مدل‌سازی رسوب‌گذاری در خور بوشهر با استفاده از نرم‌افزار MIKE 21

مرتضی زنگانه[۱*]، عقیل حاج مومنی[۲]

[۱] استادیار، بخش مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان؛ m.zanganeh@gu.ac.ir
[۲] کارشناسی‌ارشد سازه‌های هیدرولیکی، مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران؛ Hajmomeni@sazehprdazi.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
رسوب‌گذاری
خور بوشهر
MIKE 21
ماژول MT

چکیده

تخمین میزان رسوب‌گذاری در بنادر و خورها از اهمیت زیادی در طراحی سازه‌های دریایی برخوردار می باشد. در این مقاله، فرآیند رسوب‌گذاری در خور بوشهر به عنوان یکی از مهمترین پیکره‌های آبی جنوب ایران با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی و مشخصاً نرم‌افزار MIKE 21 مورد بررسی قرار گرفت. روش کار در این مطالعه به این صورت بوده است که در گام نخست با استفاده از ترازهای آب ثبتی در منطقه چابهار، یک مدل عددی هیدرودینامیکی بزرگ مقیاس به کمک ماژول FM نرم‌افزار MIKE 21 توسعه داده شد. این در حالی بود که مدل مورد نظر با استفاده از ترازهای آب ثبت شده در ایستگاه ایران سیام بوشهر کالیبره شد. سپس با استفاده از یک مدل محلی، وضعیت جریانات و نوسانات جزر و مدی در محدودهٔ طرح با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار گرفت. در توسعه این مدل محلی از نتایج مدل کلی توسعه داده شده برای محدودهٔ بوشهر استفاده گردید. در گام دوم با استفاده از غلظت رسوبات معلق ثبت شده در نقاط مختلف کانال بوشهر، روند رسوب‌گذاری در محل خور بوشهر به وسیله ماژول MT نرم‌افزار MIKE 21 در قالب یک مدل محلی مدل‌سازی شد. بعد از توسعه و کالیبراسیون مدل مذکور، به منظور بررسی روند رسوب‌گذاری سالانه در خور بوشهر این مدل برای مدت ۱ سال اجرا گردید. نتایج نشان داد که در هر سال میزان رسوب‌گذاری در داخل خور بوشهر از حدود ۷ سانتی‌متر در جلو اسکله شرکت بازرگانی و خدمات بندری ایران (CPS) تا ۲۲ سانتی متر در محل اسکله کوثر خواهد بود.

Modeling of Siltation at Bushehr Estuary by MIKE 21

Morteza Zanganeh[1], Aghil Hajmomeni[2]

[1] Corresponding author: Assistant professor, Department of Civil Engineering, College of Technical Engineering, Golestan University, (m.zanganeh@gu.ac.ir)
[2] MSc. in Hydraulic Structures, Sazehpardazi Consulting Engineering (Hajmomeni@ sazehpardazi .com)

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 10 Sep. 2015
Accepted: 21 Aug. 2016

Keywords:
Siltation
Bushehr Estuary
MIKE 21
MT Module

ABSTRACT

Estimation of siltation depth in harbors and estuaries plays an important role in design of marine structures. In this paper, siltation process at Bushehr estuary as one of the most important water bodies in south of Iran is modeled by so-called MIKE 21 mathematical model. To achieve this, at first a large scale hydrodynamic model calibrated by IRANSIAM registered water levels is developed while Chabahar registered tidal levels are considered as its boundary condition. Then, by developing a local model with fined mesh the dominant flow pattern is captured in the studied area. The local model is developed by hydrodynamic data taken from the large scale hydrodynamic model. Finally, via MIKE-21 MT module pattern of siltation in the study area is simulated by calibrating the model with sediment concentrations registered at Bushehr channel. Final results showed variation of siltation depth from 7cm in front of CPS platform till 22cm net siltation in front of Kosar platform inside the estuary.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

۱- مقدمه

خلیج فارس و دریای عمان که مرزهای جنوبی کشور پهناور ایران را تشکیل داده‌اند، پل ارتباطی بسیار مناسبی جهت تبادل و ترانزیت محصولات نفتی و غیر نفتی در منطقه می‌باشند. بر همین اساس، در چند سال اخیر اسکله‌های پهلوگیری زیادی به منظور تسهیل تردد شناورهای تخلیه‌کننده فرآورده‌های نفتی و غیر نفتی در مناطق مختلف ساحلی این پیکره‌های آبی ساخته شده است. یکی از مهمترین فاکتورها در طراحی این زیرساخت‌ها تخمین میزان رسوب‌گذاری در محل این اسکله‌ها می‌باشد. این مساله در خورها با توجه به ایجاد ناحیه سایه و چسبندگی رسوبات و فولکوله شدن آن‌ها بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد در خورها در زمانی که حالت ساکن جزر و مدی حاکم است رسوبات معلق چسبنده تمایل زیادی برای نشست به ویژه در دهانه آن‌ها پیدا می کند [۲،۱].

خور بوشهر به عنوان یکی از خورهای مهم کشور ایران بوده که تحت تاثیر رسوب‌گذاری زیادی قرار دارد. شبیه‌سازی این رسوب-گذاری با توجه به حضور رسوبات چسبنده و همچنین اسکله‌های متعدد در این محل از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. چرا که با تخمین مناسب میزان رسوب‌گذاری و فرسایش می‌توان به طراحی دقیق‌تر تاسیسات بندری در این منطقه مبادرت نمود [۳].

تاکنون مدل‌های زیادی جهت مدل‌سازی رسوب‌گذاری ارائه شده است. در سال ۱۳۷۵ شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری به سفارش سازمان بنادر و کشتیرانی یک سری اندازه‌گیری میدانی در اطراف بندر امام خمینی (ره) برای مدت یک ماه انجام داده است. هدف از انجام این اندازه‌گیری‌ها جمع‌آوری اطلاعات لازم جهت شبیه‌سازی انتقال رسوبات بود که در نهایت به توسعه مدل انتقال رسوب در منطقه مورد نظر انجامید [۴]. تحقیقات انجام شده توسط ولی‌زاده و کلاهدوزان نیز به بررسی اثر دیوار انحراف دهنده رسوب بر روی رسوب‌گذاری داخل بنادر پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار انحراف‌دهنده رسوب، قابلیت میزان رسوب‌گذاری در بنادر را تا ۳۰ درصد می‌تواند کاهش دهد. لازم به ذکر است که در تحقیق مذکور از نرم‌افزار MIKE 3 و ماژول MT به ترتیب به عنوان مدل شبیه‌ساز جریان و رسوب‌گذاری استفاده شد [۵]. این تحقیق مبتنی بر کار Kuijper و همکاران جهت کاهش میزان رسوب‌گذاری در بندر Parkhafen هامبورگ صورت گرفت. در تحقیق دیگری جزایری و سلطانپور مدل عددی را جهت مدل‌سازی رسوب‌گذاری تحت اثر امواج خطی ارائه نمودند. Connor و همکاران مدل‌های عددی مختلفی را جهت مدل‌سازی رسوب‌گذاری اطراف بندر Chukpyon کره، توسعه دادند. نتایج این مدل‌سازی‌ها حاکی از حرکت رسوبات زیادی به سوی این بندر بود [۶].

همانطور که گفته شد، یکی از خورهای مهم ایران که در معرض رسوب‌گذاری توسط رسوبات چسبنده بوده خور بوشهر می‌باشد. تخمین میزان رسوب‌گذاری در این خور به منظور احداث زیر ساخت‌های جدید می‌تواند دورنمای اقتصادی بودن این طرح‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها را در منطقه موردنظر بیش از پیش مشخص کند. به همین منظور، هدف از انجام تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی رسوب‌گذاری در خور بوشهر بوده که توسط نرم‌افزار MIKE21 ماژول MT انجام می‌شود. در این تحقیق بعد از بیان مقدمه‌ای بر اهمیت مساله رسوب‌گذاری، منطقه مورد مطالعه معرفی شده و سپس اندازه‌گیری‌های انجام شده در منطقه مورد نظر بررسی می شود. در گام بعدی مدل‌های عددی مورد نظر معرفی و سپس نیز بر مبنای اندازه‌گیری‌های انجام شده در منطقه طرح، مدل‌های عددی مورد نظر توسعه داده شده و کالیبره می‌شود. در نهایت نیز به مدل‌سازی نحوه رسوب‌گذاری در خور بوشهر پرداخته می‌شود.

