

مدل سازی عددی انتقال رسوب در اطراف بندر نوشهر

ایوب محمودی^۱، سید احمد لشت نشائی^۲، عباس منصوری^۳، محمود شفاعی بجمستان^۴

maln@guilan.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه گیلان

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۴- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

بندر نوشهر یکی از مهم ترین بنادر شمالی کشور محسوب می گردد که در دریای خزر واقع شده است. در حال حاضر این بندر گرفتار مشکلات شدید رسوب گذاری در اطراف دهانه می باشد به طوری که بهره وری از آن را تحت تأثیر قرار داده است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از اطلاعات دقیق اندازه گیری شده از موج، جریان و رسوب، مدل عددی Mike 21 راستی آزمایی شده است و سپس الگوی انتشار امواج، جریان و به تبع آن انتقال رسوب ناشی از امواج در اطراف بندر نوشهر به مدت یک سال بررسی می شود. با توجه به نتایج مدل یک ساله جریان در اطراف بندر نوشهر، مواردی همچون افزایش ناگهانی سرعت در مجاورت هد بازوی غربی موج شکن، کاهش ناگهانی سرعت در جلوی بندر و همچنین تشکیل یک گردابه در قسمت شمالی اراضی استحصال را می توان از دلایل رسوب گذاری در دهانه بندر نوشهر اشاره کرد. همچنین با بررسی الگوی جریان یک ساله می توان بیان نمود که رسوبات به همراه جریان غالب از سمت غرب بندر به سمت دهانه نزدیک می شوند و در نهایت با کاهش ناگهانی سرعت در جلوی بندر در همان قسمت ته نشین می شوند و بخشی دیگری از رسوبات که از جلوی دهانه بندر به پایین دست منتقل می شوند، مجدداً توسط گردابه ایجاد شده به سمت دهانه بندر حرکت می کنند.

واژگان کلیدی: بندر نوشهر، رسوب گذاری، فرسایش، مدل عددی .

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۱/۱۴



شکل (۱) جانمایی اولیه بندر نوشهر (حدود سال ۱۳۳۱).



شکل (۲) تغییرات جانمایی بندر در طی مدت بهره‌برداری.

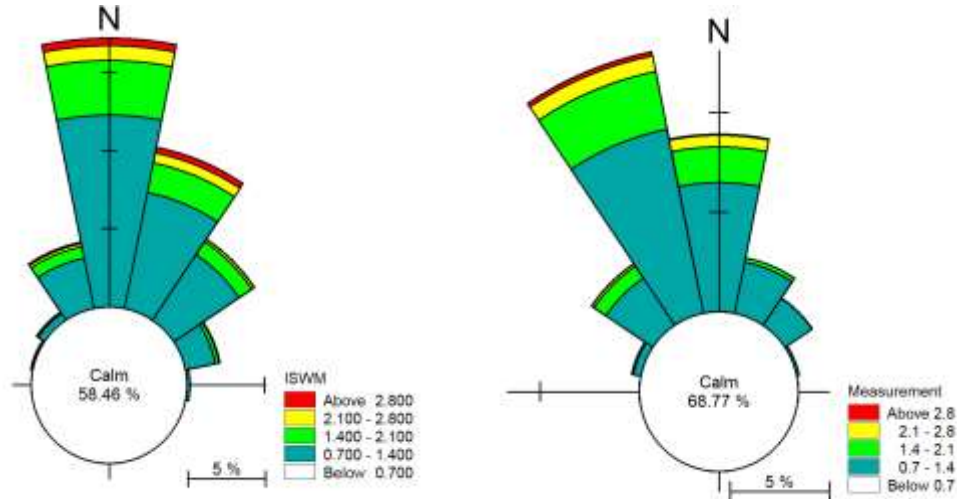
آن‌ها با استفاده از داده‌های امواج ۱۱ ساله ISWM به شبیه‌سازی جریان منطقه پرداختند. در نهایت آن‌ها نرخ انتقال رسوب منطقه ورودی و حوضچه بندر را ۱۳۴ هزار مترمکعب در سال دانستند. آن‌ها علت تفاوت این مقدار با نرخ لایروبی سالانه، (که حدود ۹۷ هزار مترمکعب در سال است و براساس آمار لایروبی بدست آمده است)، را لایروبی نکردن بخش‌هایی از بندر می‌دانستند. در مورد مطالعات انجام‌شده دو مسئله مشخص وجود دارد که می‌تواند دقت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. اولین مسئله استفاده از داده‌های ۱۱ ساله امواج ISWM است که در مرز شمالی مدل SW استفاده شده است. لازم به توضیح است که جهت گل‌موج این داده آماری از سمت شمال است، این در حالی است که جهت گل‌موج اندازه‌گیری شده از منطقه که به مدت یک سال و توسط سازمان بنادر و دریانوردی انجام‌شده است نشان می‌دهد که جهت موج غالب از سمت شمال غربی است. شکل (۳) مقایسه دو گل‌موج نشان می‌دهد که جریان ناشی از شکست موج در واقعیت بیشتر از مقادیر آن با داده‌های ISWM است. به عبارت دیگر با استفاده از داده‌های ISWM جریان شبیه‌سازی شده و در نتیجه آن میزان رسوب‌گذاری به مراتب کمتر از مقادیر واقعی خواهد بود.

۱- مقدمه

بندر نوشهر یکی از مهم‌ترین و باسابقه‌ترین بنادر شمالی کشور می‌باشد که در قسمت جنوبی دریای خزر واقع شده است (36.65°N, 51.50°E). ساخت بندر نوشهر در سال ۱۳۰۹ هجری خورشیدی با مشارکت شرکت‌های بورورکس (هلند) و آگرم (بلژیک) آغاز شد و در سال ۱۳۱۸ به بهره‌برداری رسید. این بندر از زمان ساخت تاکنون دست‌خوش تغییرات زیادی شده است. جانمایی اولیه بندر نوشهر در شکل (۱) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشخص است، بعد از ساخت بندر، سمت غرب بندر شروع به رسوب‌گذاری و سمت شرق آن دچار فرسایش شده است. این مسئله نشان می‌دهد که جهت انتقال رسوب در منطقه از سمت غرب به شرق بوده است. براساس پرسش و پاسخ با افراد باتجربه و کارکنان قدیمی بندر به نظر می‌رسد که این بندر در طی ۵۰ سال پس از ساخت، دچار مشکل شدید نفوذ موج بوده است. مشکلات رسوبی در دوره یادشده نسبت به شرایط فعلی به مراتب کمتر بوده است. بعدازآن و در سال ۱۳۶۸ با هدف کاهش مشکلات نفوذ موج و همچنین مشکلات رسوبی، بازوی غربی به طول ۳۰۰ م اطاله داده شده است. همچنین به دلیل کمبود پس‌کرانه کافی، عملیات استحصال قسمت شرق بندر در طی دو دوره در دستور کار قرار گرفته است. شکل (۲) مراحل تغییر جانمایی بندر را در طی مدت بهره‌برداری نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات به وجود آمده، هنوز بندر نوشهر گرفتار مشکلات شدید رسوبی می‌باشد. از این رو، ضرورت یک مطالعه دقیق از وضعیت هیدرودینامیک و رسوب منطقه احساس می‌شود.

به‌طور کلی مطالعات محدودی از بندر نوشهر انجام‌شده است. این مطالعات از زمان بروز مشکلات به‌ویژه مشکلات رسوبی آغاز شده است که به سال ۱۳۹۰ برمی‌گردد. تحقیقات محلی صورت گرفته و نتایج پرسش و پاسخ با مسئولین بندر حاکی از آن است که مشکلات شدید رسوبی از سال ۱۳۹۰ به بعد شدیدتر شده است. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه به دو گروه مطالعات انجام‌شده توسط شرکت‌های مشاور و همچنین مطالعات دانشگاهی انجام‌شده در داخل کشور تقسیم‌بندی می‌شود. در زمینه مطالعات دانشگاهی، رستمی و همکاران [۱] با استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱ به برآورد میزان رسوب‌گذاری در حوضچه بندر نوشهر پرداختند.



