شبیه سازی انتقال رسوب پشت موج شکن بندر انزلی با هـدف مقایسـه نـرم افـزار ایرانی PMO Dynamics و MIKE21

الهام جعفرزاده[۱]، سید علی ایوب زاده[۲*]، مسعود منتظری نمین[۳]، اصغر بهلولی[۴]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس؛ elham.jafarzadeh90@gmail.com
[۲] دانشیار، گروه سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس؛ ayyoub@modares.ac.ir
[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران؛ mnamin@ut.ac.ir
[۴] دکتری مهندسی عمران، شرکت نامرود؛ a_bohluly@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۴/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
MIKE21
PMO Dynamics
شبیه سازی
انتقال رسوب
بندر انزلی

چکیده

احداث بنادر و سازه های ساحلی در حقیقت باعث تغییر در الگوی جریانات ساحلی و به تبـع آن تغییـر در الگوی رسوب‌گذاری می‌شود. در این تحقیق به منظور شبیه سازی انتقال رسوبات پس از احداث موج شکن های جدید انزلی دو مدل عددی PMO Dynamics که یک مدل ایرانی از انواع مدل‌های دوبعدی است و MIKE 21 مورد استفاده قرار گرفت این دو مدل از دو روش متفاوت در حل شبکه محاسباتی استفاده می کنند که به منظور مقایسه بین دو روش، پس از تحلیل حساسیت و واسنجی ضرایب در هر مرحلـه، شـبیه سازی الگوی انتشار امواج با ارتفاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر در مدول موج طیفی، جریان های کرانه ای حاصل از انتقال امواج در مدول هیدرودینامیک و در نهایت شبیه سازی انتقال رسوب در مدول انتقال رسوب انجـام شد و در هر مرحله نتایج دو مدل مقایسه گردید همبستگی حدود ۹۰ درصد بین نتایج مدل ایرانی و مدل MIKE21 نشان داد با استفاده از مدل ایرانی و شبکه بندی از نوع نقطه مرکز با انجام محاسبات ساده تر و در زمانی تا ۴ برابر کمتر می توان جواب های قابل قبولی را بدست آورد.

Simulation of Sediment Transport behind Anzali Breakwater with the purpose of Comparison of Iranian PMO Dynamics Software and MIKE 21

Elham Jafarzadeh[1], Seyed Ali Ayyoubzadeh [2*], Masoud Montazeri Namin [3], Asghar Bouhloly[4]

[1]Graduate in Water Structures, Tarbiat Modarres University; elham.jafarzadeh90@gmail.com
[2]Associate Professor, Department of Water Structures, Tarbiat Modarres University; ayyoub@modares.ac.ir
[3]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tehran University; mnamin@ut.ac.ir
[4] PhD in civil Engineering, Namrood Company; a_bohluly@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 7 Jul. 2014
Accepted:13 Jan. 2015
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
MIKE21
PMO Dynamics
Simulation
Sediment Transport
Bander Anzali

ABSTRACT

Construction of ports and coastal structures actually affects the coastal flow pattern and results in the changing of the sedimentation pattern. The research carried out in this paper, aims to simulate sedimentation process following the construction of the Bandar-e Anzali New Breakwaters at the site, using Iranian developed PMO hydrodynamics and well known MIKE21 modeling package developed by DHI. These two models utilize different mesh technique to solve the governing flow hydrodynamics and transport equations. So to compare the results obtained from these two models, sensitivity analysis and calibration procedures using field data were undertaken firstly. Then wave propagation pattern of waves with heights of 0.5, 1 and 1.5 m in the spectral wave module (SW), long shore currents in the hydrodynamic module (HD) and sediment transport simulation in the sediment transport module (SD) have been considered using both models. Various statistical parameters were obtained and the results showed good agreement between the two mentioned models with at least 90% correlation coefficient in all cases. Furthermore, the study showed acceptable results can be obtained by center point mesh-type technique using PMO Dynamics model with much easier calculation procedures that reduces the computation time significantly even by a factor of 4.

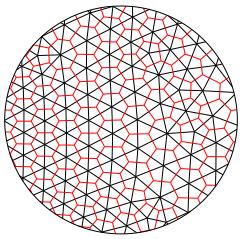
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

۱- مقدمه

با نزدیک شدن موج به ساحل و کم شدن عمق آب، طول موج کاهش می‌یابد و به دلیل فشردگی موج، شکل موج از حالت سینوسی خارج شده و ارتفاع آن زیاد می‌شود که این امر باعث ایجاد جریانهای ساحلی و نقل و انتقالات رسوبی در سواحل می‌شود و نیروی وارده از موج به سازه‌های ساحلی افزایش می‌یابد. پدیده شکست موج وقتی اتفاق می‌افتد که ارتفاع موج خیلی زیاد باشد که نهایتاً موج ناپایدار شده و باعث نقل و انتقالات رسوبی به سمت دریا می‌شود. احداث بنادر و سازه های ساحلی از جمله موج شکن ها باعث تغییر در الگوی جریانات ساحلی و به تبع آن تغییر در الگوی رسوب گذاری می‌شود. به واسطه جابجایی رسوبات ساحلی، مسئله رسوب گذاری سواحل و فرسایش در سواحل مطرح می‌گردد که هر یک از این پدیده‌ها، کاربری تأسیسات و سازه های ساخته شده در دریا را می‌تواند با مشکل مواجه نماید که به دلیل اهمیت این مسئله الگوی رسوب گذاری با استفاده از مدل های عددی متعددی شبیه سازی می شود از میان مدل‌های ریاضی مطرح در جهان، در تحلیل پدیده های حاکم بر محیط دریا، مدل ریاضی MIKE21 تهیه شده توسط انستیتوی هیدرولیک دانمارک یکی از شناخته شده ترین و پرکاربردترین آنهاست. مدل ریاضی MIKE21 مدل دو بعدی است که برای شبیه سازی هیدرولیک، انتقال رسوبات، انتقال امواج و شبیه سازی امواج مرتبط با پدیده‌های دریاچه‌ها، خلیج ها، نواحی ساحلی و دریاها بکار می رود.این مدل سیستم جامعی برای مدل کردن جریان های روباز دوبعدی است که در آن لایه آن لایه بندی جریان سیال قابل صرفنظر کردن باشد. رقم های پسوند ۲۱ به ترتیب از چپ به راست، نمایانگر کاربرد این سیستم برای جریان های دو بعدی، یک لایه می باشد. این مدل با دارا بودن قابلیت های گوناگون در دریافت اطلاعات ورودی در محدوده وسیعی از کاربردها و ارائه خروجیهای مناسب جهت کاربردهای تحقیقاتی و مهندسی، ابزار مناسبی جهت تحلیل پدیده ترسیب و فرسایش در سواحل و انتقال رسوبات ساحلی می باشد اما مدل‌های تجاری و غیر تجاری خارجی الزاماً نمی‌توانند در مطالعات دریا و سواحل جوابگوی همه نیازهای داخلی باشند. مشکلاتی مانند عدم دسترسی به کد اصلی برنامه‌ها و در نتیجه آن عدم امکان اعمال تغییرات متناسب با نیازهای بهره‌برداری در مدل‌های تجاری و غیر تجاری خارجی باعث توسعه مدل ایرانی شده است. مدل PMO Dynamics یک مدل ایرانی از انواع مدل‌های دوبعدی است که به مدل‌های میانگین‌گیری‌شده در عمق و یا مدل‌های آب‌های کم‌عمق معروفند. این مدل قادر است بر اساس ویژگی‌ها و قابلیت‌های معادلات دو بعدی، شرایط حاکم بر محیط‌های آبی و هیدرودینامیک جریان‌های ساحلی را شبیه‌سازی نماید و بگونه‌ای توسعه یافته است که امکان شبیه‌سازی جریان در بدنه های مختلف آبی با ابعاد و اندازه های متفاوت به راحتی، با دقت مناسب و در زمان مناسب امکان پذیر باشد. این دو مدل از دو روش متفاوت در حل شبکه محاسباتی استفاده می کنند که به منظور مقایسه بین دو روش و برآورد کارایی مدل ایرانی، مسئله رسوب گذاری پشت موج شکن‌های انزلی توسط شبیه سازی الگوی انتشار امواج در مدول SW ، جریان های کرانه ای حاصل از انتقال امواج در مدول هیدرودینامیک HD و در نهایت شبیه سازی انتقال رسوب در مدول ST بررسی شد و در هر مرحله نتایج دو مدل مقایسه گردید.

