

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.3.7

درصد همانندی: ۱۰٪

بررسی تاثیر موج شکن بر فرآیند رسوب گذاری در دهانه رودخانه (منطقه مورد مطالعه رودخانه بابلرود)

سید حسین صادق نژاد^۱، محمد اکبری نسب^۲، سید عباس حسینی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده عمران هنر و معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. hosseinms.civilenv@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه مازندران، بابل، ایران. m.akbarinasab@umz.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه عمران، دانشکده عمران هنر و معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. abbas_hoseyni@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

چکیده

بررسی و شناخت رژیم رسوب گذاری و فرسایش در سواحل، یکی از مهمترین پارامترها در هنگام ساخت و ساز بندرها به شمار می رود. بررسی منشأ رسوبات در رودخانه ها از اهمیت بالایی، جهت تصمیم گیری و مدیریت لایروبی دارد. منشأ رسوبات در رودخانه ممکن است از بالادست (انعشابات رودخانه ها) یا از طریق دریا باشد. در رودخانه های شمال کشور، برای ذخیره آب در بالا دست، در فصل تابستان از ورود آب به دریا جلوگیری می کنند. در نتیجه ممکن است در مصب رودخانه، آورد رسوب از دریا به رودخانه باشد. علل مختلف بر روی نشست رسوب در رودخانه موثر می باشد. از جمله شکل هندسی رودخانه، ساخت و ساز داخل رودخانه، ایجاد موج شکن در دهانه رودخانه می باشد. هدف این مطالعه بررسی نحوه تغییرات شکل هندسی موج شکن در دهانه رودخانه (مورد مطالعه رودخانه بابلرود) جهت بررسی رفتار نشست رسوب پرداخته می شود. به منظور بررسی این موضوع در ابتدا از محدوده پروژه داده های توپوگرافی، باد و موج جمع آوری شد. و بر اساس مشاهدات میدانی به عمل آمده دو سناریو در شش ماه اول سال برای بررسی رسوب گذاری در محدوده پژوهش تعیین و مدل سازی گردید. سپس با استفاده از خروجی های مدل مایک (رسوب) به بررسی تأثیر موج شکن بر فرآیندهای رسوب گذاری در رودخانه بابلرود پرداخته شد. در سناریوی ۱ میزان نشست رسوبات در دهانه رودخانه در دو فصل بهار و تابستان سال ۱۴۰۲ به حدود ۶۰ سانتی متر می رسد. که میزان قابل توجهی است و مشکلات قابل توجهی برای تردد شناورها به ویژه شناورهای تفریحی و همچنین شناورهای صید کیلکا که در دهانه رودخانه توقف کرده اند ایجاد می کند. میزان نشست رسوب در داخل رودخانه نسبت به نرخ نشست در دهانه کاهش قابل ملاحظه ای دارد. و در حدود ۲ الی ۵ سانتی متر می باشد. میزان رسوب گذاری نیز در سناریو ۲ (رسوب ورودی از دریا به رودخانه و حوضچه بندر) افزایش قابل توجهی نسبت به میزان انتقال رسوب و افزایش ترازبستر در دهانه درمقایسه با سناریو یک داشته است. این امر لایروبی های مداوم دهانه رودخانه را جهت حفظ مسیر دریایی نیازمند است.

واژه های کلیدی: موج شکن، رسوب گذاری، رودخانه، مدل سازی.

۱. مقدمه

جریان‌های موازی با ساحل رسوب را به موازات ساحل منتقل می‌کنند. و برخورد با موانعی مانند موج‌شکن‌ها یا بندرها باعث رسوب‌گذاری و ایجاد مشکلات برای سازه‌های ساحلی می‌شود. در بندر صیادی بابلسر، واقع در مصب رودخانه بابلرود، حجم بالای رسوب‌گذاری چالش‌زا است و کاهش آن وابسته به شناخت الگوی جریان و دلایل رسوب‌گذاری است. هدف این پژوهش بررسی اثر موج‌شکن شیلات بر رژیم حرکت رسوبات و تغییرات بستر دریا در محدوده دهانه رودخانه است. بررسی حرکت رسوب اهمیت اقتصادی و اکولوژیک دارد، زیرا پر شدن مخازن، خراب شدن پایه پل‌ها، تغییر مسیر رودخانه‌ها و کاهش کیفیت آب، هزینه‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند [۱ و ۲]. انتقال رسوب عمدتاً توسط جریان‌های بادی، تراکم و جزر و مد انجام می‌شود [۳] و با وجود پیشرفت‌های مدل‌سازی، هنوز روش پیش‌بینی دقیق و قابل اعتماد در دسترس نیست و مدل‌سازی ذرات ریز نیازمند کالیبراسیون و آنالیز حساس است [۴]. برنامه‌های لایروبی شامل طراحی، عملیات، نگهداری و کنترل مصب‌ها و گذرگاه‌های ساحلی است و این بخش‌ها از نظر انتقال رسوب اهمیت بالایی دارند [۵].

سابقه مطالعات پیشین در این زمینه حاکی از تلاش‌های زیادی در خصوص شبیه‌سازی و مدل‌سازی رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و سواحل است. پژوهش‌های بسیاری بر اساس مدل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های دو و سه‌بعدی برای تحلیل الگوی جریان و انتقال رسوب در مناطق ساحلی و رودخانه‌ها صورت گرفته است. با این حال، این مدل‌ها عمدتاً نیازمند کالیبراسیون و بهینه‌سازی دقیق بر اساس داده‌های منطقه‌ای هستند و اغلب در شرایط خاصی عملکرد مناسبی دارند.

سلطان‌پور (۱۳۸۳) نیز تأکید کرد که این بندر علی‌رغم وجود موج‌شکن‌ها به سرعت پر از رسوب می‌شود و طراحی موجود موج‌شکن‌ها نتایج مطلوب نداشته است [۶].

حاجی‌زاده و اعتماد شهیدی (۱۳۸۵) مشکل رسوب‌گذاری بندر صیادی بابلسر را بررسی کردند و نشان دادند که آورد

بالای رودخانه بابلرود و طراحی موج‌شکن‌های موجود موجب افزایش رسوب و کاهش عمق حوضچه شده است [۷].

آقاخانی و همکاران (۱۳۹۳) با مدل HEC-RAS وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین‌دره را بررسی کردند و دریافتند که تمام نقاط رودخانه در حالت فرسایش قرار دارند و معادله رسن دقیق‌ترین برآورد بار رسوبی را ارائه می‌دهد [۸].

نیک‌پور و ثانی‌خانی (۱۳۹۶) از مدل‌های فازی عصبی تطبیقی^۱، برنامه‌ریزی بیان^۲ و رگرسیون بردار پشتیبان^۳ برای پیش‌بینی رسوبات معلق در رودخانه دره‌رود استفاده کردند و عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی رسوب گزارش شد [۹].

سلمانی و نیک‌منش (۱۳۹۶) با مدل سه‌بعدی MIKE انتقال رسوب در رودخانه بستاک را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که ته‌نشینی ذرات وابسته به فاصله، ویژگی‌های جریان و خصوصیات رسوب است [۲].

محمودی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از نرم‌افزار MIKE 21 انتقال رسوب در اطراف بندر نوشهر را مدل‌سازی کردند و نشان دادند که تغییرات ناگهانی سرعت جریان و تشکیل گردابه‌ها، عوامل اصلی رسوب‌گذاری در دهانه بندر هستند [۱۰].

دیسانایاکی و همکاران (۲۰۱۵) در خور بگومگو با مدل Delft3D تغییرات بستر و دینامیک رسوب را شبیه‌سازی کردند و مشاهده شد که کانال مشخصی برای خروج رسوبات شکل گرفته است [۱۱].

شاران و همکاران (۲۰۱۸) مشکل رسوب‌گذاری شدید در ورودی بندر البرلوس^۴ مصر را بررسی کردند و پیشنهاد دادند که کوتاه کردن طول بالایی موج‌شکن می‌تواند از پیشروی رسوب جلوگیری کند [۱۲].

فیتری^۵ و همکاران (۲۰۱۹) در مالزی اثر موج‌شکن کم‌ارتفاع بر فرسایش و رسوب‌گذاری ساحل را با مدل دوبعدی

شن و ماسه بر غلظت و توزیع رسوب تأثیر قابل توجهی دارد [۲۱]. اگرچه مطالعات زیادی درباره فرسایش و رسوب گذاری در رودخانه ها و بنادر انجام شده است، بیشتر آن ها تنها بر یک جنبه مانند عملکرد موج شکن ها، بار رسوبی یا الگوی جریان تمرکز داشته اند. با این حال، بررسی هم زمان موج، جریان و انتقال رسوب در مقیاس موضعی دهانه و حوضچه بندر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، تاکنون تحلیل یکپارچه اثر هندسه موج شکن ها و دیوار هادی بر الگوی رسوب گذاری بندر بابلرود با استفاده از مدل MIKE 21 گزارش نشده است. پژوهش حاضر این خلأ را پوشش می دهد؛ به این صورت که با بهره گیری از مدل MIKE 21، اثر سازه های ساحلی، جریان ها و پویایی رسوب به صورت هم زمان بررسی شده و سازوکار اصلی رسوب گذاری در دهانه بندر شناسایی می شود. ضرورت انجام این تحقیق به ویژه از منظر اقتصادی قابل توجه است، زیرا در صورت عدم بررسی دقیق و کنترل میزان رسوب گذاری، هزینه های مربوط به لایروبی دوره ای افزایش می یابد. پژوهش حاضر با ارائه نتایج دقیق تر از میزان و الگوی رسوب گذاری می تواند به کاهش هزینه های لایروبی و افزایش کارایی سازه بندر بابلرود منجر شود. مقاله که در این پژوهش برنامه ریزی شده است، با تمرکز بر تأثیر موج شکن بندر بابلرود بر روند رسوب گذاری در دهانه رودخانه بابلرود می باشد.

۲. مواد و روش ها

۱. مدل مورد استفاده

در این مطالعه، از نرم افزار MIKE استفاده شد. مجموعه MIKE شامل چندین ماژول تخصصی است. یکی از این ماژول ها MIKE 21 است. این نرم افزار یکی از محصولات اصلی شرکت DHI^۸ در کشور دانمارک است که به منظور مدل سازی عددی فرایندهای هیدرودینامیکی، انتقال رسوب، کیفیت آب و تغییرات مورفولوژیکی در محیط های دوبعدی توسعه یافته است. این نرم افزار بر پایه حل عددی معادلات ناویراستوکس میانگین گیری شده (معادلات آب کم عمق) طراحی شده و قادر است رفتار جریان، امواج، و فرآیندهای

RANS بررسی کردند و کاهش سرعت جریان و تجمع رسوب پشت سازه مشاهده شد [۱۳].

مرون^۶ و همکاران (۲۰۱۹) با مدل سازی عددی و فیزیکی اثربخشی موج شکن های زنده در کاهش فرسایش و بهبود شرایط اکوسیستم را نشان دادند [۱۴].

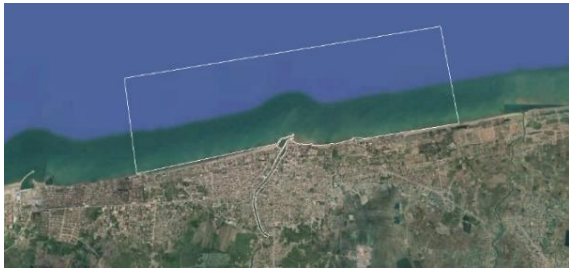
گالرانو و همکاران (۲۰۲۰) اثر موج شکن غوطه ور بر انتقال رسوب در بندر پسکارا را بررسی کردند و نشان دادند که این سازه می تواند انباشت سالانه حدود ۴۰'۰۰۰ متر مکعب رسوب را کاهش دهد [۱۵].

ونای^۷ و همکاران (۲۰۲۰) با مدل Delft3D-SWAN اثر موج شکن ها بر مرداب را بررسی کردند و مشاهده شد که موج شکن ها ۱۰ تا ۵۰ درصد انرژی موج را کاهش داده و رسوبات را در پشت خود جمع می کنند [۱۶].

یوسی وو و همکاران (۲۰۲۳) با مدل FVCOM اثر موج شکن بر انتقال رسوب در منطقه شانتو را بررسی کردند و نشان دادند که در طوفان های ده ساله، موج شکن سطح آب را افزایش داده و رسوب گذاری در کانال اصلی تشدید می شود [۱۷].

زدان و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه مروری فرآیند حفره ای شدن اطراف موج شکن ها را تحلیل کردند و دریافتند که تغییرات جریان و هندسه سازه، عمق و الگوی فرسایش را تحت تأثیر قرار می دهد [۱۸]. پارتا (۲۰۲۴) با استفاده از مدل های یک بعدی و دوبعدی MIKE، جریان و رسوب گذاری رودخانه Banshadhara را شبیه سازی کرد و نشان داد مدل دوبعدی تغییرات بستر و فرسایش فعال را به خوبی پیش بینی می کند [۱۹]. کوستبنسکو و همکاران (۲۰۲۵) با نرم افزار MIKE 21 حجم رسوب ته نشین شده رودخانه Solea رومانی را حدود ۱۳۰۴/۴ متر مکعب محاسبه کردند و تأثیر تجمع رسوب بر افزایش تراز بستر و کاهش ظرفیت جریان را نشان دادند [۲۰]. همچنین، وی. ال. وو و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از مدل MIKE 3 انتقال رسوب در نواحی ساحلی استان Nam Dinh ویتنام را شبیه سازی کردند و مشخص شد که فعالیت های انسانی مانند استخراج

شده است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

۴. وارد کردن داده‌های ژرفاسنجی و توپوگرافی موجود

به محدوده مدل‌سازی

با توجه به روش حل عددی مورد استفاده در مدل، شبکه مورد نیاز جهت معرفی هندسه و هیدروگرافی مساله شامل المان‌های مثلثی می‌باشد. فایل شبکه‌بندی در محیط MIKE Zero Mesh Generator ایجاد می‌گردد. که ابزاری برای تولید شبکه‌های نامنظم و ویرایش آن‌ها می‌باشد. استفاده از مش‌های نامنظم انعطاف‌پذیری لازم را برای مدل‌سازی هر منطقه‌ای با هندسه پیچیده و هم‌چنین میزان دقت مورد نیاز را ایجاد می‌نماید.

برای مدل‌سازی‌ها، لازم است ابتدا اطلاعات عمق‌سنجی و هندسه مدل معرفی شود. از آنجا که همواره بین افزایش دقت مدل و زمان اجرای آن رابطه معکوس برقرار است، در مرحله راه‌اندازی مدل، انتخاب شبکه‌بندی بهینه حائز اهمیت است.

برای ارزیابی تأثیر اندازه شبکه بر دقت نتایج، بررسی استقلال مش (Mesh Independence) در فرایند مدل‌سازی انجام شد. در این بررسی، اندازه‌های مختلف مش در نواحی مختلف مدل تغییر داده شد و تأثیر آن بر نتایج شبیه‌سازی (از جمله نشست رسوب و رفتار هیدرودینامیکی) تحلیل گردید. پس از مقایسه نتایج با اندازه‌های مختلف مش، شبکه‌ای بهینه انتخاب شد که در نواحی بحرانی (نزدیک دهانه رودخانه و ساحل) دقت بالایی داشته و در نواحی دورتر از سایت پروژه ابعاد مش درشت‌تری برای بهینه‌سازی زمان شبیه‌سازی استفاده شد. این روش باعث تضمین پایداری و دقت نتایج مدل‌سازی و هم‌چنین کاهش زمان محاسباتی در مناطق کم‌اهمیت‌تر گردید. برای افزایش دقت محاسبات در محدوده پروژه و صرفه‌جویی در زمان لازم برای شبیه‌سازی عددی و هم‌چنین

فیزیکی مرتبط را در محیط‌های ساحلی، مصب‌ها، دریاچه‌ها و رودخانه‌های پهن به‌صورت دقیق شبیه‌سازی نماید [۲۲]. نرم‌افزار MIKE 21 با برخورداری از قابلیت کوپل هم‌زمان بین امواج، جریان و رسوب، ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییرات بستر رودخانه‌ها و پیش‌بینی الگوهای رسوب‌گذاری به‌شمار می‌رود [۲۳]. استفاده از این مدل امکان تحلیل دقیق اثرات متقابل جریان و امواج بر پویایی رسوب و تغییرات بستر را فراهم کرده است

۲. محدوده مدل‌سازی

دریای خزر، بزرگ‌ترین پهنه آبی داخلی جهان، با مساحت حدود ۳۷۱/۰۰۰ کیلومتر مربع در یک حوضه بسته میان اروپا و آسیا قرار دارد و سطح متوسط این دریا در حال حاضر حدود ۲۸ متر پایین‌تر از سطح دریا‌های آزاد بوده و طی قرون گذشته نوسانات قابل توجهی را تجربه کرد است [۲۴]. در این پژوهش در ابتدا منطقه مورد شبیه‌سازی انتخاب شده و بر اساس اطلاعات هیدروگرافی در دسترس، مبادرت به تهیه Bathymetry برای انجام شبیه‌سازی‌ها شده است. مدل مذکور، مشتمل بر رودخانه بابلسر از محل سد لاستیکی تا دریا و محدوده ساحلی بابلسر به طول ۱۱ کیلومتر در امتداد ساحل و ۴ کیلومتر به سمت دریا تا عمق تقریبی ۱۸ متر می‌باشد.

