مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۲۰، شماره ۴، ۱۴۰۵، صفحه ۱۱۹–۱۳۰ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2026.565771.1742

شبیه‌سازی عددی دوبعدی انتقال رسوبات ریزدانه دریایی در کانال بندر بوشهر

سارا موحدی‌نژاد [۱]، مریم سیوف جهرمی [۲*]، سید عباس حق‌شناس [۳] و سید مصطفی سیادت موسوی [۴]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
[۳] دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴)

چکیده

مطالعه رسوبگذاری در بنادر و لنگرگاه‌ها، موضوعی جدی در مطالعات مهندسی سواحل و اقیانوس شناسی است. رسوبات دریایی ریزدانه به دلیل رفتارشان، ویژگی‌های پیچیده خاصی نسبت به سایر رسوبات دریایی دارند. این نوع رسوبات دریایی می‌توانند در دو فاز منتقل شوند: بار معلق و بار بستر، که هر کدام پیامدها و ویژگی‌های متفاوتی را به دنبال دارد. در این مطالعه یک مدل دوبعدی توسعه داده شده (مدل عددی)، که شامل تمام فرآیندهای مرتبط با انتقال رسوبات چسبنده دریایی مانند توده‌سازی و تأثیر آن بر سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبات چسبنده دریایی، تحکیم لایه‌های بستر و انتقال رسوبات دریایی بین لایه‌ها، تغییرات تنش برشی بستر تحت تاثیر حضور همزمان موج و جریان، مورفولوژی بستر، رسوب‌گذاری و فرسایش می‌شود، به کار برده شده است. برای ارزیابی نحوه انتقال رسوبات دریایی، تمامی فرآیندها در نظر گرفته شدند. برای تأیید عملکرد مدل، نتایج مدل با نتایج مدل اقیانوسی ساحلی حجم محدود (FVCOM) و داده‌های میدانی گزارش‌شده در مرحله شبیه‌سازی خلیج بوشهر، یک مطالعه موردی، مقایسه شده‌اند. در بخش عملکرد ماژول رسوب چسبنده، نتایج حاصل از مدل با و بدون اعمال تغییرات مورفولوژی، با نتایج حاصل از مدل FVCOM مقایسه شدند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل با موفقیت هیدرودینامیک و رسوب چسبنده را در جولای ۲۰۱۰، در منطقه خلیج بوشهر شبیه‌سازی کرده است. در مورد نتایج ارتفاع سطح و سرعت جریان مطابقت خوبی بین دو مدل و داده‌های اندازه‌گیری وجود دارد. همچنین در بخش رسوب، داده‌های غلظت رسوب با اعمال مورفولوژی برای مدل عددی نوسان بیشتری را تجربه می‌کند که به آنچه که در طبیعت رخ می‌دهد نزدیک‌تر است.

کلمه‌های کلیدی: رسوبات دریایی چسبنده، انتقال رسوبات دریایی، مدل عددی، هیدرودینامیک

* نگارنده رابط: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir

۱ مقدمه

فرآیندهای رسوبی و تعیین میزان رسوب‌گذاری، فرسایش و تغییرات خط ساحلی اساساً برای ساخت و توسعه بنادر بسیار مهم هستند. رسوبات دریایی ریزدانه چسبنده هستند، اما میزان چسبندگی آنها صرفاً با اندازه دانه تعیین نمی‌شود (مک‌کیو، ۱۹۸۴). با توجه به این واقعیت که تقریباً اغلب رسوبات ساحلی از نوع رسوبات ریزدانه یا چسبنده هستند، مطالعه این رسوبات از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه ویژگی‌های رسوبات دریایی ریزدانه و چسبنده به دلیل ویژگی‌های پرشوندگی آنها در بنادر و لنگرگاه‌ها، موضوع مهمی در مطالعات ساحلی است (درنالی و همکاران، ۲۰۰۲). رسوبات دریایی ریزدانه و به طور خاص چسبنده در مقایسه با سایر رسوبات دریایی دارای خصوصیات ویژه‌ای هستند که شبیه‌سازی چنین رسوباتی را پیچیده‌تر می‌کند.

بندرگاه‌های خور عموماً دارای بسترهای گلی هستند؛ رسوبات گل یا لای چسبنده از ذرات بسیار ریزی تشکیل شده‌اند که اندازه آنها اغلب در محدوده سیلت (کمتر از ۷۰ میکرومتر) تا رس (کمتر از ۴ میکرومتر) قرار دارد. در میان ذرات این رسوبات دریایی، نیروهای الکتروشیمیایی غالب هستند که پیچیده‌تر و بزرگتر از نیروی گرانش هستند و از این رو، بر ویژگی‌های رسوبات دریایی تأثیر می‌گذارند (حق‌شناس، ۱۳۹۱). نیروهای الکتروشیمیایی روی سطح رسوبات دریایی منجر به جاذبه بین ذرات می‌شوند. هنگامی که ذرات ریز با یکدیگر برخورد می‌کنند، نیروی الکتروشیمیایی ممکن است باعث شود که آنها به یکدیگر متصل شوند و لخته تشکیل دهند و منجر به فرآیندی به نام لخته‌سازی شوند (کویی و همکاران، ۲۰۲۳).

مکانیسم لخته‌سازی، مدل‌سازی انتقال رسوبات چسبنده، به ویژه در مصب رودخانه‌ها را به طور قابل توجهی پیچیده می‌کند. مکانیسم‌های فرسایش و رسوب‌گذاری رسوبات دریایی چسبنده نیز به دلیل وجود نیروهای الکتروشیمیایی و تحکیم رسوبات دریایی ته‌نشین شده، پیچیده‌تر هستند. بستر ساخته شده از رسوبات دریایی چسبنده تحکیم‌یافته ممکن است در برابر نیروهای برشی نسبتاً بزرگ مقاومت کند. با این حال، پس از وقوع شکست، تکه‌های بزرگی از رسوبات دریایی ممکن است از بستر بلند شوند (بار بستر) (موحدی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳). در طول رسوب‌گذاری، تحکیم ذرات بسیار ریز، بسیار آهسته انجام می‌شود. در نزدیکی بستر، سیلت ته‌نشین شده لایه‌ای با غلظت جامد بسیار بالا تشکیل می‌دهد. چنین لایه‌های گلی دارای وزن واحد بسیار کم و درجه سیالیت بالایی هستند که می‌توانند به راحتی توسط جریان‌های نسبتاً ضعیف یا کنش موج (بار معلق) به حرکت درآیند. با گذشت زمان، چنین لایه‌هایی ممکن است آب خود را از دست داده و تحکیم شوند (حق‌شناس، ۱۳۹۱؛ لئوپی، ۲۰۰۵). امواج به دلیل حالت نوسانی خود، بستر را تضعیف می‌کنند. فرسایش ناشی از امواج می‌تواند منجر به تولید یک لایه گل سیال با چگالی بالا در نزدیکی بستر شود که می‌تواند به راحتی به مناطق رسوبی منتقل شود (مهتا و همکاران، ۱۹۸۸). این نوع رسوب با ایجاد موانع در مسیر کانال‌ها (حیدری و همکاران، ۲۰۲۲)، کاهش کیفیت آب (ایساکا و همکاران، ۲۰۱۷) و آسیب رساندن به تجهیزات (لیو و همکاران، ۲۰۲۲) مشکلات مدیریتی قابل توجهی را در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مصب‌ها ایجاد می‌کند. یافتن سرنوشت رسوبات دریایی چسبنده و ارتباط آنها با مورفودینامیک بستر، روش‌های موثری برای درک انتقال رسوبات دریایی در مسائل مدیریتی و یافتن راه‌حل‌های مناسب ارائه می‌دهد. در این راستا، تحقیقات متعددی برای ایجاد توصیف‌های فیزیکی و ریاضی معتبر از رفتار و سرنوشت رسوبات معلق چسبنده متمرکز در نزدیکی بستر و تعامل آنها با ستون آب و بستر و همچنین

