

Evaluation of The Effects of Anzali Port Development on Sedimentation at Anzali Wetland Using Numerical Simulations

Hasan Heidarneshad¹, Seyed Peyman Badiei^{2*}

1-Msc. School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

2-Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

* pbadie@ut.ac.ir

Received: 26 April 2025

Accepted: 16 May 2025

Discussion: 21 March 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Coastal wetlands, such as the Anzali Wetland in Iran, are ecologically sensitive areas that play crucial roles in environmental health, climate regulation, and biodiversity conservation. However, human activities and climate change threaten these ecosystems, leading to habitat loss and reduced ecological services. The Anzali Wetland, designated as a Ramsar Site, faces challenges like sedimentation and overgrowth of invasive species. Understanding hydrodynamic and morphodynamic characteristics in these areas are vital for effective environmental management. Numerical models offer valuable tools for simulating water flow, sediment dynamics, and morphological changes in coastal wetlands. Previous studies have focused specifically and individually on the Port or Wetland, but to the knowledge of Authors, none have addressed the entire wetland-port system. This study aims to fill this gap by incorporating newly acquired field data to enhance the accuracy of simulations and exploring the effects of port development on wetland sedimentation.

Methodology: In this study, numerical simulations were conducted using Delft3D software to analyze the flow patterns and sediment exchange in the Anzali Wetland-Port (AWP) system. The simulations utilized the two-dimensional coupled flow, sediment, and morphology modules in the curvilinear version of Delft3D. The computational domain consisted of nine subdomains with 10,963 elements and 17,531 nodes, with a higher resolution grid in the northern port channel where calibration data were available.

The model was calibrated for the period of October 31 to December 11, 2019, using measured data on daily water and sediment discharge into the system. The hydrodynamic module was calibrated by adjusting the bed roughness and turbulence viscosity coefficients, with results showing good agreement with measured velocities, especially during flood periods. For the morphology module, sediment transport parameters were calibrated based on sediment concentration and erosion/sedimentation patterns observed during the same period. The model predicted 45,000 m³ of sedimentation, which closely matched the measured 49,000 m³.

Simulations were validated against measured bed level changes, showing good agreement during the calibration period. The calibrated model was applied to evaluate the impact of port development on wetland sedimentation. The results highlight the natural sediment flushing during floods, which may help reduce sediment accumulation at the piers, and provide insights into managing sediment transport in the AWP system.

Results and Discussion: The calibrated Delft3D model was applied to assess two key issues: the sediment balance of the Anzali Wetland-Port (AWP) system and the impact of port development on wetland sedimentation dynamics.

1. Sediment Balance of the AWP System

Simulation results reveal that the AWP system is experiencing critical sedimentation, especially within the Wetland's floodplains. Analysis of sediment transport from incoming rivers showed a total annual inflow of approximately 661,000 m³ of sediment. Of this, 286,000 m³ is transported from the Wetland to the Port, and 237,000 m³ eventually reaches the sea. This implies a net annual sedimentation of 375,000 m³ (57%) within the Wetland and 49,000 m³ (7%) within the Port, while the remaining 36% is flushed out to the sea. The spatial pattern of sedimentation suggests that the Wetland acts as a sediment trap, with most deposition occurring in broader floodplain areas, while localized erosion is observed at the Wetland-Port boundary and within the Port itself.

2. Impact of Port Development on Sedimentation

To evaluate the influence of recent Port development, especially the construction of the western breakwater, a scenario with modified geometry, facilitating flood outflow into the sea, was simulated. The new configuration involved shortening the breakwater and closing the west wing of the eastern basin to form a more direct outflow channel. The simulated results of this scenario were compared to current conditions. The results indicate that while the modification does not significantly change sedimentation within the Anzali Wetland, it substantially reduces sedimentation within the Port area—by nearly 90%. This suggests that these modifications in port layout can significantly improve sediment management and reduce dredging needs.

Conclusion: A depth-averaged coupled hydrodynamic and sediment transport model was developed and validated for the AWP system using Delft3D. The model reliably simulates flow and sediment dynamics, with sediment transport being highly sensitive to physical parameters and primarily driven by flood events. Results indicate that approximately 57% of riverine sediments deposit in the Wetland, 7% in the Port, and 36% are discharged into the sea. While port geometry modifications do not impact Wetland sedimentation, they can reduce Port sedimentation by up to 90%, highlighting the effectiveness of structural interventions in sediment management.

Acknowledgment: This article is derived from the first Author's M.Sc. thesis and further, based on the project "Research Studies to Examine the Sedimentation Status in the Iran Commercial Ports," which was commissioned by the Ports and Maritime Organization of Iran and carried out by Khakbaft Consulting Engineers. The above is expressed as a means of acknowledgement and appreciation.

Keywords: Anzali Wetland-Port system, Delft3D model, Morphological modeling, Sediment transport modeling.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Conceptualization, numerical modelling, data analysis, visualization, and writing of the original manuscript.

Second Author: Conceptualization support, methodological guidance, validation of results, supervision, and manuscript revision.

ارزیابی اثرات طرح توسعه بندر انزلی بر رسوبگذاری در تالاب انزلی با استفاده از شبیه سازی عددی

حسن حیدر نژاد^۱، سید پیمان بدیعی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشکدهگان فنی دانشگاه تهران.

۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشکدهگان فنی، دانشگاه تهران.

* pbadiei@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶، نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱ ☞ وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: تالاب انزلی، واقع در سواحل شمالی ایران، یکی از تالاب‌های بین المللی است که از سال ۱۹۷۵ در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است. این تالاب بخشی از یک سامانه هیدرولیکی گسترده است که از جنوب توسط چندین رودخانه تغذیه شده و در شمال، از طریق یک دهانه رودخانه‌ای به دریای خزر متصل می‌شود. یکی از چالش‌های پیش‌روی این منطقه، بررسی تأثیر توسعه‌های جدید بندری بر رسوب‌گذاری در تالاب انزلی است. برای پاسخ به این مسئله، از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدلسازی دوبعدی جریان و انتقال رسوب به کمک بسته نرم افزاری Delft3D استفاده شد تا الگوی جریان، انتقال رسوب و تغییرات بستر در سامانه تالاب-بندر انزلی بررسی شود. در این مدل، از داده‌های هیدرولوژیکی و اندازه‌گیری سرعت جریان برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهره برداری شد. اطلاعات به‌دست‌آمده از عملیات لایروبی و پایش‌های هیدروگرافی پیاپی نیز برای تعیین الگوهای رسوب‌گذاری و فرسایش در ناحیه بندر و تنظیم مدل مورفولوژی به‌کار رفت. نتایج نشان می‌دهد که حدود ۵۷٪ از رسوبات ورودی به سامانه تالاب-بندر انزلی در تالاب ته نشین شده، ۷٪ در حوضچه‌های بندر رسوب می‌کند، و ۳۶٪ به وارد دریای خزر می‌شود. همچنین، تغییر هندسه موج‌شکن بندر، که با هدف تسهیل خروج رسوب به دریا طراحی گردید، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش رسوب‌گذاری در تالاب نداشته، اما می‌تواند رسوب‌گذاری در محدوده بندر را تا ۹۰٪ کاهش دهد.

