارائه شده است که هدف از این کار بررسی تطابق مدل در مقایسه با داده‌های TMD است.



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از مدل ROMS با داده‌های TMD در وسط خلیج فارس (center)



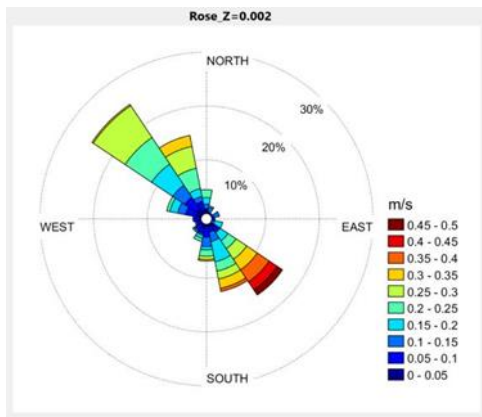
شکل ۷- مقایسه نتایج حاصل از مدل ROMS با داده‌های TMD در جنوب شرقی خلیج فارس (southeast)



شکل ۸- مقایسه نتایج حاصل از مدل ROMS با داده‌های TMD در دریای عمان

۴-۲- مقایسه گل-جریان مدل و اندازه‌گیری شده در ایستگاه فرزاد

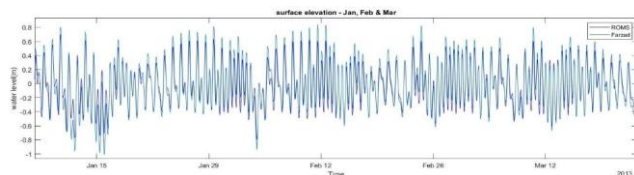
علاوه بر سرعت جریان‌ها، جهت جریان‌ها نیز بایستی به طور صحیح مدل شود. که این امر با مقایسه گل-جریان‌ها حاصل از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ها امکان پذیر است. ترسیم گل-جریان در ایستگاه فرزاد در سه ضریب بستر متفاوت $Z_{ob}=0.2$ ، $Z_{ob}=0.02$ و $Z_{ob}=0.002$ انجام شده و نتایج نشان داده است که بهترین تطابق گل-جریان حاصل از نتایج مدل با ضریب بستر $Z_{ob}=0.002$ با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه فرزاد را داشته است (شکل ۱۲). بنابراین استفاده از این مقدار در مدلسازی‌ها صورت گرفته است.



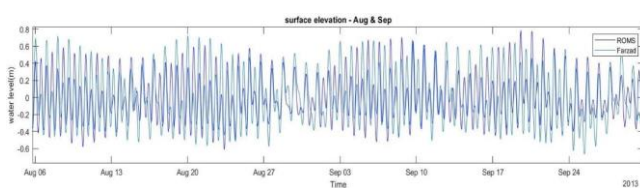
شکل ۱۲- مقایسه گل-جریان در لایه سطحی با فرض ضریب بستر $Z_{ob}=0.002$

۴-۳- مقایسه سری زمانی تراز سطح آب مدل در دو فصل زمستان و تابستان با ایستگاه فرزاد

با توجه به ضریب بستر انتخاب شده، مدل اجرا شده است و نتایج حاصل از خروجی مدل برای سطح آزاد آب در دو فصل زمستان و تابستان و مقایسه با داده‌های فرزاد در زیر نمایش داده شده است.



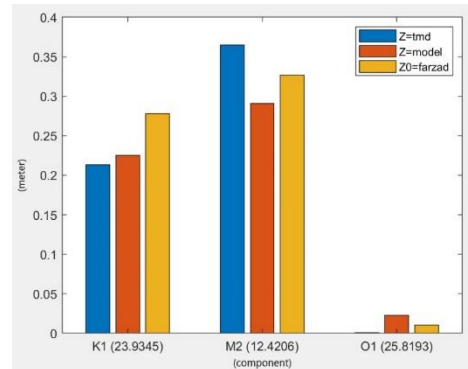
شکل ۱۳- مقایسه سری زمانی تراز سطح آب مدل و ایستگاه فرزاد در زمستان



