

بررسی عددی رسوب‌گذاری ناشی از موج و جریان در بندرانزلی با در نظر گرفتن توسعه بازوهای موج‌شکن

حامد محمدنژاد مریان^{۱*}، حبیب حکیم‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۱۳

*نویسنده مسئول

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۵

© نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده:

رسوب‌گذاری در بنادر بسته (محصورشده با موج‌شکن‌ها) یکی از مشکلات موجود این نوع حوضچه‌های بندری است. جهت رفع مشکل و تأمین امنیت ناوبری، نیاز به لایروبی ادواری است. درحالی‌که با انجام تمهیداتی در طراحی این بنادر، به‌جای عملیات لایروبی با هزینه سالانه بسیار زیاد، از ورود رسوبات تا اندازه قابل توجهی ممانعت کرد. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر طرح توسعه موج‌شکن‌های غربی و شرقی بندر انزلی بر شرایط هیدرودینامیک و رسوب‌گذاری داخل حوضچه بندر و همچنین شناسایی پارامترهای فیزیکی با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی و نیز تحلیل میزان نفوذ موج به حوضچه بندر در شرایط قبل و بعد از توسعه موج‌شکن‌ها می‌باشد.

در مقاله حاضر تغییرات الگوی موج و جریان ناشی از ساخت موج‌شکن‌های جدید به کمک MIKE 21 مدل سه‌بعدی موج و جریان (اف. ام) بررسی، و سعی شده است با استفاده از داده‌های ورودی به‌هنگام برای مدول‌ها و به‌کارگیری کمترین فرضیات ساده‌سازی، مدل‌سازی منطقه انجام شود. بدین منظور محدوده‌ای با ابعاد ۱۰ کیلومتر در راستای ساحل و ۹ کیلومتر در امتداد عمود بر ساحل به‌عنوان میدان محاسباتی منطقه موردنظر انتخاب شده و پس از اجرای مدل عددی منطقه‌ای هیدرودینامیک برای سناریوهای مختلف وزش و سرعت باد، شرایط مرزی از مدل منطقه‌ای برای مدل محلی استخراج شده است. نتایج عددی شبیه‌سازی حاکی از آن است که با احداث موج‌شکن‌های جدید بخشی از رسوباتی که قبل از احداث آنها به‌طور طبیعی وارد دریا می‌شد تله‌اندازی می‌شوند، به عبارتی بخش توسعه‌یافته بندر به‌عنوان تله رسوب‌گیر عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، موج، جریان، بندرانزلی، موج‌شکن، بسته نرم‌افزاری Mike^۴

۱. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - سازه‌های دریایی دانشگاه صنعتی سهند تبریز، H_Mohammadnezhad@Sut.ac.ir

۲. استاد دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Hakimzadeh@Sut.ac.ir

3. MIKE 21/3 Coupled Model FM

4. MIKE Software

۱- مقدمه

مسئله رسوب‌گذاری و خسارت‌های ناشی از آن یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در ساخت و توسعه بنادر است. هزینه‌های گزاف احداث و یا لایروبی بنادر موجب شده است در امر احداث و توسعه بنادر، حساسیت و دقت لازم در مرحله طراحی صورت گیرد تا عمر و کارایی سازه‌های دریایی افزایش یابد (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۰). بشر با احداث بنادر و سازه‌های ساحلی در حقیقت سبب تغییر در طبیعت و الگوی پارامترهای دریایی شده است. بنابراین در این مناطق با مسائل فراوانی روبرو شده است که از مهم‌ترین آنها تغییر الگوی جریان منطقه است. با تغییر رژیم جریان در بعضی از نواحی به دلیل پایین بودن سرعت جریان، امکان رسوب‌گذاری به وجود می‌آید و در مقابل در بعضی نواحی، ساحل دریا دچار فرسایش می‌شود. عوامل فوق باعث تغییر شرایط بستر در داخل بنادر و ساحل اطراف می‌گردند.

از آنجا که مشکل رسوب‌گذاری درون حوضچه آرامش بنادر و کانال دسترسی و مسائل انتقال رسوب در محدوده‌ی بندرگاه‌ها از مسائل مهمی محسوب می‌شوند که تأثیر مستقیمی در کاربری و اقتصاد بنادر می‌گذارند، لذا بررسی این مسئله به لحاظ سنگینی هزینه‌های نگهداری و لایروبی و نیز توسعه آبی بنادر از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

پارامترهای دریایی نظیر موج و جریان هرچند از نظر تئوری بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با این وجود، به دلیل طبیعت پیچیده آنها و تصادفی بودن موج و جریان و تأثیر طیف گسترده‌ای از عوامل طبیعی نظیر باد و ...، تلاش می‌شود تا برآورد مناسبی از نحوه عملکرد و الگوی آنها در محیط‌های دریایی انجام پذیرد. مطالعات هیدرودینامیک مناطق ساحلی گام نخست در جانمایی بنادر و سازه‌های ساحلی، ریخت‌شناسی سواحل، انتقال رسوب و آلودگی، طراحی سازه‌های ساحلی و دیگر پدیده‌های مرتبط با ساحل می‌باشد. در مقابل، عدم‌پیش‌بینی مناسب رفتار پدیده‌هایی نظیر موج و جریان در سواحل، سبب ایجاد خسارت‌های سنگین و جبران‌ناپذیری مانند فرسایش و رسوب‌گذاری در بنادر، تخریب سازه‌های ساحلی و سایر مشکلات مرتبط خواهد شد.

تحقیق حاضر مطالعه‌ای موردی است که به بررسی تأثیر توسعه موج‌شکن‌های غربی و شرقی بندر انزلی در طرح توسعه موج‌شکن‌ها و تأثیر آن بر روی حوضچه می‌پردازد. بندر انزلی در محل مصب جریان‌های خروجی تالاب بین‌المللی انزلی به دریا ساخته شده، ولی همواره به دلیل وضعیت طولی و جهتی موج‌شکن‌ها با مشکل ورود امواج با ارتفاع بلند به همراه جریان‌های تند دریایی به داخل بندر روبرو بوده است. همچنین با توجه به اینکه اسکله‌های موجود برای بهره‌برداری بندر در زمان‌های پرتراфик کافی نیست، با توسعه موج‌شکن‌ها و استحصال محدوده بیشتر، امکان احداث تعداد اسکله‌های بیشتری فراهم می‌شود. در نتیجه با توسعه موج‌شکن‌ها علاوه بر حل مشکل ورود امواج با ارتفاع زیاد، ظرفیت ناوبری بندر نیز به‌طور مؤثری افزایش می‌یابد.

۱-۱- مرور منابع علمی و پژوهش‌های انجام‌شده قبلی

به دلیل اهمیت تجاری - صنعتی بندرانزلی که بزرگ‌ترین بندر ایران در دریای خزر می‌باشد تاکنون مطالعات متنوعی در خصوص آن انجام‌شده است که می‌توان به نمونه‌های زیر اشاره کرد:

بهلولی و همکاران (۱۳۸۳)، پژوهشی با عنوان «مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی رسوب‌گذاری در بندرانزلی» انجام داده‌اند. در این مطالعه برای بررسی و برآورد بار رسوبی سعی شده است کلیه پارامترهای مؤثر در مسئله مورد توجه قرار گیرند. از جمله این عوامل اثر جریان‌های ناشی از مد طوفان، اثر توأم جریان و موج در حمل رسوب، اثر بار رسوب بستر مربوط به رسوب ساحلی و نیز تأثیر بار رسوب معلق در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل‌سازی سه‌بعدی جریان مسئله لایه‌بندی آب‌شور و شیرین با توجه به اثراتی که این مسئله در نرخ رسوب‌گذاری در حوضچه بندر دارد، مورد توجه قرار گرفته است. پس از انجام مدل‌سازی مشخص شد، حجم رسوب ته‌نشین شده در بندر انزلی، سالانه بین ۱۷۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ مترمکعب است. از این مقدار رسوب، رقمی معادل ۳۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ مترمکعب ناشی از رسوبی است که از سمت تالاب به داخل بندر حمل شده، حجم فراوانی از آن قبل از موج‌شکن فرعی به‌صورت یکنواخت پخش می‌شود. بقیه حجم رسوبات نوع رسوب بستر است که حجمی بین ۱۳۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰ مترمکعب را به خود اختصاص داده است.

