

Hydrodynamic Analysis of Waves and Coastal Flow Patterns in a River Estuary Using the MIKE 21/3 FM Modeling System

Forough Kameli¹ , Daryoush Yousefi Kebria² , Salehi, Tahereh³

1. Civil and Environmental Engineering Department, Civil engineering faculty, Babol Noshirvani University of Technology, babol, Iran. E-mail: foroughkameli69@gmail.com
2. Corresponding Author, Civil and Environmental Engineering Department, Civil engineering faculty, Babol Noshirvani University of Technology, babol, Iran. E-mail: dy.kebria@nit.ac.ir
3. Civil and Environmental Engineering Department, Civil engineering faculty, Babol Noshirvani University of Technology, babol, Iran. E-mail: salehighazaleh69@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-10-05

Received in revised form

2025-10-29

Accepted

2025-12-16

Available online

2025-12-26

Keywords:

Wave and Current Patterns,
Three dimensional modeling,
Sefidrud River Estuary,
DHI MIKE

ABSTRACT

Estuaries are among the most critical zones for the transport and dispersion of various industrial pollutants and sediments. Although several studies in recent years have examined wave induced circulation, research on the Sefidrud River estuary has predominantly focused on sedimentation processes and has typically been conducted using two dimensional models. Three dimensional investigations within this region remain limited. This study represents the first integrated application of a large scale wave model for the entire Caspian Sea coupled with a high-resolution hydrodynamic model of the estuary, implemented using the SW module of MIKE 21 for wave simulation and the Flow Model module of MIKE 3 for three-dimensional current modeling. Model validation was performed using measured current velocity data during both high-flow and low-flow conditions. The simulation results indicate that during the high flow season, the predominant flow pattern is directed from west to east and toward the southeast. In contrast, during the low-flow season, currents tend to move shoreward, flowing toward the estuary along the coastal zone. Based on the modeling outcomes, current velocities during the high-flow period range from 0.01 to 1.5 m/s, with peak values reaching approximately 3.5 m/s during periods of elevated river discharge (around 370 m³/s) combined with storm-induced winds. Overall, the strong agreement between model predictions and observational data confirms that MIKE 3 is a robust, reliable, and efficient tool for simulating estuarine hydrodynamics and coastal marine processes.

Cite this article: Kameli, Forough., Yousefi Kebria, Daryoush., & Salehi, Tahereh. (2025). Hydrodynamic Analysis of Waves and Coastal Flow Patterns in a River Estuary Using the MIKE 21/3 FM Modeling System. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2),152- 167.

DOI: 10.22126/amcen.2025.13282.1060



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2025.13282.1060

Publisher: Razi University

Introduction

Reinforced Estuaries are one of the most complex and dynamic hydrodynamic systems in coastal areas and play an important role in regulating the exchange of mass, energy and sediment between the river and the sea. In addition to their environmental functions, these areas are also of great economic and social importance, as they are the focus of maritime transport, fishing, tourism and key habitats for aquatic species. In recent decades, the intensification of human pressures, including urban and industrial development, excessive resource extraction, pollution and changes in river flow regimes, has caused the ecological sustainability of estuaries to be more threatened than ever before [1-3]. In such circumstances, a detailed understanding of hydrodynamic dynamics, especially patterns of current, wave, turbulence and wave-current interactions, is essential for proper management, environmental monitoring and design of coastal structures [4,5]. Among the coastal estuaries of Iran, the Sefidrud River estuary is considered one of the most sensitive areas in terms of delta formation, sediment production, and pollution spread on the southern coast of the Caspian Sea. With a significant discharge and high sediment load, the Sefidrud River plays an important role in coastal nutrition, the sustainability of fishery ecosystems, and the irrigation of agricultural lands. However, in recent years, the development of industrial activities, land use change, and the entry of urban and agricultural pollutants have increased concerns about the environmental quality of the estuary area. In such circumstances, a detailed analysis of the hydrodynamic characteristics of this area can play a key role in assessing the release of pollutants, sediment transport, and coastal stability [6-8]. Although field measurements are the most accurate method for determining wave and current patterns in an area, this method alone is not responsive for large areas and is very time-consuming and costly. Therefore, the use of numerical models in simulating marine processes such as currents, waves, pollutant emissions, water level fluctuations, and sediment transport has become common and necessary because these models, in addition to reducing cost and time, allow for changing parameters and improving simulation conditions [5, 6, 9]. Among the existing models, the MIKE 21/3 FM model family has high accuracy and scientific acceptance due to its flexible grid solution of Navier stokes equations, three- dimensional simulation capability, consideration of wave-current interaction, and ability to precisely adjust boundary conditions [10-12]. In recent years, significant progress has been made in hydrodynamic modeling of the Caspian Sea and its surrounding coastal areas. Three-dimensional modeling of temperature and currents at the basin scale has shown that the use of wind and atmospheric pressure data can provide an accurate representation of the thermal structure and anticyclonic circulation pattern in the Caspian Sea [7]. Investigation of the flow pattern in the southeastern part of the Caspian Sea also indicates that under the influence of variable winds, longshore currents are formed in the surface layers and two gyre

systems dominate in the middle layers; while in deeper layers, a phase inversion phenomenon of up to 180 degrees with respect to the surface layers is observed [8].

Three-dimensional simulations based on hydrostatic models have shown that the general circulation pattern of the Caspian Sea is reproducible, however, seasonal and spatial variations can lead to noticeable differences in the intensity and direction of the currents. [9] In the field of tidal currents, the development of dynamic models based on Kelvin waves has been introduced as a faster and more efficient alternative to the full MIKE 3-HD models, and their ability to simulate short-term phenomena such as oil spills has been proven [10]. In studies related to the effects of coastal structures, the results of numerical modeling of waves around submerged breakwaters show that the change in the crest level of the structure plays a decisive role in the dissipation of wave energy, the formation of eddies, and the concentration or reduction of sediment within the structure [11]. In addition, the analysis of hydrodynamics and morphological changes in the Sefidrud estuary using numerical models and remote sensing data has shown that the main factors, including river discharge, sediment load, and fluctuations in the Caspian Sea water level, directly control the flow structure and sedimentation pattern [12].

Research conducted in the Caspian Sea in recent years shows that most studies have focused on the entire basin scale and on the analysis of large-scale currents, gyre patterns, wind effects, and temperature changes [13,14]. Also, some studies in coastal areas have investigated wave patterns, longshore currents, sediment transport, and shoreline changes using the MIKE 21, Delft3D, and FVCOM models [15,16]. Most studies have used two-dimensional models, and the three-dimensional behavior of the flow, depth-dependent velocity changes, and circulation patterns in different water layers have received less attention. On the other hand, independent field data for low and high-water periods have been used less in calibration, extensive and seasonal validation, and model evaluation. Therefore, a comprehensive, three-dimensional, multi-scale study with sufficient field verification is necessary to explain the hydrodynamic behavior of the Sefidrud estuary as one of the most sensitive coastal areas in terms of ecological pressures.

In this study, large scale (entire Caspian Sea basin) and small scale (Sefidrud estuary) wave modeling was performed using MIKE 21 SW module software to determine the wave pattern, energy concentration, and stresses resulting from them in the area, and the simultaneous effects of wind, river discharge, wave boundary conditions, and bed topography were investigated in the form of a comprehensive hydrodynamic model. Then, using MIKE 3 and the Flow Model module, a three dimensional model of the Sefidrud estuary flows was simulated to more accurately evaluate the way river water enters the sea and the dynamic behavior of the sea in the estuary area. Also, by validating the data in the two high-water and low water seasons, flow patterns and velocity components were extracted in three dimensions.

Method

In this study, data from 8 boreholes, which collectively include 37 soil samples, were utilized. These soil samples are divided into four groups based on the Unified Soil Classification System (USCS). Among these samples, 14 are classified as CL, seven as GC, 13 as SC with a low plasticity index ($PI < 30$), and three as SC with a high plasticity index ($PI \geq 30$). To estimate the dynamic properties of the soil, the investigation of the propagation velocities of compressional and shear waves, as well as the differentiation of layers based on the distribution of wave velocities in the soil, is conducted using geophysical tests in three forms: in-situ tests, inter-borehole tests, and surface seismic tests. The velocities of compressional and shear waves used in this study were extracted using the in-situ testing method according to ASTM D7400 standards.