هر دو مدل PMO Dynamics و MIKE21 اساساً با استفاده از معادلات یکسانی پیش بینی های موج، جریان و رسوب را انجام می‌دهند با این تفاوت که هر یک از مدل‌های مذکور ویژگی‌های خاصی در روش‌های استفاده شده و یا نوع شبکه محاسباتی دارند.

شبکه محاسباتی بکار رفته در مدل PMO Dynamics یک شبکه بدون‌ساختار غیرهمپوشان مثلثی است که چه در حالت منظم و چه نامنظم شبکه‌ای غیر یک در میان می‌باشد و حجم کنترل‌های این شبکه در حالت نامنظم از برخورد عمود منصف‌های مثلث‌های پدید آورنده شبکه بوجود می‌آیند. اجزاء موجود در این شبکه رامی‌توان در سه گروه گره‌ها یا نقاط محاسباتی، مثلث‌های پدید آورنده شبکه و اضلاع مثلث‌های پدید آوردنده شبکه و یا به عبارتی یال‌های محاسباتی تقسیم نمود. بنابراین حجم کنترل‌های مورد استفاده در مدل چند ضلعی‌هایی هستند که مرکز آنها رئوس مثلث‌های پدید آورنده شبکه می‌باشد. این حجم کنترل‌ها با یکدیگر همپوشانی ندارند و بعلاوه مرزهای این حجم کنترل‌ها نیز بر اضلاع مثلث‌های پدید آورنده شبکه عمود هستند. به این ترتیب می‌توان گفت که در این شبکه برای انجام محاسبات نیازی به تولید نقاط محاسباتی اضافه نمی‌باشد. این شبکه از نوع نقطه مرکز است و تمامی متغیرها و مجهولات مدل در محل رئوس مثلث‌ها قرار گرفته‌اند. در شکل زیر نمایی از شبکه محاسباتی مورد استفاده نمایش داده شده است.



شکل ۱ - نمایی کلی از شبکه محاسباتی مورد استفاده در مدل PMO Dynamics (خطوط قرمز رنگ مرزهای حجم کنترل‌ها هستند)

مدل MIKE21 به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم بر فرایندها نظیر معادلات پیوستگی، مومنتم و انتقال-انتشار از روش حجم محدود میان سلولی استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

روش مش‌های منعطف مثلثی که از نوع بی‌ساختار می‌باشد و بیشترین تناسب تراکم پذیری با دامنه حل را دارند.

از روش تقریبی Riemann Solver برای محاسبه شارهای انتقالی استفاده شده است و برای اجتناب از نوسانات عددی محدود کننده های شیب TVD درجه دوم مورد استفاده قرار گرفته است و روش درجه دوم Runge-Kutta برای محاسبه انتگرال زمانی استفاده شده است [۱].

۲- مواد و روش ها

با توجه به وجود پتانسیل انتقال رسوب همراه با جریانهای موازی ساحل، رسوبات حمل شده پس از برخورد با بدنه موج شکن ترسیب نموده و بتدریج مورفولوژی ساحل در پشت بازو تغییر می یابد و با انباشت تدریجی رسوبات، در نهایت شرایطی فراهم می آید که رسوبات تمام طول بازوی موج شکن را می پوشانند.

به منظور یافتن میزان حمل انتقال رسوبات به موازات ساحل(کرانه ای)، شبیه سازی به وسیله ی مدل های عددی در سه مرحله انجام می گیرد در مرحله ی اول توسط مدول SW شبیه سازی انتقال امواج از آب عمیق به آب های کم عمق صورت گرفته و سپس با استفاده از مدول HD جریان ایجاد شده حاصل از شکست موج در منطقه ی شکست، شبیه سازی میشود و در نهایت انتقال رسوب ناشی از جریان های ایجاد شده توسط مدول ST شبیه سازی می گردد. مشخصات هیدرودینامیک جریان در مناطق ساحلی و دریاها از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. همچنین با توجه به تغییر شرایط محیطی، این مشخصات در زمان نیز عوض می‌شود. بدین ترتیب روابط تجربی باید بارها و بارها مورد استفاده قرار گیرند که این دفعات شامل گام‌های زمانی مختلف و نقاط مختلف شبکه محاسباتی می‌باشد. به همین دلیل لازم است تا مدل انتقال رسوب به همراه مدل جریان و به صورت همزمان با آن عمل نماید. بدین ترتیب شرایط هیدرودینامیکی بدست آمده در هر گام زمانی برای استفاده در مدل انتقال رسوب در اختیار خواهد بود.

۲-۱- مدول SW

هدف اصلی این مدول حل معادله تعادل عمل موج بمنظور استخراج چگونگی توزیع مشخصات موج در مختصات جغرافیایی است. معادله مذکور پدیده‌های فیزیکی از قبیل انتشار موج، انکسار موج، خیزآب موج، ایجاد و رشد موج، افت موج و همچنین اندرکنش غیر خطی موج- موج را در برمی‌گیرد و در فضای طیفی حالت عمومی این معادله $DN/Dt = S/\sigma$ می‌باشد که به صورت مبسوط زیر مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial c_{gx}N}{\partial x}+\frac{\partial c_{gy}N}{\partial y}+\frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma}+\frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta}=\frac{S}{\sigma} \quad (۱)$$

در این معادله $N(x,\sigma,\theta,t)$ چگالی عمل موج، x(x,y) مختصات جغرافیایی، $v(c_{gx},c_{gy},c_{\sigma},c_{\theta})$ مولفه‌های سرعت انتقال یک گروه موج، $\sigma=2\pi f=\sqrt{gk\tanh(kd)}$ فرکانس نسبی زاویه‌ای، θ جهت انتقال موج، d عمق آب و k معرف عدد موج می‌باشد.

در این مدل مشخصات موج بوسیله انتگرال گیری از طیف چگالی عمل موج N که با چگالی انرژی موج $E(x,\sigma,\theta,t)$ نسبت مستقیم دارد، بدست آمده است $N=(E/\sigma)$. سمت چپ معادله (۱) مشتق کامل چگالی عمل موج است که شامل تغییرات مکانی چگالی عمل موج و همچنین تغییرات طیفی چگالی عمل موج است.

سمت راست معادله تعادل در برگیرنده چشمه- چاه‌هاست که پدیده‌های فیزیکی هستند که موجب افزایش یا کاهش انرژی سیستم می‌شوند این چشمه- چاه‌ها شامل اثر باد، اندرکنش غیر خطی امواج، اصطکاک کف و اتلاف انرژی ناشی از شکست موج در منطقه کم عمق و یا اتلاف ناشی از چرخک‌های سطحی است. توابع S از سه قسمت عمده تشکیل شده‌اند که عبارتند از: S_{in} اثر باد به عنوان عامل اصلی ایجاد موج، S_{ds} کلیه عوامل میرا کننده به عنوان توابع اتلاف انرژی موج و S_{nt} اندر کنش غیر خطی موج- موج [۲].

در مدل PMO Dynamics روش حل شامل 1St Order, QUICKEST, FROMM بوده و در مدل MIKE21 با استفاده از روش تفاضلهای محدود به وسیله تکنیک ADI حل گردیده‌اند [۳].