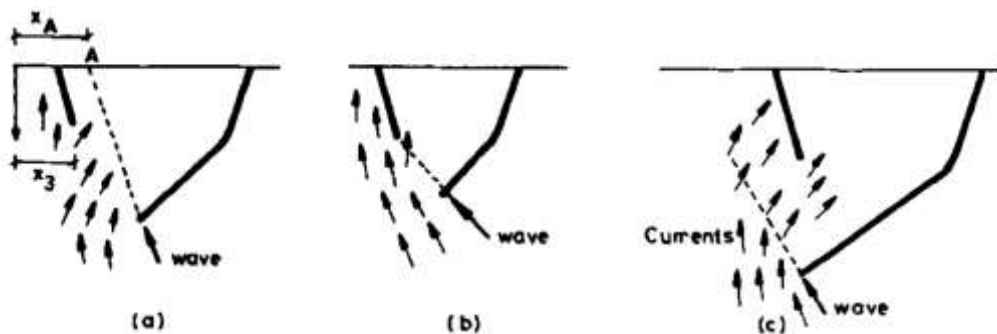
شکل (۳) مقایسه گل موج منتج شده از داده‌های اندازه‌گیری (شکل راست) داده‌های ISWM (شکل چپ).

بندر فعلی مربوط شده است [۲]. براساس این تحقیق ابتدا اشاره شده است که اگر جهت موج غالب هم‌راستا با جهت امتداد دو هد موج‌شکن باشد، آنگاه مشکلات رسوبی بندر و مشکلات ناشی از تفرق حداقل خواهد بود [۲]. با توجه به شکل (۴)، آن‌ها جانمایی بندر نوشهر را از نوع (c) بیان کردند که در این حالت دهانه بندر تحت تاثیر امواج تفرق یافته که حاوی رسوب نیز هستند، قرار می‌گیرد. نتایج مطالعات آنها بر اساس مطالعات Yüksek بوده است [۳].

در ادامه، خاکپور و همکاران با اجرای مدل همزمان موج، جریان و رسوب پیشنهادهایی برای اصلاح جانمایی بندر ارائه کردند. نکته قابل‌ذکر از مدل شبیه‌سازی ارائه شده توسط آن‌ها، استفاده از ارتفاع موج ۲ متر (به دلیل فراوانی بالا) در مرز شمالی مدل SW و با جهت ۴۵ درجه بوده است. علت این مسئله عدم دسترسی آن‌ها به اطلاعات لازم برای مدل مورد نظر بوده است. در یک تحقیق دیگر، اکبری نسب و همکاران با ارائه یک مدل HD تنها به شبیه‌سازی جریان در منطقه پرداختند.

نکته دیگری که در مورد تحقیقات صورت گرفته لازم به اشاره است، در نتایج مدل این تحقیقات، جریان ناشی از شکست موج در آب عمیق نیز دیده می‌شود که این مسئله به نظر صحیح نیست. براساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی صورت گرفته، تنش‌های تشعشعی و جریان ناشی از شکست موج در آب عمیق نیز دیده شده است، در صورتی که جریان ناشی از شکست موج در محدوده شکست و به صورت موازی ساحل دیده می‌شود. علت این مسئله می‌تواند انتخاب نادرست شرایط مرزی باشد. با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی از نتایج واقعی مدل بزرگ‌مقیاس در مرزها استفاده نشده است، اجرای مدل ایده‌آل نزدیک به واقعیت کار دشوار و پیچیده‌ای است و به همین دلیل نباید انتظار داشت نتایج مدل‌سازی که منتج به تعیین نرخ انتقال رسوب منطقه شده است صحیح باشد.

در تحقیق دیگری که توسط خاکپور و همکاران انجام شده است، دلایل رسوب‌گذاری دهانه بندر به جانمایی نادرست



شکل (۴) جانمایی‌های مختلف موج‌شکن و اندرکنش آن با موج غالب [۳].

و ۲۰ درصد جریان غالب از سمت شرق به غرب (اندازه‌گیری در عمق ۱۰ متری) است [۷].

با توجه به مطالعات انجام‌شده، مطالعه اخیر به دلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، اطلاعات بیشتر و نزدیک به واقعیت را ارائه کرده است. این در حالی است که مطالعات پیشین که مبتنی بر نتایج عددی بوده است و تنها مبتنی بر جریان ناشی از شکست موج با داده‌های امواج ISWM بوده است، ضعف‌ها و مشکلاتی را به همراه داشته است. همچنین مدل‌های موردنظر به دلیل نبود اطلاعات اندازه‌گیری کافی در زمان مربوطه و یا عدم دسترسی به آن‌ها، نمی‌توانند گویای وضعیت دقیق هیدرودینامیک منطقه باشند. علاوه بر مطالعات انجام‌شده مطالعات دیگری وجود دارد که به بررسی تأثیر جانمایی بنادر مختلف در رسوب‌گذاری اطراف آن پرداخته است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد شکل هندسی و جانمایی موج‌شکن‌ها روی نرخ رسوب‌گذاری درون لنگرگاه و حجم لایروبی سالانه مؤثر است. مطالعات متعددی نشان می‌دهد که مشکل کم‌عمق شدن درون بنادر و به خصوص دهانه بندر مربوط به پارامترهای متعدد جانمایی موج‌شکن است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸].

مطالعات ذکرشده اگرچه هرکدام برای بندر مشخصی انجام‌شده بود، اما بر تأثیر جانمایی بندر بر رسوب‌گذاری آن تأکید دارند. علی‌رغم مطالعات انجام‌شده، این بندر همچنان گریبانگیر مشکلات شدید رسوبی است. حل مشکل این بندر بدون شناخت جامع از هیدرودینامیک اطراف آن امکان‌پذیر نخواهد بود. در صورت شناخت کافی از وضعیت منطقه امکان ارائه یک مدل عددی امکان‌پذیر خواهد بود. با در اختیار داشتن مدل عددی دقیق، امکان ارائه راه‌حل‌های مختلف و بررسی فنی و اقتصادی گزینه‌های مختلف برای حل مشکلات این بندر وجود خواهد داشت. در ادامه، با استفاده از مدل عددی و داده‌های میدانی موجود وضعیت هیدرودینامیک و رسوب منطقه به‌صورت دویبعی و در نظر گرفتن موج، جریان و رسوب به‌صورت هم‌زمان شبیه‌سازی خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش برای حل معادلات ذکرشده در منطقه نوشهر از نرم‌افزار Mike 21 استفاده شده است. Mike 21 نرم‌افزار قدرتمندی در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای ساحلی است.

آن‌ها براساس اینکه میانگین جریان اندازه‌گیری شده در منطقه حدود ۰/۲ متر بر ثانیه است اقدام به شبیه‌سازی جریان با همین مقدار در منطقه نمودند.

درواقع آن‌ها در مرزها مقدار دبی را به‌گونه‌ای انتخاب نمودند که جریان با سرعت حدود ۰/۲ متر بر ثانیه از اطراف بندر عبور کند و درنهایت متوجه شدند که درجایی که سرعت کم می‌شود احتمال نشست رسوب وجود دارد [۴].

نورمندی و مصطفایی با ارزش‌گذاری پارامترهای مختلف و تأثیرگذار در مشکلات رسوبی بندر و استفاده از نظرات پژوهشگران مختلف، علت اصلی مشکلات رسوبی بندر را کاهش تغییرات تراز سطح آب بیان نمودند. براساس تحقیقات صورت گرفته که براساس تکنیک سلسله مراتبی (AHP) بوده است، تغییرات تراز سطح آب دریای خزر با ۳۴ درصد، بیشترین سهم در افزایش مشکلات رسوبی بندر نوشهر در سالیان اخیر داشته است [۵].