Results

The fitting of shear modulus estimation models on the results obtained from boreholes for four types of soil CL, GC, SC with high plasticity index and SC with low plasticity index, and for six models BMDJS, KM1, NY, SEB1, SEB2, and WMN are shown. The void ratio of CL samples is in the range of 0.55 to 0.65, the degree of saturation of the samples is usually in the range of 20% to 50%, the suction of the samples is in the range of less than 10000 kPa, and the shear modulus of the samples is between 100 MPa and 400 MPa.

Conclusions

In this study, the parameters of six experimental models were extracted to estimate the initial shear stiffness of unsaturated and saturated soils for four soil types. The model parameters were estimated using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The estimated initial shear stiffness was compared with the corresponding values from seismic tests (in situ), and the fitting error for each was presented. It can be concluded that the BMDJS and KM1 models can better predict GC and SC soils with $PI \geq 30$ compared to other soils. The NY model reasonably estimated the initial shear stiffness for various soils. However, this model does not reasonably estimate the initial shear modulus for SC soils with $PI < 30$ in saturated conditions when the void ratios are outside the range of 0.3 to 0.75. The SEB1 and SEB2 models can better predict granular soils like GC and SC with $PI < 30$ compared to other soils. The results of the WMN model for SC soils with $PI \geq 30$ and CL are more consistent with the results of seismic tests. Additionally, this paper provided parameters for all six discussed models that may be practically useful. It is suggested that the parameters of each model be determined with higher accuracy through laboratory tests for similar soils.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تحليل هيدروديناميكي امواج و الگوي جريان هاي ساحلي در مصب رودخانه با استفاده از

مدل MIKE 21/3 FM

فروغ کاملي^۱، داريوش يوسفی کبريا،^۲، طاهره صالحی^۳

۱. گروه مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه:

foroughkamelii69@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه:

dy.kebria@nit.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه:

salehighazaleh69@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳	مصب ها یکی از مهم ترین مناطق انتقال و انتشار آلاینده های مختلف صنعتی و رسوب ها محسوب می شوند. در سال های اخیر، مطالعاتی بر روی مدل سازی جريان های ناشی از امواج انجام شده است اما در مورد مصب رودخانه سفیدرود، اغلب پژوهش ها بر رسوب گذاری متمرکز بوده و عمدتاً به صورت دوبعدی انجام شده اند، در حالی که بررسی های سه بعدی در این محدوده بسیار محدود است. این تحقیق، نخستین نمونه از تلفیق مدل موج بزرگ مقیاس کل دریای خزر با مدل جريان کوچک مقیاس مصب است که با استفاده از ماژول SW نرم افزار MIKE 21 انجام شد و الگوی جريان سه بعدی نیز با استفاده از ماژول Flow Model نرم افزار MIKE 3 شبیه سازی گردید. صحت سنجی مدل با داده های اندازه گیری شده سرعت جريان در دو حالت پرآبی و کم آبی انجام شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در فصل پرآبی، الگوی غالب جريان از غرب به شرق و جنوب شرقی است، در حالی که در فصل کم آبی، جريان ها به سمت مصب و در امتداد نوار ساحلی جهت گیری می کنند. بر اساس مدل سازی انجام شده، دامنه تغییرات سرعت جريان در فصل پرآبی بین ۰.۰۱ تا ۱.۵ متر بر ثانیه است. همچنین در برخی زمان ها سرعت جريان تا حدود ۳.۵ متر بر ثانیه نیز افزایش یافته است که علت آن افزایش دبی رودخانه (حدود ۳۷۰ مترمکعب بر ثانیه) و وقوع بادهای طوفانی بوده است. علاوه بر این، نتایج مقایسه مدل با داده های مشاهداتی، هم پوشانی و دقت بسیار قابل قبولی را نشان می دهد که بیانگر آن است که نرم افزار MIKE 3 ابزاری قدرتمند، معتبر و کارآمد برای شبیه سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی مصب ها و پدیده های دریایی می باشد.

استناد: کاملي، فروغ؛ يوسفی کبريا، داريوش؛ صالحی، طاهره. (۱۴۰۴). تحليل هيدروديناميكي امواج و الگوي جريان هاي ساحلي در مصب رودخانه با

استفاده از مدل MIKE 21/3 FM. مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۲)، ۱۶۷-۱۵۲.

DOI. 110.22126/amcen.2025.13282.1060



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

مصب‌ها یکی از پیچیده‌ترین و پویاترین سامانه‌های هیدرودینامیکی در مناطق ساحلی به شمار می‌روند و نقش مهمی در تنظیم تبادل جرم، انرژی و رسوب میان رودخانه و دریا دارند. این نواحی علاوه بر کارکردهای زیست‌محیطی، از نظر اقتصادی و اجتماعی نیز اهمیت بالایی دارند زیرا کانون فعالیت‌های حمل‌ونقل دریایی، صیادی، گردشگری و زیستگاه‌های کلیدی گونه‌های آبی هستند. در دهه‌های اخیر، تشدید فشارهای انسانی شامل توسعه شهری و صنعتی، برداشت بی‌رویه منابع، آلودگی و تغییر رژیم جریان رودخانه‌ها موجب شده پایداری اکولوژیک مصب‌ها بیش از گذشته در معرض تهدید قرار گیر گیرد [۱-۳]. در چنین شرایطی، فهم دقیق پویایی‌های هیدرودینامیکی، به‌ویژه الگوهای جریان، موج، تلاطم و برهم‌کنش موج و جریان برای مدیریت صحیح، پیش‌محیط‌زیست و طراحی سازه‌های ساحلی ضروری است [۴، ۵].

در میان مصب‌های ساحلی ایران، مصب رودخانه سفیدرود یکی از حساس‌ترین مناطق از نظر دلتاسازی، تولید رسوب، و پخش آلودگی در سواحل جنوبی دریای خزر محسوب می‌شود. سفیدرود با دبی قابل توجه و بار رسوبی بالا، نقش مهمی در تغذیه سواحل، پایداری اکوسیستم‌های شیلاتی و آبیاری اراضی کشاورزی دارد. با این حال، در سال‌های اخیر توسعه فعالیت‌های صنعتی، تغییر کاربری اراضی و ورود آلاینده‌های شهری و کشاورزی موجب افزایش نگرانی‌ها نسبت به کیفیت محیطی ناحیه مصب شده است. در چنین شرایطی، تحلیل دقیق ویژگی‌های هیدرودینامیکی این منطقه می‌تواند در ارزیابی انتشار آلاینده‌ها، انتقال رسوب و پایداری ساحل نقش کلیدی داشته باشد [۶-۸].

اگرچه اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق‌ترین روش برای تعیین الگوی موج و جریان در یک منطقه به شمار می‌رود، اما برای پهنه‌های وسیع، این روش به‌تنهایی پاسخگو نبوده و بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. از این‌رو، استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی فرآیندهای دریایی نظیر جریان، موج، انتشار آلاینده‌ها، نوسانات سطح آب و انتقال رسوب امری رایج و ضروری شده است زیرا این مدل‌ها علاوه بر کاهش هزینه و زمان، امکان تغییر پارامترها و بهبود شرایط شبیه‌سازی را فراهم می‌کنند [۹، ۵، ۶]. در میان مدل‌های موجود، خانواده مدل‌های MIKE 21/3 FM به دلیل حل معادلات

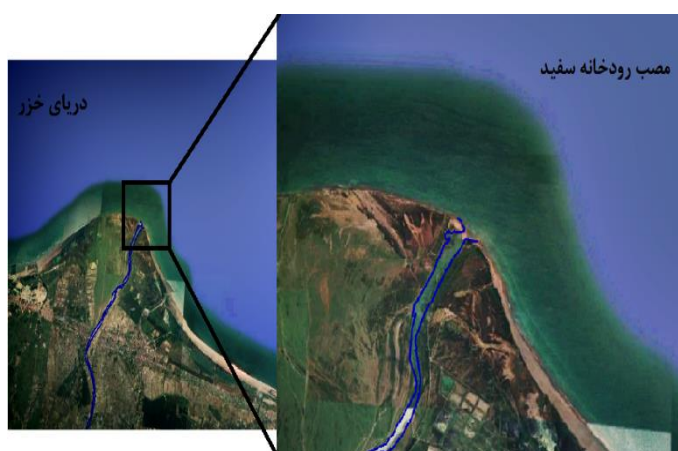
ناویراستوکس با شبکه انعطاف‌پذیر، امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی، در نظرگیری برهم‌کنش موج جریان و قابلیت تنظیم دقیق شرایط مرزی، از دقت و مقبولیت علمی بالایی برخوردار است [۱۰-۱۲]. طی سال‌های اخیر، پیشرفت قابل توجهی در مدل‌سازی هیدرودینامیکی دریای خزر و مناطق ساحلی پیرامون آن حاصل شده است. مدل‌سازی سه‌بعدی دما و جریان در مقیاس حوضه‌ای نشان داده است که استفاده از داده‌های باد و فشار جوی می‌تواند بازنمایی دقیقی از ساختار حرارتی و الگوی چرخش Anticyclonic در دریای خزر فراهم آورد [۷]. بررسی الگوی جریان در بخش جنوب‌شرقی دریای خزر نیز بیانگر آن است که تحت اثر بادهای متغیر، جریان‌های ساحلی Longshore در لایه‌های سطحی شکل گرفته و در لایه‌های میانی، دو سیستم چرخشی غالب می‌شوند در حالی که در لایه‌های عمیق‌تر، پدیده وارونگی فاز تا حدود ۱۸۰ درجه نسبت به لایه‌های سطحی مشاهده می‌شود [۸].

شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی مبتنی بر مدل‌های هیدرواستاتیک نشان داده‌اند که الگوی کلی گردش دریای خزر قابل بازتولید است، با این حال تغییرات فصلی و مکانی می‌تواند منجر به تفاوت‌های محسوس در شدت و جهت جریان‌ها شود [۹]. در حوزه جریان‌های جزرومدی، توسعه مدل‌های دینامیکی مبتنی بر موج کلون به عنوان جایگزینی سریع‌تر و کاراتر نسبت به مدل‌های کامل MIKE 3-HD معرفی شده و قابلیت آن‌ها در شبیه‌سازی کوتاه‌مدت پدیده‌هایی مانند نشت نفت به اثبات رسیده است [۱۰].

در مطالعات مرتبط با اثر سازه‌های ساحلی، نتایج مدل‌سازی عددی امواج در اطراف آبشکن‌های مستغرق نشان می‌دهد که تغییر تراز تاج سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در استهلاک انرژی موج، شکل‌گیری چرخه‌ها و تمرکز یا کاهش رسوب در محدوده سازه دارد [۱۱]. افزون بر این، تحلیل هیدرودینامیک و تحولات مورفولوژیک در مصب سفیدرود با بهره‌گیری از مدل‌های عددی و داده‌های سنجش‌ازدور نشان داده است که عوامل اصلی شامل دبی رودخانه، بار رسوبی و نوسانات تراز آب دریای خزر، ساختار جریان و الگوی رسوب‌گذاری را به‌طور مستقیم کنترل می‌کنند [۱۲].

پژوهش‌های انجام شده در دریای خزر طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد که بخش عمده مطالعات در مقیاس کل حوضه و بر تحلیل جریان‌های بزرگ‌مقیاس، الگوی چرخش (gyres)، اثر باد و تغییرات

مجموعه‌ای از شاخه‌های کوچکتر در استان گیلان تشکیل شده و در نهایت در شهر کیشهر وارد دریای خزر می‌شود [۱۷]. طول رودخانه از شاخه اصلی قزل‌اوزن حدود ۸۰۰ کیلومتر و مساحت حوضه آبریز آن حدود ۲۵۹۵۲ کیلومتر مربع است. میانگین حجم رواناب سالانه این رودخانه در سال ۲۰۱۹ حدود ۴۰۳ میلیارد متر مکعب گزارش شده و بار رسوب سالانه آن به ۳۰ میلیون تن می‌رسد. تراز رودخانه ورودی به دریا با در نظر گرفتن نوسانات سطح آب، حدود ۲۶.۵۷ متر نسبت به کد صفر بندر شهید رجایی است [۱۷، ۱۸].



شکل ۱. موقعیت جغرافیای مصب رودخانه سفیدرود

۲-۲. مدل عددی DHI Mike

برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی در مقیاس‌های بزرگ و کوچک، از مجموعه مدل عددی DHI MIKE که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک توسعه داده شده است، استفاده شد. این سیستم به طور گسترده برای شبیه‌سازی پدیده‌های مربوط به مصب رودخانه‌ها، مناطق ساحلی، دریاچه‌ها و محیط‌های کم‌عمق استفاده می‌شود و قادر به مدل‌سازی سه‌بعدی جریان‌های سطح آزاد، پیش‌بینی موج، انتقال رسوب، کیفیت آب و پراکندگی آلاینده‌ها است. در این مطالعه، از ماژول‌های MIKE 21 SW برای مدل‌سازی موج و از مدل جریان MIKE 3 برای مدل‌سازی سه‌بعدی جریان استفاده شد.

ماژول SW یک مدل طیفی-عددی پیشرفته است که بر پایه معادله تعادل کنش موج عمل کرده و به‌صورت دقیق قادر به پیش‌بینی

دما تمرکز داشته‌اند [۱۳، ۱۴]. همچنین برخی مطالعات در نواحی ساحلی به بررسی الگوی موج، جریان‌های سوحلی (Longshore)، انتقال رسوب و تغییرات خط ساحلی با استفاده از مدل‌های MIKE 21، Delft3D و FVCOM پرداخته‌اند [۱۵، ۱۶]. اغلب تحقیقات از مدل‌های دوبعدی بهره برده‌اند و رفتار سه‌بعدی جریان، تغییرات عمقی سرعت و الگوهای گردشی در لایه‌های مختلف آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر داده‌های میدانی مستقل برای دوره‌های کم‌آبی و پرآبی، کمتر در کالیبراسیون، صحت‌سنجی گسترده و فصلی و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده‌اند. بنابراین مطالعه‌ای جامع، سه‌بعدی، چندمقیاسی و با صحت‌سنجی میدانی کافی برای تبیین رفتار هیدرودینامیک مصب سفیدرود به عنوان یکی از حساس‌ترین نواحی ساحلی از نظر فشارهای اکولوژیک ضروری است.

در این تحقیق، مدل‌سازی امواج در مقیاس بزرگ (کل حوزه دریای خزر) و در مقیاس کوچک (مصب سفیدرود) با استفاده از نرم‌افزار MIKE 21 ماژول SW انجام شود تا الگوی امواج، تمرکز انرژی و تنش‌های ناشی از آن‌ها در منطقه تعیین و اثرات هم‌زمان باد، دبی رودخانه، شرایط مرزی امواج و توپوگرافی بستر در قالب یک مدل هیدرودینامیکی جامع بررسی شد. سپس با استفاده از MIKE 3 و ماژول Flow Model الگوی سه‌بعدی جریان‌های مصب سفیدرود شبیه‌سازی شده است تا نحوه ورود آب رودخانه به دریا و رفتار دینامیکی دریا در محدوده مصب با دقت بیشتری ارزیابی شود. همچنین با صحت‌سنجی داده‌ها در دو فصل پرآبی و کم‌آبی، الگوهای جریان و مؤلفه‌های سرعت به‌صورت سه‌بعدی استخراج شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

مصب رودخانه سفیدرود، به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق انتقال آب شیرین به دریای خزر، در مختصات جغرافیایی ۳۷.۴۶۹۲° شمالی و ۴۹.۹۴۲۲° شرقی و در محل تلاقی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس قرار دارد (شکل ۱). این رودخانه از ادغام دو شاخه اصلی قزل‌اوزن و شاهرود، در منطقه منجیل و

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \quad (4)$$

متغیرهای موجود در معادلات شامل:

t زمان (S)؛ x, y, z مختصات دستگاه کارتزین (m) ($x=x'$ و $y=y'$)؛ η تراز سطح آب (m)؛ $h = \eta + d$ عمق کل آب (m)؛ d عمق آب ساکن (m)؛ u, v, w مولفه های سرعت در جهت های x, y, z (m/s)؛ $f = 2\Omega \sin \phi$ پارامتر کریولیس^۱ (s-1)؛ Ω سرعت دورانی زوایه ای زمین؛ ϕ عرض جغرافیایی؛ g شتاب ثقلی زمین (m/s²)؛ ρ چگالی آب (kg/m³)؛ ρ_0 چگالی آب اولیه (ناشی از شرایط اولیه) (kg/m³)؛ $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ تنش تشعشعی امواج (N/m²)؛ vt ویسکوزیته گردابی قائم^۲؛ p_a فشار اتمسفریک (kg/m/s²)؛ S دبی ناشی از چشمه های نقطه ای (مترکز) (m³/s)؛ u_s, v_s مولفه های سرعت آبی که به محیط وارد یا خارج می شود. hF_u و hF_v ترم های پخش افقی هستند [۱۹].