کلیدواژگان: سامانه هیدرولیکی تالاب-بندر انزلی، مدل Delft3D، مدلسازی تغییرات بستر، مدلسازی انتقال رسوب.

۱- مقدمه

پایش تالاب‌های ساحلی برای حفاظت و احیای آن‌ها ضروری است (Sun et al., 2020). در حال حاضر، بسیاری از تالاب‌های ساحلی، از جمله تالاب انزلی در ساحل‌های جنوب‌غربی دریای خزر، با چالش‌هایی مانند خشکی و رسوب‌گذاری روبرو هستند. این تالاب که حدود ۱۵ هزار هکتار وسعت دارد، به دلیل اهمیت زیست‌محیطی، در سال ۱۹۷۵ در فهرست کنوانسیون رامسر ثبت شد (Ramsar Convention Secretariat, 2020). با وجود انباشت تدریجی رسوب از طریق رودخانه‌های ورودی، این تالاب همچنان نقشی کلیدی در حفظ تنوع زیستی و تعادل بوم‌شناختی ایفا

تالاب‌های ساحلی که در مرز میان خشکی و دریا قرار دارند، از جمله زیست‌بوم‌های پویا و حساس از نظر بوم‌شناختی به‌شمار می‌روند (McCarthy et al., 2015; Murray et al., 2019; Wang et al., 2020) و نقش مهمی در جلوگیری از فرسایش، تغییر اقلیم و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند (Mahdianpari et al., 2018; Xie et al., 2015). با این حال، فعالیت‌های انسانی و تغییرپذیری‌هایی اقلیمی از جمله عامل‌های تهدیدکننده این تالاب‌ها هستند که منجر به تخریب زیستگاه و کاهش خدمات بوم‌شناختی آن‌ها می‌شوند (Ren et al., 2019; Wang et al., 2020). بنابراین،

می‌کند. درک فرآیندهای هیدرودینامیکی و انتقال رسوب در تالاب‌های ساحلی، از جمله سامانه تالاب-بندر انزلی، برای حفاظت محیط‌زیست و کاهش زیان‌های ناشی از رویدادهای طبیعی مانند سیلاب‌ها اهمیت فراوانی دارد. مدل‌سازی عددی با ابزارهایی مانند Delft3D, ROMS, MIKE 21-3 و FVCOM، روشی مؤثر برای شبیه‌سازی رفتار جریان، انتقال رسوب و تغییرپذیری‌های بستر در پهنه‌های آبی بزرگ به‌شمار آید. این مدل‌ها به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی جریان‌های خورها و دینامیک رسوبی استفاده شده‌اند. به‌عنوان مثال، مدل Delft3D برای بررسی اثر گیاهان نمک‌زار ساحلی بر هیدرودینامیک و انتقال رسوب به‌کار رفته و نشان داده شده است که پوشش گیاهی موجب کاهش سرعت جریان و تله اندازی رسوب می‌شود. با این حال، نیاز به بررسی دقیق‌تر محدودیت‌های این مدل‌ها و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف زیست‌محیطی وجود دارد (Jiang et al., 2023).

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی بر شناخت سازوکار انتقال رسوب و پایداری تالاب‌ها انجام شده‌اند. در دلتای رودخلنه می‌سی‌سی‌پی، بررسی‌های چندی همچون (Meselhe et al., 2012), (Yuil et al., 2016), (Bomer et al., 2019), (Elsey-Quirk et al., 2019) و (Meselhe et al., 2021) انجام شده‌اند. برای نمونه، (Wang et al., 2018) در خلیج Fourleague (FLB) در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، داده‌هایی ساعتی از موج‌ها، جریان‌ها و غلظت رسوب معلق گردآوری کردند و دریافتند که موج‌ها ناشی از باد عامل اصلی پخش رسوب‌ها در این خلیج کم‌عمق هستند. بررسی‌ها نشان داد که مقدار رسوب ورودی به تالاب‌های مجاور، وابسته به جهت باد و بده رودخانه در فصل‌های مختلف است. همچنین، (Restrepo et al., 2019) با نمونه‌برداری هسته‌ای، نرخ ته‌نشینی رسوب را در همین منطقه بررسی کرده و نشان دادند که در زمان بده بالای رودخانه و حضور جبهه‌های هوای سرد، رسوب‌ها بدون ته‌نشینی در بستر خلیج، مستقیم وارد نمک‌زارها می‌شوند. در حالی‌که در شرایط آرام، این رسوب‌ها در کف خلیج ته‌نشین می‌شوند.

مختلاف زیست‌محیطی وجود دارد (Jiang et al., 2023). در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی بر شناخت سازوکار انتقال رسوب و پایداری تالاب‌ها انجام شده‌اند. در دلتای رودخلنه می‌سی‌سی‌پی، بررسی‌های چندی همچون (Meselhe et al., 2012), (Yuil et al., 2016), (Bomer et al., 2019), (Elsey-Quirk et al., 2019) و (Meselhe et al., 2021) انجام شده‌اند. برای نمونه، (Wang et al., 2018) در خلیج Fourleague (FLB) در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، داده‌هایی ساعتی از موج‌ها، جریان‌ها و غلظت رسوب معلق گردآوری کردند و دریافتند که موج‌ها ناشی از باد عامل اصلی پخش رسوب‌ها در این خلیج کم‌عمق هستند. بررسی‌ها نشان داد که مقدار رسوب ورودی به تالاب‌های مجاور، وابسته به جهت باد و بده رودخانه در فصل‌های مختلف است. همچنین، (Restrepo et al., 2019) با نمونه‌برداری هسته‌ای، نرخ ته‌نشینی رسوب را در همین منطقه بررسی کرده و نشان دادند که در زمان بده بالای رودخانه و حضور جبهه‌های هوای سرد، رسوب‌ها بدون ته‌نشینی در بستر خلیج، مستقیم وارد نمک‌زارها می‌شوند. در حالی‌که در شرایط آرام، این رسوب‌ها در کف خلیج ته‌نشین می‌شوند.