در بین مطالعات صورت گرفته توسط شرکت‌های مشاور، شرکت مهندسی مشاور تهران برکلی در سال ۱۳۹۲ بررسی جامعی از هیدرودینامیک و رسوب منطقه انجام داده است. کارشناسان این شرکت مشاور نشان دادند که مهم‌ترین دلیل رسوب‌گذاری، آورد رسوبات غرب به شرق است، و استفاده از دستک‌های رسوب‌گیر در سمت غرب بندر را از مهم‌ترین راه‌حل‌های ممکن برای کاهش مشکلات رسوبی بندر بیان کردند. این در حالی است که شبیه‌سازی مدل و نتایج بدست آمده براساس داده‌های ISWM در مرز بوده است. آن‌ها برای حل مشکل اختلاف جهت داده‌های موج ISWM با مقادیر اندازه‌گیری، جهت این امواج را ۲۲/۵ درجه به سمت غرب چرخش دادند تا بدین ترتیب نتایج مؤثرتری از شبیه‌سازی جریان استخراج کنند [۶].

اما شاید مهم‌ترین و جامع‌ترین مطالعات انجام‌شده از هیدرودینامیک منطقه نوشهر توسط شرکت مهندسی مشاور پویا طرح پارس انجام‌شده است [۷]. آن‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های یک‌ساله از موج و جریان به تحلیل هیدرودینامیک دریای خزر و به‌ویژه نوشهر پرداختند و اطلاعات مفیدی از منطقه ارائه کردند. آن‌ها اعلام داشتند که جهت امواج غالب از سمت شمال غربی می‌باشد و بیشترین ارتفاع موج شاخص اندازه‌گیری شده در منطقه نوشهر حدود ۳/۵ متر می‌باشد. بررسی جهت جریان اندازه‌گیری شده نشان داده است که ۸۰ درصد جریان غالب از سمت غرب به شرق

WRF که در این مطالعه برای شبیه‌سازی باد سطحی استفاده شده است یک سیستم عددی پیش‌بینی آب و هوا و شبیه‌سازی جوی می‌باشد. یکی از نتایج مطلوب در پروژه پایش و شبیه‌سازی سازی سواحل شمالی کشور، شبیه‌سازی و بهبود مدل باد با استفاده از مدل عددی WRF بوده است. خروجی این مدل شامل سرعت و جهت باد با گام زمانی یک ساعته و گام مکانی ۰/۱ درجه بوده است که در این پروژه از آن به عنوان نیروی محرک استفاده شده است. همچنین، بررسی مشخصات رسوبی در اطراف بندر نوشهر نشان می‌دهد که سمت شرق بندر بر خلاف سمت غرب آن درشت‌دانه تر است. علت این مسئله می‌تواند به دلیل فرسایش شدیدتر قسمت شرقی باشد. اندازه متوسط رسوبی در بالادست بندر حدود ۲۰۰ میکرون و ماسه بوده است. در شکل (۶) وضعیت و مشخصات رسوب در اطراف بندر نوشهر نشان داده شده است. این اندازه‌گیری‌ها در سال ۲۰۱۲ میلادی انجام شده است.

به طور کلی در قسمت غربی بندر، رسوبات در آب‌های عمیق تر یکسان و یکنواخت هستند. از عمق تقریباً شش متر به بعد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصات رسوبی مشاهده نمی‌شود و این تغییرات در طول ساحل نیز یکسان است. البته مقداری لای در آب‌های عمیق تر و نزدیک بندر مشاهده شده است. اما در نواحی ساحلی وقتی از بندر به سمت غرب حرکت می‌کنیم اندازه رسوبات بزرگ‌تر خواهد شد. در مجموع مشخصات رسوبی در قسمت غربی و در محدوده بین رودخانه و بندر یکسان می‌باشد. اما در قسمت شرقی بندر اندازه رسوبات به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. سواحل این قسمت بیشتر به صورت شن می‌باشد. حتی اندازه رسوبات در قسمت شرقی بندر تا دو برابر اندازه آن در آب عمیق قسمت غربی می‌باشد. به طور کلی در قسمت شرقی اندازه رسوبات بزرگ‌تر از قسمت غربی می‌باشد و در این قسمت با دور شدن از بندر اندازه رسوبات به سمت شرق تر، کوچک‌تر خواهد شد [۷].

در ادامه، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی همزمان موج، جریان و رسوب در جدول (۱) آورده شده است. با اجرای مدل در هر گام زمانی، خروجی اجرای مدل موج که شامل تنش‌های تشعشعی است در مدل جریان به کار گرفته می‌شود. مدل جریان نیز با دریافت تنش تشعشعی و همچنین تأثیر باد اجرا خواهد شد.

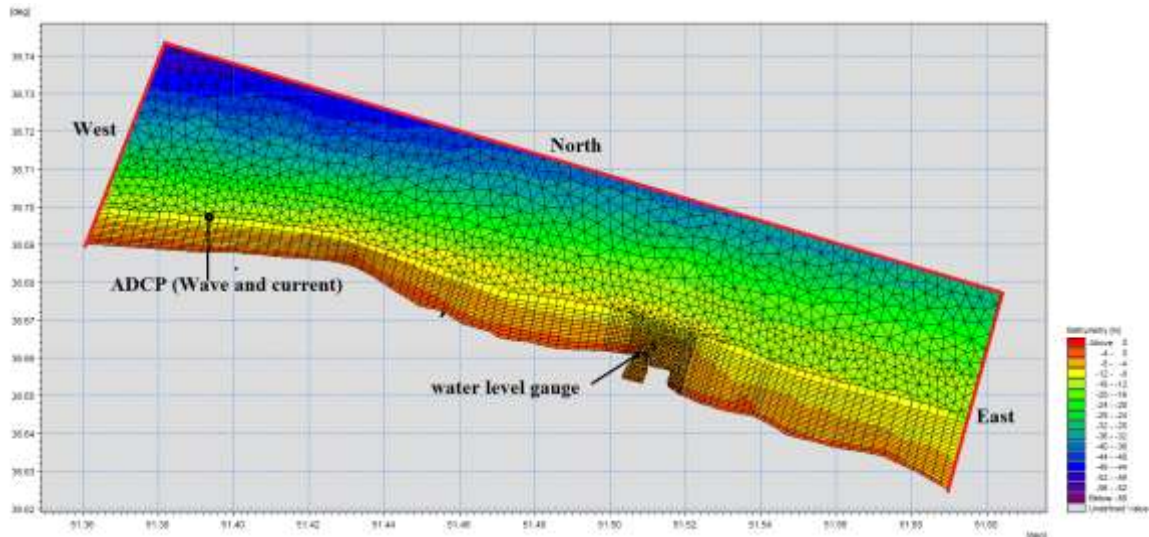
برنامه مورد استفاده در این تحقیق MIKE21/3 Integrated Model است که اثر همزمان موج، جریان و رسوب را می‌تواند بررسی کند. این مدل شامل برنامه‌های مدل انتشار امواج، Spectral Wave (SW)، مدل جریان Flow Model و مدل انتقال رسوب (ST) Sand Transport است. مدل SW یک مدل شبیه‌سازی فرایندهای تولید و انتشار امواج ناشی از باد در یک پهنه آبی است. امواج پس از رسیدن به منطقه کم عمق ساحلی، تحت تاثیر انکسار و شرایط کم عمقی قرار می‌گیرند و سر انجام می‌شکنند. تنش تشعشعی خروجی مهم این مدل است که در مدل جریان استفاده می‌شود.

در مدل همزمان، به منظور تعیین مشخصات جریان از مدل HD استفاده می‌شود که مدل‌سازی جزرومد، باد، جریانات ناشی از موج و جریانات ناشی از تغییرات دما و جرم مخصوص را شامل می‌شود. با بکارگیری این مدل، می‌توان تغییرات سطح آب و جریان‌ها را در هر مکان منطقه‌ی مورد مطالعه، بررسی نمود.