شکل ۱۴- مقایسه سری زمانی تراز سطح آب مدل و ایستگاه فرزاد در تابستان

همان‌طور که از شکل ۱۳ و ۱۴ برمی‌آید انطباق نسبتاً مناسبی بین مدل و داده‌های میدانی در خصوص تراز آب موجود است. پارامتر

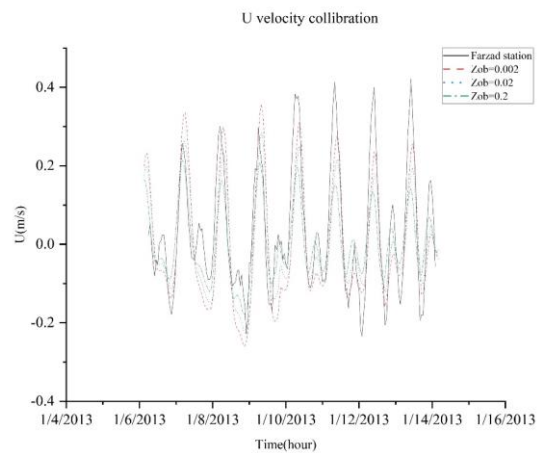
با توجه به شکل ۹ مدل عددی در همه‌ی مولفه‌ها نزدیک‌ترین عملکرد را از نظر تخمین دامنه، داشته است و حتی این برتری در مولفه‌ی M2 قابل مشاهده است که در نهایت می‌توان گفت این نشان از عملکرد خوب مدل است.



شکل ۱۰- آنالیز هارمونیک تراز سطح آب جزر و مدی با توجه به نتایج مدل TMD، ROMS و ایستگاه فرزاد

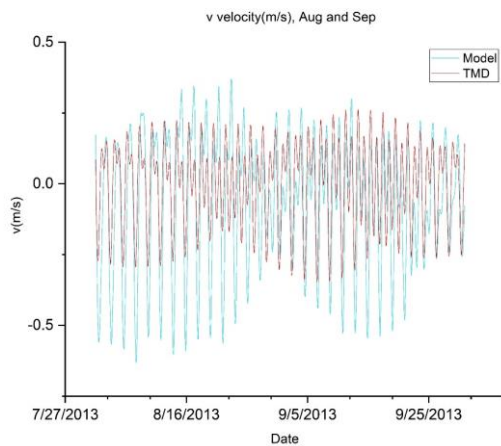
۴-۱-۳- کالیبراسیون سرعت‌ها

تعیین رابطه مورد استفاده برای تنش بستر در مدل، مهم‌ترین پارامتر در قسمت کالیبراسیون سرعت‌ها است. با توجه به مقالات پیشین و انجام تست‌هایی با دوره محدود زمانی و ارزیابی حالات \logarithmic ، $linear$ و $quadratic$ برای تنش بستر، در نهایت حالت $quadratic$ انتخاب شد. علاوه بر این، برای تعیین بهترین مقدار برای ضریب بستر، مدل در حالات $Z_{ob}=0.2$ ، $Z_{ob}=0.02$ و $Z_{ob}=0.002$ اجرا شده و نتایج در شکل ۱۱ ترسیم شده است.



شکل ۱۱- مقایسه سرعت حاصل از مدل با ایستگاه مشاهده‌ای فرزاد با توجه به مقادیر مختلف

سری زمانی ترسیم شده در شکل ۱۱ نشان داده است که انتخاب مقدار $Z_{ob}=0.002$ نزدیک‌ترین تطابق را با ایستگاه مشاهده‌ای فرزاد دارد. با انتخاب $Z_{ob}=0.002$ ، ضرایب آماری همبستگی و RMSE به ترتیب ۰.۸۳ و ۰.۱۰ هستند.



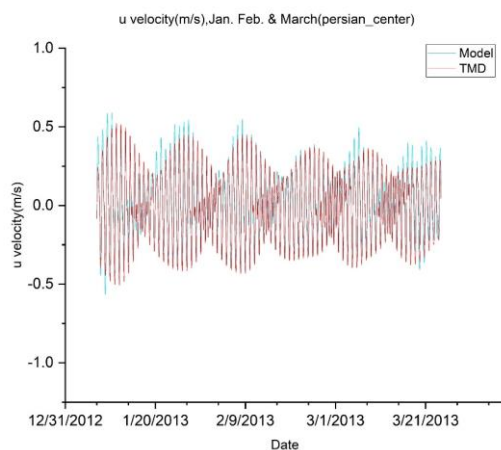
شکل ۱۶: سری زمانی سرعت در راستای v و مقایسه با داده‌های TMD در ماه‌های آگوست و سپتامبر ۲۰۱۳

علاوه بر این، در جدول ۵ برای دو ماه آگوست و سپتامبر مقایسه سرعت‌های u و v انجام شده است.