۲-۲- مدول HD

معادلات آب‌های کم‌عمق مناسبترین ویژگی‌ها را برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان آبهای سطحی داراست. این معادلات یکی از انواع معادلات شناخته شده هیدرودینامیک جریان است که فرم دوبعدی این معادلات در صفحه افق شامل معادله پیوستگی و معادلات اندازه حرکت در جهت‌های x و y می‌باشد. این معادلات، که به معادلات میانگین عمقی نیز معروفند، بکمک انتگرال‌گیری در جهت قائم از معادلات ناویر- استوکس از کف کانال تا سطح آب به همراه اعمال شرایط مرزی مناسب در بستر و سطح جریان بدست می‌آیند. معادلات آب‌های کم‌عمق در صورت برقرار بودن دو شرط اساسی توزیع فشار هیدرواستاتیک و یکنواختی پروفیل قائم سرعت قابل استفاده می‌باشند. دو فرض فوق در اکثر جریان‌های دریایی که نسبت عمق جریان به عرض آنها کم است برقرار می‌باشند . روش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

حل عددی معادلات در مدل MIKE21 ، Higher Order ، Low Order می باشد و در مدل PMO Dynamics ، Time, 2nd Order Roe, 1st Order Roe Splitting می باشد [۴].

۲-۳- مدول ST

بستر رسوبی دریاها و مناطق ساحلی همواره تحت تاثیر تنش‌های برشی ناشی از جریان و امواج می‌باشد. وجود این مسئله باعث شده است بحث بسیار گسترده‌ای به نام انتقال رسوب شکل‌گیرد. اگر چه نمی‌توان به صورت دقیق وقایع و پدیده‌های رسوبی را درک و آنرا با استفاده از روابط ریاضی بیان نمود، اما تحقیقات بسیار زیادی در این رابطه انجام شده و نتیجه آن روابط تجربی متعدد نرخ انتقال رسوب می‌باشد که با توجه به مشخصات جریان، موج و رسوب میزان جریان رسوب جابجا شده را تخمین می‌زند. با استفاده روابط موجود می‌توان تخمین‌های مناسبی از نرخ جریان رسوبی با توجه به مشخصات جریان و رسوب هر نقطه بدست آورد.

مهمترین استفاده‌ای که می‌توان از مدل‌های انتقال رسوب نمود، شبیه‌سازی تغییر شکل بستر تحت تاثیر جریان‌های مختلف ساحلی می‌باشد. این مسئله موقعی اهمیت بیشتری می‌یابد که سازه‌های غیرطبیعی که توسط انسان ساخته می‌شود، شرایط طبیعی و متعادل را بر هم زده باشد.

در مدل PMO Dynamics رسوب غیرچسبنده با استفاده از دو روش تعادلی و غیر تعادلی مدل‌سازی می‌شود. همچنین در این مدل انتقال رسوب هم در شرایط جریان و هم در شرایط ترکیب موج و جریان شبیه‌سازی می‌گردد. در خصوص تعیین ظرفیت حمل رسوب از سه روش بایکر، یانگ و ون‌راین که از معتبرترین روش‌های ظرفیت حمل رسوب هستند، استفاده شده است.به جهت در نظر گرفتن روشی مشترک در دو مدل جهت تعیین ظرفیت حمل رسوب از روش بایکر که در دو مدل در دسترس است استفاده می گردد [۵].

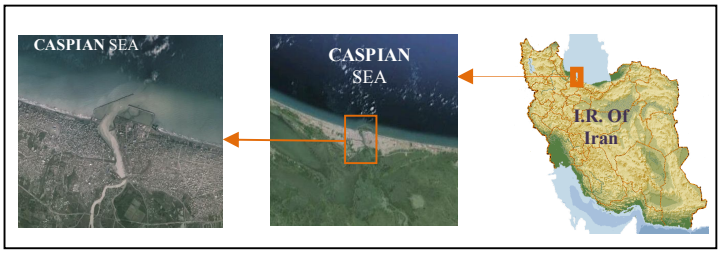
مهم‌ترین خروجی مدل‌های انتقال رسوب، نرخ انتقال رسوب است. مدل PMO Dynamics این کمیت را خروجی نمی‌دهد، اما می‌توان آن را با استفاده از خروجی‌های مدل‌های جریان و رسوب با استفاده از معادله ۵ تخمین زد.

$$q_s = C_s \times h \times V_R \times 10^{-6} \qquad (۲)$$

که در این معادله، q_s نرخ انتقال رسوب $(m^3/s/m)$ و C_s غلظت رسوب (ppm) ، h عمق آب (m)، V_R سرعت متوسط جریان(m/s) است. لازم به ذکر است با به‌کارگیری معادله فوق فرض می‌کنیم که سرعت حرکت رسوبات همان سرعت حرکت سیال است و ذرات رسوبی در کل عمق آب به صورت یکنواخت در حال حرکت هستند.

۲-۴- منطقه مورد مطالعه

بندر انزلی در کشور ایران در جنوب غربی دریای خزر، حد فاصل رشت (مرکز استان گیلان) و تالش قرار دارد. موقعیت بندر به لحاظ طول و عرض جغرافیایی عبارت است از ′۲۸ °۴۹ شرقی و ′۲۵ °۳۷ شمالی. ساختگاه دقیق بندر محل اتصال تالاب مشهور انزلی به دریا است. شکل ۲ موقعیت کلی بندر انزلی و وضعیت موج شکن های شرقی و غربی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه

۲-۵- اجرای مدل

منظور از برپایی مدل معرفی هندسه و شرایط طبیعی مسئله با حداکثر دقت ممکن، تعیین ضرایب، گام زمانی بهینه و سایر پارامترهایی است که با اعمال آنها بر مدل، مدل ریاضی مورد نظر آماده اجرا می گردد.

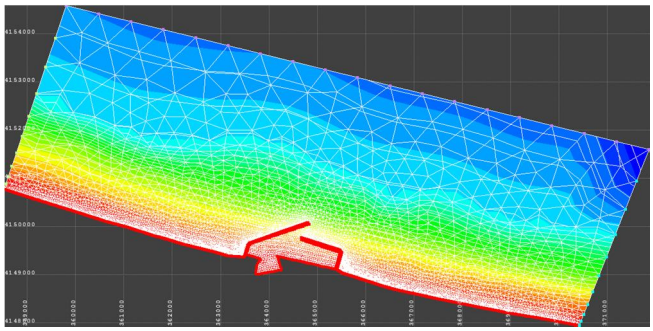
داده های مورد نیاز جهت تهیه فایل عمق نگاشت، موقعیت مرزهای خشکی و باز مدل و نیز هیدروگرافی محدوده مدل می باشد. اطلاعات فوق براساس هیدروگرافی انجام شده با مقیاس ۱:۲۰۰۰ توسط مرکز تحقیقات آب تهیه شده است.

فایل عمق نگاشت به صورت شبکه مثلثی نامنظم با ۱۸۰۶۳ المان و ۹۶۶۵ گره بوده و مرزهای آن از سمت جنوب به سواحل بندر انزلی و از سمت دیگر به نقاط مرز باز محدود شده و در آن کوچکترین فاصله گره در مرز ساحلی عدد ۱۰ در نظر گرفته شده و بیشترین فاصله گره در مرز شمالی به میزان ۷۰۰ متر می باشد. برای کنترل استقلال نتایج از مش، نیاز است که مراحل پیچیده و زمان‌بر طراحی مش چندین بار تکرار شود و در هر مرحله نتایج حاصل از مش ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد و این مراحل تا زمانی ادامه یابد که مش ایده‌آل حاصل شود. مزیت استفاده از مش ایده‌آل در مقایسه با دیگر مش‌ها، کوتاه بودن زمان اجرای مدل و دقت در نتایج شبیه‌سازی خواهد بود.در این تحقیق، مش‌های مختلف با مقادیر متفاوت در مساحت محدوده ی مدل سازی و ابعاد مش مورد مدل سازی قرار گرفت و در نهایت از مش با ۱۸۰۶۳المان جهت مدل سازی موج-جریان-رسوب استفاده شده است. در هر دو مدل جهت ارزیابی صحیح نتایج از یک فایل عمق نگاشت که در مدل PMO Dynamics تهیه شده بود استفاده شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

است. شبکه بندی محدوده مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. در مدل محلی با توجه به کوچک بودن محدوده مدلسازی از اثر باد در منطقه صرف نظر شده است.