۴-۲. اجرای مدل

مرزهای باز دریایی در جهات شمالی، شرقی و غربی به صورت مرز خروجی/ورودی تعریف شدند که شرایط آنها شامل نوسانات سطح آب و مؤلفه های سرعت از خروجی مدل سه بعدی بزرگ مقیاس دریای خزر (MIKE 3) استخراج و اعمال شد. مرز بالادست رودخانه سفیدرود به صورت مرز ورودی با اعمال دبی زمانی مشخص در نظر گرفته شد. مرز کف به عنوان مرز جریان ناپذیر با اعمال تنش برشی بستر بر اساس ضریب زبری تعریف گردید و سطح فوقانی مدل

مشخصات موج در سواحل، مصبها و پهنه های باز دریا تحت اثر باد، جریان و توپوگرافی بستر می باشد.

معادله تعادل کنش موج در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

C_x و C_y سرعت های انتشار کنش موج در جهت افقی (m/s)، N تغییر چگالی طیفی موج، C_σ سرعت انتشار کنش موج در فضای بسامدی، C_θ سرعت انتشار کنش موج در فضای جهتی برحسب درجه و جمله S در سمت راست معادله شامل اثرات تولید انرژی باد، شکست موج، زبری بستر و اندرکنش های غیرخطی است [۱۹].

۳-۲. مدل جریان Flow model

مدل جریان سه بعدی MIKE 3 بر اساس معادلات ناویر استوکس تراکم ناپذیر با فرض فشار هیدرواستاتیک است و معادلات حاکم با روش حجم محدود حل می شوند. شبکه در جهت افقی به صورت نامنظم (مش بدون ساختار) و در جهت عمودی به صورت ترکیبی از لایه های σ و Z تعریف شده است.

لایه های σ در این سیستم، مختصات عمودی به صورت نسبی از سطح آزاد تا بستر تعریف می شوند؛ به این معنی که تعداد لایه ها در همه جا ثابت است اما ضخامت هر لایه با عمق تغییر می کند. این روش برای مناطق با توپوگرافی متغیر (مثل نواحی ساحلی یا مصبها) بسیار مناسب است.

لایه های Z در این حالت، لایه ها در عمق های مطلق ثابت تعریف می شوند (مانند مختصات کارتزین کلاسیک). این روش در نواحی عمیق تر یا با تغییرات سطحی اندک دقیق تر است.

این ویژگی امکان افزایش دقت در مناطق حساس مانند مجاورت ساحل و مصب رودخانه ها را فراهم می کند. معادله پیوستگی:

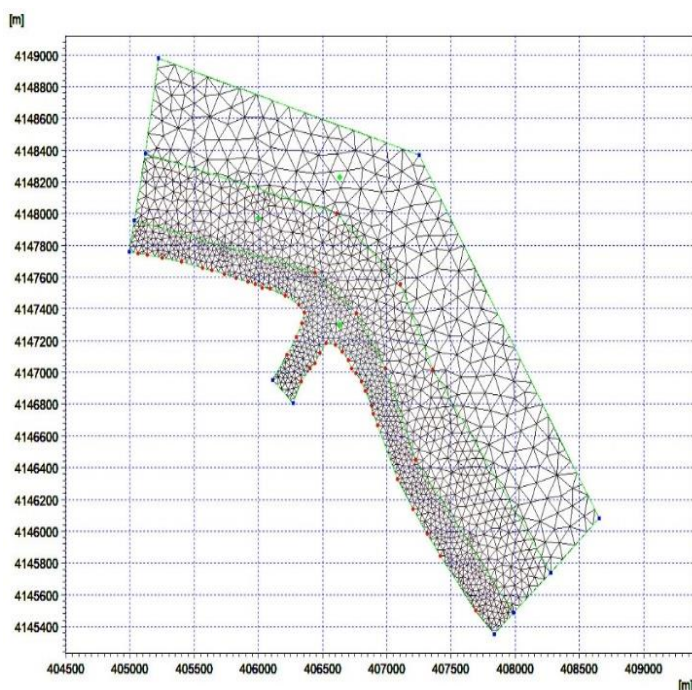
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hs \quad (2)$$

معادلات مومنوم در جهات x و y :

¹ Coriolis Parameter

² Vertical eddy viscosity

در مدل کوچک‌مقیاس، ابعاد شبکه در محدوده نزدیک مصب به صورت موضعی ریزتر تعریف شد تا دقت شبیه‌سازی در ناحیه بحرانی افزایش یابد. شبکه نهایی شامل ۳۸۵۷ گره و ۷۳۰۲ المان مثلثی و ۱۰ لایه قائم با تفکیک ۴۰ متری می باشد. این میزان تفکیک مکانی امکان شبیه‌سازی دقیق الگوی ورود جریان رودخانه، اندرکنش موج-جریان و تغییرات تراز سطح آب در ناحیه مصب را فراهم می‌کند. شکل ۳ شبکه‌بندی مدل کوچک‌مقیاس مصب را نشان می‌دهد.



شکل ۳. شبکه‌بندی کوچک مقیاس مصب سفیدرود

۳. نتایج و بحث

۳-۱. کالیبراسیون مدل و ارزیابی اولیه عملکرد

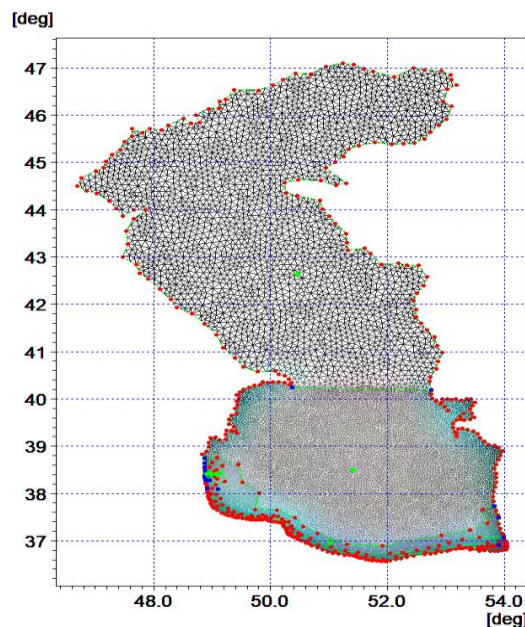
به منظور بررسی رفتار سیستم در شرایط دینامیکی متفاوت، شبیه‌سازی موج و جریان در دو دوره فصل پرآبی همزمان با افزایش حجم رواناب رودخانه و رخداد طوفان‌ها و فصل کم‌آبی در شرایط آرام و با حداقل حجم رواناب انجام شد. این انتخاب براساس نمودار حجم رواناب سالانه (شکل ۴) و داده‌های مرکز تحقیقات دریای خزر انجام شد. این دوره‌بندی امکان تحلیل رفتار جریان تحت دو رژیم متفاوت انرژی موج و ورودی رودخانه را فراهم می‌سازد.

به صورت سطح آزاد با فشار اتمسفری ثابت و امکان نوسان تراز آب لحاظ شد.

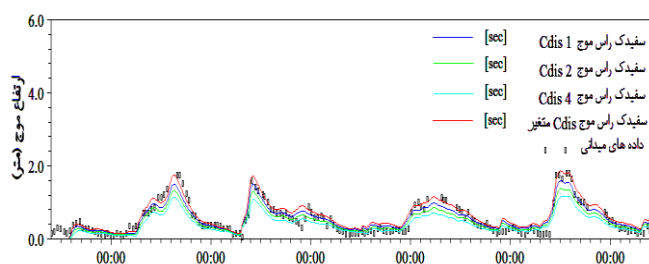
برای تهیه هندسه و شبکه‌بندی در اجرای مدل، از نقشه‌های هیدروگرافی منطقه برای تعریف مرزهای ساحلی، عمق‌سنجی و توپوگرافی بستر استفاده شد. شبکه‌بندی هر دو مدل بزرگ مقیاس و کوچک‌مقیاس به صورت یک شبکه مثلثی بدون ساختار انتخاب شد که امکان افزایش وضوح در مناطق حساس مانند ناحیه مصب را فراهم می‌کند و از نظر محاسباتی کارآمد است.