ویژگی‌های جریان آب و پوشش گیاهی تالاب قرار دارد. شبیه‌سازی‌های عددی به‌دلیل هزینه پایین و تونلایی بازنمایی شرایط مختلف، به‌عنوان ابزار مؤثری برای بررسی تعامل جریان و پوشش گیاهی شناخته می‌شوند. بررسی‌های گذشته عامل‌هایی همچون جریان، تلاطم، تغییرپذیری‌های سطح آب، تبادل جانبی آب، و ریخت‌شناسی دشت‌های جزر و مدی را در مدل‌سازی خود لحاظ کرده‌اند. گیاهان نمک‌زار نقش مهمی در تله اندازی رسوب و تغییر و دگرگونی‌های ریختار شناسی دارند و هم‌زمان بر پویایی بوم شناختی تالاب‌ها نیز تأثیرگذارند (Jiang et al., 2023). با وجود تمرکز زیاد بر بررسی اثر گیاهان در نواحی خور و خلیج، هنوز بررسی‌های میدانی و شبیه‌سازی کافی درباره تالاب‌های ساحلی گذار انجام نشده و سازوکار گیرش رسوب توسط این گیاهان به‌خوبی شناخته نشده است.

Jiang et al. (2023) با استفاده از مدل ترکیبی هیدرودینامیک و انتقال رسوب Delft3D، به بررسی رسوب‌گذاری ناشی از جزر و مد در تالاب‌های ساحلی پرداختند. آنان با لحاظ کردن مقاومت پوشش گیاهی و نقشه توزیع آن، تعامل جریان-گیاه را به‌خوبی بازنمایی کردند. آزمایش‌های عددی در مصب رودخانه پایین دست (LRE) نشان داد که گیاهان نمک‌زار به‌ویژه در دوره‌های مد و جزر، بر سرعت جریان و غلظت رسوب‌ها تأثیرگذارند. در این پژوهش، خلیج‌های ساحلی به‌عنوان منابع اصلی رسوب‌گذاری معرفی شده‌اند و نوع پوشش گیاهی و تبادل آب به‌عنوان عامل‌های مؤثر بر بودجه رسوب شناسایی شدند. نتایج نشان داد که تا ۶۰٪ از رسوب‌ها در این منطقه‌ها توسط خلیج‌های ساحلی ته‌نشین می‌شوند. مدل‌های عددی در گذشته برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک، انتقال رسوب و تغییرپذیری‌های بستر در سامانه تالاب-بندر انزلی به‌کار رفته‌اند (Bohluly et al., 2004; Fathi Ozanbalagh et al., 2017; Hosseinian et al., 2017). به‌عنوان مثال، مدل MIKE21 برای بررسی تأثیر ساخت بازوهای موج‌شکن جدید بر زمان ماند آب در تالاب استفاده کرده و نشان داد که این ساخت‌وسازها باعث پایداری بیشتر جریان در تالاب در طول سال می‌شوند

آبکنار، سیاه‌کشیم، شیجان و سرخانکل (هندخاله) تشکیل شده است (شکل ۱).

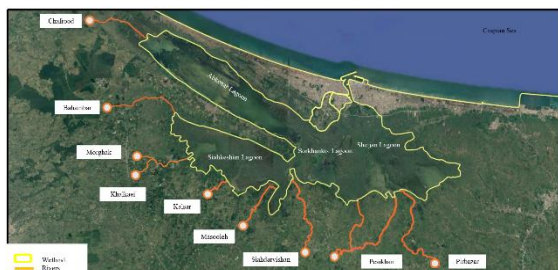


Fig. 1 Location of Anzali Wetland and Hydrometric stations location (Google earth, 2020)

شکل ۱ موقعیت تالاب انزلی و بخش‌های مختلف آن (Google earth, 2020)

توسعه بندر انزلی در سال ۲۰۰۷ به پایان رسید. نمایی از وضعیت پیشین شکل ۲ و کنونی بندر شکل ۳ را نشان می‌دهد. در شرایط گذشته، ورودی بندر در محدوده منطقه شکست موج‌ها قرار داشت و رسوب‌گذاری ناشی از انتقال ساحلی، تأثیر منفی قابل توجهی بر ناوبری و عملکرد بندر داشت. اما در شرایط کنونی، ورودی بندر به خارج از منطقه شکست موج‌ها منتقل شده و جریان‌های رسوبی نزدیک ساحل تأثیر چندانی بر مسئله‌های رسوب‌گذاری بندر ندارند.



Fig. 2 Anzali Port layout before the development (Google earth, 2004)

شکل ۲ هندسه موجشکن قبل از طرح توسعه (Google earth, 2004)

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی، داده‌های گوناگونی از سازمان‌های مرتبط گردآوری شد. داده‌های به دست آمده از نمونه‌برداری رسوب‌های بستر، شامل نمونه‌های سطحی و عمقی، از سازمان محیط زیست و سازمان بنادر و دریانوردی

(Nadimi & Lashteh Neshaei, 2010). همچنین، الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری در حوضه بندر انزلی با استفاده از MIKE21/MIKE3 شبیه‌سازی کردند (Fathi Ozanbalagh et al., 2017). با این حال، هنوز خلأهایی در مدل‌سازی جامع کل سامانه تالاب-بندر انزلی شامل رودخانه‌های ورودی، تالاب، خروجی‌ها، بندر و بخشی از دریا وجود دارد؛ به‌ویژه در ارزیابی تبادل رسوب در مرزهای تالاب-بندر و بندر-دریا.

این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ، از یک سامانه مدل‌سازی ترکیبی مبتنی بر Delft3D استفاده کرده که فرآیندهای جریان و رسوب را در سامانه تالاب-بندر انزلی در بر می‌گیرد. داده‌های میدانی برای واسنجی مدل هیدرودینامیک و مدل رسوب-ریختارشناسی به کار رفته و برای افزایش دقت مدل‌سازی، داده‌های رودخانه‌های بالادست نیز لحاظ شده‌اند که نقطه قوت این تحقیق به‌شمار آید. در این پژوهش، اثرگذاری‌های کوتاه‌مدت یک سیلاب ۴۱ روزه بر انتقال رسوب در تالاب‌های ساحلی بررسی شده و هدف آن برآورد میزان رسوب خالص ته‌نشین‌شده در تالاب، بندر، رودخانه‌ها و دریا در طول این رویداد، و نیز ارائه کارایی راهکارهای مدیریتی برای مهار رسوب‌گذاری در سامانه تالاب-بندر انزلی بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

