



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Numerical Simulation of Flow Patterns and Bed Level Changes in The Area of Shahid Rajaei Port Using Telemac-Mascaret Model

Sina Gharavi¹, Seyed Mostafa Siadatmousavi^{1*}, Ali Khosh kholgh²

1. School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. Department of Ocean Engineering and technology, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

* Corresponding Author Email: Siadatmousavi@iust.ac.ir

Received: 7 June 2023

Revise Date: 26 August 2023

Accepted: 18 September 2023

DOI: 10.22113/JMST.2023.398203.2529

ABSTRACT

Sedimentation and erosion are among the most significant issues that pose serious challenges in coastal areas. The consequences of these phenomena include reduced lifespan of ports, continuous dredging, and high costs. When ports experience sedimentation, engineering solutions are required. Predicting the rate and pattern of sediment deposition in the access channel and the basin of ports enables better cost management. The objective of this study is to numerically model the hydrodynamic and morphological effects using the open-source numerical model TELEMAC in the Strait of Khuran and Shahid Rajaei Port, located in the Persian Gulf. For this purpose, water surface elevations at open boundaries were provided to the model, obtained from a calibrated MIKE21 model. The hydrodynamic model was executed, and the output included velocity and water surface elevation. Additionally, the sediment transport model GAIA was coupled with the hydrodynamic model and executed. The sediment model output includes bed level changes and suspended sediment concentrations. Finally, the simulated model was validated using measurement data, confirming that the dominant flow is tidal, parallel to the coast, and reaches a maximum velocity of 2 meters per second. The water surface elevation modeled by TELEMAC indicates that localized maximum water levels reach up to 4 meters. Wind speeds rarely reach 5 meters per second in the Khuran channel, and therefore, their influence on the currents is minimal. The results from the sediment model demonstrate that the intensity of sediment deposition in the port area and the access channel is higher in the central and eastern parts of the Strait of Khuran, as well as in the western area of Shahid Rajaei Port.

Keywords: numerical model; erosion; sedimentation rate; Khuran Channel.

1. INTRODUCTION

Sedimentation in ports due to longshore transport current is estimated using state of the art hydrodynamic models; e.g. in Rotterdam port in the Netherlands (Sjoerd de Groot, 2018), Hamburg port in Germany (Kuijper et al., 2005) and Shanghai port in China (Song and Wang, 2013). Such a numerical system includes simulation of longshore currents, waves, sediment transport, and changes in morphology (Cialone, 1991).

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



TELEMAC-MASCARET is one of the open source models that can be used for such applications and this model has been used in this study using GAIA sediment module which can be used to assess the sediment dynamics in case of cohesive materials (Giardino et al., 2009; Santoro et al., 2017), non cohesive bed materials (Luo et al., 2013) or their combinations (Van, 2012). The model was used for sedimentation around Shahid Rajaei Port which is one of the most important ports in Iran.

2. MATERIALS AND METHODS

Khuran Channel is located between Qeshm Island and the mainland of Iran. The main driving force for current and sedimentation is the tide in this area. The TELEMAC-2D was employed to determine the hydrodynamics and the GAIA module was used for estimation of sedimentation and erosion. The boundary conditions were determined from a global MIKE21 model in terms of the time series of water elevation. The mesh file includes 21640 nodes and 42116 elements. The simulation period was from 22/10/2009 to 18/01/2010 with 4 sec time step. Wind data from the ECMWF ERA5 dataset were prepared and meteo. f and idwm_t2d.f files were modified accordingly to include wind effects in the model. The bed friction was included using Strickler's coefficient.

3. RESULTS

The current velocity showed a high current speed (as high as ~2 m/s) in the Khuran Channel which is in agreement with previous studies (Khosravi et al., 2018, Mahmoudov et al., 2011). The time series of water level and current speed were in good agreement with in situ measurements at Rahaei and Dargahan stations when Strickler's number of 50 was used in the model. Twelve configurations were considered for the sediment module by changing the critical shear stresses for deposition and erosion, mud concentration, the initial thickness of the mud, fall velocity for mud flocs, and sediment density. Scenario number 6 with shear stresses of 0.15 and 0.3 Pa for critical shear stresses, 60 g/l of mud concentration with an initial thickness of 3.5 cm with a density of 1650 provided the best agreement with bed level change obtained from periodic dredging operation.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The water level lagged velocity peak by 2-3 hours at Pohl and Rahaei stations which shows the tidal signal has progressive waves nature. Sedimentation of ~9 cm/year was determined for the Shahid Rajaei port. The western part of the basin has more sedimentation than its eastern part.

REFERENCES

1. Sjoerd D.G., 2018. Suspended Sediment Modelling in the Port of Rotterdam.2108, Master's Thesis, Delft University of Technology.
2. Kuijper, C., Christiansen, H., Cornelisse, J. M. and Winterwerp, J. C., 2005. Reducing harbor siltation. II: Case study of Parkhafen in Hamburg. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 131(6), pp 267-276. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:6\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(267))
3. Song, D. and Wang, X.H., 2013. Suspended sediment transport in the Deepwater Navigation Channel, Yangtze River Estuary, China, in the dry season 2009: 2. Numerical simulations, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, pp.5568–5590. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20411>.
4. Cialone, M.A., 1991. Coastal modeling system (CMS) user's manual.
5. Giardino, A., Ibrahim, I., Adam, S., Toorman, E., and Monbaliu, J., 2009. Hydrodynamics and cohesive sediment transport in the IJzer estuary, Belgium: Case study. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 135, pp.176–184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2009\)135:4\(176\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2009)135:4(176)).
6. Santoro, P., Fossati, M., Tassi, P., Huybrechts, N., Pham Van Bang, D., and Piedra-Cueva, J., 2017. A coupled wave–current–sediment transport model for an estuarine system: Application to the Río De La Plata and Montevideo Bay. *Applied Mathematical Modelling*, 52, pp.107–130. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.07.004>
7. Luo, J., Li, M., Sun, Z., and O'Connor, B., 2013. Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region. *Marine Geology*, 342, pp.14–27. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.06.004>.
8. Van, L. A., 2012. Numerical modelling of sand-mud mixtures settling and transport processes: application to morphodynamic of the Gironde estuary (France). PhD thesis, *Université Paris-Est*.
9. Khosravi, M., Siadatmousavi, S.M., Chegini, V., and Vennell, R., 2018. Across-channel distribution of the mean and tidal flows in the Khuran Channel, Persian Gulf, Iran. *International Journal of Maritime Technology*, 10, pp.1-6. <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.1>
10. Mahmoudov, M., V. Chegini, and M. Montazeri Namin, 2011. Three-dimensional simulation of qeshm channel currents, *Journal of The Persian Gulf*, Vol (2), No 3, pp 1-8.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و تغییرات تراز بستر در محدوده بندر شهید رجایی با استفاده

از مدل TELEMAC-MASCARET

سینا غروی^۱، سید مصطفی سیادت موسوی^{۱*}، علی خوش خلق^۲

۱. گروه آب و محیط‌زیست دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Siadatmousavi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

DOI: 10.22113/JMST.2023.398203.2529

چکیده

رسوب‌گذاری و فرسایش از مهم‌ترین مسائلی هستند که مشکلات جدی را در مناطق بندری ایجاد می‌کنند. از پیامدهای این پدیده می‌توان به کاهش طول عمر بندر و لایروبی مستمر و پرهزینه اشاره کرد. هنگامی که بنادر ته‌نشینی رسوب را تجربه می‌کنند، به راه‌حل‌های مهندسی نیاز است. پیش‌بینی نرخ و الگوی رسوبگذاری در کانال دسترسی بنادر امکان مدیریت بهتر هزینه‌های بندر را فراهم می‌آورد. هدف از انجام این مطالعه، مدل‌سازی عددی اثر پدیده‌های هیدرودینامیکی و مورفولوژی با استفاده از مدل عددی کدباز تلمک در تنگه خوران و بندر شهید رجایی، واقع در خلیج فارس است. برای این منظور، تراز سطح آب در مرزهای باز به مدل داده شد که این داده‌ها از یک مدل کالیبره شده مایک ۲۱ تأمین گردید. مدل هیدرودینامیک اجرا گردید و خروجی‌های سرعت و تراز سطح آب به دست آمد. همچنین مدل رسوب GAIA به صورت کوپل شده با مدل هیدرودینامیک اجرا گردید. خروجی مدل رسوب، تغییرات سطح بستر و غلظت رسوبات معلق را شامل می‌شود. در انتها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، مدل شبیه‌سازی شده صحت‌سنجی شد و مشخص گردید که جریان جزر و مدی و موازی ساحل بوده و از سرعت حداکثر ۲ متر بر ثانیه برخوردار است. تراز سطح آب مدل شده توسط تلمک، نشان می‌دهد بیشینه تراز سطح آب تا ۴ متر به صورت موضعی رخ می‌دهد. سرعت باد در کانال خوران به ندرت ۵ متر بر ثانیه تجاوز می‌کند و بنابراین اثر آن در جریانات کم است. نتایج حاصل از مدل رسوب نشان می‌دهد که شدت رسوبگذاری در منطقه بندر و کانال دسترسی در محدوده مرکزی و شرقی تنگه خوران و نیز در محدوده غربی بندر شهید رجایی بیشتر از سایر مناطق است.

