

## Original Article



# Use of a Hydrodynamic Model to Assess the Discharge of Urban Wastewater Treatment Effluent on the Pollution of Coastal Areas Case Study: Bandar Abbas City

Received: 2024.05.11

Accepted: 2024.10.13

Amin Ghasami,<sup>1</sup> Mohammad Javad Amiri,<sup>2\*</sup> Naser Mehrdadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

<sup>2</sup> Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** The discharge of urban and industrial wastewater into aquatic environments, particularly in coastal areas, poses significant environmental challenges. This study aims to investigate the pollution status caused by the effluent discharge from the Bandar Abbas wastewater treatment plant into the "Goursouzan Creek" and to evaluate its impacts on the adjacent marine environment. Focusing on pollutant dispersion simulation, this research seeks to provide scientific solutions for predicting contaminant movement and mitigating its destructive effects on the coastal ecosystem.

**Material and methods:** The MIKE 21 FM numerical model (developed by DHI) was employed for hydrodynamic and transport simulation. The modeling process was executed in three stages: first, a hydrodynamic model of the entire Persian Gulf was developed; then, water level data from the calibrated regional model were extracted to set up a local hydrodynamic model for the Bandar Abbas area. Finally, a water quality model was implemented based on field sampling data and wastewater characteristics (such as turbidity and physical appearance) to analyze the pollution dispersion patterns.

**Results and discussion:** Field observations indicate high turbidity, foam formation, and unpleasant odors at the discharge point in Goursouzan Creek. Numerical modeling results confirmed that the hydrodynamic characteristics of the area, including depth and current velocity/direction, play a key role in pollutant transport. Based on various scenarios (trial and error), it was found that discharging wastewater near the shoreline or even at points just outside the creek does not improve the environmental quality of the area due to the average current patterns.

**Conclusion:** The findings of this study demonstrate that current wastewater discharge practices near the Bandar Abbas coast do not meet environmental standards and fail to resolve the region's pollution issues. Given the hydrodynamic limitations of Goursouzan Creek, it is essential to consider alternative options, such as relocating the discharge points to deeper offshore locations with more favorable current conditions, guided by numerical model outputs, to ensure the sustainability of the marine ecosystem.

**Keywords:** Wastewater discharge, Goursouzan creek, Numerical modeling, MIKE 21, Pollutant dispersion, Bandar Abbas.

**How to cite this article:**  
Ghasami, A., Amiri, M. J., and Mehrdadi, N. 2026. Use of a Hydrodynamic Model to Assess the Discharge of Urban Wastewater Treatment Effluent on the Pollution of Coastal Areas Case Study: Bandar Abbas City. *Adv. Environ. Sci.* 23(4): 1085-1102.

\* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1304



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## استفاده از مدل هیدرودینامیکی جهت ارزیابی تخلیه پساب‌های شهری بر آلودگی نواحی ساحلی مطالعه موردی: شهر بندرعباس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

امین قصمی<sup>۱</sup>، محمدجواد امیری<sup>۲\*</sup>، ناصر مهرداد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی سوانج، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده مبسوط

**سابقه و هدف:** تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به محیط‌های آبی، به‌ویژه در مناطق ساحلی، چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه دارد. هدف از این پژوهش، بررسی وضعیت آلودگی ناشی از تخلیه فاضلاب تصفیه‌خانه بندرعباس به داخل «خور گورسوزان» و ارزیابی اثرات آن بر محیط دریایی مجاور است. این مطالعه با تمرکز بر شبیه‌سازی پخش آلاینده‌ها، به دنبال ارائه راهکارهای علمی برای پیش‌بینی حرکت آلودگی و کاهش اثرات تخریبی آن بر اکوسیستم ساحلی است.

**مواد و روش‌ها:** در این تحقیق از مدل عددی MIKE 21 FM (متعلق به موسسه DHI دانمارک) برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و انتقال آلودگی استفاده شده است. فرآیند مدلسازی در سه مرحله اجرا گردید: ابتدا کل محدوده خلیج فارس مدلسازی هیدرودینامیکی شد؛ سپس با استخراج داده‌های تراز سطح آب از مدل کالیبره شده خلیج فارس، مدل هیدرودینامیکی محلی برای محدوده بندرعباس تهیه شد. در نهایت، مدل کیفی بر اساس داده‌های حاصل از نمونه‌برداری‌های میدانی و ویژگی‌های فاضلاب تخلیه‌شونده (مانند کدورت و ویژگی‌های ظاهری) برای بررسی الگوی پخش آلودگی اجرا شد.