برای مدل موج، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی نسبت به سه اندازه‌گیری مختلف شامل ۰/۰۲-۰/۲۵، ۰/۰۱-۰/۲ و ۰/۰۰۴-۰/۲۵ کیلومتر انجام شد. مقایسه نتایج ارتفاع موج حاصل از این سه شبکه با داده‌های اندازه‌گیری شده سازمان بنادر و دریانوردی نشان داد که مدل نسبت به تغییرات اندازه‌گیری شده حساسیت قابل توجهی ندارد.

بنابراین شبکه با ابعاد ۰.۰۲ - ۰.۲۵ km به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد، زیرا ضمن حفظ دقت، زمان محاسبات را به طور معناداری کاهش می‌دهد [۲۰]. برای مدل سه بعدی بزرگ‌مقیاس، شبکه قائم شامل ۱۰ لایه با گام عمودی ۴۰ متر تعریف شد. این لایه‌بندی امکان بازنمایی تغییرات عمقی جریان و دما را فراهم می‌کند. شکل ۲ شبکه‌بندی بزرگ‌مقیاس دریای خزر را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. شبکه‌بندی بزرگ مقیاس دریای خزر



شکل ۶. کالیبراسیون سفیدک راس موج با Mike 21

جدول ۱ تمامی پارامترها در شبیه سازی موج با Mike 21 پس از چندین بار اجرای مدل و انتخاب مناسب ترین پارامتر در مصب سفیدرود نشان می دهد.

جدول ۱. مجموعه پارامترهای تنظیم شده در اجرای مدل موج با Mike 21

پارامتر	مقدار
گام زمانی	۶۰ ثانیه
تعداد کل گام زمانی	۴۳۲۰۰
روش دقت محاسباتی	Low Order
شکست موج	۰/۸
زبری بستر	$m \cdot 0.02$
سفیدک راس موج	متغیر Cdis DELTA dis ۰/۸

۲-۳. الگوهای باد و امواج در دوره های پربابی و کم آبی

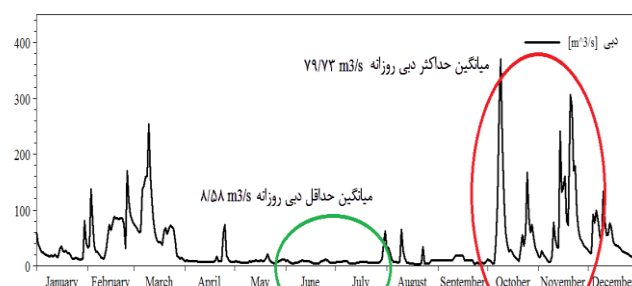
تحلیل گل باد و گل موج مربوط به دو فصل مورد مطالعه (شکل های ۷ و ۸)، حاکی از غالب بودن بادهای شمال شرقی و شمالی در هر دو حالت است. این الگوی باد سبب می شود که جهت غالب امواج نیز عمدتاً از همین راستا شکل گیرد.

در فصل پربابی، با بیشینه سرعت باد حدود 9.7 m/s ، ارتفاع موج تا 3.6 m ثبت شد؛ درحالی که در فصل کم آبی، علی رغم ثبت بیشینه باد نزدیک 9.9 m/s ، ارتفاع موج حداکثر 2.4 m بود. دلیل این اختلاف، افزایش طول تبادل انرژی موج با سطح آب در شرایط طوفانی و همراهی آن با افزایش حجم رواناب رودخانه سفیدرود است که موج های قوی تر ایجاد می کند.

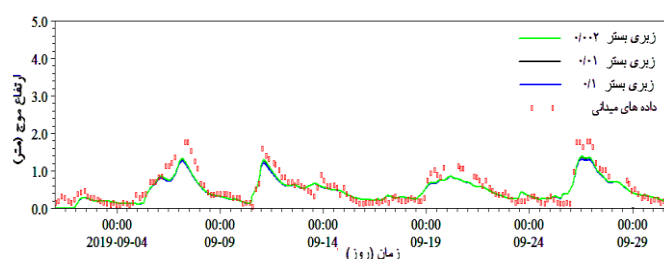
این نتایج کاملاً با مدل سازی های بزرگ مقیاس پیشین در دریای خزر سازگار است، به گونه ای که مطالعات اخیر نشان داده اند بادهای

برای اطمینان از دقت شبیه سازی و انتخاب مناسب ترین پارامترهای ورودی، ابتدا فرایند کالیبراسیون مدل های موج و جریان اجرا شد. کالیبراسیون دقیق در مدل های هیدرودینامیکی، به ویژه در محیط های پیچیده ای مانند مصب سفیدرود، نقشی بنیادین در کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری نتایج دارد. بر همین اساس، مدل طیفی موج MIKE 21 SW ابتدا در معرض تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی شامل زبری بستر، شکست موج و ضریب سفیدک راس موج قرار گرفت.

مقدار واقعی ضریب زبری بستر معمولاً بین 0.001 تا 0.1 متر تغییر می کند، برای این پارامتر سه مقدار 0.002 ، 0.001 و 0.1 متر آزموده شد. نتایج مقایسه ارتفاع موج شبیه سازی شده و داده های میدانی نشان داد مقدار 0.002 مناسب ترین مقدار بوده و کمترین انحراف را ایجاد می کند. بنابراین بدلیل عمق زیاد آب حساسیت مدل به زبری بستر کمتر است. (شکل ۵). از سوی دیگر، چهار مقدار برای سفیدک راس موج (1 ، 2 ، 4 و حالت متغیر) بررسی شد. مقدار متغیر Cdis کمترین اختلاف را با موج نگار ثبت شده نشان داد و به عنوان پارامتر بهینه انتخاب شد (شکل ۶). جزئیات پارامترهای نهایی در جدول ۱ ارائه شده است.

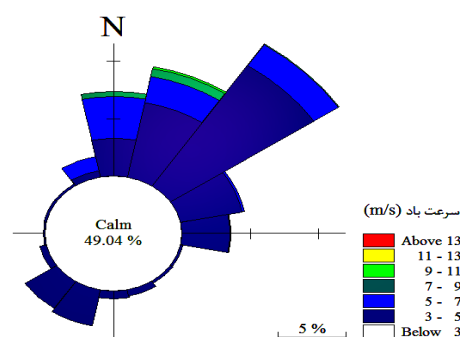
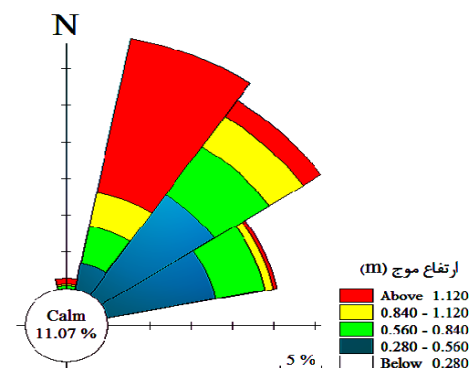


شکل ۴. تغییرات حجم رواناب در دو دوره فصل پربابی و کم آبی

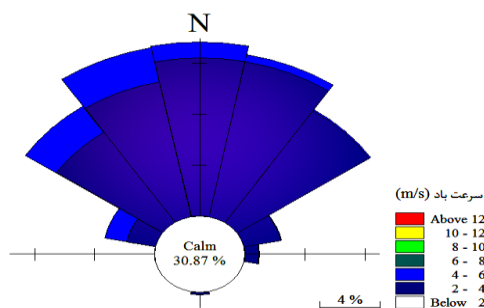
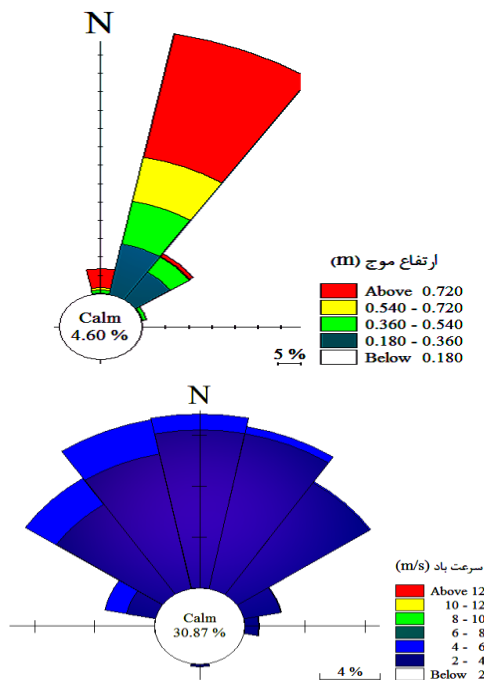


شکل ۵. کالیبراسیون زبری بستر مدل موج با Mike21

شمالی و شمال شرقی نقش اصلی در شکل‌گیری میدان موج حاشیه جنوبی خزر دارند [۲۱، ۲۲].