ویژگی‌های آشفتگی حرکت مملو از رسوب انجام شده است (لئوپی، ۲۰۰۵).

مسئله رسوب‌گذاری در خلیج تجاری بوشهر، واقع در شمال خلیج فارس، به دلیل کانال ناوبری و نیاز سالانه آن به لایروبی، یکی از چالش‌ها در مطالعات مختلف است. بندر بوشهر یکی از قدیمی‌ترین بنادر خلیج فارس در ایران است که در قسمت جنوبی خلیج بوشهر و در امتداد خور سلطانی واقع شده است. خلیج بوشهر یک خلیج کم عمق و محصور است که از جنوب به شبه جزیره بوشهر و از شمال به دلتای رودخانه حله محدود می‌شود. این خلیج، به استثنای کانال جزر و مدی سلطانی، در امتداد قسمت شمال شرقی شبه جزیره بوشهر، یک خلیج نسبتاً کم عمق با عمق کمتر از ۵ متر است. مسیر دسترسی به خلیج بوشهر از دو کانال دسترسی، یک کانال دسترسی خارجی در خلیج و یک کانال دسترسی داخلی در خور سلطانی عبور می‌کند.

عمق کانال در بخش‌های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۰.۳ تا ۱۰.۸ متر است (سازمان بنادر و دریانوردی ایران، ۲۰۲۰). کانال دسترسی خلیج بوشهر به شدت تحت تأثیر رسوبات منتقل شده از منابع مجاور قرار دارد (DHI، ۲۰۰۵؛ SOGREAH، ۲۰۰۶؛ Baird و JWERC، ۲۰۰۹؛ Ocean Research، ۲۰۲۰). این کانال معمولاً هر ۱۰ سال یکبار لایروبی می‌شود، در حالی که حداکثر هر سه سال یکبار نیاز به لایروبی دارد. میزان رسوب‌گذاری دریایی سالانه کانال حدود ۱،۲۰۰،۰۰۰ متر مکعب تخمین زده می‌شود تا عمق ناوبری حفظ شود. بررسی‌های هیدروگرافی دوره‌ای، داده‌های حاصل از اکوگرام دوفرکانسه و پروفیل‌های زیر بستری با تناوب‌های گاه به گاه در طول سه دهه گذشته در دسترس هستند (سازمان بنادر و دریانوردی ایران، ۲۰۲۰).

بر اساس مطالعات انجام شده، اعتقاد بر این است که این کانال به دلیل بار معلق، تحت تأثیر رسوب‌گذاری دریایی مداوم و طولانی‌مدت قرار دارد؛ با این حال، شواهدی از رسوب‌گذاری ناگهانی (بار بستر) به دلیل انتقال جرم در طول وقایع طوفانی شدید وجود دارد (سازمان بنادر و دریانوردی ایران، ۲۰۲۰). مرکز تحقیقات جهاد در سال ۱۳۷۹، تعدادی تله اندازه‌گیری رسوب دریایی در ۸ سطح مختلف نصب کرد و میزان انتقال رسوب دریایی را در کانال داخلی و خارجی خلیج بوشهر ارزیابی کرد. طبق این تحقیق، در دو طرف کانال خارجی، میزان انتقال رسوب بستر ۰/۱ تا ۳ (کیلوگرم بر متر مکعب در روز) بود. در دو طرف کانال داخلی (در محل تلاقی کانال خارجی و در محل تلاقی ورودی بندر)، میزان انتقال رسوب دریایی بالا (۳ کیلوگرم بر متر مکعب در روز) بود، اما در امتداد کانال داخلی، کمتر (حدود ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز) بود (شرکت تحقیقات آب و انرژی جهاد، ۱۳۷۹). شرکت فناوری آب و محیط زیست ایران نیز در سال ۲۰۰۵، نرخ انتقال رسوبات دریایی را از طریق روابط تجربی در ده مقطع مختلف تعیین کرد. نتایج آنها نشان داد که در ساحل شرقی نزدیک دماغه (خور سلطانی)، جهت انتقال رسوبات دریایی به گونه‌ای بود که رسوبات دریایی را از کانال‌ها دور می‌کرد. اما انتقال رسوبات ساحلی ناشی از شکست موج در ساحل جزیره عباسک در جهتی بود که رسوبات دریایی را به سمت کانال‌ها سوق می‌داد (شرکت فناوری آب و محیط زیست ایران، ۱۳۸۴). فرآیند رسوب‌گذاری دریایی کانال‌های دسترسی بوشهر با استفاده از داده‌های عمق‌یابی دقیق (۱۳۸۲ تا ۱۳۹۲) بررسی شد (صادقیان و همکاران، ۱۳۹۵). نرخ رسوب‌گذاری محاسبه‌شده، نرخ فرسایش و آمار تحلیل‌شده لایروبی‌های موجود، تخمینی از رسوب‌گذاری سالانه معادل ۱۴.۴۱ سانتی‌متر در سال را نشان داد. تعیین نرخ رسوب دریایی در کانال دسترسی خلیج بوشهر (فرهنگمهر و همکاران، ۲۰۲۱) نشان داد که

علیرغم شبیه‌سازی نسبتاً موفق رسوبات دریایی چسبنده در کانال، عدم تفکیک رسوبات معلق و بار بستر، نتیجه را با خطاهای قابل توجهی مواجه کرده است.

در این پژوهش، یک مدل دوبعدی با نام مدل عددی (موحدی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳) به کار برده شد که انتقال رسوب چسبنده را در کانال دسترسی ناوبری خلیج بوشهر، شمال خلیج فارس، شبیه‌سازی می‌کند. این مدل با پیاده‌سازی یک ماژول رسوب چسبنده در مدل PMODynamics به کار گرفته شد.