**نتایج و بحث:** بررسی‌های میدانی نشان‌دهنده کدورت بالا، ایجاد کف و بوی نامطبوع در محل تخلیه فاضلاب به خور گورسوزان است. نتایج مدلسازی عددی تایید کرد که الگوی جریان و ویژگی‌های هیدرودینامیکی منطقه (مانند عمق و سرعت جریان) نقش کلیدی در جابه‌جایی آلاینده‌ها دارند. بر اساس نتایج حاصل از سناریوهای مختلف (سعی و خطا)، مشخص شد که تخلیه فاضلاب در نزدیکی ساحل یا حتی نقاطی خارج از خور، به‌دلیل متوسط سرعت و جهت جریان، منجر به بهبود وضعیت کیفی منطقه نخواهد شد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راهکارهای فعلی تخلیه فاضلاب در نزدیکی ساحل بندرعباس پاسخگوی استانداردهای زیست‌محیطی نیست و مشکلات آلودگی منطقه را حل نخواهد کرد. با توجه به محدودیت‌های هیدرودینامیکی خور گورسوزان، ضروری است گزینه‌های جایگزین مانند انتقال محل تخلیه به نقاط دورتر از ساحل با عمق بیشتر و شرایط جریان مناسب‌تر، بر اساس خروجی‌های مدل عددی، مورد توجه قرار گیرد تا پایداری اکوسیستم دریایی تأمین شود.

**واژه‌های کلیدی:** مدل سازی، تخلیه فاضلاب های شهری، تغذیه گرایی

استناد به این مقاله: قصمی، ا.، امیری، م. ج.، و ن. مهرداد. ۱۴۰۴. استفاده از مدل هیدرودینامیکی جهت ارزیابی تخلیه پساب‌های شهری بر آلودگی نواحی ساحلی مطالعه موردی: شهر بندرعباس. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۴): ۱۰۸۵-۱۱۰۲.

\* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1304



## مقدمه

درجه تحلیل مدل (مدل پایش اولیه و پیشرفته)، در دسترس بودن مدل (مدل در دسترس عموم و یا اختصاصی)، تغییرپذیری در زمان (حالت جریان ماندگار یا غیرماندگار/دینامیک)، رزولوشن مکانی (یک، دو و یا سه بعدی)، فرایندها (جریان، انتقال و یا ترکیب جریان و انتقال در سیستم یکپارچه)، کیفیت آب (شیمیایی، بیولوژیکی، رادیونوکلوئید و رسوب) و پشتیبانی مؤسسه صاحب اعتبار مدل (پشتیبانی کاربران، دسترسی به آموزش، راهنمای کاربران) را مورد بررسی قرار داد (Bahadur et al., 2018).

کرتینگ و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی با استفاده از مدل 21FM MIKE خور استنفورد را از نظر هیدرودینامیکی مدل سازی کردند. این خور محیطی پیچیده با سرعت جریان بالا و الگوی جریان پیچیده داشته که با استفاده از داده های جزر و مدی و جریان در منطقه شبیه سازی شده و نتایج کالیبره شده است. در انتها در این تحقیق نتیجه گیری شده است که این مدل برای مطالعات هیدرودینامیکی، پخش آلودگی و بررسی انرژی های تجدیدپذیر مناسب و دقیق بوده است (Kregting and Elsaber, 2020).

در تحقیقی که در سال ۲۰۱۹ میلادی انجام شده است جریانات سطحی و نزدیک بستر خلیج بوشهر با استفاده از داده های جوی و مؤلفه های جزر و مدی S2، M2، K1 و O1 و همچنین شرایط مرزی موجود توسط مدل عددی سه بعدی کوهپرنس شبیه سازی شده و در نهایت نتیجه گرفته شده است که جریانات این خلیج تحت تأثیر جریانات جزر و مدی است. بنابر نتایج این تحقیق با استفاده از ردگیری شناورهای سطحی نیز به این نتیجه رسیده شده است که در زمان مد، در محدوده کانال خارجی، جریانات از سمت جنوب و جنوب غرب به سمت شمال و شمال شرق حرکت کرده و بخشی از آنها وارد خور سلطانی شده و بخش دیگر به سمت سواحل شمالی خلیج بوشهر حرکت می کنند. در زمان جزر، جریانات از سمت سواحل جزیره شیف به سمت کانال ها حرکت کرده و تقریباً موازی با کانال خارجی،

اقیانوس ها و دریاها حدود ۷۰ درصد از سطح کره زمین را پوشش می دهند و اکوسیستم دریایی بزرگترین اکوسیستم روی زمین است. این اکوسیستم آب و هوا را تعدیل می کند و موجب جلوگیری از فرسایش می شود، انرژی خورشیدی را جمع آوری و توزیع کرده و دی اکسید کربن را جذب می کند. دریاها و اقیانوس ها هر یک دارای ویژگی های منحصر به فردی می باشند که به طور مشخص به حجم توده آبی آنها مرتبط می باشد. زیرا دریاها به علت کاهش حجم توده آبی شان نسبت به اقیانوس ها از شرایط آب و هوای محلی بیشتر تأثیر می گیرند.