واژگان کلیدی: مدل عددی، نرخ رسوب‌گذاری، فرسایش، کانال خوران.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ساحلی، پدیده انتقال رسوب است که عمده عوامل محیطی موثر در ارتباط با آن شامل امواج، جریان‌ها، بادها و تغییر محیط سواحل توسط انسان است. رسوب‌گذاری و فرسایش از مهم‌ترین مسائلی هستند که مشکلات جدی را در مناطق بندری ایجاد می‌کنند. از پیامدهای این پدیده می‌توان به کاهش طول عمر بندر و لزوم لایروبی مستمر و پرهزینه اشاره کرد.

توسعه شهرهای اطراف بنادر، اغلب با گسترش فعالیت‌های بندری مانند صادرات نفت، زغال سنگ و گاز همراه است. چنین توسعه‌ای منجر به فشارهای محیط‌زیستی متعددی می‌شود، مانند لایروبی برای تسهیل دریانوردی کشتی‌های بزرگ‌تر، تغییرات در رسوبات و رواناب مواد مغذی به مناطق حوضه آبریز ناشی از فعالیت‌های انسانی. افزایش غلظت گل و لای در آب‌های ساحلی یک مسئله اکولوژیکی جهانی است. علاوه بر این، رسوبات دریایی ممکن است مواد مغذی و آلاینده‌ها را از منابع خشکی حمل کنند. درک انتقال رسوب منجر به درک بهتر کنترل آلودگی می‌شود و بنابراین به حفظ اکوسیستم دریایی و ایجاد یک سیستم مدیریت یکپارچه ساحلی کمک می‌کند. هنگامی که بنادر تهنشینی رسوب را تجربه می‌کنند، راه‌حل‌هایی مورد نیاز است. پیش‌بینی و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در حوضچه و کانال دسترسی بنادر با استفاده از ابزار مدل‌سازی عددی امکان مدیریت بهتر هزینه‌های لایروبی و نگهداری بندر را فراهم می‌آورد و این موضوع در بنادر اصلی، بسیار مورد توجه است (Dashti et al., 2019).

از جمله این موارد می‌توان به تخمین نرخ رسوب‌گذاری در بنادر روتردام در هلند (Sjoerd de Groot, 2018)، بندر هامبورگ در آلمان (Kuijper et al., 2005) و بندر شانگهای در چین (Song and Wang, 2013) با استفاده از یک سامانه مدل‌سازی انتقال رسوب اشاره نمود.

یک سامانه مدل‌سازی انتقال رسوب مجموعه یکپارچه‌ای از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان، امواج، انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژی در مناطق ساحلی است (Cialone, 1991). کاربردهای اصلی چنین سامانه‌ای، ارزیابی عملکرد کانال‌های ناوبری و مدیریت فرآیندهای رسوب‌گذاری برای ورودی‌های بنادر و سواحل مجاور است (Sharaan et al., 2018).

دینامیک رسوب در مناطق ساحلی به دلیل دخالت عوامل طبیعی مختلف نظیر جزر و مد، امواج، باد، آورد رودخانه‌ها، توزیع رسوب، و همچنین به دلیل عوامل بشرساخت مانند سازه‌های ساحلی بسیار

پیچیده است (Dyer, 1997; Wu et al., 2017). درک این فرآیندهای فیزیکی در محیط‌های ساحلی بر تجزیه و تحلیل انتقال غلظت رسوبات معلق و تغییرات مورفودینامیک تکیه دارد (Dronkers, 2005). تغییرات غلظت رسوب معلق (SSC)، در مقیاس‌های زمانی از سیکل جزر و مدی نیمه روزانه تا دوره‌های فصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Grasso et al., 2018; Feng et al., 2019) و تغییرات مورفودینامیکی از تغییرات سطح بستر در بازه‌های زمانی مختلف از دو هفته تا دهه‌ها قابل تجزیه و تحلیل است (Orseau et al., 2020; Brand et al., 2021).

مدل‌های عددی کالیبره‌شده و معتبر که توانایی خود را در شبیه‌سازی صحیح دینامیک رسوب در محیط‌های ساحلی و بنادر نشان داده‌اند، به ابزارهای مفیدی برای توصیف شرایط رسوبی این محیط‌ها و پیش‌بینی رفتار آنها تحت سناریوهای مختلف تبدیل شده‌اند. تغییرات مورفولوژی با توجه به پدیده‌های هیدرودینامیکی مؤثر بر آنها در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (در اثر یک طوفان)، میان‌مدت (سیکل جزر و مدی) و درازمدت (چندین سال) رخ می‌دهد که برای بررسی هریک از آنها بایستی از روش‌های متناسب با آنها استفاده نمود.

سه رویکرد متمایز شامل استفاده از مدل‌های دو بعدی عمودی با میانگین‌گیری جانبی (Sinha et al., 2004; Etemad-Shahidi et al., 2010)، مدل‌های افقی دو بعدی با میانگین‌گیری در عمق (Gourgue et al., 2013; Santoro et al., 2017; Gourgue et al., 2022) و مدل‌های سه بعدی (Fairley et al., 2015) و درازمدت (چندین سال) رخ می‌دهد که برای بررسی هریک از آنها بایستی از روش‌های متناسب با آنها استفاده نمود. رسوب در این نواحی به کار گرفته شده است.

اگرچه مدل‌های سه‌بعدی، جزئیات دقیق هیدرودینامیک و فرآیندهای انتقال رسوب را در ستون آب و هندسه‌های پیچیده و مختلف مناطق ساحلی ارائه می‌کنند، لیکن از نظر محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های طولانی مدت و برای آزمایش سناریوهای مختلف برای اهداف عملیاتی بسیار پرهزینه هستند. در محیط‌های کم عمق و محیط‌هایی که اختلاط قائم در آنها به خوبی صورت گرفته است، توانایی رویکرد استفاده از مدل‌های دو بعدی افقی با میانگین‌گیری در عمق به اثبات رسیده است (Angeloudis et al., 2016; Nnafie et al., 2019).

از جمله سیستم‌های مدل‌سازی در دسترس برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک، انتقال رسوب و فرآیندهای تغییرات تراز بستر سیستم منبع باز TELEMAC-MASCARET است که با تکیه بر روش گسسته‌سازی المان محدود بر اساس یک شبکه بدون ساختار، مناسب برای نواحی ساحلی و بنادر با هندسه پیچیده ارزیابی می‌شود. عملکرد

۲. مواد و روش کار

کانال خوران یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های دریایی در خلیج فارس و در برگرفته‌ی بزرگترین منطقه رویش جنگل‌های حرا است. این کانال کم عمق (حداکثر عمق ۴۲ متر) در خط ساحلی استان هرمزگان قرار دارد. همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده، کانال خوران بین مختصات ۵۶/۲۵ تا ۵۵/۲۰ شرقی و ۲۷/۲۰ تا ۲۶/۶ شمالی واقع است. این کانال از جنوب به جزیره‌ی قشم و از شمال به ساحل جنوبی استان هرمزگان محدود است. طول این کانال بین مرز شرقی و غربی ۱۱۰ کیلومتر و عرض آن ۲۵ کیلومتر است. وجود جنگل‌های متمرکز و انبوه درختان حرا به خصوص در قسمت مرکزی این کانال، سبب شده تا این منطقه به‌عنوان منطقه محافظت شده اعلام شود.

شبیه‌سازی ماژول انتقال رسوب و مورفودینامیک GAIA که در این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد با موفقیت در مطالعات مختلف برای محیط‌هایی با رسوبات چسبنده (Giardino et al., 2009; Santoro et al., 2017) رسوبات غیرچسبنده (Luo et al., 2013) و مخلوط رسوبات چسبنده-غیرچسبنده (Van, 2012) استفاده شده است.

مطالعه حاضر نیز نحوه استفاده از این سیستم مدل‌سازی رسوب را در تعیین الگوی جریان و رسوبگذاری در حوضچه و کانال دسترسی بندر شهید رجایی که مهم‌ترین بندر کانتینری کشور است، ارائه می‌نماید.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- The study area

فرآیندها و منابع رسوبی و نیروهای محیطی تأثیرگذار بر آن معرفی نمودند:

(۱) انتقال مستقیم رسوبات رودخانه کل و رودخانه‌های فصلی اصلی به منطقه در هنگام وقوع سیل.

(۲) حرکت رسوبات در بستر کانال خوران در غرب خوران (فقط) و انتقال آنها به شرق.

(۳) منابع رسوب رودخانه‌های فصلی در بخش‌های شرقی.

Shanehsazzadeh و Ardalan (2019) در مطالعه‌ای، فرآیندهای انتقال رسوب در تنگه خوران بین سرزمین اصلی ایران و جزیره قشم در شمال خلیج فارس مرکزی را در مقیاس منطقه‌ای به صورت جامع بررسی کرده، و نوع و منشأ رسوب، عوامل موثر و شیوه غالب انتقال رسوب را تعیین نموده‌اند. سپس به منظور بررسی دقیق و بررسی الگوی و میزان رسوب/فرسایش در کانال خوران، بر اساس مطالعات قبلی و شواهد تاریخی، چهار سناریوی احتمالی زیر را از نظر

(۴) حرکت رسوبات از بستر.