یگانه بختیاری و محمدیان (۱۳۸۷)، مقاله دیگری با عنوان «بررسی اثر نوسانات سطح آب دریای خزر بر روی میزان انتقال رسوب کرانه‌ای (مطالعه موردی: بندر انزلی)» ارائه دادند. در این تحقیق، میزان دبی و علل انتقال رسوب در نوار ساحلی جنوب دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفته است. روش بررسی در این مطالعه، استفاده از مشاهدات بلندمدت خط ساحلی، آنالیزهای آماری خصوصیات باد و موج، بررسی خصوصیت‌های رسوب و سپس مدل‌سازی عددی تغییرات خط

ساحلی بوده است. برای مدل‌سازی عددی تغییرات خط ساحلی از مدل عددی لیت‌پک^۵ از زیرمجموعه‌های بسته نرم‌افزاری مایک استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل، چنین نتیجه گرفته شد که طول بازوهای موج‌شکن در مقایسه با پهنای منطقه فعال ساحلی کوچک است. نتایج نشان داد بخش عمده‌ای از رسوبی که در امتداد ساحل جابجا می‌شود از انتهای بازوها عبور می‌کند و به‌سوی دیگر بندر حمل می‌گردد و در حقیقت موج‌شکن نمی‌تواند از حمل رسوب در طول ساحل جلوگیری کند.

کنارسری و همکاران (۱۳۸۹)، مقاله‌ای با عنوان «بررسی اثرات زیست‌محیطی ناشی از اندرکنش تالاب و دریا در حوضچه بندر انزلی» ارائه دادند. به‌منظور تعیین اثرات ناشی از اندرکنش تالاب و دریا در حوضچه بندر، مطالعاتی جهت تشخیص منابع اصلی ورود رسوب به داخل حوضچه و تحلیل روند رسوب‌گذاری صورت گرفت و تأثیر جریان‌های ترکیبی تالاب و دریا بر روی الگوی رسوب‌گذاری در محدوده حوضچه بررسی شد. از آنجا که تالاب انزلی به‌عنوان مخزن بزرگ رسوب‌گیر عمل می‌کند و بخش عمده‌ای از آورد رسوب حوضه آبریز را درون خود به دام می‌اندازد و رسوبی که فرصت عبور از تالاب را پیدا کند اغلب بسیار ریزدانه (در حد لای و رس) است، بنابراین جریانی که از تالاب به سمت دریا است، رسوب قابل‌توجهی را در حوضچه ته‌نشین نمی‌کند. وسعت تالاب بندر انزلی سبب شده جریان‌های ورودی از سمت رودخانه‌های تغذیه‌کننده تالاب، بعد از ورود به تالاب توان حمل خود را از دست داده و رسوب آنها به‌طور تدریجی در داخل تالاب ته‌نشین شود، در نتیجه دلتای رسوب در داخل تالاب شکل گیرد. بررسی‌های انجام‌شده در مورد منشأ رسوب با توجه به اندازه‌گیری‌های رسوب بستر نیز مؤید این است که عمده رسوب داخل بندر منشأ ساحلی دارد. در ادامه عوامل مؤثر بر نفوذ رسوب از سمت دریا به داخل بندر از جمله مد طوفان، اثر امواج، جریان‌های موازی ساحل و الگوهای مورفولوژی قابل‌مشاهده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، همچنین میزان تأثیر هر یک از آنها بررسی شد و در نهایت به این نتیجه رسیدند که منبع رسوب موجود، رسوب دریایی و رسوب حمل شده توسط تالاب بوده و این نسبت معادل ۸۰ به ۲۰ است. از دیگر موارد اندرکنش تالاب و دریا مسئله تداخل آب شور دریا و آب شیرین تالاب بوده که موجب لایه‌بندی شوری در حوضچه شده میزان این شوری بین ۱٪ در قسمت سطحی تا ۱۳٪ در عمق ۴/۵ متری تغییر می‌کند.

جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۲)، پژوهشی در مورد ارزیابی نرم‌افزار هیدرودینامیکی سازمان بنادر و دریانوردی^۶ به منظور شبیه‌سازی انتقال امواج پس از احداث موج‌شکن جدید ساحل انزلی انجام دادند که در آن، مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده ارزیابی شده است. جهت انجام این تحقیق، امواج ساحل بندرانزلی پس از احداث موج‌شکن جدید با استفاده از زیرمدل طیف‌های موج^۷ از بسته نرم‌افزاری سازمان بنادر شبیه‌سازی گردید. ارزیابی مدل با بررسی‌های هیدرودینامیک امواج حاصل از مدل سازمان بنادر نشان داد که نتایج شبیه‌سازی برای ارتفاع و پرپود موج به ترتیب ۹۴٪ و ۵۵٪ با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی همبستگی دارند.

جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۳)، مقاله‌ای با عنوان «شبیه‌سازی انتقال امواج ساحل انزلی پس از احداث موج‌شکن‌های جدید» باهدف مقایسه نرم‌افزار ایرانی سازمان بنادر Dynamics و MIKE 21 انتشار دادند. پس از برپایی مدل و انجام اجراهای آزمایشی، شبیه‌سازی در دوره ۱۹ روزه انجام گرفت و سپس به منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده، داده‌های شبیه‌سازی شده از هر دو مدل استخراج و باهم مقایسه شدند. نتایج نشان داد شبیه‌سازی انتقال امواج توسط نرم‌افزار سازمان بنادر با دقت بالایی منطبق بر داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل MIKE 21 است. به‌طوری‌که ارتفاع امواج شبیه‌سازی‌شده با این نرم‌افزار به میزان ۹۹٪ با داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل MIKE 21 همخوانی دارد.

۲- مواد و روش‌ها

خلاصه‌ای از واقعیت یک پدیده را مدل و فرایند ایجاد و انتخاب مدل‌ها را مدل‌سازی گویند. هدف از مدل‌سازی عددی تبدیل پدیده‌های فیزیکی به فرمول‌های ریاضی و حل آن به کمک رایانه است. به عبارتی جوهر اصلی مدل‌سازی عددی، تبدیل مسئله به شکل ریاضی است (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۰). با در اختیار داشتن یک نرم‌افزار مدل‌سازی می‌توان در دنیای مجازی بسیاری از مشکلات ریز و درشت مسئله را، چه از دیدگاه طراحی و یا ساخت پیدا و نسبت به رفع آن اقدام کرد. مدل‌سازی به معنای تقلید واقعیت فیزیکی در دنیای مجازی است. مدل‌سازی، امروزه در علوم مهندسی جایگاه ویژه‌ای دارد و به‌عنوان یکی از مراحل اصلی در انجام پروژه‌ها مطرح است. اهمیت مدل‌سازی به این دلیل است که اولاً فرایند طراحی را آسان‌تر می‌کند و ثانیاً باعث صرفه‌جویی فراوانی در هزینه و زمان طراحی می‌شود. از این گذشته با استفاده از شبیه‌سازی، میزان موفقیت در طرح‌های مهندسی افزایش چشمگیری پیدا می‌کند (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۰).

5. LITPACK

6. PMO Dynamics

7. Spectral Waves

به منظور شبیه‌سازی ریاضی هر پدیده‌ای، شناخت پدیده و عوامل مؤثر بر آن الزامی است. با کسب این آگاهی می‌توان ابزار مورد نیاز برای شبیه‌سازی آن پدیده را انتخاب کرده و به جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز جهت انجام این کار پرداخت. بعد از جمع‌آوری آمار و اطلاعات و انتخاب ابزار مورد نیاز، طرح‌ریزی مراحل مختلف شبیه‌سازی انجام شده است، پس از اجرای این مراحل و حصول نتایج تحلیل و ارزیابی پدیده‌ها ارائه می‌شود.

۲-۱ - توصیف مدل Mike 21

در این تحقیق مسئله انتقال امواج از آب عمیق به آب کم‌عمق در بندر انزلی پس از احداث موج‌شکن جدید، به وسیله مدل هیدرودینامیکی MIKE 21 شبیه‌سازی شده است. برنامه محاسباتی مشهور به مایک که توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک^۸ و با همکاری انستیتو کیفیت آب^۹ پایه‌ریزی و به مرور زمان تکمیل و توسعه یافته است، دارای قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه مدل کردن پدیده‌های مربوط به خورها، دریاچه‌ها، نواحی کم‌عمق ساحلی، خلیج‌ها و دریاها است. نرم‌افزار Mike سیستم برای شبیه‌سازی عددی جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی، با در نظر گرفتن سطح آزاد سیال است. مؤسسات فوق‌الذکر نرم‌افزار Mike را حاصل ۲۰ سال تلاش پیوسته برای تهیه یک سیستم پیشرفته مدل‌سازی ریاضی می‌دانند که در بیش از ۳۰۰ مورد در پروژه‌های مختلف سراسر دنیا کاربرد عملی داشته و بر اساس نتایج و تجربیات حاصل از آنها مورد تجدیدنظر قرار گرفته و تکمیل شده است.