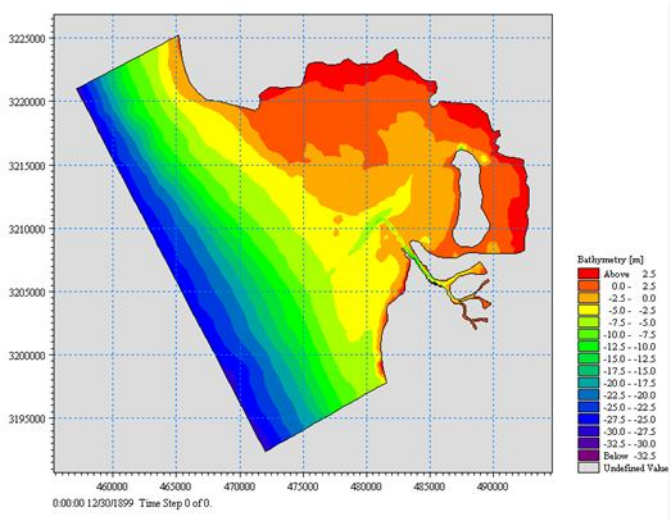
۲- منطقه مورد مطالعه

همانطور که گفته شد، در این مقاله به چگونگی رسوب‌گذاری در خور بوشهر با استفاده از شبیه‌سازی عددی مبادرت می‌شود. این پیکره آبی در ناحیه ۳۹ سیستم جغرافیایی UTM و در حدود مختصات ۴۸۰۷۱ شرقی و ۳۲۰۷۴۵۲ شمالی واقع شده است. همچنان‌که در شکل ۱ نمایش داده شده است تاسیساتی مانند بندر بوشهر، اسکله کوثر در داخل این پیکره آبی واقع شده که این مساله اهمیت مطالعه حاضر را بیش از پیش مشخص می‌کند. بسی‌متری موجود منطقه طرح برای مدل‌سازی در این مقاله، از هیدروگرافی انجام شده در محدودهٔ کانال بوشهر و حوضچهٔ بندر بوشهر در سال ۱۳۸۲، هیدروگرافی‌های برداشت شده در طرح توسعه اسکله کوثر و همچنین هیدروگرافی انجام شده در محدودهٔ اسکله شرکت بازرگانی و خدمات بندری ایران (CPS) در سال ۱۳۹۰ تهیه شده است. همان‌طورکه در شکل ۲ نمایش داده شده است عمق آب در این خور در مناطقی به حدود ۱۲ متر نیز می‌رسد.

شکل ۱ – موقعیت خور بوشهر نسبت به شهر بوشهر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

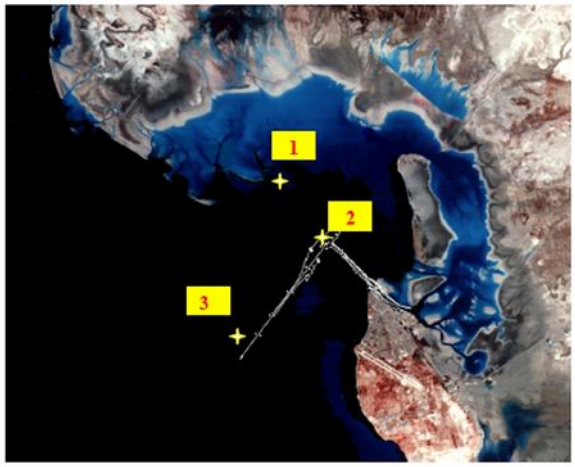


شکل ۲ – هیدروگرافی منطقه خور بوشهر و منطقه اطراف آن

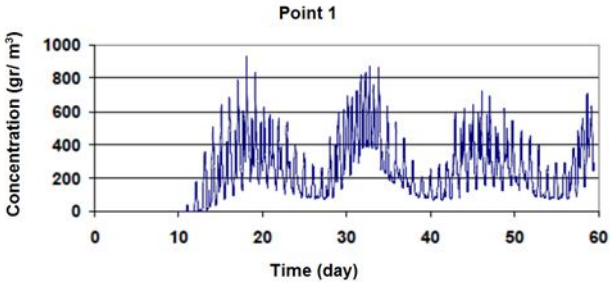
۲- اندازه‌گیری‌های انجام شده در منطقه طرح

در استفاده و توسعه هر مدل عددی کالیبراسیون آن مدل با استفاده از داده‌های میدانی ثبت شده آن منطقه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. به همین منظور، در این تحقیق جهت کالیبره کردن مدل‌های عددی جریان و رسوب از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری (در سال ۱۳۷۹) در منطقه طرح استفاده شده است. این شرکت به سفارش سازمان بنادر و کشتیرانی، یک سری عملیات میدانی با هدف تهیه اطلاعات لازم به منظور شبیه‌سازی انتقال رسوب در بندر بوشهر انجام داده است. اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌های مذکور توسط مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو اصلاح شده و فایل‌های الکترونیک مربوط به آن تهیه گردیده است. در این اندازه‌گیری‌ها میزان غلظت رسوبات در سه نقطه نشان داده شده در شکل ۳ انجام شد. شکل ۴ تا شکل ۶ تغییر میزان غلظت رسوبات اندازه‌گیری شده را برای مدت ۲ ماه در نقاط مورد نظر نشان می‌دهد. مطابق با نمودار این شکل‌ها میزان غلظت با ترازهای جزر و مدی دچار نوسان می‌شود. همچنین میزان غلظت در حداکثر مقدار خود به مقدار ۱۴۰۰ گرم بر مترمکعب در نقطه ۲ اندازه‌گیری رسیده که مقدار قابل توجه‌ای است.

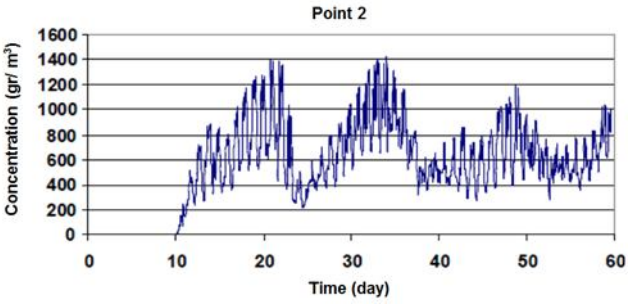
در تحقیق شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری نوسانات ترازهای جزر و مدی، مختص منطقه مورد مطالعه در محل مشخصی در فاصله زمانی ۲۰ تیر ماه تا ۲۶ مرداد ماه سال ۱۳۷۹ همزمان با غلظت رسوبات معلق (اواسط جولای تا اواسط اگوست سال ۲۰۰۰ میلادی) ثبت شده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده مربوط به موقعیتی به نام ایران سیام بوده که در شکل ۷ نمایش داده شده است. نمونه‌ای از نتایج اندازه‌گیری ترازهای جزر و مدی، در شکل ۸ آورده شده است.



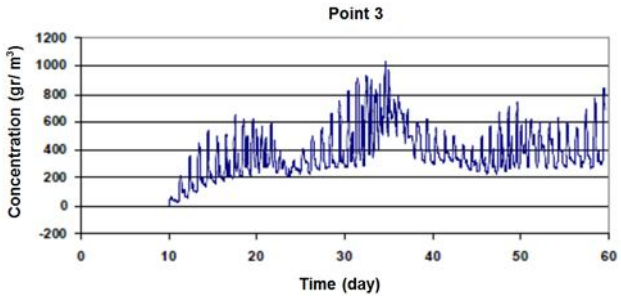
شکل۳- موقعیت اندازه‌گیری‌های غلظت رسوبات در محدوده بندر بوشهر [۳].



