

مدل سازی سرعت جریان جزرومدی با استفاده از نرم افزار TELEMAC-2D (مطالعه موردی: خلیج بوشهر)

محمد اکبری نسب^{۱*}، معصومه رسولیان^۲، نادیا طالب پور^۳، علی ناصری^۴

m.akbarinasab@umz.ac.ir

masoomehrasoolian@gmail.com

talebpoor.nadia@gmail.com

ali.s.naseri@gmail.com

^{۱*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر

^۲ دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر

^۳ دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر

^۴ مربی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۳۱

چکیده

جزرومد از اطلاعات پایه و ضروری در انجام مطالعات مربوط به رسوب گذاری، تغییرات مورفولوژیک و آب گرفتگی سواحل، فرسایش و مدیریت نوار ساحلی محسوب می شود. به دلیل کمبود اطلاعات اندازه گیری در بسیاری از مناطق ساحلی و دریایی، خصوصیات موج با استفاده از روش های مختلف تخمین زده می شود. پروژه های دریایی پیش بینی / پیش یابی اقلیم موج اغلب با مدل های عددی یا روش های تجربی انجام می شود. در پژوهش پیش رو سرعت جریان جزرومدی در خلیج بوشهر با استفاده از مدل عددی TELEMAC-2D مدل سازی شد و جهت جریان غالب در منطقه مورد تحلیل واقع شد. تنظیمات مدل شامل شبکه بندی نامنظم مثلثاتی در راستای x و y با نسبت یک به سه از کوچک ترین شبکه بندی ۳۰ متر تا بزرگ ترین شبکه بندی ۸۱۰ متر، گام زمانی ۳۰ ثانیه، قانون اصطکاک بستر با استفاده از نظریه استریکلر با مقدار $50 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ به کار رفته شد. مدل برای یک ماه از تاریخ ۲۰۱۱/۰۷/۱۲ در خلیج بوشهر اجرا شد. پس از اجرای مدل داده های اندازه سرعت جریان با داده های اندازه گیری متناظر و پایگاه داده جهانی TPXO مقایسه شد، نتایج پژوهش بیانگر افزایش همبستگی از ۴۱/۸۶ درصد به ۹۱/۴۱ درصد بود که حاکی از مناسب بودن مدل برای مدل سازی اندازه سرعت جریان در خلیج بوشهر بود. در انتها جریان غالب در منطقه شمال غربی نشان داده شد.

واژه های کلیدی: سطح تراز، سرعت جریان جزرومدی، شبیه سازی عددی، TELEMAC، خلیج بوشهر

۱. مقدمه

اکتشاف، بهره برداری و استخراج منابع نفت و گاز در دریاها، ناوربری، شیلات، حفاظت از محیط زیست دریایی، همچنین ساخت سازه های ساحلی و دیگر پروژه های مهندسی از جمله

پایداری دهانه رودخانه ها و کانال های کشتیرانی، صیادی و تغییرات خط ساحلی نیازمند تعیین سطح تراز آب دریا و جریان های دریایی از جمله بررسی های دقیق جزرومدی به ویژه در مناطقی که جریان های جزر ومدی نقش به سزایی

را در انتقال رسوب ایفا می کنند، است. در این راستا و به این دلیل که تمامی سواحل جنوبی کشور تحت تأثیر جریان های ناشی از جزرومد بوده و از لحاظ اقتصادی و بازرگانی اهمیت زیادی دارد، مطالعات اساسی و دقیق در بررسی، شناخت و پیش بینی این جریان ها ضروری است [۱-۲].

یکی از ویژگی های مهم جریان های جزرومدی گستردگی آنهاست که در مقیاس افقی به ده ها و صدها کیلومتر می رسد که در مسائل ناوبری اهمیت زیادی دارد [۳]. امروزه در مناطق مختلف دنیا از مدل های عددی برای بررسی و پیش بینی جریان ها و امواج استفاده می شود. دلیل این امر قابلیت تغییر در ضرایب و بهبودی کاربری فراسنج های موجود در معادله های مدل است که می توان به این وسیله با آزمایش و فراسنجی این ضرایب و استفاده از داده های اندازه گیری شده، نتایج را تا دقت های بسیار بالایی به واقعیت نزدیک کرد [۴-۵].

مطالعات متعددی در این حوزه با نرم افزارهای محاسباتی متفاوتی صورت گرفته است. آزموده اردلان و طوریان در پژوهش خود تغییرات جزرومدی سطح آب دریای عمان و خلیج فارس را با استفاده از ۱۱ سال داده های ماهواره توپکس پوزایدون^۱ و اطلاعات تایید گنج های ساحلی با به کارگیری روش آنالیز فوریه و برآورد کمترین مربعات مؤلفه های جزرومدی در پریود بزرگ تر از چهار ساعت مدل سازی کردند. سپس سطح متوسط آب دریا، مدل جزرومدی، نقشه سطح متوسط آب دریا، نقشه های دامنه و هم فاز مؤلفه های جزرومدی برای چهار مؤلفه O_2 , K_2 , M_2 , S_2 تعیین نمودند. نتایج نشان داده روش به کار برده شده به خوبی قادر است جریان های جزرومد منطقه ای را مدل سازی کند [۶]. ربیعی فر و باقری در سال ۱۳۹۱ در تحقیق خود با استفاده از اطلاعات تراز سطح آب در بندر شهید رجائی به مدت ۲۲ ماه در سال ۲۰۰۷ میلادی مدلی عددی را تهیه نمودند که با آن می توان رژیم جزرومد در مناطق دلخواه از آب های دریا را تشخیص داد. همچنین در مطالعه خود با استفاده از نرم افزار مایک ۲۱ به آنالیز هارمونیک (روش رگرسیون خطی) دامنه های اصلی جزرومد پرداختند و در

