

شبیه‌سازی جریان حجمی در مصب اروندرود با استفاده از مدل مایک ۲۱

محمد رضا خلیل آبادی^{۱*}، باقر بهروز^۲

khalilabadi@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

bagherbehrooz@yahoo.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم فنون خرمشهر، خرمشهر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

چکیده

الگوی جریان در مصب‌ها از مهم‌ترین فرایندهای ساحلی مؤثر بر ریخت‌شناسی خط ساحلی است. عوامل تأثیرگذار بر جریان در یک مصب یا خلیج از توپوگرافی مصب، نوع جزرومد و عوامل محیطی (باد و دبی رودخانه) متأثر می‌شوند. اروندرود یک رودخانه مرزی بین کشور ایران و عراق است که از نظر اقتصادی، استراتژیک، محیط‌زیست و نظامی جزء مهم‌ترین مناطق دریایی دو کشور است. قرار گرفتن بنادر خرمشهر، آبادان و بصره در طول مسیر و یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های آبی، اهمیت ویژه اقتصادی، زیست‌محیطی و استراتژیک به این منطقه بخشیده است. در این مقاله از مدل هیدرودینامیکی مایک استفاده شده است. این مدل هیدرودینامیکی بر اساس حل معادله‌های آب کم‌عمق استوار بوده و اثرات چرخش زمین و تغییرات توپوگرافی و اثرات اصطکاک نیز در آن دخالت داده شده است. معادله‌های هیدرودینامیک شامل پیوستگی و اندازه حرکت میانگین‌گیری شده در عمق هستند. در مقاله حاضر ابتدا مطالعات میدانی (برای اندازه‌گیری سمت و سرعت جریان، نوسان سطح آب) انجام شد. سپس مدل‌سازی عددی به کمک مدل هیدرودینامیکی و دوبعدی مایک ۲۱ انجام شد و با استفاده از داده‌های میدانی و مؤلفه‌های جزرومدی آدمیرالتی، مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده است. نتایج بیان می‌کند که حداکثر میانگین تغییرات برای مؤلفه p جریان حجمی $0.5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ و حداقل آن $-0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$ است و برای مؤلفه Q مقدار حداقل میانگین تغییرات $-0.45 \text{ m}^3/\text{m/s}$ و حداکثر آن تقریباً $0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد هر چه عمق آب بیشتر باشد، مؤلفه (p) شارش بیشتر است و در تحلیل مؤلفه (Q) شارش کاملاً برعکس است.

واژه‌های کلیدی: مصب اروندرود، جریان حجمی، شبیه‌سازی، هیدرودینامیک

۱. مقدمه

سواحل به لحاظ اقتصادی، زیست محیطی، سیاسی و غیره به عنوان مرزهای آبی هر کشور اهمیت ویژه ای دارند. بنابراین شناخت همه پارامترهای مؤثر در تغییرات ساحل به ویژه فرایندهای هیدرودینامیکی و مطالعه خصوصیات فیزیک دریا در هر بخش ساحلی برای استفاده بهینه از سواحل حائز اهمیت است. جریان های دریایی و اقیانوسی همان حرکت آب دریاست که از سه عامل اصلی جزرومد، نیروی باد و اختلاف چگالی ناشی می شود. بستر رسوبی دریاها و مناطق ساحلی همواره تحت تأثیر تنش های برشی ناشی از وجود جریان و امواج هستند. تعیین ساختار و مقدار جریان در یک منطقه، اطلاعات مفیدی در خصوص تخمین آثار سوء بر سازه و خطوط ساحلی در اختیار قرار می دهد [۱].

در تحقیق های پیشین اغلب پارامترهای سرعت و جهت جریان به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است و به مقدار جریان حجمی عبوری از منطقه پرداخته نشده است، حال آنکه جریان حجمی پارامتر مناسبی برای تعیین الگوی جریان در منطقه است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی جریان حجمی برای انجام مطالعات رسوب گذاری فرسایش و تغییرات مورفولوژیک سواحل، آب گرفتگی سواحل، پخش و انتشار آلودگی نفتی، نفوذ شور و ارائه راه کارهای مدیریت نوار ساحلی مورد استفاده است، در رابطه با شبیه سازی جریانات تاکنون مطالعاتی انجام شده است که از جمله می توان به مطالعات انجام شده زیر اشاره کرد.

هوگن و توپیل در سال ۲۰۱۰ در تحقیقی مدل سازی چرخش و گردابه در خلیج فارس را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جریان های ورودی و خروجی ناشی از چگالی در تنگه هرمز، شدید است. جریان های ساحلی شمال غربی در محل تنگه هرمز و شمال قطر، دامنه شمالی سلول را تشکیل می دهند و از جولای تا آگوست این جریان ها به دلیل مکانیسم ناپداری باروکلینیک ناپایدار می شوند [۲].

کنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، در مطالعه ای با عنوان تأثیر پتانسیل افزایش سطح آب دریا در آینده بر جزرومد در دریای چین^۱ پرداخته اند. در این مطالعه سه سناریوی افزایش

سطح (۰/۵، ۱ و ۱/۵) اجرا شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که اندازه مؤلفه قمری اصلی M_2 و اندازه مؤلفه روزانه K_1 واکنش بیشتری به افزایش تغییرات تراز سطح آب نشان می دهند؛ همچنین نتایج نشان می دهد تغییرات دامنه M_2 و K_1 در آب های کم عمق بیشتر از آب های عمیق است و در ادامه نتایج نشان داده است که تأثیر زیادی بر مؤلفه M_2 دارد در حالی که تأثیر روی مؤلفه K_1 ندارد [۳].