برای بررسی الگوی جریان، ابتدا باید عوامل مؤثر در ایجاد جریان از قبیل باد و موج تعیین گردد. از نکات برجسته این تحقیق می‌توان به بهره‌گیری از مدل ریاضی MIKE 21 مدول سه‌بعدی موج و جریان (اف.ام) با قابلیت ایجاد یک سیکل کاملاً دینامیکی بین مدول‌های موج و جریان اشاره کرد. در این روند در هر گام زمانی تنش‌های تشعشی از مدول موج طیفی به مدل هیدرودینامیک، با در نظر گرفتن شرایط اولیه سطح آب و جریان، از مدول هیدرودینامیک به مدول موج طیفی انتقال می‌یابد (MIKE 21, 2011).

شرایط مرزی در مرزهای باز میدان محاسباتی مهم‌ترین بخش در روند شبیه‌سازی پدیده‌ها است، به طوری که دسترسی به شرایط مرزی مناسب سبب کاهش محسوس خطا در نتایج و از منظر دیگر کوتاه نمودن زمان واسنجی مدل می‌گردد. با توجه به استفاده هم‌زمان از مدول‌های موج و جریان، نیازمند شرایط مرزی جداگانه‌ای برای هر مدل خواهیم بود. طبق بررسی‌های عددی انجام شده در روند حساسیت‌سنجی، مشاهده شد مدل عددی جریان (هیدرودینامیک) بسیار بیشتر از مدل موج به شرایط مرزی حساس بوده و متأثر از آن است. اهمیت این امر به اندازه‌ای است که نمی‌توان انتظار داشت تا با شرایط نامناسب مرزی برای مدل هیدرودینامیک جریان در روند صحت‌سنجی مدل، به همگرایی و حصول نتایج مناسب دست یافت.

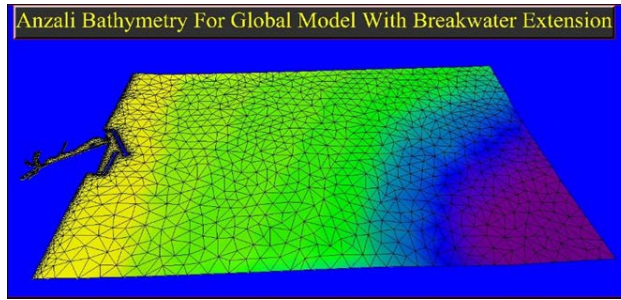
شرایط مرزی در غالب موارد حاصل اندازه‌گیری‌های میدانی می‌باشند. به این منظور پارامترهایی نظیر سرعت و جهت جریان، تراز آب یا شار جریان در مرزهای مدل هیدرودینامیک توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری ثبت می‌گردند و نتایج به دست آمده از این مشاهدات در مدل اعمال می‌گردد. در تهیه مدل موج نیز، روش به همین ترتیب بوده و سعی در تعیین مشخصات امواج نظیر ارتفاع موج مشخصه، پریود موج و جهت موج میانگین به خصوص در آب عمیق می‌گردد. در مواردی همانند مورد مطالعاتی تحقیق شده به دلیل فقدان برداشت‌های دریایی مناسب جهت استفاده در مرزهای مدل، می‌توان از نتایج مدل عددی با ابعاد بزرگ‌تر که دربرگیرنده میدان محاسباتی مورد مطالعه باشد، به عنوان شرایط مرزی استفاده نمود. با توجه به راهکار ذکر شده و از طرف دیگر با توجه به حساسیت مدل جریان به شرایط مرزی، به منظور کاهش اثرات مرزهای باز در میدان محاسباتی در ابتدای امر مدلی هیدرودینامیک از مدل منطقه‌ای تهیه شد. هر چند این امر سبب افزایش روند مدل‌سازی از منظر زمانی و همچنین تهیه داده‌های مربوطه می‌گردد، اما در ادامه، استفاده از نتایج مدل مذکور به عنوان شرایط مرزی در مدل نهایی، فرایند محقق را در کالیبراسیون آن یاری می‌رساند.

در مدول هیدرودینامیک، شرایط مرزی به صورت تراز سطح آب از مدل منطقه‌ای برای مدل محلی استخراج شد. شرایط مرزی به کاررفته در مدل موج به این صورت بود که یک مدل منطقه‌ای به ابعاد نه کیلومتر در امتداد ساحل و شانزده کیلومتر در راستای عمود بر ساحل همانند شکل (۱) انتخاب گردید و در زیرمدل طیف‌های موج MIKE 21 (اف-ام) برای مرز شمالی مدل منطقه‌ای، اطلاعات موج آب عمیق دریافتی از سازمان بنادر و دریانوردی قرار داده شد و مرزهای شرق و غرب به صورت مرز جانبی^{۱۰} تعریف شد و نهایتاً از مدل منطقه‌ای مدل موج، شرایط مرزی برای مرز شمالی مدل محلی استخراج گردید. در مدول هیدرودینامیک، شرایط مرزی به صورت تراز سطح آب از مدل منطقه‌ای برای مدل محلی استخراج شد.

8. Danish Hydraulic Institute

9. Water Quality Institute

10. Lateral Boundary



شکل (۱): محدوده مطالعاتی مدل منطقه‌ای موج به کاررفته در مدل‌سازی

۲-۲- کالیبراسیون مدل

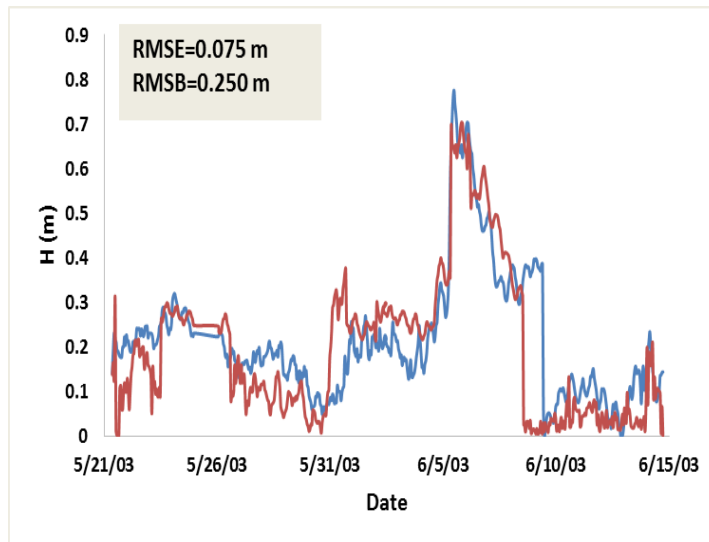
هدف از کالیبراسیون یک مدل ریاضی، تعیین شرایطی است که به کمک آنها مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده فیزیکی باشد. پس از تهیه مدل، باید نتایج آن در هر دوره شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته و یا اصطلاحاً مدل کالیبره گردد. در این قسمت از روند شبیه‌سازی، با تغییر در پارامترهای آزاد تأثیرگذار در محاسبات که ضرایب کالیبراسیون نامیده می‌شوند، سعی در بهبود نتایج خواهد شد. به‌طور کلی مراحل انجام واسنجی شامل (۱) انتخاب داده‌های مناسب جهت مقایسه، (۲) انتخاب نقاط و بازه‌های زمانی، (۳) انتخاب پارامترهای مناسب جهت واسنجی، (۴) اجرای مدل‌سازی، (۵) مقایسه نتایج خروجی با اندازه‌گیری‌ها در نقاط متناظر و (۶) تغییر و اصلاح پارامترهای باز در جهت بهبود نتایج می‌باشد.