انتها نتایج را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل عددی به کار برده شده به خوبی قادر به محاسبه رژیم جزرومدی است [۷]. در سال ۱۳۹۳ به بررسی تأثیر جزرومد در محل اتصال یک خلیج کوچک به دریای آزاد بر الگوی جریان و انتقال رسوب با استفاده از مدل عددی مایک ۲۱ پرداخته شد. این شبیه سازی در مقادیر مختلف دامنه جزرومدی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این تحقیق ایجاد جریان های گردابی در حالت تبدیل از جزر به مد و برعکس بود که عملکرد این جریان های گردابی در حضور جریان های مدی و جریان های جزری، باعث ایجاد کم عمقی هایی در بالادست و پایین دست مصب گشت و نشان داده شد که شعاع گردابه های جزرومدی و عرض محدوده رسوب گذاری در طرفین دهانه، با دامنه جزرومد رابطه مستقیم دارند [۸]. جوکار و همکاران در سال ۱۳۹۵ در تحقیقی به بررسی جریان های کشتی با استفاده از مدل مایک ۲۱، اندازه گیری میدانی و مدل جهانی FES در خلیج فارس پرداختند. جریان های کشتی با استفاده از مدل FM نرم افزار مایک ۲۱ با ساختار مش نامنظم و با در نظر گرفتن نیروهای نجومی جریان های کشتی در این مطالعه شبیه سازی شد و با نتایج اندازه گیری ایستگاه ها صحت سنجی شدند. در این تحقیق نتایج حاکی از دقت کمتر مدل FES برای نوار ساحلی، اختلاف کمتر مؤلفه های مدل جهانی FES با اندازه گیری میدانی در آب های عمیق و تطابق خوب بین مدل مایک و ایستگاه های کشتندسجی در خلیج فارس بود و مشاهده شد که جریان های تغییرات سطوح جزرومدی شبیه سازی شده از مدل، همگرایی قابل قبولی با نتایج موجود از برداشت های میدانی داشت [۹]. پژوهشگران در یک مدل غیرخطی فشارگری را برای خلیج فارس طراحی کردند. این مدل مبتنی بر انتگرال گیری از معادله های آب کم عمق در راستای عمق بود و نسبت به چرخش زمین و اثرات پستی و بلندی بستری حساس بود. در این مدل از شکل واقعی خلیج فارس به منظور حل عددی معادله های مدل با استفاده از روش تفاضل منتهای استفاده شد. این مدل برای تعیین عکس العمل خلیج فارس نسبت به باد و نیروی کشتی با استفاده از شبیه سازی عددی استفاده شد. نتایج این شبیه سازی به شکل چرخش آب ها در خلیج فارس و

جزرومد نرمال و جزرومد طوفانی بود. در این تحقیق سطح آب و خروجی، ورودی و خروجی در طول دوره سپتامبر و رویداد طوفان در ماه دسامبر به خوبی تولید شدند، نتایج عددی توافق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت که نشان‌دهنده پتانسیل مدل برای شبیه‌سازی این نوع جریان‌های آب برای یک چرخه طبیعی جزرومد بهار برای موج‌های طوفان بود [۱۴]. در تحقیقی نیروی باد و جزرومدی در جریان‌های طبقه‌بندی شده در فلات گرینلند با TELEMAC-3D که یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی این پویایی بود، بررسی شد. در تجزیه و تحلیل جزرومد نشان داده شد که قدرت و جهت جریان‌های جزرومدی از هر نوع تغییر در عرض و شکل دامنه حساس است و اثر انتشار جزرومدی روی پروفایل شوری نقش مهمی دارد و شوری آن طی ۵ تا ۶ ساعت پس از سیل‌های ناشی از انفجار و انهدام در امتداد باد، بر گردش فلات قرار دارد [۱۵]. هاورسون و همکاران در تحقیقی تأثیر انباشتگی انرژی استخراج شده حاصل از امواج جزرومد در هشت ناحیه از دریای ایرلند را با استفاده از نرم افزار TELEMAC مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که در داخل دریای ایرلند، تعداد بسیار کمی از پروژه‌های جزرومدی که از نظر جغرافیایی مورد مطالعه قرار گرفته شد، نزدیک به یکدیگر بودند که نشان‌دهنده تعامل محدود بین آن‌ها بود [۱۶].

با توجه به اهمیت اقتصادی و بازرگانی زیاد آب‌های آزاد و نیازهای مهندسی همچون ساخت اسکله، موج‌شکن‌ها، سکوهای نفتی و شیلات، اطلاع از رژیم جزرومدی و به‌طور کلی جریان‌ات جزرومدی اهمیت زیادی دارد. در کشور ما نیز با توجه به قرار داشتن در گروه کشورهای با مرز آبی متصل به آب‌های آزاد، تحقیقات جزرومدی در بهره‌برداری بهتر و گسترده‌تر از منابع و امکانات دریایی از ضروریات محسوب می‌شود. تاکنون در کشور ما برای بررسی جریان‌های جزرومدی با استفاده از مدل هیدرودینامیکی TELEMAC، کاری انجام نشده؛ از این رو در طرح پیش‌رو از ماژول دوبعدی مدل هیدرودینامیکی TELEMAC برای مدل‌سازی جریان‌های جزرومدی در

همچنین نوسانات سطح تراز آب دریا نشان داده شد. پس از انجام شبیه‌سازی مقایسه‌ای بین اندازه‌گیری‌های نوسانات سطح تراز آب دریا در ایستگاه‌های بوشهر و کنگان با مقادیر پیش‌بینی شده با مدل به عمل آمد. این مقایسه توافق قابل قبولی را بین دیده‌بانی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل نشان داد. همچنین در این مدل اثرات جمله‌های غیرخطی فرارفتی بررسی شد [۱۰].

در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی جریان‌های جزرومدی در خلیج فارس مدل شد. نتایج بررسی نشان داد که تنگه هرمز دارای پتانسیل انرژی جزرومد بالایی در مقایسه با دیگر مناطق خلیج فارس است [۱۱].

در پژوهشی از مدل عددی هیدرودینامیکی دوبعدی TELEMAC-2D برای تخمین منابع انرژی جزرومدی در پورتلند بیل انگلستان استفاده شد و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری ارتفاع موج و مؤلفه‌های جزرومدی، سرعت جریان‌های جزرومدی در سرتاسر منطقه مورد مطالعه مدل‌سازی شد. نتایج این مدل برای تولید یک سری زمانی از سرعت جریان جزرومدی در طول دوره شبیه‌سازی استفاده شد که برای تعیین مکان‌های قرارگیری توربین‌های جزرومدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲]. در پژوهش دیگری به مطالعه تأثیر امواج بر منابع انرژی جزرومد در یک آرایه جریان پرداخته شد. در این مطالعه با بررسی تأثیر متقابل موج-جریان^۲ بر منابع جزرومدی، موج غالب منطقه بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر ترکیبی تنش تشعشعی موج و افزایش ضریب اصطکاک بستر به ترتیب می‌تواند تا ۲۰٪ و ۱۵٪ شدت موج شدید و متوسط زمستانی را کاهش دهد. همچنین نشان داده شد که جریان‌های تولیدشده با باد ناشی از تنش برشی آن می‌تواند توزیع این اثر را تغییر دهند [۱۳]. در تحقیقی مدل‌سازی عددی در TELEMAC-3D برای مناطق کنترل سیل با ساختارهای شناخته و کنترل‌شده در کنار رودخانه شلت و منطقه ساحلی را برای رویداد طوفان ۶ دسامبر ۲۰۱۶ انجام شد؛ که این تحقیق، شامل اجرای یک تابع زیرگذر جدید در مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی TELEMAC-3D و بررسی عملکرد آن در هر دو حالت

شرکت EDF^۳ فرانسه توسعه یافته است. تمام ماژول‌های مختلف TELEMAC از الگوریتم ظرفیت بالا براساس مش بندی فضایی به صورت یک شبکه غیر منظم از عناصر مثلثی است. ماژول استفاده شده در این مطالعه TELEMAC-2D است. این ماژول می‌تواند اصطکاک، تأثیر نیروی کوریولیس، آشفتگی، انتشار امواج بلند (با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی)، تأثیر دمای افقی و گرادیان شوری در چگالی و ... را در محاسبات خود به کار گیرد [۲۰]. همچنین این ماژول امکان مطالعه مناطق ساحلی، رودخانه‌ای و استوایی را فراهم می‌کند. کد TELEMAC-2D معادله‌های دیفرانسیل جزئی درجه دوم را برای عمق متوسط جریان سیال، مشتق شده از معادله‌های سه بعدی ناویر استوکس حل می‌کند که معادله‌های سنت-ونانت^۴ نامیده می‌شوند [۲۱-۲۲].