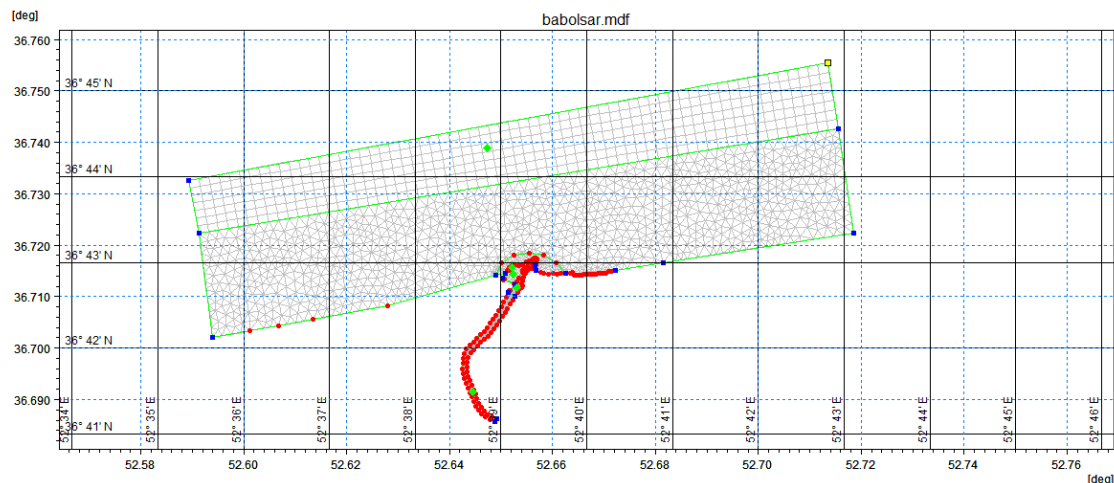
۳. شبکه بندی طرح

برای تولید محدوده مدل‌سازی اقدامات زیر صورت گرفته است:

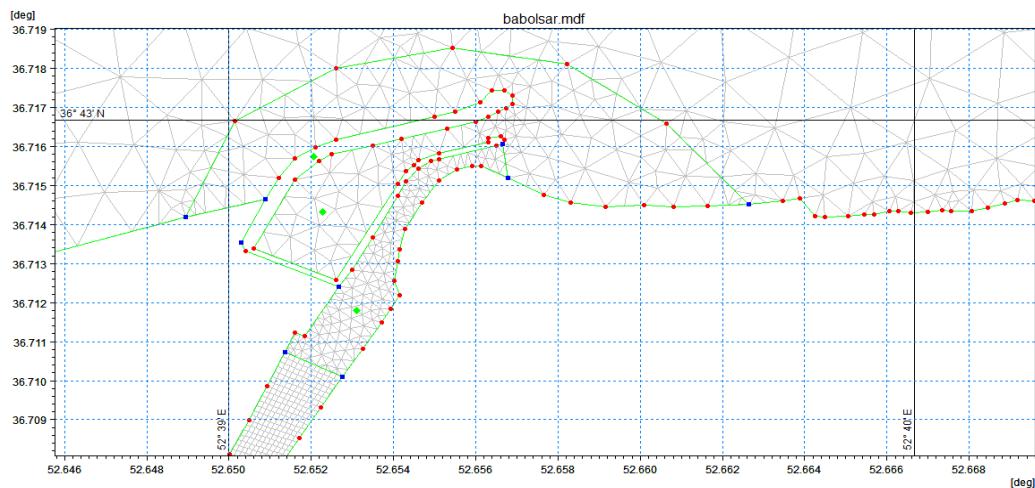
انتخاب محدوده مناسب، انتخاب آن به گونه‌ایست که بتوان از آن نتایج قابل قبولی را در حین مدل‌سازی انتظار داشت. شکل (۱) محدوده مدل‌سازی را نشان می‌دهد. محدوده بگونه‌ای انتخاب شده که مرزهای انتخابی شرق و غرب در نزدیکی مرز سلول‌های ساحلی باشند و مرز شمالی نیز در آب عمیق در نظر گرفته شده است تا امکان شبیه‌سازی جریانات موازی ساحل در اثر شکست موج و بررسی نحوه نفوذ جریانات موازی ساحل به محدوده رودخانه میسر گردد. محل سد لاستیکی رودخانه نیز به صورت مرز خشکی در نظر گرفته

مش ها در نزدیکی ساحل از دقت بالایی برخوردار باشند. در مرز باز شمالی شبکه بندی مربعی بوده و کوچکترین زاویه استفاده شده در تولید مش ۳۰ درجه می باشد. تعداد ۵۲۵۳ المان و ۴۴۰۶ گره با استفاده از مش بندی هیبرید (ترکیب مثالی و مربعی) به دست آمد. شبکه بندی ژرفاسنجی مورد استفاده در برپایی مدل ها در شکل های (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

استفاده هدف دار از اطلاعات عمق سنجی، در محدوده های دور از محل پروژه ابعاد مش درشت تر و در محدوده نزدیک به سایت پروژه ابعاد المان ها ریزتر و با دقت بیشتری انتخاب شده است. به طور کلی در مرز شمالی مش ها کمی بزرگتر و در محدوده رودخانه و محل اتصال آن به دریا مش های محاسباتی کوچکتر انتخاب شده اند. شبکه بندی مدل سراسری به گونه ای انجام شده است که



شکل ۲. مش محاسباتی محدوده مدل سازی



شکل ۳. مش محاسباتی در محدوده بندر شیلاتی بابلسر

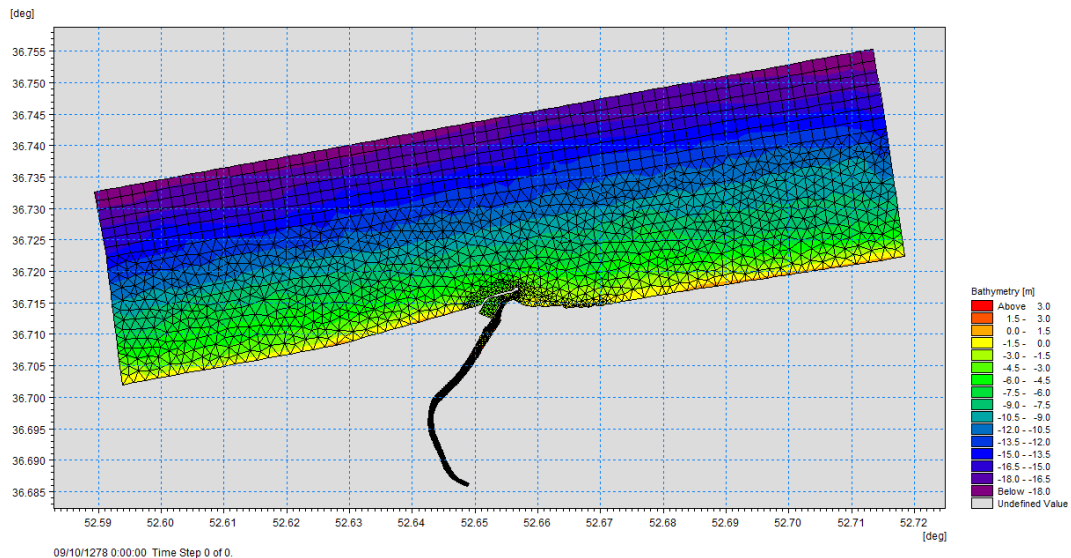
برای این کار از چندین مجموعه داده استفاده گردید. مقاطع عرضی برداشت شده در عرض رودخانه از مهمترین داده های استفاده در ایجاد فایل مش محاسباتی بودند. این داده ها در بهار ۱۴۰۲ به صورت میدانی برداشت شدند. علاوه بر مقاطع برداشت شده از عرض رودخانه، برداشت های

با توجه به هندسه رودخانه، در محدوده رودخانه از مش های چهار ضلعی استفاده گردید. جهت بررسی تغییرات در عرض رودخانه ۱۱ مش محاسباتی در نظر گرفته شده است. ابعاد مش ها در محدوده رودخانه در عرض ۱۰ متر و در طول در حدود ۱۴ الی ۱۵ متر می باشند.

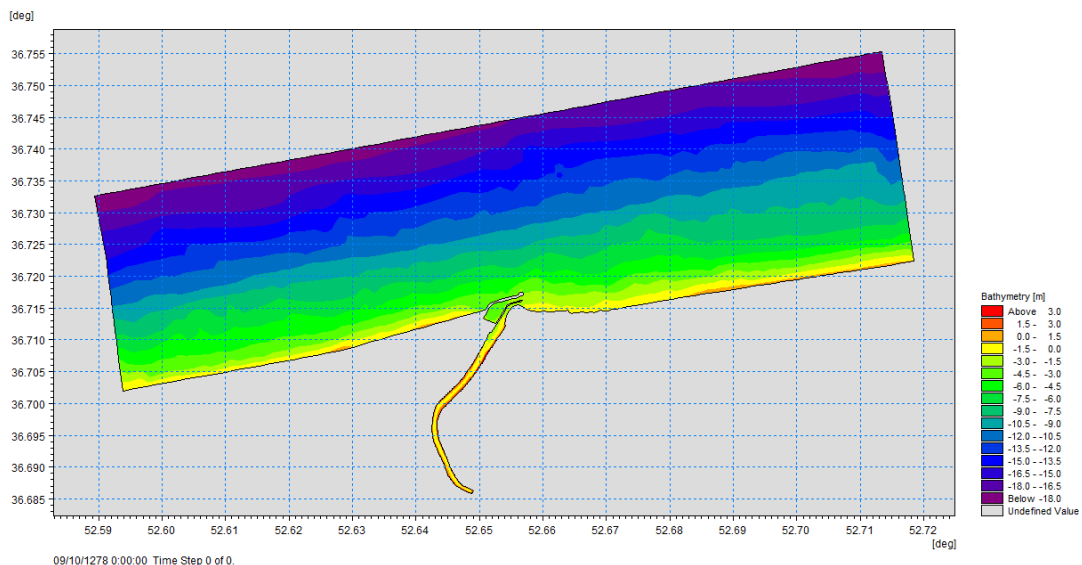
اینترپوله کردن گره‌ها و نقاط هیدروگرافی و بهینه کردن مساحت‌المان‌های نزدیک خط ساحلی پس از آنالیز حساسیت فایل نهایی مش تولید گردید. مش نهایی و ژرفا سنجی حاصل شده به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است.

عمق سنجی نیز در محدوده دهانه رودخانه در سال ۱۴۰۱ انجام شده بود. که با توجه به نیازهای اطلاعاتی عمق سنجی در محدوده رودخانه، از این مجموعه داده پس از اصلاحات لازم در تهیه فایل مش محاسباتی نیز استفاده شد.

برای ایجاد فایل عمق سنجی پس از هموارسازی مش‌ها و



شکل ۴. مش محاسباتی تولید شده



شکل ۵. ژرفاسنجی محدوده مطالعات پس از اینترپولاسیون داده‌ها

شبیه‌سازی اندرکنش متقابل موج و جریان در محدوده مدل‌سازی، معادلات مربوط به انتقال رسوب را نیز حل کرده و تغییرات مورفولوژیک را محاسبه نمود. بدین ترتیب، اثرات تغییرات تراز بستر در هر گام زمانی از اجرای مدل بر روی حل معادلات جریان و موج اعمال خواهد شد. برپایی مدل شامل ماژول‌های زیر از مدل MIKE21 می‌باشد:

۵. برپایی مدل

برای شبیه‌سازی انتقال رسوب در محدوده مطالعه، ماژول Coupled FM (کوپل با استفاده از مش‌های نامنظم) مدل یکپارچه MIKE21/3 مورد استفاده قرار گرفت. در این شبیه‌سازی، با فعال کردن مدول‌های هیدرودینامیک^۹ و طیف موج^{۱۰} در کنار مدول انتقال رسوب^{۱۱} می‌توان هم‌زمان با

آب کمتر از عمق ترشدگی باشد مسئله دوباره فرمول بندی می گردد و تنها هنگامی که عمق آب کمتر از عمق خشک شدگی باشد آن المان یا سلول از شبیه سازی حذف می گردد. از عمق آب گرفتگی به منظور تعیین آب گرفتگی یک المان استفاده می شود (یعنی آنکه دوباره در محاسبات وارد می گردد). فرمول بندی دوباره با مساوی قرار دادن شار اندازه حرکت برابر صفر و لحاظ نمودن شار جرم انجام می پذیرد. در صورتی که خشک شدگی و آب گرفتگی فعال نشده باشد، می بایست یک عمق حداقل حذف شدگی کمتر از صفر تعیین گردد. اگر عمق آب کلی کمتر از صفر گردد، یک ناپایداری ایجاد شده و شبیه سازی متوقف می شود. مقادیر در شبیه سازی ها و مطابق مقادیر پیشنهادی نرم افزار: عمق خشک شدگی $hdry=0/005$ متر، عمق آب گرفتگی $hflood=0/05$ متر و عمق ترشدگی $hwet=0/1$ متر در نظر گرفته شد.

۴-۱-۵. داده های ورودی های مدل

۱-۴-۱-۵. باد:

باد به صورت متغیر در زمان و مکان به مدل معرفی شده است. میدان باد یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار در شرایط هیدرودینامیکی است. برهم کنش موج و جریان ناشی از باد می تواند بر پدیده های رسوب گذاری و فرسایش و به طور کل حرکت رسوبات در محیط های آبی تأثیر بگذارد. در این پروژه بررسی تأثیر باد بر روی موج و تولید جریان بسیار مهم است. در این پژوهش از اطلاعات باد WRF، به عنوان منبع مناسب آمار باد با تغییر تاریخ (عدم دسترسی به داده به روز تر و با دقت مشابه) استفاده شده است. اطلاعات باد مدل WRF مدل سازی شده در پروژه پایش و شبیه سازی سواحل شمالی کشور به دلیل طول دوره آماری نسبتاً بلند، گام زمانی و مکانی کوچک، پیش بینی مناسب سرعت طوفان ها و پوشش دادن کل محدوده دریای خزر مورد توجه است. طول دوره آماری داده های در دسترس حاصل از این مدل ۳۱ ساله است. اطلاعات حاصل از این مدل با گام مکانی ۰/۱ درجه و گام زمانی ۱ ساعت، در کل محدوده دریای خزر در دسترس می باشد.

- مدل جریان با استفاده از مش نامنظم، ماژول هیدرودینامیک
- ماژول موج طیفی
- مدل جریان با استفاده از مش نامنظم، ماژول انتقال رسوب

۱-۵. مدل جریان با استفاده از مش نامنظم، ماژول هیدرودینامیک

۱-۱-۵. اثر گام زمانی اجرای مدل (Δt):

انتخاب گام زمانی نیز مانند اندازه شبکه محاسباتی حائز اهمیت است. در مدل هیدرودینامیک اجرا شده بر اساس مشخصات حل عددی معادلات، مقدار گام زمانی محاسبات بین ۰/۰۱ تا ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل عددی توانایی این را دارد که بزرگترین گام زمانی ممکن را با در نظر گرفتن شرایط پایداری انتخاب نماید.