هر یک از این سناریوها به صورت عددی شبیه‌سازی شده و اثرات آنها بر رسوب و فرسایش بستر در منطقه بررسی شده است. نتایج مدل مفهومی و مدل عددی MIKE21 که برای این منظور اعمال شده است نشان می‌دهد که منابع رسوب در فرآیندهای انتقال رسوب در تنگه خوران عمدتاً توسط رسوبات معلق از مناطق مرکزی و شرقی بستر تنگه تأمین می‌شود. سایر منابع از جمله ورودی رودخانه‌ها تأثیر مستقیمی بر فرآیندها ندارند.

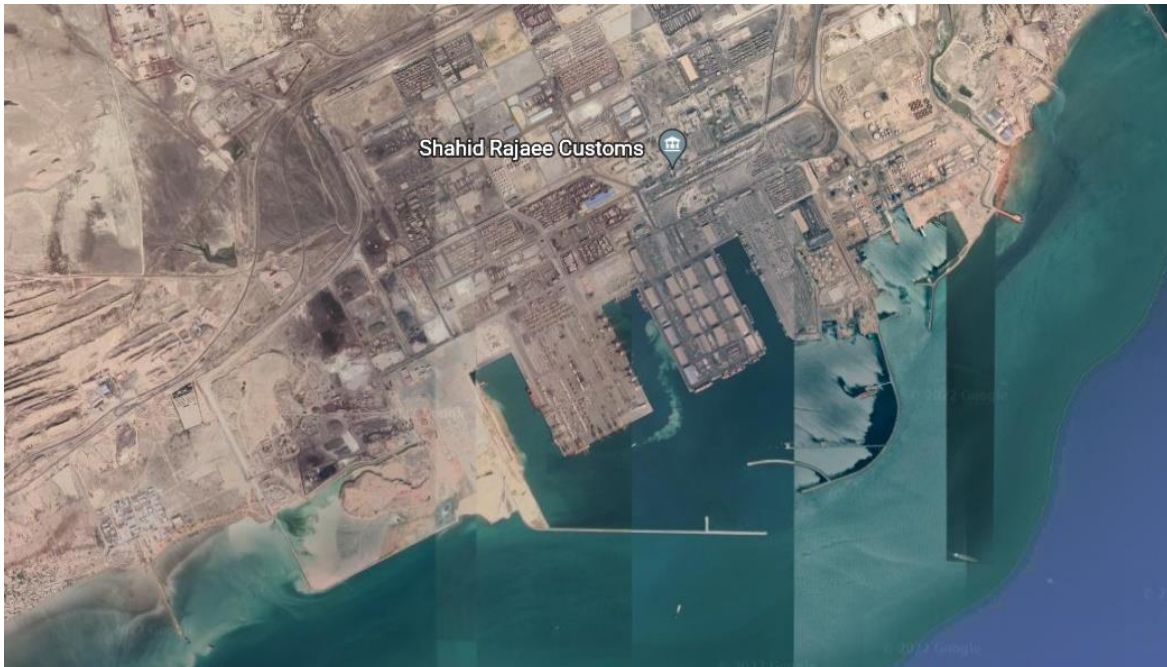
وجود تاسیسات کشتی‌سازی، نیروگاه برق، تاسیسات بندری شهید رجایی و شهید باهنر در ساحل شمالی و ایستگاه آب‌شیرین‌کن در جزیره قشم اهمیت این کانال را افزایش داده است.

بندر شهید رجایی که در شکل (۲) نمایش داده شده است، در نوار ساحلی جنوب ایران، در شمال جزیره قشم قرار گرفته است. مختصات جغرافیایی بندر ۲۷/۱ شمالی و ۵۶/۰۵ درجه شرقی بوده و یکی از مهم‌ترین بنادر کشور است. این بندر دارای کانال دسترسی بندر به طول ۶/۵ کیلومتر بوده و عمق لازم برای کشتی‌رانی امن در آن ۱۵/۵ متر است و به دلیل رسوب‌گذاری در طول زمان، نیازمند لایروبی دوره‌ای نگاهداری است که حجم آن در حدود ۱ میلیون متر مکعب در

سال تخمین زده می‌شود (Shanehsazzadeh and Ardalan, 2019).

با توجه به پیشینه تحقیقات ارائه شده در بخش مقدمه، در این مطالعه جهت مدل‌سازی الگوی جریان و رسوبگذاری در بندر شهید رجایی، از سیستم مدل‌سازی با نرم‌افزار تلمک استفاده شد. این سیستم مدل‌سازی شامل طیف گسترده‌ای از زیربرنامه‌ها است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی و مورفولوژی مختلف، از رودخانه‌های کوهستانی گرفته تا دلتاهای ساحلی تحت تأثیر جزر و مد قابل استفاده هستند (TELEMAC-2D V8P3 2021).

در این مطالعه از دو زیربرنامه برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و الگوی انتقال رسوب در بندر شهید رجایی استفاده شده است. زیربرنامه TELEMAC-2D برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و از زیربرنامه GAIA در این سیستم برای بررسی انتقال رسوب و تکامل بستر استفاده شد. به دلیل کدباز بودن مدل، کاربر می‌تواند تغییراتی را به زبان فرترن اعمال کند. همانطور که از شکل (۳) مشخص است، نرم افزار تلمک در محیط CMD ویندوز یا ترمینال لینوکس اجرا می‌شود.



شکل ۲- موقعیت بندر شهید رجایی

Fig 2- Location of Shahid Rejaee port

شکل ۳- محیط نرم افزار در سیستم

Fig. 3- Software environment in the system port

کد TELEMAC-2D چهار معادله هیدرودینامیکی (۱-۴) را به طور همزمان حل می‌کند:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \nabla(h) + h \operatorname{div}(u) = S_h \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla(u) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \nabla u) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \nabla(v) = -g \frac{\partial z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \nabla v) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla(T) = S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_T \nabla T) \quad \text{رابطه (۴)}$$

اصطکاک بستر، منبع یا کاهش تکانه درون دامنه را نشان می‌دهند. لزجت آشفتگی ممکن است توسط کاربر داده شود یا با مدلی که انتقال مقادیر آشفتگی k (انرژی جنبشی آشفتگی) و ε (اتلاف آشفتگی) را شبه‌سازی می‌کند، تعیین شود، که به صورت معادلات ۵ و ۶ هستند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla(k) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{v_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + P - \varepsilon + P_{kv} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla(\varepsilon) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P - c_{2\varepsilon} \varepsilon + P_{\varepsilon v}) \quad \text{رابطه (۶)}$$

مخلوطا، ویژگی‌ها (چسبنده و غیرچسبنده) و انتقال (معلق، بار بستر و هر دو به طور همزمان) تنظیم شده است. چارچوب کلی مورد استفاده برای لایه‌بندی بستر باعث می‌شود که هر ترکیبی از کلاس‌های اندازه بزرگ برای رسوبات غیرچسبنده و چسبنده به طور همزمان مدل شوند. همچنین باعث سازگاری بین یک مدل لایه فعال (رویکردی که به

برای اجرای مدل تلمک نیاز به سه فایل، شامل فایل هندسی (مش‌بندی منطقه موردنظر)، فایل شرایط مرزی و فایل فرمان هست که پس از ساختن این فایل‌ها می‌توان مدل را اجرا کرد.

که در این معادلات h عمق آب (متر)، u, v مولفه‌های سرعت (متر بر ثانیه)، T مولفه شوری، دما (گرم بر لیتر، درجه سانتی‌گراد)، v_T, v_ε به ترتیب انتقال و ضریب انتشار ترم شوری و دما هستند. در ضمن، S_x و S_y عبارت‌های چشمه و چاه هستند که باد، نیروی کوریولیس،

عبارات سمت راست این معادلات نشان دهنده تولید و استهلاک کمیت‌های آشفتگی (انرژی و اتلاف) است. زیربرنامه گایا، قادر به مدل‌سازی رسوبات پیچیده و فرآیندهای مورفودینامیکی در مناطق ساحلی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مصب‌ها است و برای انواع حالت‌های مکانی و زمانی کلاس‌های اندازه رسوب (یکنواخت، درجه‌بندی یا

می‌شود. در مدل دو بعدی، انتقال رسوب معلق با حل معادله دوبعدی انتقال-انتشار، بیان می‌شود:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hUC}{\partial x} + \frac{\partial hVC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + (E - D) \quad (7)$$

حسب جرم خشک است که برای الگوریتم‌های انتقال جرم مورد استفاده برای مدل لایه بستر مناسب است (GAIA V8P3, 2021).