۲-۳. داده‌های مورد استفاده

در محاسبات TELEMAC-2D فایل‌هایی به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند. این فایل‌ها شامل هیدروگرافی بستر و داده‌های جزرومدی روی نقاط مرزی هستند. هیدروگرافی بستر که از جمله داده‌های ورودی مهم و مورد نیاز برای مدل‌های هیدرودینامیکی از جمله مدل مورد استفاده است، برای منطقه مورد مطالعه با سامانه مختصات جهانی مرکاتور معکوس^۵ از سازمان بنادر و دریانوردی با دقت ۱:۲۰۰ درون کانال و ۱:۵۰۰ در سایر مناطق برای افزایش دقت نتیجه مدل در محدوده مدل محلی، گرفته شد.

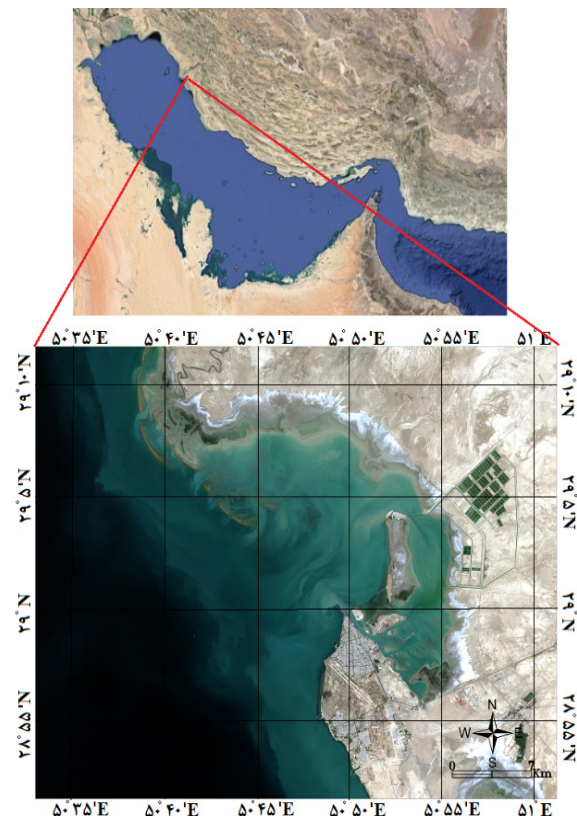
برای اعمال داده‌های جزرومدی به مرزهای باز در مدل، چهار پایگاه داده جزرومدی JMJ، TPXO، NEA و PREVIMER atlases با مدل استفاده شده، معرفی شد که با توجه به منطقه مورد مطالعه داده‌های جزر و مدی برای نقاط مرزی از پایگاه TPXO که از سوی دانشگاه ایالت آرگان^۶ برای دستیابی به داده‌های جزرومدی توسعه یافته است، دریافت شد. دقت این پایگاه برای خلیج فارس $1/60^\circ$ است. استخراج داده‌های پایگاه TPXO در یک نقطه خاص، ثابت در مکان و متغیر در زمان انجام می‌شود.

خلیج بوشهر استفاده شد. برای واسنجی، نتایج به دست آمده با داده‌های میدانی اخذ شد از سازمان بنادر و دریانوردی مورد مقایسه قرار داده شد [۱۷].

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق خلیج بوشهر که بندر مهم تجاری بوشهر در آن واقع شده است، برای بررسی‌های عددی مورد مطالعه قرار داده شد (شکل ۱). این بندر با یک کانال کشتیرانی که به دو بخش داخلی و خارجی تقسیم می‌شود، به خلیج فارس متصل شده است. بندر بوشهر به عنوان یکی از مناطق ویژه در پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی بخش‌هایی از سواحل استان بوشهر مورد توجه قرار گرفته است [۱۸-۱۹].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی خلیج بوشهر

۲-۲. مدل عددی TELEMAC

مدل عددی هیدرودینامیکی به کار برده شده در پژوهش پیش‌رو TELEMAC است. TELEMAC یک مجموعه نرم‌افزار محاسباتی با قابلیت دسترسی آزاد است که توسط

مؤلفه‌های سرعت افقی U و V به صورت زیر در زمان t فرض

می‌شود:

$$F(M, t) = \sum_i F_i(M, t) \quad (5)$$

$$F_i(M, t) = A_{F_i}(M) \cos\left(2\pi \frac{t}{T_i} - \varphi_{F_i}(M)\right) \quad (6)$$

برای جزرومد طبیعی:

$$F_i(M, t) = f_i(t)A_{F_i}(M) \quad (7)$$

$$\cos\left(2\pi \frac{t}{T_i} - \varphi_{F_i}(M) + u_i^0 + v_i(t)\right)$$

در اینجا مقدار F نشان‌دهنده ارتفاع آب h یا یکی از مؤلفه‌های سرعت افقی U یا V است که نشان‌دهنده موج مورد نظر است، T_i نشان‌دهنده دوره موج است، A_{F_i} نشان‌دهنده دامنه ارتفاع یا اجزای سرعت افقی موج است، فاکتور فیزیکی F_i ، $f_i(t)$ و $v_i(t)$ نشان‌دهنده عوامل گره است و u_i^0 فاز را در مبدأ زمان برای شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

ارتفاع و سرعت هر موج در نظر گرفته شده، سپس به منظور به دست آوردن ارتفاع و سرعت آب به عنوان شرایط مرزی دامنه به دست می‌آید:

$$h = \sum_i h_i - z_f + z_{moy} \quad (8)$$

$$U = \sum_i U_i \quad (9)$$

$$V = \sum_i V_i \quad (10)$$

ضرایب A_{F_i} و F_i با توجه به زمان ثابت هستند و تنها به موقعیت نقطه M بستگی دارد. این مقادیر که کمیت آن‌ها بسیار مهم است، به طور گسترده‌ای برای مدلسازی استفاده می‌شود و پایگاه‌های ثابت هارمونیک برای مناطق مختلف وجود دارد [۲۸].