با توجه به اینکه مدول مورد استفاده کوپل دینامیکی میان موج و جریان است، از این‌رو تعداد ضرایب کالیبراسیون افزایش یافته و این امر سبب طولانی شدن این مرحله تا حصول نتایج اطمینان‌بخش گردید. برخی از ضرایب کالیبراسیون به شرح ذیل (۱) ضریب زبری کف (مدول موج و جریان)، (۲) ضریب اصطکاک باد (مدول موج و جریان)، (۳) لزجت گردابی افقی (مدول موج و جریان)، (۴) ضریب شکست موج (مدول موج)، (۵) White Capping (شکست موج آب عمیق) برای ارتفاع موج (مدول موج) و (۶) White Capping برای دوره تناوب موج (مدول موج) می‌باشد. جهت اجرای مدل‌های مختلف برای کالیبره نمودن سرعت جریان و تراز سطح آب در محیط بندر و دریا در چندین مرحله (حدوداً ۱۰ بار) مدل هیدرودینامیک اجرا گردید و با تغییر ضرایب مختلف مدل سعی گردید تا حد امکان نتایج مدل ریاضی هیدرودینامیک با اطلاعات محیطی اندازه‌گیری شده از تطابق خوبی برخوردار باشد. لازم به ذکر است برای کالیبره کردن مدل موج از ارتفاع موج هم استفاده شده است. نهایتاً پس از بررسی‌های مختلف، تهیه مدل‌های متنوع و مقایسه ضرایب به دست آمده با تحقیقات انجام گرفته در بندر انزلی ضرایب صحت‌سنجی به دست آمدند که در جدول (۱) نشان داده شده است (فتوحی و سعادت‌خواه، ۱۳۸۷).

جدول (۱): ضرایب کالیبراسیون مدل نهایی موج و جریان

پارامتر صحت‌سنجی	مدل جریان	مدل موج
ضریب زبری کف	$70 \text{ (m}^{1/3}/\text{s)}$	$\text{Kn} = 0.002 \text{ (m)}$
ضریب اصطکاک باد	0.001255	$\alpha = 0.018$
لزجت گردابی افقی	Smagorinsky (constant value= $0.28 \text{ (m}^2/\text{s)}$)	-
ضریب شکست موج	-	$\gamma = 0.65$
White Capping (ارتفاع موج)	-	$C_{\text{dis}} = 2$
White Capping (دوره تناوب موج)	-	$\delta = 0.8$

در ضمن مقایسه نتیجه اجرای دهم برای تغییرات ارتفاع موج در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): مقایسه تغییرات ارتفاع موج ثبت‌شده با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در محدوده بندر

۲-۳- منطقه مورد مطالعه

بندر انزلی در جنوب غربی دریای خزر، در شمال شهر بندر انزلی و در استان گیلان واقع است. بزرگ‌ترین و فعال‌ترین بندر حاشیه جنوبی دریای خزر است که مجهز به امکانات مدرن تخلیه و بارگیری است و دارای رتبه سوم بین بنادر کشور بعد از بندر امام خمینی و بندر شهید رجایی از لحاظ ظرفیت تخلیه و بارگیری است (سایت اداره کل بنادر استان گیلان). این بندر در باریکه بین تالاب انزلی و دریای خزر، در موقعیت جغرافیایی $28^{\circ} 49'$ و $28^{\circ} 37'$ قرار گرفته است. به واسطه شرایط خاص اقلیمی و عوامل طبیعی حاکم بر منطقه خصوصاً آبراهه‌های منتهی به بندر، محدوده بندر را می‌توان به دو بخش نسبتاً مجزا به نام‌های انزلی و غازیان تقسیم نمود. آبراهه اصلی بندر، این دو بخش را به یکدیگر متصل می‌نماید. منطقه غازیان محل اتصال ۴ روگای اصلی منشعب از تالاب به نام‌های سوسرروگا، پیربازار روگا، راسته خاله روگا و نهنگ روگا است. در سمت غرب بندر و بافاصله کمی از غازیان نیز روگای شنبه‌بازار قرار دارد. شکل (۳) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۰).

تالاب انزلی از پدیده‌های طبیعی مهم به شمار می‌رود و اختلاط و اتصال آن به دریا از مجاورت محل طرح صورت می‌گیرد. آب حاصل از بارندگی‌ها و مازاد آب‌های آبیاری توسط رودخانه‌های بزرگ و کوچک و تعدادی زهکش وارد تالاب انزلی می‌گردد. آب‌های جمع‌آوری شده توسط تالاب از طریق ۵ روگا (خروجی تالاب) پس از عبور از داخل تالاب انزلی وارد دریای خزر می‌گردند. این روگاها پس از به هم پیوستن در محل بندر انزلی مجرای بزرگ خروجی آب تالاب را تشکیل می‌دهند. از نظر اکولوژیک، تالاب انزلی در حقیقت مانند مصب بزرگی عمل می‌کند که محدوده آن تا داخل تالاب، یعنی تا جایی که شوری آب صفر شود، ادامه دارد. این ارتباط یک‌سویه نبوده و حالتی متقابل بین این دو پیکره آبی برقرار است؛ به نحوی که آب شیرین سبک‌تر، از بالای دهانه نهنگ روگا خارج و از بخش‌های زیرین آب شورتر و سنگین‌تر دریای خزر وارد تالاب می‌شود (سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۰).



(ج)



(ب)



(الف)

شکل (۳): منطقه مورد مطالعه؛ (الف) ایران، (ب) ناحیه بندرانزلی، (ج) بازوهای موج شکن بندرانزلی

۲-۴- اجرای مدل

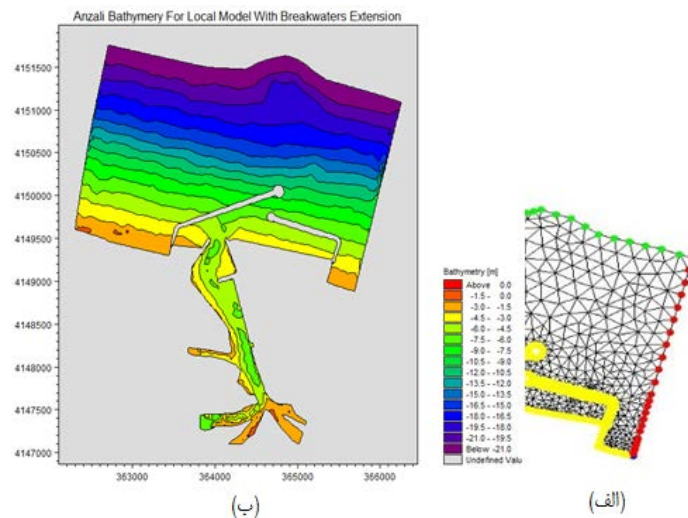
۲-۴-۱- برپایی مدل

منظور از برپایی مدل^{۱۱}، معرفی هندسه و شرایط طبیعی مسئله با حداکثر دقت ممکن به شکل قابل حل برای مدل است. به علاوه، چگونگی حل مسئله توسط مدل نیز در این فرایند در قالب پارامترهای مختلف به مدل معرفی می‌گردد. در این بخش، توضیحاتی در مورد مراحل مختلف برپایی مدل آورده شده است.

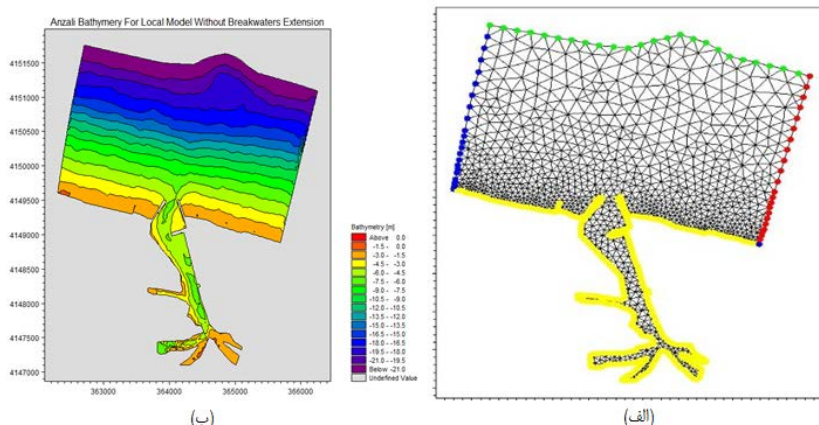
۲-۴-۲- تهیه فایل شبکه بندی و عمق نگاشت

داده‌های مورد نیاز جهت تهیه فایل شبکه بندی و عمق سنجی، شامل موقعیت مرزهای خشکی و باز مدل و نیز هیدروگرافی در محدوده مدل است. در همین رابطه جهت آماده سازی اطلاعات عمق سنجی مدل منطقه ای از نقشه هیدروگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ و برای مدل محلی از اطلاعات هیدروگرافی انجام شده توسط مرکز تحقیقات آب، با مقیاس ۱/۵۰۰۰ و ۱/۲۰۰۰ استفاده شده است. شبکه بندی با مدل مایک صفر زیرمدل تولید شبکه (مش)^{۱۲} انجام می‌گیرد. برای انجام شبکه بندی دو روش وجود دارد که با توجه به شرایط حاکم و نتایج مورد نظر می‌توان از آنها استفاده کرد. روش اول تولید شبکه به صورت شبکه های با ساختار، روش دوم تولید شبکه بندی های بی ساختار است که روش دوم مشتمل بر شبکه بندی های مثلثی و مستطیلی است.