فرم کلاسیک معادله قانون پایستگی برای جرم رسوب معادله اکسیر بردار سرعت انتقال حجمی در واحد عرض بدون منافذ Q_b را بیان می‌کند که با اجزای Q_{bx} : Q_{by} در جهت x, y بیان می‌شود. به ترتیب بردار حمل بار را می‌توان به اجزای x, y تجزیه کرد:

$$Q_b = (Q_{bx}, Q_{by}) = (Q_b \cos \alpha, Q_b \sin \alpha)$$

ثانویه است. همچنین گایا معادله اکسیر را به عنوان تابعی از نرخ شار انتقال جرمی و نه بر اساس نرخ انتقال حجمی، به صورت رابطه (۹) حل می‌کند؛ جایی که Q_{mb} بردار نرخ انتقال جرمی در واحد عرض بدون تخلخل و ρ چگالی باشد (Juilien, 2010).

$$Q_{mb} = \rho Q_b$$

تا مدل بتواند این داده‌ها را بخواند. اطلاعات باد از پایگاه ECMWF در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه ۲۰۰۹-۲۰۱۰ گرفته شد. سپس به فرمت telemac تبدیل شد. برای اعمال باد از ۲ فایل فرترن meteo.f و idwm_t2d.f استفاده گردید. مدل از تاریخ ۲۰۰۹/۱۲/۱۱ تا تاریخ ۲۰۱۰/۱۲/۲۵ با گام زمانی ۳ ثانیه اجرا شده و هر ۱ ساعت یکبار خروجی گرفته شده است. در مدل هیدرودینامیک به ترتیب از سه ضریب اصطکاک استریکلر ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ استفاده شده است و هر ۳ اجرا با داده‌های اندازه‌گیری جهت صحت‌سنجی مقایسه شد و میزان خطای هر کدام با معیار جذر میانگین مربعات خطا RMSE محاسبه گردید. سپس نتایج برای شرایط مختلف اصطکاک با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

با توجه به پایش و مطالعات سواحل ایران (۱۳۹۰)، نتایج نمونه‌های رسوب در شرق بندر تا حدود ۰/۰۲ میلیمتر یافت می‌شود، ولی در بخش غربی بندر نمونه‌های رسوب درشت‌تر از بخش شرقی هستند. همچنین نمونه‌های رسوب بندر از دهانه بندر و نیز داخل حوضچه بندر ریزدانه بوده و دارای قطر ۰/۰۱ میلی‌متر است. شکل (۴)، موقعیت نمونه‌برداری‌های تکمیلی از داخل کانال دسترسی بندر شهید رجایی را نشان می‌دهد.

طور سنتی برای رسوبات غیرچسبیده اتخاذ می‌شود) و حضور کلاس‌های مختلف رسوبات ریز می‌شود. البته در مدل گایا، مقدار هر طبقه رسوب در بستر با استفاده از جرم خشک به جای حجم ارزیابی رابطه (۷)

که غلظت عمق متوسط $C = C(x, y, t)$ برحسب گرم بر لیتر بیان می‌شود، مقادیر U, V مولفه‌های سرعت عمق متوسط در جهت x, y و همچنین مقادیر E, D به ترتیب شار فرسایش و رسوب‌گذاری هستند. همچنین عدد اشمیت و برابر یک پیشنهاد شده است.

در گایا شارهای بستر بر حسب نرخ انتقال جرم (خشک) در واحد عرض، بدون تخلخل محاسبه می‌شود. محاسبه عددی شار رسوب بر

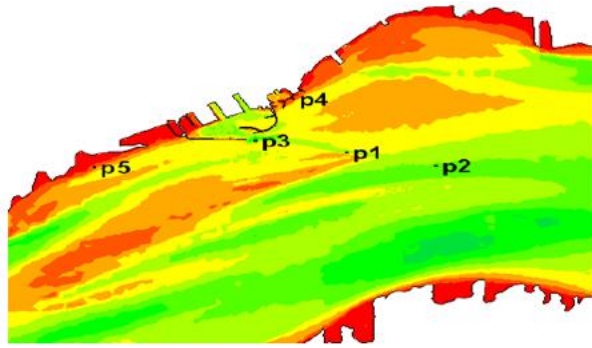
رابطه (۸)

در بالا، Q_b نرخ انتقال بار بستر بر واحد عرض است که به عنوان تابعی از ظرفیت انتقال رسوب محاسبه می‌شود و α زاویه بین بردار انتقال رسوب و جهت پایین دست (محور X) است. انحراف جهت بار بستر از جهت جریان عمده‌تاً تحت تأثیر شیب بستر و وجود جریان‌های

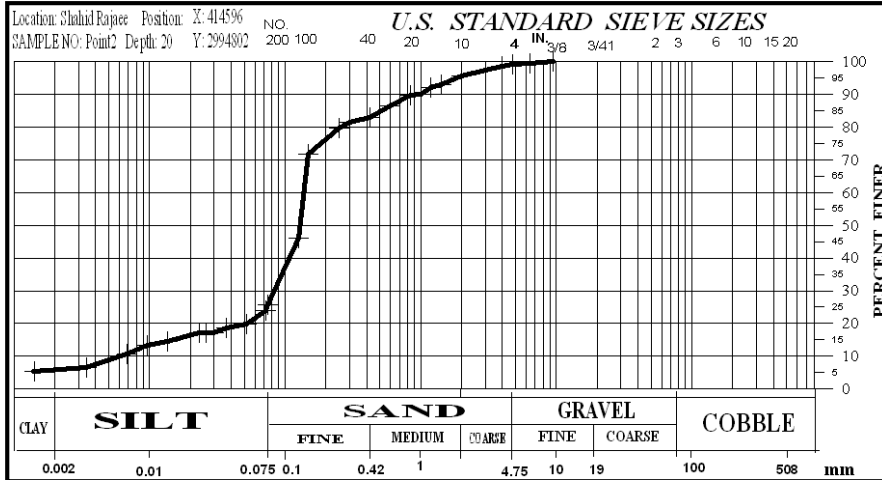
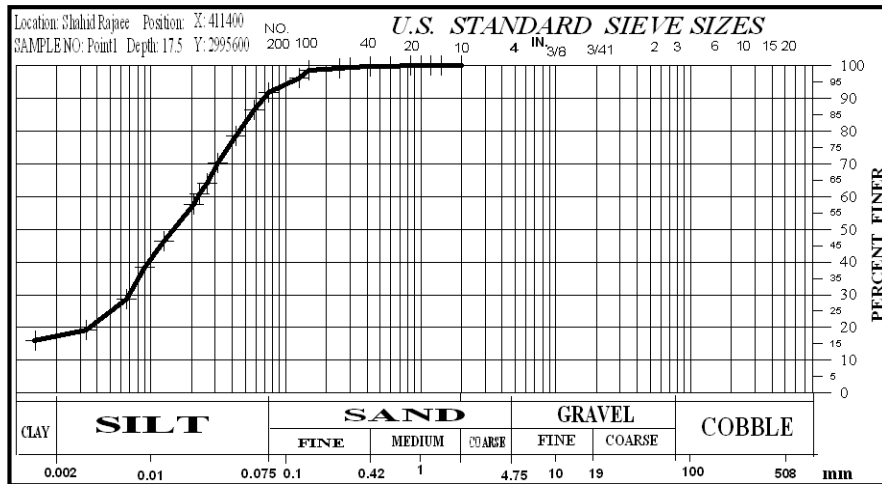
رابطه (۹)

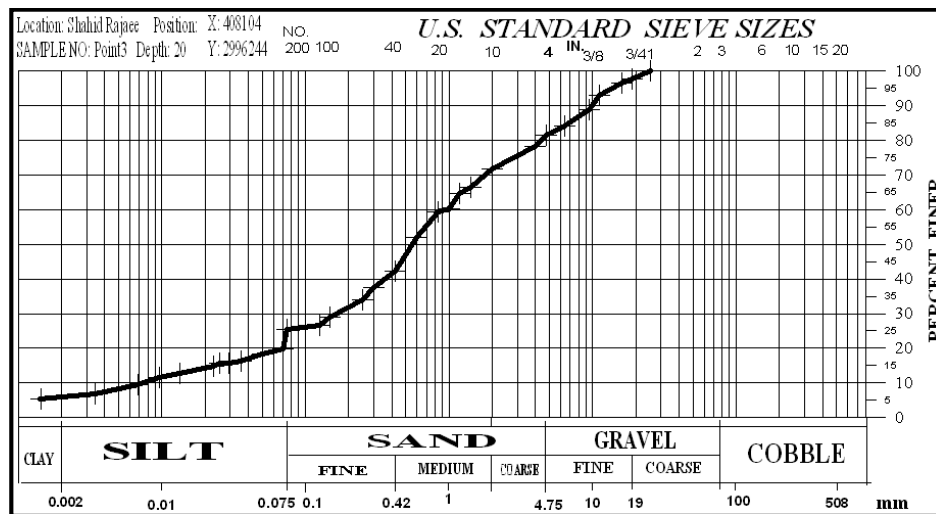
برای اطلاعات مرزی مدل، از اجرای یک مدل کالیبره شده مایک ۲۱ توسط شرکت سازه‌پردازی ایران استفاده شد و فرض می‌شود این اطلاعات تراز آب را در محل مرزها به درستی تخمین می‌زنند. همچنین برای شبیه‌سازی باد، اطلاعات از ERA5 گرفته شد که فرض می‌شود دارای دقت کافی است و از اثر فشار هوا نیز صرف‌نظر گردید. مدل برای دو هفته اجرا شده است و با توجه به وضعیت جزرومدی حاکم بر منطقه، فرض می‌شود این دوهفته نماینده مناسبی از عملکرد منطقه در کل سال است. پس از ساخت شبکه محاسباتی منطقه مورد مطالعه، این شبکه با فایل عمق‌سنجی هم‌پوشانی شد. شبکه محاسباتی شامل ۲۱۶۴۰ گره و ۴۲۱۱۶ المان است که در شکل (۴) نمایش داده شده است. شرایط مرزی به صورت تعیین تراز آب انتخاب شد. به این منظور از تاریخ ۲۰۰۹/۱۰/۲۲ تا ۲۰۱۰/۱/۱۸ با گام زمانی ۴ ثانیه توسط مدل کالیبره شده مایک اجرا شد.