شکل ۳- شبکه بندی محدوده شبیه سازی شده

تعیین گام زمانی حل معادلات یکی از مراحل مهم در برپایی مدل می باشد و مقدار آن بستگی به ابعاد شبکه بندی و سرعت گروهی امواج دارد. افزایش گام زمانی از سویی باعث کاهش مدت اجرای مدل شده و از سوی دیگر سبب کاهش دقت شبیه سازی می گردد. در تحقیق حاضر امکان تعریف یک بازه زمانی ۱ روزه از ۱۵:۱۳:۰۰ ۲۰۰۳/۵/۲۲ تا ۱۵:۱۳:۰۰ ۲۰۰۳/۵/۲۳ و فواصل زمانی ۳۰۰ ثانیه جهت مقایسه نتایج دو مدل عددی در نظر گرفته شد بطوریکه مدل براساس مشخصات هر المان و احراز شرایط پایداری یک گام زمانی بهینه در محدوده المان تعریف شده برآورد می نماید و سپس طبق بررسی های انجام شده شرایط جریان پس از طی ۴ ساعت به حالت پایدار رسیده فلذا زمان شبیه سازی به ۴ ساعت کاهش داده شده است.

۲-۶- اطلاعات ورودی

در مدول SW اطلاعات موج شامل ارتفاع، زمان تناوب غالب و جهت متوسط از بویه موج نگار سازمان بنادر و دریانوردی که در آب عمیق ۲۵ متری قرار دارد در تاریخ ذکر شده در دسترس می باشد و به منظور این بررسی سری امواج ۳۰ ساله استخراج شده از بویه تحلیل شده است. گل موج حاصل از امواج نشان داد که بیشترین درصد وقوع امواج در منطقه انزلی مربوط به امواج با ارتفاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر می باشد این امواج به منظور ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی جریان و رسوب انتخاب شده اند و مشخصات این امواج در جدول ۱ ارائه شده است.

در مدول HD به منظور شبیه سازی جریانات کرانه ای فایلهای حاوی تنش‌های شعاعی، خروجیهای مدول SW ، به عنوان فایلهای ورودی به مدول HD معرفی گردیدند.

به منظور شبیه سازی رسوبگذاری توسط مدول ST خروجی مدول HD که حاوی مشخصات عمق و شار در جهتهای متعامد برای مدت ۱ روز می باشد به عنوان ورودی به این مدول معرفی می گردد.

مشخصات دانه های رسوبی شامل اندازه متوسط ذرات d۵۰ ، انحراف معیار هندسی آنها، چگالی نسبی رسوبات و تخلخل مواد رسوبی در بستر. در مطالعات منطقه بندر انزلی d50 = ۰/۲۲ میلی متر و اندازه دانه ها یکنواخت فرض گردید . همچنین چگالی نسبی رسوبات ۱/۴ و ضریب تخلخل ۰/۴ در نظر گرفته شد.

به دلیل تاثیر همزمان موج و جریان فایل حاوی نتایج تنشهای تشعشعی که عامل ایجاد جریان می باشد و از شبیه سازی موج حاصل می شود در این مدول در نظر گرفته می‌شود.

۲-۷- تحلیل حساسیت

رفتار طبیعی آب بسیار پیچیده است، تصادفی و روند غیر خطی که نمی‌توان بطور صحیح رابطه ریاضی آن را بیان نمود. درستی خروجی مدل به داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ غیر مطمئن و پارامترهای مدل بستگی دارد. تحلیل حساسیت یک روش سیستماتیک ارزیابی اثر، برای روشن‌سازی ارتباط بین مقدار پارامترها و نتایج حاصل از مدل دارد که از تغییر دادن مقدار پارامترها حاصل می‌شود.

تحلیل حساسیت، مشخص کردن این که کدام یک از پارامترها تاثیر بیشتری بر روی نتیجه نهایی می‌گذارد می‌باشد. در این تحقیق پارامترهایی که برای تحلیل حساسیت انتخاب شدند عبارتند از: ضریب زبری بستر (ضریب مانینگ)، مقادیر لزجت گردابه‌ای، مقادیر ضرایب شکست موج.

۲-۸- واسنجی پارامترها

هدف از واسنجی, حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است و این کار ممکن است بوسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا به وسیله روشهای بهینه سازی انجام شود. پارامترهای مدل بایستی در گسترهٔ معقولی از محدوده هر پارامتر انتخاب گردند تا بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده، کمترین میزان خطا صورت گیرد.

در مدول SW این ضرایب شامل ضرایب شکست موج و اصطکاک بستر می باشند که براساس مقادیر پیشنهادی در پروژه مدلسازی امواج آبهای ایران در اجرای مدل بندر انزلی، مقادیر کالیبره شده ضرایب به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

ضرایب شکست موج برابر با α =۰/۶

ضرایب اصطکاک بستر شامل زبری K_n = ۰/۰۰۲

مدول HD به منظور شبیه سازی جریانات با ضریب ویسکوزیته چرخشی ۵۰ و عدد مانینگ ۳۲ به عنوان ضریب زبری بستر اجرا گردید. این ضرایب براساس مقادیر پیشنهادی در مطالعات دریایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

مدلسازی ریاضی بندر انزلی و نیز در نظر گرفتن شرایط همگرایی مدل انتخاب شده است.

با توجه به عمق مدل‌های طراحی شده و گام زمانی ۵ دقیقه در نظر گرفته شده برای آنها، مدل با عدد کورانت ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

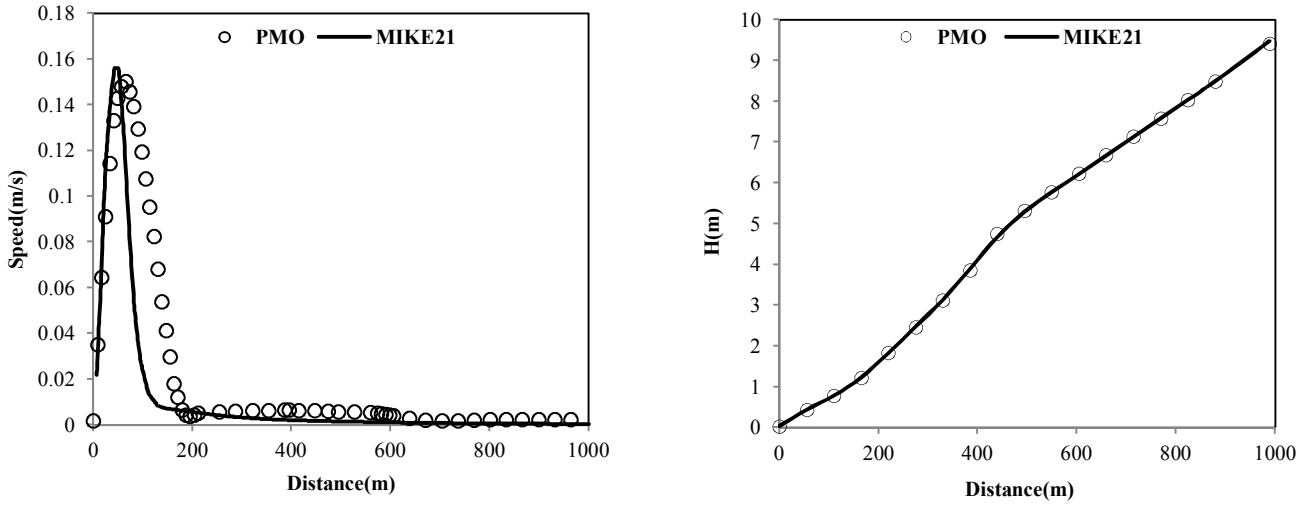
پارامترهای واسنجی در مدول ST عبارتند از دمای آب که معادل با ۲۵ درجه در مدل لحاظ گردید و ضریب زبری بستر که مطابق با آنچه درباره شبیه سازی هیدرودینامیک توسط مدول HD گفته شد بصورت ضریب مانینگ معادل ۳۲ در مدل معرفی شده اند.