امروزه دریاها تبدیل به گزینه نهایی برای تخلیه زباله ها و فاضلاب ها شده اند، فاضلاب ها توسط رودخانه ها و یا مستقیماً به درون دریا سرازیر می شوند از دیگر تهدیدها، ورود مواد رادیواکتیو و همچنین مواد نفتی به همراه گونه های ناسازگار ناشی از آب توازن کشتی ها به درون دریا است. این فعالیت ها موجب تهدید اکوسیستم دریایی به ویژه زندگی مانگروها و صخره های مرجانی شده و آب های ساحلی و آب های شیرین را تحت تأثیر قرار می دهد. برخی از محیط های دریایی و ساحلی از حساسیت بیشتری در برابر این آلودگی ها برخوردارند که از آن میان می توان به خورها اشاره کرد.

در زمینه مدل سازی رفتار آلودگی، دو نوع آلودگی یکی آلودگی هایی که به عنوان ردیاب غیرعامل<sup>۱</sup> عمل می کنند، مانند رادیواکتیو و ... که رفتار نسبتاً ساده تری نسبت به دیگر آلاینده ها دارند و دیگری آلاینده هایی مانند نفت که رفتار پیچیده تری دارند، وجود دارند (James, 2016).

به منظور تهیه مدل های شبیه سازی آلاینده های آب های سطحی و اقیانوسی معیارهای انتخاب و ارزیابی مدل مناسب در جهت هدف شبیه سازی را می توان در دو گام بیان نمود. در گام اول مدل های آب سطحی و اقیانوسی شناسایی و انتخاب شده و در گام بعدی معیارهای محیط مناسب برای مدل تهیه شده (رودخانه، دریاچه، خور، آب های ساحلی و تالابها)،

در اینجا ۴ نقطه به‌عنوان منبع تخلیه آلودگی مورد استفاده قرار گرفته است که این نقاط در دهانه تنگه هرمز، منطقه نفتی عسلویه، خروجی رودخانه اروند و محلی بین کشورهای قطر و امارات فرض شده‌اند. نتایج حاصله نشان‌دهنده تبعیت پخش آلودگی در سطح و بستر از حرکت جریان و زمان ماندگاری آب بوده و سرعت آن در نواحی مختلف متفاوت است و میزان غلظت مواد آلاینده به مرور کاهش می‌یابد. همچنین نحوه پخش در این مدل در فصول مختلف متفاوت بوده است به‌گونه‌ای که در فصل تابستان پخش آلودگی سرعت بیشتری نسبت به فصل زمستان دارد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۸).

در این تحقیق هدف اصلی مدل‌سازی هیدرودینامیک خور گورسوزان و انتخاب مکانی مناسب برای تخلیه فاضلاب خانگی تصفیه شده بندرعباس در این خور بوده است. در این راستا از تفاوت شوری فاضلاب و محیط خورها برای بررسی رفتار این آلاینده استفاده شده است. برای انجام این تحقیق مدل‌های مختلفی وجود دارد که با توجه به در دسترس بودن این مدل‌ها و سازگاری با اهداف و وسعت و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه این پژوهش به‌وسیله مدل Mike انجام شده است.

#### محدوده مطالعاتی

استان هرمزگان در حدفاصل بین مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. این استان حدود ۶۸ هزار کیلومتر مربع مساحت دارد که از این نظر هشتمین استان کشور است.

هرمزگان از جهت شمال و شمال‌شرقی با استان کرمان، غرب و شمال‌غربی با استان‌های فارس و بوشهر از شرق با سیستان و بلوچستان همسایه بوده و جنوب آن را آب‌های گرم خلیج فارس و دریای عمان در نواری به طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر دربرگرفته است.

شهرستان بندرعباس به مرکزیت شهر بندرعباس دارای ۴

از کانال داخلی عبور می‌کنند. در کانال خارجی نیز بخشی از جریانات از خلیج بوشهر خارج شده و بخش دیگر به موازات ساحل غربی بندر بوشهر، به سمت جنوب می‌روند (Sadriinasab and Hosseini, 2019).

لاری و همکاران در سال ۱۳۹۵ تحقیقی را به کمک اندازه‌گیری‌های میدانی ثبت شده مربوط به موج و نقشه‌های هیدروگرافی منطقه به بررسی شیب بستر، نوع و ناحیه شکست، طول و ارتفاع موج و عمق نقطه شکست انجام دادند. نتایج حاکی از آن بوده است که بیشینه ارتفاع شکست ۶۵/۲ متر و بیشینه فروآب ناشی از شکست ۸/۹ سانتی‌متر و کمترین فاصله شکست از خط ساحلی ۴۲ متر و بیشترین شکست‌ها در فاصله ۲۰۰ تا ۶۰۰ متری از خط ساحلی رخ داده است. شکست در این منطقه از نوع آشفته تعیین شده است (لاری و همکاران، ۱۳۹۱).