در شبیه‌سازی با ماژول TPXO رابطه به صورت رابطه (۷) است [۲۹].

$$F_i(M, t) = f_i(t) \operatorname{Re} \left(A_{F_j}(M) \exp \left(i \left(2\pi \frac{t}{T_i} + \varphi_{F_j}(M) + u_j^0 + v_j(t) \right) \right) \right) \quad (11)$$

۳. تئوری و محاسبات

معادله‌ها در چگالی ثابت با یکپارچه‌سازی از بستر به سطح به طور عمودی میانگین‌گیری می‌شوند. فرم میانگین معادله پیوستگی و اندازه جهت در راستای x و y به ترتیب عبارت است از:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hUU)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [hv_e \frac{\partial U}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [hv_e \frac{\partial U}{\partial y}] + hF_x \quad (2)$$

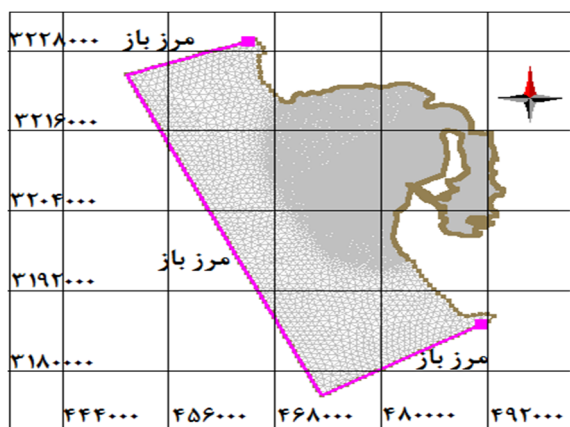
$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hVV)}{\partial y} + \frac{\partial(hUV)}{\partial x} = -gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} [hv_e \frac{\partial V}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [hv_e \frac{\partial V}{\partial y}] + hF_y \quad (3)$$

h عمق آب (m)، u و v مؤلفه‌های دوبعدی سرعت (m/s)، U و V اندازه مؤلفه‌های دوبعدی سرعت (m/s)، g شتاب گرانشی (m/s²)، v_e ضریب انتشار تکانه (m/s²)، t زمان (s)، x و y مؤلفه‌های افقی مکان در دستگاه دکارتی (m)، F_x و F_y عبارت چشمه و چاه در معادله‌های دینامیکی است که می‌تواند نیروی باد، کوریولیس، اصطکاک بستر یا هر پروسه دیگری که به اعمال نیروی خارجی به مدل منجر شود، تعریف کرد. اصطکاک بستر به عنوان تابع درجه دوم سرعت نشان داده می‌شود، تنش $\vec{\tau} = \rho C_f |U| \vec{U}$ ؛ که $\vec{U} = (U, V)$ مؤلفه دوبعدی سرعت است. ضریب اصطکاک (C_f) بستر را می‌توان به عنوان پارامتری در معادله استریکلر محاسبه نمود.

$$C_f = \frac{2g}{S^2 h^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

S ضریب استریکلر است [۲۳]. از جمله روش‌های مرسوم و متداول تجزیه و تحلیل جزرومدی، روش آنالیز هارمونیک است که نوسانات جزرومدی را به مجموعه‌ای متناهی از مؤلفه‌های هارمونیک که سرعت زاویه‌ای و فاز آن‌ها از استدلال نجومی تعیین می‌شود، نسبت می‌دهد. در مطالعه حاضر، تراز آب و مؤلفه‌های سرعت جزرومد به صورت یک تابع هارمونیک در نظر گرفته شده است [۲۴-۲۷]. تابع هارمونیک‌های اصلی تراز آب در مکانی M به عمق h و

خلیج بوشهر، سه مرز باز با سطح تراز (h) و مؤلفه‌های سرعت جریان (u,v) در نظر گرفته شد که شامل مرز شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی است (شکل ۳). مدل‌سازی سرعت جریان جزرومدی برای یک ماه از تاریخ ۲۰۱۱/۰۷/۱۲ تا ۲۰۱۱/۰۸/۱۰ به دلیل دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری در این بازه زمانی با استفاده از نرم‌افزار TELEMAC انجام شد. جهت کالیبراسیون مدل، داده‌های اندازه‌گیری سرعت جریان در منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۴۸۰۸۲۰ و عرض جغرافیایی ۳۲۱۰۱۷۸ از پایگاه داده مشخصه‌های دریایی دریافت شد.

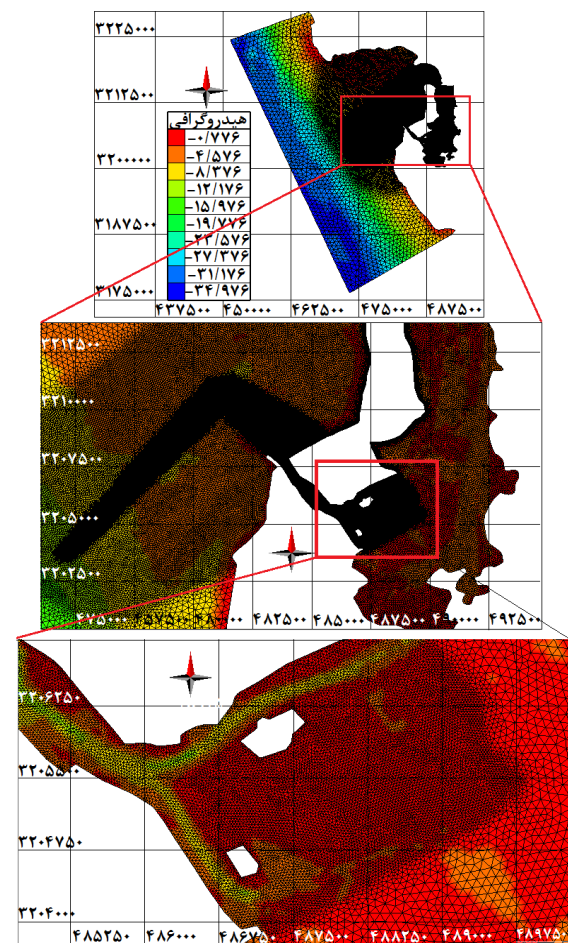


شکل ۳: مرزهای باز با u, v, h در مدل (سامانه مختصات جهانی مرکاتور معکوس)