شکل ۷. به ترتیب گل‌موج و گلباد در فصل پربابی



شکل ۹. به ترتیب گل‌موج و گلباد در فصل کم‌آبی

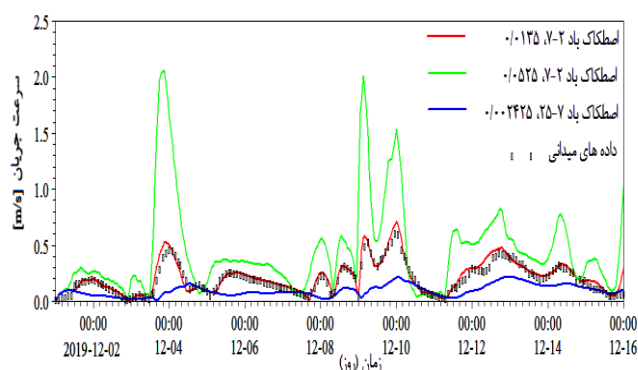
پس از نهایی‌شدن شبیه‌سازی موج، مدل جریان سه‌بعدی MIKE 3 FM برای دوره ۱۵ روزه و با گام زمانی ۶۰ ثانیه اجرا شد. تحلیل حساسیت مدل جریان نشان داد پارامترهای مقاومت بستر و اصطکاک باد بیشترین اثر را بر روی سرعت‌های سطحی و پروفیل‌های عمقی دارند.

بنابراین این دو پارامتر به‌عنوان پایه کالیبراسیون انتخاب شدند. باد ورودی از داده‌های ECMWF با تفکیک فضایی-زمانی اعمال شد. نتایج مدل با داده‌های میدانی حجم رواناب، سرعت و نوسانات سطح آب مقایسه شد که نشان‌دهنده تطابق قابل‌قبول در هر دو فصل است. در بررسی پروفیل‌های عمقی سرعت مشخص شد که مدل توانسته الگوی برش عمقی ناشی از تغییر چگالی، جریان رودخانه و اثر باد را بازتولید کند. این موضوع یکی از مزیت‌های مدل سه‌بعدی نسبت به مدل‌های دوبعدی پیشین در این منطقه است [23, 24].

در دوره پربابی، مدل نشان داد که جریان غالب در ناحیه مصب از غرب به شرق و جنوب شرقی است. سرعت جریان در برخی روزهای طوفانی تا ۳-۳.۵ m/s افزایش یافته است که نتیجه هم‌افزایی حجم رواناب بالای رودخانه (370 m³/s) و موج‌های شدید ناشی از بادهای شمالی است. این نتایج با مطالعات انجام‌شده در دریای خزر مبنی بر تقویت جریان‌های ساحلی در دوره‌های طوفانی سازگار است [۲۲]. در فصل کم‌آبی، شدت جریان کاهش یافته و الگوهای غالب به سمت جریان‌های ساحلی طولی (longshore) و حرکت بازگشتی آرام به سمت مصب تغییر می‌کند. تمرکز جریان در لایه‌های سطحی و افت سرعت در لایه‌های میانی و پایین‌تر نیز قابل مشاهده است. این الگو با نتایج مطالعات پیشین در مورد رفتار تابستانی جریان‌های خزر جنوبی مطابقت دارد [۲۴].

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار هیدرودینامیکی مصب سفیدرود تابعی از برهم‌کنش سه عامل اصلی حجم رواناب رودخانه، میدان موج ناشی از بادهای غالب شمالی و توپوگرافی و هندسه خاص مصب است. این سه عامل با یکدیگر الگوهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند که در شبیه‌سازی سه‌بعدی به‌خوبی بازتاب یافته است. در مطالعات بزرگ‌مقیاس دریای خزر، گزارش شده که بادهای شمالی و شمال شرقی محرک اصلی جریان‌های ساحلی و گردابه‌های منطقه‌ای هستند [۲۲، ۲۳]. نتایج حاضر این الگو را در مقیاس محلی مصب سفیدرود نیز تأیید می‌کند. پژوهش‌های سه‌بعدی اخیر

نتایج نشان داد وضعیت اول، یعنی سرعت باد ۲-۷ m/s همراه با ضریب اصطکاک ۰.۰۱۳۵، بیشترین انطباق را با داده‌های میدانی دارد و بنابراین به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. روند مقایسه مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۱۱ - ۰/۰۰۵۵ - ۰/۰۰۱۲۵۵ ارائه شده است.



شکل ۱۰. کالیبراسیون اصطکاک باد مدل جریان با Mike 3

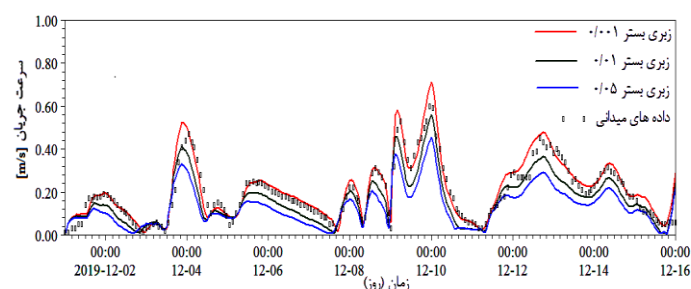
مجموعه کامل پارامترهای به کاررفته در اجرای نهایی مدل جریان Mike 3، شامل روش دقت محاسباتی، مقاومت بستر، اصطکاک باد، لزجت گردابه‌ای و جزئیات گام زمانی، در جدول ۲ ارائه شده است. این مقادیر پس از چندین بار اجرای مدل و ارزیابی حساسیت انتخاب شده‌اند تا بالاترین دقت ممکن در شبیه‌سازی هیدرودینامیک مصب سفیدرود حاصل شود.

جدول ۲. مجموعه پارامترهای تنظیم شده در اجرای مدل جریان با Mike 3

پارامتر	مقدار
گام زمانی	۳۰ ثانیه
تعداد کل گام زمانی	۴۳۲۰۰
روش دقت محاسباتی	High Order
لزجت گردابه‌ای افقی	اسماگورینسکی ۰/۲۸
لزجت گردابه‌ای قائم	$m^2/s \cdot 4$
مقاومت بستر	$m/0.01$
اصطکاک باد	سرعت باد ۲-۷ ضریب اصطکاک ۰/۰۰۱۲۵۵ - ۰/۰۱۳۵

نشان داده‌اند که تغییر فاز جریان بین لایه‌های سطحی و میان‌عمق در دریای خزر قابل توجه است [۲۴]. این پدیده در خروجی این مدل نیز دیده شد، به‌ویژه در فصل کم‌آبی که اختلاف فاز ۱۵۰-۱۸۰ درجه بین لایه‌های سطحی و زیرسطحی مشاهده گردید. در مطالعات مرتبط با آبشکن‌ها و موج در جنوب خزر [۲۵] و همچنین مدل‌سازی مورفولوژی مصب سفیدرود [۲۶]، تأکید شده است که امواج نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال رسوب دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که در فصل پرآبی قابلیت انتقال رسوب به‌واسطه شدت موج و جریان بسیار بیشتر است. در اغلب مطالعات پیشین، مدل دویعدی به عنوان ابزار شبیه‌سازی استفاده شده است، در حالی که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مدل سه‌بعدی MIKE 3 با توانایی بازنمایی ساختار لایه‌ای جریان، برای مصب‌های بزرگ و عمیق نظیر سفیدرود ضروری است.