این مدل شامل فرآیندهای مختلفی است: (۱) جابجایی و انتشار رسوبات چسبنده، (۲) لخته‌سازی و تأثیر آن بر سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبات دریایی چسبنده، (۳) تحکیم لایه‌های بستر، (۴) انتقال رسوب بین لایه‌ها، (۵) تغییرات تنش برشی بستر تحت تأثیر حضور همزمان موج و جریان، (۶) مورفولوژی بستر و (۷) رسوب‌گذاری و فرسایش.

در تمام این مراحل، عمق بر اساس توپوگرافی واقعی بستر در نظر گرفته شد. برای اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی، مدل برای یک دوره زمانی خاص (جولای ۲۰۱۰)، اجرا شد. نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های اندازه‌گیری و مدل اقیانوسی ساحلی حجم محدود (FVCOM) مقایسه شده است.

۲ روش پژوهش

۲-۱ معادلات مدل عددی

مدل عددی (موحدی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳) به طور همزمان هیدرودینامیک و رسوبات چسبنده را شبیه‌سازی می‌کند. ماژول هیدرودینامیک دوبعدی، معادلات آب کم‌عمق (SWE) را حل می‌کند که می‌توان آن را به شکل پایستار به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(p^2/h)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)-\Omega q+gh\frac{\partial \eta}{\partial x}+ C_f u\sqrt{u^2+v^2}-(\rho_a/\rho_w)C_d u_w\sqrt{u_w^2+v_w^2}=-h/\rho_w\frac{\partial p_a}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t\frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+\Omega p+ gh\frac{\partial \eta}{\partial y}- C_f v\sqrt{u^2+v^2}-\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)C_d v_w\sqrt{u_w^2+v_w^2}=-h/\rho_w\frac{\partial p_a}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t\frac{\partial v}{\partial y}\right) \qquad (۳)$$

که در آن t زمان، x و y مختصات دکارتی، g شتاب گرانشی، η ارتفاع سطح آب، u و v مؤلفه‌های سرعت، h عمق آب، p = uh و q = vh مؤلفه‌های شار، uw و vw مؤلفه‌های سرعت باد، Cd ضریب درگ هوا–سیال، Cf ضریب اصطکاک، pa فشار هوا، υt ویسکوزیته گردابی و Ω پارامتر کوریولیس است. برای حل SWE از روش Roe مرتبه دوم روی یک شبکه بدون ساختار استفاده شده است.

سه مکانیسم اصلی معادله مدل (۴) برای انتقال ذرات آلاینده یا رسوب، جابجایی (یعنی انتقال توسط میدان سرعت)، انتشار و مولفه‌های منبع هستند. هر یک از مکانیسم‌ها ویژگی‌ها و مشکلات عددی خاص خود را دارند و بنابراین استفاده از روش گام‌های کسری (یانکو، ۱۹۷۱) مناسب است. این روش امکان به‌کارگیری کارآمدترین تکنیک عددی را برای هر یک از فرآیندهای جداگانه (نامین، ۲۰۰۳) که در معادله حاکم به شرح زیر نشان داده شده است، فراهم می‌کند:

$$\frac{\partial ch}{\partial t}+\frac{\partial chu}{\partial x}+\frac{\partial chv}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\upsilon_x h\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\upsilon_y h\frac{\partial c}{\partial y}\right)+S \qquad (۴)$$

که در آن u و v سرعت‌های جریان به‌دست‌آمده با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی عمق میانگین هستند. c غلظت در محیط را بیان می‌کند و υx و υy به ترتیب ضرایب انتشار را در جهت‌های افقی و عمودی بیان می‌کنند. کمیت h نمایش عمق در طول مدل‌سازی و S منبع است. برای حل معادله انتقال–پخش از روش احجام

محدود، روش Fromm استفاده شده است; همچنین روش تفاضل محدود کرانک-نیکلسون و روش توماس (لوکیو، ۲۰۰۷) به ترتیب برای حل بخش انتشار و ماتریس سه قطری استفاده شدند. زمان و مکان به ترتیب با استفاده از روش ذوزنقه‌ای و روش مرکزی مرتبه دوم (لوکیو، ۲۰۰۷) بسط داده شدند. لازم به ذکر است که این روش ها در حالتی استفاده شده است که افزونه رسوب (در حالت یک‌بعدی) به صورت کاملا مستقل آزمایش شده است.

در واقع مدل عددی مذکور شامل دو بخش هیدرودینامیک و بخش رسوب چسبنده است که بخش هیدرودینامیک آن مدل هیدرودینامیک دوبعدی PMODynamics است. بخش رسوب چسبنده به صورت مستقل به این مدل هیدرودینامیک اضافه شده است. حالت ابتدایی افزونه رسوب چسبنده در قالب یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد (موحدی‌نژاد، ۱۳۹۶) به مدل هیدرودینامیک اضافه شد. در این حالت کمیت‌هایی چون سرعت جریان و مولفه‌های موج، در ماژول رسوب، به صورت ثابت اعمال شده اند. در پژوهش حاضر این کمیت‌ها به صورت متغیر در زمان به افزونه رسوب چسبنده اعمال شده اند.

۲- ۲ تنش برشی بستر و سرعت سقوط در انتقال رسوبات

تنش برشی بستر در حضور همزمان موج و جریان، بر اساس فرمول (ترون و همکاران، ۱۹۹۳)، از معادله زیر محاسبه شده است:

$$\frac{\tau_{mean}}{\tau_c+\tau_w}=\frac{\tau_c}{\tau_c+\tau_w}\left(1+b\left(\frac{\tau_c}{\tau_c+\tau_w}\right)^P\left(1-\frac{\tau_c}{\tau_c+\tau_w}\right)^Q\right) \quad (۵)$$

که در آن τc تنش برشی جریان و τw تنش برشی موج است. b، P، Q ثابت‌هایی هستند که برای نظریه‌های پارامتربندی مختلف رژیم‌های جریان موج متفاوت، متفاوت هستند. به عنوان نمونه پارامتر b به این صورت محاسبه می‌شود:

$$b=b_1+b_2|cos\,\gamma|^j+(b_3+b_4|cos\,\gamma|^j)\log_{10}(r) \quad (۶)$$

در این معادله پارامترهای b1، b2 و ... نیز پارامترهایی ثابت‌اند که از آوردن جزییات بیشتر صرف نظر شده است. لازم به ذکر است که افزونه رسوب قادر به شبیه‌سازی حضور همزمان موج و جریان می‌باشد.