برای دقت بیشتر، داده‌های ارتفاعی در مرزها به صورت گره به گره اعمال شد. به همین منظور از سه فایل فرترن (read_fic_frlq.f, sl.f, bord.f) برای خواندن داده‌ها توسط مدل، به صورت گره به گره استفاده شد. لازم به ذکر است در این فایل‌ها باید توسط کاربر مدل، تغییرات لازم به زبان فرترن اعمال شود



شکل ۴- نقاط اندازه‌گیری
Fig. 4- Measurement points





شکل ۵- نتایج دانه بندی در سه ایستگاه کانال دسترسی بندر شهید رجایی

Fig.5- Grading curve in 3 stations of Shahid Rajaei port access channel

اطلاعات باد براساس پایگاه اطلاعات داده ECMWF، است. به دلیل سرعت باد کم در منطقه معمولاً از تاثیر آن در مدل سازی‌های قبلی منطقه صرف نظر شده است. برای تاثیر باد در مدل از ۲ فایل فرترن استفاده شد. سرعت باد در کانال خوران از ۰/۲۲ تا ۵/۳۳ متر بر ثانیه متغیر است و انتظار نمی‌رود باد تغییرات محسوسی در جریانات منطقه ایجاد نماید.

برای کالیبراسیون تراز سطح آب از داده‌های اندازه‌گیری پایش سواحل هرمزگان (۱۳۹۰) استفاده شده است که نتایج آن در ادامه ارائه شده است. همانطور که در جدول (۱) قابل مشاهده است، برای کالیبره کردن مدل و صحت سنجی تراز سطح آب از دو ایستگاه شهید رجایی و پل استفاده شد. مقادیر برای هر سه ضریب اصطکاک بسیار نزدیک به هم هستند. همچنین مقادیر نزدیک به شرایط ایده‌آل بوده و عملکرد مدل خوب ارزیابی می‌شود.

شکل (۵) نیز نتایج دانه‌بندی را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج نمودارها، دانه‌بندی کانال خوران ریزدانه بوده و باتوجه به ریزدانه بودن رسوب داخل کانال دسترسی، به کارگیری مدل رسوب دوبعدی مناسب این منطقه است (Shanehsazzadeh and Ardalan, 2019). به همین منظور مدلسازی رسوب و تکامل بستر، مدل گایا به صورت کوپل شده با telemac-2d اجرا گردید.

طبق این نتایج از قطر ۰/۰۰۰۰۲ متر در فایل فرمان گایا استفاده شد. همچنین نوع کلاس رسوب چسبنده انتخاب شد. همانطور که در گزارش پایش و مطالعات سواحل ایران (۱۳۹۰) بیان شده است، پس از انجام آنالیزهای حساسیت مختلف، ضرایب معرفی شده است که با توجه به آن چگالی لایه بستر در مدل تلمک ۱۶۵۰ کیلو گرم بر متر مکعب و سرعت سقوط ۰/۰۱۳۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین تنش برشی آستانه فرسایش ۰/۳ نیوتن بر متر مربع و تنش برشی آستانه رسوب‌گذاری ۰/۱۵ نیوتن بر متر مربع انتخاب شد.

جدول ۱- مقادیر معیار محاسبه شده برای ایستگاه اندازه‌گیری تراز آب

Table 1- Calculated statistics for in situ water level stations

| | Stickler30 | | Stickler40 | | Stickler50 | |
|---------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| Station | Rajaei | Pohl | Rajaei | Pohl | Rajaei | Pohl |
| RMSE(m) | 0.3549 | 0.4631 | 0.3493 | 0.5569 | 0.3413 | 0.5569 |

۳- نتایج

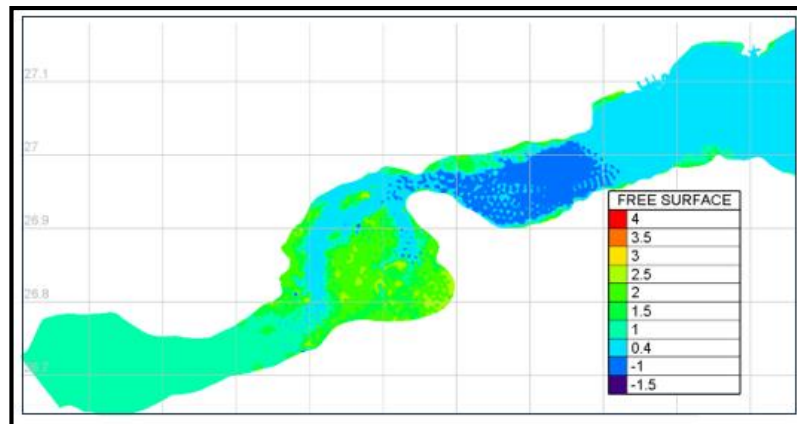
شکل (۶)، تراز سطح آب را که توسط مدل تلمک شبیه‌سازی شده است در تاریخ ۲۰۰۹/۱۱/۲۳ نشان می‌دهد. در این لحظه مشخص است که به دلیل کم‌عمق بودن مناطق جنگل حرا، مقاومت در برابر جریان متفاوت از اطراف بوده و سبب ایجاد تفاوت در تراز آب می‌کند طبق نتایج به دست آمده از مدل، حداکثر مقدار سرعت در کانال خوران حدود ۲ متر بر ثانیه پیش‌بینی شده است که سرعت زیادی در خلیج فارس محسوب می‌شود. لازم به ذکر است مطالعه میدانی khosravi et al. (2018) و نیز مطالعات شبیه‌سازی Mahmoudiev et al. (2011) این تخمین از سرعت‌ها را تایید می‌کند.

برای صحت‌سنجی سرعت، از دو ایستگاه رجایی و درگهان استفاده شده است. مقادیر سرعت نیز برای سه ضریب اصطکاک یاد شده به دست آمد. جدول (۲) خطای میانگین مربعات را در دو ایستگاه و سه ضریب اصطکاک برای سرعت کل نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشخص شده، در ایستگاه شهید رجایی بیشترین تشابه با داده‌های اندازه‌گیری مربوط به ضریب اصطکاک استریکلر ۵۰ بوده و در ایستگاه درگهان بیشترین تشابه مربوط به ضریب اصطکاک استریکلر ۳۰ است.

با توجه به این که تمرکز این پژوهش در محدوده بندر رجایی انجام می‌شود، عدد استریکلر ۵۰ برای کلیه شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده شده است.

جدول ۲- مقادیر معیار محاسبه شده برای ایستگاه اندازه‌گیری سرعت
Table 2- Calculated statistics for in situ water velocity stations

| Station | Stickler30 | | Stickler40 | | Stickler50 | |
|---------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | Rajaei | Pohl | Rajaei | Pohl | Rajaei | Pohl |
| RMSE(m) | 0.1545 | 0.1678 | 0.2766 | 0.3049 | 0.1241 | 0.3374 |



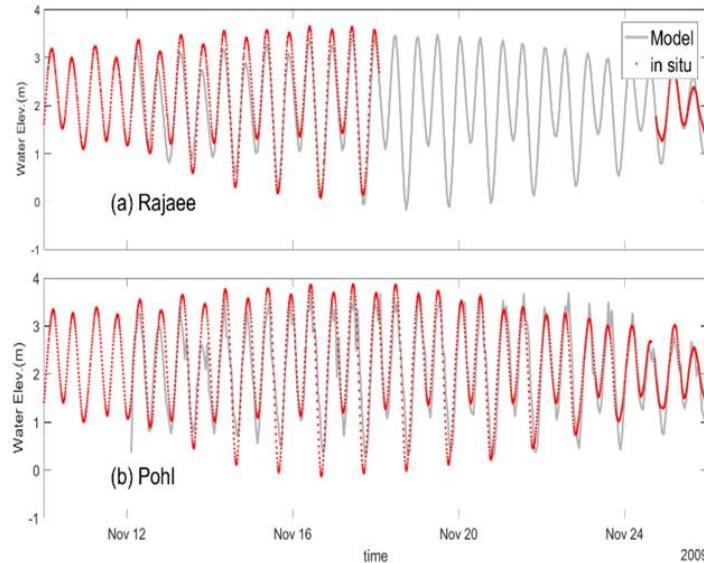
شکل ۶- تراز سطح آب مدل شده
Fig. 6- Simulated water level

سری زمانی تراز آب در ایستگاه‌های شهید رجایی و پل در شکل (۷) نمایش داده شده است. مدل به خوبی تراز آب و نیز فاز را در دو ایستگاه برای این دو هفته شبیه‌سازی کرده است. لازم به ذکر است افزایش محدوده تغییر تراز آب در مه‌کشد نسبت به که‌کشد به خوبی قابل ملاحظه است. همچنین مقایسه سرعت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه رجایی و درگهان در شکل (۸) نشان

شکل (۷) و (۸)، نشان دهنده مقایسه داده‌های اندازه‌گیری با نتایج مدل به صورت سری زمانی است. همانطور که از اشکال قابل تشخیص است، مدل به خوبی توانسته است مقادیر تراز سطح آب را ایجاد کند. در هر صورت خطای استفاده از عدد ۳۰ به عنوان استریکلر اندکی بیش از ۴۰ و ۵۰ بوده است.