سامانه تالاب-بندر انزلی در بخشی از یک سامانه هیدرولوژیکی بزرگ شامل یک حوضه آبریز گسترده به مساحت حدود ۳۳۰۰ کیلومتر مربع در جنوب دریای خزر، قرار دارد. محدوده مورد بررسی تالاب-بندر انزلی در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. در مجموع، نه رودخانه اصلی و پنج رودخانه کوچک‌تر به تالاب انزلی وارد می‌شوند. تالاب انزلی که تحت پوشش کنوانسیون رامسر قرار دارد، از جمله با ارزش‌ترین زیست‌بوم‌های کشور به‌شمار می‌رود. با وجود تدابیر حفاظتی تعیین‌شده در این کنوانسیون، تالاب انزلی با تهدیدهای بسیاری روبرو است که از جمله آن‌ها می‌توان به ورود فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی؛ افزایش رسوب‌گذاری ناشی از رودخانه‌های ورودی؛ و رشد بی‌رویه گیاه آژولا اشاره کرد. تالاب انزلی از چهار بخش جداگانه شامل

۱۳۹۸ انجام شده است بهره گرفته شد و در بخش‌هایی از تالاب که بدون داده‌های آب نگاری بودند، از اطلاعات ارتفاعی ماهواره‌ای پایگاه داده الوس^۱ استفاده شد (شکل ۹).



Fig. 3 Anzali Port layout after the development (Google earth, 2023)

شکل ۳ هندسه موجشکن بعد از طرح توسعه (Google earth, 2023)

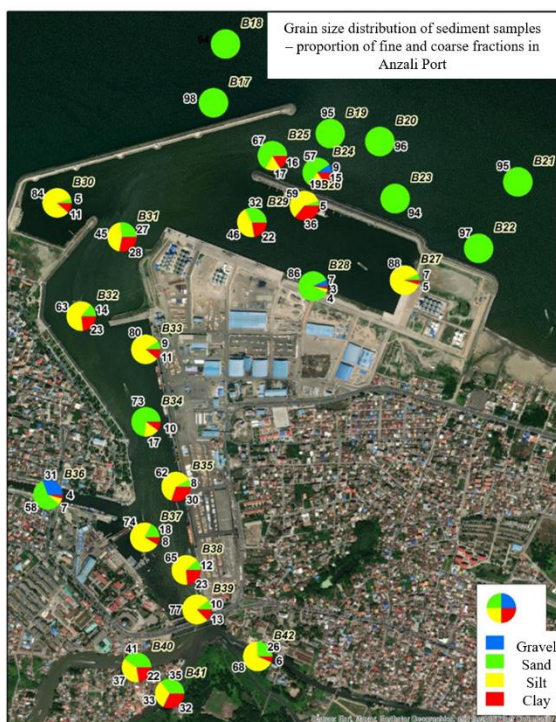


Fig. 5 Sediment gradation in the port (Google earth, 2020)

شکل ۵ دانه‌بندی رسوب‌ها در بندر انزلی (Google earth, 2020)

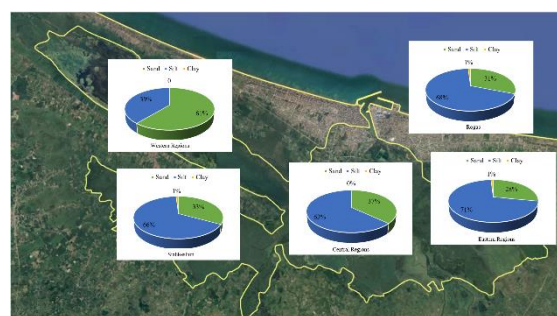


Fig. 4 Sediment gradation in the wetland (Google earth, 2023)

شکل ۴ دانه‌بندی رسوب‌ها در تالاب انزلی (Google earth, 2023)

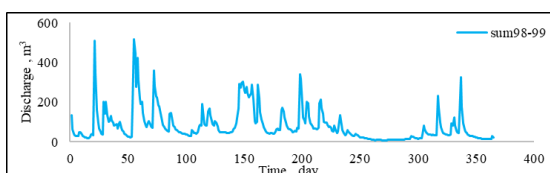


Fig. 6 Catchment areas of the rivers flowing into Anzali Wetland (September 23, 2019 to September 23, 2020)

شکل ۶ مجموع بده رودخانه‌های ورودی به تالاب انزلی (از ۱ مهر ۱۳۹۸ تا ۱ مهر ۱۳۹۹)

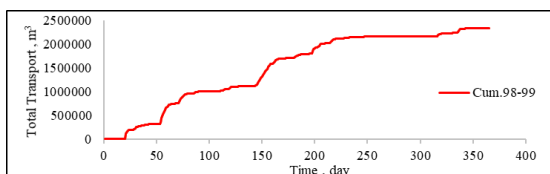


Fig. 7 The total daily discharge and the cumulative total transport (September 23, 2019 to September 23, 2020)

شکل ۷ انتقال رسوب تجمعی رودخانه‌های ورودی (از ۱ مهر ۱۳۹۸ تا ۱ مهر ۱۳۹۹)

دریافت شد و ترکیب رسوب‌ها در موقعیت‌های مکانی مختلف بررسی شد (شکل‌های ۴ و ۵). اطلاعات مربوط به عملیات لایروبی، شامل حجم و موقعیت آن در حوضچه‌های بندر و آبراهه‌های تالاب، طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰، نیز از همین سازمان دریافت شد. همچنین داده‌های بده جریان (شکل ۶) و غلظت رسوب معلق (شکل ۷) در ۹ رودخانه اصلی ورودی به تالاب، مبتنی بر ایستگاه‌های آبسنجی وزارت نیرو دریافت و تحلیل شد. داده‌های مربوط به سرعت جریان در محدوده اسکله شماره ۱۰ بندر انزلی با استفاده از جریان‌سنج Aquadopp در موقعیت نشان داده شده در شکل ۸ از سازمان بنادر و دریانوردی دریافت و استفاده شد. در نهایت، از عمق سنجی انجام شده توسط سازمان بنادر و دریانوردی در بندر و تالاب که در سال



Fig. 10 Grid and input boundary (Google earth, 2020)
 شکل ۱۰ شبکه بندی و مرز ورودی در تالاب انزلی
 (Google earth, 2020)



Fig. 8 Location of the Aquadopp device and 10th pier
 شکل ۸ موقعیت دستگاه جریان سنج Aquadopp و اسکله
 شماره ۱۰



Fig. 11 Grid and output boundary (Google earth, 2020)
 شکل ۱۱ شبکه بندی و مرز خروجی در دریای خزر
 (Google earth, 2020)



Fig. 9 Bathymetry of Anzali Wetland and Port
 شکل ۹ عمق نگاشت بستر در کل تالاب و بندر انزلی

۱-۲- مدلسازی

برای بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب بین بخش‌های مختلف تالاب-بندر انزلی، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار Delft3D انجام شد. در این پژوهش از نسخه دوبعدی این نرم‌افزار شامل پودمان‌های جریان، انتقال رسوب و ریختارشناسی به صورت جفت^۲ شده استفاده شده است. حوزه محاسبه شدنی مدل شامل ۹ زیردامنه متصل به هم که در کل شامل ۱۰۹۶۳ عنصر و ۱۷۵۳۱ گره می‌باشد. در مرز ورودی شکل ۱۰، بده روزانه آب و رسوب رودخانه‌ها به صورت منبع نقطه‌ای^۳ اعمال شد و در مرز خروجی دریایی شکل ۱۱، شرایط مرزی نوع نیومان^۴ و تراز آب^۵ ثابت لحاظ شد.