شکل ۴- تغییرات غلظت رسوبات در نقطه ۱ (گرم بر متر مکعب) [۳]



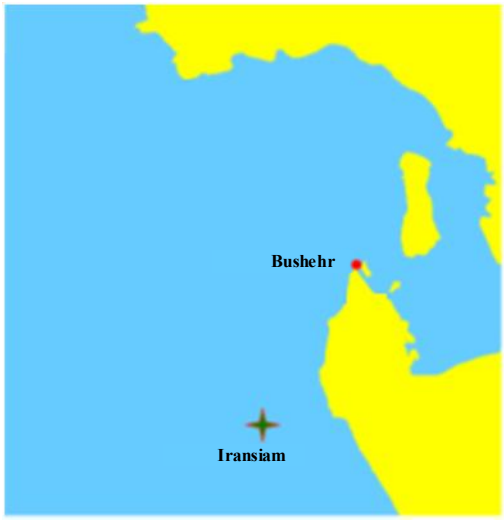
شکل ۵- تغییرات غلظت رسوبات در نقطه ۲ (گرم بر متر مکعب) [۳].



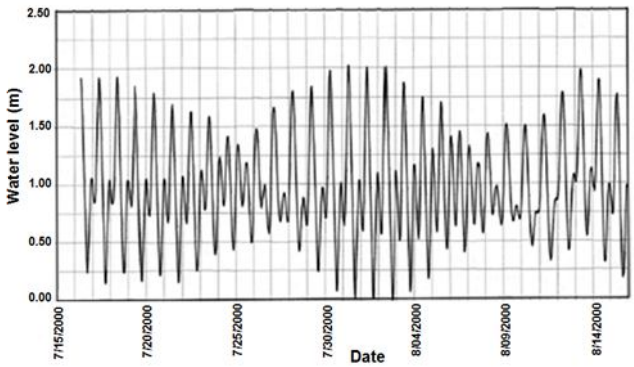
شکل ۶- تغییرات غلظت رسوبات در نقطه ۳ (گرم بر متر مکعب) [۳].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]



شکل ۷- موقعیت ایران سیام در نزدیک بندر بوشهر [۳] .



شکل ۸- نمونه‌ای از اندازه‌گیری‌های تغییرات تراز آب در اطراف بندر بوشهر- موقعیت ایران سیام [۳]

۳- معرفی نرم‌افزار MIKE21-FM

به منظور توسعه مدل هیدرودینامیک جریان در این مقاله از ماژول FM نرم‌افزار دوبعدی MIKE 21 استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی انتشار جریان با توجه به مطالعات گذشته و حاکم بودن رفتار دوبعدی بر پدیده رسوب‌گذاری و همچنین بررسی بلندمدت رسوب‌گذاری در منطقه خور بوشهر از این نرم‌افزار استفاده می‌شود. معادلات دوبعدی در این نرم‌افزار در واقع معادلات جریان متوسط‌گیری شده در عمق می‌باشند. این معادلات شامل یک معادله بقاء جرم و دو معادله بقاء اندازه حرکت (در دو بعد افقی و قائم) بوده و به کمک این دستگاه معادلات، سه مجهول عمق آب (h) و دو مؤلفه سرعت که در دستگاه مختصات کارتزین $(\bar{u},\bar{v})$ بوده، قابل محاسبه است. دستگاه معادلات مذکور عبارتند از:

- معادله بقاء جرم:

$$\frac{\partial h\rho}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS \qquad (۱)$$

- معادله بقاء اندازه حرکت در جهت x:

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^{2}}{\partial x}+\frac{\partial h\overline{uv}}{\partial y}=f\bar{v}h-gh\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{t_{sx}}{\rho_0}-\frac{t_{bx}}{\rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{xy}\right)+hu_sS \qquad (۲)$$

- معادله بقاء اندازه حرکت در جهت y:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{v}^{2}}{\partial y}+\frac{\partial h\overline{uv}}{\partial x}=f\bar{u}h-gh\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y}+\frac{t_{sy}}{\rho_0}-\frac{t_{by}}{\rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial s_{yx}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{xy}\right)+hv_sS \qquad (۳)$$

که در آن:

$h=d+\eta$: که در آن d، عمق متوسط آب و h، تراز سطح آب است.

$\bar{u},\bar{v}$: مولفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق به ترتیب در راستای x,y بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$h\bar{u}=\int_{-d}^{\eta}udz,\quad h\bar{v}=\int_{-d}^{\eta}vdz, \qquad (۴)$$

$\vec{g}$: شتاب جاذبه زمین

$f=2W\sin j$: اثر کریولیس است که در آن j عرض جغرافیایی می‌باشد

W: نرخ چرخش زاویه‌ای

r: چگالی

r_0: چگالی مبنا

S: مقدار دبی در نقاط منبع

(u_s,v_s): سرعت ورود آب در نقاط منبع

x , y: مولفه‌های مختصات

t: زمان

$s_{xy},s_{xx},s_{yy},s_{yx}$: مولفه‌های تانسور تنش تشعشعی

$(t_{sx},t_{sy}),(t_{bx},t_{by})$: مولفه‌های تنش برشی ناشی از اصطکاک در کف و ناشی از باد در سطح

T_{ij}: تنش برشی افقی ناشی از آشفتگی است که توسط روابط زیر تخمین زده می‌شوند:

$$T_{xx}=2A\frac{\partial \bar{u}}{\partial x},\quad T_{xy}=A\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right),\quad T_{yy}=2A\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \qquad (۵)$$

که در آن A ضریب لزجت گردابه‌ای است.

به منظور مدل‌سازی حرکت رسوبات چسبنده در این مطالعات ماژول AD از همین نرم‌افزار فعال می‌شود که با استفاده از آن دو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

معادله انتقال و پخش رسوبات معلق که به صورت زیر بوده حل می‌شوند:

معادله انتقال-پخش غلظت:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}+u\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}=0 \qquad (۶)$$

$$\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right)+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}\left(hD_y\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}\right)+Q_L C_L\frac{1}{h}-S=0 \qquad (۷)$$

که در آن:

$\bar{c}$: غلظت متوسط در عمق

$\bar{u},\bar{v}$: مولفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق به ترتیب در راستای x, y

h: عمق آب (m)

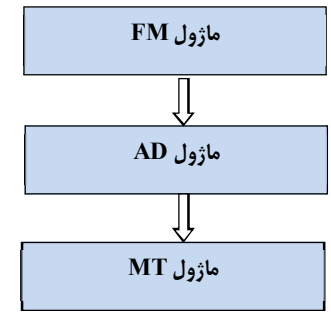
D_x و D_y : ضرایب پخش

S: مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری

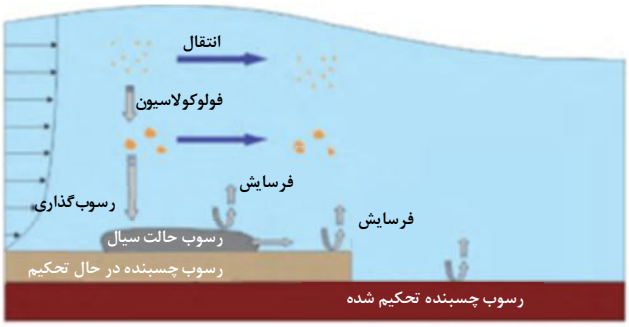
Q_L: دبی ورودی در واحد مساحت

C_L: میزان غلظت موجود در منبع ورودی رسوب

معادله انتقال-پخش رسوب ارائه شده در نرم‌افزار MIKE 21 با استفاده از روش مرتبه سوم QUCKEST ULTIMATE حل می‌شود. بعد از تحلیل حرکت رسوبات معلق باید میزان رسوب-گذاری و فرسایش (S) تعیین گردد که این مساله با استفاده از ماژول MT (Mud Transport) نرم‌افزار MIKE 21 انجام می‌شود. به طور کلی ارتباط بین ماجول‌های مختلف در نرم‌افزار MIKE 21 را می‌توان به صورت شکل ۹ بیان کرد. همچنین شکل ۱۰ فرآیندهای مختلف در انتقال رسوبات چسبنده را نمایش می‌دهد [۷].