روابط حاکم بر سرعت ته‌نشینی بر اساس فرمول‌های MIKE21 هستند که تحت تأثیر لخته‌سازی (DHI، ۲۰۱۲) قرار دارند که در معادله زیر نشان داده شده است:

$$w_s=\begin{cases}w_0\left(\frac{c_{hindered}}{\rho_{sediment}}\right)^\gamma & c\geq c_{hindered}\\ w_0\left(\frac{c_{total}}{\rho_{sediment}}\right)^\gamma & c_{floc}<c<c_{hindered}\\ w_0\left(\frac{c_{floc}}{\rho_{sediment}}\right)^\gamma & c\leq c_{floc}\end{cases} \quad (۷)$$

که در آن ρsediment چگالی اصلی مواد رسوبی، cfloc غلظت در ابتدای لخته شدن، ctotal غلظت کل رسوب (غلظت کل همه گرانول‌ها)، chindered غلظتی است که در آن لخته‌ها نمی‌توانند آزادانه سقوط کنند و در نتیجه سرعت ته‌نشینی کاهش می‌یابد (غلظت اشباع)، ws سرعت ته‌نشینی، w0 ضریب سرعت ته‌نشینی، γ ثابت توان است.

۲- ۳ غلظت نزدیک بستر رسوب چسبنده

برای محاسبه غلظت رسوبات دریایی در نزدیکی بستر، از رابطه تیتر (۱۹۸۶) به شرح زیر استفاده شده است:

$$C_b=\beta\bar{C};\ \beta=1+\frac{P_e}{1{\cdot}25+4{\cdot}75\,P_d^{2{\cdot}5}};\ P_e=\frac{6w_s}{\kappa U_f} \quad (۸)$$

که در آن κ یک ثابت جهانی (ثابت ون کارمن) با مقدار ۰/۴ است، و Uf سرعت برای هر دانه‌بندی است که می‌توان آن را با استفاده از $Uf=\sqrt{(\tau b/\rho)}$ محاسبه کرد.

۲-۴ نرخ رسوب‌گذاری و فرسایش

نرخ رسوب‌گذاری و فرسایش نیز با استفاده از کارهای انیشتین و کرون (۱۹۶۲) و پارتنیادس (۱۹۶۵) به دست آمده است، که به ترتیب معادله ۹ برای رسوب‌گذاری، ۱۱ (فرسایش برای بستر سخت) و ۱۲ (فرسایش برای بستر نرم) هستند.

$$S_D = w_s C_b p_d \quad (۹)$$

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}};\ \tau_b \le \tau_{cd} \quad (۱۰)$$

$$S_E = E(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1)^M;\ \tau_b > \tau_{ce} \quad (۱۱)$$

$$S_E = E\ exp(\alpha(\tau_b - \tau_{ce})^{0.5});\ \tau_b > \tau_{ce} \quad (۱۲)$$

که در آن ws سرعت ته‌نشینی (m/s)، Cb غلظت رسوب در نزدیکی بستر (kg/m3) و pd احتمال رسوب‌گذاری، E پتانسیل فرسایش بستر (kg/m2/s)، τb تنش برشی بستر (N/m2)، τce تنش برشی بحرانی برای فرسایش (N/m2)، τcd تنش برشی بحرانی برای رسوب‌گذاری (N/m2)، M توان فرسایش و α ضریبی با بُعد (m/N1/2) است که مقدار آن معمولاً بین ۴ تا ۲۶ می‌تواند متغیر باشد (پارچور و مهتا، ۱۹۸۵). هر لایه بستر توسط تنش برشی بحرانی فرسایش، τ_cej، توان فرسایش،(M_(j، چگالی خشک رسوب بستر، ρ_i، ضرایب E_j و α_j مشخص می‌شود. هم‌چنین مدل به تعریف ضخامت اولیه هر لایه نیازمند است. لایه‌ها چنین طبقه‌بندی‌شده‌اند: در اولین لایه گل سیال ضعیف، بعدازآن گل سیال (بستر نیمه تحکیم یافته) و در زیر آن لایه تحکیم یافته قرار گرفته است. همچنین محاسبه تنش برشی بستر در حضور همزمان موج و جریان مورد نیاز است. در واقع τb همان τ_mean در حضور همزمان موج و جریان می‌باشد. فرمول‌های فرسایش، فرآیند تحکیم را در نظر گرفته و بسترهای سخت و نرم را تفکیک می‌کنند. رسوب دریایی خالص را می‌توان در هر زمان معین با استفاده از مجموع رسوب‌گذاری و فرسایش به دست آورد (DHI، ۲۰۱۲).

۲-۵ شبیه‌سازی همزمان هیدرودینامیک و رسوب

برای مقایسه کامل عملکرد مدل رسوب دریایی، یک مورد واقعی از خلیج بوشهر برای بررسی مدل انتخاب شد. ویژگی اصلی خلیج بوشهر این بود که داده‌های میدانی کافی، در بخش هیدرودینامیک، برای مقایسه دو مدل وجود داشت. مدل عددی حاضر برای شبیه‌سازی رسوبات دریایی چسبنده در این منطقه استفاده شد. به منظور اطمینان از دقت مدل، نتایج با نتایج شبیه‌سازی‌های منطقه با استفاده از FVCOM و همچنین داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

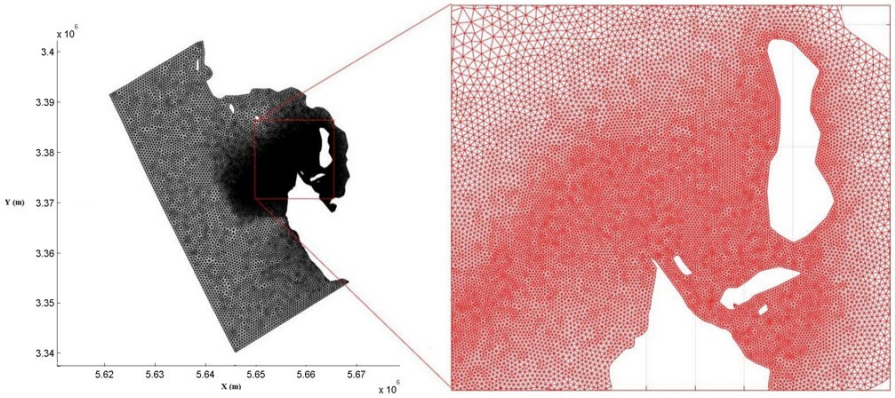
مدل دوبعدی در خلیج بوشهر اعمال شد. منطقه مورد نظر در مختصات UTM (شماره ۳۹) واقع شده است. منطقه مشخص‌شده خلیج بوشهر توسط یک مرز خشکی و سه مرز آبی احاطه شده و هفت جزیره در این محدوده وجود دارد. عمق‌سنجی این منطقه بر اساس داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده به مدل اعمال شد. شبکه شامل ۲۲۶۶۸ گره و ۴۴۴۴۷ سلول است (شکل ۱). اطلاعات ما بین مدل عددی و FVCOM مشترک بود. به عنوان شرایط اولیه، مؤلفه‌های سرعت صفر بودند.