جدول ۵- برآوردهای آماری برای سرعت در آگوست و سپتامبر ۲۰۱۳

Velocity direction	u	v
	RMSE(m/s)	0.123
R	0.794	0.624

همچنین با توجه به ایستگاه‌های center و southeast در نظر گرفته شده مطابق شکل ۱ در خلیج فارس، سرعت در راستای افقی و قائم خروجی مدل با داده‌های TMD در فصل زمستان در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ مقایسه شده است.



شکل ۱۷: سری زمانی سرعت در راستای u و مقایسه با داده‌های TMD در فصل زمستان ۲۰۱۳ (center)

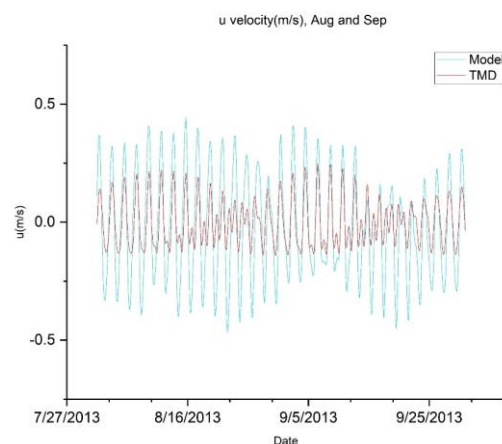
همبستگی و RMSE بین مدل و داده‌های میدانی در فصل زمستان برابر ۰/۹۳ و ۰/۱۴ و در فصل تابستان برابر ۰/۹۲ و ۰/۱۳ محاسبه شد. اعداد فوق نشان از کارکرد خوب مدل برای تخمین تراز آب هم در زمستان و هم در تابستان دارد. لازم به ذکر است که داده‌های اندازه‌گیری در محل ایستگاه فرزاد دائمی نبوده و در ماه‌های خاصی موجود بوده و به همین دلیل، ماه‌های فوق به عنوان نماینده فصول سرد و گرم برای مقایسه نتایج انتخاب شده است. در جدول ۴ نیز می‌توان برآوردهای آماری را مشاهده نمود.

جدول ۴- برآوردهای آماری برای تراز سطح در زمستان و تابستان ۲۰۱۳ (ایستگاه فرزاد)

Water elevation	R	RMSE (m)
Winter	0.93	0.14
Summer	0.92	0.13

۴-۴- مقایسه داده‌های TMD با خروجی مدل

در این قسمت نتایج حاصل از مدل با TMD مقایسه شده است. سری زمانی سرعت در راستای u و v حاصل از مدل با داده‌های TMD در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ در نزدیکی ایستگاه فرزاد مقایسه شده است.



شکل ۱۵: سری زمانی سرعت در راستای u و مقایسه با داده‌های TMD در ماه‌های آگوست و سپتامبر ۲۰۱۳

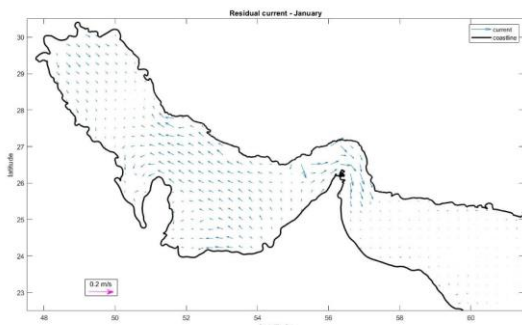
جدول ۵- برآوردهای آماری برای سرعت در زمستان ۲۰۱۳

Water elevation	center(u)	center(v)	southeast(u)	southeast(v)
RMSE	0.079	0.082	0.116	0.100
R	0.933	0.775	0.872	0.665