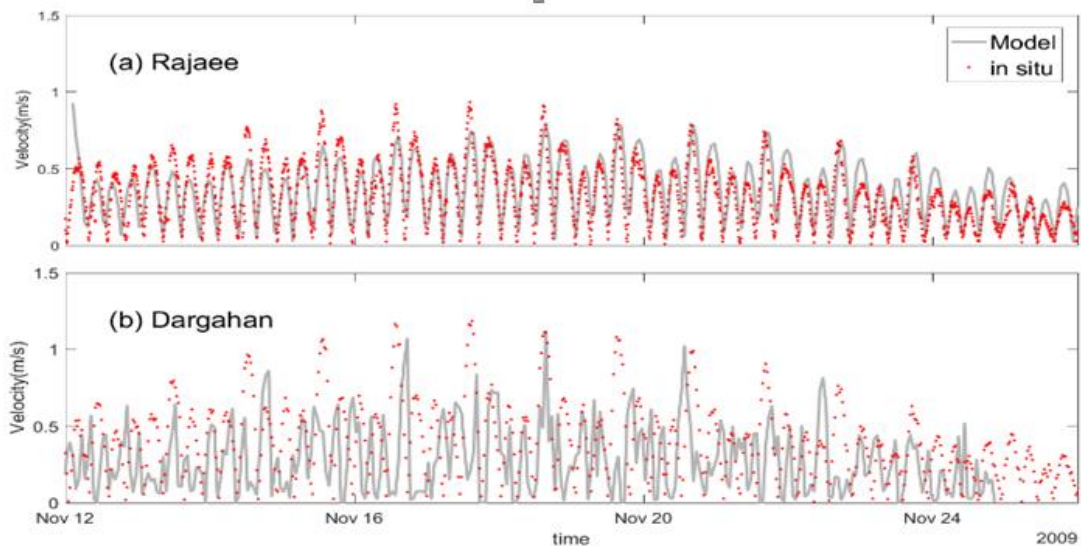
از نتایج دیگر می‌توان به اختلاف فاز تراز سطح آب و سرعت نیز اشاره کرد. به همین منظور دو ایستگاه شهید رجایی و پل انتخاب شد. سرعت و تراز سطح آب در هر کدام از ایستگاه‌ها برای ۲۹ ساعت در انتهای شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

می‌دهد که مدل به صورت نسبی توانسته است روند کلی تغییرات را به خوبی شبیه‌سازی نماید.



شکل ۷- مقایسه تراز سطح آب به دست آمده از مدل با نتایج اندازه‌گیری در بندر شهید رجایی و پل

Fig.7- Comparison of the sea water level from the model with the measurement results at (a) Rejaee and (b) Pohl stations

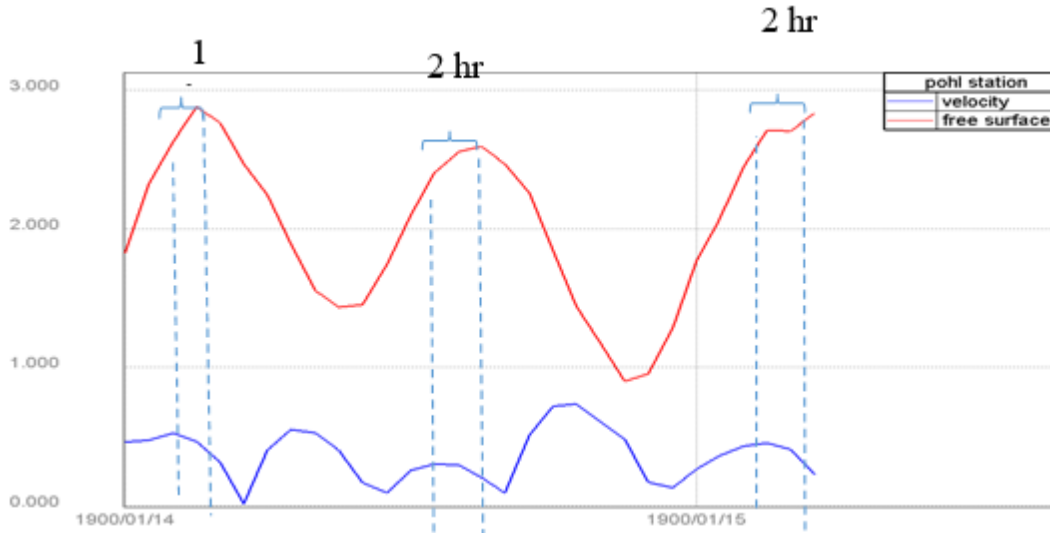


شکل ۸- مقایسه سرعت به دست آمده از مدل با نتایج اندازه‌گیری در دو ایستگاه رجایی و درگهان

Fig.8- Comparison of the current velocity from the model with the measurement results at (a) Rejaee and (b) Dargahan stations

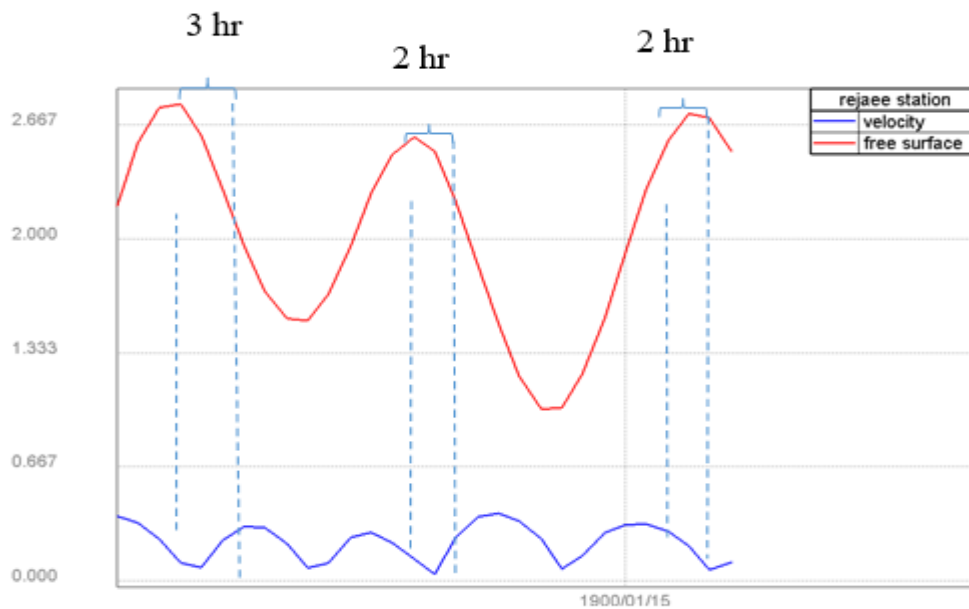
۳ نقطه اوج، اختلاف تراز سطح آب و سرعت در همه نقاط دوم و سوم برابر ۲ ساعت و در نقطه اول برابر با ۱ ساعت است. همانطور که از شکل مشخص است، امواج از نوع پیشرونده هستند.

همانطور که از اشکال (۹) و (۱۰) مشخص است، در ایستگاه شهید رجایی در ۳ نقطه اوج تراز سطح آب با سرعت مقایسه شده است. اختلاف تراز در ایستگاه شهید رجایی در نقطه اول برابر ۳ ساعت است و در نقاط دوم و سوم ۲ ساعت است. همچنین در ایستگاه پل در



شکل ۹- تراز آب (متر) و سرعت (متر بر ثانیه) برای ۲۹ ساعت در ایستگاه پل

Fig.9- Water level and velocity for 29 hours at the Pohl station



شکل ۱۰- تراز آب (متر) و سرعت (متر بر ثانیه) برای ۲۹ ساعت در ایستگاه رجایی

Fig.10- Water level and velocity for 29 hours at Rejaee station

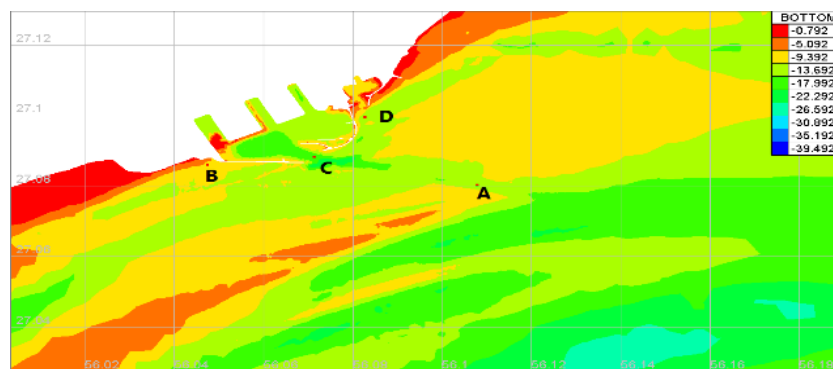
مختلف اجرا گردید. این شرایط در جدول (۳) نمایش داده شده است. به همین منظور ۴ ناحیه از کانال خوران در محدوده بندر شهید رجایی شامل محدوده کانال (A)، داخل بندر (C)، سمت راست بندر (D) و همچنین سمت چپ بندر (B) مطابق با شکل (۱۱) انتخاب شد و مقادیر تغییرات بستر در ۱۲ اجرا با یکدیگر مقایسه شدند.