ایجاد فایل شبکه بندی نامنظم کار بسیار پیچیده ای در فرایند مدل سازی محسوب می‌شود. یک فایل شبکه بندی اعماق را به موقعیت های مختلف وصل می‌کند و حاوی اطلاعاتی شامل شبکه های محاسباتی، اعماق آب و شرایط مرزی است. در شبکه بندی ناحیه مورد نظر با دور شدن از ساحل مساحت شبکه ها افزایش می‌یابد. استفاده از شبکه های درشت تر برای کاهش زمان اجرای برنامه مدل سازی است. شبکه بندی نهایی مورد استفاده شامل ۳۰۰۴ گره و ۴۸۵۳ المان است. در مدل محلی نمایش داده شده، طول مرز شمالی ۳۵۶۰ متر و طول مرزهای غربی و شرقی ۲۰۰۰ متر است. شکل های (۴) و (۵) نقشه عمق سنجی و شبکه بندی بندر انزلی را نشان می‌دهند.



شکل (۴): (الف) شبکه بندی، (ب) نقشه عمق سنجی محدوده مطالعاتی در مدل محلی با توسعه بازوهای موج شکن



شکل (۵): (الف) شبکه‌بندی و (ب) نقشه عمق‌بخشی محدوده مطالعاتی در مدل محلی بدون توسعه بازوهای موج‌شکن

۲-۴-۳- تعیین گام زمانی حل معادلات

تعیین گام زمانی حل معادلات یکی از مراحل مهم در برپایی مدل است و اندازه آن بستگی به ابعاد شبکه و سرعت گروهی امواج دارد. افزایش گام زمانی از سویی باعث کاهش مدت اجرای مدل شده و از سوی دیگر سبب کاهش دقت شبیه‌سازی و یا گسسته شدن جواب‌ها می‌گردد.

مدل عددی مورد استفاده، قابلیت محاسباتی بسیار مناسبی در زمینه انتخاب گام زمانی دارد؛ به عبارت دیگر می‌توان با تعیین مقدار حداقل و حداکثر برای گام زمانی محدوده‌ای مشخص کرد تا حداکثر گام زمانی مناسب با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده و ابعاد شبکه‌بندی در ناحیه مورد نظر اعمال گردد. این قابلیت سبب می‌شود تا زمان مدل‌سازی کاهش یابد. برای این منظور مقدار حداقل $0/1$ ثانیه و حداکثر 10 ثانیه در هر دو مدول موج و جریان انتخاب گردید. در ضمن مدول موج نیز به صورت کاملاً طیفی بوده و گسسته سازی فرکانسی به صورت لگاریتمی بوده و به طور معمول در 16 امتداد گسسته‌سازی جهت انجام شده است.

۲-۴-۴- اطلاعات موج ورودی

مهم‌ترین منبعی که در ارتباط با امواج طرح منطقه وجود دارد، نتایج پروژه مدل‌سازی امواج آب‌های ایران ($ISWM^{13}$) است. این پروژه توسط اداره کل مهندسی سواحل و بنادر در حوزه معاونت فنی و مهندسی سازمان بنادر و دریانوردی تعریف و توسط مرکز ملی اقیانوس‌شناسی به همراه موسسه تحقیقات هیدرولیک دانمارک انجام شد. پروژه در دو فاز، (۱) مدل‌سازی و پیش‌بینی مشخصات موج در دریای مازندران و (۲) مدل‌سازی امواج دریاهای جنوب ایران در بازه‌های زمانی (۱۹۹۲ - ۲۰۰۳) میلادی انجام شد. در پروژه $ISWM$ پس از بررسی داده‌های مختلف و مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی از داده‌های بلندمدت باد $ECMWF^{14}$ به عنوان باد ورودی مدل استفاده شده است. پس از تهیه مدل عددی موج دریای مازندران، کالیبراسیون آن با داده‌های بویه‌های موجود در حاشیه جنوبی خزر (بویه نکا، بندر امیرآباد و بندرانزلی) انجام گرفت و دقت نتایج حاصله بنا به تأیید رسمی مشاور خارجی پروژه مذکور حداقل 80% اعلام گردید. در این پروژه با استفاده از اطلاعات سری زمانی باد حاصل از اجرای مدل‌های هواشناسی و توسط مدل طیفی عددی نسل سوم مایک ۲۱ مدل (SW)، سری زمانی ۱۱ ساله امواج تولید شده است که اطلاعات مربوط به هر منطقه را می‌توان تهیه نمود و از نتایج آن استفاده کرد (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۸۷). در پروژه کنونی از اطلاعات ایستگاه موجود در روبروی بندر و در عرض جغرافیایی $37/625^{\circ}$ و طول جغرافیایی $49/5^{\circ}$ با کد $ISWM$ 5-9 جهت استخراج آمار و اطلاعات موج آب عمیق استفاده شده است. داده‌های سری زمانی مربوط به این نقطه شامل اطلاعات ارتفاع و پرید و جهت متوسط امواج می‌باشند که از این نقطه به عنوان شرایط مرزی در مرز باز شمالی مدل موج استفاده شد.

۲-۴-۵- اطلاعات باد ورودی

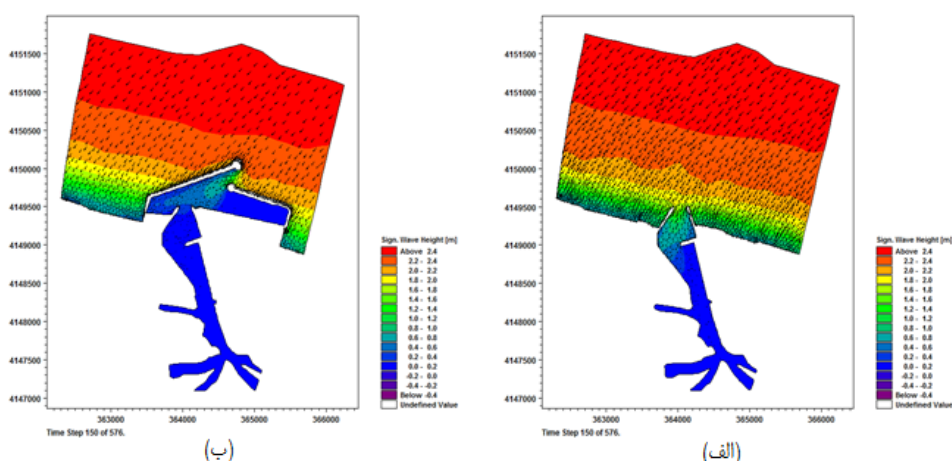
باد عاملی است که سبب ایجاد طوفان و امواج می‌شود. این مسئله علاوه بر تأثیر بر روی وضعیت هیدرودینامیک جریان، سبب اعمال نیروهای خارجی بر تأسیسات و تجهیزات بندری و لنگرگاه‌ها می‌شود، به گونه‌ای که حتی ممکن است سبب تخریب سازه‌ها و تجهیزات ساحلی گردد. علاوه بر این می‌تواند بر روی عملیات اجرایی پروژه در مرحله ساخت نیز مؤثر باشد.

در روند مدل‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیکی، باد به‌عنوان یک عامل مهم شناخته شده است، به طوری که عدم دقت در انتخاب مناسب داده باد به‌عنوان یک داده ورودی در مدل عددی سبب تولید خطای محسوس در نتایج خواهد شد، به همین دلیل جمع‌آوری داده‌های مناسب از منابع متنوع و مقایسه آنها با یکدیگر و در نهایت انتخاب صحیح داده ورودی امری مهم تلقی می‌شود. در این خصوص منابع مهم داده‌های باد به ترتیب زیر هستند.