دونگ فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، با استفاده از یک مدل عددی مورفولوژیکی به نام TELEMAC به مدل سازی عددی جریان، انتقال شن و ماسه در ساحل جزرومدی ناحیه خورمانند در اطراف شمال غربی انگلیس به منظور درک تأثیرات جزر و مد امواج و انتقال رسوب بر تبادل شن و ماسه میان سه خور و منطقه ساحلی مجاور آن پرداخته اند. مقایسه نتایج مدل بین این سه خور متفاوت بر تأثیرات بستر، عمق، هیدرودینامیک اندازه رسوب با برهمکنش جزرومد و موج به طور کلی مشخص شده است. جهت انتقال خالص رسوب در دهانه خود به قدرت اصلی انتقال به سمت کشتی در آب های کم عمق به دلیل عدم تقارن جزرومدی و انتقال دریا سو درون کانال های عمیق خور بستگی دارد، به علاوه جهت شار کل به میزان زیادی با اندازه های رسوب محلی و مجاور تعیین می شود [۴].

سبحانی پور و امیری در سال ۱۳۹۴، به کمک مدل مایک ۳، حرکت آب، رسوب و تأثیر آن بر ریخت شناسی (مورفولوژی) رودخانه سیوند با مدل سه بعدی مایک ۳ به شبیه سازی پرداخته اند. پس از تحلیل، رودخانه سیوند در دو حالت پایدار و ناپایدار، به بررسی تغییر شکل بستر رودخانه با توابع انتقال رسوب مختلف پرداخته شده است.

پس از مدل سازی، پارامترهای مهم هیدرولیکی جریان از قبیل عمق، سرعت، شعاع هیدرولیکی و ... تعیین شده است. در ادامه از بین توابع موجود در برنامه، تابع انتقال رسوب انگلند و هانسن که بیشترین تطبیق را با شرایط حاکم در رودخانه سیوند داشته، انتخاب و به بررسی تغییر فرم بستر رودخانه تحت تأثیر سیلاب های مربوط به چندین سال متوالی پرداخته شده است و سرانجام بهترین تابع در رودخانه سیوند

پیشنهاد شده است [۵].

در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای توسط گوآ و لیو، در خصوص جریان جزرومدی و رسوب در بندرگاه آب‌های عمیق یانگشان شانگهای انجام شد. منطقه یانگشان که در مجمع‌الجزایر کیکو واقع شده، منطقه معمولی ساحلی با جزیره موتایی و کانال موتی است. در این مطالعه، با استفاده از نمونه‌برداری از منطقه دریایی یانگشان، یک مدل عددی سه‌بعدی از جریان‌های جزرومدی و رسوب برای مطالعه تغییرات جریان جزرومدی و رسوبات ایجاد شده است. اعتبار مدل با داده‌های مشاهده شده شامل جریان جزرومدی و غلظت رسوب معلق در نزدیکی بندر تأیید شده است. مقادیر محاسبه شده نیز در توافق خوب با داده‌های اندازه‌گیری شده است. معلوم شده زمینه جریان‌های جزر و مدی، غلظت رسوب معلق و تغییر شکل دریایی می‌تواند با موفقیت شبیه‌سازی شود. در نهایت یک طرح برای شبیه‌سازی تغییرات زمینه رسوب فعلی و معلق شبیه‌سازی شد و تکامل دریایی با مدل پیش‌بینی شده است [۶].

در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای توسط استروسکی و استلا در خصوص امواج و جریان‌های دریایی غیر جزرومدی، در لویاتو انجام شد. این مطالعه مربوط به منطقه ساحلی شنی در لهستان (دریای بالتیک جنوبی) است و شامل مطالعات تجربی و نظری فرایندهای هیدرودینامیکی و لیتودینامیکی در منطقه ساحلی است که در نزدیک مرز دریایی منطقه گشت و گذار قرار دارد. بسترهای مختلفی به وسیله جریان‌ها در منطقه ایجاد شده است. در این مطالعه، امکان حمل بار رسوب فزاینده و احتمال وقوع زلزله در آب‌های زیرزمینی مورد بحث قرار گرفته است [۷].

در سال ۲۰۱۶ مطالعه دیگری توسط بورگز و نیتروئر در خصوص رسوب گذاری ساحلی در خلیج سبتیا در برزیل انجام شده است. در این مطالعه ماهیت رسوب گذاری و نرخ انباشت رسوب در خلیج سبتیا، با الگوی دانه‌بندی، توزیع رادیوشیمیایی طبیعی و چینه‌شناسی لریزه‌ای تحلیل و تفسیر شده است. نتیجه بررسی دانه‌بندی، پیشرفت صعودی رسوب در هسته‌ها و درصد سنگین تر در رسوبات سطحی را در سال

۱۹۹۶ نسبت به سال‌های قبل نشان داده است. نرخ رسوب گذاری بالا طی ۱۰۰ سال گذشته باعث شده خط ساحلی در قسمت شمال خلیج حدود ۴۰۰ متر پیشروی داشته باشد و افزایش آشکار در نرخ انباشت و تمایل به رسوب گذاری در طول صد سال گذشته به نسبت دخالت انسان و فرسایش خاک داخلی، با توسعه اقتصادی، تسریع شده است [۸].

۲. مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی جریانات دریایی در منطقه اروندرود از مدل شبیه‌سازی جریانات^۴ بسته نرم‌افزاری مایک ۲۱ استفاده شد. مدل جریانات در نرم‌افزار مایک ۲۱، یک سیستم مدل‌سازی است که بر مبنای ساختار منظم و نامنظم است. مدل هیدرودینامیک، مدل محاسباتی اصلی کل نرم‌افزار مایک ۲۱ به حساب می‌آید. این مدل در محدوده گسترده‌ای از هیدرولیک و پدیده‌های مربوط به آن قابل کاربرد است. این مدل مدل‌سازی هیدرولیک جزرومد، باد، جریانات ناشی از موج و برکشند طوفان را شامل می‌شود [۹].