برای کالیبراسیون اندازه سرعت جریان چهار ضریب، محدوده جزرومد^۷، محدوده سرعت جریان^۸، تراز آب^۹ و اصطکاک^{۱۰} مورد بررسی قرار گرفت. در محدوده ضرایب توصیه شده به شیوه آزمون و خطا با اجرا گرفتن مکرر مدل و مقایسه نتایج سری زمانی خروجی‌های هر ضریب کالیبره با مقادیر اندازه‌گیری انتخاب شدند که در جدول ۱ به برخی از تغییرات ضرایب انتخاب شده جهت کالیبراسیون اشاره شده است. برای بررسی دقیق‌تر میزان درستی داده‌های محاسبه شده با مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری به عبارتی صحت‌سنجی مدل از محاسبه پارامترهای آماری چون RMSE^{۱۱} و ضریب همبستگی پیرسون^{۱۲} در طول جغرافیایی ۴۸۰۸۲۰ و عرض جغرافیایی ۳۲۱۰۱۷۸ استفاده شد. مقادیر نزدیک به صفر برای RMSE نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل و در نتیجه کمتر بودن خطای مدل است. ضریب همبستگی بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند

۴. یافته‌ها

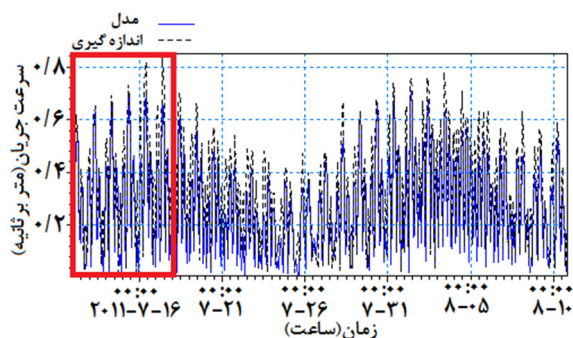
برای مدل‌سازی جزرومد در منطقه مورد مطالعه، اعمال اطلاعات هندسه و عمق به مدل امری ضروری است در این راستا شبکه‌بندی بهینه با استفاده از حساسیت تراکم شبکه، برای کل منطقه با نسبت یک‌به‌سه، از کوچک‌ترین شبکه‌بندی ۳۰ متر تا ۸۱۰ متر انتخاب شد. مقیاس این شبکه با نزدیک شدن به مرز دریایی برای کاهش زمان محاسبات بزرگ‌تر در نظر گرفته شد. هیدروگرافی بستر با درون‌یابی خطی به شبکه‌بندی بارگذاری شد. شبکه‌بندی نهایی مورد استفاده به صورت المان‌های غیرمنظم مثلثاتی شامل ۱۴۶۷۶۲ المان و ۷۴۶۹۸ گره است (شکل ۲).



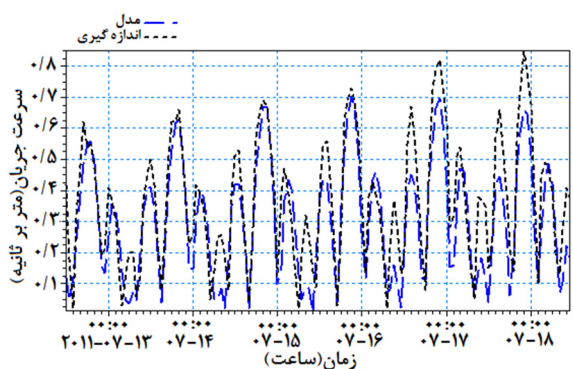
شکل ۲: بزرگ‌نمایی شبکه‌بندی و توپوگرافی محدوده مورد مطالعه بر اساس سامانه مختصات جهانی مرکاتور معکوس

اعمال داده‌های جزرومدی به مدل مستلزم شرایط مرزی مناسب است. تعریف شرایط مرزی و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در طول تولید مش ایجاد شده است. در مدل منطقه‌ای

گام زمانی با توجه به زمان محاسبه‌های بهینه و عدد کورانت (کوچک‌تر از یک) برای پایداری و دقت مدل، ۳۰ ثانیه انتخاب شده است. با بررسی جدول ۱ ضرایب کالیبراسیون مدل شامل ضریب سطح تراز، محدوده جزرومد، محدوده سرعت جریان و اصطکاک به ترتیب $1/13 \text{ m}$ ، $0/98 \text{ m}$ ، $1/10 \text{ m/s}$ و $50 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ در نظر گرفته شد. همچنین نشان داده شد اندازه سرعت جریان به ضریب حدود سرعت جریان حساسیت زیادی ندارد ولی به سایر ضرایب حساسیت نشان داد. از جمله تنظیمات دیگر در نظر گرفته شده، صرف نظر از نیروی کوریولیس با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه است. در شکل ۴ مقایسه سری زمانی خروجی سرعت جریان حاصل از مدل و داده‌های اندازه‌گیری تناظر به همراه بزرگ‌نمایی برای ۶ روز جهت وضوح بیشتر نشان داده شد.



(الف)



(ب)

شکل ۴: مقایسه نوسانات اندازه سرعت جریان مدل با ضرایب کالیبره نهایی و مقادیر متناظر اندازه‌گیری (الف) به همراه بزرگ‌نمایی برای ۶ روز (ب) در خلیج بوشهر

شکل ۵ نمودار سری زمانی سرعت جریان حاصل از مدل عددی TELEMAC، پایگاه پیش‌بینی جهانی TPXO و داده‌های اندازه‌گیری متناظر به همراه بزرگ‌نمایی تصویر برای ۶ روز را نشان می‌دهد.

و به‌ازای مقدار صفر میان مدل و اندازه‌گیری هیچ همبستگی وجود ندارد، درحالی‌که هر چه مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بیشتر است و اعداد منفی همبستگی معکوس را نشان می‌دهند [۳۰-۳۱]. پارامترهای آماری سناریوهای مختلف کالیبراسیون ضرایب در جدول ۲ آورده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (12)$$