۱-۱-۲- واسنجی و صحت سنجی

مدل جریان و رسوب در بازه زمانی ۹ آبان تا ۲۰ آذر ۱۳۹۸ (۳۱ اکتبر تا ۱۱ دسامبر ۲۰۱۹) واسنجی شد. دلیل انتخاب این بازه، در دسترس بودن دو برداشت آب نگاری متوالی در تاریخ‌های آغاز و پایان این دوره با کمترین عملیات لایروبی بود. داده‌های مربوط به لایروبی به طور معمول با عدم قطعیت‌هایی در زمینه موقعیت و حجم عملیات همراه هستند، بنابراین در این بازه زمانی، داده‌های قابل اطمینانی از مکان و میزان رسوب‌گذاری یا فرسایش قابل دستیابی بود.

۲-۱-۲- پودمان جریان

در دوره واسنجی مدل، بده روزانه ورودی رودخانه‌ها به تالاب انزلی به‌عنوان عامل محرک جریان پایه و جریان سیلاب در سامانه تالاب-بندر انزلی به کار گرفته شد.

4. Neumann
 5. Water level

1. Modules
 2. Couple
 3. Source

زمانی محدود داده‌های ورودی روزانه رودخانه‌ها، تا حدی قابل پیش‌بینی بود.

در ادامه، پیش فرض زبری متغیر به‌عنوان حالت نهایی مدل واسنجی شده انتخاب شد (شکل ۱۳). این مدل برای شبیه‌سازی جریان در سه دوره مختلف سیلابی استفاده و نتایج به دسا آمده به‌ویژه برای سرعت‌های بالا رضایت‌بخش بودند.

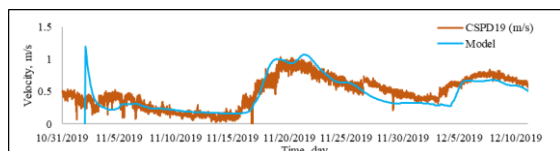


Fig. 13 Comparison between modeled flow velocities and measured data at the tenth station.

شکل ۱۳ مقایسه بین سرعت جریان در مدل و داده‌های اندازه‌گیری واقع در اسکله برگشتی

در ادامه، مدل واسنجی شده برای سه دوره سیلابی دیگر اجرا شد و سازگاری مناسبی با داده‌های مشاهده‌ای داشت (شکل ۱۴). همچنین الگوی جریان در روز اوج سیلاب (۲۸ آبان ۱۳۹۸) نشان داد که سرعت‌های بالا در آبراهه‌های اصلی تالاب و در مقابل اسکله‌ها رخ می‌دهند که می‌تواند نقش مؤثری در انتقال رسوب‌های انباشته‌شده در حوضچه بندر به سمت دریا ایفا کند.

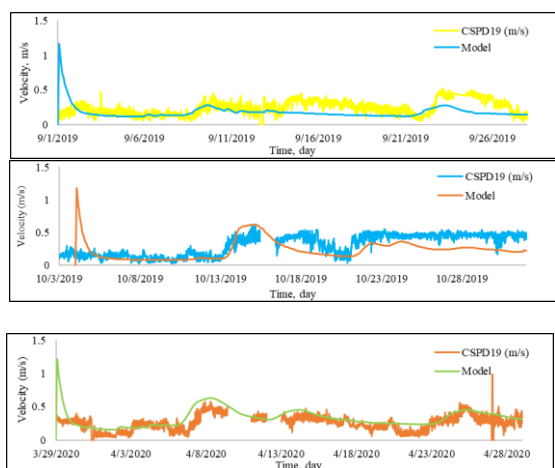


Fig. 14 Validation of calibrated model for three different flooding periods

شکل ۱۴ صحت سنجی مدل با مقایسه سرعت جریان شبیه‌سازی شده داده‌های اندازه‌گیری واقع در اسکله برگشتی

مهم‌ترین فراسنجه‌های تنظیم‌شده شامل زبری بستر (ضریب مانینگ) و ضریب لزجت آشفتگی بودند. محدوده مورد بررسی شامل آبراهه‌های طبیعی موسوم به "روگا"، دشت‌های سیلابی پوشیده از پوشش گیاهی، و حوضچه‌های ذخیره در درون تالاب خواهد بود.

دو پیش فرض برای زبری بستر^۱ بررسی شد: نخست با استفاده از ضریب مانینگ^۲ ثابت برابر با $0.2 \text{ m}^{(-1/3)}/\text{s}$ در کل حوزه، و دوم با اعمال زبری متغیر شامل ضریب $0.2/0.5$ برای آبراهه‌های اصلی و $0.5/0.2$ برای دشت‌های سیلابی و نواحی دارای پوشش گیاهی. ضریب لزجت آشفتگی افقی^۳ برای کل حوزه ثابت در نظر گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱ فراسنجه‌های ورودی به مدل هیدرودینامیک

Table 1 Input parameters

Title	Amount	Discription
Manning roughness coefficient	wetland variable	Taken as 0.02 in main channels and 0.5 in vegetated floodplains.
	Whole domain	0.02 is assumed over the whole domain
Eddy viscosity	Horizontal m ² /s	0.28 default

نتایج شبیه‌سازی این دو پیش فرض با میزان‌های سرعت اندازه‌گیری شده در فاصله ۳۹ متری از دماغه اسکله شماره ۱۰ (در شکل ۱۲ مقایسه شدند). مقایسه‌ها نشان دادند که دو نقطه اوج اصلی سیلاب با دقت مناسبی و با تأخیری کمتر از یک روز شبیه‌سازی شده‌اند، گرچه در نقطه اوج دوم، میزان‌های شبیه‌سازی شده سرعت جریان کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده بود. این اختلاف به دلیل دقت

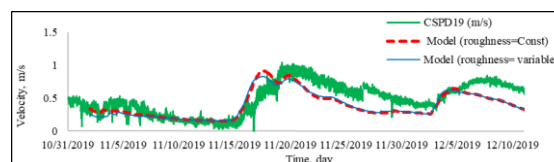


Fig. 12 Comparison of modeled velocities with field data at the tenth station under two different scenarios.