مدول هیدرودینامیک مدل پایه برای تمامی مدل‌های مایک ۲۱ است، طوری که سایر مدل‌ها بدون اجرای مقدماتی این مدل قادر به ایفای نقش مربوط به خود نخواهد بود.

دلیل انتخاب مدل دوبعدی در این تحقیق، کم عمق و کوچک بودن تغییرات عوامل حرکت در راستای قائم در حوضه مصب اروندرود است، به عبارت دیگر مدل HD اساس هیدرودینامیکی لازم برای محاسبات اجرایی دیگر مدل‌های نرم‌افزار یادشده را فراهم می‌آورد. اثر نیروی ناشی از وجود چشمه^۲ و چاه‌ها^۳ نیز با داشتن سرعت و اندازه دبی جریان رودخانه به عنوان چشمه، می‌تواند لحاظ شود [۱۰].

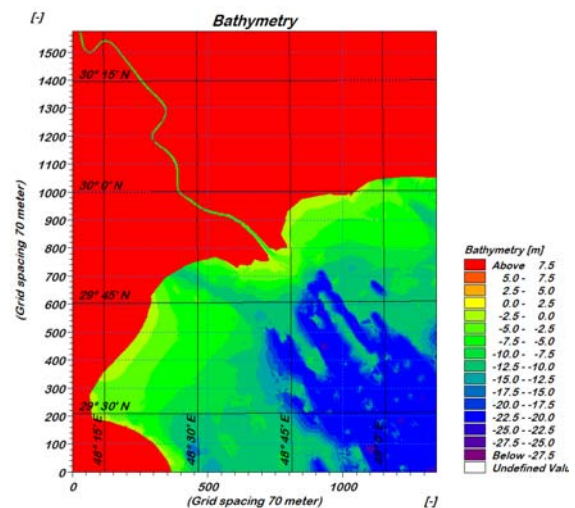
این مدل برای مدل‌سازی جریانات دریاها، اقیانوس‌ها، سواحل و خورها به کار می‌رود. کاربرد آن اغلب در مواردی است که پدیده انتقال و جریان حائز اهمیت است و اثر نیروی کوریولیس در بزرگ مقیاس، نیروی باد، مقاومت بستر و ادی و اسکوزیته می‌تواند در محاسبات استفاده شوند.

۲-۱. شبکه بندی منطقه مورد مطالعه

مش بندی دامنه اصلی مدل سازی در نرم افزار مایک ۲۱ از بسته مایک زیرو^۵ زیر برنامه ساخت مش^۶ استفاده شد.

برای ساخت فایل عمق سنجی منطقه مورد مطالعه، نقشه هیدروگرافی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰، از سازمان بنادر خرمشهر گرفته شده است و نقشه ها به زیر برنامه ساخت مش اعمال شده و شروع به رقومی کردن نقشه ها کرده و در نهایت فایل عمق سنجی به صورت XYZ رقمی شد، بلافاصله اطراف این منطقه فاصله اضافه مورد مطالعه مشخص شد و محدوده با ابعاد ۷۰×۷۰ گرید بندی شده و زمان محاسباتی مورد نیاز برای مدل سازی باعث ایجاد محدودیت در انتخاب تعداد گره و فواصل شبکه مش بندی به ابعاد ۷۰×۷۰ متر شد.

گام زمانی برای مدل سازی طوری انتخاب شد که بتواند رزولوشن مناسبی برای تغییرات زمانی سرعت جریان تهیه شود تا معیار مدل سازی عددی (عدد کورانت ۴/۶) را ارضا و در ادامه با در نظر گرفتن ۱۳۴۵ گره در جهت افقی و ۱۵۷۴ گره در جهت عمودی فایل عمق سنجی ساخته شد.



شکل ۱. هیدروگرافی و مش به کاررفته در مدل

در نهایت فایل مش بندی منظم حاصله به صورت گرید سری (فایل دوبعدی) و به عنوان فایل ژرف سنجی به مدل اعمال شده است. شکل ۱ مش بندی و نمایی دوبعدی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

۲-۲. منطقه مورد مطالعه

اروند رود، رودخانه ای پهناور و پرخروش است که در شهرستان خرمشهر و آبادان جاری بوده و رودخانه مرزی ایران و عراق است، طول بخش مرکزی این رودخانه ۸۴ کیلومتر است. اروندرود که از تلاقی رودخانه دجله و فرات در نقطه ای به نام قرنه در ۱۱۰ کیلومتری شمال باختری آبادان تشکیل می شود و به سوی جنوب خاوری از کنار شهر بصره می گذرد، وارد خاک عراق می شود، خرمشهر و آبادان را طی می کند و سپس در ۸ کیلومتری جنوب اروندرود کنار به خلیج فارس می ریزد [۱۱].

جریان حجمی پارامتر مناسبی برای تعیین الگوی جریان در منطقه است. پارامتر جریان حجمی یکی از مشخصه های جریان های دریایی است که تحت تأثیر سه عامل سرعت جریان، حجم آب عبوری از منطقه و جهت جریان بوده و معرف مقدار حجم آب عبوری با سرعت (V) از منطقه است. پارامتر جریان حجمی ($m^3/m/s$) با دو مؤلفه (P) و (Q) معرفی می شود که به ترتیب جریان حجمی عبوری در راستای X و Y است.

شکل ۲ منطقه مورد مطالعه و موقعیت مکانی برداشت داده های شارش حجمی در جهت مؤلفه p و Q را نشان می دهد.