شکل ۹- فرآیند محاسبه میزان انتقال رسوبات چسبنده در مدل MIKE21-FM/MT



شکل ۱۰- فاکتورهای مهم در رسوب‌گذاری و فرسایش رسوبات چسبنده [۷].

۴- مدل‌سازی عددی

به عنوان مهمترین پارامتر انتقال رسوبات در محدودهٔ طرح لازم است شناخت کافی از وضعیت جریانات جزر و مدی در این منطقه حاصل گردد. در تعیین میزان جریان‌های ناشی از پدیده جزر و مد در منطقه خلیج فارس دو نوع مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مدل اول، مدل بزرگ مقیاسی (Large scale) بوده که شامل یک مرز باز خواهد بود. این مدل وضعیت نوسانات و جریانات جزر و مدی را به صورت کلی ارائه می‌دهد و از نتایج آن برای شرایط مرزی مدل‌های ریز مقیاس‌تر استفاده می‌گردد. با توجه به مجموعه تجربیات پیشین، موقعیت مرز باز این مدل کلی، منطقه نزدیک خلیج چابهار در جنوب شرق ایران در نظر گرفته شده است. مدل دوم نیز مربوط به مدل محلی و یا کوچک مقیاس (Small scale) بوده که در این مدل پس از استخراج مشخصات جریان در منطقه طرح از مدل بزرگ مقیاس توسعه داده شده، به تعیین نوسانات و میزان سرعت جریانات در محدودهٔ طرح پرداخته می‌شود.

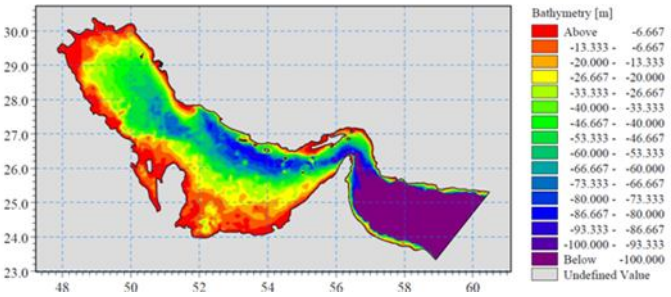
۴-۱- مدل بزرگ مقیاس

یکی از مهمترین داده‌های ورودی در مدل‌سازی بزرگ مقیاس با نرم‌افزار MIKE 21 تهیه فایل بسی‌متری محدودهٔ مورد مطالعه است. در این مقاله، بسی‌متری بکارگرفته شده در مدل بزرگ مقیاس بر اساس نقشه‌های هیدروگرافی و آدمیرالیتی خلیج فارس و دریای عمان بوده که با استفاده از داده‌ها و نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰، ۱/۲۵۰۰۰ و ۱/۱۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری ایران برای سواحل سمت ایران به هنگام شده است. بعد از تهیه فایل بسی‌متری (شکل ۱۱)، محدوده مدل شبکه‌بندی شده که شکل ۱۲ چگونگی شبکه‌بندی منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد. اندازه کوچکترین بعد سلول‌های (Cells) شبکه محاسباتی برابر ۱۰۰۰ متر و اندازه بزرگترین آن نیز به ۱۰۰۰۰ متر می‌رسد. لازم به ذکر است که اندازه شبکه‌ها در محل پروژه با توجه به نیاز دقیق‌تر بررسی آن منطقه ریزتر در نظر گرفته شده است.

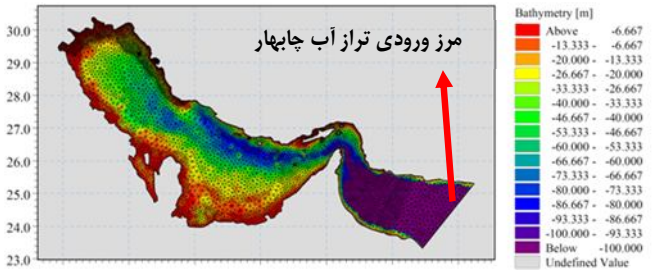
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

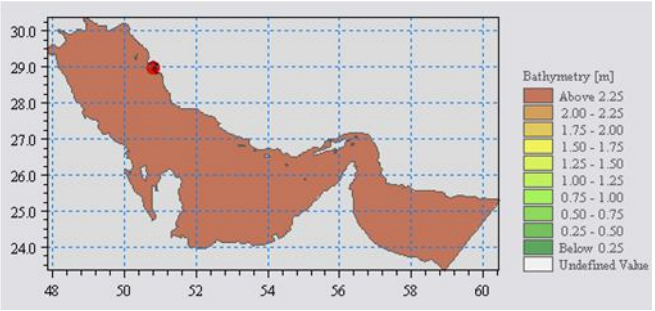
همانطور که قبلا بدان اشاره شد، از جمله موارد مهم در هر مدل عددی جهت تعمیم‌پذیر کردن هر چه بیشتر آن‌ها به منظور بکارگیری در شرایط هیدرودینامیکی دیگر، کالیبراسیون این مدل‌ها می‌باشد. به همین منظور، مدل جریان بزرگ مقیاس توسعه داده شده با استفاده از داده‌های تراز آب در منطقه چابهار از تاریخ ۲۰۰۰/۷/۱۵ تا تاریخ ۲۰۰۰/۸/۱۶ به عنوان مرز ورودی مدل، در منطقه بوشهر با استفاده از داده‌های تراز سطح آب ایستگاه ایران سیام کالیبره شد (شکل ۸). لازم به ذکر است که در این مدل میزان عدد مانینگ ۶۰ به عنوان ضریب زبری بستر در نظر گرفته شده است. تغییرات تراز آب بدست آمده توسط مدل عددی توسعه داده شده در مقابل ترازهای ثبتی ایستگاه ایران سیام بوشهر در شکل ۱۴ نمایش داده شد است. همچنان‌که در این شکل نمایش داده شده است، مدل توسعه داده شده در این منطقه کالیبره بوده و قابلیت استفاده و تعمیم به حالت‌ها و کاربردهای دیگر در این محل را دارا می‌باشد.



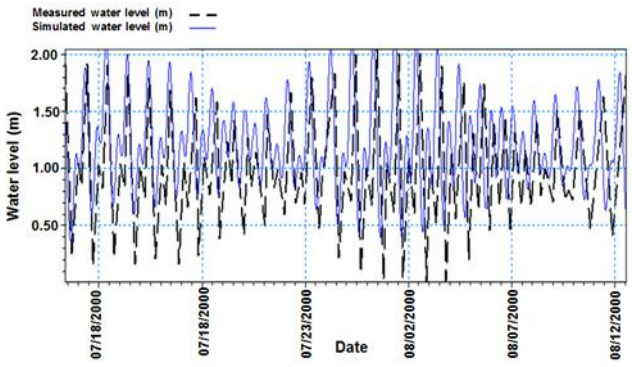
شکل ۱۱- بسی‌متری کلی دریای عمان و خلیج فارس



شکل ۱۲- چگونگی شبکه‌بندی در دامنه محاسباتی مدل کلی جریان جزر و مدی



شکل ۱۳- نقطه استخراج داده‌های جزر و مدی شبیه‌سازی شده با استفاده ماژول FM



شکل ۱۴- تغییرات تراز آب ثبتی در منطقه بوشهر در مقابل مقادیر نتیجه شده از شبیه‌سازی عددی