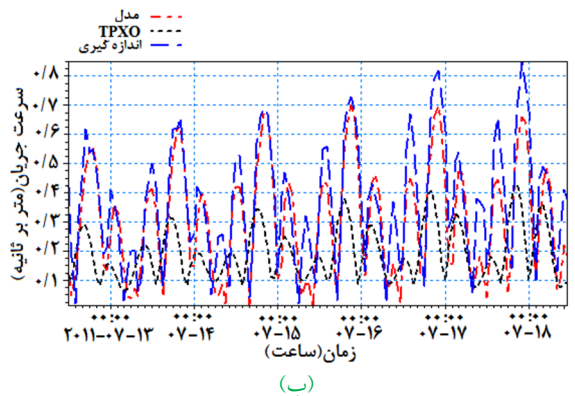
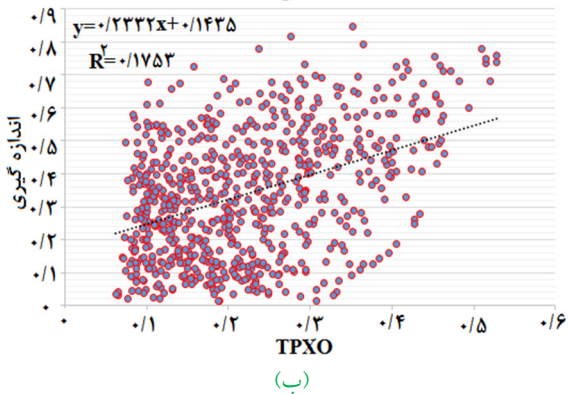
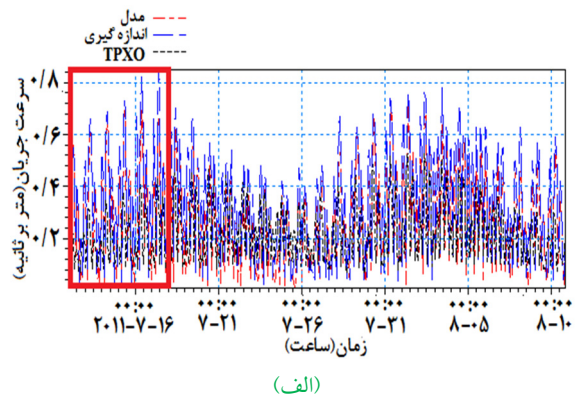
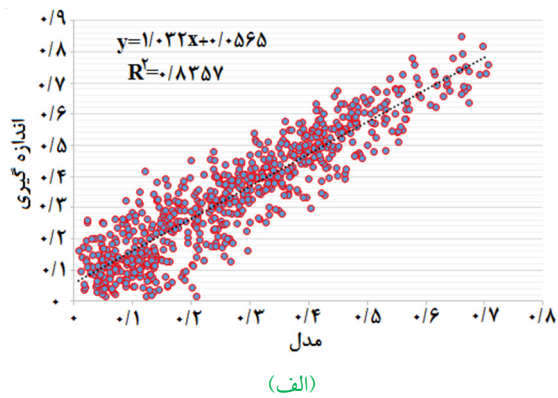
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

جدول ۱: سناریوهای مختلف برای کالیبراسیون مدل برای مدلسازی اندازه سرعت جریان در خلیج بوشهر

عنوان ضرایب	سناریو	سطح تراز	محدوده جزرومد	محدوده سرعت جریان	اصطکاک
	۱	۰/۸	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
سطح تراز	۲	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
	۳	۱/۸	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
محدوده جزرومد	۴	۱/۱۳	۰/۷	۱/۱	۵۰
	۵	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
	۶	۱/۱۳	۱/۴	۱/۱	۵۰
محدوده سرعت جریان	۷	۱/۱۳	۰/۹۸	۰/۵	۵۰
	۸	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
	۹	۱/۱۳	۰/۹۸	۲	۵۰
اصطکاک	۱۰	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۴۰
	۱۱	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۵۰
	۱۲	۱/۱۳	۰/۹۸	۱/۱	۶۰

جدول ۲: پارامترهای آماری سناریوهای مختلف موجود در جدول ۱

سناریو	RMSE	CC
۱	۰/۷۸۵	۰/۸۹۶۷
۲	۰/۰۶۲۸	۰/۹۱۴۱
۳	۰/۱۰۴۵	۰/۸۹۵۸
۴	۰/۱۱۸۵	۰/۸۹۵۰
۵	۰/۰۶۲۸	۰/۹۱۴۱
۶	۰/۰۵۸	۰/۸۸۳۹
۷	۰/۰۷۹۹	۰/۸۹۸۷
۸	۰/۰۶۲۸	۰/۹۱۴۱
۹	۰/۰۷۸۵	۰/۸۹۷۴
۱۰	۰/۰۸۶۲	۰/۹۰۵۲
۱۱	۰/۰۶۲۸	۰/۹۱۴۱
۱۲	۰/۰۷۴۸	۰/۹۰۳۷

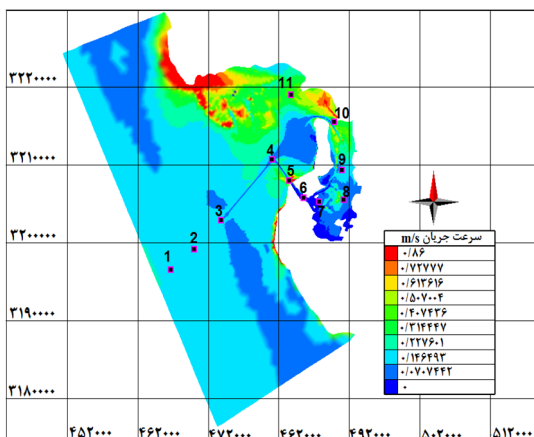


شکل ۶: همبستگی داده‌های سرعت جریان اندازه‌گیری با مدل (الف) و پایگاه TPXO (ب)

شکل ۵: مقایسه نوسانات سرعت جریان مدل، TPXO و مقادیر متناظر اندازه‌گیری (الف) به همراه بزرگ‌نمایی برای ۶ روز (ب)

در ادامه برای بررسی جهت غالب جریان در خلیج بوشهر، کل جریان یازده نقطه در مناطق مختلف منطقه رسم شد. نقاط این مناطق در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۳ مقایسه پارامترهای آماری بین سرعت جریان حاصل از مدل، پایگاه جهانی TPXO و داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نقاط رسم گال جریان در خلیج بوشهر

جدول ۳: پارامترهای آماری RMSE و CC سرعت جریان مدل و پایگاه TPXO

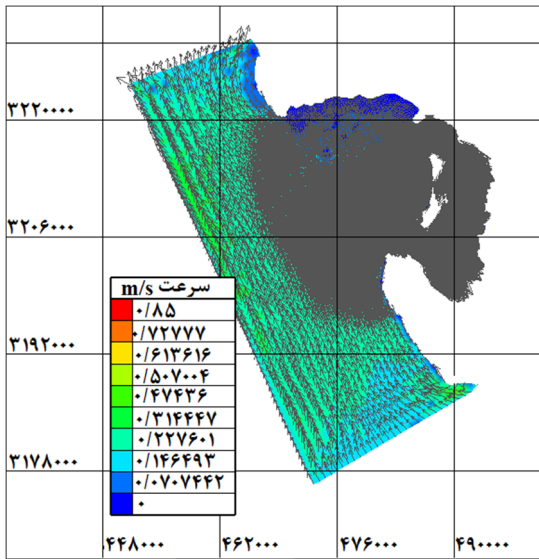
	RMSE	CC
مدل	۰/۰۶۲۸	۰/۹۱۴۱
TPXO	۰/۱۳۲۰	۰/۴۱۸۶

شکل ۶ همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری با مدل و پایگاه جهانی TPXO را نشان می‌دهد.