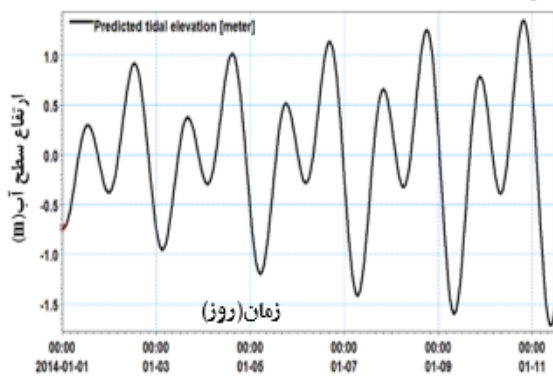
شکل ۲. منطقه مورد مطالعه و موقعیت مکانی استخراج داده های شارش حجمی

خشک‌شدگی^۸، ۰/۳ متر و عمق غرق‌شدگی^۹، ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است.

۲-۵. مشخص کردن شرایط مرزی

در این تحقیق، دامنه مدل‌سازی اروندرود است که به صورت یک فایل عمق‌سنجی به نرم‌افزار اعمال شده است. در این تحقیق دو مرز باز (مرز دریا و مرز بالا دست رودخانه) برای مدل در نظر گرفته شده است و سری زمانی تغییرات تراز آب مربوط به دهانه اروندرود به عنوان نزدیک‌ترین منطقه به مرز دریایی مدل و تغییرات تراز سطح آب به صورت یک عدد ثابت در بازه زمانی مورد مطالعه به بخش هیدرودینامیکی اعمال شده است.

در شکل ۴ تغییرات تراز سطح آب نشان داده شده است. لازم به توضیح است که دامنه و فاز چهار مؤلفه اصلی جزرومد (S_2 و M_2, O_1, K_1) مربوط به دهانه اروندرود از کتاب جداول جزرومدی آدمیرالتی استخراج و به مدل معرفی شده‌اند و در نهایت تغییرات تراز سطح آب به صوت سری زمانی زیر حاصل شده است.



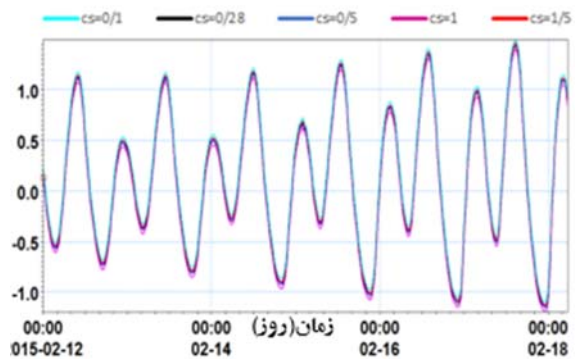
شکل ۴. تغییرات تراز سطح آب اعمال شده به مرز دریا (جدول آدمیرالتی)

۲-۶. معادله‌های حاکم

مدل مایک بر پایه روش اوپلری توسعه داده شده است و در آن برای مشخص کردن الگوی جریان از معادله‌های پیوستگی و تکانه (معادله‌های ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق)، معادله‌های (۱)، (۲) و (۳) استفاده شده است [۱۰].

۲-۳. ضریب گرانروی گردابه‌ای

به منظور بررسی اثر عدد کورانت^۷ بر تراز جزر و مد بر نتایج شبیه‌سازی، مدل‌سازی حاضر با ضرایب گرانروی مختلف ($0/1$ ، $0/28$ ، $0/5$ ، 1 ، $1/5$) برای یک دوره مشخص اجرا شده و نتایج به دست آمده در مناطق مختلف با یکدیگر مورد مقایسه واقع شدند. مقایسه ترازهای آب در شبیه‌سازی نشان داد که نسبت به ضریب گرانروی حساسیت ندارند. از آنجا که اجرای چندباره مدل نشان داده که ضریب گرانروی بر نتایج ترازهای آب ناشی از جزرومد، تأثیر نداشته است، بنابراین عدد ثابت $0/28$ مقدار پیش فرض مدل به کار گرفته شده است. در شکل ۳ حساسیت‌سنجی تراز سطح آب نسبت به ضریب گرانروی نشان داده شده است.



شکل ۳. حساسیت‌سنجی تراز سطح آب نسبت به ضریب گرانروی گردابه‌ای

۲-۴. مرز تری و خشکی

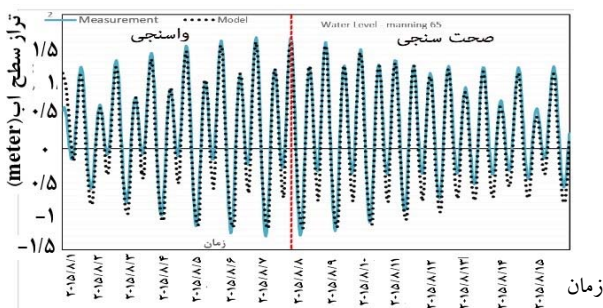
نقاطی که در شبیه‌سازی تحت تأثیر جزرومد از آب خارج می‌شوند با تعریف عمق خشک‌شدگی، از محاسبات خارج شده و در مقابل، نقاطی که به زیر آب می‌روند با تعریف عمق ترشدگی، وارد محاسبات می‌شوند.

درواقع زیربرنامه هیدرودینامیک، در هر گام زمانی، تغییرات سطح آب را محاسبه نموده و با توجه به نسبت تغییرات سطح آب دو حالت را در نظر می‌گیرد.