در تحقیقی دیگر به بررسی رفتار آلودگی ناشی از فاضلاب شهر باری در ایتالیا در آب‌های ساحلی این محدوده پرداخته شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری شده، بزرگی و جهت جریانات، باد، جزر و مد و لایه‌بندی در این منطقه نقش مهمی در پخش و انتشار ردیاب‌های غیرعامل از جمله شوری و حرارت داشته است. در مرحله بعدی این منطقه با مدل عددی MIKE 3FM شبیه‌سازی شده و پس از کالیبراسیون مشاهده شده که تأثیر باد بیشتر از زبری بستر در این ناحیه بوده است؛ بنابراین نتایج حاصل از مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های میدانی هماهنگی خوبی داشته است (De Serio et al., 2020).

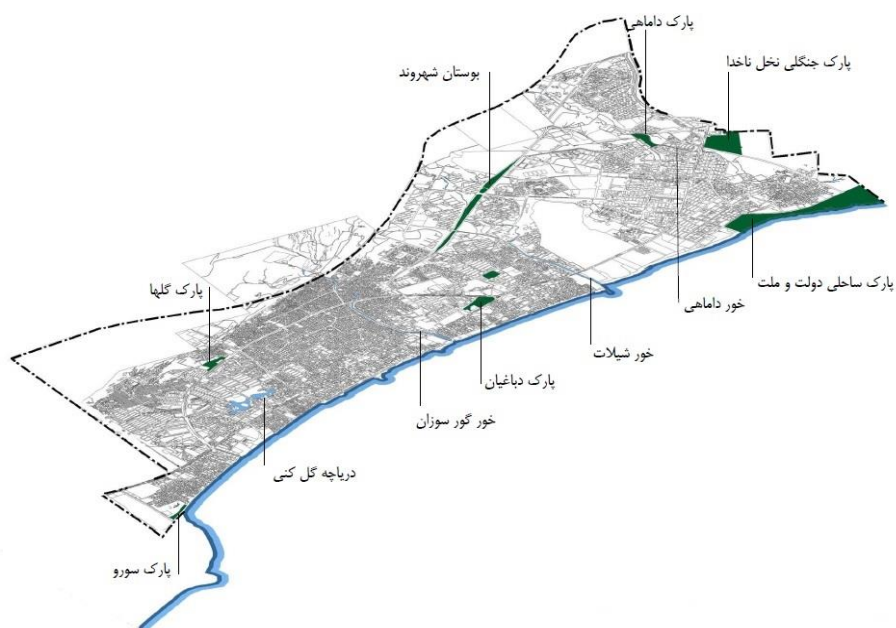
محمودی و همکاران در سال ۱۳۹۸، تحقیقی را در خصوص تهیه مدل هیدرودینامیک سه‌بعدی کوهپرنس برای شبیه‌سازی پخش آلودگی در لایه‌های آب در خلیج فارس (دو لایه سطح و بستر) در یک بازه زمانی ۲۴ ساله انجام دادند. اطلاعات آب‌وهوایی مورد استفاده در مدل، شامل: داده‌های بارش، پوشش ابر، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد و دمای هوا بوده و چهار مؤلفه اصلی جزر و مدی M2، S2، O1 و K1 برای شبیه‌سازی جریانات استفاده شده است.

حدود ۵۱۲۰ کیلومتر مربع و در حاشیه خلیج فارس (شمال تنگه هرمز) واقع است. مطالعات طرح تفصیلی شهر بندرعباس در سال ۱۳۶۹ انجام شده که براساس آن شهر به ۳۵ محله تقسیم شده است. خورگورسوزان در جنوب این شهر و در راستای غربی- شرقی واقع شده است. بندرعباس دارای هفت خور تحت عناوین گورسوزان، شیلات، سنگ کن، گلزار شهدا، حسین آباد، دو هزار و کپشکن می باشد. پساب تصفیه خانه فاضلاب شهر بندرعباس از طریق خور گورسوزان وارد خلیج فارس می شود.