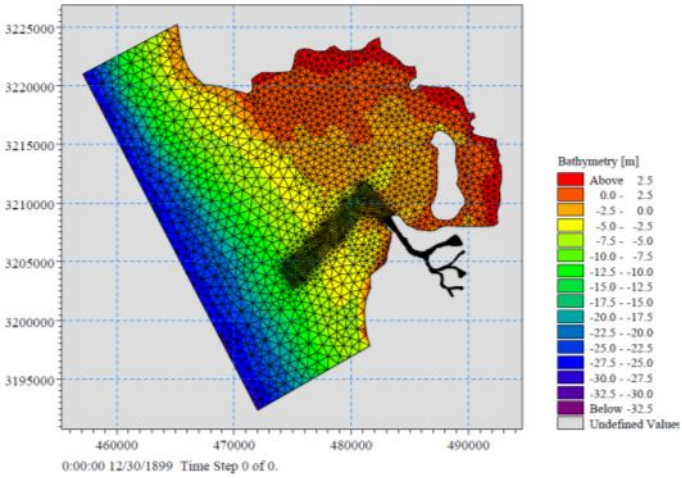
۴-۲- مدل کوچک مقیاس

بعد از استخراج نتایج جریان و تراز آب در نزدیکی منطقه بوشهر، در مرحله بعد با در نظر گرفتن محدودهٔ محاسباتی جدید، کوچک مقیاس و متمرکز بر محدودهٔ پروژه، تغییرات سرعت جریان و ترازهای جزر و مدی در خور بوشهر و در نزدیکی سازه اسکله سایت شرکت بازرگانی و خدمات بندری ایران (CPS) در بندر بوشهر بررسی می‌شود. محدوده محاسباتی در نظر گرفته شده در این منطقه و همچنین نحوه شبکه‌بندی و موقعیت استخراج نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

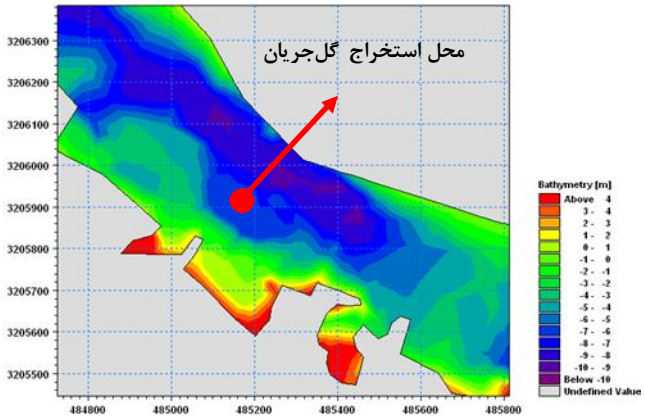
شایان ذکر است که اندازه ابعاد شبکه در کانال لایروبی شده و در محدوده خور در حدود ۵۰ متر می‌باشد. این در حالی است که ابعاد شبکه محاسباتی در محدوده خور بوشهر و کانال بوشهر ریزتر در نظر گرفته شده است. بعد از اجرای مدل مورد نظر گل‌جریان ناشی از جریان‌های جزر و مدی در جلوی اسکله خدمات بندری CPS (شکل ۱۶) در شکل ۱۷ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج بیشترین میزان سرعت جریان‌های جزر و مدی در روبروی سایت CPS حدود ۰/۲ متر بر ثانیه می‌باشد. این میزان سرعت بیان‌کننده میزان پتانسیل ورود و ته‌نشینی رسوبات چسبنده می‌باشد. از آنجایی‌که در فرآیند انتقال رسوب، آشفتگی ناشی از موج منجر به افزایش و بلندشدن رسوبات معلق می‌شود، پدیده رسوب‌گذاری در محل اسکله مورد نظر باید در اندرکنش با امواج تولیدی در منطقه مورد مطالعه منظور شود. به منظور مدل‌سازی امواج در منطقه مورد نظر از ماژول SW نرم‌افزار MIKE 21 استفاده می شود. نتایج این مدل در مدل‌سازی رسوب توسط نرم‌افزار MIKE 21، به صورت یک‌طرفه اعمال می‌گردد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

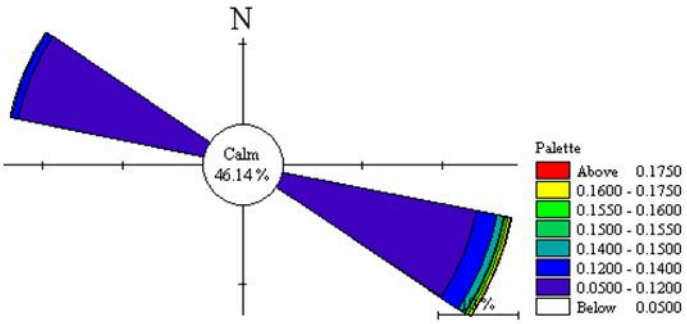
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]



شکل ۱۵- شبکه‌بندی انتخاب شده جهت مدل‌سازی محلی جریان‌های جزر و مدی



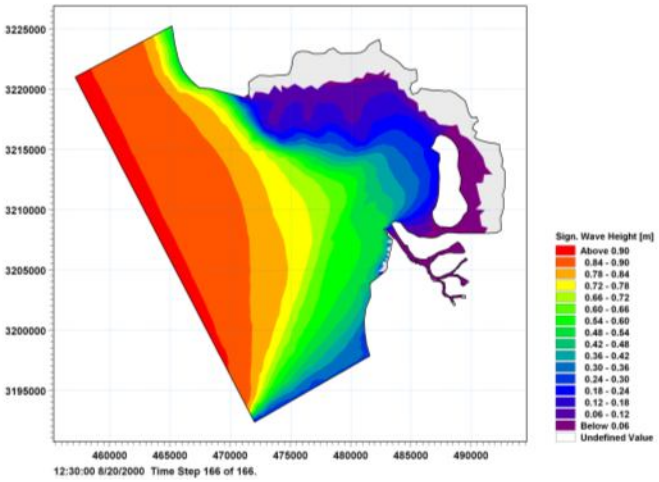
شکل ۱۶- موقعیت نقط استخراج نتایج مدل محلی در جلوی اسکله خدمات بندری CPS



شکل ۱۷- گل‌جریان ناشی از جریان‌های جزر و مدی در داخل خور با معیار آرامش سرعت جریان ۰/۰۵ متر بر ثانیه

۳-۴- مدل‌سازی موج با استفاده از ماژول SW

همچنان که در بخش قبل بدان اشاره شد، در فرآیند کالیبراسیون مدل انتقال رسوب از داده‌های موج تولیدی توسط مدل SW به عنوان شرط مرزی موج به حالت یک طرفه استفاده می‌شود. منظور از مدل یک طرفه (None-coupled) در این مقاله مجزا بودن مدل MT و SW بوده که در آن اثر غلظت رسوبات بستر بر مدل موج لحاظ نمی‌شود. برای مدل‌سازی حرکت موج در منطقه بوشهر از داده‌های موج ISWM از تاریخ ۲۰۰۰/۷/۱۰ تا تاریخ ۲۰۰۰/۸/۲۰ استفاده شده است که این داده‌ها بر اساس مدل‌سازی کلی خلیج فارس و دریای عمان و با استفاده از اطلاعات میدان باد ECMWF حاصل شده است. بعد از اجرای مدل موج SW توسعه داده شده در منطقه بندر بوشهر مشخصات ارتفاع موج برای یک گام زمانی در منطقه مورد نظر در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. همچنان که در این شکل نشان داده شده میزان ارتفاع موج با نزدیک شدن به دهانه خور بوشهر کاهش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است در مدل SW توسعه داده شده میزان زبری بستر نیکورادزه معادل ۰/۰۰۲ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸- نمونه‌ای از توزیع ارتفاع موج شبیه‌سازی شده در مدل MIKE 21-SW

۵- مطالعات رسوب‌گذاری

بعد از توسعه و کالیبراسیون مدل جریان، در این بخش نتایج مطالعات رسوب‌گذاری در محل خور بوشهر منعکس می‌گردد. از آنجایی که استفاده از مدل عددی در مدل‌سازی فرآیند انتقال رسوب با هدف توانایی تعمیم‌پذیری برای شرایط مختلف، مستلزم کالیبراسیون آن می‌باشد، در این مطالعه از داده‌های اندازه‌گیری غلظت در نقطه ۲ شکل ۳ استفاده شده است. به این صورت که با اعمال غلظت رسوبات معلق در نقطه ۳ اندازه‌گیری به عنوان شرایط مرزی ورودی و همچنین اعمال شرایط مرزی هیدرودینامیکی (جزر و مد و موج) در مدل با مقیاس کوچک، میزان غلظت رسوبات معلق در نقطه ۲ تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که در این مرحله با توجه به اهمیت امواج تولیدی در ایجاد آشفتگی و پدیده انتقال رسوب، از نتایج شبیه‌سازی مدل SW استفاده شده است.