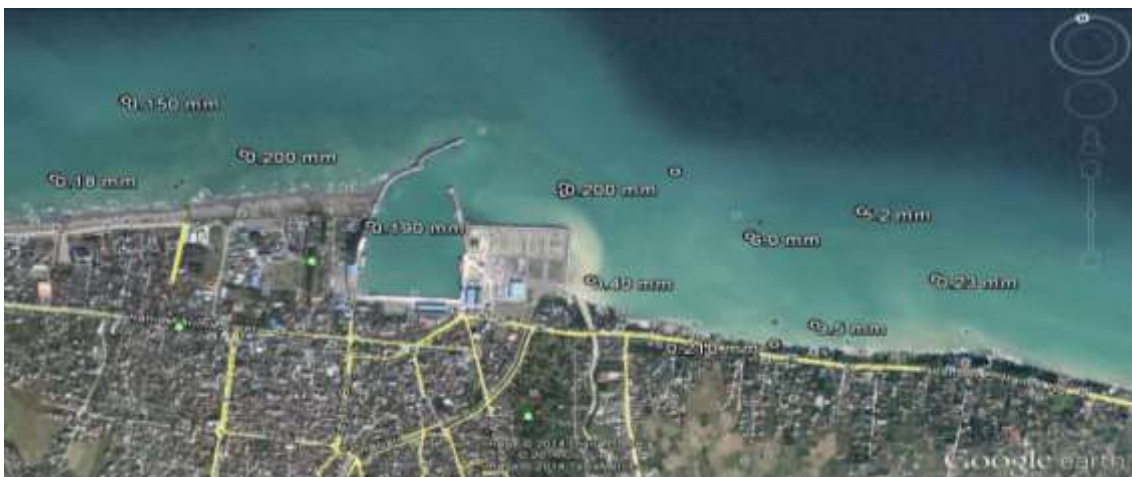
همچنین مدل ST ابزاری است جهت دستیابی به نرخ انتقال رسوبات ماسه‌ای و تغییرات تراز بستر وابسته به آن، در محدوده‌ای که تحت تاثیر جریان قرار دارد. در این مدل، رسوبات غیر چسبنده و ماسه‌ای فرض شده‌اند. در مدل همزمان ST با موج و جریان امکان معلق شدن رسوبات توسط امواج و انتقال آن توسط جریان وجود دارد.

۲-۱- آماده سازی و اجرای مدل

منطقه مورد مطالعه و شبکه محاسباتی مورد استفاده در شکل (۵) نشان داده شده است. شبکه محاسباتی در نزدیک ساحل به صورت مستطیلی و در آب عمیق و محدوده بندر به صورت مثلثی در نظر گرفته شده است. اندازه طول و عرض مش مستطیلی به ترتیب ۵۰ و ۲۰۰ متر می‌باشد. اندازه مش مثلثی در محدوده دهانه بندر نیز حدود ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. این محدوده مورد مطالعه از شمال، شرق و غرب با دریا و مرز باز در ارتباط می‌باشد. مدل مورد نظر به مدت یک سال (۲۰۱۳) اجرا شده است که شامل اجرای همزمان مدل موج (SW)، مدل هیدرودینامیک جریان (HD) و مدل رسوب (ST) می‌باشد. باد به عنوان نیروی محرک هم در مدل موج و هم در مدل جریان استفاده می‌شود. اطلاعات باد استفاده شده در این پژوهش مرجع WRF می‌باشد. مدل



شکل (۵) منطقه مورد مطالعه جهت شبیه‌سازی همزمان موج، جریان و رسوب و موقعیت دستگاه اندازه‌گیری.



شکل (۶) اندازه متوسط رسوبات ماسه‌ای در اطراف بندر نوشهر [۷].

جدول (۱) مشخصات پارامترهای مورد استفاده در مدل همزمان موج، جریان و رسوب.

مشخصات مدل	مقدار
گام زمانی	۳۰۰ ثانیه
مدت مدل‌سازی	۱۰۵۱۲۰ گام زمانی
گسسته‌سازی جهتی موج	۱۶ جهت در ۳۶۰ درجه
تعداد فرکانس	۲۵
کمینه فرکانس	۰/۰۵۵ هرتز
ضریب دلتا*	۰/۸
ضریب زبری بستر در مدل موج	۰/۰۰۲ متر
ضریب سفیدک امواج	۲
ضریب زبری بستر در مدل	۵۰ ($m^{1/3}/s$)
اندازه متوسط دانه‌های بستر	۲۰۰ میکرون
ضریب تغییرات رسوب	۱/۱

* این عبارت ترجمه (DELTA dis) است که یک ضریب پخش در معادلات موج است. معمولاً از این ضریب در مدل‌سازی به عنوان ضریب کالیبراسیون پررود موج استفاده می‌شود.

در نهایت تأثیر همزمان ارتفاع موج و سرعت جریان در مدل رسوب آورده می‌شود. همچنین، در ادامه و در گام زمانی بعدی تأثیر تغییرات بستر در اجرای مدل موج و جریان در نظر گرفته می‌شود. برای مدل موج و جریان، اطلاعات مرزهای باز از مدل بزرگ‌مقیاس دریای خزر که توسط سازمان بنادر و دریانوردی ارائه شده است، اخذ شده است. در مدل رسوب نیز، برای مرزهای باز تغییرات فلاکس رسوبی صفر در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل به مدت یک سال اجرا شده است. لازم به توضیح است که نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری موج، جریان و تراز سطح آب در محدوده بندر مقایسه شده است. اندازه‌گیری موج و جریان توسط دستگاه ADCP و در عمق ۱۰ متری به مدت یک سال صورت پذیرفته است.

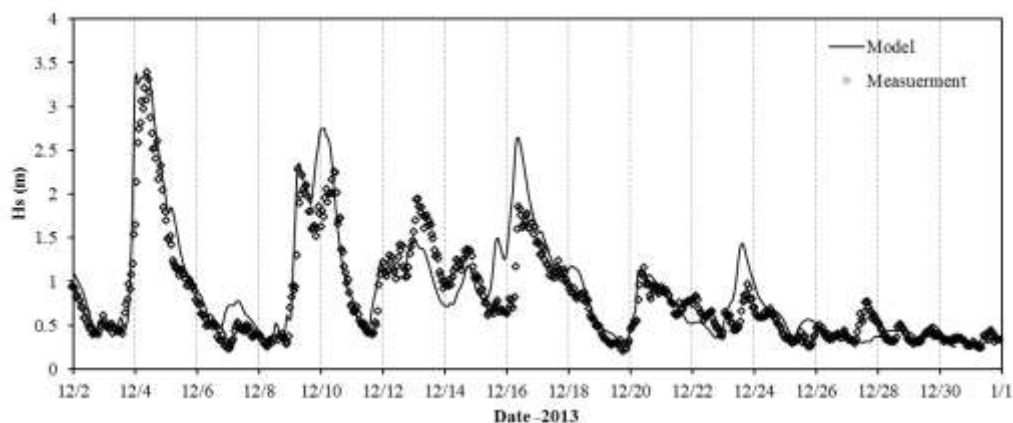
حدود ۳/۴ متر رسیده است که بیشترین مقدار موج ثبت شده در طی یک سال نیز بوده است. این طوفان در چهارم دسامبر اتفاق افتاده است و بررسی نتیجه مدل عددی نشان می دهد که مدل مورد استفاده در این مطالعه به خوبی توانسته است مقدار ارتفاع موج و جهت آن را پیش بینی کند. در شکل (۸) مقایسه تغییرات سرعت جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده توسط مدل را نشان می دهد. همچنین در شکل (۹) مقایسه جهت جریان اندازه گیری و پیش بینی را نشان می دهد. با توجه به این دو نمودار، در چهارم دسامبر جریان قوی (حدود ۰/۷ متر بر ثانیه) از سمت غرب به شرق در جریان است. مدل عددی در مورد پیش بینی جریان و جهت آن عملکرد قابل قبولی دارد. در همین زمان تراز سطح آب ۳۰ سانتیمتر بالا می رود و مدل عددی نیز به خوبی توانسته است همین مقدار را پیش بینی کند (شکل (۱۰)). با بررسی طوفان های دیگر مشخص می شود، زمان پیک ارتفاع موج، جریان و تراز سطح آب در یک زمان اتفاق می افتد.