بخش (مرکزی، قلعه قاضی، تخت و فین) و ۱۱ دهستان (گچین، ایسین، تازیان، تخت، شمیل، دهنو، سرخون، قلعه قاضی، فین، سیاهو و گهره) مساحتی بالغ بر ۱۴۰۸۶ کیلومترمربع را دربرگرفته است. این شهرستان از شرق به شهرستان میناب و رودان، از غرب به شهرستان بندرلنگه و بستک، از شمال به شهرستان حاجی آباد و استان فارس و از جنوب به تنگه هرمز و خلیج فارس محدود است. شهر بندرعباس در موقعیت ۲۷ درجه و ۱۰ دقیقه عرض جغرافیایی و ۵۶ دقیقه طول جغرافیایی دارای مساحتی



شکل ۱- موقعیت استان هرمزگان و شهرستان های آن  
Fig. 1- Location of Hormozgan Province and its cities



شکل ۲- موقعیت خورگورسوزان در شهر بندرعباس  
Fig. 2- Location of Gourosuzan estuary in Bandar Abbas city

## داده‌ها و روش‌ها

### برپایی مدل هیدرودینامیکی

برای به‌دست آوردن سطوح آب جزرومدی در ناحیه خلیج فارس، مدل DHI MIKE 21HD به کار گرفته شده است که بر مبنای حل عددی تقریب رینولدز از معادلات دوبعدی ناویر-استوکس (متوسط‌گیری شده در عمق) غیرفشرده در آب کم‌عمق استوار است. مدل عددی فوق‌الذکر در شبکه‌ای منعطف و به روش المان محدود حل می‌شوند.

برای مدل‌سازی ریاضی جریان در محدوده پروژه، نرم‌افزار MIKE21-HD-FM به کار رفته که در آن از معادلات دوبعدی افقی جریان آب کم‌عمق که در واقع معادلات جریان متوسط در عمق هستند، استفاده می‌شود. این معادلات شامل یک معادله بقای جرم و دو معادله بقای اندازه حرکت در افق بوده و به کمک این دستگاه معادلات، سه مجهول عمق آب ( $h$ ) و دو مؤلفه سرعت که در دستگاه مختصات کارتزین  $(\bar{u}, \bar{v})$  هستند قابل محاسبه است. دستگاه معادلات مذکور عبارتند از:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

معادله بقای اندازه حرکت در جهت  $x$  و  $y$ :

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + h\alpha_x S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{yy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) \quad (3)$$

که پارامترهای مختلف در این معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

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

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{h'} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{h'} v dz \quad (4)$$

$g$ : شتاب جاذبه،  $p$ : چگالی،  $\rho$ : چگالی مینا،  $S$ : مقدار دبی در نقاط منبع،  $u_s$  و  $v_s$ : سرعت ورود آب در نقطه منبع،  $f$ : اثر کوریولیس،  $\tau_{bx}$  و  $\tau_{by}$ : تنش برشی ناشی از اصطکاک در کف،  $\tau_{sx}$  و  $\tau_{sy}$ : مؤلفه‌های تنش برشی ناشی از باد در سطح است که از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{\tau}_s = \rho_a C_d |\bar{u}_{10}| |\bar{u}_{10}| \quad (5)$$

که در آن  $\rho_a$ : چگالی هوا و  $u_{10}$ : بردار سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری سطح دریا بوده و  $C_d$ : ضریب رانش است.

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

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$, T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

که در آن  $A$  ضریب لزجت گردابه‌ای است.

در این نرم‌افزار معادلات فوق به روش حجم محدود صریح و با استفاده از المان‌های سه‌ضلعی نامنظم حل می‌شود.

### زمان اجرای مدل هیدرودینامیکی

این مدل با توجه به همپوشانی زمانی اطلاعات موجود برای ۱۲ ماه سال ۲۰۱۹ میلادی اجرا شده است.

زمان شروع: ۲۰۲۰/۰۵/۰۱ ساعت: ۰۶:۰۰:۰۰

فاصله گام‌های زمانی خروجی: ۶۰۰ ثانیه (معادل ۱۰ دقیقه)

تعداد گام‌های زمانی: ۳۱۰۰۰

## صحت‌سنجی و واسنجی مدل

سطوح آب جزرومدی پیش‌بینی‌شده توسط مدل همان‌طور که در فصول قبلی معرفی شد با اندازه‌گیری‌های در محل، مقایسه شده است. پارامترهای کلیدی واسنجی، شامل زبری کف و لزجت گردابه‌ای می‌باشد. زبری کف بر مبنای عدد مانینگ تعریف می‌شود؛ این پارامتر، بر سرعت جریان و دامنه‌های جزرومد اثر می‌گذارد. لزجت گردابه‌ای که آشفتگی افقی را کنترل می‌کند، با استفاده از روش Smagorinsky مشخص شده است.

صحت‌سنجی مدل جزرومدی به کمک انجام تحلیل دقیق آماری با تغییر عدد زبری مانینگ انجام شده است تا مناسب‌ترین عدد زبری بستر برای حصول دقیق‌ترین نتایج مدل‌سازی به دست آید. مشاهده می‌شود که بهترین همبستگی در همه موارد مربوط به مقدار زبری مانینگ ۸۰ می‌باشد که به همه شبیه‌سازی‌های بعدی تعمیم داده شده است. برای لزجت گردابه‌ای، مقدار Smagorinsky ۰/۲۸ به‌عنوان مقدار کالیبره شده در فرایند مدل‌سازی انتخاب شده است.