شرایط مرزی برای سه مرز باز شامل ارتفاع سطح است که از خروجی یک مدل جامع خلیج فارس گرفته شده است. برای اعتبارسنجی مدل دوبعدی، به دلیل در دسترس بودن داده‌های میدانی (داده‌های میدانی فازهای مختلف پروژه پایش سواحل کشور، فاز ۲ و ۳ (Irancoasts.pmo.ir) در بخش هیدرودینامیکی فقط در سال ۲۰۱۰، خروجی‌ها در این دوره مقایسه شدند. دو ایستگاه وجود دارد. خروجی‌های بخش هیدرودینامیکی شامل کل محدوده، ایستگاه جزر و مدی یک (TG)، (طول جغرافیایی ۳۲۱۵۷۴۷ و عرض جغرافیایی ۴۸۹۳۳۱ متر از UTM شماره ۳۹) و ایستگاه دو (AQ) (طول جغرافیایی ۳۲۱۰۱۷۸ و عرض جغرافیایی ۴۸۰۸۲۰ متر از

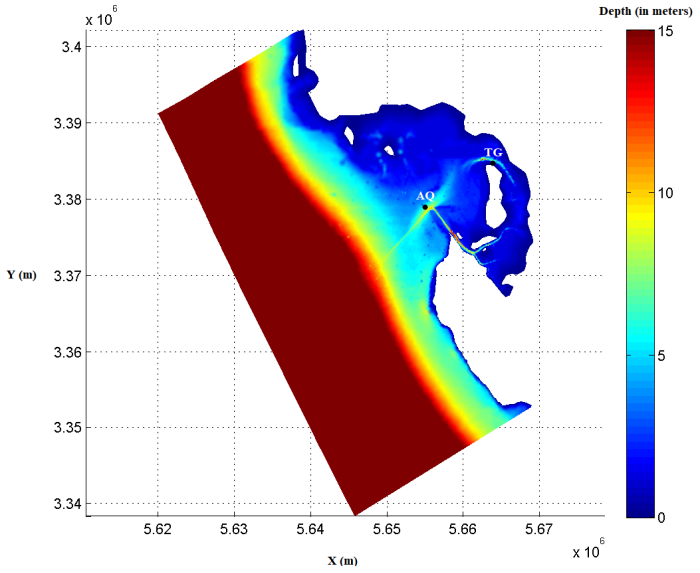
UTM شماره ۳۹) هستند. لازم به ذکر است که موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری از سازمان بنادر و دریانوردی ایران (۱۳۹۹) گرفته شده است (شکل ۲).

به علاوه، ارتفاع سطح آب (سطح) در ایستگاه یک اندازه‌گیری شد و داده‌های به‌دست‌آمده از مدل با این اندازه‌گیری مقایسه شد؛ همچنین، مقادیر مؤلفه‌های سرعت اندازه‌گیری شده در ایستگاه دو با مقادیر شبیه‌سازی‌های مدل FVCOM و مقادیر مدل عددی مقایسه شدند. سری زمانی غلظت رسوبات معلق در ایستگاه شماره دو برای ارزیابی مدل استفاده شد. لازم به ذکر است که غلظت رسوبات معلق به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر شبیه‌سازی‌های مدل FVCOM مقایسه شد.

در بخش انتقال رسوب، تعداد کسرها برای رسوب یک در نظر گرفته شده و بستر به عنوان یک سیستم دو لایه در نظر گرفته شده و فرآیند لخته شدن بررسی شده است. چگالی رسوبات دریایی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، غلظت در شرایط لخته شدن ۰/۰۱ (کیلوگرم بر متر مکعب) و غلظت برای حالت اشباع ۱۰ (کیلوگرم بر متر مکعب) بوده است (DHI، ۲۰۱۲). ضریب سرعت سقوط ۵ (متر بر ثانیه) در نظر گرفته شده است. لایه اول بستر، گل نرم و لایه دوم (کف) گل سخت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شبکه محاسباتی مورد استفاده در مدل توسعه‌یافته و مدل FVCOM.



شکل ۲. نقشه ژرفاسنجی منطقه مورد مدلسازی به همراه موقعیت ایستگاه‌ها.

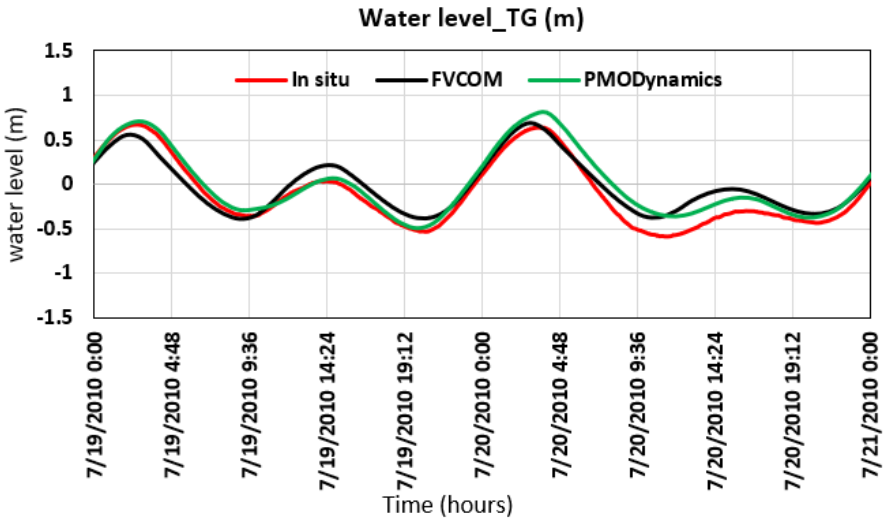
۲-۶ اعتبارسنجی مدل

نتایج مدل عددی با داده‌های میدانی در سال ۲۰۱۰ و نتایج FVCOM مقایسه شد.

۳ اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

۳-۱ ارتفاع سطح آب

نتایج ارتفاع سطح مدل عددی و مدل FVCOM در ایستگاه یک با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل مقایسه شدند (شکل ۳). نتایج مدل عددی به اندازه‌گیری‌ها و همچنین نتایج FVCOM نزدیک بود. این نزدیکی نتایج، اعتبار عملکرد مدل عددی را تأیید کرد.



شکل ۳. مقایسه ارتفاع سطح آب (متر) در ایستگاه جزر و مدی (ایستگاه یک) برای مدل عددی ، مدل FVCOM و داده‌های اندازه‌گیری.