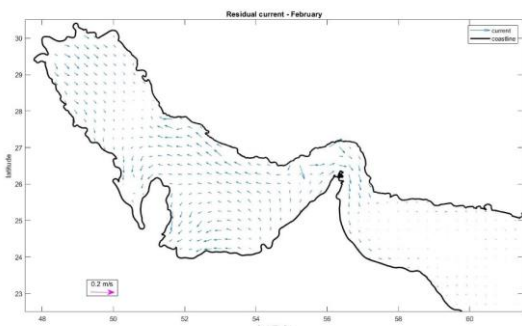
با توجه به شکلهای ۱۵ الی ۲۰ و جدولهای ۵ و ۶ می توان نتیجه گیری کرد که تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از مدل و داده های TMD برقرار است؛ به عبارت دیگر بخش جزرومدی جریانات به خوبی توسط مدل در این فصل شبیه سازی شده است.

۴-۵- مطالعه و بررسی جریان های Residual ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه

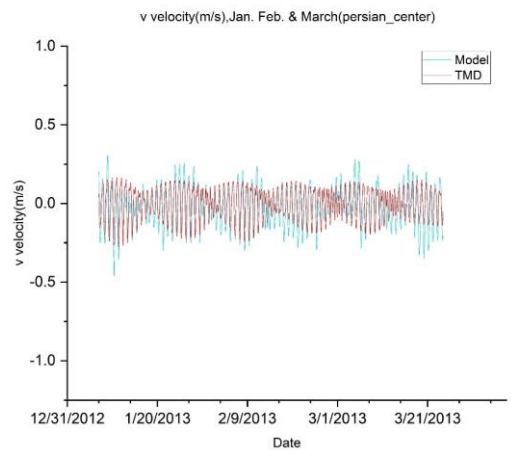
گردش آب در منطقه خلیج فارس و دریای عمان با توجه به سه مولفه اصلی تغییرات چگالی، جزر و مد، نیروی باد شکل می گیرد. در مطالعه حاضر اثرات نیروهای باد و جزر و مدی برای توسعه مدل عددی در نظر گرفته شده است. جریان های ناشی از جزر و مد روزانه، نیم روزانه یا ساعتی، است و جریان های ناشی از باد به جهت وزش باد بستگی دارد و تغییرات روزانه اندکی دارند. مطالعات نشان داده است که جریان باقی مانده عمده، از حذف جزر و مد حاصل می شود. جریان جزر و مدی باقی مانده در اکثر مناطق دریا ضعیف بوده و میانگین بزرگی آن حدود ۰/۲ متر بر ثانیه در منطقه مرکزی خلیج فارس تخمین زده می شود. اگر چه این جریان کوچک است، اما در انتقال آلودگی ها و میزان ذرات معلق نقش اساسی دارد.



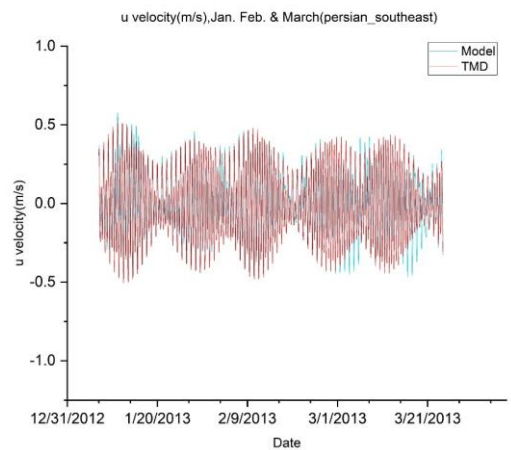
شکل ۲۱- جریان باقی مانده در ماه ژانویه ۲۰۱۳



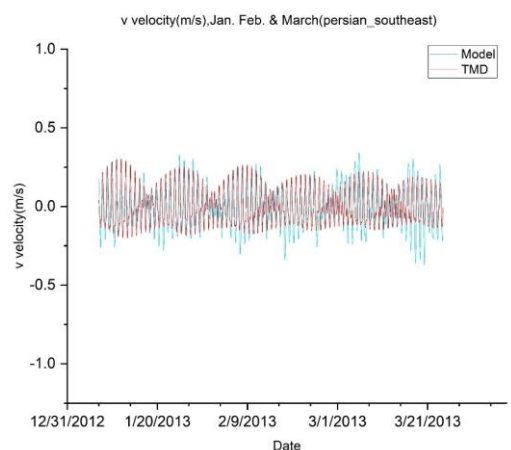
شکل ۲۲- جریان باقی مانده در ماه فوریه ۲۰۱۳