۳- نتایج و بحث

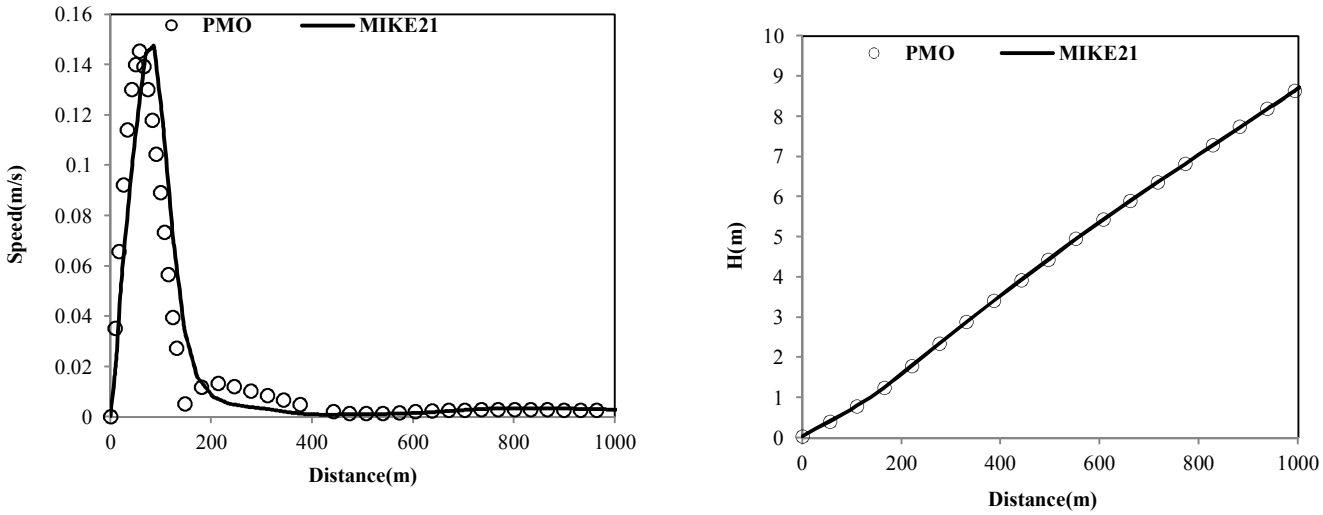
نتایج زیر حاصل از شبیه سازی پارامتر های سرعت، عمق آب و حجم کل انتقال رسوب حاصل از موج های ۰/۵، ۱ و ۱/۵متری با گام زمانی ۵ دقیقه و مدت ۲۴ ساعت (معادل رخ دادن ۱ طوفان در بندر انزلی) است که به صورت فایل dfsu1 (خطی) بوده و خطوط مورد نظر به طول ۱ کیلومتر به فاصله ی ۵۰۰ متری از موج‌شکن‌ها در هر دو ساحل شرقی و غربی قرار دارند.جدول ۱ مشخصات امواج مورد بررسی را نشان می‌دهد. در نهایت به منظور بررسی دقت مدل PMO Dynamics پارامترهای آماری مربوط به نتایج این مدل با مدل MIKE21 در جداول ۲ و ۳ مقایسه می‌شوند.

جدول ۱- مشخصات امواج مورد بررسی

ارتفاع موج $[m]$	پریود موج $[s]$	جهت موج [^]
۰/۵	۳	۷۰
۱	۵	۳۳۰
۱/۵	۶	۳۱۰



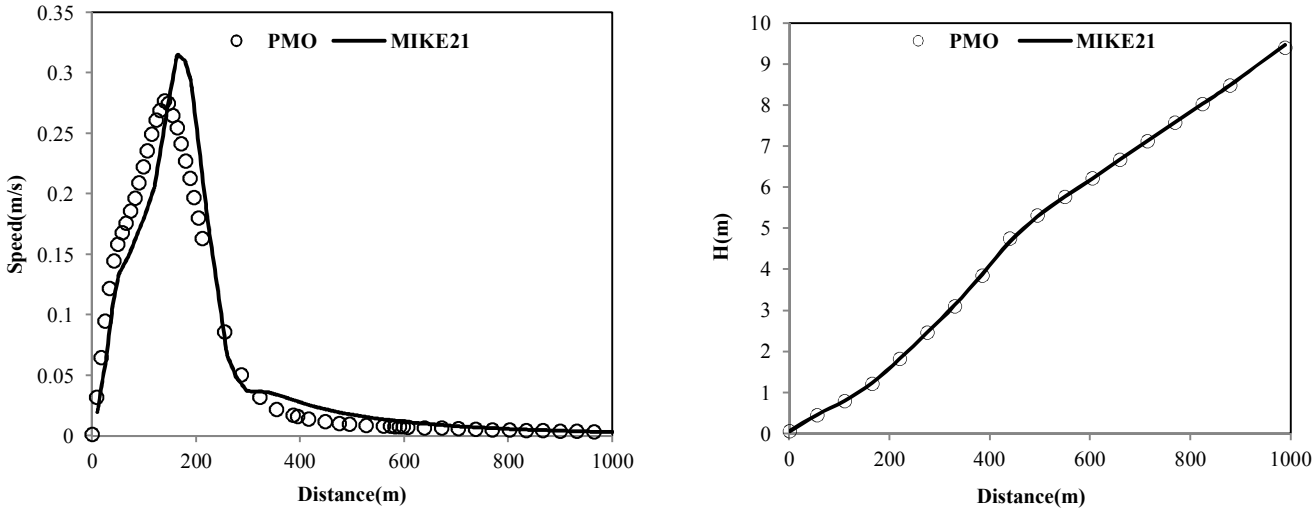
شکل ۴ - مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل شرقی موج ۰/۵ متر