۲-۱-۵. پایداری مدل

پایداری و همگرایی مدل عددی به پارامترهایی مانند گام زمانی و ابعاد شبکه محاسباتی وابسته است. در مدل هیدرودینامیکی، برای بررسی پایداری عددی از عدد گوران-فریدریش-لوی (CFL) استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$CFL = \frac{(\sqrt{gh} + |\bar{u}|)\Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

که در آن g شتاب گرانش، h عمق آب، $|\bar{u}|$ بزرگی سرعت جریان، Δt گام زمانی و Δx اندازه مشخصه شبکه (فاصله گره ها یا ابعاد المان) است.

در این مطالعه، گام زمانی به صورت متغیر تعریف شد به گونه ای که مقدار عدد CFL در تمامی گره های محاسباتی کمتر از مقدار بحرانی ۰/۸ باقی بماند. حداقل و حداکثر گام زمانی به ترتیب ۰/۰۱ و ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد و میانگین گام زمانی مؤثر در طول شبیه سازی حدود ۳۰۰ ثانیه بوده است که پایداری عددی و کارایی محاسباتی مدل را تضمین می کند.

۳-۱-۵. خشک و تر شدن

خشک و تر شدن در مدل لحاظ شده و در مواقعی که عمق

فرایندهای ساحلی دارد: می‌توان خیز آب موج را با لحاظ کردن تغییرات تنش تشعشی به صورت ریاضی مدل‌سازی کرد. تنش تشعشی تسور شار اندازه حرکت افقی اضافی ناشی از حضور امواج است. با توجه به اینکه هدف این مطالعه بررسی خیزاب ناشی از موج و نیز جریان‌های ایجاد شده در اثر شکست امواج می‌باشد در ابتدا تنش‌های تشعشی محاسبه می‌گردد.

در انتشار دوبعدی موج، تنش تشعشی S یک تسور مرتبه دوم با مؤلفه‌های زیر است:

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در سیستم مختصات دکارتی x ، y و z :

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \int_{-h}^{\eta} (p + p\tilde{u}^2) dz - \frac{1}{2} pg(h + \bar{\eta})^2, \\ S_{xy} &= \int_{-h}^{\eta} (p\tilde{u}\tilde{v}) dz = S_{yx}, \\ S_{yy} &= \int_{-h}^{\eta} (p + p\tilde{v}^2) dz - \frac{1}{2} pg(h + \bar{\eta})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن \tilde{u} و \tilde{v} مؤلفه‌های جزء نوسانی سرعت جریان در راستاهای x و y هستند.

بسط مرتبه دوم مؤلفه‌های تسور تنش تشعشی برای یک موج متناوب پیش‌رونده به صورت زیر است:

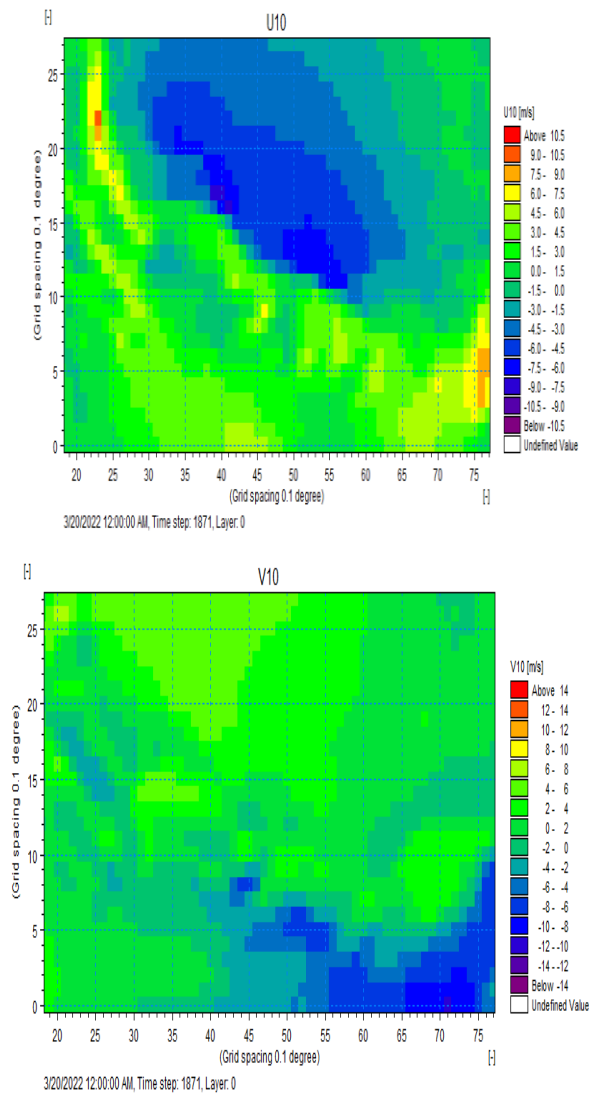
$$\begin{aligned} S_{xx} &= \left[\frac{k_x^2 c_g}{k^2 c_p} + \left(\frac{c_g}{c_p} - \frac{1}{2} \right) \right] E, \\ S_{xy} &= \left(\frac{k_x k_y c_g}{k^2 c_p} \right) E = S_{yx}, \\ S_{yy} &= \left[\frac{k_y^2 c_g}{k^2 c_p} + \left(\frac{c_g}{c_p} - \frac{1}{2} \right) \right] E \end{aligned} \quad (4)$$

که k_x و k_y مؤلفه‌های افقی بردار عدد موج k عمود بر تاج موج هستند.

۵-۱-۶. شرایط مرزی مدل هیدرودینامیک

شرایط مرزی مدل محلی از یک مدل بزرگ مقیاس استخراج شده است. نمونه‌ای از نتایج مدل بزرگ مقیاس در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور میدان باد در محدوده دریای خزر برای بازه زمانی ۳۱ ساله (۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳) به کمک این مدل شبیه‌سازی و در محدوده دریای خزر کالیبره شده است. شکل ۶ نمونه‌ای از داده‌های باد WRF در تراز ۱۰ متری را بر روی محدوده پروژه نمایش می‌دهد.



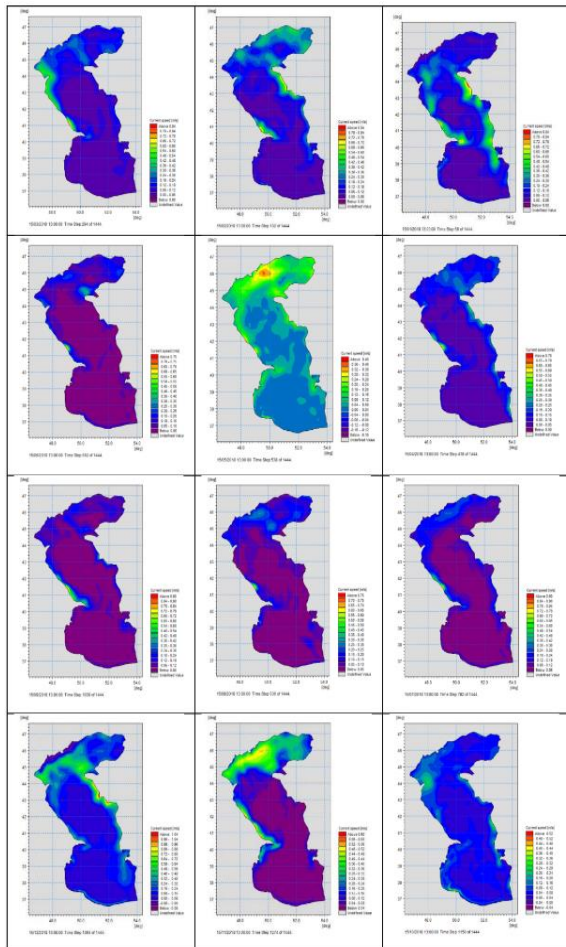
شکل ۶. داده‌های باد WRF بر روی محدوده پروژه

۵-۴-۲. بارش و تبخیر:

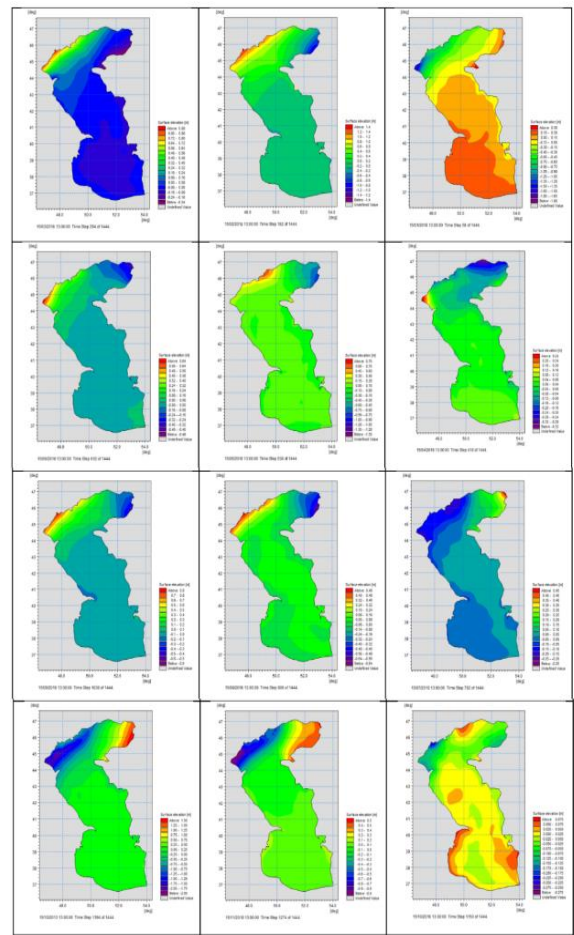
در این مطالعات برای کل خزر بر اساس داده‌های پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور میزان تبخیر ۲۲۰۰ میلیمتر در سال و میزان بارش ۴۲۵ میلیمتر در سال در نظر گرفته شده است.

۵-۱-۵. تنش تشعشی:

تنش تشعشی نقش مهمی در توصیف و مدل‌سازی برخی از

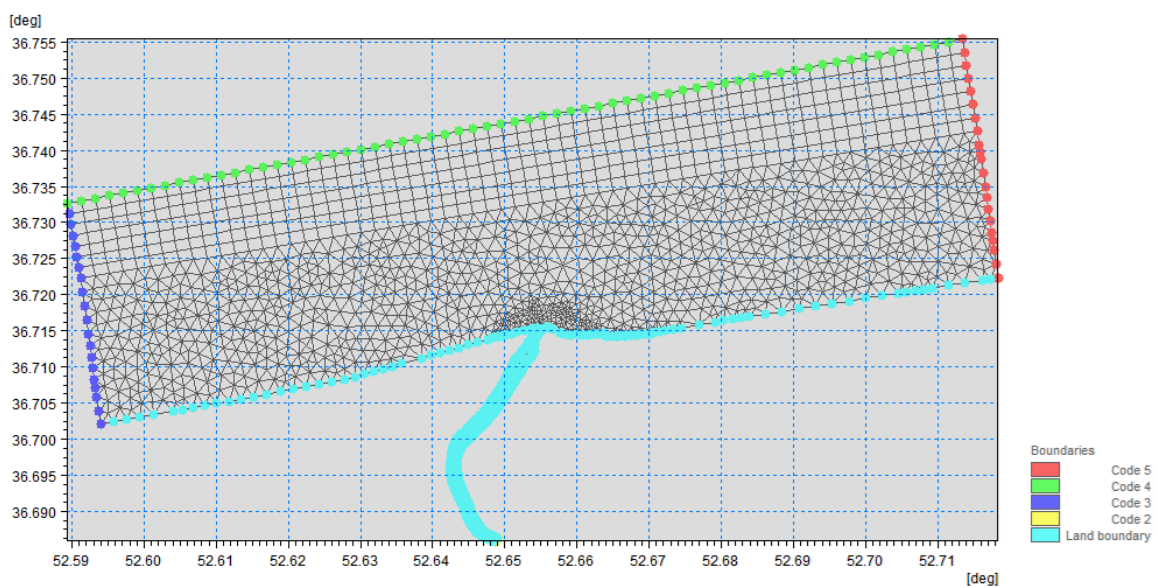


شکل ۸. الگوی سرعت جریان در دریای خزر در ماه‌های مختلف سال



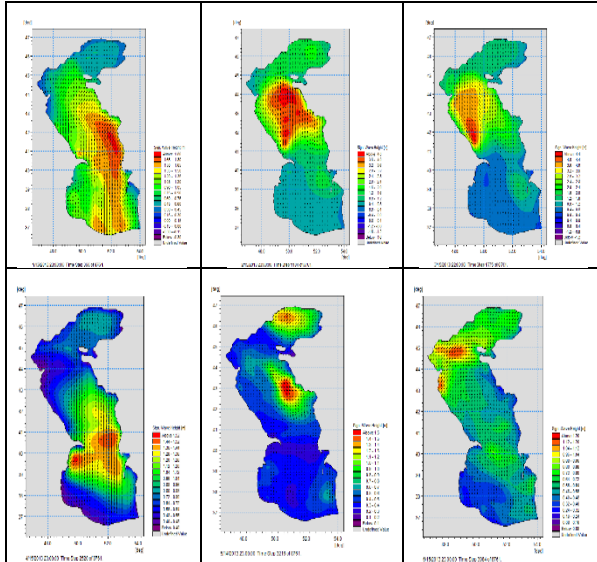
شکل ۷. الگوی تراز آب دریای خزر در ماه‌های مختلف در اثر وزش باد و کوریولیس

مدل هیدرودینامیک دارای سه مرز باز است که در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند.

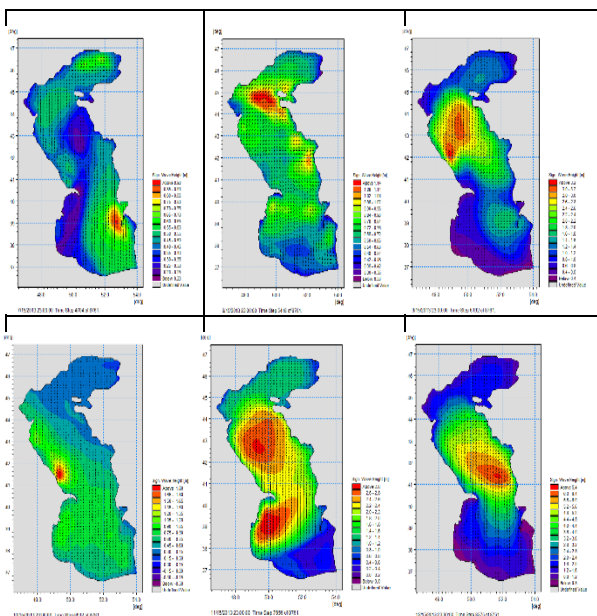


شکل ۹. مرزهای محدوده مدل سازی

مدل بزرگ مقیاس در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده است در شکل‌های زیر ارتفاع موج در روز ۱۵ هر ماه از نتایج مدل استخراج و نمایش داده شده است. با توجه به عمق کم و نیز با توجه به جهت وزش باد که غالباً شمال به جنوب است امواج در بخش یک سوم شمالی دریای خزر از ارتفاع کمتری برخوردار است. و بخش‌های مرکزی و جنوبی احتمال رخداد امواج با ارتفاع بیشتر مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰. الگوی امواج در دریای خزر در ماه‌های مختلف (ماه ژانویه تا ژوئن)



شکل ۱۱. الگوی امواج در دریای خزر در ماه‌های مختلف (جولای تا دسامبر)

همان‌گونه که ذکر شد، انتخاب محدوده شبیه‌سازی بگونه‌ای است که مرز مدل در آب عمیق قرار بگیرد. در این مطالعه مرز باز در شمال، غرب و شرق منطقه مورد مطالعه واقع شده

در مرزها شرایط زیر در نظر گرفته شده است:

- مرز شرقی (کد ۳): تغییرات سرعت جریان به صورت متغیر در زمان و مکان
- مرز دور از ساحل (کد ۴): تغییرات تراز سطح آب و سرعت جریان به صورت متغیر در زمان و مکان
- مرز غربی (کد ۵): تغییرات سرعت جریان به صورت متغیر در زمان و مکان
- مرز رودخانه (کد ۲): با توجه به اینکه در ۶ ماهه اول سال دبی آب از سد لاستیکی وجود ندارد لذا مرز خشکی در نظر گرفته شد.