شکل ۱۲ مقایسه سرعت‌های مدل شده با داده‌های میدانی در اسکله برگشتی با دو پیش فرض متفاوت

3. Horizontal eddy viscosity

1. Roughness
2. Manning's roughness coefficient

فرسایش در این ناحیه در نظر گرفته شد. برای منطقه بندر انزلی، با توجه به الگوی فرسایش مشاهده شده، مقدار تنش برشی بحرانی برای فرسایش برابر با 0.05 نیوتن بر متر مربع تعیین شد. همچنین، تنش برشی بحرانی برای ته نشینی در کل دامنه شبیه سازی مقدار ثابتی معادل 0.1 نیوتن بر متر مربع لحاظ شد.

نتایج مدل در دوره واسنجی نشان داد که میزان رسوب گذاری خالص 45000 مترمکعب بوده که با مقدار اندازه گیری شده برابر با 49000 مترمکعب همخوانی خوبی دارد. مقایسه تغییرپذیری های تراز بستر در دوره زمانی یاد شده نشان داد که الگوی فرسایش و رسوب گذاری شبیه سازی شده با نتایج اندازه گیری شده همانندی قابل قبولی دارد، به ویژه در ناحیه های بندری (شکل های ۱۶ و ۱۷). این موضوع صحت مدل سازی را برای کاربرد ارائه راهکارهای مدیریت رسوب و تحلیل کمی اثرگذاری های این راهکارها در منطقه تأیید کند. الگوی کلی انتقال رسوب در اوج سیلاب ۱۹ نوامبر ۲۰۱۹ نشان داده شده است (شکل ۱۸).

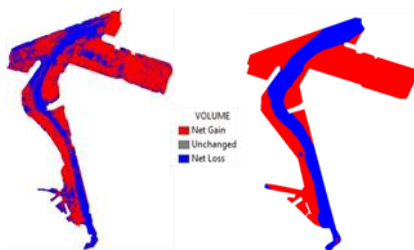


Fig. 16 simulated net sedimentation/erosion (Right), measured net sedimentation/erosion (Left)

شکل ۱۶ برآیند رسوب گذاری/فرسایش شبیه سازی شده (سمت راست)، برآیند رسوب گذاری/فرسایش اندازه گیری شده (سمت چپ)

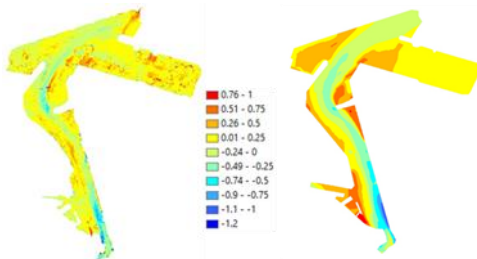


Fig. 17 simulated bed level changes, right & measured bed level changes, left

شکل ۱۷ تغییرپذیری های شبیه سازی شده تراز بستر (سمت راست)، تغییرپذیری های اندازه گیری شده تراز بستر (سمت چپ)

الگوی جریان در اوج سیلاب ۲۸ آبان ۱۳۹۸ (۱۹ نوامبر ۲۰۱۹) در محدوده تالاب، آبراهه های اصلی و ناحیه بندر قابل نمایش است (شکل ۱۵). در این حالت، سرعت جریان در ناحیه های آبراهه ای، به ویژه مقابل اسکله های ۱ تا ۷ و در نزدیکی سر اسکله دهم قابل توجه بود. این الگوی جریان در دوره های سیلابی می تواند نقش مؤثری در شست و شوی طبیعی رسوب های تجمع یافته در پای اسکله ها و انتقال آن ها به دریا ایفا کند.



Fig. 15 Flow pattern at the AWP (Google earth, 2020)
شکل ۱۵ الگوی تغییرپذیری های سرعت جریان پیرامون تالاب و بندر انزلی در زمان رخداد بیشینه جریان (Google earth, 2020)

۲-۱-۳- پودمان ریختارشناسی

بنا بر نتایج به دست آمده از یک بررسی هیدرولوژیکی بر روی رودخانه های ورودی، بده های روزانه جریان به همراه غلظت های مشخصی از رسوبها شامل 32% شن، 30% سیلت و 38% رس به عنوان نقطه های ورودی در مرزهای جنوبی مدل اعمال شدند. در مرز دریایی، به دلیل تغییرپذیری های ناچیز غلظت رسوب، مقدار غلظت صفر فرض شد. الگوی فرسایش و رسوب گذاری با استفاده از تفاوت بین دو برداشت آب نگاری متوالی به عنوان مبنای مقایسه و واسنجی استفاده شد. این واسنجی در دوره سیلابی ۴۱ روزه (۹ آبان تا ۲۰ آذر ۱۳۹۸) که بدون عملیات لایروبی بود، انجام شد.

در این مدل، ضریب های حساس فیزیکی مانند تنش برشی بحرانی برای فرسایش و ته نشینی، سرعت ته نشینی، ضخامت لایه بستر و چگالی رسوبها مورد آزمون قرار گرفت. رسوب های موجود در تالاب به دلیل سرعت پایین جریان و قابلیت تراکم پذیری بالاتر، نسبت به فرسایش مقاومت بیشتری دارند. بر این مبنای، مقدار بالای $1/2$ نیوتن بر متر مربع به عنوان تنش برشی بحرانی برای آغاز

می‌شود که از این مقدار ۲۸۶.۰۰۰ مترمکعب از تالاب به منطقه بندر و ۲۳۷.۰۰۰ مترمکعب به دریا جریان می‌یابد. این مقادارها نشان‌دهنده ۳۷۵.۰۰۰ مترمکعب (نزدیک به ۵۷٪) رسوب‌گذاری در تالاب، مترمکعب رسوب‌گذاری (نزدیک به ۷٪) در منطقه بندر و بقیه آن، یعنی ۳٪، به دریا تخلیه می‌شود.



Fig. 20 Cumulative sediment transport over the 41-day period (Google earth, 2020)

شکل ۲۰ انتقال رسوب تجمعی طی دوره ۴۱ روزه (Google earth, 2020)

۳-۲- اثرگذاری‌های توسعه بندر بر رسوب‌گذاری تالاب

تصور بر این است که اجرای طرح توسعه بندر، به‌ویژه ساخت موج‌شکن غربی، به نوعی از خروج آزادانه جریان سیلاب‌های حاوی رسوب به دریا جلوگیری کرده و باعث افزایش رسوب‌گذاری در سامانه تالاب-بندر، و به طور ویژه در تالاب انزلی شده است. این فرضیه با اجرای مدل واسنجی شده فوق برای حالتی که هندسه طرح توسعه به‌گونه‌ای اصلاح شود که جریان رسوب به دریا آسانگری شود، مورد ارزیابی قرار گرفت. این تغییرپذیری‌ها به گونه ای است که در آن موج‌شکن غربی کوتاه‌تر شده و بال غربی حوضه شرقی بسته می‌شود تا آبراهه مستقیمی برای خروج رسوب‌ها بدون هیچ انحرافی ایجاد شود (شکل ۲۱). اثرگذاری‌های این تغییرپذیری‌ها بر الگوی رسوب‌گذاری در منطقه بندر در شکل ۲۲ نشان داده شده است و با وضعیت موجود مقایسه شده است.