در فرایند کالیبراسیون مدل جریان، مقاومت بستر برای سه مقدار ۰.۰۰۱، ۰.۰۱ و ۰.۰۵ متر مورد آزمون قرار گرفت. مقایسه خروجی مدل با داده‌های میدانی سرعت جریان نشان داد که مقدار 0.001 مناسب‌ترین عملکرد را دارد و کمترین اختلاف را با اندازه‌گیری‌ها ایجاد می‌کند. بر این اساس، ضریب مقاومت بستر ۰.۰۰۱ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. شکل ۹ تطابق خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. کالیبراسیون مقاومت بستر مدل جریان با Mike 3

در ادامه، کالیبراسیون اصطکاک باد در سه حالت مختلف انجام شد. حالت نخست شامل سرعت باد ۲ تا ۷ m/s همراه با ضریب ۰/۰۰۱۲۵۵ - ۰/۰۱۳۵، حالت دوم برای سرعت ۳ تا ۷ m/s با ضریب ۰/۰۰۱۲۵۵ - ۰/۰۰۵۵ و حالت سوم برای سرعت ۷ تا ۲۵ m/s با ضریب ۰/۰۰۱۲۵۵ - ۰/۰۰۲۴۲۵ تنظیم گردید. مقایسه

جذر متوسط مربع خطاها:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2}$$

درصد خطا:

$$ERROR = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \cdot 100$$

در این معادلات، X داده‌های اندازه‌گیری شده، Y نتایج شبیه‌سازی و $\bar{x}$ و $\bar{y}$ متوسط هر یک از این دو سری را نشان می‌دهند و n تعداد داده‌ها هستند. براساس مطالعات پیشین، مقادیر قابل قبول در مدل‌های جریان برای ضریب همبستگی 0.7 تا 0.9 و جذر میانگین مربع خطا 0.1 تا 0.7 و درصد خطا هرچه نزدیک‌تر به صفر، عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل در هر دو فصل پرآبی و کم‌آبی، از نظر شاخص‌های آماری در محدوده قابل قبول قرار دارد و تطابق قابل توجهی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. بنابراین مدل هیدرودینامیکی اجرا شده از دقت و پایداری لازم برای تحلیل الگوی جریان در مصب سفیدرود برخوردار است.

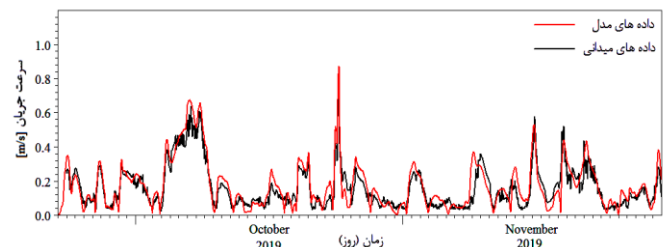
جدول ۳. میزان دقت مدل کوچک مقیاس مصب سفیدرود

فصل	ضریب همبستگی	جذر متوسط مربع خطاها	درصد خطا
پرآبی	۰/۹	۰/۵۷	۱۳/۲۴
کم آبی	۰/۹	۰/۴۳	۱۵/۷۶

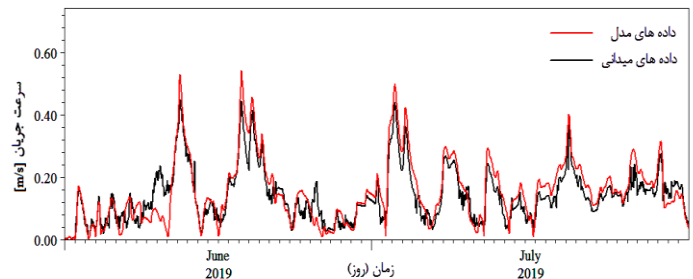
۳-۳. الگوی جریان در فصل پرآبی

به منظور تحلیل رفتار هیدرودینامیکی منطقه، الگوی جریان و جهت‌گیری آن در دو فصل پرآبی و کم‌آبی مورد بررسی قرار گرفت. در فصل پرآبی (شکل ۱۳)، با توجه به افزایش قابل توجه حجم رواناب رودخانه سفیدرود در این دوره بین 12.5 تا $133 \text{ m}^3/\text{s}$ متغیر بوده است، بخش عمده جریان از دهانه رودخانه به سمت دریا هدایت می‌شود. این افزایش حجم رواناب، همراه با بادهای شمالی و شمال‌شرقی و توپوگرافی پیچیده بستر، موجب شکل‌گیری جریان‌هایی با الگوی ترکیبی شامل جریان‌های خروجی رودخانه‌ای

برای ارزیابی عملکرد مدل در بازتولید شرایط واقعی، صحت‌سنجی در دو دوره هیدرولوژیکی فصل پرآبی (اکتبر و نوامبر) و فصل کم‌آبی (ژوئن و ژوئیه) انجام شد. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که مدل توانسته است الگوهای تغییرات سرعت جریان را در هر دو دوره با دقت قابل قبول بازسازی کند. اختلاف بین خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار ناچیز است و روند زمانی تغییرات نیز تقریباً منطبق است. بنابراین پارامترهای انتخاب شده در فرایند کالیبراسیون از دقت و کارایی مناسبی برخوردار بوده و مدل توانایی کافی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک مصب سفیدرود را دارد.



شکل ۱۱: صحت‌سنجی مدل جریان در فصل پرآبی با Mike 3



شکل ۱۲. صحت‌سنجی در فصل کم‌آبی با Mike 3

برای تعیین میزان دقت مدل کوچک‌مقیاس مصب سفیدرود، از شاخص‌های نیمه‌تجربی و آماری شامل ضریب همبستگی (CC)، جذر میانگین مربع خطاها ($RMSE$) و درصد خطا ($ERROR$) استفاده شد. روابط این شاخص‌ها مطابق معادلات زیر تعریف می‌شوند:

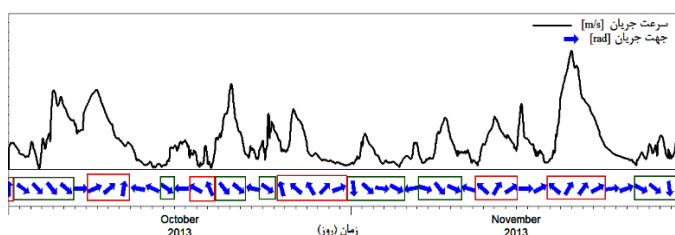
ضریب همبستگی:

$$CC = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \times \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، الگوی هیدرودینامیک مصب سفیدرود با به کارگیری مدل موج MIKE 21 و مدل سه بعدی جریان MIKE 3، تحت دو رژیم هیدرولوژیک پرآبی و کم آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. کالیبراسیون دقیق مدل ها بر اساس داده های میدانی ارتفاع موج، سرعت جریان، دبی رودخانه و باد، نشان داد که انتخاب مقادیر بهینه برای زبری بستر، ضریب سفیدکراس موج، مقاومت بستر و اصطکاک باد تأثیر مستقیم بر بازتولید الگوی واقعی جریان دارد. خروجی مدل های کالیبره شده در هر دو فصل پرآبی و کم آبی، با داده های اندازه گیری شده سازگاری مناسبی داشتند و شاخص های آماری شامل CC، RMSE و ERROR عملکرد قابل قبول مدل را تأیید کردند. همچنین نتایج شبیه سازی موج و جریان نشان داد که رفتار هیدرودینامیکی مصب به شدت وابسته به برهم کنش مؤلفه های بادهای غالب شمالی و شمال شرقی، دبی رودخانه و مورفولوژی بستر است. در فصل پرآبی، افزایش قابل توجه دبی رودخانه همراه با رخداد طوفان ها موجب شکل گیری جریان های قوی خروجی از مصب، تقویت جریان های ساحلی غرب به شرق و ایجاد گردابه های محلی در ناحیه دهانه می شود. برعکس، در فصل کم آبی، کاهش ورودی رودخانه سبب می شود جریان غالب تحت تأثیر باد و موج از دریا به سمت مصب هدایت گردد و الگوی یکنواخت تری با سرعت کمتر شکل گیرد. توانایی مدل سه بعدی MIKE 3 نسبت به مدل های دوبعدی گزارش شده در مطالعات گذشته، بازنمایی الگوی لایه بندی عمقی جریان، تفاوت فاز بین جریان های سطحی و زیرسطحی و تغییرات زمانی-مکانی سرعت با دقتی بسیار بالاتر است و نتایج نشان داد استفاده از رویکرد چندمقیاسی و سه بعدی در تحلیل مصب های بزرگ و پویا نظیر سفیدرود از اهمیت بالایی برخوردار است. در مجموع، نتایج این تحقیق هم درک دقیق تری از سازوکارهای حاکم بر الگوی جریان در مصب سفیدرود ارائه می دهد و همچنین چارچوبی مناسب برای پیش بینی شرایط دینامیکی، تحلیل انتقال رسوب، مدیریت مناطق ساحلی و ارزیابی اثرات محیط زیستی فراهم می سازد. استفاده از این مدل در مطالعات آینده شامل تغییرات مورفولوژی، پخش و انتقال آلاینده ها، کیفیت آب و بررسی سناریوهای تغییر اقلیم می تواند نقش تعیین کننده ای در مدیریت پایدار سواحل جنوبی دریای خزر ایفا کند.