علاوه بر این، یک دستگاه ترازسنج نیز در داخل بندر و در محدوده اسکله نفتی نصب شده است. موقعیت دستگاه های ذکر شده در شکل (۵) نشان داده شده است.

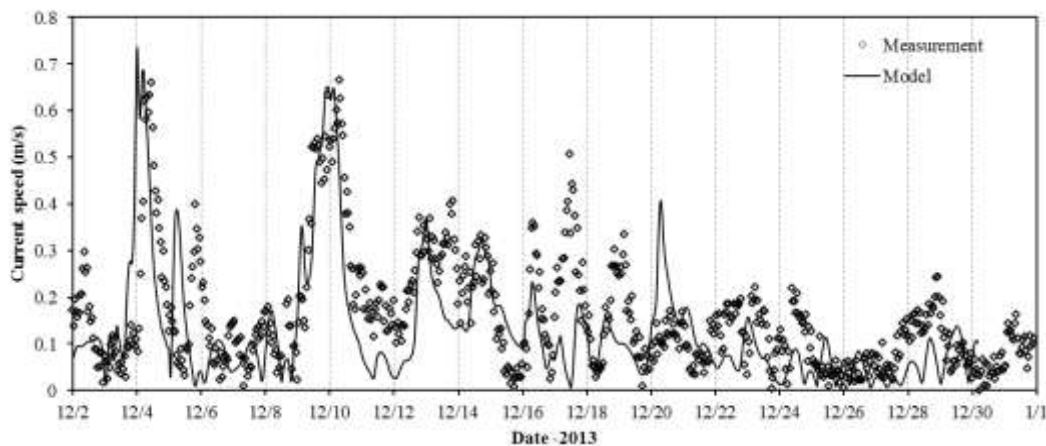
۳- نتایج شبیه سازی و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با مقادیر اندازه گیری ارتفاع موج، جریان و تغییرات تراز سطح آب در محدوده نوشهر مقایسه می شود. به عنوان نمونه این نتایج تنها برای ماه دسامبر و به مدت یک ماه مورد ارزیابی قرار می گیرد. هدف از ارزیابی نتایج مدل با مقادیر اندازه گیری در ماه دسامبر، وقوع چند طوفان با ارتفاع موج بلند و جریان شدید در این ماه بوده است.

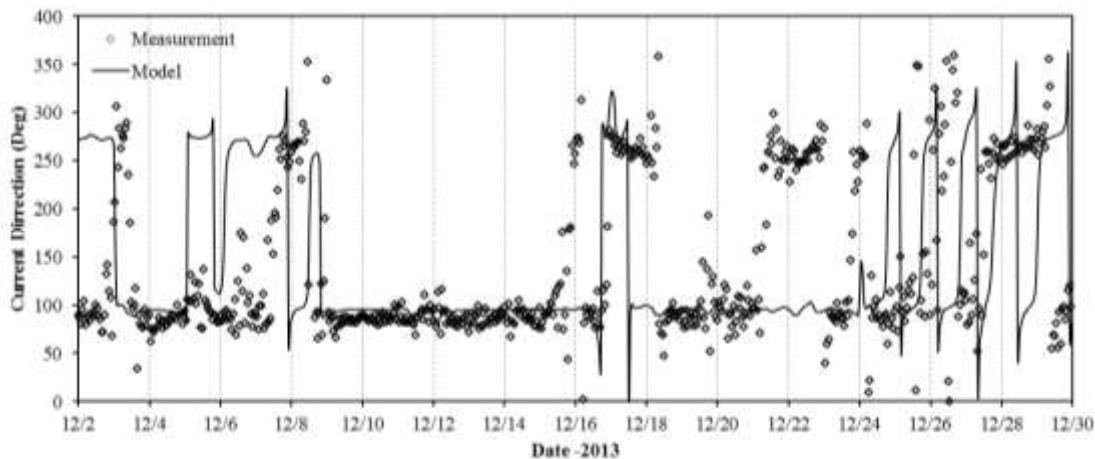
شکل (۷) مقایسه تغییرات ارتفاع موج اندازه گیری شده و پیش بینی شده را برای ماه دسامبر نشان می دهد. با توجه به شکل مشخص است که ۴ طوفان در ماه دسامبر با ارتفاع موج بیشتر از یک متر رخ داده است. در طوفان اول ارتفاع موج تا



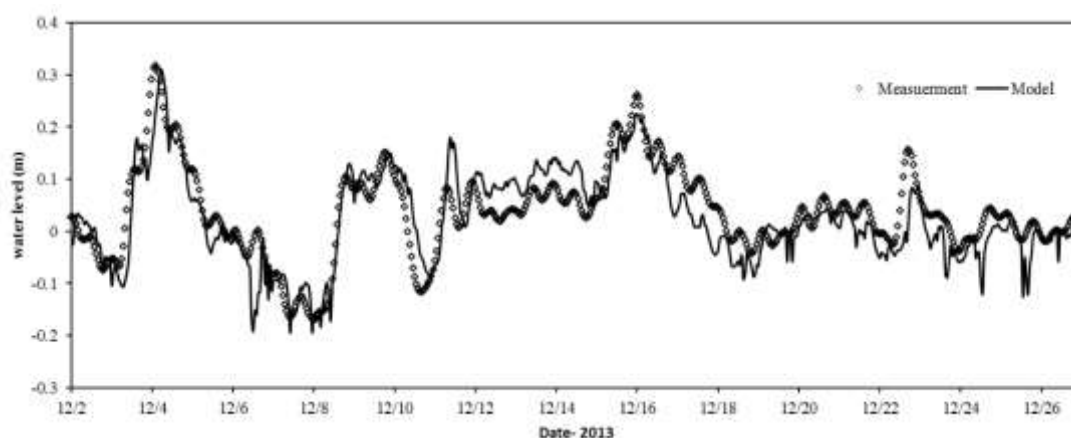
شکل (۷) مقایسه ارتفاع موج اندازه گیری شده و پیش بینی مدل برای ماه دسامبر ۲۰۱۳.



شکل (۸) مقایسه جریان اندازه گیری شده و پیش بینی مدل برای ماه دسامبر ۲۰۱۳.



شکل (۹) مقایسه جهت جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی مدل برای ماه دسامبر ۲۰۱۳.



شکل (۱۰) مقایسه تغییرات تراز سطح آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی مدل برای ماه دسامبر ۲۰۱۳.