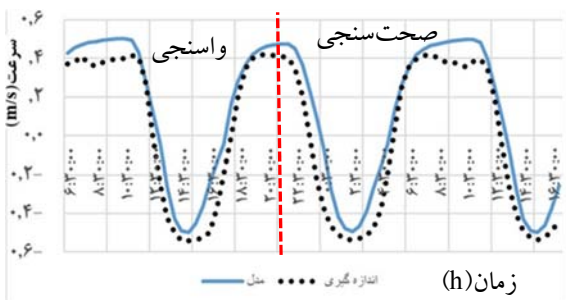
اگر این نسبت مثبت باشد به این حالت غرق‌شدگی و در غیر این صورت خشک‌شدگی می‌گویند. با تعیین حداقل عمق برای این دو حالت، شبکه گره‌های محاسباتی را برای رسیدن به عمق مورد نظر گسترش داده و اعماق کمتر از آن در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله عمق

با انتخاب عدد ۶۵ به عنوان ضریب مانینگ خروجی های منطقی تر به دست آمد شکل ۵ نشان دهنده واسنجی و صحت سنجی تراز سطح آب در بندر فاو است، همچنین شکل ۶ نشان دهنده واسنجی و صحت سنجی جریان آب مقابل اسکله شیلات آبادان است، لازم به یادآوری است که برای کالیبره کردن سرعت آب در ایستگاه آبادان یک جریان سنج مغناطیس به مدت ۳۲ در سال ۱۳۹۶ در فاصله ۱۵۰ متری ساحل ایران در عمق ۳ متری نصب شد. در این نقطه عمق کل حدود ۶ متر و عرض رودخانه ۵۰۰ متر است. برای کالیبره کردن تراز سطح آب یک دوره مه کشند و کهکشند در نظر گرفته و با داده های استخراج شده از مدل مقایسه شده است، همچنین برای مقایسه سرعت جریان یک سیکل جزرومد در نظر گرفته شده و با داده های میدانی مقایسه شده است.

برای اعتبارسنجی نتایج مدل و داده های مشاهداتی از شاخص آماری خطای مجذور میانگین مربعات^{۱۱} استفاده شده است که مقدار این پارامتر برای تراز سطح آب ۰/۲۳۸ متر برای جریان آب ۰/۱۲۷ متر بر ثانیه به دست آمده است.



شکل ۵. واسنجی و صحت سنجی تغییرات تراز سطح آب نتایج مدل و نتایج داده های اندازه گیری شده در بندر فاو (جدول جزرومدی آدمیرالتی)



شکل ۶. واسنجی و صحت سنجی جریان آب نتایج مدل با نتایج داده های اندازه گیری شده مقابل اسکله شیلات آبادان

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{p_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega_q - f v_x + \frac{h}{p_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{p_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega_q - f - v_x + \frac{h}{p_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (3)$$

کمیت های استفاده شده در این معادله ها عبارت اند از، عمق آب $h(x, y, t)$ ، تراز سطح آب $\zeta(x, y, t)$ تغییر زمانی عمق آب $d(x, y, t)$ ، چگالی های شارژ در جهت های $p, q(x, y, t)$ ، شتاب گرانش، مقاومت شزی (واحد، $M^{1/2}/S$) (Cxy) ، نیروی کوریولیس وابسته به عرض جغرافیایی Ω ، سرعت مؤلفه های آن در جهت های v_x, v_y ؛ واحد آن m/s ، فشار اتمسفر p_a ، چگالی آب: ρ_w زمان: t ، مؤلفه های تنش تشعشی $\tau_{xy}, \tau_{xx}, \tau_{yy}$ معادله های بالا با گسسته سازی به روش تفاضل محدود و روی شبکه منظم حل شده اند.

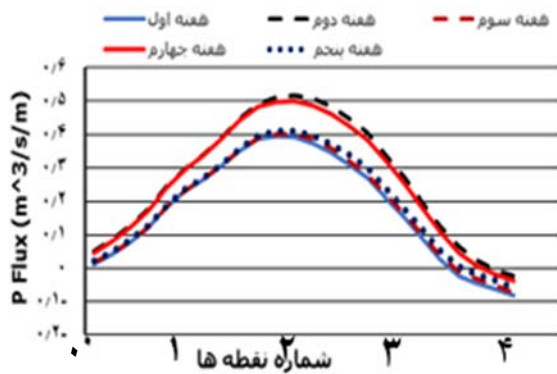
مانند هر مدل دیگری از این نوع، جهت مدل سازی باید به ضوابط پایداری مدل توجه شود که این مدل با عدد کورانت مشخص می شود. که در ذیل به آن اشاره شده است.

۲-۲. واسنجی و صحت سنجی مدل

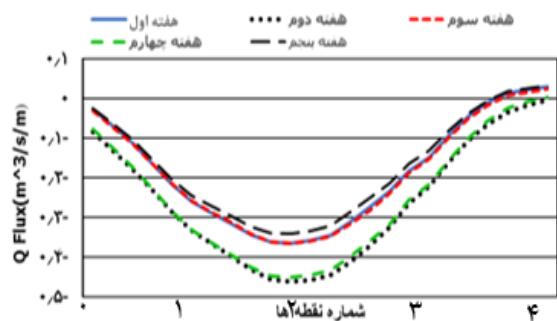
واسنجی و صحت سنجی مدل با استفاده از ضریب زبری^{۱۱} انجام شده است. برای ابتدا مدل تنظیم شده است و در هر بار اجرای مدل ضریب زبری را تغییر و عوامل دیگر ثابت فرض شد. ضریب مقاومت بستر که با عدد مانینگ تعریف می شود ابتدا با پیش فرض نرم افزار عدد ۳۲ اجرا شد که نتایج با داده های میدانی فاصله داشت.