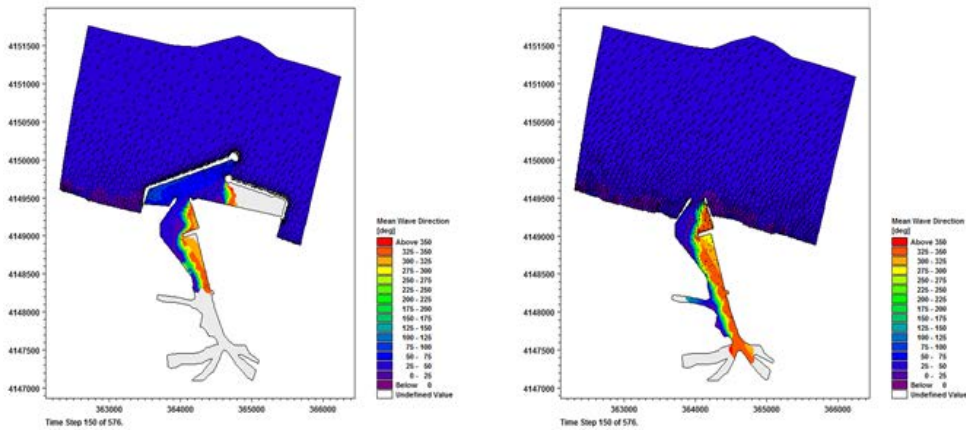
داده‌های باد ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بندر انزلی: در این پروژه اطلاعات مربوط به باد از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک به محل پروژه دریافت شده است. ایستگاه مذکور به علت دور بودن از عوارض زمین مانند کوه‌ها و ساختمان‌های بلند از حداقل اختلال^{۱۵} این‌گونه عوارض در آمار ثبت‌شده برخوردار است و ضمن نزدیکی ایستگاه فوق به منطقه دریایی مورد مطالعه، بیشترین تطابق را بین مشخصات باد اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه و سطح آب فراهم کرده است. داده‌های این ایستگاه به‌صورت برداشت‌های ۳ ساعته سرعت و جهت باد است. بازه زمانی اطلاعات مورد اشاره از سال ۱۹۹۲ تا پایان سال ۲۰۰۳ است. **داده‌های باد مربوط به ECMWF در محدوده بندر انزلی:** داده‌های باد مربوط به مدل ECMWF در محدوده بندر انزلی از سازمان بنادر و دریانوردی پروژه ISWM تهیه شد. در روند مدل‌سازی این پروژه به دلیل کمبود شرایط مرزی مناسب، علاوه بر مدل محلی یک مدل کلی نیز تهیه شده است که به تناسب نیاز به تهیه داده‌های باد برای مدل کلی خواهد بود. داده‌های این مدل هواشناسی با فواصل زمانی ۳ ساعته سرعت و جهت باد است. اطلاعات مورد اشاره از سال ۱۹۹۲ تا پایان سال ۲۰۰۳ تهیه شده است.

۳- بحث و تحلیل

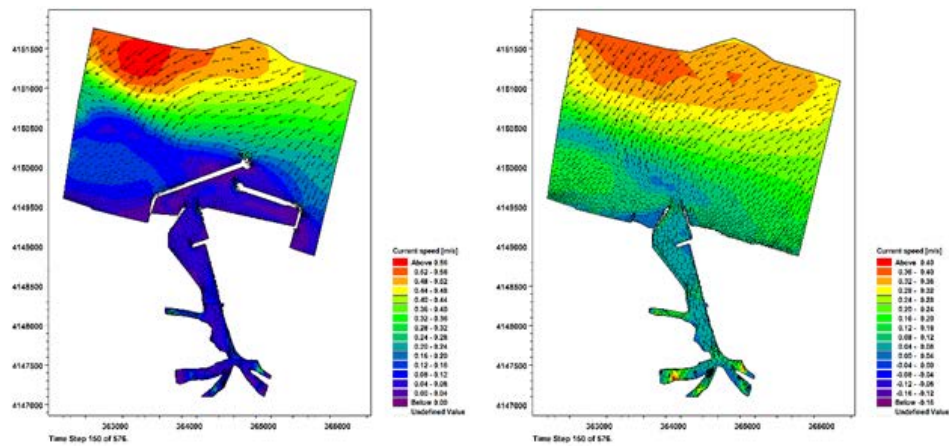
در این قسمت پس از آماده‌سازی عمق‌سنجی‌ها، برپایی و کالیبره نمودن مدول‌های موج و هیدرودینامیک برای مدل محلی و نیز استخراج شرایط مرزی از مدل منطقه‌ای برای بکار بستن در مدل محلی هیدرودینامیک، نتایج شبیه‌سازی عددی استخراج شد. در ذیل نتایج به‌دست‌آمده با توجه به جهت باد غالب شمال شرقی در دو حالت قبل و بعد از توسعه موج‌شکن بررسی شده است.



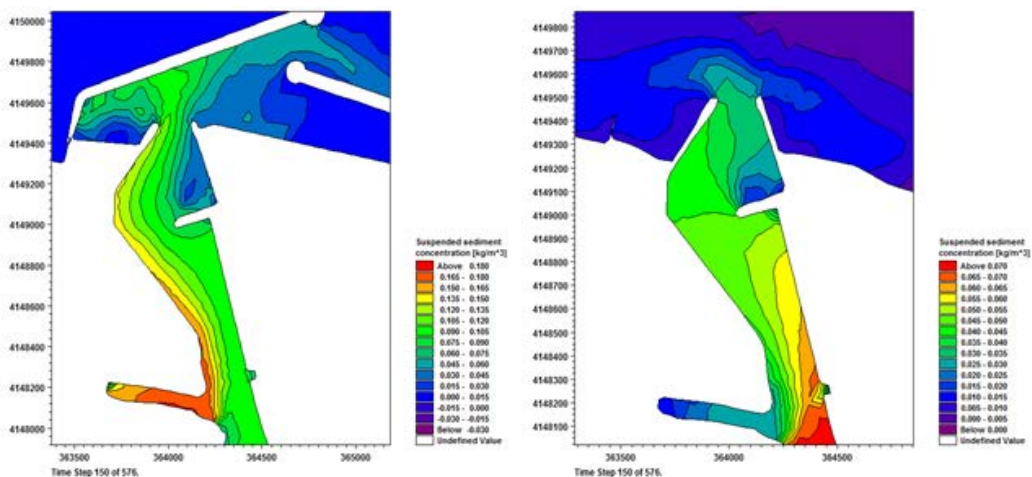
شکل (۶): جهت و ارتفاع مشخصه امواج، قبل و بعد از توسعه موج‌شکن‌های بندر انزلی در زمان وزش باد شمال شرقی



شکل (۷): جهت متوسط امواج، قبل و بعد از توسعه موج‌شکن‌های بندرآنزلی در زمان وزش باد شمال شرقی



شکل (۸): تغییرات سرعت جریان، قبل و بعد از توسعه موج‌شکن‌های بندرآنزلی در زمان وزش باد شمال شرقی



شکل (۹): تغییرات غلظت جریان رسوبات، قبل و بعد از توسعه موج‌شکن‌های بندرآنزلی در زمان وزش باد شمال شرقی

همان‌طور که از روی نتایج ملاحظه می‌شود الگوی توزیع امواج در داخل حوضچه برای حالت قبل و بعد از توسعه به‌گونه‌ای است که ارتفاع امواج برای حالت بعد از طرح توسعه پایین‌تر از ارتفاع امواج قبل از طرح توسعه است به‌طوری‌که محدوده تغییرات ارتفاع امواج در حالت قبل از توسعه بین $1/8 - 0/60$ متر و برای

حالت بعد از توسعه طرح موج‌شکن این محدوده تغییرات بین $1/2 - 0/20$ متر است، به عبارت دیگر با توسعه بازوها به هدف توسعه و تأمین آرامش بندر دست یافته شده است که نشانگر وجود آرامش کافی در داخل بندر در شرایط بعد از طرح توسعه است.