برای تکنیک حل، یک الگوی سریع حل، برای انتگرال‌گیری زمانی و گسسته‌سازی مکانی انتخاب شده است. برای اطمینان از پایداری مدل، عدد کوارنت- فردریت- لووی (CFL) به مقدار ماکزیمم ۰/۸ محدود شده است. در مورد شرایط مرزی، تغییرات جزرومد در راستای میان سیریک و مسندم که با استفاده از روش OTPS به دست آمد، به‌عنوان مرز باز مدل گنجانده شده است. بقیه مرزهای دامنه مورد مطالعه می‌تواند به‌عنوان خشکی تلقی شود.

## برپایی مدل کیفی

با توجه به موضوع تحقیق و همچنین مطالعات انجام شده در گذشته پس از برپایی مدل بر اساس داده‌های موجود و در دسترس از جمله تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های هواشناسی و ... نسبت به اضافه کردن مدل کیفی اقدام شده است. در حقیقت ماژول هیدرودینامیکی مبنا و اساس دیگر ماژول‌ها بوده، و ماژول‌های دیگر توانایی اجرا شدن مستقل بر پایه

خروجی‌های ماژول هیدرودینامیکی ندارند. اساس مدل‌سازی پخش شوری معادلات انتقال شوری و حرارت است. در این پژوهش دمای فاضلاب تخلیه‌شونده با دمای محیط آبی خور یکسان فرض شده است. بنابراین چگالی فقط تابع شوری در نظر گرفته شده است.

به‌منظور امکان انجام بررسی‌های کیفی نسبت به انجام نمونه‌برداری، انجام آزمایش‌های کیفی و وارد کردن داده‌های کیفی به مدل اقدام شده است.

پارامترهای موردنظر جهت اندازه‌گیری و استفاده در مدل دوبعدی مایک جهت بررسی الگوی رفتار پخش آلودگی ناشی از فاضلاب تصفیه‌شده در سواحل بندرعباس و برآورد میزان ظرفیت جذب این آب‌ها با توجه به شاخص‌های تغذیه‌گرایی به شرح ذیل انتخاب گردیده‌اند:

- عمق ستون آب<sup>۲</sup>- دما<sup>۳</sup>- pH- شفافیت آب<sup>۴</sup>- کلروفیل<sup>۵</sup>- نیتريت<sup>۶</sup>- نترات<sup>۷</sup>- آمونیوم<sup>۸</sup>- کلیفرم کل<sup>۹</sup>- کلیفرم مدفوعی<sup>۱۰</sup>- اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی<sup>۱۱</sup>- اکسیژن محلول<sup>۱۲</sup>- فسفات<sup>۱۳</sup>

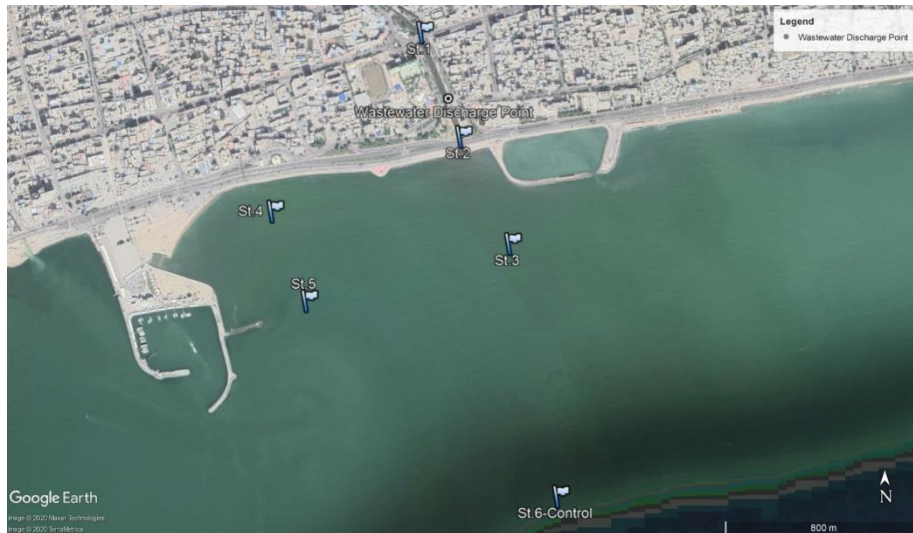
روش تعیین نقاط نیز به‌صورت مختلط بوده و ترکیبی از روش‌های نقطه‌ای و نیم‌رخ سطحی و ... است. به این ترتیب با توجه به جزر و مدی بودن منطقه و جریانات رفت‌وبرگشتی در آب‌های ساحلی و خور گورسوزان، در کنار رفتار پلوم آلودگی در اثر این جریانات، بهترین و بهینه‌ترین شبکه نمونه‌برداری از محیط تعیین شده است.