از مهمترین پارامترهای موثر بر رسوب‌گذاری (Deposition) در بستر خور سرعت سقوط ذرات (Fall velocity) بوده که در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

مکان‌هایی مانند خور که دارای رسوبات چسبنده بوده به عواملی مانند شوری آب، غلظت رسوبات، عمق آب و سرعت جریان وابسته می‌باشد. به طور کلی بررسی فرآیند سرعت سقوط ذرات بر اساس غلظت ناشی از فولکوله شدن و برخورد بین ذرات فولکوله می‌باشد. لازم به ذکر است که فولکوله شدن ذرات رسوب تحت تأثیر یون‌های حاصل از وجود شوری، تاثیر زیادی در سرعت سقوط آن‌ها دارد.

۵-۱- بررسی معیار رسوب‌گذاری و فرسایش

پدیده انتقال رسوب در یک خور جزر و مدی را می‌توان با توجه به تغییرات میزان سرعت به دو بخش رسوب‌گذاری (Deposition) و فرسایش (Erosion) تقسیم‌بندی کرد.

- رسوب‌گذاری

رسوب‌گذاری به مقدار مورد نیاز تنش برشی جهت رسوب‌گذاری ($\tau_{d,full}$) در مقابل تنش برشی موجود بستر (τ_b) بستگی داشته که توسط Krone (۱۹۶۲) بررسی شده است [۸]. در این فرآیند چنانچه میزان تنش برشی موجود از تنش برشی مورد نیاز رسوب-گذاری ($\tau_{d,full}$) کمتر باشد، در طول خور رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. بر اساس مطالعات Krone نرخ رسوب‌گذاری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{net} = c\alpha w_{s,m} \qquad (۸)$$

که در آن:

D_{net}: نرخ رسوب‌گذاری بر حسب کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه

$w_{s,m}$: سرعت سقوط ذرات در شرایط آب ساکن ($\tau_b = 0$)

α: ضریب ثابت

c: غلظت رسوبات نزدیک بستر

در رابطه بالا میزان α نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \tau_b \geq \tau_{d,full} \\ \left(1 - \dfrac{\tau_b}{\tau_{d,full}}\right) & \tau_b < \tau_{d,full} \end{cases} \qquad (۹)$$

در این روابط τ_b میزان تنش برشی موجود بستر بر حسب نیوتن بر متر مربع می‌باشد.

- فرسایش

فرسایش در یک خور با توجه به میزان تنش برشی موجود بستر (τ_b) در مقابل تنش موثر بحرانی (τ_e) تعیین می‌شود. چنانچه میزان تنش برشی موجود بستر (τ_b) بزرگتر از تنش برشی موثر (τ_e) باشد محل خور دچار فرسایش می‌شود. با توجه به توضیح بالا می‌توان رابطه زیر را جهت تعیین نرخ فرسایش در خور بیان کرد:

$$E_{net} = M\left(\frac{\tau_b - \tau_e}{\tau_e}\right), \ \tau_b > \tau_e \qquad (۱۰)$$

که در آن:

E_{net}: نرخ فرسایش بر حسب کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه

τ_e: تنش موثر بحرانی برای فرسایش برحسب نیوتن بر متر مربع

M: فاکتور فرسایش پذیری در مدل که بر حسب کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه می‌باشد.

با توجه به دو فاکتور فرسایش و رسوب‌گذاری بالا میزان تغییرات بستر را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$H_{bed}^{new} = \begin{cases} H_{bed}^{old} + \dfrac{ND.\Delta t}{\rho^{i}}, ND \leq 0 \\ H_{bed}^{old} + \dfrac{ND.\Delta t}{\rho_{bed}^{old}}, ND > 0 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$\rho_{bed}^{new} = \frac{H_{bed}^{old}.\rho_{bed}^{old} + ND.\Delta t}{H_{bed}^{new}} \qquad (۱۲)$$

در رابطه بالا $ND = \sum_{i=1}^{n}\left(D_{net} - E_{net}\right)$ ،

H: ضخامت بستر

ρ: چگالی

Δt: گام زمانی

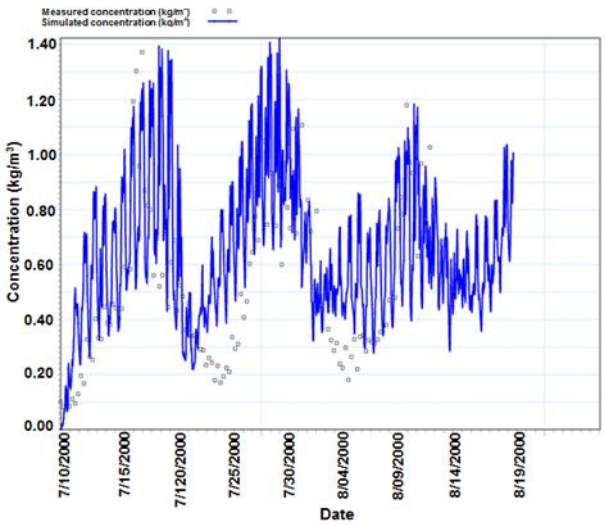
۵-۲- کالیبراسیون مدل رسوب‌گذاری

از آنجایی که اولین گام در استفاده از نرم‌افزار مورد استفاده در بحث انتقال رسوب (MIKE 21-FM/MT) کالیبره کردن آن می‌باشد، در این بخش از گزارش به کالیبراسیون مدل عددی توسعه داده شده جهت تخمین میزان رسوب‌گذاری و فرسایش در خور بوشهر پرداخته می‌شود.

به همین منظور، در این بخش مدل انتقال رسوب چسبنده توسعه داده شده برای منطقه مورد نظر در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده کالیبره می‌شود که شکل ۱۹ چگونگی مقادیر تخمین زده شده غلظت رسوبات توسط مدل را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوبات نمایش می‌دهد. شایان ذکر است با توجه به دورهٔ اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق (اواسط جولای سال ۲۰۰۰ تا اواسط آگوست همان سال)، دورهٔ کالیبراسیون مطابق با همین دوره منظور شده است. همچنان که در این شکل نمایش داده شده است، نتایج شبیه‌سازی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده دارای دقت نسبتا خوبی بوده که این مساله مبین کالیبره بودن مدل توسعه داده شده می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]



شکل ۱۹- مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوبات در مقابل مقادیر نتیجه شده از مدل MIKE21-FM/MT

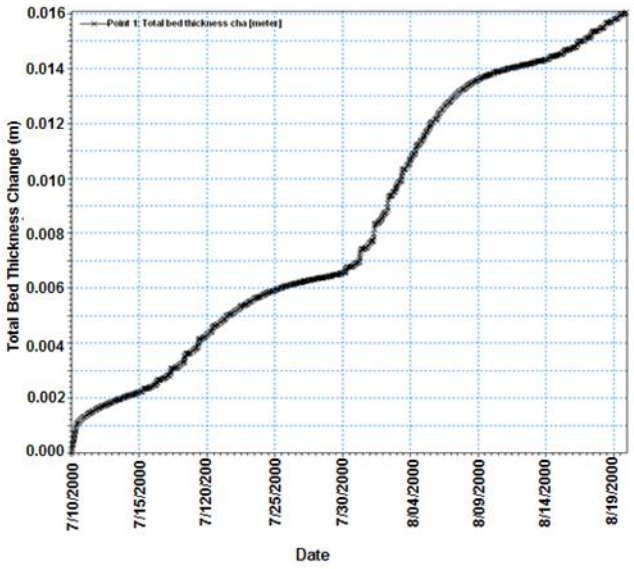
در فرآیند کالیبره کردن مدل انتقال رسوب چسبنده پارامترهایی به عنوان پارامتر کالیبراسیون و مدل در نظر گرفته شده که جدول ۱ مقادیر این پارامترها را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل MIKE21-FM/MT

ضریب مانینگ	تعداد لایه های	$\tau_e (N/m^2)$	$\tau_{d\,full} (N/m^2)$	ضخامت لایه بستر (سانتی متر)
۶۰	۲	۰/۲۵	۰/۰۴	۳۰

همچنان‌که در بخش قبل بدان اشاره شد، در فرآیند کالیبراسیون مدل انتقال رسوب از داده‌های موج تولیدی در مدل SW به عنوان شرط مرزی موج به صورت یک‌طرفه استفاده می‌شود. به منظور مدل‌سازی حرکت موج در منطقه بوشهر از داده‌های موج ISWM از تاریخ ۲۰۰۰/۷/۱۰ تا تاریخ ۲۰۰۰/۸/۲۰ استفاده شده است. همانطور که گفته شد، این داده‌ها بر اساس مدل‌سازی کلی خلیج فارس و دریای عمان و با استفاده از اطلاعات میدان باد ECMWF حاصل شده است.