طبق خروجی‌های مدول موج طیفی و به دلیل پدیده انکسار، نتایج عددی نشان دادند که به دلیل پدیده انکسار، جهت انتشار امواج با رسیدن به نواحی ساحلی به سمت عمود بر ساحل تغییر جهت داده و قسمتی از امواج وارد موج‌شکن می‌شود. همچنین به‌وضوح قابل‌رؤیت است که امواج با توجه به ارتفاع آنها در اعماق مختلف می‌شکنند و با نزدیک شدن به ساحل به دلیل اثر پدیده‌هایی مثل انکسار، شکست امواج و اصطکاک بستر، امواج با ارتفاع کمتری مشاهده می‌شود. در مورد خروجی سرعت جریان برای حالت قبل و بعد از توسعه نیز می‌توان دید سرعت جریان داخل حوضچه در حالت قبل از توسعه بیشتر از حالت بعد از توسعه بوده، به طوری که محدوده تغییرات سرعت جریان در حالت قبل از توسعه بین $0/105 - 0/045$ متر بر ثانیه و برای حالت بعد از توسعه موج‌شکن این محدوده تغییرات بین $0/08 - 0/01$ متر بر ثانیه است، به عبارتی با توسعه موج‌شکن مانعی در برابر جریان ایجاد شده است، در نتیجه سرعت جریان کم شده است و احتمال رسوب‌گذاری داخل حوضچه افزایش می‌یابد.

مطلب فوق را از خروجی غلظت رسوبات نیز می‌توان تا حدود زیادی متوجه شد، به این صورت که غلظت رسوب در حالت بعد از توسعه بیشتر از حالت قبل از توسعه بوده به طوری که محدوده تغییرات غلظت رسوب در حالت قبل از توسعه بین $0/06 - 0/03$ کیلوگرم بر مترمکعب و برای حالت بعد از توسعه موج‌شکن این محدوده تغییرات بین $0/135 - 0/075$ کیلوگرم بر مترمکعب است. درستی این مطلب با توجه به احجام لایروبی‌های دوره‌ای، قابل اثبات است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج مدل‌سازی مشخص شد که بندر انزلی از نظر آرامش داخل حوضچه، از وضعیت نسبتاً قابل قبولی برخوردار است، اما رسوب‌گذاری داخل حوضچه و لزوم لایروبی بافاصله‌های زمانی کم، مشکلی برای بندر انزلی محسوب می‌شود. این مشکل پس از احداث موج‌شکن‌های جدید بندر نمایان شده که پیامد آن نیاز به لایروبی‌های مکرر را روشن می‌سازد. متأسفانه تاکنون راه‌حلی برای مشکل رسوب داخل حوضچه بندر انزلی ارائه نشده و خود مسئولین بندر نیز اجرای طرح توسعه بندر انزلی را موفق ارزیابی نمی‌کنند. از این‌رو به‌عنوان نتیجه کلی می‌توان چنین بیان کرد که با توسعه بندر و اطلاع بازوهای شرقی و غربی موج‌شکن به هدف توسعه بندر و تأمین آرامش بندر دست یافته شده است، اما همین آرامش شرایط را برای ته‌نشینی رسوبات معلق فراهم می‌نماید.

در گذشته و پیش از احداث دو موج‌شکن جدید، بخش بزرگی از رسوب ورودی به کانال و محدوده بندر، با توجه به مجرای باز و شیب هیدرولیکی اولیه از حدفاصل دو موج‌شکن قدیمی وارد دریا می‌شد و در روزهای طغیانی رودخانه‌ها، اثرات گل‌آلودگی آن تا فاصله چند کیلومتری دریا قابل‌رؤیت بود. ولی با ساخت و توسعه موج‌شکن بندر انزلی شاهد حرکت رسوب از تالاب به حوضچه بندر و ته‌نشینی آن در داخل بندر و کانال دسترسی هستیم. با توجه به اینکه احداث موج‌شکن جدید توان تخریبی امواج را کاهش داده و آرامش سطح آب داخل کانال را برقرار نموده، اما برقراری آرامش درون حوضچه و کانال به‌منزله تله رسوب‌گیر عمل نموده و شرایط بسیار مناسبی برای ته‌نشینی رسوبات معلق فراهم می‌نماید؛ بنابراین برخلاف گذشته که بخش بزرگی از نسبت دانه‌های ذرات جامد به دریا منتقل می‌شد، شرایط جدید این امکان را فراهم نمی‌کند. همچنین در بازدیدی که اواخر اسفندماه ۱۳۹۲ به همراه مسئولین محترم فنی و نگهداری موج‌شکن‌ها از بندر و تالاب صورت پذیرفت، این موضوع کاملاً مشهود بود و مسئولین به دنبال راه‌کاری برای جلوگیری از مکش رسوبات به داخل حوضچه بندر بودند؛ زیرا در صورت عدم رفع این مشکل، بندر به‌صورت مداوم و در بازه‌های زمانی کوتاه باید از یک برنامه لایروبی مدون و منظم بهره‌برداری. این امر جدا از بحث هزینه بسیاری که بر بندر تحمیل می‌نماید، راندمان بهره‌برداری بندر را نیز کاهش خواهد داد.

طبق بررسی‌های انجام‌شده روی بنادر مختلف جهان در وبسایت‌های مختلف مشاهده گردید که در شهر Velsersbroek کشور هلند موج‌شکنی مشابه موج‌شکن بندر انزلی وجود دارد. همان‌طور که از روی شکل (۱۰-الف) ملاحظه می‌شود موج‌شکن‌ها را طوری گسترش داده‌اند که مانعی در برابر رسوب ورودی به حوضچه ایجاد نمی‌کنند ولی در شکل (۱۰-ب) می‌توان مشاهده کرد، بازوهای موج‌شکن بندر انزلی به چه شکل توسعه پیدا کرده‌اند. همان‌طور که از شکل به‌وضوح می‌توان مشاهده کرد موج‌شکن‌ها مانعی در برابر رسوب ایجاد می‌کنند، به عبارتی حوضچه بندر به‌عنوان تله رسوب‌گیر عمل می‌نماید. در نتیجه بستر کانال و حوضچه به لایروبی بیشتری از گذشته نیاز خواهد داشت.



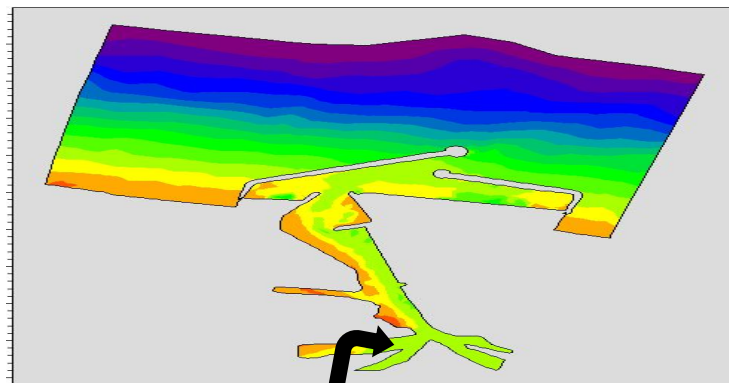
(ب)

(الف)

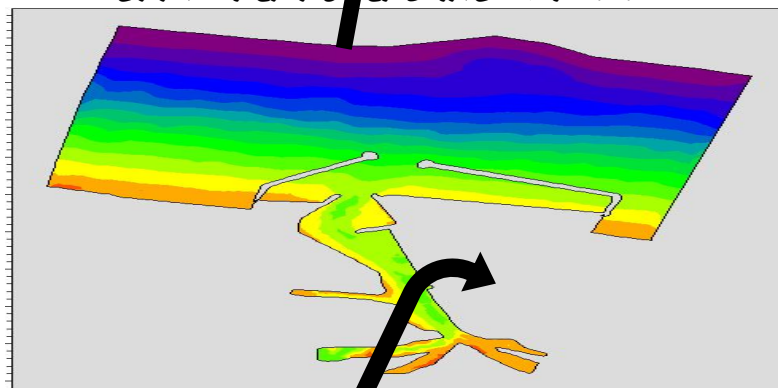
شکل (۱۰): نحوه جانمایی بازوهای موج‌شکن در شهر Velsbroek کشور هلند

پیشنهادها

تحقیق حاضر تلاش کرده تا با مطالعات هیدرودینامیک و رسوب طرح اصلاحی را برای بندر انزلی ارائه نماید همان‌طور که از روی شکل (۱۱) مشاهده می‌شود نحوه جانمایی موج‌شکن بندر انزلی به‌گونه‌ای است که به‌عنوان مانعی در برابر خروج مواد رسوبی از حوضچه بندر عمل می‌نماید. شکل (۱۲) طرح پیشنهادی این مطالعه برای رفع مشکل رسوب‌گذاری داخل حوضچه را نشان می‌دهد. در رابطه با این طرح یک نکته مهم وجود دارد که با تغییر نحوه قرارگیری موج‌شکن غربی و نیز کاهش طول آن می‌توان انتظار داشت تا رسوبی که از سمت تالاب به داخل حوضچه وارد می‌شوند از دهانه موج‌شکن به بیرون فوران یابند.