در چند مرحله بعد با زیاد کردن این عدد به ۴۰ و ۶۵ در هر بار اجرای مدل خروجی ها به مقادیر واقعی نزدیک تر شد و ضریب زبری بستر جهت واسنجی مدل به کار گرفته شد پس از سعی و خطای فراوان و اجرای چندباره مدل و مقایسه نتایج آن با داده های میدانی ضریب مانینگ برابر $m=65$ به دست آمد.

که در شکل ۲ نشان داده شده موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های بررسی شده در دهانه اروندرود است.



شکل ۸. نمودار تغییرات میانگین مؤلفه (P) شارش در طول چهار نقطه



شکل ۹. نمودار تغییرات میانگین مؤلفه (Q) شارش در طول چهار نقطه

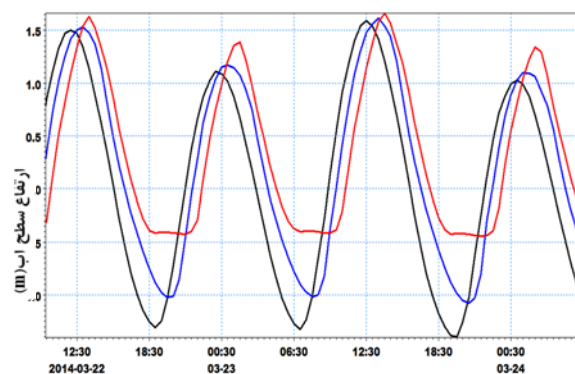
با توجه به شکل ۸ الگوی تغییرات مؤلفه (p) شارش، در طول چهار نقطه و مربوط به پنج هفته متوالی نشان داده است، الگوی تغییرات شارش از سوی عراق به سمت وسط رودخانه افزایش و با حرکت به سمت سواحل ایران کاهش یافته است. دلیل این امر عمق آب است، پس هر چه عمق آب بیشتر باشد، مؤلفه (p) شارش بیشتر است ولی در تحلیل مؤلفه (Q) شارش کاملاً برعکس می‌باشد.

لازم به یادآوری است که الگوی تغییرات شارش در دو شکل در هفته اول، سوم و پنجم مشابه هم هستند و در هفته‌های دوم و چهارم هم تقریباً مشابه هم، دلیل این امر پدیده مهکشند و کهکشند است؛ بنابراین تغییرات مهکشند بیشتر از کهکشند است. طبق شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نتایج به صورت گل جریان در دو نقطه انتخابی (دهانه اروندرود، پیچ خسروآباد) در حالت‌های دبی $700 \text{ m}^3/\text{s}$ و دبی $480 \text{ m}^3/\text{s}$ نمایش داده شده است.

۳. نتایج مدل هیدرودینامیک

تغییرات تراز سطح آب در سه نقطه (دهانه اروندرود، بندر فاو و پیچ خسروآباد) در شکل ۷ در زمان مهکشند نشان داده شده است. در این شکل اختلاف فاز و اختلاف دامنه قابل مشاهده است، با توجه به این شکل اختلاف فاز بین دهانه با بندر فاو حدود نیم ساعت و با پیچ خسروآباد تقریباً یک ساعت است و دامنه جزر و مد با حرکت به سمت بالادست مصب کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع دبی اروندرود است، زیرا در هنگام مد تراز آب دریا بالا می‌آید و این افزایش ارتفاع آب در مصب رودخانه به صورت موج به داخل رودخانه نفوذ می‌کند و باعث افزایش سطح آب رودخانه می‌شود و از طرفی بالا آمدن سطح آب در مصب باعث جلوگیری از خروج آب رودخانه و انباشت آب می‌شود؛ بنابراین عمده حجم آبی که باعث بالا آمدن سطح آب رودخانه می‌شود، با دبی رودخانه تأمین می‌شود و همین دبی رودخانه باعث می‌شود که قدرت مد کاهش پیدا کند و حجم آب کمتری به بالادست حرکت کند و افت دامنه جزرومدی ایجاد شود، همچنین زبری بستر و دیواره‌های رودخانه در افت دامنه جزرومد در حرکت به سمت بالادست سهیم است.

با توجه به شکل ۷ دامنه جزر و مد در دهانه، بندر فاو و پیچ خسروآباد به ترتیب $3/2$ ، $2/8$ و $2/12$ است.

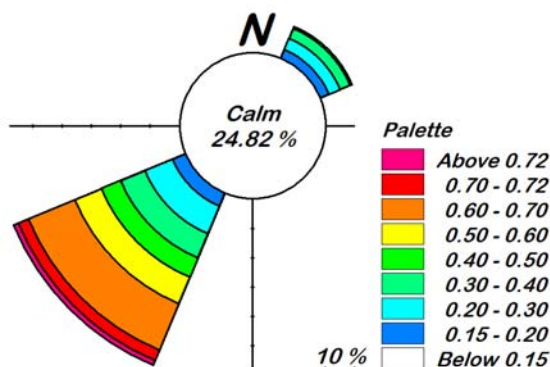


شکل ۷. مقایسه تراز سطح آب در سه ایستگاه مختلف؛ دهانه (سیاه)، فاو (آبی) و پیچ خسروآباد (قرمز)

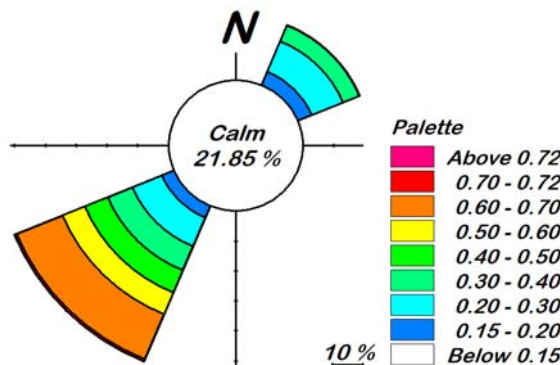
در شکل ۸ و ۹ نمودار تغییر میانگین هفتگی مؤلفه‌های شارش در طول چهار نقطه به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور

است، همچنین جهت جریان در پیچ خسروآباد شرقی-غربی ولی در دهانه غربی-شرقی است.