نتایج و اثرگذاری‌های چنین تغییری در هندسه بندر، در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد، که تغییرپذیری‌های یاد شده هیچ تأثیری بر رسوب‌گذاری در تالاب ندارد، لیکن رسوب‌گذاری در بندر را نزدیک به ۹۰٪



Fig. 18 Total transport pattern at the AWP (Google earth, 2020)

شکل ۱۸ الگوی انتقال رسوب در تالاب- بندر انزلی (Google earth, 2020)

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، نتایج مدل عددی واسنجی شده به‌منظور بررسی دو مسئله اصلی شامل:

- الگوی رسوب‌گذاری در اجزا سامانه تالاب-بندر انزلی
- اثرگذاری اجرای طرح توسعه بندر بر رسوب‌گذاری در تالاب بررسی شده است.

۳-۱- الگوی کلی رسوب‌گذاری و فرسایش در درون تالاب و بندر

الگوی کلی رسوب‌گذاری و فرسایش در تالاب و بندر در شکل ۱۹ نشان داده شده است. طبق این شکل، بیشتر رسوب‌های ورودی در سیلاب دشت‌های پیرامون روگهای اصلی تالاب ته‌نشین می‌شوند. در انتهای آبراهه‌ها، در مرز بندر، فرسایش قابل توجهی مشاهده می‌شود. سطح بالاتری از رسوب‌گذاری و فرسایش در بندر مشاهده می‌شود که در مساحتی کوچک‌تر رخ می‌دهد.



Fig. 19 Bed level change at the AWP (Google earth, 2020)

شکل ۱۹ تغییرپذیری‌های تراز بستر در تالاب- بندر انزلی (Google earth, 2020)

برای مشخص‌تر شدن، انتقال رسوب تجمعی مدل ۴۱ روزه در مقطع‌های مختلف سامانه تالاب-بندر انزلی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. طبق این شکل، در کل ۶۶۱.۰۰۰ مترمکعب رسوب وارد سامانه تالاب-بندر انزلی

۴- نتیجه گیری

مدل جریان با انتقال رسوب دو بعدی در سطح افق با استفاده از بسته نرم افزاری Delft3D برای سامانه تالاب-بندر انزلی توسعه داده شد. مدل جفت شده هیدرودینامیک با استفاده از اندازه گیری های میدانی و اندازه گیری های جریان واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان در محدوده تالاب متأثر از پوشش گیاهی استو با افزایش ضریب زبری در مدل در سیلاب دشت ها، همخوانی مناسب تری از منظر مقدار و زمان رخداد بیشینه بین مقدارهای اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مشاهده می شود.

شبیه سازی انجام شده نشان داد که مدل هیدرودینامیکی دو بعدی معرفی شده با دقت قابل قبولی قادر به تبیین الگوی جریان های سیلابی در سامانه تالاب-بندر انزلی بوده است. در نتیجه، مدل واسنجی شده جریان با پودمان حمل رسوب ترکیب شد تا ابزاری برای بررسی انتقال رسوب و در نهایت تغییرپذیری های ریختارشناختی در مرحله های مختلف ایجاد شود.

حجم حمل رسوب به شدت به تنظیم های اندازه متوسط ذرات، سرعت ته نشینی، تنش برشی بحرانی بستر برای رسوب گذاری و فرسایش، فراسنجه فرسایش، و ضخامت لایه اولیه رسوب در بستر حساس است که برای محاسبه نرخ های حمل رسوب استفاده می شود. پژوهش کنونی از شبیه سازی ریختارشناختی در مرحله های مختلف برای درک بهتر این پدیده استفاده خواهد کرد.

نتایج این تحقیق نشان داد که نزدیک به ۵۷٪ از رسوب ها تحویلی توسط رودخانه ها به درون سامانه تالاب-بندر انزلی، در تالاب ته نشین می شود، ۷٪ در حوضچه های بندر و ۳۶٪ به دریا تخلیه می شود. همچنین، نشان داده شد که اثرگذاری تغییر هندسه بندر از شکل کنونی به شکلی همانند پیش از اجرای طرح توسعه، به گونه ای که خروج جریان های سیلابی به دریا آسانگری شود، اثری در رسوب گذاری در تالاب ندارد. لیکن با جلوگیری از ورود سیلاب ها به درون حوضچه جدید شرقی، حجم رسوب گذاری در بندر را تا ۹۰٪ کاهش دهد.

کاهش می دهد. دلیل کاهش رسوب گذاری در محدوده بندر نیز به روشنی ناشی از مسدود شدن راه ورود سیلاب ها به درون حوضچه جدید شرقی است.

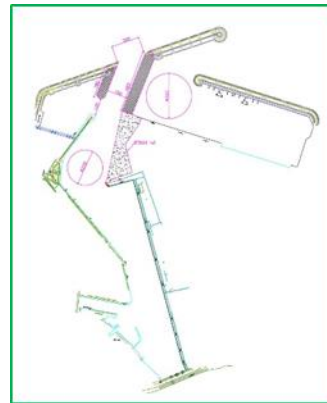


Fig. 21 Proposed schematic design (Darya Bandar Consulting Engineers, 2020)

شکل ۲۱ نمای طرح پیشنهادی (Darya Bandar Consulting Engineers, 2020)

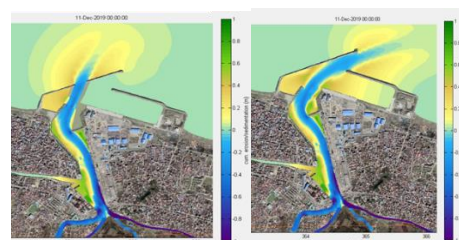


Fig. 22 Bed level change under current conditions, right & under modified breakwater geometry, left (Google earth, 2020)

شکل ۲۲ تغییر تراز بستر در شرایط موجود، سمت راست، و تحت هندسه اصلاح شده موج شکن، سمت چپ (Google earth, 2020)

جدول ۲ اثرگذاری اصلاح هندسه موج شکن بر رسوب گذاری تالاب-بندر انزلی

Table 2 Effects of the modifications on the geometry of development plan

Location	Before modification	After modification
Accumulative sediment inflow into AWP (m ³)	661000	661000
Wetland sedimentation (m ³)	375000	374000 (-0%)
Port basins sedimentation (m ³)	-5000 (-90%)	49000

Implications for river-sediment diversions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 20 – 33. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.021>

Darya Bandar Consulting Engineers. (2020). Phase II studies of the comprehensive port master plan for Noshahr, Amirabad, and Anzali ports. Iran Ports and Maritime Organization. (In Persian).