۲-۵. مازول موج طیفی

۲-۵-۱. داده‌های موج حاصل از مدل‌سازی با در اختیار داشتن میدان باد WRF در کل محدوده دریای خزر که از مدل‌سازی باد در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور حاصل شده است، به کمک مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار MIKE21 SW، اقدام به پیش‌بینی امواج منطقه شده است. با توجه به این که این مدل نسبت به پارامترهای مختلف حساسیت‌سنجی شده و نتایج از مدل‌سازی‌های کالیبره شده به دست آمده است و اطلاعات مورد نیاز در فواصل مناسب از محل پروژه استخراج شده است، اطلاعات حاصل از این مدل، نسبت به سایر منابع اطلاعاتی در دسترس، اعتمادپذیرتر است.

جدول ۱. مقایسه آمار موج آب عمیق در محدوده سایت پروژه

Hormozgan Monitorin (1983- 2010)	ISWM (1992- 2002)	آمار موج
۲۸	۱۱	دوره آماری (Year)

مدل MIKE21 SW بخشی از مجموعه MIKE21 می‌باشد. این مدل دارای دو نوع فرمول‌بندی متفاوت است: فرمول‌بندی پارامتری جهتی و فرمول‌بندی کاملاً طیفی. در پروژه حاضر با توجه به اینکه هدف انتقال موج از عمق تقریباً ۱۸ متری به ساحل بوده لذا از فرمول‌بندی نوع اول استفاده شده است.

۲-۲-۵. شرایط مرزی مدل موج طیفی

در مطالعه حاضر از اطلاعات یک مدل سراسری تولید موج برای داده‌های مرزی استفاده گردید. نمونه‌ای از خروجی‌های

۳-۵. مدل سازی دو بعدی انتقال رسوب

مدل سازی رسوب برای محدوده مطالعات با استفاده از مدول ST مدل عددی MIKE21 انجام شده است. با توجه به اینکه محدوده طرح در منطقه ای است که جهت رسوبات دریایی و هم رودخانه ای را شامل می شود. عامل انتقال رسوبات هم موج و هم جریان در نظر گرفته شد.

با توجه به کویل بودن مدل سازی در این مطالعات با فعال کردن مدول انتقال رسوب^{۱۲} می توان در کنار مدل سازی هیدرودینامیک نسبت به شبیه سازی انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژیک نیز اقدام نمود.

مدل MIKE21 FM ST فرآیندهای انتقال رسوب، فرسایش و رسوب گذاری، رسوبات ماسه ای را تحت اثر جریان و امواج شبیه سازی می کند. محاسبات انتقال رسوبات غیر چسبند در این مدول با استفاده از مقادیر میانگین سرعت های افقی انجام می شود.

این مدول فرآیند انتقال رسوب را در دو حالت زیر مدل سازی می کند:

الف: تحت اثر جریان

ب: تحت اثر توأم جریان و موج

در این مطالعه از نوع دوم مدل سازی یعنی، اثر توأم موج و جریان استفاده شده است که در این نوع بار رسوبی به صورت بار کل محاسبه شده و بار معلق و بار بستر جداگانه محاسبه نمی گردد.

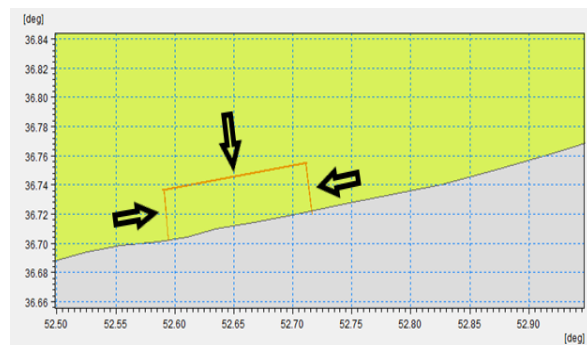
۳-۵-۱. شبکه محاسباتی

پلان ژرفاسنجی و شبکه محاسباتی مورد استفاده در مدل سازی دو بعدی در بخش مش محاسباتی نمایش داده شده است. محدوده مدل سازی به گونه ای در نظر گرفته شده است که منابع رسوبی مؤثر موجود در منطقه در محدوده مدل سازی در نظر گرفته شود و همچنین ناحیه فعال رسوبی در محدوده مدل سازی قرار گیرد.

۳-۵-۲. شرایط مرزی و ورودی های مدل

در بخش انتقال رسوب اطلاعات ورودی شامل اطلاعات موج و اطلاعات مربوط به دانه بندی رسوب است. اطلاعات

است. این مرزها اطلاعات و مشخصات امواج را به محدوده شبیه سازی منتقل کرده و شرایط مورد نظر را به درون محدوده مدل اعمال می کند. انتخاب محل مرز و نوع آن بستگی به وجود و در دسترس بودن اطلاعات لازم در آن دارد. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر شرایط مرزی به صورت متغیر در زمان و در طول مرز (پروفیل زمانی) در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) موقعیت استخراج مرزها در سه مرز باز را نشان می دهد.



شکل ۱۲. موقعیت استخراج داده های مرزی

۳-۵-۲-۳. شرایط اولیه

مدل حاضر قادر به تعریف سه نوع شرط اولیه می شود: طیف صفر (Zero Spectral) که در این حالت تابع عمل موج در همه نقاط صفر در نظر گرفته می شود.

طیف حاصل از فرمول های تجربی که سه فرمول بندی متفاوت برای آن وجود دارد:

الف: JONSWAP

ب: SPM1973 در آب کم عمق

ج: SM1973 در آب عمیق

اندازه گیری طیف موج در این مطالعه برای شرایط اولیه رابطه JONSWAP استفاده شده که در جدول (۲) مشخصات آن ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات شرایط اولیه مدل

شرایط موج		پارامترهای JONSWAP	
سیگما a (m)	۱۰۰۰۰۰	۰/۰۷	۰/۰۹
سیگما b (Hz)	۰/۴	۰/۰۹	۳/۳
پارامتر قله	۰/۰۰۸۱	۳/۳	بیشینه ثابت فیلیس

جدول ۴. پارامترهای مدل موج طیفی

پارامتر	توضیحات
انتخاب ماژول	ماژول موج طیفی
معادلات اولیه	Directionally Decoupled Parametric Formulation Time Formulation: Quasi Stationary
روش حل	Newton-Raphson Iteration
تراز سطح آب	Water level variation From HD Simulation
شرایط جریان	Current variation From HD Simulation
زبری بستر	Nikuratsse Roughness 0.04
شکست موج	Included, gamma=0.8
نوع خروجی‌ها	Points, area

۶. صحت‌سنجی مدل بزرگ‌مقیاس

برای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل بزرگ‌مقیاس MIKE21/3، خروجی‌های مدل شامل تراز آب، سرعت جریان و مشخصات موج در دریای خزر در طول ماه‌های مختلف سال مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. این بررسی به منظور اطمینان از صحت پیش‌بینی‌های مدل و قابلیت استفاده آن به عنوان ورودی مدل کوچک‌مقیاس انجام شد. علاوه بر مقایسه کیفی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی، به منظور ارزیابی کمی دقت مدل از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

۶-۱. تراز آب: مدل توانست روندهای فصلی تغییر تراز دریای خزر تحت تأثیر باد و اثر کوریولیس را به خوبی بازتولید کند. الگوی تراز آب ماهانه (شکل ۷) با داده‌های مشاهداتی هماهنگی مناسبی داشت و افزایش یا کاهش فصلی تراز در طول سال به خوبی نشان داده شد. اختلافات جزئی در دوره‌های وزش باد شدید مشاهده شد که طبیعی و قابل قبول است. مقدار RMSE محاسبه شده برای تراز آب حدود ۰/۱۲ متر به دست آمد که بیانگر دقت مناسب مدل است.

۶-۲. سرعت جریان: الگوی جریان‌ها (شکل ۸) شدت و جهت جریان‌های اصلی دریای خزر را به طور صحیح شبیه‌سازی کرد. جریان‌های فصلی و الگوهای جابجایی آب مطابق مشاهدات و مطالعات پیشین بود، هرچند که جریان‌های کوچک‌مقیاس محلی با اختلاف جزئی همراه بودند. مقدار

موج شامل ارتفاع مشخصه، جهت و پیوند بیک از نتایج مدل انتشار موج در محدوده مدل‌سازی استخراج و به مدل معرفی شده است.

اطلاعات مربوط به دانه‌بندی رسوب نیز از اندازه‌گیری‌های موجود قبلی استفاده شده است.

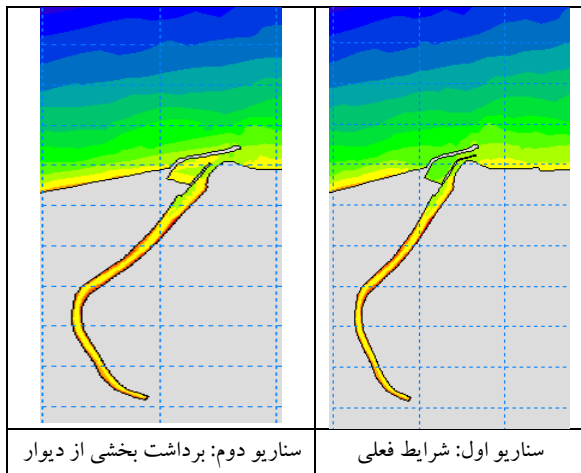
برای مرز شماره ۲ (سد لاستیکی) شرط مرزی Land برای انتقال رسوب در نظر گرفته شده است.

برای مرز آبی شماره ۳، (مرز سمت غربی)، شرط مرزی گرادیان صفر برای شار رسوبی در امتداد این مرز در نظر گرفته شده است.

برای مرز شماره ۴ (مرز سمت دریا)، شرط مرزی Land برای انتقال رسوب در نظر گرفته شده است. و این به این معنی است که شار رسوبی در امتداد این مرز برابر با صفر است. با توجه به این که مرز دور از ساحل در بیرون ناحیه فعال رسوبی در نظر گرفته شده است، در این مدل‌سازی از این شرط مرزی برای مرز دور از ساحل مدل در نظر گرفته شده است. برای مرز کد ۵ (مرز شرقی)، شرط مرزی گرادیان شار رسوبی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. مشخصات برپایی مدل کویل به صورت جداول زیر است:

جدول ۳. مشخصات برپایی مدل هیدرودینامیک

پارامتر	توضیحات
انتخاب ماژول	ماژول هیدرودینامیک
تکنیک حل	Time integration: low order fast algorithm Space discretization: low order fast algorithm
گام زمانی	Minimum time step: 0.1s Maximum time step: 1800s
عدد کورانت بحرانی	Critical cfl number: 0.8
مناطق خشک و تر	Include flood and dry
چگالی	Density type: Barotropic
ادی ویسکوزیته	Smagorinsky formulation Value: 0.28
مقاومت بستر	Manning number Value: 32
نیروی کوریولیس	No Coriolis Force
پوشش یخ	No Ice coverage
جزرومد	No tidal potential
تبخیر	Specified evaporation
تنش تشعشی	Wave Radiation From SW simulation
نوع خروجی‌ها	Area



شکل ۱۳. سناریوهای مختلف اجرا

در ادامه نتایج هر سناریو ارائه شده است. همچنین سناریو ۲ به منظور بررسی افزایش تبادل جریان بین رودخانه و حوضچه بندر و تأثیر آن بر رسوب گذاری و کاهش عمق حوضچه انتخاب گردید. حذف بخشی از دیوار هادی باعث تشکیل پیچک های جریان و افزایش رسوب گذاری در دهانه رودخانه می شود، که مشکلاتی برای تردد شناورها ایجاد می کند. در ابتدا با توجه به روند مدل سازی، نتایج مدل انتقال موج ارائه می گردد. مدل برای ۶ ماه اول سال اجرا شده است.

۱. نتایج مدل سازی های سناریو ۱:

به منظور درک بهتر از شرایط هیدرودینامیک منطقه، شرایط مختلف موج و نحوه انتشار امواج و نفوذ به رودخانه و حوضچه بندر بررسی می گردد. نزدیک شدن امواج از قطاع شمالی (۳۵۰ درجه)، همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می گردد، ارتفاع امواج با نزدیکتر شدن به ساحل کوچکتر شده و در دهانه موج شکن، امواج متفرق شده و تغییر جهت داده و به سمت رودخانه و دهانه حوضچه صیادی تغییر جهت می دهند.

با این وجود حوضچه از آرامش قابل قبول برخوردار است و میزان نفوذ امواج به رودخانه نیز بسیار محدود صورت گرفته است.

RMSE محاسبه شده برای سرعت جریان حدود ۰/۱۸ متر بر ثانیه برآورد گردید که نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه سازی جریان ها است.

۳-۶. مشخصات موج: مدل همچنین توانست ارتفاع و الگوی موج را در طول سال پیش بینی کند (شکل های ۱۰ و ۱۱). روندهای فصلی موج و توزیع مکانی آن با داده های ماهواره ای و اندازه گیری های دریا مطابقت داشت و بیشینه ارتفاع موج در ماه های بادخیز تابستان و پاییز به خوبی بازتولید شد. مقدار RMSE محاسبه شده برای ارتفاع موج حدود ۰/۳۵ متر به دست آمد که دقت قابل قبول مدل در شبیه سازی شرایط موجی را تأیید می کند. صحت سنجی نشان داد که مدل بزرگ مقیاس MIKE21/3 با فعال سازی ماژول های هیدرودینامیک، موج طیفی و انتقال رسوب، رفتار کلی دریای خزر را به شکل قابل اعتماد شبیه سازی می کند. با وجود برخی اختلافات جزئی در مقیاس محلی و شرایط گذرا، دقت مدل برای استفاده به عنوان ورودی مدل کوچک مقیاس کافی است و خروجی های آن می توانند مرجع مناسبی برای شبیه سازی انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژیک باشند.

۳. یافته ها و بحث

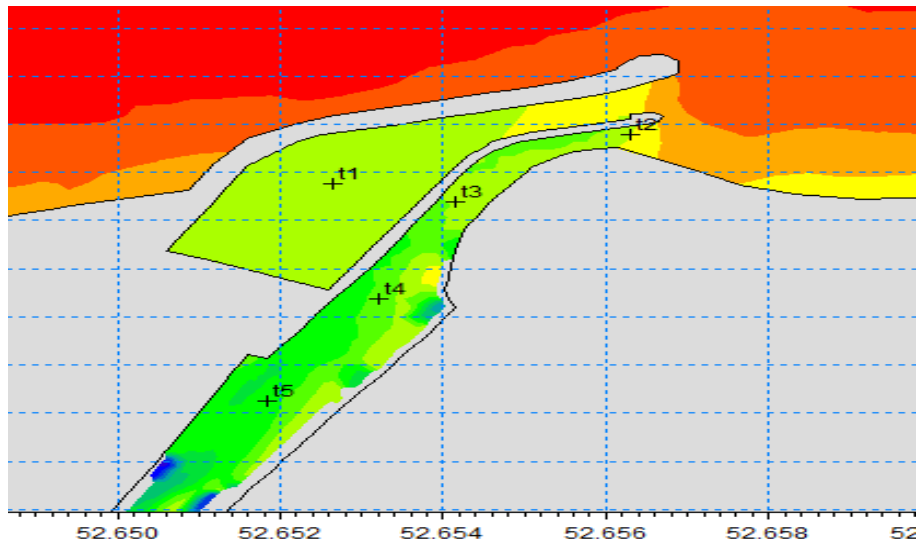
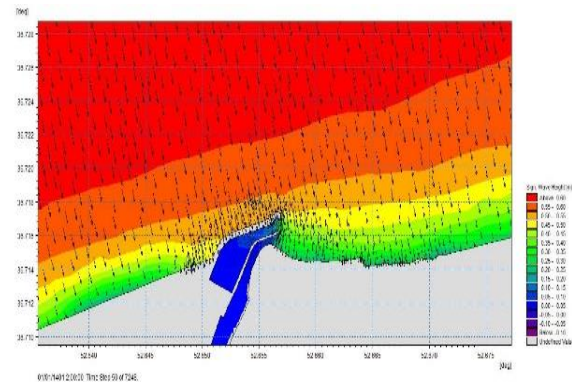
به منظور بررسی اثر حوضچه صیادی بر رسوب گذاری داخل حوضچه در رژیم تابستانی (شش ماهه اول سال) دو سناریو در نظر گرفته شد:

سناریو اول: شرایط فعلی دهانه رودخانه و موج شکن بندر صیادی

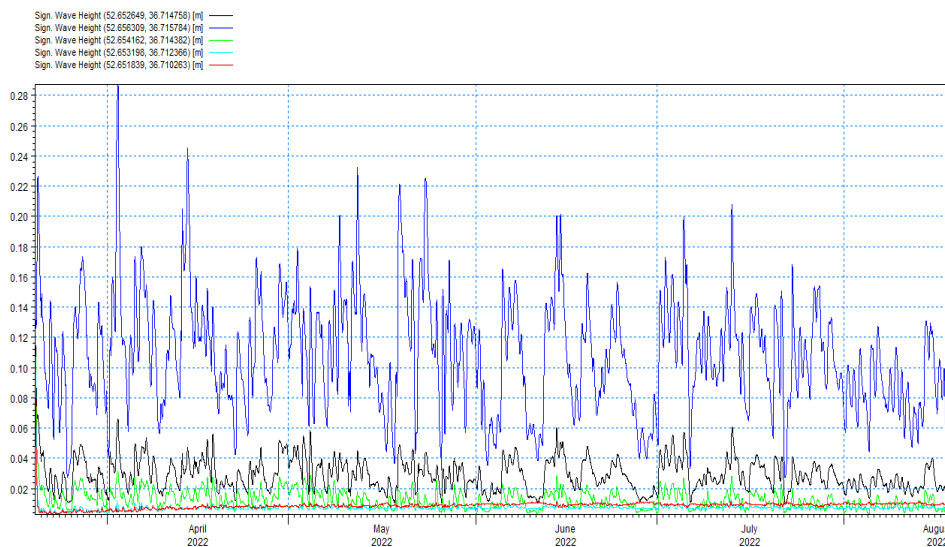
سناریو دوم: برداشت بخشی از دیوار هادی رودخانه در دهانه

شکل (۱۳) تفاوت دو سناریو اجرا را با هم نمایش می دهد.