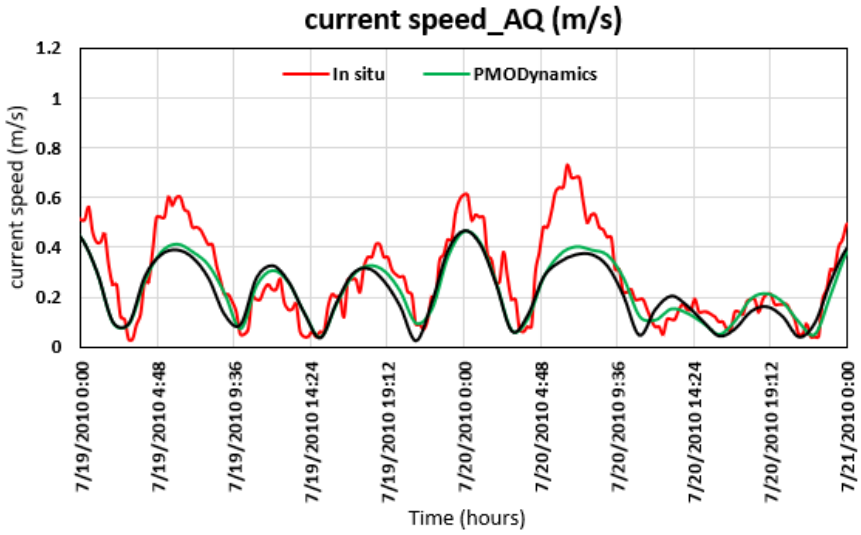
۳-۲ سرعت افقی آب

نتایج سرعت آب مدل عددی دوبعدی و FVCOM در ایستگاه دو با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه شدند (شکل ۴)؛ نتایج مدل عددی به شدت به نتایج FVCOM نزدیک بود، در حالی که هر دو با داده‌های اندازه‌گیری‌شده کمی متفاوت بودند. در نهایت، این تطابق نتایج، اعتبار عملکرد مدل عددی را به طور قابل قبولی تأیید کرد.

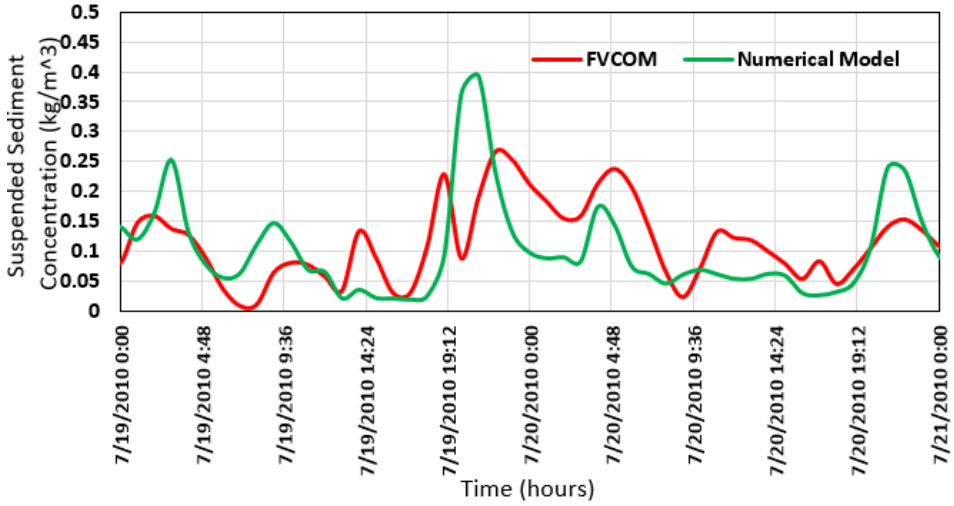
نتیجه، دقت نتایج مدل عددی را نشان می‌دهد. در واقع، می‌توان گفت که نتایج مدل عددی با داده‌های میدانی اندازه‌گیری‌شده مربوطه قابل مقایسه بودند، از این رو، مدل، هیدرودینامیک را به طور دقیق شبیه‌سازی کرد. ارتفاع سطح و سرعت آب، برای داده‌های اندازه‌گیری، به ترتیب از ۱/۱- تا ۱/۲ (متر)، ۰ تا ۰/۹ (متر بر ثانیه) تخمین زده شدند، در حالی که این مقادیر برای خروجی مدل عددی به ترتیب از ۰/۸- تا ۱ (متر)، ۰ تا ۰/۶ (متر بر ثانیه) متغیر هستند.

۳- ۳ غلظت رسوب معلق

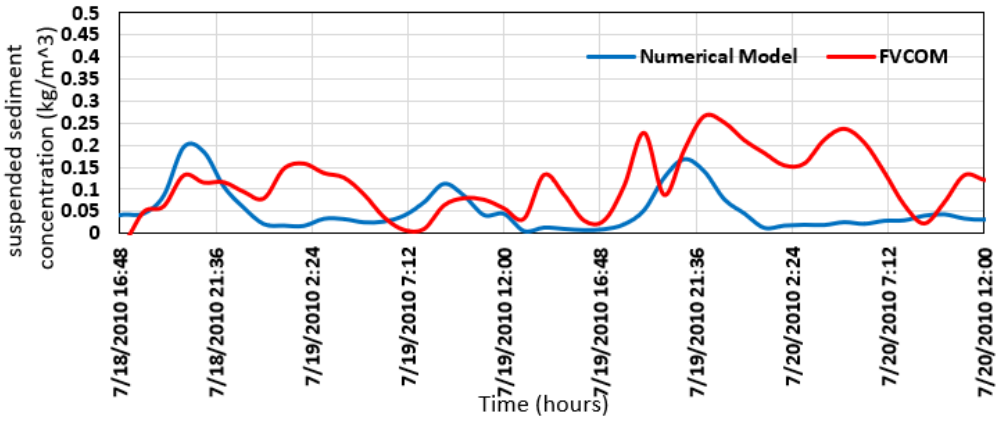
شکل ۵ و ۶ میزان غلظت در ایستگاه دو را بین پیش‌بینی‌های مدل FVCOM و مدل عددی ، با و بدون اعمال مورفولوژی، مقایسه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، هنگام اعمال مورفولوژی، خروجی مدل عددی مشابه پروفیل‌های خروجی FVCOM است که عملکرد مدل را در شبیه‌سازی غلظت رسوبات معلق تأیید می‌کند. با این حال، بدون اعمال مورفولوژی، هنوز هم می‌توانیم بگوییم که شبیه‌سازی مدل نسبتاً قابل قبول به نظر می‌رسد. از آنجایی که بسیاری از داده‌های ورودی مدل ساده شده‌اند، پیش‌بینی سرنوشت رسوبات دریایی نمی‌تواند به همان اندازه دقیق باشد.



شکل ۴. مقایسه سرعت آب (متر بر ثانیه) در ایستگاه دو برای مدل عددی، مدل FVCOM و اندازه‌گیری‌های میدانی.



شکل ۵. مقایسه غلظت رسوبات معلق دریایی یا SSC (کیلوگرم بر متر مکعب) در ایستگاه دو با اعمال مورفولوژی برای مدل عددی و مدل FVCOM.