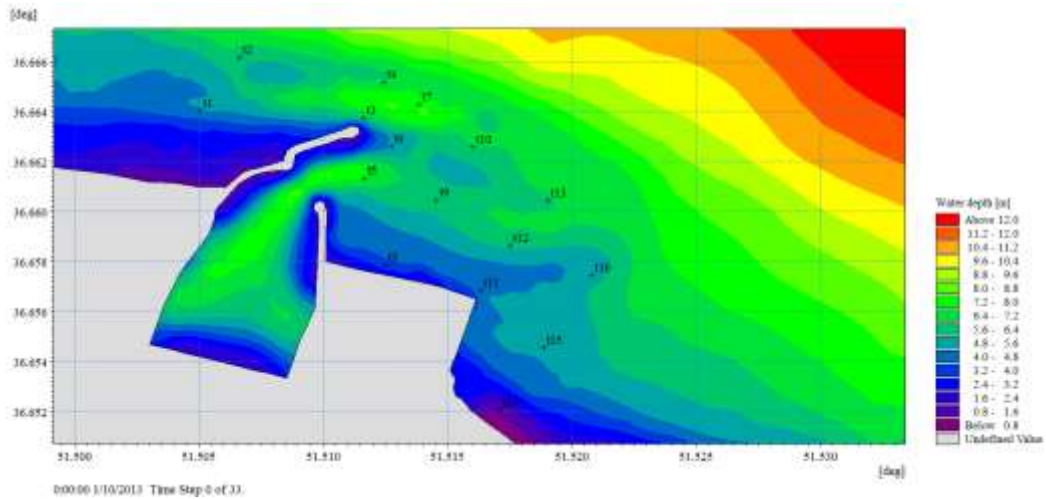
سطح آب را پیش‌بینی کند. با اطمینان به مدل عددی پیشنهادی وضعیت جریان در اطراف بندر نوشهر به مدت یک‌سال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

شکل (۱۱) موقعیت ایستگاه‌های مختلف به‌منظور بررسی جریان را نشان می‌دهد. شکل (۱۲) گل‌جریان ایستگاه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مشخص است که در ایستگاه t_1 و t_2 جریان غالب به سمت شرق بندر می‌باشد. در واقع بیش از ۸۰ درصد جریان غالب منطقه به سمت شرق و کمتر از ۲۰ درصد آن به سمت غرب بندر می‌باشد.

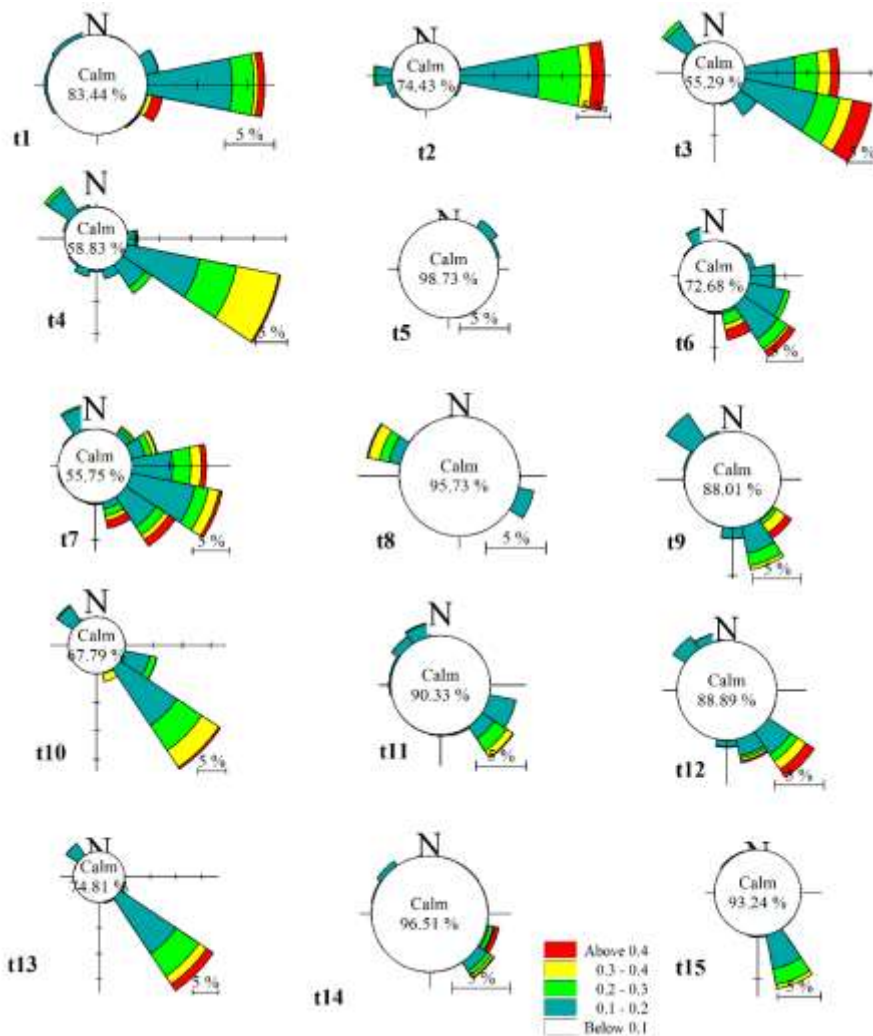
در مقایسه این دو ایستگاه هم می‌توان گفت در ایستگاه t_2 که در مناطقی با عمق بیشتر واقع شده است، سرعت جریان بزرگ‌تر از ایستگاه t_1 می‌باشد. در ایستگاه t_3 و t_4 که جریان تحت تأثیر هد بازوی غربی قرار می‌گیرد شدت می‌گیرد و به سمت حوضچه بندر منحرف می‌شود. در ایستگاه t_5 جریان قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود و این قسمت تحت تأثیر گردابه‌ای قرار دارد که ساعت‌گرد در حال چرخش است.

در مورد عملکرد مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای هیدرودینامیکی این‌گونه باید گفت که عملکرد مدل موج در پیش‌بینی موج قابل قبول بوده است. مدل موج تقریباً همه طوفان‌ها را پیش‌بینی کرده است و خطای مدل موج در پیش‌بینی بعضی از طوفان‌ها تا حدود ۲۵ درصد بوده است. در مقابل عملکرد مدل جریان نسبت به مدل موج ضعیف‌تر بوده است. مدل جریان قادر به پیش‌بینی یک طوفان که در ۱۷ دسامبر اتفاق افتاده است نبوده است. در این زمان سرعت جریان حدود ۰/۵ متر بر ثانیه بوده است که مدل عددی در پیش‌بینی آن موفق نبوده است. مدل عددی پیش‌رو جهت جریان‌های شدید را به‌درستی پیش‌بینی می‌کند اما با توجه به شکل (۹) در پیش‌بینی جهت جریان‌های با سرعت کمتر از ۰/۲ متر بر ثانیه عملکرد قابل قبولی نداشته است.

از سوی دیگر، مدل عددی در پیش‌بینی تغییرات تراز سطح آب نسبت به مدل جریان و موج موفق‌تر بوده است. این مدل به‌خوبی توانسته است با دقت مناسبی کاهش و افزایش تراز



شکل (۱۱) ایستگاه‌های مورد نظر جهت بررسی جریان به مدت یک سال.



شکل (۱۲) گل جریان ایستگاه‌های مختلف.

گردابه ساعت‌گرد قرار دارد و جریان‌های شرق به غرب آن نیز به همین علت است. اما برای جریان غرب به شرق در این

در نقطه t_6 و t_7 جریان تحت تأثیر فضای باز جلوی بندر است و پخش می‌شود. در نقطه t_8 و t_{11} جریان در مسیر حرکت

شده درست باشد، انگاه، در زمان طوفان امواج به موج‌شکن‌های اراضی استحصالی برخورد می‌کنند و منجر به معلق شدن آن می‌شوند. رسوبات معلق شده در مسیر جریان گردابه‌ای قرار می‌گیرند و دوباره به سمت دهانه بندر می‌رسند. در واقع وضعیت هیدرودینامیکی در اطراف بندر نوشهر به گونه‌ای رقم خورده است که دهانه بندر مقصد نهایی همه رسوبات منطقه باشد.