سرعت جریان در پیچ خسرو کمتر از دهانه است، همچنین در هنگام دبی زیاد سرعت جریان در پیچ نسبت به دبی کم افزایش پیدا کرده است، ولی به دلیل تقابل پدیده مد با دبی زیاد رودخانه باعث شده جریانی آرام‌تر (۲۴/۸۲٪ آرام) نسبت به دبی کم (۲۱/۸۵٪ آرام) در گل جریان نشان داده شود؛ همچنین فراوانی جهت جریان در حالت دبی زیاد از سمت قطاع ۳۰۰ الی ۳۴۰ مقدار کمی افزایش یافته است.



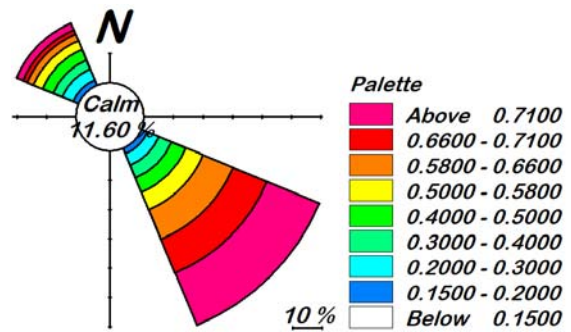
شکل ۱۲. گل جریان در پیچ خسروآباد دبی $700 \text{ m}^3/\text{s}$



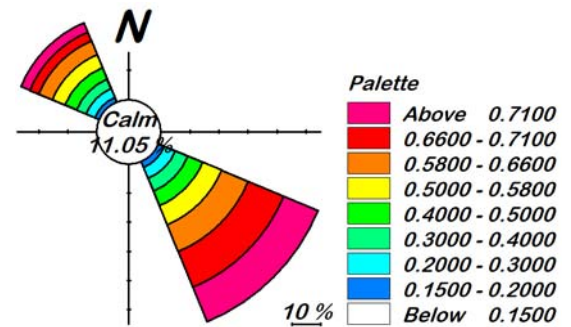
شکل ۱۳. گل جریان در پیچ خسروآباد دبی $480 \text{ m}^3/\text{s}$

۴. نتیجه‌گیری و بحث

جریانات تغییرات سطوح جزرومدی شبیه‌سازی شده از مدل، همگرایی قابل قبولی با نتایج موجود از برداشت‌های میدانی دارند که این نکته نشان‌دهنده انتخاب مناسب مقدار عددی ۶۵ برای ضریب زبری بستر و حداکثر گام زمانی ۶۰ ثانیه در آب‌های کم‌عمق در این مدل است.



شکل ۱۰. گل جریان در دهانه اروندرود با دبی $700 \text{ m}^3/\text{s}$



شکل ۱۱. گل جریان در دهانه اروندرود با دبی $480 \text{ m}^3/\text{s}$

شکل ۱۰ و ۱۱ شرایط جریان برای دهانه اروندرود نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، از نظر جهت جریان در دو وضعیت دبی $700 \text{ m}^3/\text{s}$ و $480 \text{ m}^3/\text{s}$ تفاوت قابل توجهی وجود ندارد.

در هر دو حالت پرآبی و کم‌آبی جریان‌های جزر به شکل طبیعی قوی‌ترند، اما در حالت پرآبی این اختلاف شدت جریان (حالت جزر و مد) از اختلاف شدت جریان در حالت کم‌آبی بیشتر است.

در ضمن باید عنوان کرد که با اعمال دبی زیاد، سرعت جریان افزایش یافته است، طوری که سرعت‌های بالای ۰/۷۱ متر بر ثانیه در شکل در حالت پرآبی فراوانی بیشتری دارند.

در شکل ۱۲ و ۱۳ شرایط جریان در پیچ خسروآباد نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، جریان از نظر جهت جریان در دو وضعیت دبی $700 \text{ m}^3/\text{s}$ و $480 \text{ m}^3/\text{s}$ تفاوت کمی وجود دارد و از نظر فراوانی جریان با هم تفاوت است.

این شکل نشان می‌دهد؛ جهت جریان در نقاط مختلف رودخانه متفاوت است و جهت پیچش رودخانه تأثیرگذار

پیچ خسروآباد نتیجه گرفت، جهت جریان تأثیر پیچش رودخانه است به طوری که جهت جریان در دهانه جنوب شرقی-شمال غربی ولی در پیچ شمال شرقی-جنوب غربی است. جریانات تغییرات سطوح جزرومدی شبیه‌سازی شده از مدل، همگرایی قابل قبولی با نتایج موجود از برداشت‌های میدانی دارند که این نکته نشان‌دهنده انتخاب مناسب مقدار عددی ۶۵ برای ضریب زبری بستر و حداکثر گام زمانی ۶۰ ثانیه در آب‌های کم‌عمق در این مدل است. در بررسی دامنه کشندی حاصل از نتایج مدل‌سازی معلوم شد که بزرگ‌ترین دامنه جزرومدی مشاهده شده مربوط به مؤلفه کشندی نیم روزانه M2 است که مقدار آن در دهانه ۶۱ سانتی‌متر و در مقابل پالایشگاه ۵۰ سانتی به دست آمده است.

مراجع

[۱] کاظمی محمد عامر و همکاران. بررسی عددی جریان‌های ناشی از موج در بندر امیرآباد. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ ۱۳۸۹ اردیبهشت؛ مشهد.