بر اساس جمله نتایج مدل‌سازی اولیه انجام شده و نیز بازدید میدانی صورت گرفته در خردادماه سال ۱۳۹۹، در نهایت ۶ ایستگاه شامل یک ایستگاه کنترلی و ۵ ایستگاه نمونه‌برداری جهت انجام مطالعات حاضر در نظر گرفته شده است که در ادامه مشخصات این ایستگاه‌ها ارائه می‌گردد.

دو ایستگاه نمونه‌برداری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در فاصله ۲۰۰ متری از محل تخلیه فاضلاب تصفیه‌شده شهر بندرعباس یکی در دهانه خور گورسوزان (فاصله ۲۰۰ متری) و دیگری در فاصله ۲۰۰ متری از محل تخلیه در داخل خور تعیین شده است. ایستگاه شماره ۳ در راستای

ایستگاه ۴ قرار دارد. علاوه بر ایستگاه‌های شماره ۱ تا ۵، ایستگاه ۶ با فاصله ۱۵۰۰ متر از خط ساحلی و دهانه خور گورسوزان به‌عنوان ایستگاه کنترل جانمایی شده است. در شکل زیر محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان داده شده است. در جدول شماره ۱ مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری آورده شده است.

دهانه خور و در فاصله حدود ۴۵۰ متری از آن در نظر گرفته شده است. موقعیت ایستگاه ۴ در مجاورت پایانه حقانی تعیین گردیده و فاصله آن از دهانه خور، ساحل و موج‌شکن شرقی پایانه حقانی به‌ترتیب برابر با ۸۰۰، ۱۵۰، ۳۵۰ متر است. در این محل انباشت و رسوب مواد آلاینده محتمل است. ایستگاه شماره ۵ نیز با فاصله تقریباً ۴۰۰ متری از



شکل ۳- جانمایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب و رسوب در ساحل بندرعباس

Fig. 3- Location of water and sediment sampling stations on the Bandar Abbas coast

جدول ۱- توصیف ایستگاه‌های نمونه برداری و پارامترهای اندازه‌گیری در هر ایستگاه  
Table 1- Description of sampling stations and measurement parameters at each station

ردیف	نام ایستگاه	Longitude	Latitude	محل و فاصله (متر) از دهانه خور	عمق	تکرار	پارامترهای مورد اندازه‌گیری
۱	St.1	56.291474°	27.183409°	داخل خور- زیر پل بلوار امام- ۴۵۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	
۲	St.2	56.293065°	27.179592°	در دهانه خور- ۲۰۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	در آب: عمق، شفافیت، شوری، دما، DO، pH، BOD5، TN، TP، نیترات، نیتریت، فسفات، آمونیوم و کلیفرم‌های مدفوعی و کل.
۳	St.3	56.295078°	27.175674°	آب‌های ساحلی در راستای خور- ۴۵۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	
۴	St.4	56.285329°	27.176860°	اسکله حقانی- ۸۰۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	
۵	St.5	56.286726°	27.173583°	دور از ساحل نزدیک موج شکن شرقی اسکله حقانی- ۹۰۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	
۶	St.6-Control	56.297048°	27.166428°	دور از ساحل در راستای خور- ۱۵۰۰ متر	سطح و نزدیک بستر	۲ تکرار	

## نتایج و بحث

## توسعه تراز بستر و تولید شبکه

شبکه‌بندی علاوه بر گسسته‌سازی مکانی محدوده محاسباتی مدل در میزان دقت و اعتماد به نتایج خروجی مدل نیز تأثیرگذار است. شبکه با سلول‌های ریزتر دقت محاسباتی را افزایش داده ولی در مقابل زمان محاسبه و عملیات اجرای مدل را به‌نحو چشمگیری افزایش می‌دهد. اگرچه ریزتر کردن شبکه دقت را افزایش می‌دهد، اندازه شبکه با کوچکتر شدن از یک اندازه حداقل به‌صرفه نخواهد بود. بنابراین در شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی پس از ایجاد شبکه و اجرای مدل به‌صورت مکرر این اندازه بهینه مشخص شده و در ادامه عملیات مدل‌سازی از آن استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به مزایای شبکه‌بندی نامنظم و انعطاف‌پذیر محدوده خورهای سلطانی، لشگری و پودر به‌صورت محلی ریزتر شده‌اند که دلیل آن دقت بالاتر موردنیاز در این منطقه، وسعت و عمق کمتر آن است. ریز شدن این ناحیه در دو مرحله انجام گرفته است؛ به این صورت که ابتدا محدوده‌ای در نزدیکی دهانه این خور ریز شده و سپس شبکه‌بندی در خود خور سلطانی با توجه به دقت موردنیاز ریز شده است. دلیل این کار حفظ یکنواختی نسبی شبکه‌بندی بوده است تا به این‌گونه تا حد امکان زمان حل محاسبات کاهش یابد. همچنین این شبکه‌بندی در نواحی کم‌عمق‌تر نیز ریزتر از نواحی عمیق‌تر است به این دلیل که سلول‌های مناسب در نواحی عمیق در نواحی کم‌عمق وسعت زیاد و عمقی کم خواهند داشت و این باعث عدم دقت در نواحی کم‌عمق می‌شود.