نتایج مدل کالیبره شده به منظور ارزیابی اولیه رسوب‌گذاری در محل لنگرگاه اسکله CPS به مدت ۴۰ روز (۲۰۰۰/۷/۱۰ تا ۲۰۰۰/۸/۲۰) استخراج و محاسبه شده که شکل ۲۰ چگونگی رسوب‌گذاری در محل لنگرگاه اسکله CPS را در این دورهٔ کوتاه‌مدت نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که در محل لنگرگاه اسکله CPS در مدت ۴۰ روز میزان رسوب-گذاری حدود ۱/۶ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۲۰- رسوب‌گذاری در محل لنگرگاه اسکله خدمات بندری در مدت ۴۰ روز

۵-۳- تخمین رسوب‌گذاری سالانه در محل لنگرگاه

بعد از کالیبره کردن مدل عددی توسعه داده شده به منظور تخمین میزان رسوب‌گذاری و فرسایش در محدودهٔ مورد نظر لازم است که مدل توسعه داده شده برای بررسی رسوب‌گذاری سالانه در محل خور برای دورهٔ بلندمدت‌تری اجرا و نتایج آن مورد استفاده قرار گیرد. به همین منظور، با اعمال غلظت رسوب در مدت یک سال (تعمیم دورهٔ یک و نیم ماههٔ برداشت شده به کل سال) در شرایط مرزی مدل محلی و همچنین مد نظر قرار دادن نرخ آورد رسوب از طریق رودخانهٔ هله در نزدیک منطقه طرح، تخمین میزان رسوب-گذاری در محل خور برای مدت یک سال پیش‌بینی می‌گردد. همچنین در این مرحله از فایل بسی‌متری مطابق شکل ۲ که مبین خور بوشهر در منطقه می‌باشد، استفاده شده است. دورهٔ شبیه‌سازی یک ساله در حد فاصل جولای سال ۲۰۰۰ تا انتهای ژوئن سال ۲۰۰۱ منظور گردیده است. جهت ارزیابی وزن مواد جامد معلق در آب رودخانه‌ها از آمار نمونه‌برداری‌های رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شده است. با توجه به غلظت متوسط رسوبات معلق در رودخانه های دالکی و شاپور غلظت متوسط ورودی به خلیج فارس توسط رودخانه هله که از این دو رودخانه تشکیل شده در این گزارش ۵/۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. همچنین، دبی متوسط ورودی رودخانه هله به خلیج فارس در محل ورودی این رودخانه در مدل معادل ۳۶/۷ متر مکعب بر ثانیه بر اساس مطالعات مرکز تحقیقات جهاد آب و آبخیزداری در نظر گرفته می‌شود [۴].

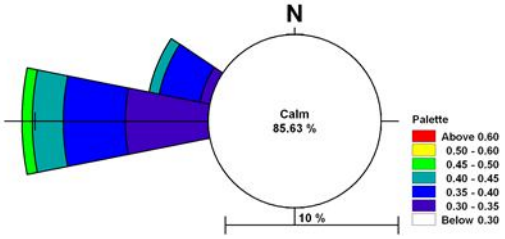
با توجه به ضرورت منظور نمودن اثر امواج در انتقال و نشست رسوبات، در طول زمان شبیه‌سازی یک‌ساله، مشابه فرآیند

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

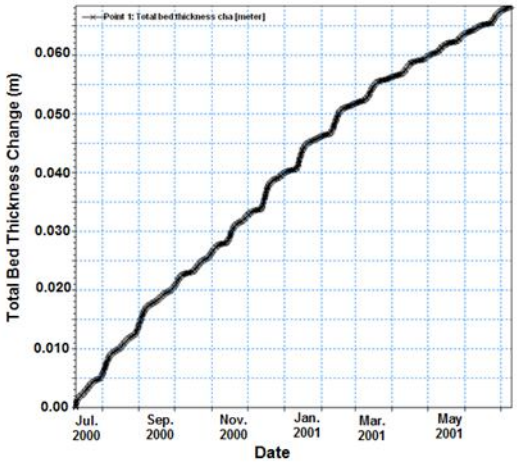
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]

کالیبراسیون مدل، شبیه‌سازی انتشار امواج صورت گرفت. گل‌موج یک سالهٔ منتشره بر اساس اطلاعات ISWM در نزدیکی دهانه خور بوشهر در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۲۲ بعد از اجرای مدل توسعه داده شده میزان رسوب‌گذاری در محل لنگرگاه CPS برای مدت یک سال نمایش داده شده است. همچنان‌که در این شکل ملاحظه می‌شود در حوضچه جلوی اسکله CPS در مدت یک سال به اندازه ۷ سانتی‌متر رسوب‌گذاری تخمین زده می‌شود.

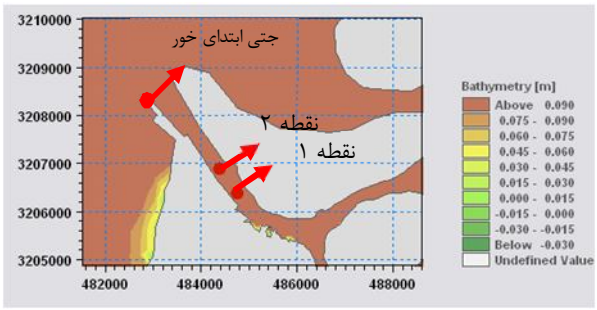


شکل ۲۱- نمونه‌ای از گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی موج در مدل MIKE 21-SW در دهانه خور بوشهر برای در مدت یک سال