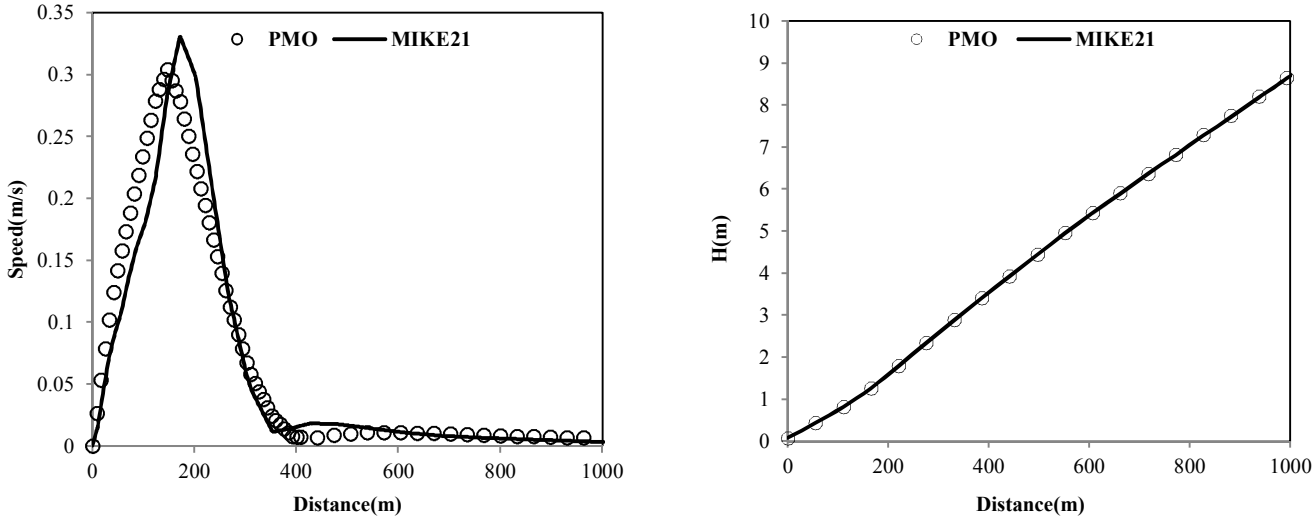
شکل ۵ - مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل غربی موج ۰/۵ متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

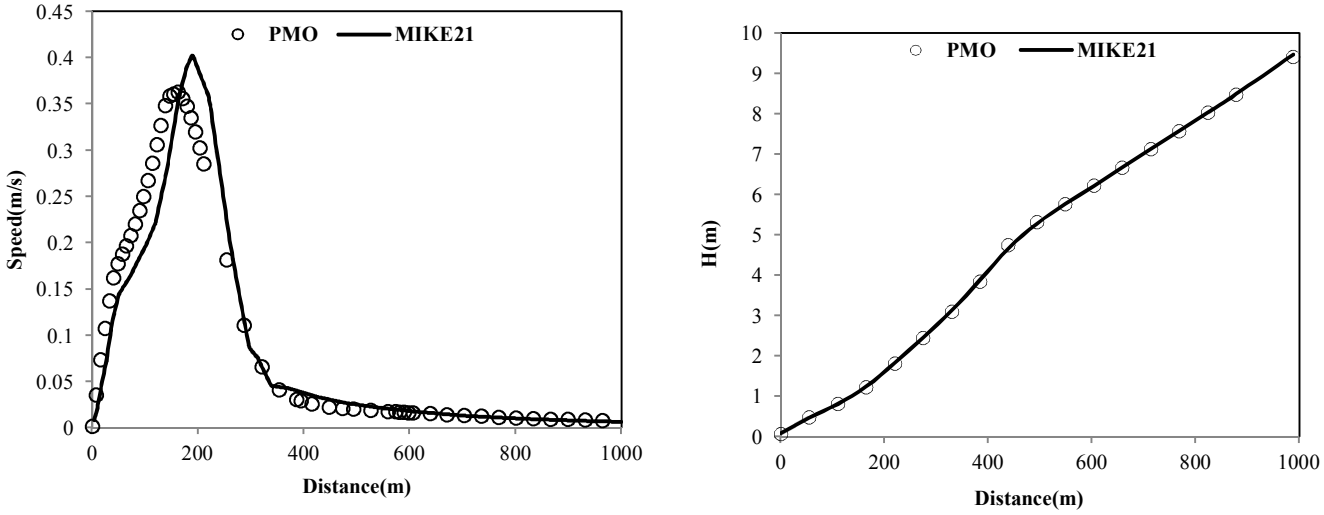
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]



شکل ۶ - مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل شرقی موج ۱ متر



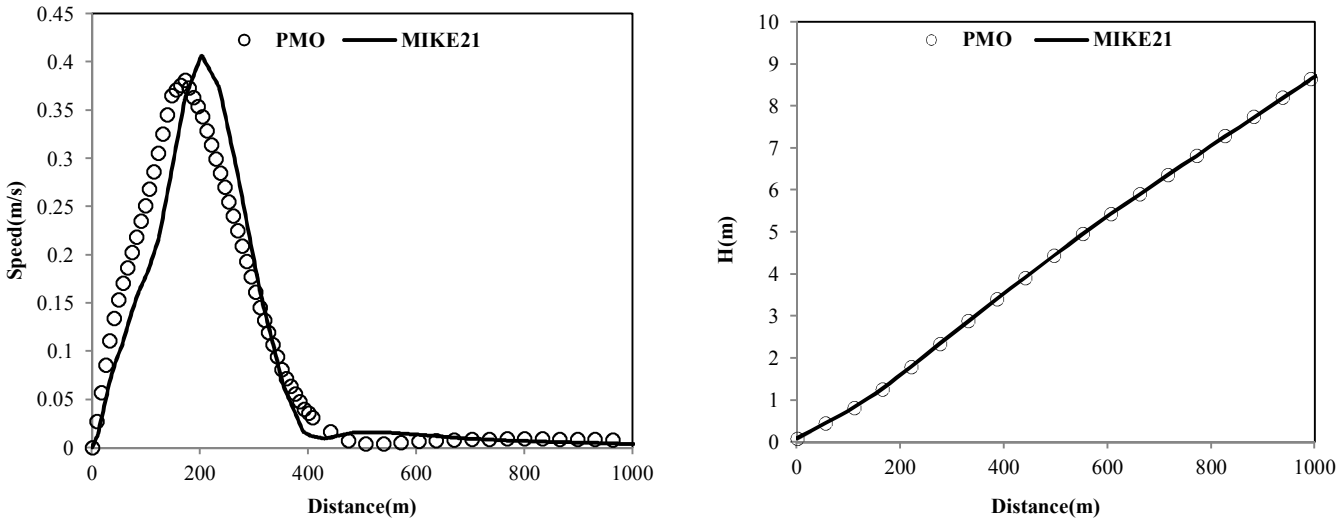
شکل ۷- مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل غربی موج ۱ متر



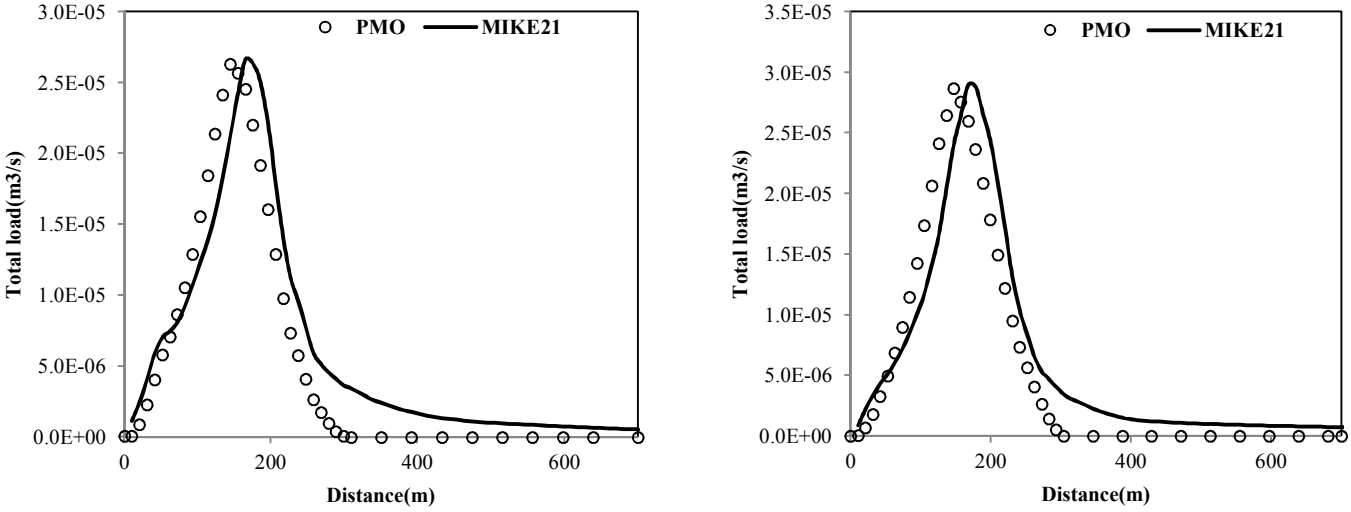
شکل ۸- مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل شرقی موج ۱/۵ متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