شبیه‌سازی مورفولوژی کانال خوران و همچنین بندر شهید رجایی با استفاده از نرم افزار گایا از مجموعه سامانه تلمک انجام شد. در این شبیه‌سازی زیربرنامه گایا به صورت کوپل شده با زیربرنامه تلمک دوبعدی به مدت ۱۴ روز اجرا گردید. به همین منظور از فایل هیدرودینامیک، به عنوان فایل فرمان تلمک دو بعدی استفاده شد. به منظور بررسی پارامتر تغییرات بستر، مدل ۱۲ بار با ضرایب کالیبراسیونی

جدول ۳- پارامترهای مختلف در اجراهای مختلف مدل انتقال رسوب در محدوده بندر شهید رجایی

Table 3- Different scenarios for parameters of the sediment model for the Shahid Rajaei Port area

| Run No | Critical Shear stress for Deposition(pa) | Critical Shear stress for erosion(pa) | Mud concentration (g/l) | Initial thickness (m) | Fall velocity (m/s) | Sediment density (kg/m ³) |
|--------|--|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |
| 2 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.035 | 0.00139 | 2200 |
| 3 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.035 | 0.00139 | 1200 |
| 4 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.035 | 0.0008 | 1650 |
| 5 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.035 | 0.004 | 1650 |
| 6 | 0.15 | 0.3 | 60 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |
| 7 | 0.15 | 0.3 | 10 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |
| 8 | 0.25 | 0.45 | 30 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |
| 9 | 0.3 | 0.6 | 30 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |
| 10 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.01 | 0.00139 | 1650 |
| 11 | 0.15 | 0.3 | 30 | 0.06 | 0.00139 | 1650 |
| 12 | 0.15 | 0.3 | 100 | 0.035 | 0.00139 | 1650 |



شکل ۱۱- نواحی بررسی تغییرات بستر

Fig.11- Areas of investigation of bed changes

در ۱۲ اجرا، مشابه بخش‌های لایروبی شده در قسمت قبلی به دست آمد. باتوجه به اطلاعات لایروبی و هیدروگرافی از کانال دسترسی در سال‌های متوالی که از سازمان بنادر و کشتی‌رانی ارائه شده است، Shanehsazzadeh و Ardalan (2019). نشان دادند الگوی رسوب و مقدار آن برای یک سال ۱/۵۶ متر و حرکت رسوبات از سمت

برطبق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل که در جدول (۴) نشان داده شده، در کانال دسترسی به طور میانگین میزان تغییرات بستر ۱۰ سانتی‌متر خواهد بود. همچنین در قسمت دهانه ورودی بندر ۳ سانتی‌متر و در قسمت‌های چپ و راست بندر تغییرات بستر به ترتیب برابر ۸ و ۵ سانتی‌متر خواهد بود. الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش نیز

دسترسی در محدوده مرکزی و شرقی تنگه خوران بیشتر است که این موضوع با اطلاعات لایروبی و هیدروگرافی مطابقت دارد. لایروبی و هیدروگرافی بیان شد، مقدار رسوب در حوضچه شرقی بندر شهید رجایی ۴۰ سانتی‌متر و در حوضچه شماره ۱ مقدار آن برابر با حداقل ۳۰ سانتی‌متر است. همچنین در محدوده نیمه غربی بندر مقدار رسوب سالیانه حداقل ۲۰ سانتی‌متر و در دهانه ورودی بندر رسوب‌گذاری قابل توجهی است که حداقل مقدار آن ۹ سانتی‌متر خواهد بود.

شرق کانال خوران است. همچنین براساس این اطلاعات، در بخش میانی کانال دسترسی بیشتر در جناح غربی کانال، رسوب‌گذاری قابل توجهی مشخص است. همانطور که از جدول (۴)، مشخص است بیشترین شباهت را اجرای شماره ۶ دارد به طوری که میزان رسوب‌گذاری به مدت ۱۴ روز ۴ سانتی‌متر به دست آمد. باتوجه به اینکه با گذشت زمان مقدار رسوب‌گذاری کاهش پیدا می‌کند از این رو مقادیر اجرای ششم برای این مدت قابل قبول است. همچنین الگوی بدست آمده از کانال دسترسی نشان می‌دهد که فعالیت رسوبی در کانال

جدول ۴- تغییرات بستر در اجراهای مختلف مدل انتقال رسوب در محدوده بندر شهید رجایی

Table 4- Bed level changes in different simulation scenarios of the sediment model for the Shahid Rajaei Port area

| Run No. | Point A(cm) | Point B(cm) | Point C(cm) | Point D(cm) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 10 | 5 | 4 | 4 |
| 2 | 11 | 8 | 5 | 8 |
| 3 | 14 | 9 | 5 | 7 |
| 4 | 8 | 9 | 3 | 8 |
| 5 | 20 | 8 | 5 | 7 |
| 6 | 10 | 5 | 3 | 8 |
| 7 | 5 | 10 | 8 | 8 |
| 8 | 10 | 4 | 1 | 4 |
| 9 | 5 | 4 | 1 | 3 |
| 10 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| 11 | 15 | 10 | 5 | 12 |
| 12 | 4 | 4 | 2 | 6 |

تراز سطح آب مدل شده توسط تلمک، نشان می‌دهد بیشینه تراز سطح آب تا ۴ متر به صورت موضعی رخ می‌دهد. برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل از دو ایستگاه شهید رجایی و پل استفاده گردید. تراز سطح آب مدل شده با سه مقدار اصطکاک مختلف با اندازه‌گیری متناظر مقایسه و مقدار بهینه تعیین گردید. همچنین مقادیر پارامترهای آماری مورد استفاده نشان از عملکرد مدل خوب مدل داشته است. سرعت مدل شده توسط تلمک، حداکثر مقدار سرعت در کانال خوران کمتر از ۲ متر بر ثانیه را پیش‌بینی می‌کند که با توجه به مطالعات قبلی عددی و اندازه‌گیری، به نظر می‌رسد مقادیری واقع‌گرایانه باشد. برای کالیبراسیون و سنجش درستی از مقادیر اندازه‌گیری شده دو ایستگاه شهید رجایی و درگهان استفاده شد. ضریب اصطکاک استریکلر ۳۰، دارای کمترین خطا بین دو ضریب اصطکاک دیگر بوده است. در ایستگاه شهید رجایی بیشترین تشابه با داده‌های اندازه‌گیری مربوط به ضریب اصطکاک استریکلر ۵۰ بوده و در ایستگاه درگهان بیشترین تشابه مربوط به ضریب اصطکاک استریکلر ۳۰ بود. سرعت باد در مدت

در مجموع از نتایج بالا می‌توان گفت با توجه به عدم وجود اطلاعات کامل از لایروبی‌های انجام شده در حوضچه بندر، برآورد نرخ دقیق رسوب‌گذاری در حوضچه بندر امکان‌پذیر نیست، هیدروگرافی از بندر شهید رجایی، الگو و مقدار رسوب‌گذاری در نواحی مختلف بندر متفاوت است. با توجه بررسی‌های صورت گرفته می‌توان بیان کرد، حداقل رسوب‌گذاری سالیانه در حوضچه بندر شهید رجایی در حدود ۹ سانتی‌متر خواهد بود. باتوجه به بخش قبلی، نتایج حاصل از اجرای ششم، در حوضچه بندر شهید رجایی بدین صورت است که مقدار رسوب‌گذاری در حوضچه شرقی بندر حداقل ۸ سانتی‌متر است. همچنین مقدار رسوب در بخش غربی بندر برابر با حداقل ۵ سانتی‌متر است و در دهانه ورودی بندر مقدار رسوب‌گذاری برابر با حداقل ۳ سانتی‌متر است که با توجه به اعداد و الگوی رسوب در بخش لایروبی و هیدروگرافی بندر، این مقادیر برای مدت ۱۴ روز قابل قبول است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۱۰ سانتی‌متر است. این مقدار با توجه به اطلاعات لایروبی قابل قبول است. بر اساس این نتایج فعالیت رسوبی کانال دسترسی در محدوده مرکزی و شرقی تنگه خوران و در محدوده غربی بندر شهید رجایی بیش‌تر است. مقدار رسوب در حوضچه شرقی بندر شهید رجایی ۴۰ سانتی‌متر و در حوضچه شماره ۱ مقدار آن برابر با حداقل ۳۰ سانتی‌متر است. همچنین در محدوده نیمه غربی بندر مقدار رسوب سالیانه حداقل ۲۰ سانتی‌متر و در دهانه ورودی بندر رسوب‌گذاری قابل توجهی است که حداقل مقدار آن ۹ سانتی‌متر خواهد بود. نتایج حاصل از مدل در حوضچه بندر شهید رجایی بدین صورت است که مقدار رسوب‌گذاری در حوضچه شرقی بندر حداقل ۵ سانتی‌متر است. همچنین مقدار رسوب در بخش غربی بندر برابر با حداقل ۴ سانتی‌متر و در دهانه ورودی بندر مقدار رسوب‌گذاری برابر با حداقل ۱ سانتی‌متر است. با توجه به اعداد و الگوی رسوب در بخش لایروبی و هیدروگرافی بندر، این مقادیر برای مدت ۱۴ روز قابل قبول است.