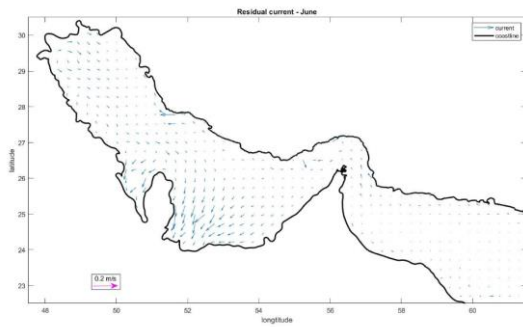
شکل ۱۸: سری زمانی سرعت در راستای v و مقایسه با داده های TMD در فصل زمستان ۲۰۱۳ (center)



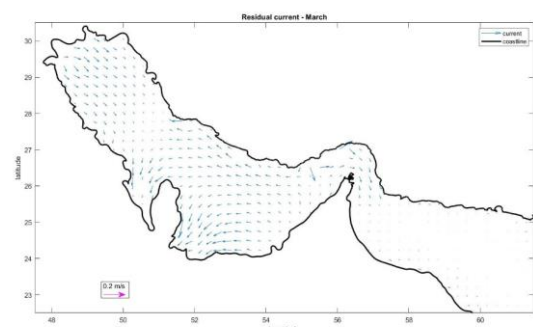
شکل ۱۹: سری زمانی سرعت در راستای u و مقایسه با داده های TMD در فصل زمستان ۲۰۱۳ (southeast)



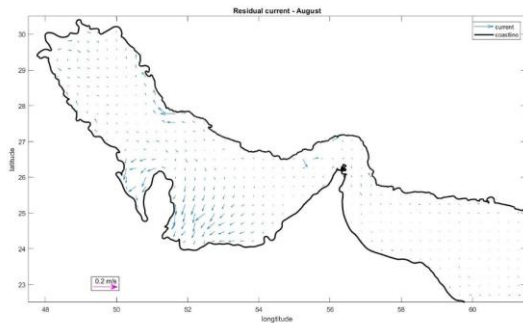
شکل ۲۰: سری زمانی سرعت در راستای v و مقایسه با داده های TMD در فصل زمستان ۲۰۱۳ (southeast)



شکل ۲۵- جریان باقی‌مانده در ماه ژوئیه ۲۰۱۳



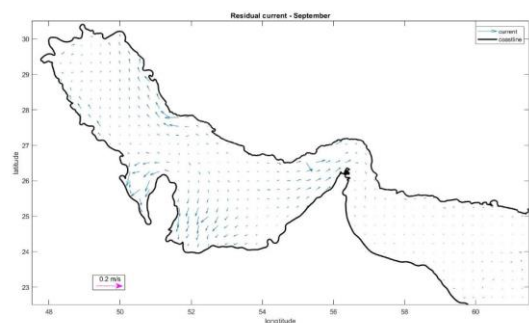
شکل ۲۳- جریان باقی‌مانده در ماه مارس ۲۰۱۳