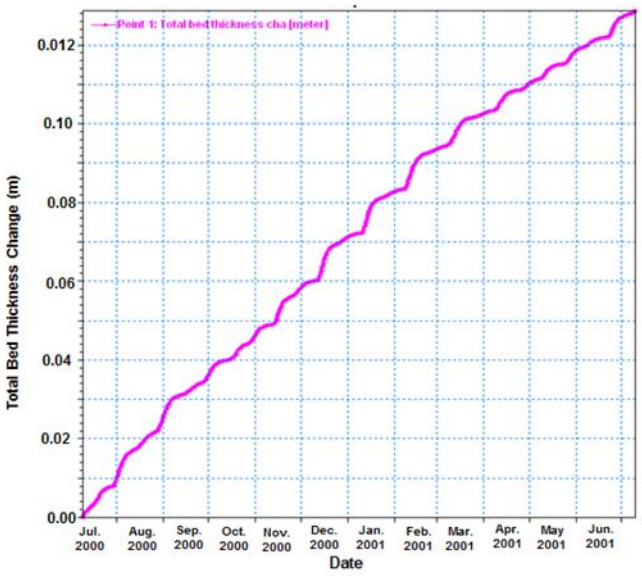


شکل ۲۲- چگونگی رسوب‌گذاری در محدودهٔ اسکله CPS در مدت یک سال

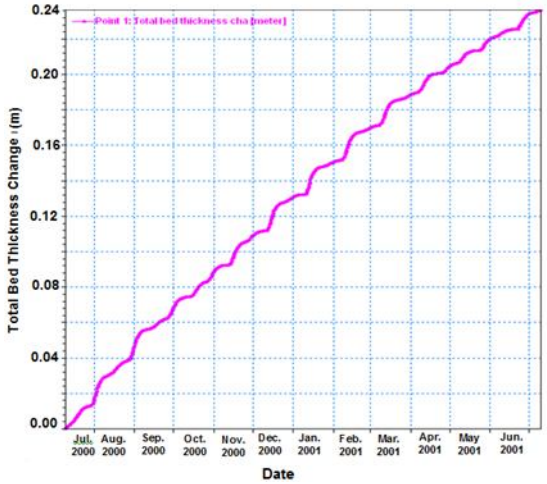
به منظور بررسی نحوه رسوب‌گذاری در نواحی دیگری از خور بوشهر تعداد ۲ نقطه دیگر انتخاب شد که نحوه جانمایی آن‌ها در شکل ۲۳ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود با فاصله‌گرفتن از اسکله CPS میزان رسوب‌گذاری در داخل خور بوشهر افزایش می‌یابد که با توجه به موقعیت منابع رسوبی در منطقه و نیز شدت جریانات، این موضوع چندان هم دور از ذهن نیست. همانطور که در شکل ۲۴ و شکل ۲۵ نمایش داده شده میزان رسوب‌گذاری در نقاط ۱ و ۲ (جلوی اسکله کوثر) به ترتیب حدود ۱۳ و ۲۲ سانتی‌متر بوده که این نتایج با توجه به مشاهدات میدانی نتایج قابل تعمیمی جهت طراحی‌های آینده می‌باشند. همچنین منحنی میزان رسوب‌گذاری و فرسایش در خور بوشهر برای مدت یک سال در شکل ۲۶ نمایش داده شده است.



شکل ۲۳- جانمایی نقاط دیگر به منظور بررسی نحوه رسوب‌گذاری در مقابل اسکله‌های خور بوشهر



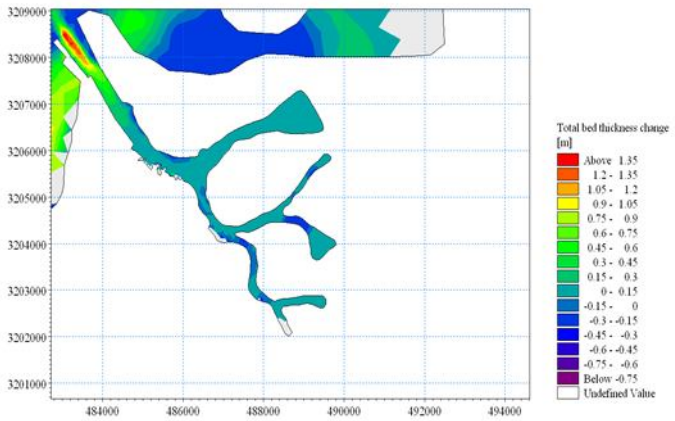
شکل ۲۴- میزان رسوب‌گذاری در نقطه ۱- مقابل اسکلهٔ کوثر بندر بوشهر



شکل ۲۵- میزان رسوب‌گذاری در نقطه ۲- مقابل اسکلهٔ کوثر بندر بوشهر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]



شکل ۲۶- نحوه رسوب‌گذاری و فرسایش در خور بوشهر در مدت یک سال شبیه‌سازی عددی

با توجه به شکل ۲۶ این گونه می‌توان استنباط کرد که در طی یک سال شبیه‌سازی به وسیله مدل مورد نظر بیشترین مقدار رسوب-گذاری در دهانه خور بوده که با ورود به خور این میزان کاهش پیدا می‌کند (از میزان ۲۲ سانتی متر در جلوی اسکله کوثر تا مقدار ۷ سانتی متر در محل اسکله CPS بوشهر). این رسوب‌گذاری در عمل باعث ایجاد تمهیدات لازم جهت لایروبی دائمی خور بوشهر به منظور ایجاد عمق آبخور مناسب برای کشتی‌های ترددکننده شده است. مقدار رسوب‌گذاری در ورودی خور مورد نظر معادل ۱/۲ متر تخمین زده شده است. این مساله اهمیت لایروبی در این محل که به صورت دوره‌ای و یا دائمی باید انجام گیرد و به عبارت کلی تر علاج بخشی رسوب‌گذاری را پیش از بیش مشخص می‌کند.

۶ –نتیجه‌گیری

تخمین میزان رسوب‌گذاری در خورها از اهمیت زیادی در طراحی سازه‌های دریایی برخوردار می‌باشد. یکی از خورهایی که در ایران به دلیل تردد کشتی‌های ترازیتی دارای نقش مهمی بوده خور بوشهر بوده که تحت تاثیر رسوبات چسبنده باید مورد لایروبی قرار گیرد. از آنجایی که تخمین مناسب لایروبی اهمیت زیادی در تعیین ریسک سرمایه‌گذاری در این منطقه دارد، در این مقاله با ارائه روشی مبتنی بر کالیبره کردن مدل‌های جریان و رسوب به مدل-سازی رسوب‌گذاری در محل خور بوشهر پرداخته شد. نتایج نشان داد که میزان رسوب‌گذاری سالانه در محل خور از ۲۲ سانتی‌متر در جلوی اسکله کوثر تا ۷ سانتی متر در جلوی اسکله خدمات بندری و بازرگانی (CPS) می‌باشد. بر اساس مطالعات شرکت کامپاکس در سال ۱۹۷۳، متوسط تهنشست رسوب در داخل خور بوشهر و دور از دهانه ورودی خور سالیانه ۱۰ سانتیمتر برآورد شده است. این مساله نشان می‌دهد که مدل توسعه داده شده دارای قابلیت مناسبی با توجه به برآورد ۲۲ تا ۷ سانتی‌متری رسوب‌گذاری برای تخمین رسوب‌گذاری در خور بوشهر می‌باشد [۴]. باید توجه داشت که طی این سال‌های تغییرات زیادی در سواحل بوشهر رخ داده که این مساله تا حدودی اختلاف مورد نظر را توجیه می‌کند.

به منظور جلوگیری از رسوب‌گذاری در منطقه مورد نظر می‌توان راه‌کارهای زیر را مد نظر قرار داد تا بدین ترتیب از رسوب‌گذاری و تبعات آن در منطقه طرح جلوگیری کرد:

۱- استفاده از دیوارهای منحرف کننده مسیر رسوبات در جلوگیری از رسوب‌گذاری در مناطق داخل خور و نزدیک تاسیسات و اسکله‌ها [۵].

۲- تطویل جتی‌های منحرف کننده در ورودی خور که هزینه اجرای آن با توجه به عمق آب زیاد در جلوی این سازه‌ها، بالا می‌باشد.

۳- استفاده از لایروبی‌های ادواری در داخل خور بوشهر جهت تامین عمق آبخور مورد نظر کشتی‌های تردد کننده با رعایت معیارهای زیستمحیطی.

۴- اقدامات آبخیزداری جهت جلوگیری از فرسایش رسوبات در حوضه های آبریز رودخانه اطراف منطقه به ویژه رودخانه هله

۷- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسنده‌های مقاله از بخش مهندسی سواحل و سازه های دریایی شرکت مهندسی مشاور سازه‌پردازی به دلیل حمایت های انجام شده توسط آنها در طی انجام تحقیق مربوطه تشکر می-کند.

۸–مراجع

1- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas* (Vol. 1006). Amsterdam: Aqua publications.

2- Mehta, A. J., & Partheniades, E. (1975). *An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments*. Journal of Hydraulic Research, 13(4), 361-381.

3- Iran water research center, (2002-2001), *Bushehr harbor modeling, (In Persian)*

4- Iran water research center, (1996), *Emamkhomeini harbor modeling, (In Persian)*

5- Valizadeh, D., & Kolahdoozan, M. (2011). *REDUCING SEDIMENTATION IN RIVERINE HARBORS USING CURRENT DEFLECTING WALL*. International Journal of Maritime Technology, 6(12), 1-15. (In Persian).

6- Kuijper, C., Christiansen, H., Cornelisse, J. M., & Winterwerp, J. C. (2005). *Reducing harbor siltation. II: Case study of Parkhafen in Hamburg*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 131(6), 267-276

7- DHI (2009).MIKE21 FM (HD, MT) and SW User Manuals.

8- Krone, R. B. (1962*). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.8.3]