شبیه‌سازی شده توسط مدل، در کانال خوران از ۰/۲۲ تا ۵/۳۳ متر بر ثانیه متغیر است که نشان از سرعت کم در این منطقه است. برای بررسی اختلاف فاز تراز سطح آب و سرعت از دو ایستگاه رجایی و پل برای ۲۹ ساعت انتهایی مدل استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد امواج از نوع پیش‌رونده هستند.

به تحلیل اطلاعات لایروبی بندر شهید رجایی و کانال دسترسی پرداخته شد که شامل ۲ بخش حجم ناخالص لایروبی و اطلاعات هیدروگرافی است. با توجه به این اطلاعات الگو و مقدار رسوب‌گذاری مشخص شد. بیشترین مقدار رسوب در طی ۱ سال در کانال دسترسی ۱۵۶ سانتی‌متر خواهد بود. به منظور بررسی تغییرات بستر مدل شده توسط تلمک ۱۲ اجرا با ضرایب مختلف از جمله چگالی، غلظت، سرعت سقوط و تنش بحرانی فرسایش و رسوب‌گذاری انجام شد. برطبق نتایج اجرای اصلی، میزان تغییرات بستر در کانال دسترسی در طی ۱۴ روز،

References:

- Angeloudis, A., Falconer, R., Bray, S., and Ahmadian, R., 2016. Representation and operation of tidal energy impoundments in a coastal hydrodynamic model. *Renewable Energy*, 99, pp.1103–1115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.004>.
- Brand, M., Guo, L., Stein, E. D. and Sanders, B. F., 2021. Multi-decadal simulation of estuarine sedimentation under sea level rise with a response-surface surrogate model. *Advances in Water Resources*, 150, pp.103–876. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103876> Get rights and content.
- Cialone, M.A., 1991. Coastal modeling system (CMS) user's manual.
- Dashti, T., Ashtari Larki, M. and Mohammadi, F., 2019. Investigation of the impact of tidal effects on the sedimentation process on the dock of number 38 Bandar Imam Khomeini. *Journal of Environmental Sciences Studies*, 4(3), pp.1832-1841. (In Persian).
- Davidson, M.A., Lewis, R.P. and Turner, I.L., 2010. Forecasting seasonal to multi-year shoreline change. *Coastal Engineering*, 57, pp.620-629, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.001>.
- Dronkers, J., 2005. *Dynamics of coastal systems*, volume 25. World Scientific.
- Dyer, K.R., 1977. *Estuaries: A Physical Introduction*, Wiley, London, 140 pp.
- Etemad-Shahidi, A., Shahkolahi, A., and Liu, W., 2010. Modeling of hydrodynamics and cohesive sediment processes in an estuarine system: Study case in Danshui River. *Environmental Modeling & Assessment*, 15, pp.261–271. <https://doi.org/10.1007/s10666-009-9203-9>.
- Fairley, I., Masters, I., and Karunarathna, H., 2015. The cumulative impact of tidal stream turbine arrays on sediment transport in the Pentland Firth. *Renewable Energy*, 80, pp.755–769. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.004>.
- Feng, Z., Tan, G., Xia, J., Shu, C., Chen, P., and Yi, R., 2019. Two-dimensional numerical simulation of sediment transport using improved critical shear stress methods. *International Journal of Sediment Research*, 35, pp.15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.10.003>.
- GAIA"USER MANUAL" VERSION V8P3, 2021.
- Giardino, A., Ibrahim, I., Adam, S., Toorman, E., and Monbaliu, J., 2009. Hydrodynamics and cohesive sediment transport in the Ijzer estuary, Belgium: Case study. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 135, pp.176–184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2009\)135:4\(176\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2009)135:4(176)).
- Gourgue, O., Baeyens, W., Chen, M., De Brauwere, A., De Brye, B., Deleersnijder, E., Elskens, M.,

- and Legat, V., 2013. A depth-averaged two-dimensional sediment transport model for environmental studies in the Scheldt estuary and tidal river network. *Journal of Marine Systems*, 128, pp.27–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.03.014>.
- Gourgue, O., van Belzen, J., Schwarz, C., Vandenbruwaene, W., Vanlede, J., Belliard, J.-P., Fagherazzi, S., Bouma, T. J., van de Koppel, J., and Temmerman, S., 2022. Biogeomorphic modeling to assess resilience of tidal marsh restoration to sea level rise and sediment supply. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2021, pp.1–38. <https://doi.org/10.5194/esurf-10-531-2022>.
- Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., Khojasteh Pour Fard, I., Lemoine, J.-P., Dumas, F., and Garnier, V., 2018. Suspended sediment dynamics in the macrotidal Seine estuary (France): 1. Numerical modeling of turbidity maximum dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, pp.558–577. <https://doi.org/10.1002/2017JCO13185>.
- Hesse, R., Zorndt, A., and Fröhle, P., 2019. Modelling dynamics of the estuarine turbidity maximum and local net deposition. *Ocean Dynamics*, 69, pp.489–507. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01250-w>.
- Julien, P.Y., 2010. Erosion and sedimentation. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806049>
- Khosravi, M., Siadat Mousavi, S.M., Chegini, V., and Vennell, R., 2018. Across-channel distribution of the mean and tidal flows in the Khuran Channel, Persian Gulf, Iran. *International Journal of Maritime Technology*, 10, pp.1-6. <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.1>
- Kuijper, C., Christiansen, H., Cornelisse, J. M. and Winterwerp, J. C., 2005. Reducing harbor siltation. II: Case study of Parkhafen in Hamburg. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 131(6), pp 267-276. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:6\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(267)).
- Luo, J., Li, M., Sun, Z., and O'Connor, B., 2013. Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region. *Marine Geology*, 342, pp.14–27. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.06.004>.
- Mahmoudov, M., V. Chegini, and M. Montazeri Namin, 2011. Three-dimensional simulation of qeshm channel currents, *Journal of The Persian Gulf*, 2 (3), pp 1-8.
- MIKE21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM HYDRODYNAMIC AND TRANSPORT MODULE 2017. Available at: www.mikepoweeredbydhi.com was first indexed by Google in February 2015.
- Nnafie, A., Van Oyen, T., De Maerschalck, B., Van der Vegt, M., and Van der Wegen, M., 2018. Estuarine channel evolution in response to closure of secondary basins: An observational and morphodynamic modeling study of the Western Scheldt Estuary. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, pp.167–186. <https://doi.org/10.1002/2017JF004364>.
- Orseau, S., Huybrechts, N., Tassi, P., Pham Van Bang, D., and Klein, F., 2020. Two-dimensional modeling of fine sediment transport with mixed sediment and consolidation: Application to the Gironde estuary, France. *International Journal of Sediment Research*, 36(6), pp.736-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.005>
- Report on sedimentation and morphology studies of special points (Shahid Rajaei Port). (In Persian).
- Santoro, P., Fossati, M., Tassi, P., Huybrechts, N., Pham Van Bang, D., and Piedra-Cueva, J., 2017. A coupled wave-current-sediment transport model for an estuarine system: Application to the Río De La Plata and Montevideo Bay. *Applied Mathematical Modelling*, 52, pp.107–130. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.07.004>
- Shanehsazzadeh, A. and Ardalan, H., 2019. Regional-scale study on sediment processes of Khuran Strait at Persian Gulf with implications for engineering design. *China Ocean Engineering*, 33, pp.356-364. <https://doi.org/10.1007/s13344-019-0034-4>.
- Sharaan, M., Ibrahim, M.G., Iskander, M., Masria, A. and Nadaoka, K., 2018. Analysis of sedimentation at the fishing harbor entrance: Case study of El-Burullus, Egypt. *Journal of Coastal Conservation*, 22(6), pp.1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0624-y>.

- Sinha, P., Guliani, P., Jena, G., Rao, A., Dube, S., Chatterjee, A.K. and Murty, T., 2004. A breadth averaged numerical model for suspended sediment transport in Hooghly Estuary, East coast of India. *Natural Hazards*, 32, pp.:239–255. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000031316.67393.23>.
- Sjoerd D.G., 2018. Suspended Sediment Modelling in the Port of Rotterdam.2108, Master's Thesis, *Delft University of Technology*.
- Song, D. and Wang, X.H., 2013. Suspended sediment transport in the Deepwater Navigation Channel, Yangtze River Estuary, China, in the dry season 2009: 2. Numerical simulations, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, pp.5568–5590. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20411>.
- TELEMAC-2D"USER MANUAL" VERSION V8P3, 2021.
- Van, L. A., 2012. Numerical modelling of sand-mud mixtures settling and transport processes: application to morphodynamic of the Gironde estuary (France). PhD thesis, *Université Paris-Est*.
- Wu, Y., Xu, C., Ke, Y., Chen, K. and Xu, H. 2017. Multi-criteria decision-making on assessment of proposed tidal barrage schemes in terms of environmental impacts. *Marine Pollution Bulletin*, 125, pp.271–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.030>.