شکل ۶. مقایسه غلظت رسوبات معلق دریایی یا SSC (کیلوگرم بر متر مکعب) در ایستگاه دو بدون اعمال مورفولوژی برای مدل عددی و مدل FVCOM.

۴ بحث

همان‌طور که دیده می‌شود نتایج (شکل‌های ۳ الی ۶) نشان‌دهنده دقت مدل عددی است. نتایج آن با مدل FVCOM مطابقت داشت. به منظور ارزیابی عملکرد مدل از خروجی مدل در ایستگاه دو استفاده شد. غلظت رسوبات معلق برای مدل FVCOM، به ترتیب از ۰ تا ۰/۲۷ (کیلوگرم بر متر مکعب) تخمین زده می‌شود، در حالی که این مقادیر برای خروجی مدل عددی ، با و بدون مورفولوژی به ترتیب از ۰/۰۲ تا ۰/۴ و ۰ تا ۰/۲۱ (کیلوگرم بر متر مکعب) متغیر است.

در ناحیه خلیج بوشهر، پویاترین نواحی چه از نظر هیدرودینامیکی و چه از نظر رسوبات منسجم، دو کانال دسترسی، بین مرز ساحلی شرقی و جزیره نگین (کانال داخلی) و کانال خارجی است. تنگه بین مرز شرقی و جزیره نگین باریکتر است و عبور جریان و رسوبات منسجم از وسط این تنگه می تواند پیچیده تر باشد. همچنین الگوهای رسوب و جریان در ناحیه دو کانال پیچیده ترند.

شاید با اجرای سایر روش‌های انتقال رسوب منسجم، بتوان با استفاده از مدل‌سازی سطح بالا، دقت پیش‌بینی حرکت ریزدانه را پیش‌بینی کرد. همچنین با اعمال اثر زمان در پدیده توده‌سازی و تحکیم رسوب در فرآیند مدلسازی، فرضیه های موجود با واقعیت همخوانی بیشتری دارند و در نتیجه نتایج از دقت بیشتری برخوردار خواهند بود.

در پروژه‌های تحقیقاتی دیگر، که مدل‌سازی دو بعدی رسوبات ریزدانه در مناطق طبیعی است، نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری سازگار نیست. این نشان می دهد که رسوبات ریزدانه عمدتاً در کانال ناوبری حمل می شود. در این صورت استفاده از مدل سه بعدی در مدل سازی این نوع رسوب ضروری به نظر می رسد، زیرا در این نوع مدل سازی جابجایی عمودی و افقی رسوبات ریز در نظر گرفته می شود. همچنین، اگر مدلی توانایی بازتولید ویژگی‌های رسوب شناور مانند تشکیل حداکثر غلظت رسوبات معلق و حرکت گل سیال را داشته باشد، به تخمین مقدار واقعی غلظت رسوبات معلق کمک می کند (نورمت، ۲۰۰۰).

بسترهای چسبنده اغلب لایه لایه هستند، و توده‌های گل متراکم با سرعت ته‌نشینی بالاتر، لایه‌های بستر پایین‌تر با چگالی بالاتر را تشکیل می‌دهند (برلامونت و همکاران، ۱۹۹۳). علاوه بر این، میچنر و تورفس(۱۹۹۶) و تورفس (۱۹۹۷) پیشنهاد کردند که ساختار بستر مخلوط‌های ماسه-گل ممکن است از لایه‌های مجزای ماسه و گل تشکیل شده باشد. لایه‌های گلی عمدتاً مستقیماً به حالت تعلیق فرسایش می‌یابند، در حالی که لایه‌های ماسه عمدتاً به بار بستر فرسایش می‌یابند.

۵ نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بالای انتقال رسوبات چسبنده و پیش‌بینی‌های مربوطه در محیط‌های آبی، یک مدل دوبعدی توسعه داده شده به کار گرفته شد که به طور همزمان هیدرودینامیک و رسوب را مدل‌سازی می کند. این مدل بر روی خلیج بوشهر اعمال شد که فرآیندهایی مانند فرسایش، رسوب‌گذاری، تحکیم و غیره را شبیه‌سازی کرد. سپس، نتایج ارتفاع سطح آب، سرعت جریان و میزان غلظت رسوبات معلق حاصل از مدل با داده‌های اندازه‌گیری و نتایج حاصل از مدلسازی با مدل آماده FVCOM مقایسه شد که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل بود. این مقایسه، اعتبار عملکرد مدل عددی را در حالت دوبعدی تأیید کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان از کمک‌های صادقانه و ارزشمند شرکت دانش بنیان ژرف دریا پژوهش پارس و تیم حرفه‌ای آن

بسیار قدردانی می‌کنند. همچنین از بنیاد ملی علوم ایران (INSF) در پروژه شماره ۴۰۳۲۲۲۰۹ تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

حق‌شناس، سید عباس (۱۳۹۱). انتشار موج روی بستر گلی. رساله دکتری. به راهنمایی محسن سلطان‌پور. گروه مهندسی عمران. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲-۲۱.

ژرف دریا پژوهش پارس (۱۳۹۹). گزارش بررسی تغییرات الگوی رسوب‌گذاری ناشی از توسعه بندر بوشهر.

سازمان بنادر و دریانوردی (۱۳۹۹). بررسی تغییرات الگوی رسوب‌گذاری ناشی از توسعه بندر بوشهر.

شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی (۱۳۷۹). گزارش اندازه‌گیری‌های دریایی بندر بوشهر.

صادقیان، آرزو، یاری، صادق و نجفی علمداری، مهدی (۱۳۹۵). بررسی روند رسوب‌گذاری کانال های دسترسی بندر بوشهر با استفاده از داده های هیدروگرافی دقیق.کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. تهران.

موحدی‌نژاد، سارا (۱۳۹۶). پیاده‌سازی مدل انتقال رسوبات معلق ریزدانه در نرم‌افزار PMODynamics. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. به راهنمایی اصغر بهلولی. گروه فیزیک فضا. موسسه ژئوفیزیک. دانشگاه تهران.

Baird and JWERC (2009). Marine measurements in the third phase (Bushehr).

Berlamont, J. E., Ockenden, M. C., Toorman, E. A., and Winterwerp, J. C. (1993). The characterization of cohesive sediment properties. Coast. Eng. 21(1–3), 105–128. https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90047-C.

Cui, Z., Huang, L., Fang, H., Han, D., Bombardelli, F. (2023). Exploring Cohesive Sediment Flocculation With Surface Heterogeneity: A Theoretical Lagrangian-Type Flocculation Model. Water. Resour. Res. Volume 59, Issue 11. https://doi.org/10.1029/2022WR034374.