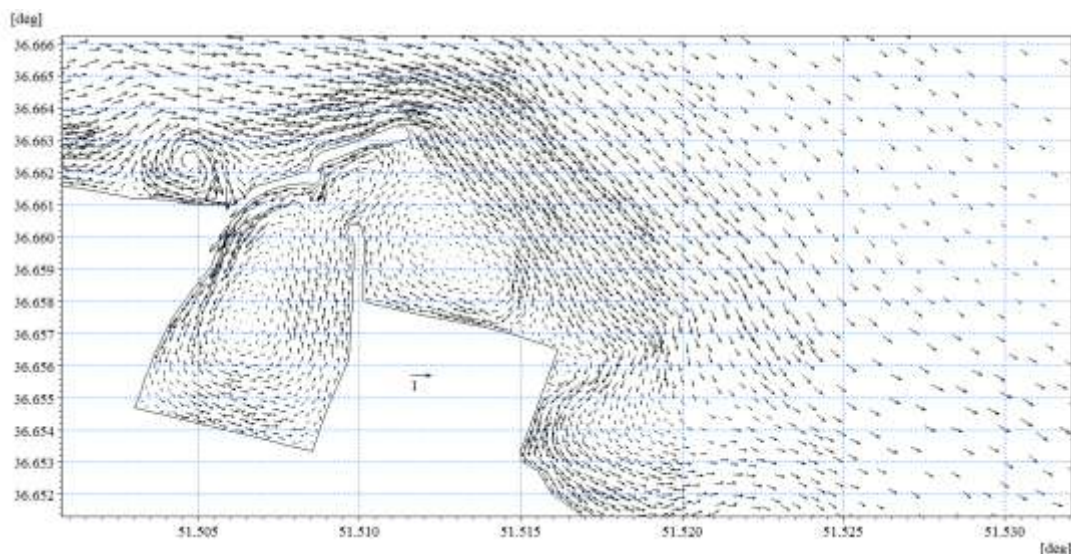
در ادامه مدل‌سازی صورت گرفته برای مشخص شدن وضعیت رسوب‌گذاری در اطراف دهانه بندر در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این شکل تغییرات بستر را به مدت یک سال شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که در جلوی دهانه بندر و قسمت شمالی اراضی استحصال شرقی رسوب‌گذاری شدیدی اتفاق می‌افتد. در مقابل میزان نشست رسوبات در داخل حوضچه ناچیز است. در این شکل مشخص می‌شود که بعد از یک سال می‌تواند حدود ۲ متر در داخل کانال رسوب‌گذاری اتفاق بیافتد که این عدد با توجه به نتایج بدست آمده تا حدود بسیار زیادی مورد تأیید کارشناسان لایروبی بندر نوشهر نیز می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

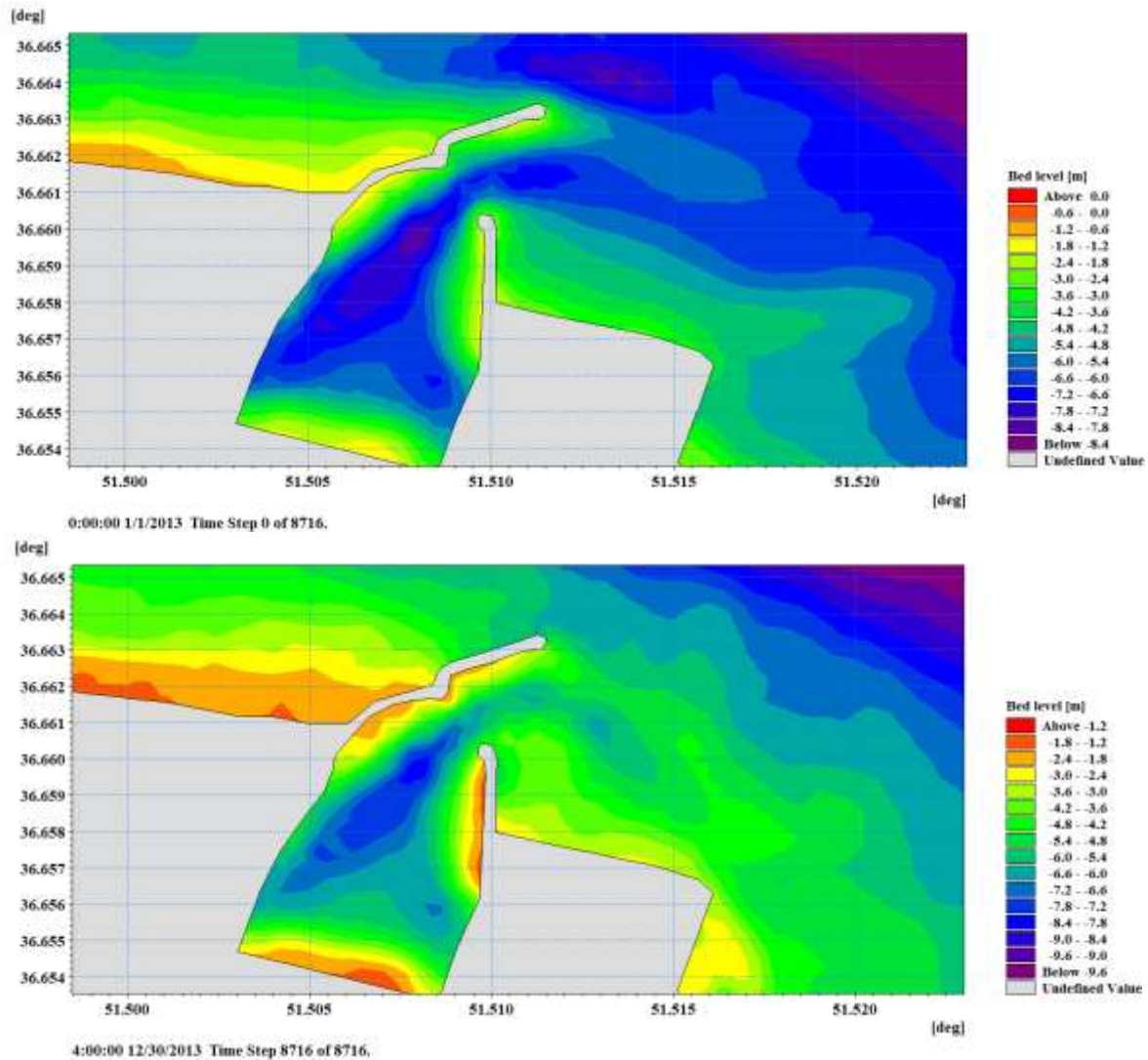
در این تحقیق، اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای هیدرو دینامیکی مانند امواج، جریان، تراز سطح آب و رسوب‌گذاری در محدوده بندر نوشهر شده است. یک مدل محلی برای همین منظور انتخاب شده است.

ایستگاه جریان زمانی وجود دارد که جریان‌های گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود و جریان‌های اصلی با برخورد به قسمت شمالی اراضی شرقی به سمت شرق تغییر جهت می‌دهند. ایستگاه t_9 و t_{12} نیز در مسیر جریان گردابه‌ای و جریان‌های اصلی قرار دارد. از سوی دیگر ایستگاه t_{10} و t_{13} تحت تأثیر جریان اصلی قرار دارد که به سمت سواحل شرقی منحرف می‌شود. ایستگاه‌های t_{14} و t_{15} نیز تحت تأثیر اراضی شرقی قرار دارند و جریان‌ها در این قسمت ضعیف هستند. به‌طور کلی، شکل (۱۳) می‌تواند الگوی مناسبی از ساختار جریان در اطراف بندر نوشهر را نشان بدهد. بررسی و آزمایش میدانی با رهاسازی اجسام شناور در قسمت‌های مختلف بندر در زمان طوفانی نیز مؤید ساختار جریان ذکر شده است. در این آزمایش میدانی اجسام شناوری که در سمت غربی بندر رها می‌شدند با عبور از دهانه بندر و برخورد با قسمت شمالی اراضی شرقی مجدداً به سمت دهانه بندر برمی‌گشتند.