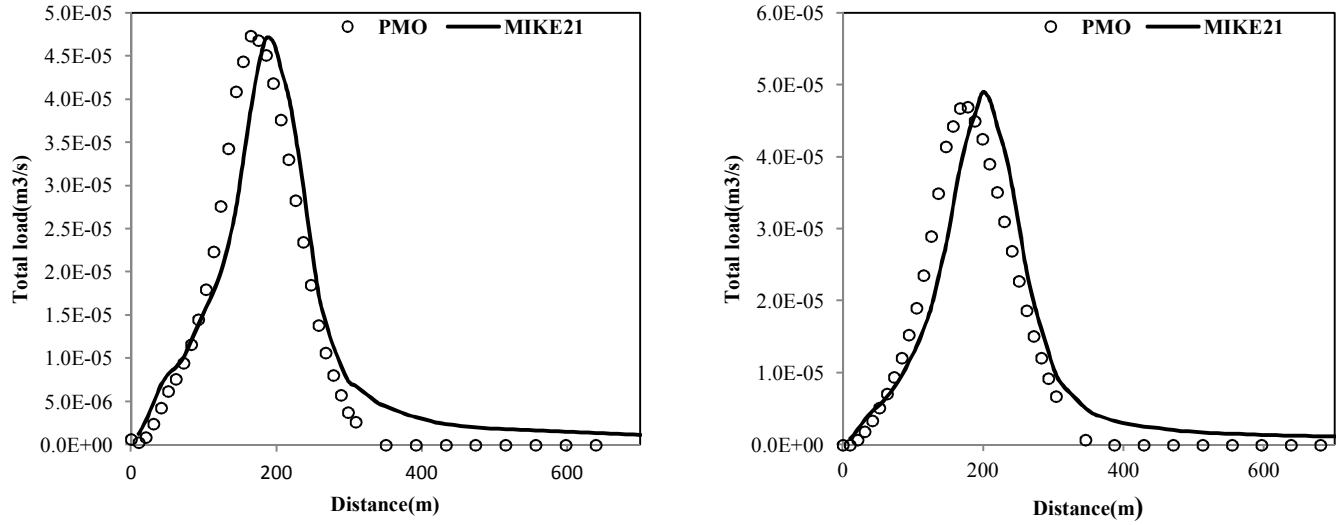
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]



شکل ۹- مقایسه سرعت جریان و عمق آب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل غربی موج ۱/۵ متر



شکل ۱۰ - مقایسه بار کل رسوب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل شرقی (چپ) و ساحل غربی (راست) موج ۱ متر



شکل ۱۱- مقایسه بار کل رسوب شبیه سازی شده در PMO و MIKE21 در ساحل شرقی (چپ) و غربی (راست) موج ۱/۵ متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

جدول ۲- مقایسه پارامترهای آماری نتایج شبیه سازی شده پارامترهای جریان(الف): ساحل شرقی (ب): ساحل غربی

(الف)

	عمق آب						سرعت جریان					
ساحل شرقی	Skill	MAE	SI	CC	RMSE	Bias	Skill	MAE	SI	CC	RMSE	Bias
موج ۰/۵ متر	۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۲۱۱	۰/۰۹۸	۰/۹۶	۰/۰۰۴	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲
موج ۱ متر	۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۲۱۲	۰/۰۹۸	۰/۹۸	۰/۰۰۷	۰/۳	۰/۹۷	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱
موج ۱/۵ متر	۱	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۲۱۲	۰/۰۹۸	۰/۹۸	۰/۰۰۹	۰/۳	۰/۹۷	۰/۰۳۹	۰/۰۰۱

(ب)

	عمق آب						سرعت جریان					
ساحل غربی	Skill	MAE	SI	CC	RMSE	Bias	Skill	MAE	SI	CC	RMSE	Bias
موج ۰/۵ متر	۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	۰/۹۷	۰/۰۰۳	۰/۵	۰/۹۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱
موج ۱ متر	۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۹۸	۰/۰۰۸	۰/۳	۰/۹۷	۰/۰۱۷	۰/۰۰۳
موج ۱/۵ متر	۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۹۸	۰/۰۰۹	۰/۳	۰/۹۷	۰/۰۲۴	۰/۰۰۵

جدول ۳- مقایسه پارامترهای آماری نتایج شبیه سازی شده بار کل رسوب (الف): ساحل شرقی (ب): ساحل غربی

(الف)

ساحل شرقی	Skill	MAE (*10^-7)	SI	CC	RMSE (*10^-6)	Bias (*10^-6)
موج ۱ متر	۰/۹۹	۲/۶	۰/۳	۰/۹۶	۲/۱۹	۹/۸۵
موج ۱/۵ متر	۰/۹۹	۲/۴۶	۰/۳	۰/۹۷	۴/۰۷	۱/۲۹

(ب)

ساحل غربی	Skill	MAE (*10^-7)	SI	CC	RMSE (*10^-6)	Bias (*10^-7)
موج ۱ متر	۰/۹۹	۲/۷	۰/۳	۰/۹۵	۲/۳۹	۸/۸۱
موج ۱/۵ متر	۰/۹۹	۲/۶۹	۰/۳	۰/۹۶	۳/۸۹	۱/۱۸

نتایج قابل قبول پارامترهای آماری و همچنین ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد بین نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که نرم افزار PMO Dynamics با دقت بالایی منطبق بر نرم افزار MIKE21 توانسته است جریان و میزان انتقال رسوب حاصل از امواج با ارتفاع های مختلف را شبیه سازی نماید و تفاوت های موجود بین دو نرم افزار به دلیل پیچیدگی هیدروگرافی و به دلیل آن که برای دستیابی به نتایج شبیه سازی جریان تنش های تشعشعی حاصل از مدل موج وارد مدل جریان شده و سپس نتایج سرعت و عمق آب برای برآورد رسوب در مدول ST مورد استفاده قرار می گیرد و بدین ترتیب خطاهای موجود در هر مرحله بر نتایج مرحله ی بعد هم تاثیر گذار می گذارد قابل قبول خواهد بود.

این نتیجه نشان دهنده آن است که شبکه بندی از نوع نقطه مرکز با کاهش دادن زمان اجرای شبیه سازی نسبت به شبکه از نوع سلول مرکز با دقت بالایی قادر به شبیه سازی جریان و انتقال رسوب حاصل از آن می باشد.

تنها در مورد موج با ارتفاع ۰/۵ متر است که نرم افزار PMO Dynamics مقادیر حاصل از رسوب گذاری را صفر اما نرم افزار MIKE21 مقدار رسوب را در هر فاصله ای به میزان تقریبی ۱۰ متر مقدار ناچیزی در حدود 10^{-6} نشان می‌دهد.جهت تعیین شدن دلیل این تفاوت می‌بایست میزان تنش برشی بستر و تنش برشی بحرانی مقایسه گردد.