شکل (۱۱): نحوه جانمایی بازوهای موج‌شکن در طرح توسعه بندر انزلی



شکل (۱۲): طرح پیشنهادی این مطالعه برای رفع مشکل رسوب‌گذاری داخل حوضچه

در ادامه، بررسی‌ها و تحقیقاتی با موضوع‌های: (۱) بررسی تغییرات خط ساحلی و انتقال رسوب کرانه‌ای با استفاده از مدول LITPACK، (۲) ساخت مدل فیزیکی بندر جهت بررسی دقیق‌تر پدیده‌های هیدرودینامیکی و ریخت‌شناسی، (۳) بررسی و تحقیق شکست موج در مقیاس کوچک، در محدوده بندر با استفاده از مدول موج بوسینسک، (۴) بررسی آب‌شستگی و انباشت مواد رسوبی در اطراف موج‌شکن‌های بندر و (۵) اجرا و بررسی مدل انتقال رسوب سه‌بعدی داخل حوضچه پیشنهاد می‌گردد.

ضمایم

روش حل عددی معادلات حاکم در مدل MIKE 21

معادلات حاکم مدل ریاضی پیش‌بینی موج SW

مدل ریاضی مورد استفاده در این پروژه جهت پیش‌بینی مشخصه‌های امواج، مدل طیفی موج (SW) است. مبنای این مدل برای پیش‌بینی موج، حل معادله انتقال انرژی همراه با عبارات‌های چشمه و چاه است. به‌منظور لحاظ کردن طبیعت تصادفی امواج دریا، معادله انتقال انرژی در شکل طیفی آن در نظر گرفته می‌شود. ضمناً در این نرم‌افزار معادله مذکور از روش حجم محدود با تقریب تفاضل مرکزی نسبت به زمان منفصل سازی می‌شود. شکل معادلات انتقال در حالت دوبعدی به‌صورت زیر است (MIKE 21, 2011).

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\cos\theta}{C} \frac{\partial(E.C.C_g)}{\partial x} + \frac{\sin\theta}{C} \frac{\partial(E.C.C_g)}{\partial y} + \frac{C_g}{C} \left(\sin\theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos\theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \frac{\partial E}{\partial \theta} = S \quad (1)$$

که در معادله فوق:

$E(t, x, y, f, \theta)$: طیف انرژی موج فرکانسی جهتی

t: زمان

x, y: مختصات دکارتی در حالت دوبعدی

f: فرکانس

θ : جهت انتشار موج

C_g : سرعت گروهی موج

C: سرعت انتشار موج

S: عبارت چشمه و چاه می‌باشند.

معادله فوق خاطرنشان می‌کند که هر مؤلفه یک طیف انرژی فرکانسی - جهتی با سرعت گروهی موج حرکت می‌کند و در مسیر خود تحت اثر افزایش یا کاهش انرژی ناشی از توپوگرافی کف دریا، سرعت، جهت باد و شکل طیف قرار می‌گیرد. آخرین عبارت در سمت چپ معادله مذکور اثرات انکسار و پشته کردن موج را در نظر می‌گیرد. عبارت منبع در سمت راست معادله انتقال موج به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2)$$

در معادله (۲) S_{in} معرف انتقال انرژی از باد به سطح آب، S_{nl} معرف انتقال انرژی از یک فرکانس به فرکانس دیگر توسط اندرکنش غیرخطی امواج، S_{dis} :

معرف انرژی موج در اثر پدیده شکست موج آب عمیق، S_{bot} : معرف استهلاک انرژی موج ناشی از اصطکاک کف، S_{surf} : معرف استهلاک انرژی موج ناشی از

شکست موج در ناحیه کم‌عمق می‌باشند (MIKE 21, 2011).

معادلات هیدرودینامیک^{۱۶}

در این نرم‌افزار انفصال معادلات هیدرودینامیکی به روش حجم محدود صورت گرفته است. برای حل معادلات هیدرودینامیکی انفصال یافته نیز از یک روش نیمه‌ضمنی با خطا از مرتبه دوم بهره برده شده است و توسط ضریب تقویت و زاویه فاز، پایداری روش مورد تحلیل قرار می‌گیرد (MIKE 21, 2011). در ذیل به بررسی معادلات حاکم در مدول هیدرودینامیکی (HD) و روش حل عددی آنها پرداخته می‌شود. در ابتدا معادلات و الگوریتم عددی بکاررفته در مدل تشریح می‌شود و سپس برای هر یک از عبارات‌های معادلات اصلی، وضعیت فیزیکی، ریاضی و عددی آنها توضیح داده می‌شود.

¹⁶. MIKE 21- FLOW MODEL

معادلات اصلی

مدل هیدرودینامیکی مورداستفاده در MIKE 21 سیستم عددی متداول مورداستفاده در مدل سازی ارتفاع و جریان ها در مصب رودخانه ها، خورها و مناطق ساحلی است و جریانی دوبعدی متغیر با زمان در یک لایه (به صورت همگن در عمق) از سیال را شبیه سازی می کند که در مطالعات زیادی نیز بکار رفته است. معادلات بقاء جرم و اندازه حرکت که در عمق انتگرال گیری شده اند تغییرات آب و جریان را محاسبه می کنند این معادلات در زیر آورده شده اند.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

معادله پیوستگی:

معادله اندازه حرکت در جهت X:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} -$$

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega p - f v v_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (Pa) = 0$$

معادله اندازه حرکت در جهت Y:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} -$$

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega p - f v \cdot v_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (Pa) = 0$$

که در آن:

$h(x, y, t)$	عمق آب (m)
$H(x, y, t)$	تراز سطح آب
$p, q(x, y, t)$	دبی در جهت x, y ($m^3/s/m$)
$c(x, y)$	ضریب شزی ($m^{1/2}/s$)
g	شتاب ثقل (m/s^2)
$f(V)$	ضریب اصطکاک باد
$V, V_x, V_y(x, y, t)$	سرعت باد و مؤلفه های آن در جهت x, y (m/s)
$\Omega(x, y)$	پارامتر کوریولیس (s-1)
Pa	فشار اتمسفری (Kg/m^2)
ρ_w	چگالی آب (kg/m^3)
x, y	مختصات مکانی (m)
t	زمان (s)
$\tau_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{xx}$	مؤلفه های تنش برشی مؤثر

مراجع

- ۱- محمدیان، ع. و همکاران، مطالعه روند رسوب گذاری ناشی از اسکله های موجود در خلیج چابهار با استفاده از مدل عددی، گزارش طرح پژوهشی، ۱۳۹۰.
- ۲- بهلولی، الف. و همکاران، مدل سازی دوبعدی و سه بعدی رسوب گذاری در بندر انزلی، ششمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، ۱۳۸۳.
- ۳- یگانه بختیاری، ع. و محمدیان، ف. بررسی اثر نوسانات سطح آب دریای خزر بر روی میزان انتقال رسوبات کرانه ای، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۷.
- ۴- کنارسری، الف. و همکاران. بررسی اثرات زیست محیطی ناشی از اندرکنش تالاب و دریا بر حوضچه بندر انزلی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۹.
- ۵- جعفرزاده، الف. و همکاران. ارزیابی مدل PMO Dynamics در شبیه سازی انتقال امواج پس از احداث موج شکن های جدید ساحل انزلی. موسسه آموزش عالی خاوران مشهد، ۱۳۹۲.

- ۶- جعفرزاده، الف؛ و همکاران. شبیه‌سازی انتقال امواج ساحل انزلی پس از احداث موج‌شکن‌های جدید باهدف مقایسه نرم‌افزار ایرانی PMO Dynamics و MIKE 21. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۹۳.
- ۷- فتوحی، ن. و سعادت خواه ن، مدل‌سازی جریان‌های ناشی از باد، هشتمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، ۱۳۸۷.
- ۸- سایت اداره کل بنادر و دریانوردی استان گیلان.
- ۹- سازمان مدیریت منابع آب ایران، مطالعه گردش و اختلاط آب در تالاب انزلی با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های محلی و شبیه‌سازی ریاضی، ۱۳۸۰.
- ۱۰- سازمان بنادر و دریانوردی، مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران پیش‌یابی امواج سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۹۲. جلد ۱: دریای خزر، فصل ۵، ۱۳۸۷.
- 11- MIKE21/3 Coupled Model FM, Step by step training guide: coastal application, 2011. DHI Software
- 12- Mike by DHI, Manuals- MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic Module, User Guide, 2011.