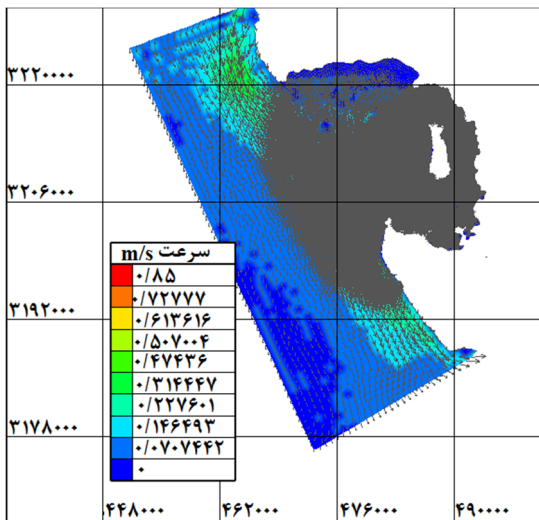
جهت جریان غالب خارج کانال، شمال غربی است با بیشینه سرعت 0.62 m/s که با ورود به داخل کانال خارجی جهت غالب جنوب غربی با بیشینه سرعت 0.61 m/s و با وارد شدن به کانال داخلی شمال غربی با بیشینه سرعت 0.44 m/s جهت

با توجه به جدول ۳، شکل ۵ و ۶ نشان داده شد سرعت جریان حاصل از خروجی مدل نسبت به پیش‌بینی پایگاه جهانی TPXO هم‌خوانی بیشتری با داده‌های اندازه‌گیری متناظر در خلیج بوشهر دارد.

شکل ۹ و ۱۰ الگوی جریان در زمان وقوع جزرومد در محدوده مدل منطقه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۹: الگوی جریان در حین رخ دادن جزر در محدوده مدل منطقه‌ای



شکل ۱۰: الگوی جریان در حین رخ دادن مد در محدوده مدل منطقه‌ای

در هنگام مد جریان‌های جزرومدی از شمال شرقی به جنوب غربی وارد خلیج بوشهر می‌شوند و در هنگام جزر از جنوب شرقی به شمال شرقی از منطقه خارج می‌شوند.

۶. نتیجه‌گیری

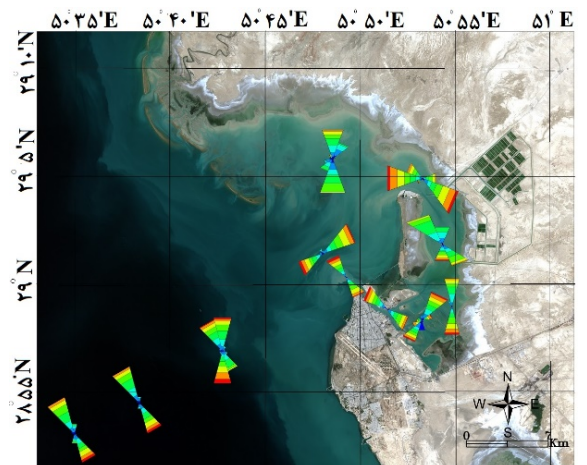
به‌طور کلی در پژوهش پیش‌رو به مدلسازی سرعت جریان جزرومدی با استفاده از ماژول دوبعدی نرم‌افزار TELEMAC-2D پرداخته شد.

غالب می‌شود. پشت جزایر جریان به‌صورت گردشی با حداکثر سرعت 0.72 m/s است و جهت جریان غالب در جلوی جزیره جنوب غربی با بیشینه سرعت 0.48 m/s است.

جدول ۴: جهت غالب و بیشینه سرعت در نقاط انتخابی در خلیج بوشهر

شماره نقاط	جهت غالب	بیشینه سرعت (متر بر ثانیه)
۱	شمال غربی	۰/۶۲
۲	شمال غربی	۰/۶
۳	شمال غربی	۰/۴۶
۴	جنوب غربی	۰/۶۱
۵	شمال غربی	۱/۱۲
۶	شمال غربی	۱/۴۴
۷	شمال غربی	۰/۳۵
۸	جنوب غربی	۰/۱۶
۹	جنوب غربی	۰/۲
۱۰	شمال شرقی	۰/۷۲
۱۱	جنوب غربی	۰/۴۸

با توجه به جدول ۳ بیشینه سرعت جریان مربوط به نقاط واقع شده درون کانال داخلی با مقادیر $1/12$ و $1/44 \text{ m/s}$ است. شکل ۸ جهت جریان را در یازده نقطه مورد بررسی روی تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲^{۱۳} خلیج بوشهر برای یک ماه از تاریخ $2011/07/12$ نشان می‌دهد. جریان از شمال غربی وارد کانال خارجی و وارد کانال داخلی می‌شود، به دور جزایر به صورت گردشی می‌چرخد، سپس خارج می‌شود. همچنین این جریانات رفت و برگشتی هستند و در نزدیکی ساحل موازی با ساحل هستند.



شکل ۸: جهت جریان در خلیج بوشهر

- for sea water level prediction. Applied Ocean Research. 2018 Jan 1;70:14-21.
- [۴] موسی‌زاد حکیمه. بررسی جریان‌ات باقی‌مانده جزرومدی در خلیج چابهار و خلیج پزم با استفاده از مدل‌سازی عددی [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. مازندران: دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران؛ ۱۳۹۵.
- [۵] رشیدی ابراهیم حصاری اکبر، حسینی سید مرضیه. ارزیابی حساسیت دینامیک کشند نیمروزانه M_2 به تغییرات مکانی ناهمواری بستری در تنگه هرمز. هیدروفریزیک. ۱۳۹۶؛ ۳(۱): ۲۱-۳۲.
- [۶] آزموده اردلان علیرضا، طوریان محمدجواد. مدل‌سازی جزرومد در دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایید گنج‌های ساحلی. فیزیک زمین و فضا. ۱۳۹۸؛ ۳۶(۳): ۱۵-۲۵.
- [۷] ربیعی‌فر حمیدرضا، باقری نرجس. مدل‌سازی تغییرات جزرومد (با مطالعه موردی در بندر شهید رجایی). دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی؛ ۱۳۹۱؛ منطقه ویژه اقتصاد انرژی پارس جنوبی، تهران، ایران.
- [۸] خانیکی علی، بخشنده فیروزه، کامران لاری. بررسی تأثیر جزرومد بر الگوی جریان و انتقال رسوب در مصبها با استفاده از شبیه‌سازی عددی مایک ۲۱. مهندسی منابع آب. ۱۳۹۳؛ ۷(۲۱): ۱-۱۱.
- [۹] جوکار محمد، لاری کامران. بررسی جریان‌های کشندی با استفاده از مدل مایک ۲۱ و اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل جهانی FES در خلیج فارس. اطلاعات جغرافیایی. ۱۳۹۵؛ ۲۵(۱۰۰): ۹۷-۱۱۰.
- [10] Reissosadat SM. Numerical study of water circulation in Persian Gulf using finite difference method. Research in Marine Science. 2018 Jun 1;3(2):303-10.
- [11] Aghajanloo K, Pirooz MD, Namin MM. Numerical simulation of tidal currents in Persian Gulf. Proceeding of International Conference on Civil, Environmental and Chemical Engineering; 2011 Oct 27.