Elsey-Quirk, T., Graham, S.A., Mendelssohn, I. A., Snedden, G., Day, J.W., Twilley, R.R., ... & Lane, R.R. (2019). Mississippi river sediment diversions and coastal wetland sustainability: Synthesis of responses to freshwater, sediment, and nutrient inputs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 221, 170–183.

Fathi Ozanbalagh, S., Nik Sokhan, M.-H. & Karbasi, A.-R. (2017). Assessment of water level variations in the Anzali Port–Wetland system under the influence of the new breakwater configuration using the MIKE-21 model. Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Planning and Management, Tehran.

Filostat, J.E. (2014). Estimation of sediment resuspension and deposition in coastal waters. Master's thesis, University of New Orleans Theses and Dissertations, 1796.

Google Earth. (2019, December 4). Bandar Anzali, Iran, 32°27'37"N, 52°25'49"E, eye alt 25 km [Landsat/Copernicus imagery]. Maxar Technologies 2020. Version 7.3.3.7786. <https://earth.google.com> (Accessed April 23, 2025)

Hosseinian, S., Esmaili, H. & Ghanbarian, M. (2017). Sediment transport modeling in Anzali harbor using MIKE21. *Water Science*, 3, 42–55. (In Persian)

Jiang, H., Chai, C. & Zhang, M. (2023). Numerical study on the influence of salt marsh plants on coastal wetland hydrodynamics and suspended sediment transport. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1180457. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1180457>

Mahdianpari, M., Salehi, B., Mohammadimanesh, F., Brisco, B., Mahdavi, S., Amani, M. & Granger, J. E. (2018). Fisher Linear Discriminant Analysis of coherency matrix for wetland classification using PolSAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 206, 300–317.

McCarthy, M.J., Merton, E.J. & Muller-Karger, F.E. (2015). Improved coastal wetland mapping using very-high 2-meter spatial resolution imagery. *International Journal for Applied Earth Observation and Geoinformation*, 40, 11–

۵- سپاسگزاری

این بررسی و ارزیابی برگرفته از مرحله‌های اجرای پروژه پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول، تحت راهنمایی نویسنده دوم، و مبتنی بر طرح "مطالعات تدقیق بررسی رسوب گذاری در بنادر کشور" است که کارفرمای آن سازمان بنادر و دریانوردی بوده و توسط مهندسان مشاور خاکبافت انجام شده است. لذا بدین وسیله از دست اندرکاران طرح یاد شده قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: طراحی پژوهش، مدلسازی عددی، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله
نویسنده دوم: راهنمایی علمی، توسعه روش تحقیق، اعتبارسنجی نتایج و ویرایش مقاله

۶- منبع‌ها

Bohluly, A., Badiei, P. & Zaker, H. (2004). Sedimentation modeling by 3D & 2D models in Anzali Harbor. International Conference on Coast, Ports and Marine Structures (ICOPMAS).

Bomer, E.J., Bentley, S.J., Hughes, J.E.T., Wilson, C.A., Crawford, F. & Xu, K. (2019). Deltaic morphodynamics and stratigraphic evolution of middle Barataria bay and middle Breton sound regions, Louisiana, USA:

- Stark, J., Plancke, Y., Ides, S., Meire, P. & Temmerman, S. (2016). Coastal flood protection by a combined nature-based and engineering approach: Modeling the effects of marsh geometry and surrounding dikes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 175, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.03.021>
- Sun, S., Zhang, Y., Song, Z., Chen, B., Zhang, Y., Yuan, W., ... & Wang, Y. (2020). Mapping coastal wetlands of the Bohai Rim at a spatial resolution of 10 m using multiple open-access satellite data and terrain indices. *Remote Sensing*, 12, 4114, <https://doi.org/10.3390/rs12244114>.
- Wang, J., Xu, K., Restrepo, G.A., Bentley, S. J., Meng, X. & Zhang, X. (2018). The coupling of bay hydrodynamics to sediment transport and its implication in micro-tidal wetland sustainability. *Marine Geology*, 405, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.08.011>.
- Wang, X., Xiao, X., Zou, Z., Chen, B., Ma, J., Dong, J., Doughty, R.B., Zhong, Q., Qin, Y. & Dai, S., (2020). Tracking Annual Changes of Coastal Tidal Flats in China During 1986–2016 Through Analyses of Landsat Images With Google Earth Engine. *Remote Sens. Environment*, 238, 110987, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.030>.
- Yuill, B.T., Khadka, A.K., Pereira, J., Allison, M.A. & Meselhe, E.A., (2016). Morphodynamics of the Erosional Phase of Crevasse-Splay Evolution and Implications for River Sediment Diversion Function. *Geomorphology*, 259, 12–29.
18. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.007>
- Meselhe, E.A., Georgiou, I., Allison, M.A. & McCorquodale, J.A. (2012). Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in lower Mississippi at a proposed delta building diversion. *Journal of Hydrology*, 472, 340–354.
- Meselhe, E., Khalifa, A.M., Hu, K., Lewis, J. & Tavakoly, A.A. (2021). Influence of key environmental drivers on the performance of sediment diversions. *Water*, 14(1), 24, <https://doi.org/10.3390/w14010024>
- Nadimi, E. & Lashteh Neshaei, S. (2010). Morphodynamic modeling of Anzali harbor using MIKE21, MIKE3. (In Persian)
- Ramsar Convention Secretariat (2020). List of Wetlands of International Importance Included in The Montreux Record. Retrieved from <https://www.ramsar.org>
- Ren, C., Wang, Z., Zhang, Y., Zhang, B. & Song, K. (2019). Rapid expansion of coastal aquaculture ponds in China from Landsat observations during 1984–2016. *International Journal for Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101902, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101902>
- Restrepo, G.A., Bentley, S.J., Wang, J. & Xu, K. (2019). Riverine sediment contribution to distal deltaic wetlands: Fourleague Bay, LA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.03.009>
- Rosen, T. & Xu, Y.J. (2014). A hydrograph-based sediment availability assessment: Implications for Mississippi River sediment diversion. *Water*, 6(3), 564–583.



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. 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.