شکل ۲۶- جریان باقی‌مانده در ماه آگوست ۲۰۱۳

همان‌طور که در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، الگوی جریان در منطقه مورد مطالعه نشان داده است که در ماه ژانویه غالب سرعت جریان در بخش مرکزی و شرقی خلیج فارس بیشتر از ماه مارس است. با این حال الگوی کلی گردش جریان در این منطقه تقریباً ثابت بوده است. دو حلقه اصلی در بخش میانی و شرقی خلیج فارس کاملاً مشخص است و همچنین حلقه آب دیگری نزدیک بوشهر مشاهده می‌شود. در دریای عمان نیز در بخش مرکزی چرخش آب مشاهده می‌شود، هرچند سرعت‌های بسیار کمتری دارد. در بخش تنگه هرمز هم جریان غالب از سمت خلیج فارس به سمت دریای عمان بوده و شاهد سرعت بالای جریان در ماه ژانویه هستیم که به مرور زمان و با نزدیک شدن به فصل تابستان، سرعت‌ها در این ناحیه کم می‌شود. همچنین جریان در خلیج فارس را می‌توان به دو قسمت مجزا از لحاظ جریان تقسیم‌بندی کرد. همان‌طور که در شکل‌های بالا مشخص است، از قسمت شمال غربی به سمت قسمت مرکزی یک جریان داشته و از سمت جنوب شرقی به سمت مرکزی خلیج فارس دارای الگوی جداگانه‌ای است. در شکل‌های ۲۴ الی ۲۶، گردش آب فصل تابستان را نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ترسیم شده، سرعت جریان در این فصل به طور محسوسی نسبت به زمستان کاهش پیدا کرده است و همچنین شاهد وجود حلقه گردش آب در قسمت‌های غربی، مرکزی و شرق خلیج فارس هستیم. در دریای عمان هم به نسبت فصل زمستان سرعت‌های بسیار کمتری رخ می‌دهد؛ هرچند که در بخش‌های جنوبی خلیج فارس (نزدیک امارات و قطر) سرعت بالای جریان دیده می‌شود. از دیگر تفاوت این دو فصل، جهت و اندازه سرعت در تنگه هرمز است. در این فصل برخلاف زمستان سرعت‌های بسیار کمتری در کل حوزه هست و همچنین جهت جریان غالب در تنگه از سمت عمان به سمت خلیج فارس است. جریان دو تکه‌ای در خلیج فارس رخ می‌دهد که قسمتی از سمت مرکزی خلیج فارس به سمت شمال غرب و دیگری از مرکز تا نزدیکی تنگه هرمز وجود دارد. اگرچه از شدت جریانات در این فصل کاسته شده است اما همچنان شاهد این دو دسته‌ای جریان هستیم.



شکل ۲۴- جریان باقی‌مانده در ماه سپتامبر ۲۰۱۳

۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در سالیان اخیر، با پیشرفت روزافزون و توسعه مدل‌های عددی جایگاه ویژه‌ای در مدلسازی عددی مرتبط با مهندسی دریا و اقیانوس پیدا کرده‌اند. کاربرد مدل‌های عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی سبب کاهش قابل توجهی در هزینه و زمان در مطالعه پارامترهایی نظیر تراز سطح آب، سرعت جریانات، جهت

گردید؛ اما در دریای عمان سرعت‌های به مراتب کم‌تری به دست آمد. در فصل تابستان سرعت جریان کمتر شده و گردابه‌هایی در غرب (نزدیک کویت)، جنوب‌غربی (نزدیک عربستان) و همچنین در مرکز عمان مشاهده شده است. از دیگر تفاوت مهم جهت و اندازه سرعت در دو فصل زمستان و تابستان در قسمت تنگه هرمز است، جهت غالب جریان در زمستان خروج آب از خلیج فارس به سمت دریای عمان است حال آنکه در تابستان در قسمت شمالی تنگه هرمز ورودی جریان به خلیج فارس و در قسمت جنوبی تنگه هرمز خروجی جریان به سمت دریای عمان مشاهده شد که همچنان سرعت در تابستان کمتر از زمستان است.

۶- مراجع

1. A Kämpf, J. and Sadrinasab, M., 2005. The circulation of the Persian Gulf: a numerical study. *Ocean Sci. Discuss.*, 2(3), pp.129-164. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298403/>
2. Mehrfar, H., Torabi Azad, M., Lari, K. and Ali-Akbari Bidokhti, A.A., 2020. Study of the Persian Gulf coastal jets under the influence of thermocline using numerical simulation. *Journal Of Marine Engineering*, 15(30), pp.121-129. (In Persian)
3. Shariatmadari, D., Siadat-Mousavi, M. and Ershadi, C., 2021. Evaluation of extractable energy from tidal farm in the Qeshm canal using numerical flow simulation. *J. Oceanogr.*, 12(46), pp.1-12. <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1489-en.html>
4. Seyed Alipur, S.A., Siadatmousavi, S.M. and Mahmoudof, S.M., 2020. Improving the Simulation of Depth-induced Breaking in the Third-Generation Wave Model SWAN. *Journal Of Marine Engineering*, 16(31), pp.53-64. (In Persian)
5. Parsa, R., Shanehsazzadeh, A. and Ardalan, H., 2013. Conceptual and Numerical Modeling of Coastal Sediment Processes at Kong and Lengeh Ports at Northern Persian Gulf Coastline. *International Journal of Maritime Technology*, 9(17), pp.95-103.
6. Ghazi Zanganeh M, Hahmomeni A. Modeling of Siltation at Bushehr Estuary by MIKE 21. *marine-engineering* 2016; 12 (23) :25-35. URL: <http://marine-eng.ir/article-1-437-en.html>.