شکل ۱۴. نزدیک شدن امواج از قطاع شمالی (۳۵۰ درجه) - سناریو ۱
به منظور بررسی نفوذ امواج به داخل حوضچه صیادی و همچنین محیط رودخانه نیز سری ارتفاع امواج از خروجی مدل استخراج و به صورت سری زمانی ترسیم گردید. نقاط استخراج سری زمانی در شکل (۱۵) و گراف سری های زمانی در شکل (۱۶) نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. موقعیت استخراج داده های موج از مدل



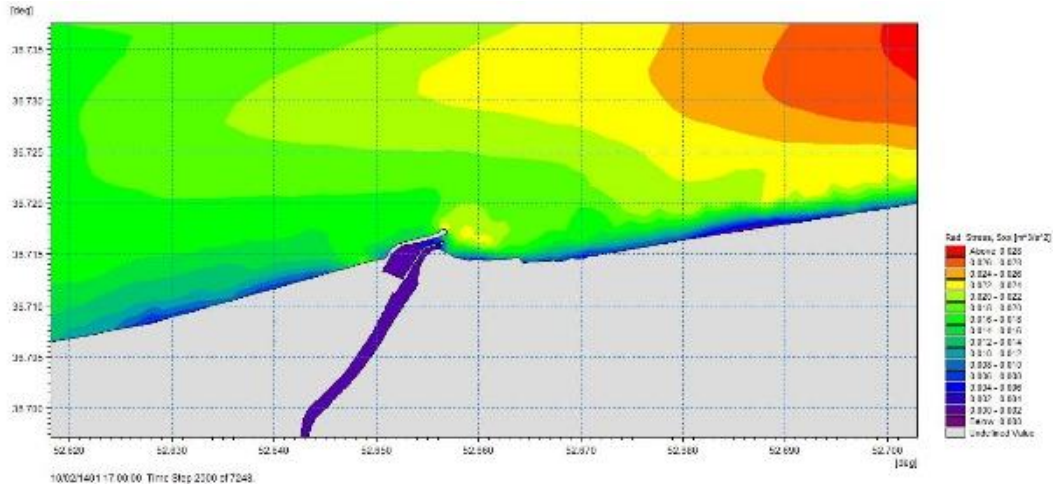
شکل ۱۶. سری زمانی ارتفاع موج در محدوده بندر صیادی و رودخانه بابلرود

ارتفاع موج در حوضچه بندر صیادی در حدود ۲۹ سانتیمتر و در محدوده رودخانه در حدود ۵ سانتیمتر است.
از دیگر خروجی های مدل انتشار موج، تنش های تشعشعی است که عامل اصلی ایجاد جریان های موازی ساحل به ویژه

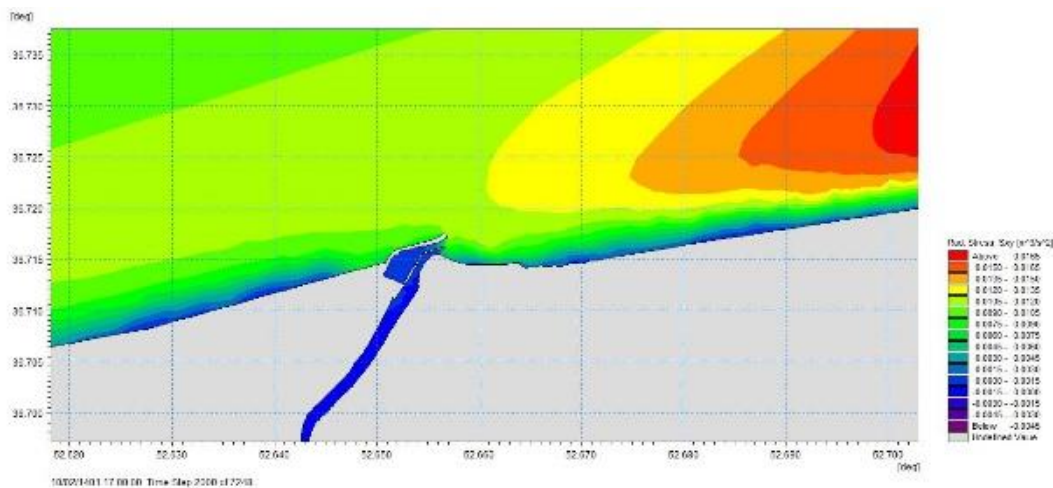
همان طور که مشاهده می گردد بزرگترین موج با ارتفاع حدود ۲/۹ متر از مرز شمالی وارد محدوده مدل شده است. امواج در دهانه تفرق پیدا کرده و وارد دهانه بندر و رودخانه می شوند. ارتفاع امواج به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

لازم به ذکر است که تنش های تشعشی برای تمام گام های زمانی مدل سازی محاسبه و ذخیره شده و یکی از ورودی های اصلی مدل هیدرودینامیک می باشد.

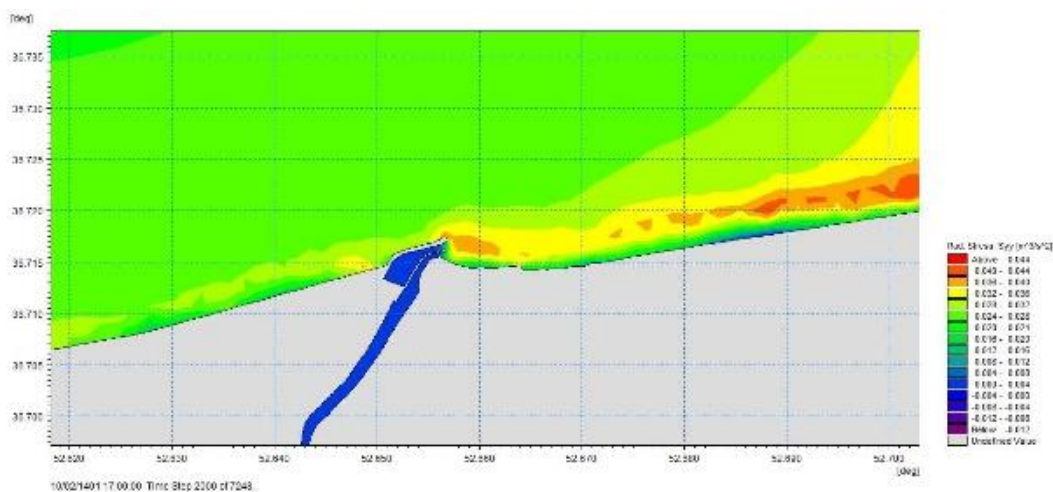
هنگام اعمال امواج با جهت مایل به محدوده مدل هستند. شکل های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تنش های تشعشی محاسبه شده در محدوده مدل سازی در اثر شکست امواج با ارتفاع ۴۵ cm و جهت ۴۰ درجه را از مرزهای شمال شرقی نشان می دهند.



شکل ۱۷. مؤلفه S_{xx} تنش تشعشی محاسبه شده



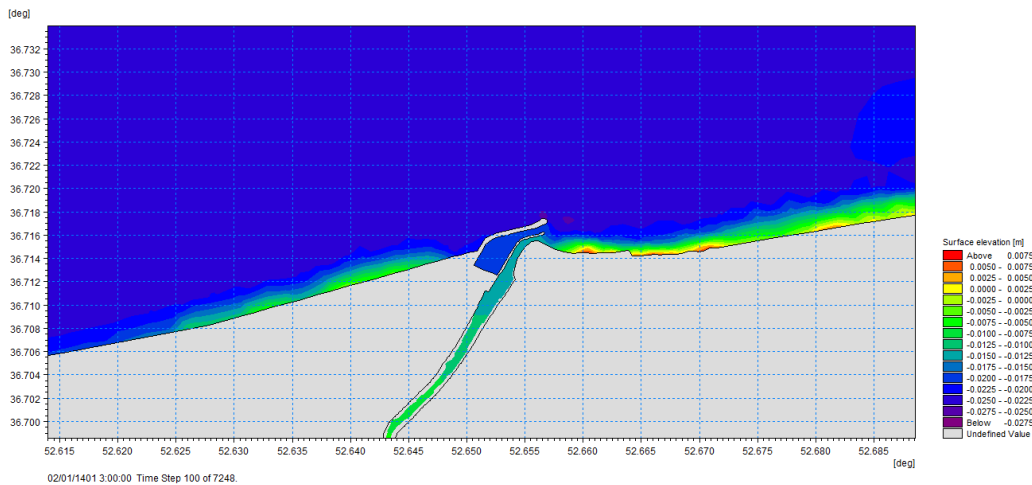
شکل ۱۸. مؤلفه S_{xy} تنش تشعشی محاسبه شده



شکل ۱۹. مؤلفه S_{yy} تنش تشعشی محاسبه شده

تراز آب در نزدیکی ساحل و به تبع آن ورود آب به محدوده رودخانه می‌باشد. شکل (۲۰) افزایش سطح تراز آب را برای یک گام زمانی نشان می‌دهد.

وزش باد و شکستن امواج باعث افزایش تراز آب در نزدیکی خط ساحلی می‌گردد. یکی از عواملی که باعث نفوذ آب به داخل بستر رودخانه در شش ماهه اول سال می‌گردد. افزایش

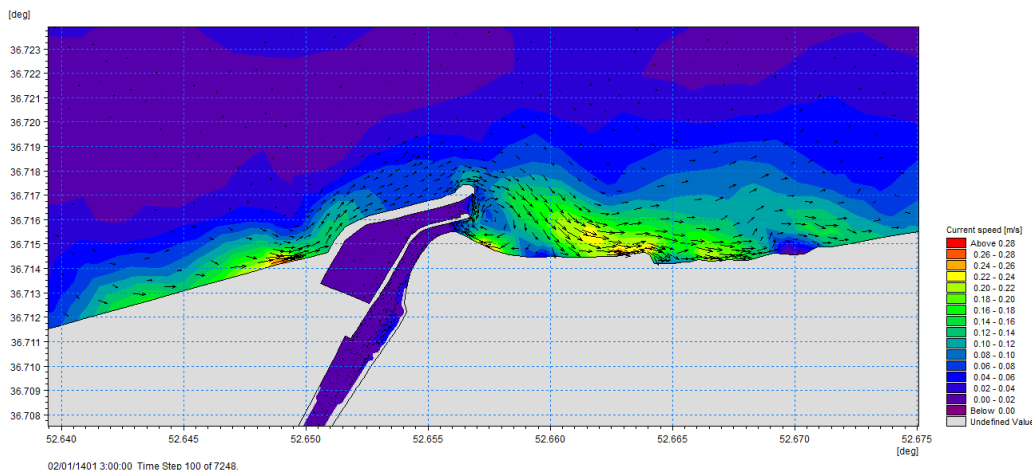


شکل ۲۰. افزایش تراز سطح آب در اثر خیزاب ناشی از باد و موج - سناریو ۱

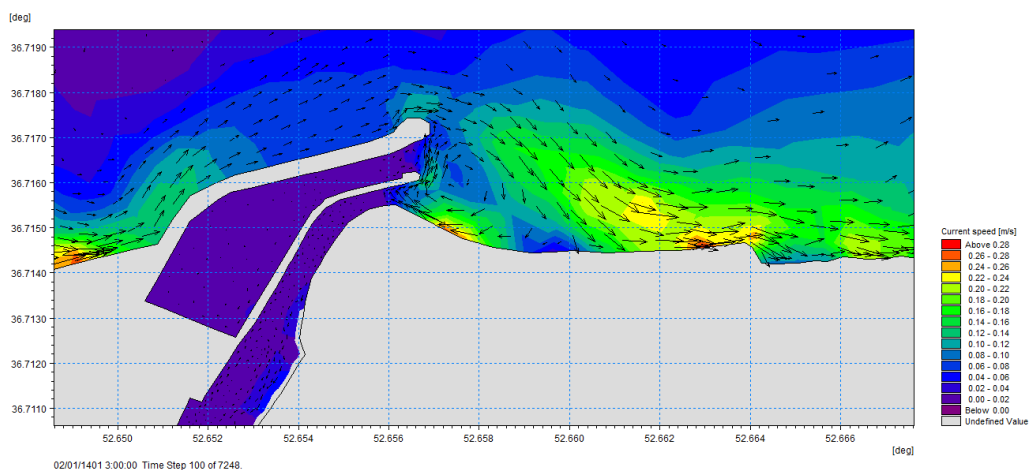
پدیده جدایش جریان، مقابل دهانه ورودی رودخانه یک پیچک توسعه یافته مشاهده می‌گردد. با توجه به اینکه در مرکز پیچک سرعت جریان از مقدار زیادی برخوردار نیست لذا این مناطق محدوده‌های مناسب برای نشست رسوبات می‌باشد. ضمن اینکه جریاناتی که در اثر این پیچک وارد دهانه رودخانه و حوضچه صیادی می‌شوند نیز رسوباتی را از سمت دریا با خود به همراه می‌آورد. در شکل (۲۲) بردارهای سرعت و داخل رودخانه نیز مشاهده می‌گردد که جهت جریان‌ها از سمت دریا به سمت رودخانه است. مشاهده می‌گردد سرعت‌های جریان در مقابل اسکله‌های موجود شیلات و توقفگاه شناورهای صیادی نسبت به مناطق مجاور از بزرگی بیشتری برخوردار است.

خیزاب‌های ناشی از باد و تنش‌های تشعشی ایجاد جریان‌های موازی ساحل را در پی دارند. جریان‌های موازی ساحل به خوبی در نتایج مدل هیدرودینامیک مشهود هستند. این جریان‌ها در زمان وقوع امواج به صورت مایل از شدت بیشتری برخوردارند. در هنگام ورود وقوع امواج شمال غربی این جریانات شکل گرفته پس از عبور از دهانه موج شکن صیادی در اثر پدیده جدایش جریان، بخشی از جریان آب تغییر جهت داده و یک پیچک در مقابل دهانه بندر و رودخانه به صورت ساعت گرد ایجاد می‌شود.