نتایج کالیبراسیون مدل نشان‌دهنده حساسیت بالای مدل جهت مدل‌سازی سرعت جریان به مقیاس شبکه‌بندی و ضرایب محدوده جزرومدی، تراز آب، محدوده سرعت جریان و اصطکاک در خلیج بوشهر بود.

جریان‌ات جزرومدی شبیه‌سازی‌شده از ماژول دوبعدی TELEMAC، همگرایی قابل قبولی با نتایج حاصل از برداشت‌های میدانی داشتند که نشان‌دهنده انتخاب مناسب مقادیر برای ضرایب کالیبراسیون در این مدل بود.

خطای RMSE و همبستگی بین داده‌های میدانی سرعت جریان و پایگاه پیش‌بینی جهانی TPXO به ترتیب ۱۳ و ۴۱ درصد محاسبه شد. پس از انجام مدل‌سازی خطای RMSE، ۷ درصد کاهش و همبستگی ۵۰ درصد افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده مدل‌سازی دقیق مدل یا ورودی دارای درصد خطا و اختلاف زیاد بود.

جریان‌های غالب جزرومدی در خلیج بوشهر از سمت شمال غرب وارد کانال خارجی و داخلی می‌شوند که بیشینه اندازه سرعت آن درون کانال داخلی مقدار $1/44 \text{ m/s}$ است.

جریان‌های جزرومدی رفت و برگشتی، نزدیک ساحل موازی ساحل و در نقاط دور از ساحل بیضوی گردشی است که قطر اصلی آن موازی ساحل است.

در منطقه خلیج بوشهر که در خلیج فارس واقع شده است در هنگام مد جریان‌های جزرومدی از شمال شرقی به جنوب غربی وارد منطقه می‌شوند، زمان جزر از جنوب شرقی به شمال شرقی از منطقه خارج می‌شوند.

مراجع

- [1] Lefebvre M, Stewart R. History of Altimetry, 1960-1992. Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency; 2006. (Vol. 614).
- [2] Ardalan AA, Toorian MJ. A new tidal model for the Persian Gulf and Oman Sea based on satellite altimetry and coastal tidal gauge observations. Journal of the Earth and Space Physics. 2010;36(3):15-25.
- [3] El-Diasty M, Al-Harbi S, Pagiatakis S. Hybrid harmonic analysis and wavelet network model

- [۲۴] اکبری نسب محمد، کتابداری محمدجواد. مدل عددی جهت تعیین رژیم و توان جزرومد. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک. ۱۳۹۸؛ ۲۱(۲): ۲۱-۳۰.
- [۲۵] جزیریان ایرج، شریفی عادل. کاهش اثرات غیر جزرومدی با استفاده از آنالیز اختلاف ارتفاع نقاط هم جوار مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای در منطقه خلیج فارس. مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی. ۱۳۹۵؛ ۷(۲): ۱-۸.
- [26] Dronkers JJ. Tidal computations in rivers and coastal waters. Amsterdam, New York: North-Holland Pub. Co; 1996.
- [27] Godin G. The analysis of tides. Liverpool (UK): Liverpool University Press; 1972.
- [28] Pham CT, Lyard F. Use of tidal harmonic constants databases to force open boundary conditions in TELEMAC. Proceedings of the XIXth TELEMAC-MASCARET User Conference; 2012 Oct 18-19. Oxford: St Hugh's College; 2012. p.165-72.
- [29] Pham CT, Bourban S, Durand N, Turnbull M. Methodology to model tides with version 6.2 of TELEMAC-2D and TELEMAC-3D. National Hydraulic and environment Laboratory; 2013.
- [30] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 2007;50(3):885-900.
- [31] Boyle DP, Gupta HV, Sorooshian S. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. Water Resources Research. 2000 Dec;36(12):3663-74.
- [12] Blunden LS, Bahaj AS. Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK. Renewable Energy. 2006 Feb 1;31(2):121-32.
- [13] Hashemi MR, Neill SP, Robins PE, Davies AG, Lewis MJ. Effect of waves on the tidal energy resource at a planned tidal stream array. Renewable Energy. 2015 Mar 1;75:626-39.
- [14] Teles MJ, Smolders S, Maximova T, Rocabado I, Vanlede J. Numerical modelling of flood control areas with controlled reduced tide. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress; 2015 Jun. (Vol. 28)
- [15] Moloney V, Karunarathna H, Murray T, Rutt I, Everett A, Reeve D. Investigation of wind and tidal forcing on stratified flows in Greenland fjords with TELEMAC-3D. European Journal of Computational Mechanics. 2016 May 3;25(3):249-72.
- [16] Haverson D, Bacon J, Smith HC, Venugopal V, Xiao Q. Cumulative impact assessment of tidal stream energy extraction in the Irish Sea. Ocean Engineering. 2017 Jun 1;137:417-28.
- [۱۷] اداره بنادر و دریانوردی کل استان بوشهر [اینترنت]. ۲۰۱۱. قابل دسترس در: <https://bushehrport.pmo.ir>
- [۱۸] بختیاری آرش، کمیجانی فرشته، الهیار محمدرضا، توکلی محمود. بررسی مدل ایرانی PMO Dynamic در خلیج بوشهر. اقیانوس شناسی. ۱۳۹۲؛ ۴(۱۴): ۱۳-۱۸.
- [۱۹] فرجامی حسین، حسینی سید طالب، چگینی وحید، محمدی سیده سعیده. شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با مدل عددی سوان. اقیانوس شناسی. ۱۳۹۰؛ ۲(۸): ۷۹-۸۷.
- [20] TELEMAC-2D Software. Version 5.2, User Manual. EDF-R&D; 2002.
- [21] Open TELEMAC-MASCARET. Available from: <http://www.openTELEMAC.org/>.
- [22] Batica J, Gourbesville P, Erlich M, Coulet C, Mejean A. Xynthia Flood, Learning from the Past Events—Introducing a FRI to Stakeholders. In: Gourbesville P, Cunge J, Caignaert G, editors. Advances in Hydroinformatics. Springer Water. Singapore: Springer; 2018. p.607-19.
- [23] Nolivos Alvarez I, Choudhur A, Manbaliu J. N 2D hydrodynamic modelling of a tidal inlet using TELEMAC. Case study of “De IJzermondig [dissertation]. 2009.

پی‌نوشت

1. Topex-Poseidon
2. wave-current interaction
3. Electricité de France
4. Barre de Saint-Venant
5. Universal Transverse Mercator (UTM)
6. Oregon State University
7. Tidal range
8. Velocity range
9. Sea level
10. friction
11. Root Mean Square Error
12. Correlation Coefficient
13. Sentinel-2