غالب جریان و الگوی گردش جریان در منطقه خلیج فارس و دریای عمان که وسعت گسترده‌ای دارند شده است. مدل عددی ROMS یکی از مدل‌های قدرتمند دریایی و اقیانوسی است که در پژوهش حاضر به منظور بررسی هیدرودینامیک ناشی از جزر و مد و باد در منطقه خلیج فارس استفاده شده است. داده‌های جزر و مدی با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی TPXO و از پایگاه TMD استخراج کرده تا هم در نقاط مرزی و هم در نقاط مقایسه‌ای، بتوان این داده‌ها را به کار برد. همچنین داده‌های سرعت باد و سایر مشخصات جوی نظیر فشار هوا از ERA5 استخراج شده و برای مقایسه داده‌های خروجی از مدل، ایستگاه‌های مشاهده‌ای فرزاد را که در سال ۲۰۱۳ اندازه‌گیری میدانی در آن وجود داشت استفاده شد. برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، مقدار تراز سطح را با تغییر در معادلات شرایط مرزی موجود در مدل و مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای فرزاد و همچنین برای سرعت مقدار ضریب زبری بستر تعیین شد تا سرعت‌ها کالیبره شوند که در نهایت الگوهای جریان‌ات در نقطه مورد مطالعه از مدل عددی استخراج گردید.

کالیبراسیون مدل ROMS نشان داد که حالت Champman_implicit به عنوان شرط مرزی سطح آزاد و ضریب بستر $Zob=0.002$ به نتایج مناسبی برای تراز و سرعت در منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس سری زمانی نتایج، دامنه‌ی هارمونیک جزر و مد بوده است. همانطور که در شکل‌های ۵ تا ۸ ارائه گردید، با فاصله گرفتن از مرز، دقت ضرایب آماری کمی پایین آمد که می‌توان دلیل پایین آمدن دقت را به وسعت زیاد دامنه مدل‌سازی نسبت داد. علاوه بر این، اقدام به مقایسه داده‌های خروجی از مدل و داده‌های ایستگاه فرزاد شده است. سری‌های زمانی سطح آزاد آب خروجی از مدل، تطابق بسیار خوبی با اندازه‌گیری‌ها داشت و سری زمانی سرعت‌ها هم دامنه مناسبی را داشتند. همچنین از آنجایی که داده‌های ورودی برای اجرای مدل از TMD گرفته شده است، مدل تطابق نسبتاً بهتری با داده‌های TMD نسبت به داده‌های مشاهده‌ای فرزاد دارد؛ به همین منظور برای بهبود دقت مدل بهتر آن است که داده‌های ورودی مرزی از ایستگاه‌های مشاهده‌ای باشد که در این تحقیق به دلیل موجود نبودن داده‌های مشاهده‌ای در دامنه مرزی (عمان) و همچنین سایر نقاط، از داده‌های ماهواره‌ای TMD استفاده شد و همانطور که در شکل‌ها دیده شد، مدل تطابق خوب و قابل قبولی با داده‌های TMD داشت. بررسی جریان باقی‌مانده ناشی از حذف جزر و مد، برای دو فصل زمستان و تابستان انجام شد. در فصل زمستان و در ماه ژانویه سرعت‌های به مراتب بالاتری نسبت به ماه مارس مشاهده شد و همچنین دو حلقه‌ی اصلی در بخش میانی و بخش شرقی مشهود است. گردابه‌هایی در قسمت‌های شمال‌غربی (نزدیک بوشهر)، مرکزی، جنوب شرقی و گردابه‌ای در مرکز عمان مشاهده