به منظور بررسی بیشتر محدوده دهانه و ورودی بندر با بزرگنمایی بیشتری، مجدد در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نمایش داده شده است جریان موازی ساحل به موازات موج شکن بندر صیادی حرکت کرده و در اثر تغییر جهت جریان به دلیل



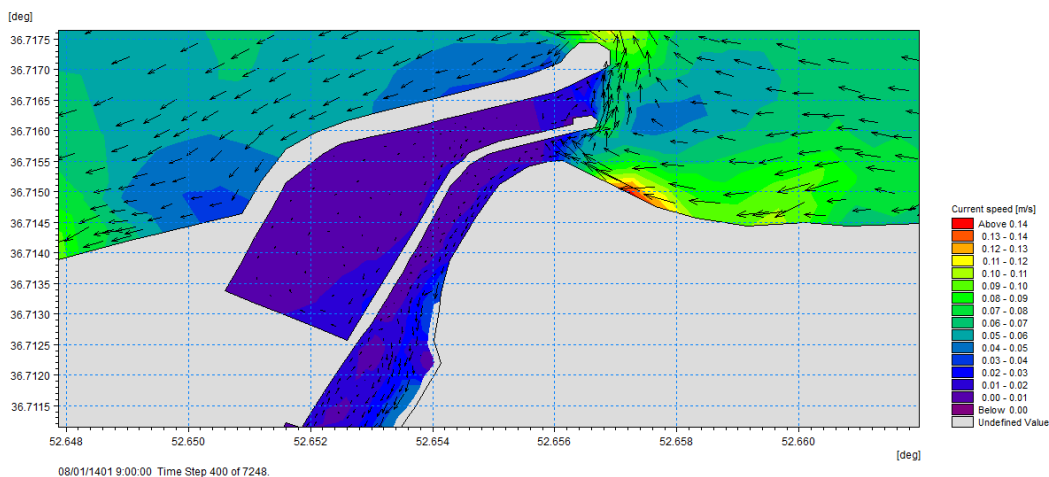
شکل ۲۱. الگوی جریان موازی ساحل در محدوده دهانه بندر و پیچک ایجاد شده - سناریو ۱



شکل ۲۲. نفوذ جریان به داخل رودخانه- سناریو ۱

در شکل (۲۳) الگوی جریان با وضوح بیشتری نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بخشی از جریان آب از کرانه شرقی رودخانه نفوذ کرده و جریان ضعیفی نیز به حوضچه صیادی وارد شده و یک جریان گردشی در آنجا ایجاد می‌کند. در کل در سواحل دریای خزر جریان موازی ساحل با توجه به شرایط امواج و شیب ساحل از مقادیر قابل توجهی برخوردار بوده که عامل اصلی حرکت رسوبات در طول خط ساحلی می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به رژیم جریان موازی ساحل جهت غالب جریان موازی ساحل غرب به شرق بوده ولی در زمان وقوع امواج شمال شرقی، جهت جریان موازی ساحل از شرق به غرب می‌باشد.

در هنگام وقوع امواج از جهت شمال شرقی نیز جریان‌های موازی ساحل ایجاد می‌شود. این جریان‌ها پس از رسیدن به دهانه رودخانه و پس از دور زدن دهانه بندر صیادی به موازات ساحل به حرکت خود ادامه می‌دهند. در محدوده روبروی اسکله‌های شیلات که محل توقف شناورهای صیادی است جریان‌ها ضعیف مشاهده می‌گردد. در این شرایط پیچک در مقابل دهانه ایجاد نمی‌شود ولی سرعت جریان در مقابل دهانه با توجه به عوارض متعدد موجود در مسیر حرکت جریان سرعت جریان آب اندکی کاهش می‌یابد بدیهی است با کاهش سرعت جریان آب میزان نشست رسوبات افزایش پیدا کند.



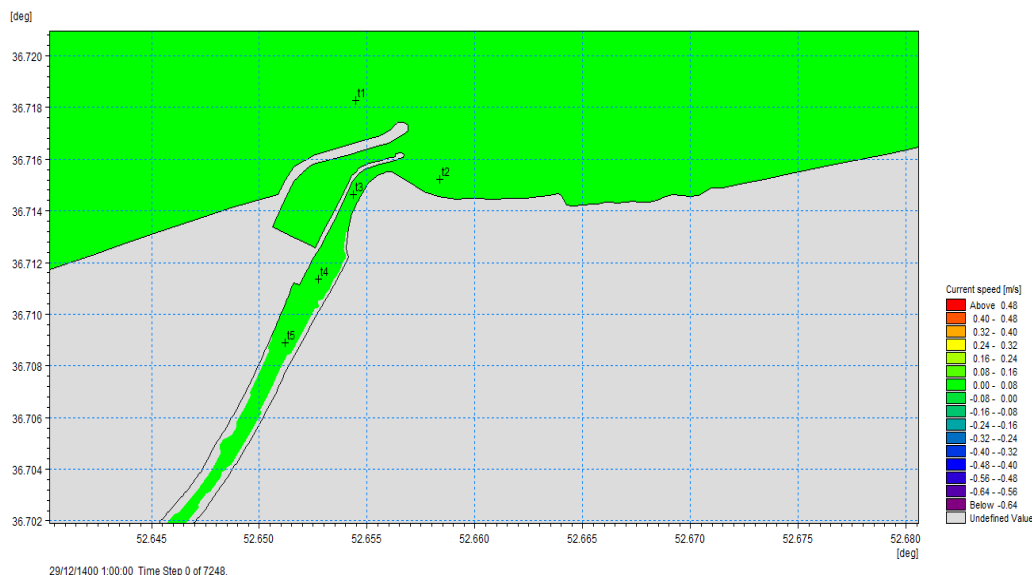
شکل ۲۳. الگوی جریان موازی ساحل غرب به شرق در محدوده دهانه رودخانه- سناریو ۱

داده‌های سری زمانی سرعت جریان در شکل (۲۴) نمایش داده شده است. نقطه 1 با فاصله کمی از موج شکن بندر صیادی در دریا انتخاب شده، نقطه 2 در ساحل شرقی و

به منظور درک بهتر از سرعت جریان و نحوه تغییرات آن در محدوده مطالعه سری زمانی این جریان‌ها در چهارنقطه از خروجی مدل جریان استخراج شده که محل استخراج

نقطه t4 روبروی اسکله شیلات و محل توقف شناورهای صید کیلکا انتخاب شده و جایی است که در بازدیدهای میدانی رسوبگذاری قابل توجهی در آن نقطه مشاهده گردیده و نقطه t5 نیز در داخل رودخانه انتخاب شده است.

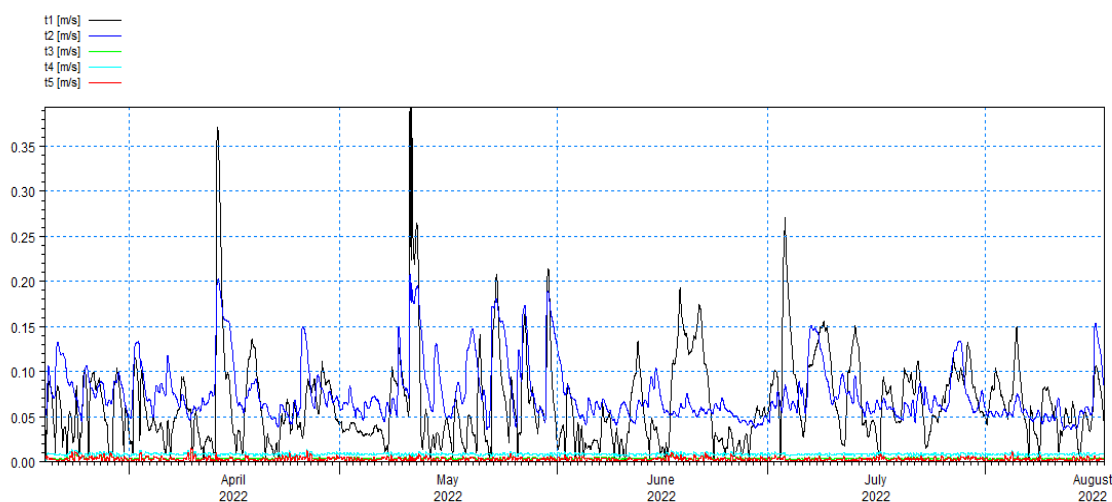
مجاورت دهانه رودخانه در نظر گرفته شده تا با تحلیل سرعت جریان در این نقاط و مقایسه آن با سرعت جریان در نقاط t3، t4 و t5 نفوذ جریان به داخل رودخانه مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۲۴. محل استخراج داده‌های سری زمانی سرعت جریان - سناریو ۱

محاسبه شده است. حداکثر سرعت جریان در نقطه t1 در یک روداد به بیش از 0.35 m/s می‌رسد. در نقطه t2 در زمان مشابه سرعت جریان در حدود 0.2 m/s است.

سری‌های زمانی استخراج شده سرعت جریان در شکل (۲۵) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود سرعت جریان در نقاط t1 و t2 نسبت به سایر نقاط مقادیر بیشتری دارند. در نقاط داخل رودخانه مقادیر کمتری نسبت به محدوده ساحلی



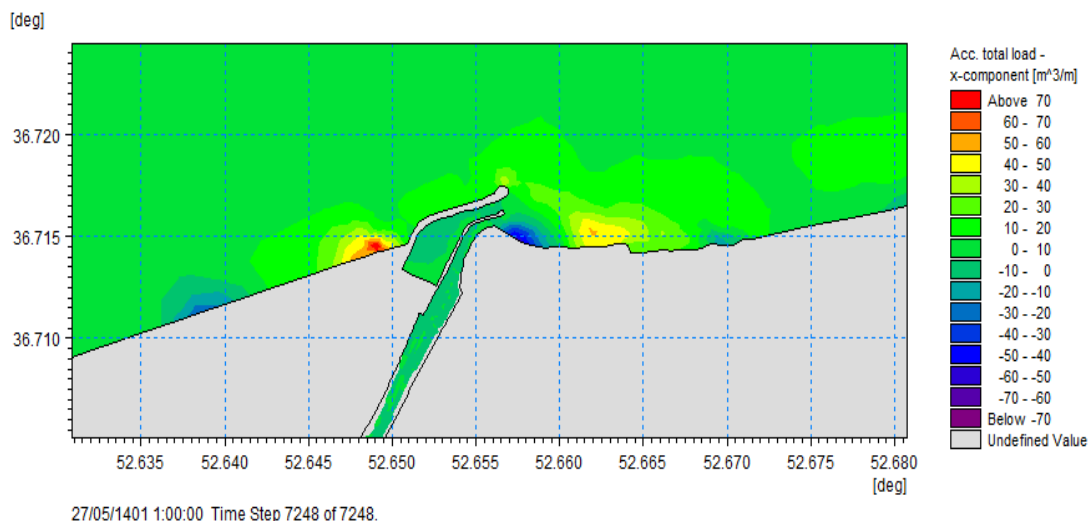
شکل ۲۵. شکل سری زمانی سرعت جریان در نقاط مشخص شده - سناریو ۱

سرعت جریان در مقابل موج شکن بندر صیادی مشاهده می‌شود سرعت‌های بالا با وقوع وقوع امواج بلند همزمان هستند. به منظور بررسی الگوی رسوب گذاری در دهانه و محدوده رودخانه نتایج مدل انتقال رسوب مورد بررسی قرار

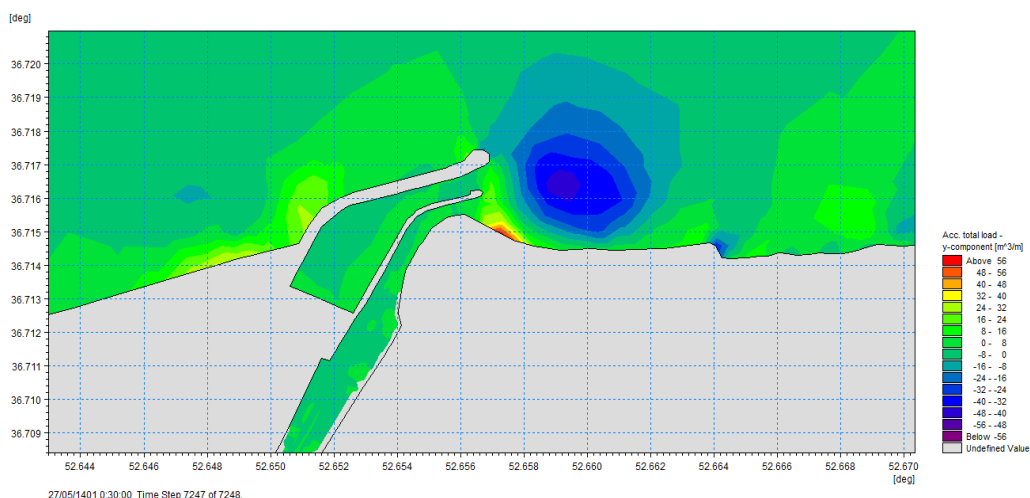
ضمناً بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد ارتباط معنی داری بین ارتفاع موج و سرعت جریان در محدوده ساحلی برقرار باشد. با مقایسه داده‌های ارتفاع موج در آب عمیق و داده‌های

قابل توجه انتقال رسوب مشاهده می گردد. ضمناً در محلی که در نزدیکی دهانه رودخانه با رنگ آبی مشخص شده نشان از حرکت رسوبات در جهت خلاف (به سمت غرب) یعنی به سمت دهانه رودخانه می باشد.

گرفت. در ابتدا بار بارهای کل انتقال رسوب به صورت تجمعی در شکلهای (۲۶) و (۲۷) به ترتیب برای جهت های اصلی x و y ارائه شده است. در جهت x بیشینه بار رسوبی به صورت تجمعی مربوط به پشت موج شکن بندر صیادی شیلات است. در ضمن اینکه در منطقه نزدیک ساحل پتانسیل



شکل ۲۶. بار کل انتقال رسوب در جهت x به صورت تجمعی - سناریو ۱

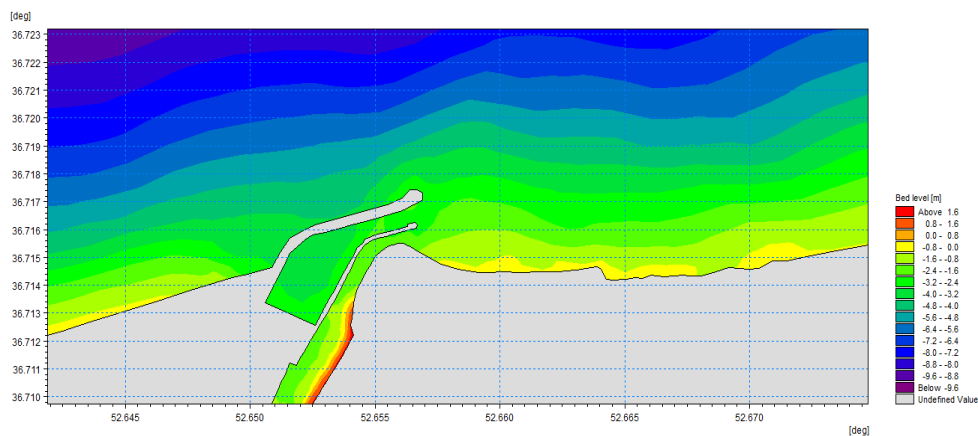


شکل ۲۷. بار کل انتقال رسوب در جهت y به صورت تجمعی - سناریو ۱

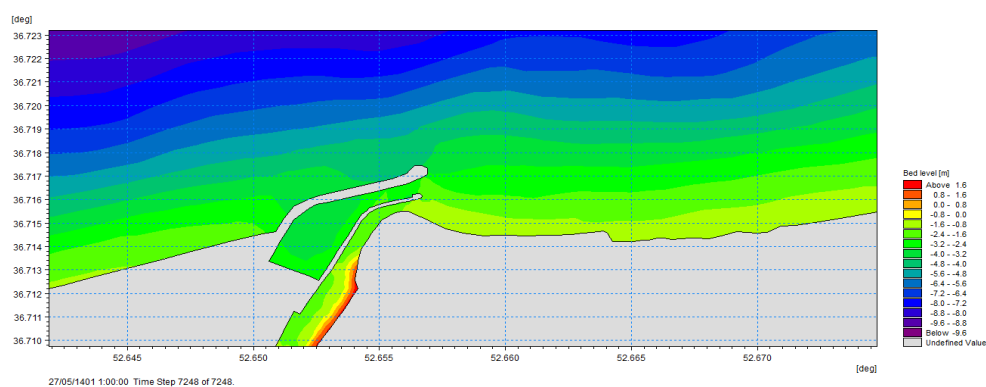
از شرق به غرب) کاملاً مشهود است و نتایج با مشاهدات شکل ۳۰ و رسوب گذاری در ضلع شرقی دهانه مطابقت دارد. محاسبات مؤید این است که در دهانه رودخانه، با توجه به فرایندهای انتقال رسوب ساحلی و موانع ایجاد شده در محل (موج شکن ها) و ایجاد پیچک در اثر جدایش جریان در دهانه ورودی و تشدید رسوبگذاری، نشست رسوبات دریایی تا ۶۰ سانتیمتر بدون لحاظ نوسانات تراز آب دریای خزر در طی ۶ ماه امکان پذیر است.