Dearnaley, M. P., Roberts, W., Jones, S., Leurer, K. C., Lintern, D. G., Merckelbach, L. M., Sills, G. C., Toorman, E. A., Winterwerp, J. C. (2002). Proceedings in Marine Science, Volume 5, 57-73. https://doi.org/10.1016/s1568-2692(02)80008-0.

DHI (2005). Modeling studies of Bushehr Port.Einstein, H. A. and Krone, R. B. (1962). Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water, J. Geophys. Res. 67(4), 1451-1461 . https://doi.org/10.1029/jz067i004p01451.

Farhangmehr, A., Haghshenas, S. A., and Zarinfar, E. (2021). Investigating Sedimentation in Bushehr Port Access Channel, Adopting Periodic Sonar Surveys and Numerical Simulations, Conference: International Conference on Cohesive Sediment At: Delft, The Netherlands.

Heydari, N., Diplas, P. (2022). Three-Dimensional Turbulent Flow Characteristics Near the Leading Edge of a Longitudinal Structure in the Presence of an Inclined Channel Bank. J. Water. 14(21), 3524. https://doi.org/10.3390/w14213524.

Issaka, S., Ashraf, M. A. (2017). Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review, Journal of Geology, Ecology, and Landscapes. 1-11. https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053.

Leupi, C. (2005). Numerical modeling of cohesive sediment transport and bed morphology in estuaries, Thesis, P.D.: DIPET II de l'Université de Douala, Cameroun et de nationalité camerounaise.

LeVeque, R. J. (2007). Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations

Liu, M., Zeng, L., Wu, L., Zhu, C., Abi, E. (2022). Effect of periodic water-sediment laden flow on damage for steel piles, J. Front. Env. Sci. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.971786.

McCave, I. N. (1984). Erosion, transport and deposition of fine-grained marine sediments. Geological Society, London, Special

Publications, 15(1), 35-69. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142025

Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., Teeter, A. M. (1989). Cohesive Sediment Transport. I: Process Description. J. Hydraul. Eng. (N Y), Volume 115, Issue 8. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:8.(۱۰۷۶)

MIKE21 (2012). Mud Transport Models, Release 2.7, User Guide and Reference Manual, Danish Hydraulic Institute.

Mitchener, H. J., and Torfs, H. (1996). Erosion of mud/sand mixtures. Coast. Eng. 29 (1–2), 1–25. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00002-6.

Movahedinejad, S.; Bohluly, A; Haghshenas, S. A.; Bidokhti, A. A. (2023). A 2D numerical model for simulation of cohesive sediment transport, Comput. Geosci. http://doi.org/10.1007/s10596-023-10201-w.

Namin, M. (2003). A fully three-dimensional non-hydrostatic free surface flow model for hydro-environmental prediction, Ph.D. Thesis, Cardiff School of Engineering, Cardiff University.

Normant, C.L. (2000). Three-dimensional modelling of cohesive sedi ment transport in the Loire estuary. Hydrol. Process. 14(13), 2231–2243.

Parchure, T. M. and Mehta, A. J. (1985). Erosion of soft cohesive sediment deposits, J. Hydraul. Eng. 111(10), 1308-1326. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:10.(۱۳۰۸)

Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils, J. Hydraul. Eng. 91(1), 105-139. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001165.

Sogreah (2006). Bushehr Port complex development – Design supporting hydraulic studies.

Teeter, A. M. (1986).Vertical transport in fine-grained suspension and newly-deposited sediment, In Estuarine cohesive sediment dynamics, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, vol 14. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4936-8_9.

Thorne, P. D., Hardcastle, P. J. and Soulsby, R. L. (1993). Analysis of acoustic measurements of suspended sediments, J. Geophys. Res.: Oceans 98(C1), 899-910. http://dx.doi.org/10.1029/92JC01855.

Torfs, D., Mitchener, H., Huysentruyt, H., and Toorman, E. (1996). Settling and consolidation of mud/sand mixtures. Coast. Eng. 29 (1– 2), 27–45. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00013-0.

Torfs, H. (1997). Erosion of mixed cohesive/non-cohesive sediments in uniform flow. Cohesive sediments, N. Burt, R. Parker, and J. Watts, eds., Wiley, New York, 245–252.

Yanenko N. N. (1971). The Method of Fractional Step, Springer-Verlag.

Iranian Journal of Geophysics, Vol 20, No 4, 2026, P. 7 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2026. .565771.1742

The 2D numerical simulation of fine-grained marine sediment transport in the channel of the Bushehr Port

Sara Movahedinejad [1], Maryam Soyuf Jahromi [2*], Seyed Abbas Haghshenas [3] and Seyed Mostafa Siadatmousavi [4]

[1] *Ph.D. Student, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran*
[2] *Associate Professor, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran*
[3] *Associate Professor, Institute of geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*
[4] *Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

(Received: 14 December 2025, Accepted: 14 June 2026)

Summary

The study of sedimentation in ports and harbors is a serious topic in coastal engineering and oceanography studies which is annually accompanied by high dredging costs. Study of sediment transport and determination of deposition and erosion rates are fundamental studies in construction and development of ports. Numerical modeling of fine-grained and cohesive sediments transport and morphodynamics provides an effective tool for understanding sediment problems in coastal areas with fine-grained material. Study of sedimentary processes depends on the type of sediment. Due to this fact that many coastal zones have fine-grained or cohesive sediment, studying of this kind of sediment is important. Fine-grained marine sediments, due to their behavior, have certain complex characteristics compared to other marine sediments. This type of marine sediment can be transported in two phases: suspended load and bed load, each of which has different consequences and characteristics. In this study, a two-dimensional numerical model was used, which includes all processes related to the transport of marine cohesive sediments such as flocculation and its effect on the settling velocity of marine cohesive sediment particles, consolidation of bed layers and transport of marine sediments between layers, changes in bed shear stress under the influence of the simultaneous presence of waves and currents, bed morphology, deposition and erosion. To evaluate the transport of marine sediments, all processes were considered. To simulate fine-grained sediment transport, the main parts of the computational engine are an advection-dispersion engine and some experimental formulas related to cohesive sediment processes. This model determines the rate of erosion and deposition of cohesive sediment under different wave and current conditions. To verify the model performance, the model results were compared with the Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) results and field data reported in the Bushehr Bay simulation phase, a case study. In the performance section of the cohesive sediment module, the model results with and without applying morphological changes were compared with the FVCOM model results. The comparisons show that the model successfully simulated the hydrodynamics and cohesive sediment in the Bushehr Bay area in July 2010. The location chosen for comparing sedimentation between the two models is located exactly at the beginning of the outer channel. This location has high dynamics in terms of sedimentation and erosion. This is because the natural outlet path of Bushehr Bay intersects with the outer channel at this location, which results in more complex sedimentation patterns, including deposition and erosion.

Keywords: Cohesive sediment, sediment transport, numerical model, hydrodynamics

[*] Corresponding author: soyufjahromi@hormozgan.ac.ir