اگر در حداکثر سرعت جریان میزان تنش برشی بستر از میزان تنش برشی بحرانی بیشتر شود به معنی انتقال رسوب و ضعف نرم افزار PMO Dynamics خواهد بود. لذا جهت برآورد این مقادیر از روابط زیر که بیانگر رابطه تنش برشی بستر و تنش برشی بحرانی در حالت ترکیب موج و جریان به پیشنهاد Bijiker است، استفاده می‌گردد.

$$\tau_{b,cr} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho)gd_{50} \quad (۳)$$

$$\tau_{b,cw} = \tau_{b,c} + \tau_{b,w} \quad (۴)$$

$$\tau_{b,c} = \frac{\rho g u^2}{18^2 log^2(\frac{12h}{k_s + \frac{3.3\nu}{u_{*,c}}})} \quad (۵)$$

$$\tau_{b,w} = 0.25\rho f_w(\hat{U})^2 \quad (۶)$$

در این رابطه $\tau_{b,cr}$ تنش برشی بحرانی بستر، $\tau_{b,cw}$ تنش برشی متوسط بستر، d_{50} قطر متوسط دانه های رسوب بر حسب متر و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

ρ_s دانسیته ماسه و ρ دانسیته آب، $\tau_{b,c}$ تنش برشی متوسط بستر مربوط به جریان، $\tau_{b,w}$ تنش برشی متوسط بستر مربوط به موج، u سرعت جریان، h عمق آب، f_w ضریب اصطکاک موج و $\hat{U}$ حداکثر سرعت اربیتالی موج در کف است.

فرمول‌های فوق جهت بدست آوردن مقادیر تنش برشی بستر و تنش برشی بحرانی در برنامه مطلب برنامه نویسی شده و مقادیر تنش برشی بستر به ازای حداکثر سرعت و عمق آب متناظر آن در دو نرم افزار و در هر دو ساحل شرقی و غربی برآورد شد این مقادیر در جدول ۴ نشان داده شده است. مقایسه این مقادیر با مقدار تنش برشی بحرانی نشان دهنده آن بود که در هیچ یک از دو ساحل شرقی و غربی و در هیچ کدام از نرم افزارها مقدار تنش برشی بستر از مقدار تنش برشی بحرانی پیشی نگرفته و به معنی عدم انتقال ذره رسوبی است بنابراین نرم افزار PMO Dynamics به درستی مقدار صفر را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش جهت شبیه سازی جریان و رسوب انتقال یافته حاصل از جریان های کرانه ای پشت موج شکن های انزلی از دو مدل دو بعدی PMO Dynamics و MIKE21 استفاده شد. نتایج این شبیه سازی نشان داد با استفاده از مدل PMO Dynamics و در نتیجه استفاده از روش نقطه مرکز جهت حل شبکه محاسباتی نه تنها به دقت های مشابه و یا حتی بهتری می توان دست پیدا کرد بلکه حجم محاسبات به دلیل تکراری نبودن محاسبات در یال های مشترک شبکه بندی برخلاف مدل MIKE21 کاهش یافته است. زمان شبیه سازی نیز در مدل PMO Dynamics در این شبیه سازی به میزان ۴ برابر کمتر از مدل MIKE21 بوده است. نتایج این پژوهش نشان داد که در ارتفاع موج ۰/۵ متر شرایط آستانه حرکت جهت انتقال مواد بستری وجود ندارد و در این شرایط قاعدتاً می‌بایست میزان انتقال رسوب برابر صفر باشد که این مقدار در نرم افزار PMO Dynamics مقدار صفر برآورد می‌گردد اما مدل MIKE21 در این شرایط نیز میزان رسوب را برآورد کرده است که با توجه به عدم در دسترس بودن منبع اصلی این برنامه نمی‌توان راجع به چگونگی برنامه نویسی مدول انتقال رسوب آن قضاوت نمود.

بنابراین مدل ریاضی ایرانی نتایجی نزدیک به مدل MIKE21 که یکی از مطرح‌ترین مدل‌های دوبعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های دریایی و سواحل است را دارا می باشد و به عنوان مدلی عددی با قابلیت بالا در کنار نرم افزار های تجاری و غیر تجاری خارجی در دسترس همچون MIKE21 توصیه می شود.

جدول ۴- تنش برشی بحرانی و نتایج حاصل از محاسبه تنش برشی بستر حاصل از نتایج دو نرم افزار

تنش برشی بحرانی $[N/m^2]$	تنش برشی بستر $[N/m^2]$		
	MIKE21	PMO Dynamics	
۰/۱۶	۰/۱۲۱۴	۰/۱۲۱۳	**ساحل شرقی**
	۰/۱۱۱۲	۰/۱۲۰۵	**ساحل غربی**

۵- مراجع

1- Manual of MIKE 21., 2005, *Coastal Hydraulic and Oceanography Hydrodaynamic Module*, Danish Hydraulic Institute (DHI Software), 74pp.

2- Bohluly,A.,2013,*Reporting the theory of spectral wave model of PMO Dynamics*, Monitoring and Modeling Studies parts of the coastal provinces of Sistan and Baluchestan, Bushehr. (In Persian)

3- MIKE 21 (1998), *Coastal Hydraulics and Oceanography Hydrodynamic Models*, Release 2.7, User Guide and Reference Manual, Danish Hydraulic Institute

4- Bohluly,A.,2013,*Reporting the theory of hydrodynamic model of PMO Dynamics*, Monitoring and Modeling Studies parts of the coastal provinces of Sistan and Baluchestan, Bushehr. (In Persian)

5- Bohluly,A.,2013,*Reporting the theory of sediment model of PMO Dynamics*, Monitoring and Modeling Studies parts of the coastal provinces of Sistan and Baluchestan, Bushehr. (In Persian)

6- Bohluly,A. and Namin M,M.,2010, *Simulation of nonlinear interaction of waves in deep and shallow waters*, Fourth National Congress on Civil Engineering, Tehran University. (In Persian).

7- Neishabori,A. and Taghdisian,M.,1996, *Open channel flow*. (In Persian)

8- Nadimi,S.,2011, *Study of Erosion and Sedimentation in reservoirs leading to the Anzali Wetland by using mathematical models*, MS Thesis, University of Guilan,. . (In Persian)

9- Mohammadian,A. and Le Roux, D.Y., (2006), *Simulation of Shallow Flows Over Variable Topographies Using Unstructured Grids*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 52, pp 473-498.

10- Montazeri Namin, M.,(1988), *High Accurate Positive Definite Numerical Schemes for Scalar Transport*, Delft Hydraulics Report no. Z142.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]

11- Van Rijn.,1995, *PRINCIPLES OF SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS*, ESTUARIES AND COASTAL SEAS

12- Namin M,M., Falconer R,A., Mohammadian ,M., Lin, B., and Kamalian, R., (2002), *Hydro-Environmental Modeling and Analysis Tool (HEMAT)*, Proc. of 5th Int. Conf. On Hydroinformatics, Hydroinformatics 2002, Ed. Falconer, et.al, IWA Publishing, pp 109-116

13- Richtmeyer R,D. and Morton, K.W., (1967), *Difference Methods For Initial Value Problems*, 2nd Edition, Inter-science, New York.

14- Spectral Wave Module, *Scientific Documentation*,DHI Software 2005, Denmark, pp 8-25.

15- Van Rijn,L.C.,2007,*Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves*.I:Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport, Journal Hydraulic Engineering

16- Barnes, M.P. and Baldock, T.E.,2010,*Determination and control of longshore sediment transport:A case study*,Journal of Coastal Engineering

17- Bayram,A.,Larson, M.,Hanson,H.,2007, *A new formula for the total longshore sediment transport rate*,Journal of Coastal Engineering

18- Prabhakar ,V., and Pandurangan, J. ,2006,*A Quadrature Method for Computing Nonlinear Source Term Due Wave-Wave interactions*, J Current Science, 90, 6, 812-817.

19- Van Vledder G. Ph., Bottema ,M., 2002, *Improved Modelling of Nonlinear Four-Wave Interactions .in Shallow Water*, Proc. 28'h Int. Conf 0n Coastal Engineering, UK, 459-471

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.11.6]