شکل (۲۸) تراز بستر در محدوده مطالعه را در زمان شروع مدل سازی و شکل (۲۹) تراز بستر را پس از طی دو فصل بهار و تابستان نمایش می دهد. با توجه به پدیده انتقال رسوب همانگونه که انتظار می رود تغییرات تراز بستر دریا در محدوده دهانه رودخانه و اطراف موج شکن بندر شیلاتی بابلسر مشاهده می گردد.

در شکل (۲۹) حرکت رسوبات از غرب به شرق و همینطور ورود رسوبات به دهانه رودخانه (حرکت بخشی از رسوبات



شکل ۲۸. تراز بستر در زمان شروع مدل سازی - سناریو ۱



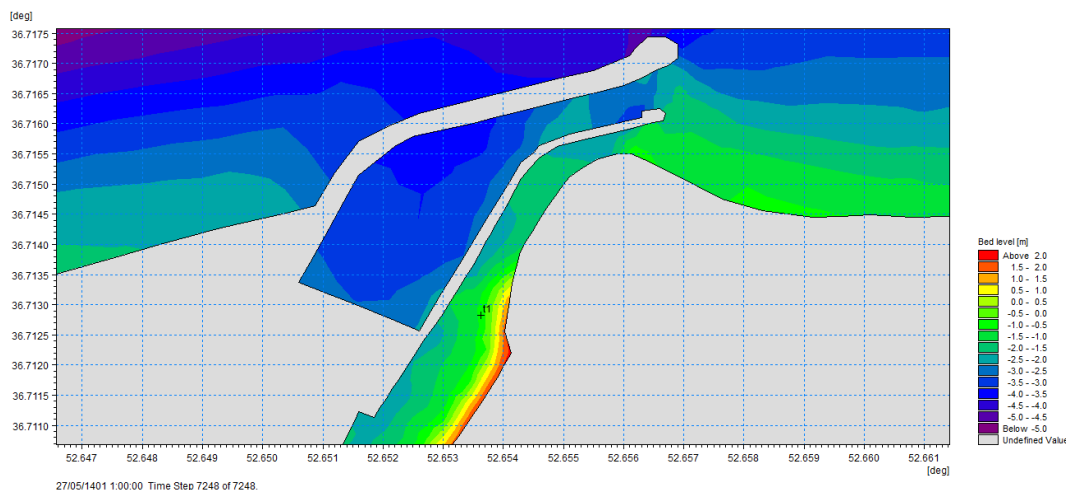
شکل ۲۹. تراز بستر پس از طی ۶ ماه بهار و تابستان - سناریو ۱



شکل ۳۰. رسوبگذاری در ضلع شرقی دهانه رودخانه - سناریو ۱

موضوع است. در شکل (۳۱) موقعیت استخراج داده‌ها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تغییرات تراز کاهش چشمگیری نسبت به دهانه رودخانه دارد.

با توجه به اندازه ذرات رسوبی انتظار می‌رود با حرکت به سمت داخل رودخانه از میزان نشست رسوبات کاسته شود. استخراج داده‌های تراز بستر در داخل رودخانه مؤید این

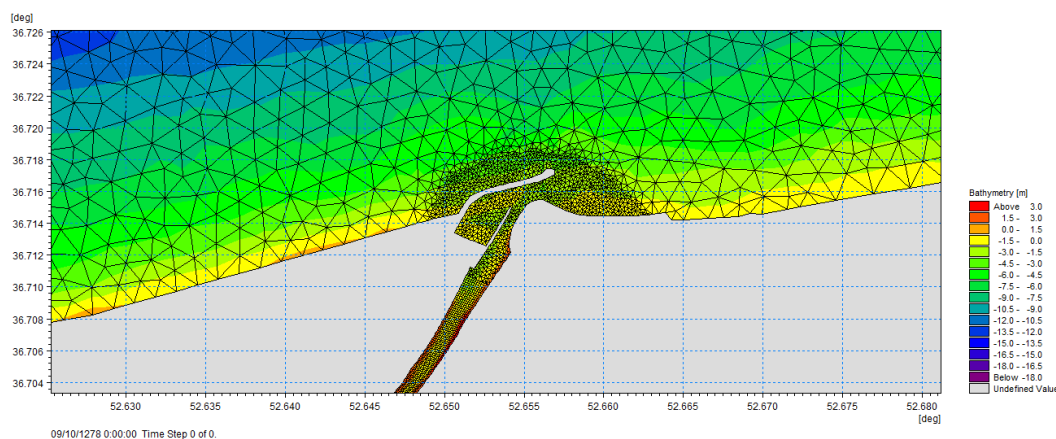


شکل ۳۱. موقعیت استخراج تراز بستر در داخل رودخانه- سناریو ۱

۲. نتایج مدل سازی های سناریو ۲:

دیواره بر رسوبگذاری در دهانه رودخانه شبیه سازی شده است. مش محاسباتی در محدوده دهانه رودخانه در شکل (۳۳) نمایش داده شده است.

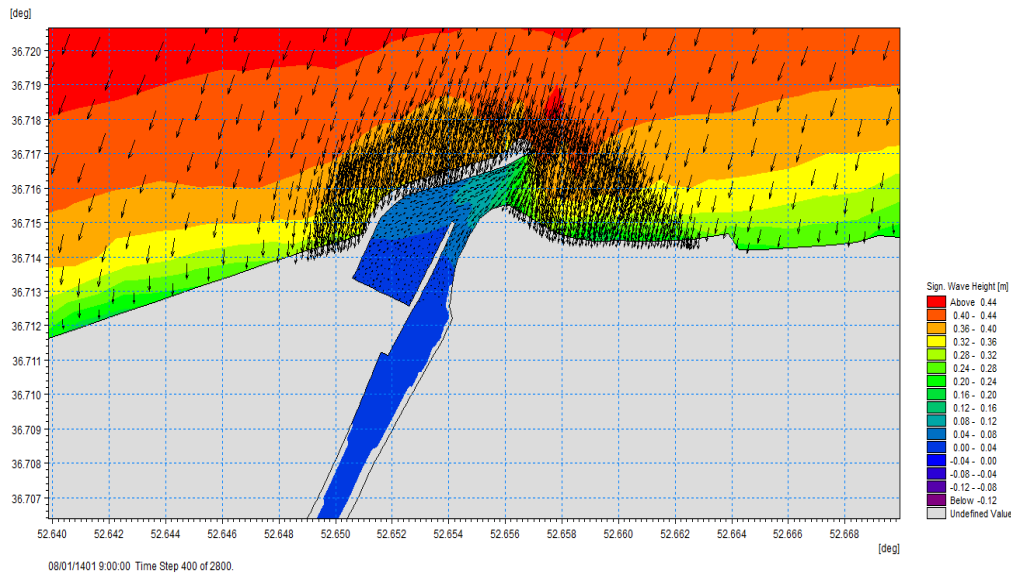
در سناریوی دوم شرایط هیدرودینامیکی و رسوب محدوده مطالعات در شرایط حذف بخشی از دیوار هادی جریان (جداکننده رودخانه و بندر صیادی) با هدف بررسی اثر



شکل ۳۲. مش محاسباتی سناریو ۲ در محدوده دهانه رودخانه

دیوار حائل باعث شده است تا میزان نا آرامی از حد مجاز (۹۷٪ آرامش) فراتر رود و این امر فعالیت تخلیه و بارگیری و همچنین ورود و خروج شناورها را با مشکل همراه خواهد ساخت. در خصوص رودخانه نیز امواج ورودی باعث تعلیق رسوبات در دهانه شده و تنش تشعشعی ناشی از شکست امواج جریانات موازی ساحل را ایجاد خواهد کرد که لازم است در جای خود الگوی جریانات و انتقال رسوب مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

نتایج مدل موج طیفی نشان می دهد که امواج در دهانه موج شکن منکسر شده و پس از تغییر جهت وارد رودخانه و بندر صیادی بابلسر می شوند. آن بخش از امواج که به دیواره جدا کننده برخورد می کنند. و با توجه به شیب دیواره تا حد زیادی منعکس شده و در ساحل مقابل میرا می شوند. شکل (۳۳) نفوذ امواج شمال شرقی در سناریو ۲ را نمایش می دهد. در این شرایط نا آرامی قابل توجه در حوضچه بندر صیادی مشاهده می گردد. بررسی ها نشان داد در این سناریو، برداشت

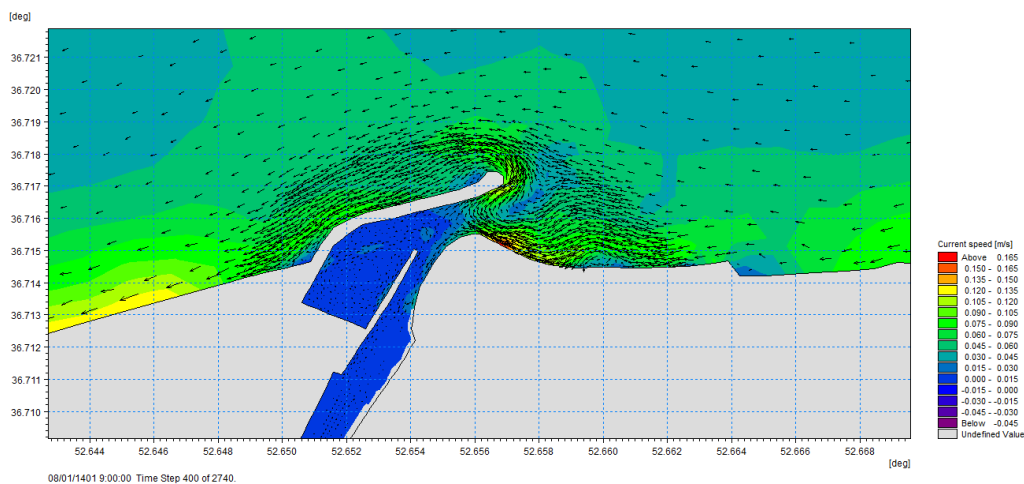


شکل ۳۳. نفوذ امواج شمال شرقی در سناریو ۲

شکل (۳۴) الگوی جریان موازی ساحل در اثر شکستن امواج شمال شرقی را نشان می‌دهد. بخشی از جریان پس از رسیدن به موج شکن منحرف شده و پس از تغییر جهت، به موازات موج شکن به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حالت محدوده با سرعت کم در مقابل دهانه به وجود می‌آید (یک پیچک توسعه نیافته) می‌تواند محل مناسبی برای نشست رسوبات فراهم کند. یک جریان ضعیف نیز از ساحل شرقی رودخانه به سمت جنوب مشاهده می‌گردد.

در خصوص امواج شمال شرقی پس از برخورد با موج شکن چند درجه انحراف پیدا کرده ولی میزان انحراف به قدری نیست که امواج به داخل رودخانه و حوضچه بندر صیادی نفوذ کنند.

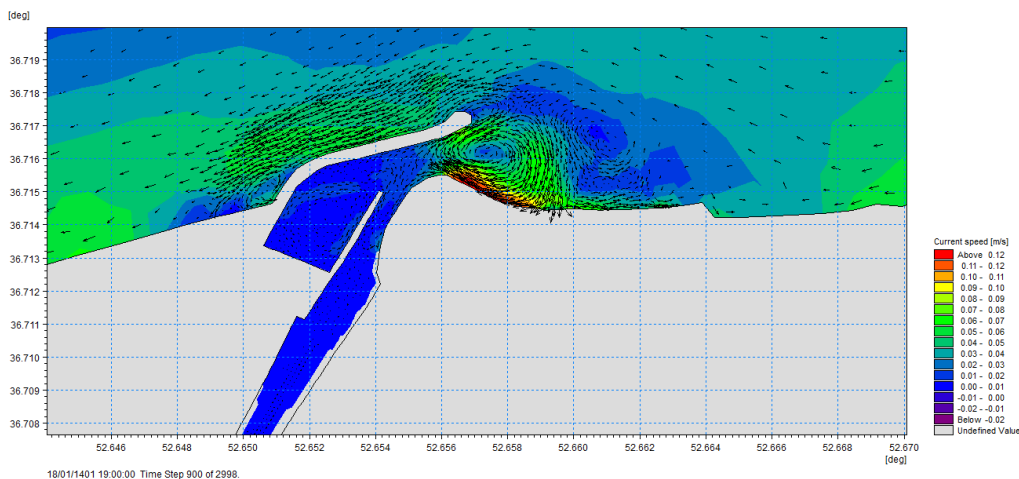
همان‌طور که پیشتر گفته شد شکستن امواج باعث ایجاد تنش‌های تشعشعی و به تبع آن ایجاد جریان‌های موازی ساحل می‌گردد که عامل اصلی انتقال رسوبات از دریا به رودخانه هستند.



شکل ۳۴. الگوی جریان موازی ساحل از شرق به غرب - سناریو ۲

شکل (۳۵) گواه این قضیه می‌باشد. در سناریو ۱ دیوار حائل مانع از ایجاد پیچک توسعه یافته در شرایط هیدرودینامیکی مشابه می‌گردد.

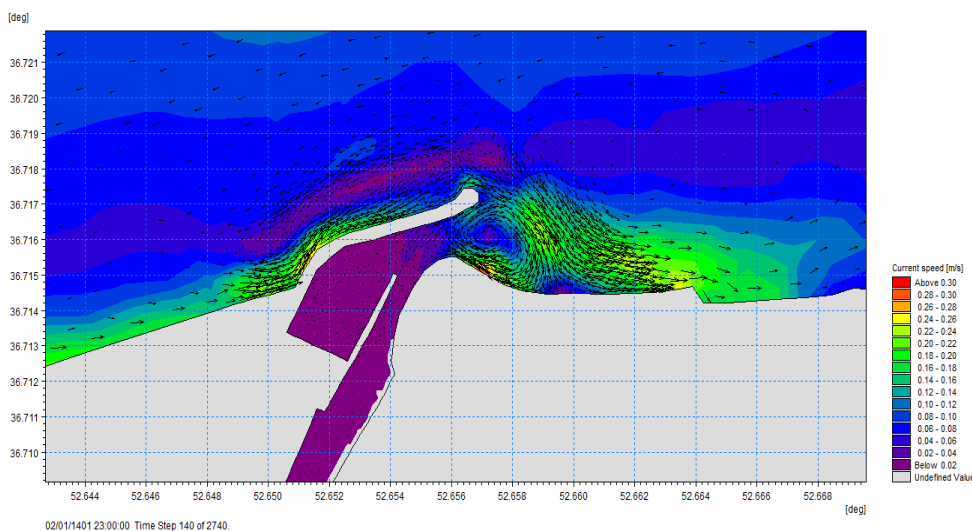
با توجه به ایجاد پیچک توسعه نیافته در زمان وقوع امواج شرقی به غرب، ایجاد پیچک در سایر رویدادهای مشابه (شکست امواج شمال شرقی) بررسی گردید. مشاهده شد امکان احداث پیچک توسعه یافته در این شرایط وجود دارد.



شکل ۳۵. ایجاد پیچک توسعه یافته در زمان وقوع امواج شمال شرقی - سناریو ۲

همینطور رسوب گذاری در دهانه بندر به وجود آمدن پیچک ها و هدایت جریان به داخل رودخانه است. شکل (۳۶) ایجاد پیچک در مقابل دهانه را در اثر شکست امواج شمال غربی نمایش می دهد.