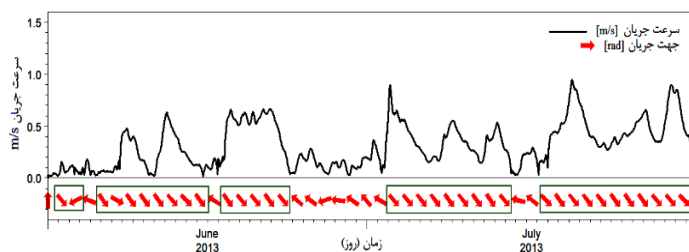
از غرب به شرق و سپس به سمت دریا، جریان های برگشتی و ساحلی ناشی از باد و گردابه های محلی در ناحیه دهانه به دلیل اختلاف سرعت و زاویه برخورد جریان ها می شود. دامنه تغییرات سرعت جریان در این فصل بین $0.1 - 1.5$ m/s است. به طور کلی، الگوی جریان غالب در ناحیه ساحلی غرب مصب در این فصل، در امتداد خط ساحل و به صورت جریان طول ساحلی غرب به شرق مشاهده می شود.



شکل ۱۳. سرعت و جهت جریان در فصل پرآبی با Mike 3

نتایج الگوی جریان در فصل کم آبی (شکل ۱۴) نشان می دهد به دلیل کاهش قابل توجه ورودی رودخانه در محدوده $0.1/4$ تا $0.4/40$ مترمکعب بر ثانیه و بیشترین دبی برابر $62/40$ مترمکعب است. رفتار هیدرودینامیکی این منطقه بیشتر تحت تأثیر موج و باد قرار می گیرد تا دبی رودخانه قرار دارد. در این دوره، بادهای شمالی و شمال شرقی به عنوان نیروی محرکه اصلی جریان عمل می کنند. از آنجا که دبی رودخانه حداقل مقدار سالانه را دارد، جریان غالب از دریا به سمت دهانه مصب و عمدتاً با جهت شمال غربی به جنوب شرقی شکل می گیرد.

امواج ورودی از شمال و شمال شرقی نیز با تقویت جریان غالب، موجب ایجاد الگوی منظم تری نسبت به فصل پرآبی می شوند. سرعت جریان در این فصل در محدوده $0.1/0$ تا 1 متر بر ثانیه قرار دارد که نسبت به فصل پرآبی کاهش محسوسی نشان می دهد.



شکل ۱۴. سرعت و جهت جریان در فصل کم آبی با Mike 3

- [10] Badri, M.A. and P. Wilders, Flow estimation for the Persian Gulf using a Kelvin wave expansion. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2012. 41(3):(p. 249-258.
- [11] H. Afsousbiria, M. A. Lashteh Neshaei, A. Ghabraie, and M. A. Mehrdad, "Numerical study of the effect of submerged breakwaters on wave pattern (Case study: Sefidrud Mouth)," *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 44, no. 77, pp. 13-24, 2015.
- [12] M. Karimi, J. Mohammadvali Samani, and M. Mazaheri, "Investigation of flow pattern and morphological changes of Sefidrud River estuary using MIKE21 model and remote sensing data," in 15th Iranian Hydraulic Conference, 2016.
- [13] Björk, G., et al., Bathymetry and oceanic flow structure at two deep passages crossing the Lomonosov Ridge. *Ocean Science*, 2018. 14(1): p. 1-13.
- [14] Ibrayev, R., et al., Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science*, 2010. 6(1): p. 311-329.
- [15] Liu, Y., et al., Theoretical and experimental study of anti-helical motion for underwater glider. *Applied ocean research*, 2016. 60: p. 121-140.
- [16] Rennie, S.E., A. Brandt, and C.T. Friedrichs, Initiation of motion and scour burial of objects underwater. *Ocean Engineering*, 2017. 131: p. 282-294.
- [17] Krasnozhan, G., H. Lahijani, and G. Voropayev, Evolution of the delta of the Sefidrud River, Iranian Caspian Sea coast, from space imagery. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 1999. 36(4): p. 256-264.
- [18] Ataei H, S., et al., Long-term Caspian Sea level variations based on the ERA-interim model and rivers discharge. *International Journal of River Basin Management*, 2019. 17(4): p. 507-516.
- [19] Naderkhanloo, V., M. Hemmati, and H. Ahmadi, Simulation of Tsunami Waves Using Mike 3 Flow Model FM. 2025.
- [20] Ghanbari, F., M. Adjami, and S. Ataei H, An Analytical Study on the Formation of Submerged Bars in the Southern Coasts of Caspian Sea. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*, 2019. 4(3): p. 1-8.

References

- [1] M. Sadat Kiaee and A. Khaniki, "Investigation of sedimentation and erosion in estuaries under the combined effect of tides and waves perpendicular to the coast using numerical modeling," *Watershed Management Research*, vol. 27, no. 3, pp. 62-74, 2014.
- [2] Z. Eskandari, R. Noori, L. Rasouli, and V. Naseh, "Proposing a new approach for quality management of Sefidrud River based on canonical correlation analysis method," *Environmental Researches*, vol. 5, no. 9, pp. 79-86, 2015.
- [3] S. Ershadhosseini, A. R. Keshtkar, S. M. Hosseini, and A. Afzali, "Analysis of temporal trends of groundwater quality using non-parametric Mann-Kendall test and Sen's slope estimator (Case study: Yazd-Ardakan plain)," *Geography and Environmental Planning*, vol. 32, no. 4, pp. 87-106, 2021.
- [4] H. Hakimzadeh and H. Mohamadnezhad Maryan, "Numerical investigation of sedimentation induced by wave and current in Anzali Port considering breakwater arm expansion," *Maritime Transport Industry*, vol. 2, no. 2, Summer 2016.
- [5] S. Nasimi, S. Sharbati, and S. S. Hosseini, "Investigation of 3D water current model in the southeast basin of the Caspian Sea under the influence of variable wind pattern using MIKE 3 software," *Journal of Modern Technologies in Aquaculture Development*, vol. 6, no. 2, pp. 65-76, 2012.
- [6] A. S. Esmaceli and A. Khaniki, "Simulation of coastal currents using MIKE 21 numerical model (Case study: Kiashahr region)," *Journal of the Earth and Space Physics*, vol. 35, no. 2, 2009.
- [7] Banaazadeh, M.R., et al., A three-dimensional model of the Caspian Sea. *Iranian Journal of Science and Technology*, 2002: p. 207-220.
- [8] Nasimi, S., S. Sharbaty, and S.S. Hoseini, Three-dimensional model of water flow in the southeast Caspian Sea under varying wind patterns. *Iranian Fisheries Journal*, 2012. 6(2): p. 65-76.
- [9] Sharbaty, S., 3-D simulation of wind-induced currents using MIKE 3 HS model. *Canadian Journal on Computing in Mathematics, Natural Sciences, Engineering and Medicine*, 2012. 3(3): p. 45-54.

- [21] Bohluly, A., et al., Evaluation of wind induced currents modeling along the Southern Caspian Sea. Continental Shelf Research, 2018. 153: p. 50-63.
- [22] Gong, W., et al., Long-term setup of a displacement pile in clay: an analytical framework. Ocean Engineering, 2020. 218: p. 108143.
- [23] Sharbaty, S., 3-D simulation of wind-induced currents using MIKE 3 HS model in the Caspian Sea. Canadian Journal on Computing in Mathematics, Natural Sciences, Engineering and Medicine, 2012. 3(3): p. 45-54.
- [24] Fu, J., et al., A split-window method to retrieving sea surface temperature from Landsat 8 thermal infrared remote sensing data in offshore waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020. 236: p. 106626.
- [245] Carevic, D., et al. Modelling of wave interaction with submerged breakwater using MIKE 21 BW. in International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid Macedonia. 2009.
- [26] Mikkelsen, E., P.B. Sør Dahl, and A.-M. Solås, Transparent and consistent? Aquaculture impact assessments and trade-offs in coastal zone planning in Norway. Ocean & Coastal Management, p. 106-150