S146350030900122X?via%3Dihub

15. Ezam, M., Bidokhti, A.A. and Javid, A.H., 2010. Numerical simulations of spreading of the Persian Gulf outflow into the Oman Sea. *Ocean Science*, 6(4), pp.887-900. <https://doi.org/10.5194/os-6-887-2010>
16. komijani F, chegini V, sadrinasab M, siadatmousavi S M. Simulation of 3D Current Pattern, Sea Surface Temperature and Salinity Distribution in the South of Caspian Sea. *marine-engineering* 2016; 12 (23) :69-80 URL: <http://marine-eng.ir/article-1-426-fa.html>
17. Yao, F. and Johns, W.E., 2010. A HYCOM modeling study of the Persian Gulf: 2. Formation and export of Persian Gulf Water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C11). <https://doi.org/10.1029/2009JC005788>
18. Alosairi, Y. and Pokavanich, T., 2017. Seasonal circulation assessments of the northern Arabian/Persian Gulf. *Marine pollution bulletin*, 116(1-2), pp.270-290. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.065>
19. Hassanzadeh, S., Hosseinibalam, F. and Rezaei-Latifi, A., 2011. Numerical modelling of salinity variations due to wind and thermohaline forcing in the Persian Gulf. *Applied Mathematical Modelling*, 35(3), pp.1512-1537. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.029>
20. Akbarpour Jannat, M.R. and Noranian Esfahani, M., 2021. Investigation of high-risk zones in Anzali coasts associated with rip currents using field measurement and coupled wave-current numerical model (ROMS-SWAN). *Journal of Oceanography*, 11(44), pp.105-115. URL: <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1665-en.html>
21. Noranian Esfahani, M., Akbarpour Jannat, M. and Banijamali, B., 2018. Evaluation of the ROMS-SWAN Coupled Model in the Southern Caspian Basin Circulation. *Journal of Oceanography*, 8(32), pp.31-42. URL: <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1219-fa.html>
22. Nyamweya, C., Desjardins, C., Sigurdsson, S., Tomasson, T., Taabu-Munyaho, A., Sitoki, L. and Stefansson, G., 2016. Simulation of Lake Victoria circulation patterns using the regional ocean modeling system (ROMS). *PLoS One*, 11(3), p.e0151272. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151272>
7. Chao, S.Y., Kao, T.W. and Al-Hajri, K.R., 1992. A numerical investigation of circulation in the Arabian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C7), pp.11219-11236. <https://doi.org/10.1029/92JC00841>
8. Fox-Kemper, B., Adcroft, A., Böning, C.W., Chassignet, E.P., Curchitser, E., Danabasoglu, G., Eden, C., England, M.H., Gerdes, R., Greatbatch, R.J. and Griffies, S.M., 2019. Challenges and prospects in ocean circulation models. *Front. Mar. Sci.*, 6, p.65. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00065/full>
9. Lim, H.S., Kim, C.S., Park, K.S., Shim, J.S. and Chun, I., 2013. Down-scaled regional ocean modeling system (ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea. *Acta Oceanolog. Sin.*, 32(9), pp.50-61. <http://aosocean.com/en/article/doi/10.1007/s13131-013-0352-y>
10. Isachsen, P.E., 2015. Baroclinic instability and the mesoscale eddy field around the Lofoten Basin. *Geophys. Res.: Oceans*, 120(4), pp.2884-2903. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JC010448>
11. Martin, C.I., 2018. On the vorticity of mesoscale ocean currents. *Oceanography*, 31(3), pp.28-35. <https://tos.org/oceanography/article/on-the-vorticity-of-mesoscale-ocean-currents>
12. Contreras, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Sepulveda, H.H. and Renault, L., 2019. Subsurface mesoscale eddy generation in the ocean off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(8), pp.5700-5722. <https://doi.org/10.1029/2018JC014723>
13. Swift, S.A. and Bower, A.S., 2003. Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C1), pp.4-1. <https://doi.org/10.1029/2002JC001360>
14. Shore, J.A., 2009. Modelling the circulation and exchange of Kingston Basin and Lake Ontario with FVCOM. *Ocean Modell.*, 30(2-3), pp.106-114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>

23.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*, 94, pp.55-70. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.008>