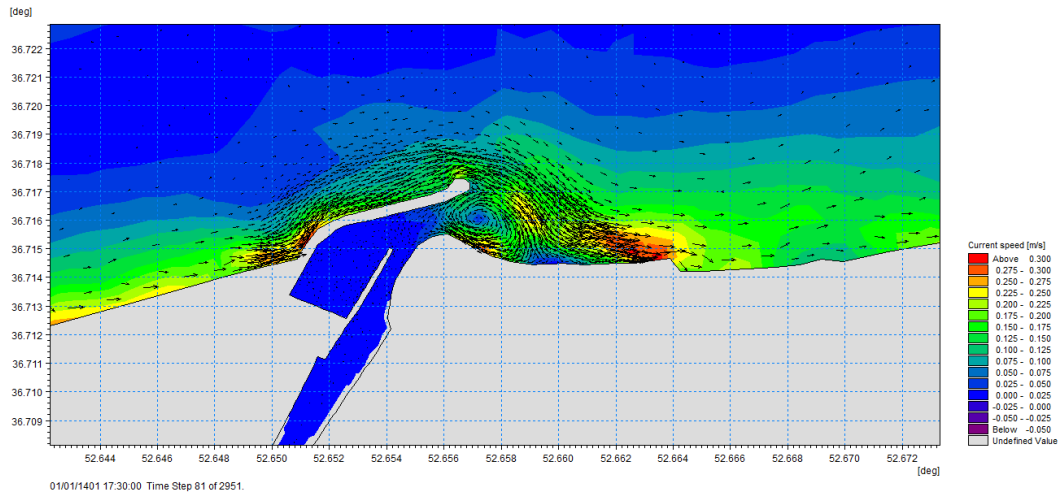
در هنگام شکست امواج شمال غربی، جریان موازی غرب به شرق ایجاد شده و پس از عبور از موج شکن به دلیل جدایی جریان یک پیچک توسعه یافته در مقابل دهانه موج شکن ایجاد می گردد. بررسی های قبلی نشان داده است که اصلی ترین عامل ورود رسوبات به محدوده رودخانه و



شکل ۳۶. جریان موازی ساحل غرب به شرق - سناریو ۲

رسوب را به محدوده رودخانه و حوضچه بندر صیادی منتقل کند. به عنوان یک قاعده کلی در مرکز پیچک سرعت های جریان بسیار کم بوده و این نقاط محل نشست رسوبات است.

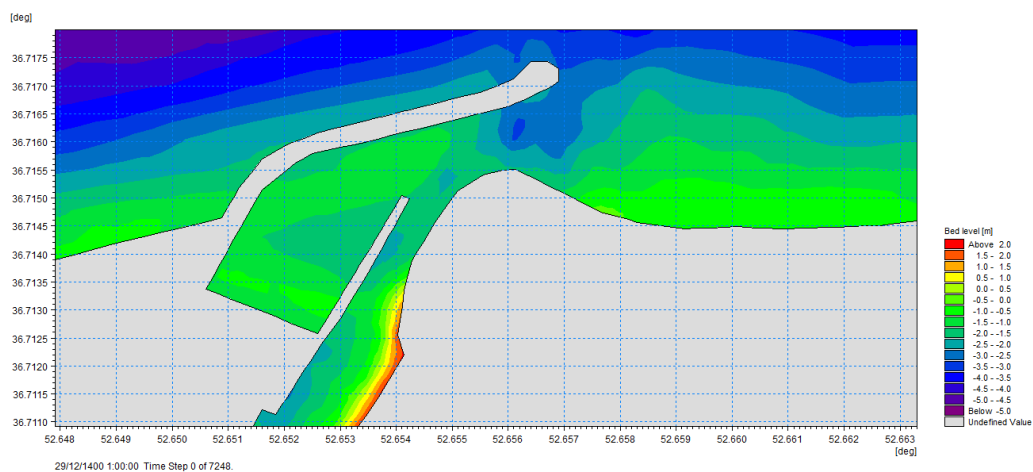
شکل ۳۷. یک رویداد دیگر (وقوع موج شمال غربی) از جریان موازی ساحل غرب به شرق و ایجاد پیچک را نشان می دهد. مشابه مثال قبلی، سرعت های جریان در وجه جنوبی پیچک از سرعت بیشتری برخوردار است که می تواند ذرات



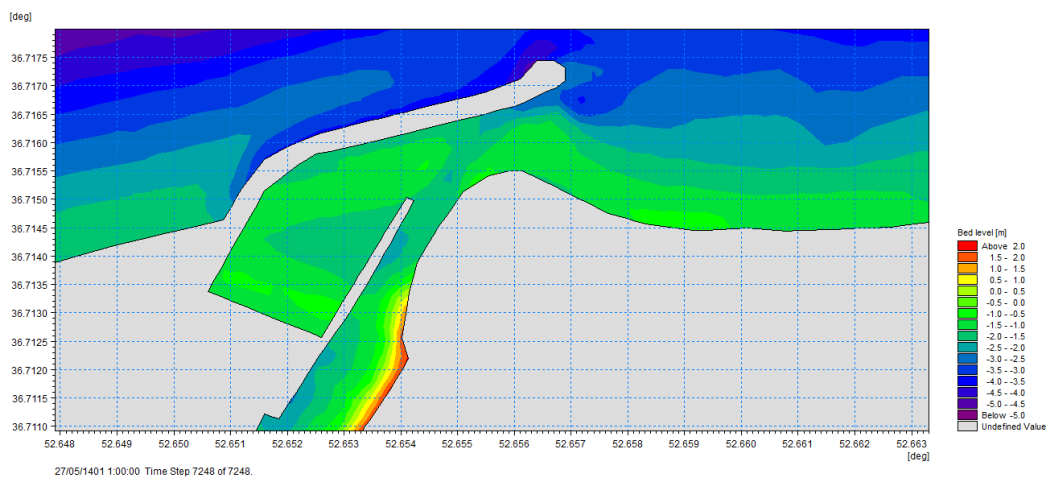
شکل ۳۷. جریان موازی ساحل غرب به شرق - سناریو ۲

مدل سازی مشاهده می شود کانال مذکور به طور کامل پر شده است که این امر تردد شناورهای تفریحی و هم صیادی را محدود می نماید.

شکل (۳۸) توپوگرافی بستر را در زمان شروع مدل سازی و شکل (۳۹) توپوگرافی بستر را پس از ۶ ماه بهار و تابستان نمایش می دهد. در محدوده دهانه رودخانه یک کانال دسترسی به عمق ۲/۵ متر پیش بینی شده است. پس از پایان



شکل ۳۸. توپوگرافی محدوده مدل سازی در آغاز اجرا - سناریو ۲



شکل ۳۹. توپوگرافی محدوده مطالعات پس از ۶ ماه مدل سازی - سناریو ۲

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل عددی MIKE 21، فرآیند انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژیکی در دهانه رودخانه و بندر صیادی بابلسر در دو سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول، شرایط آرام تر هیدرودینامیکی دریای خزر در فصول بهار و تابستان سبب کاهش ارتفاع امواج، تضعیف جریان های ساحلی و افزایش نرخ ته نشینی رسوبات گردید. نتایج مدل نشان داد که بخش عمده ای از رسوبات بلافاصله پس از ورود به دهانه رودخانه ته نشین می شوند و تمرکز رسوب گذاری عمدتاً در نواحی اطراف موج شکن ها، به ویژه در ضلع شرقی دهانه، شکل می گیرد (شکل های ۲۸ و ۲۹). در سناریوی دوم، حذف بخشی از دیوار هادی بین حوضچه بندر و رودخانه منجر به افزایش تبادل جریان میان دو ناحیه و تشکیل پیچک های جریان با شدت و ابعاد بیشتر شد. این پدیده موجب افزایش رسوب گذاری در دهانه و داخل حوضچه بندر و در نتیجه کاهش پایداری جریان و محدودیت در تردد شناورها گردید. مقایسه دو سناریو نشان داد که وجود دیوار هادی در سناریوی نخست، موجب هدایت مناسب جریان، کاهش آشفته گی هیدرودینامیکی و کنترل تمرکز رسوب گذاری در دهانه می شود، در حالی که حذف آن در سناریوی دوم، منجر به تشدید فرآیندهای رسوبی و تغییرات نامطلوب در مورفولوژی بستر می گردد. صحت سنجی مدل MIKE 21 با استفاده از داده های میدانی و مشاهدات رسوب گذاری (شکل ۳۰) نشان داد که الگوی شبیه سازی شده تغییرات بستر و جهت غالب انتقال رسوبات با واقعیت انطباق بالایی دارد. این همخوانی بیانگر دقت و قابلیت اطمینان مدل در بازتولید فرآیندهای هیدرودینامیکی و رسوبی منطقه است. بر این اساس، مدل MIKE 21 به عنوان ابزاری معتبر می تواند در تحلیل و طراحی طرح های مهندسی مرتبط با مدیریت رسوب، پایداری مورفولوژیکی و بهینه سازی سازه های ساحلی در دهانه رودخانه بابلسر مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات گسترده ای در زمینه مدل سازی عددی انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژیکی در دهانه رودخانه ها و نواحی

پیرامون سازه های ساحلی انجام شده است. برای مثال، زنگانه و همکاران با استفاده از مدل MIKE 21 نشان دادند که این مدل قادر است الگوی رسوب گذاری و میزان تجمع رسوبات در مصب بوشهر را با دقت مناسبی شبیه سازی کند؛ یافته ای که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. [25] همچنین، تأثیر موج شکن ها بر تغییر الگوی جریان و تمرکز رسوب گذاری در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. واصلعلی و همکاران گزارش کردند که کاهش انرژی جریان در پشت موج شکن موجب افزایش رسوب گذاری در مجاورت سازه می شود؛ روندی که در سناریوی اول این تحقیق نیز مشاهده شد. [26] افزون بر این، پژوهش های جدیدتری مانند مطالعه اوویش و همکاران نشان داده اند که مدل MIKE 21 FM قادر است تغییرات بلندمدت انتقال رسوب و تکامل مورفولوژی ساحلی را با دقت مناسبی بازتولید کند. [27] به طور کلی، مقایسه نتایج این تحقیق با یافته های پیشین نشان می دهد که الگوهای شبیه سازی شده از تمرکز رسوب گذاری در پشت سازه ها تا نقش مؤثر دیوار هادی در کاهش آشفته گی جریان در چارچوب مطالعات معتبر پیشین قابل تفسیر بوده و عملکرد مدل MIKE 21 در بازنمایی فرآیندهای هیدرودینامیکی و رسوبی منطقه از پشتوانه علمی کافی برخوردار است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از داوران و ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک که در بهبود کیفیت مقاله کمک شایانی داشته اند کمال تقدیر و تشکر داریم.

مراجع

- [1] Alp M, Cigizoglu HK. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. *Environmental Modelling & Software*. 2007;22(1):2-13.
- [۲] سلمانی حمید، نیک منش محمدرضا. شبیه سازی سه بعدی انتقال رسوب در مجاری طبیعی توسط مدل MIKE3FM (مطالعه موردی: رودخانه بستانک). شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران؛ ۱۳۹۶؛ اردیبهشت،

- low-crested breakwater on a cohesive coast. *Water*. 2019;11(8):1721.
- [14] Marrone J, Zhou S, Brashear P, Howe B, Baker S. Numerical and physical modeling to inform design of the Living Breakwaters Project, Staten Island, New York. In: *Coastal Structures* 2019. p. 1044-1054.
- [15] Galiano F, et al. Numerical study of the effects of a designed submerged breakwater on coastal sediment transport in Pescara Port (Italy). *Journal of Coastal and Harbor Engineering*. 2020;12(3):21-34.
- [16] Vona I, Gray MW, Nardin W. The impact of submerged breakwaters on sediment distribution along marsh boundaries. *Water*. 2020;12(4):1016.
- [17] Wu Y, Zhu K, Qin H, Wang Y, Sun Z, Jiang R, et al. Numerical investigation on the influence of breakwater on sediment transport in Shantou offshore area. *Applied Sciences*. 2023;13(5):3011.
- [18] Zedan RN, Rashwan EH, Omara HM. Flow pattern and wave reflection in front breakwaters during scour development: A review. *Journal of Engineering Research*. 2023;7(3):1-13.
- [19] Pareta K. 1D–2D hydrodynamic and sediment transport modelling using MIKE models. *Discover Water*. 2024;4:94. doi:10.1007/s43832-024-00130-9
- [20] Costinescu I-M, Nedelea A, Sârbu D, Chevereşan M, Comănescu L. Simulation of sediment transport and the total volume of alluvium using MIKE 21—Case study: The Şolea Stream. *Water*. 2025;17(19):2831. doi:10.3390/w17192831
- [21] Vu VL, Bui DT, Tran QV, Vu MC, Ngo TM. Utilisation of the MIKE 3 model for simulating sediment transport in coastal areas affected by sand mining. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*. 2025;67(2):117-128. doi:10.31276/VJSTE.2024.0068
- [22] DHI. MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, User Guide. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute; 2022.
- [23] DHI. MIKE 21: 2D Hydrodynamic Modeling Software. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute; 2024.
- [24] Aladin N, Plotnikov I. The Caspian Sea. Lake Basin Management Initiative—Thematic Papers. 2004:1-29.
- ایران. <https://civilica.com/doc/727286>
- [3] Puls W, Sündermann J. Simulation of suspended sediment dispersion in the North Sea. In: *Residual Currents and Long-Term Transport*. Berlin: Springer; 1990. p. 356-72.
- [۴] شرکت جهاد آب و انرژی. مطالعه رسوب گذاری بندر بابلسر. تهران: شرکت جهاد آب و انرژی؛ ۱۳۸۵.
- [5] Gomez B. The potential rate of bed-load transport. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2006;103(45):17170-3.
- [6] Soltanpour M. A survey on fishery ports in Iran. In: *2nd Yokohama Symposium on Coastal Processes in Developing Countries*; 2004.
- [7] Zohari NH, Etemad-Shahidi A. Sedimentation in Babolsar and Pozm fishery ports in Iran. *Journal of Coastal Research*. 2006;22(6):1143-1156.
- [۸] آقاخانی افشار امیر، حسن‌زاده‌ای یوسف، اعلمی محمدتقی. مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه. در: سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران؛ ۱۳۹۳. <https://civilica.com/doc/379564>
- [۹] نیک‌پور محمدرضا، ثانی‌خانی هادی. مدل‌سازی رسوبات معلق رودخانه. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب. <https://civilica.com/doc/888603>. (۳۰)۸؛ ۱۳۹۶
- [۱۰] محمودی ایوب، لشت‌نشانی میراحمد، منصورى عباس، شفاعی محمود. مدل‌سازی عددی جریان و رسوب در اطراف بندر نوشهر. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون ۱۳۹۷؛ ۵(۳):۱۰۵-۱۱۶. <https://civilica.com/doc/886877>
- [11] Dissanayake P, Duong T, Karunarathna H, Ranasinghe R. Sediment dynamics of Negombo Lagoon outlet, Sri Lanka. In: *Coastal Sediments* 2015. Singapore: World Scientific; 2015.
- [12] Sharaan M, Ibrahim MG, Iskander M, Masria A, Nadaoka K. Analysis of sedimentation at the fishing harbor entrance: Case study of El-Burullus, Egypt. *Journal of Coastal Conservation*. 2018;22(6):1143-1156. doi:10.1007/s11852-018-0624-y
- [13] Fitri A, Hashim R, Abolfathi S, Abdul Maulud KN. Dynamics of sediment transport and erosion–deposition patterns near a detached

[۲۵] زنگانه مرتضی، حاج مومنی عقیل. مدل سازی رسوب گذاری در خور بوشهر با استفاده از نرم افزار ۲۱ MIKE. مهندسی دریا. ۱۳۹۵؛ ۱۲ (۲۳): ۲۵-۳۵.

[۲۶] واصل علی علی رضا، آرم سا سیدعلی، کرمی خانیکی علی. بررسی تاثیر احداث آبشکن بر الگوی انتشار امواج (مطالعه موردی خلیج پرم). در: ششمین همایش علوم و فنون دریایی؛ ۱۳۸۴؛ تهران، ایران.
<https://civilica.com/doc/4949>

[27] Aouiche I, Bouziane A, Benaabidate L. Modelling of sediment transport and coastal morphology using MIKE 21 FM. Journal of Marine Science and Engineering. 2023;11(11):2051.

پی نوشتها

1. ANFIS
2. GEP
3. SVR
4. El-Burullus Port
5. Arniza Fitri
6. Marrone
7. Lacopo Vona
8. Danish Hydraulic Institute
9. Hydrodynamic
10. Spectral Wave
11. Sand Transport
12. sand transport