[2] Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*. 2010; 40(9): 22-34.

[3] Kuang C, Chen W, Gu J, Su TC, Song H, Ma Y, Dong Z. River discharge contribution to sea-level rise in the Yangtze River Estuary, China. *Continental Shelf Research*. 2017 Feb 15; 134: 63-75.

[4] Xie D, Gao S, Wang Z, Pan C. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China. *International Journal of Sediment Research*. 2013 Sep 1; 28(3): 316-28.

[۵] سبحانی پور مرتضی، امیری ابراهیم. شبیه‌سازی حرکت رسوبات طبیعی در رودخانه سیوند توسط مدل سه‌بعدی MIKE. مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در علوم مهندسی؛ ۱۳۹۴ اسفند ۸ دی.

[6] Guo CS, Liu DB. 3D Simulation of Tidal Current and Sediment in the Yangshan Deep-Water Harbor of Shanghai. In: *World Environmental and Water Resources Congress*; 2017 May 21-25; Sacramento, California. American Society of Civil Engineers; 2017.

[7] Ostrowski R, Stella M. Sediment transport

خروجی اروندرود می‌تواند دو مسیر داشته باشد، طوری که تحت تأثیر نیروی کوریولیس پلوم آب تازه به طور خاص در امتداد ساحل کویت و عربستان جاری شود و باعث نگهداری و ماندن یک رژیم چرخشی و اچرخند در قسمت غرب خلیج فارس شود، اما در زمان‌های خاص ممکن است مقابل سواحل ایران یافت شود، این مطلب با نتایج مطالعه رینولدز سازگاری دارد [۱۲].

الگوی تغییرات شارش از سواحل عراق به سمت وسط رودخانه افزایش و با حرکت به سمت سواحل ایران کاهش یافته است. دلیل این موضوع عمق آب است، پس هر چه عمق آب بیشتر باشد، مؤلفه (p) شارش بیشتر است و در تحلیل مؤلفه (Q) شارش کاملاً برعکس، نتایج این مدل‌سازی با نتایج تحقیق حسن تبار و خلیل‌آبادی مشابه است [۱۳]. با توجه به این موضوع الگوی تغییرات مؤلفه (p) شارش مربوط به چهار نقطه، در طول پنج دوره زمانی مشاهده می‌شود، روند تغییرات مؤلفه‌های شارش در هفته اول، سوم و پنجم مشابه هم هستند و الگوی تغییرات شار در هفته دوم و چهارم مشابه هم هستند. دلیل این موضوع پدیده کهکشند و مهکشند است. در هفته دوم و چهارم مهکشند رخ می‌دهد و در هفته اول و سوم و پنجم کهکشند، اتفاق افتاده و تغییرات کمتری نسبت مهکشند ایجاد کرده است.

نتایج در چهار نقطه با عمق‌های متفاوت در دهانه اروندرود نشان می‌دهد که حداکثر میانگین تغییرات برای مؤلفه p جریان حجمی $0.5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ و حداقل آن $-0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$ است و برای مؤلفه Q مقدار حداقل میانگین تغییرات $0.45 \text{ m}^3/\text{m/s}$ - و حداکثر آن تقریباً $0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$ است. با توجه به اینکه منطقه اروندرود عمق کم است؛ بنابراین معادله‌های آب‌های کم‌عمق حاکم است و در آب‌های کم‌عمق با افزایش عمق سرعت جریان در سطح افزایش می‌یابد و به دنبال آن مؤلفه P در وسط رودخانه افزایش و در کناره دیواره‌های رودخانه به دلیل عمق کم کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۷ دامنه جزومد در دهانه، بندر فاو و پیچ خسروآباد به ترتیب $3/2$ ، $2/8$ و $2/12$ است، این پیش‌بینی‌ها با مطالعات فیاض محمدی توافق بسیار خوبی دارد. با استفاده از گل جریان در دو مکان دهانه اروندرود و

Bulletin. 1993 Aug 2; 27: 35-59.

[۱۳] حسن تبار بزودی سیدحسین، خلیل آبادی محمدرضا. بررسی پارامتر جریان حجمی در تنگه هرمز با استفاده از مدل عددی MIKE21. هیدروفیزیک. ۱۳۹۶؛ ۲(۲): ۱۵-۲۶.

[۱۴] فیاض محمدی محمد. مدل سازی عددی پارامترهای فیزیکی دریایی در خور اروند [پایان نامه کارشناسی ارشد]. خرمشهر: دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛ ۱۳۸۸.

پی نوشت ها

1. China Sea
2. Source
3. Sink
4. FLOW model
5. Mike Zero
6. Mesh Generator
7. Courant Number
8. Drying depth
9. Flooding depth
10. Root Mean Square Error
11. Coefficient Manning

beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiato (Poland) case study. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2016 Jun 1; 63(1): 63-77.

[8] Vargas Borges H, Nittrouer CA. Coastal Sedimentation in a Tropical Barrier-Island System During the Past Century in Sepetiba Bay, Brazil. Anuario do Instituto de Geociencias. 2016 Apr 1; 39(2).

[۹] فیاض محمدی محمد. مدل سازی عددی رسوب در خور اروند [رسالة دکتری]. خرمشهر: دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛ ۱۳۹۶.

[10] DHI (Danish Hydraulic Institute). MIKE21: Oil Spill Module Scientific Documentation. Copenhagen: DHI; 2012.

[۱۱] اعتماد شهیدی امیرفرشاد، صبوری امیرادهم، پارسا جواد. کنترل نفوذ شوری در خور رودخانه ای اروند در شرایط مختلف هیدرولوژیکی. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳۹۰؛ ۷(۲): ۵۰-۶۰.

[12] Reynolds RM. Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt. Mitchell expedition. Marine Pollution