درواقع با تعیین الگوی جریان می‌توان دلیل رسوب‌گذاری در اطراف دهانه بندر و مشکلات آن را مشخص نمود. با توجه به نتایج بررسی یک ساله جریان در نقاط مختلف بندر نوشهر این گونه می‌توان گفت که جریان‌های غربی با حمل رسوبات رودخانه‌های بالادست به سمت بندر حرکت می‌کنند. بخشی از رسوبات به دلیل کاهش ناگهانی سرعت در جلوی بندر می‌نشینند و بخشی دیگر از جلوی دهانه عبور کرده و به سمت پایین دست حرکت می‌کنند. انتظار می‌رود رسوبات عبور کرده به استحصال دوم و به‌خصوص قسمت شمالی آن برخورد می‌کنند و در همان جا ته‌نشین می‌شوند. اگر فرضیه مطرح



شکل (۱۳) الگوی جریان در اطراف بندر.



شکل (۱۴) تغییرات بستر در اطراف بندر نوشهر، بستر اولیه (شکل بالا) و بستر نهایی (شکل پایین).

غربی و به دلیل رابطه پیوستگی با افزایش ناگهانی سرعت مواجه می‌شوند. جریان آب با عبور از هد، با فضای باز جلوی بندر روبه رو می‌شوند و به همین دلیل سرعت آن کاهش پیدا می‌کند این کاهش ناگهانی سرعت در جلوی بندر می‌تواند تا حدود زیادی در نشست رسوب در این منطقه موثر باشد. بررسی گل جریان‌ها همچنین نشان داده است که یک گردابه در سمت شرق بندر تشکیل می‌شود که به نظر می‌رسد این گردابه می‌تواند در انتقال مجدد رسوبات عبور کرده از جلوی دهانه بندر به سمت دهانه موثر باشد. در این مطالعه، الگوی رسوب‌گذاری در اطراف بندر نوشهر به کمک مدل عددی شبیه‌سازی شده است. نتایج تغییرات بستر و نشست رسوب همخوانی مناسبی با مشاهدات میدانی دارد. بنابراین می‌توان به کمک مدل عددی پیشنهاد شده جانمایی‌های مختلفی از بندر نوشهر را مورد ارزیابی قرار داد

مرزهای این مدل از مدل بزرگ‌مقیاس که توسط سازمان بندر و دریانوردی اجرا شده است، انتخاب شده است. میدان باد WRF با دقت مکانی ۰/۱ درجه و دقت زمانی یک ساعت نیز به عنوان نیروی محرک باد در طول مدت مدل‌سازی به مدل اعمال گردید. مدل همزمان موج، جریان و رسوب به مدت یک سال اجرا شده است. بررسی مقایسه نتایج شبیه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی با مقادیر اندازه‌گیری آن نشان داده است که مدل توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی دارد. در ادامه و با استفاده از نتایج مدل صحت‌سنجی شده جریان در اطراف بندر به صورت گل‌جریان ارائه شده است. بر اساس بررسی یک‌ساله جریان در اطراف بندر نوشهر و همچنین مشاهدات میدانی مشخص شده است که جریان غالب در منطقه از سمت غرب به شرق می‌باشد. این جریان‌ها با عبور از هد بازوی

- [10] Wang, R., "The Review and Prospect of Siltation Study on Tianjin Port". Proc., Coast. and Port Engrg in Developing Countries; Vol.2, pp.1478-14-90, 1987.
- [11] Tanaka, N., Sato, S., "Topographic Change Resulting from Construction of a Harbor on Sandy Beach : Kashima Port", Proc., 15th Conf. on Coast. Engrg., pp.1824-1847, 1976.
- [12] Zhangquan, M., and Xiankun, K., "The Application of Coastal Dynamic geomorphology to Harbour-Site Choosing -an Example of Qinhuangdao Oil Dock". Proc., Coast. and Port Engrg in Developing Countries, Vol.1, pp.809-818, 1987.
- [13] Healy, T., Stephens, S., Black, K., Gorman, R., Cole, R., and Beamsley, B., "Port Redesign and Planned Beach Renourishment in a High Wave Energy Sandy-Muddy Coastal Environment, Port Gisborne, New Zealand" Geomorphology, Vol.48, No.1, pp.163-177, 2002.
- [14] Scraggs, C., Mocke, G., Smit, F., Vieria, F., and Zhu, X., "Overview of the Coastal Engineering Studies Performed for the Design of a New Commercial Port in Qatar", Proc., Coasts and Ports 2013: 21st Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 14th Australasian Port and Harbour Conference, Engineers Australia, 671, 2002.
- [15] Cáceres, R. A., Zyserman, J. A., and Perillo, G. M., "Analysis of Sedimentation Problems at the Entrance to Mar del Plata Harbor", Journal of Coastal Research, Vol.32, No.2, pp.301-314, 2016.
- [16] Pang, Q., "Key Parameters of Breakwater Layout in Muddy Port of Lianyungang", International Journal of Engineering and Technology, Vol.9, No.4, 2017.
- [17] Katoh, K., "Coastal Zone Management Sediment Movement and Beach Transformation Due to Port Construction in Japan", International Compendium of Coastal Engineering, p.471, 2015.
- [18] Shenghui, J., Rijun, H., Xiuli, F., Longhai, Z., Wei, Z., and Aijiang, L., "Influence of the Construction of the Yantai West Port on the Dynamic Sedimentary Environment", Marine Georesources & Geotechnology, pp.1-9, 2017.

و در نهایت جانمایی که بتواند مشکل رسوبی بندر نوشهر را حل کند، جهت انجام مدل فیزیکی انتخاب نمود. به نظر می‌رسد مدل رسوب ارائه شده در این پژوهش می‌تواند برای اصلاح جانمایی بندر و پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری مورداستفاده قرار بگیرد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از سازمان بنادر و دریانوردی به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات خودشان تشکر می‌کنند.

۶- مراجع

- [۱] رستمی، س.، نظامیوند چگینی، ا.، غبرایی، ع.، لشته نشایی، م و اصفهانی زاده، م.، بررسی روند رسوب‌گذاری در حوضچه بندر نوشهر، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۹۰.
- [۲] خاکپور، ا.، بررسی تأثیر هندسه و مورفولوژی بندر بر بهینه سازی رسوبگذاری (مطالعه موردی بندر نوشهر)، پایان نامه ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۵.
- [3] Yükses, Ö., "Effect of Breakwater Parameters on Shoaling of Fishery Harbors", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, January/February, pp.13-22. 1995.
- [۴] اکبری نسب، م.، عبدالله‌نژاد، ا.، متاجی، غ.؛ بررسی جریانات موازی ساحل بر روند رسوب‌گذاری در کانال دسترسی بندر نوشهر، سومین کنفرانس بین‌المللی اقیانوس‌شناسی، ۸ و ۹ اسفندماه ۱۳۹۴.
- [۵] نورمند، ب. و مصطفایی، م.، بررسی عوامل مؤثر بر رسوب‌گذاری کانال دسترسی و حوضچه آرامش بندر (مطالعه موردی- بندر نوشهر)، اولین کنگره سراسری فناوری‌های نوین ایران، تهران، ۱۳۹۳.
- [۶] تهران برکلی، م.، مجموعه مطالعات مرحله اول پروژه احداث ساماندهی حفاظتی شرقی و غربی بندر نوشهر، اداره کل بنادر و دریانوردی استان مازندران، ۱۳۹۰.
- [۷] پویا طرح پارس، م.، پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور، موجود در اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، معاونت توسعه و تجهیز بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹۳.
- [8] Tanaka, N., ("Beach Erosion at the Up-Drift Coast of a Breakwater Prolonged Obliquely from the Shore: Senadi Port". Coast. Sediments' 77, pp. 1026-1041. 1987
- [9] Cartney, B.L.Mc, Herrmann, F.A.Jr, Simmons, B.H., "Estuary Waterway Projects-Lessons Learned", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol.117, No.4, pp.409-421, 1991.