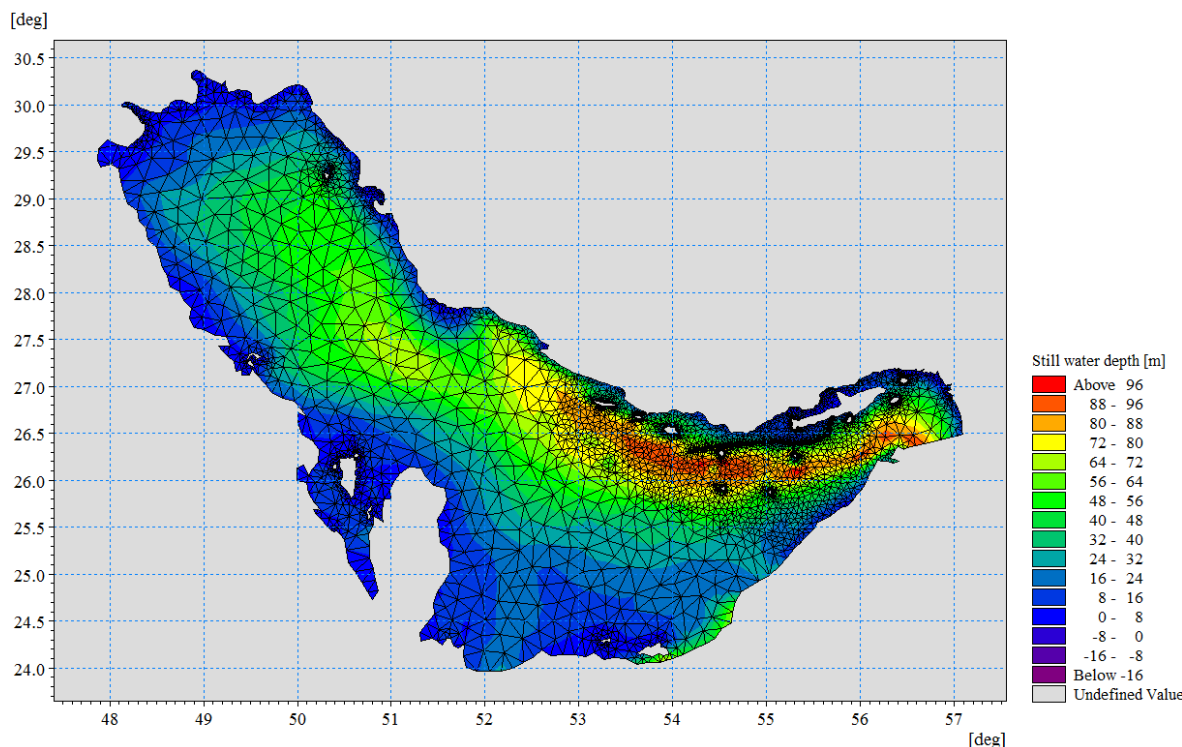
فایل عمق‌سنجی برای مطالعه حاضر، با استفاده از ESRI Arc GIS 9.2 و سپس با به‌کارگیری ابزار DHI MIKE Zero، تهیه گردید. داده‌های تراز بستر متشکل از

داده‌های ETOPO با دقت ۲ دقیقه، تهیه شده توسط مرکز ملی داده‌های ژئوفیزیکی آمریکا (NGDC)، جداول دریایی NCC در مقیاس‌های ۱:۱۰۰ k و ۱:۲۵ k، داده‌های برداری خط ساحلی سواحل ایران از پایگاه داده ICZM ایران، داده‌های برداری خط ساحلی ESRI 2006 برای سایر نواحی ساحل خلیج فارس، تصاویر ماهواره‌ای Landsat جهانی و جدول ۲۸۸۸ نقشه‌های نیروی دریایی انگلیس از تنگه هرمز می‌باشند.

خطوط ساحلی جزیره از مجموعه داده‌های جهانی ESRI به‌دست آمده است و سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و جداول دریایی به‌خوبی واسنجی شده است. به‌علاوه ۳۶ جزیره نیز در خلیج فارس و تنگه هرمز در تراز بستر مدل ترکیب شدند.

داده‌های NGDC ETOPO2 از وب‌سایت NGDC و با گزینش خاص برای این که داده‌ها فقط شامل داده‌های مربوط به خلیج فارس باشند، دانلود شد. این داده‌ها در سال ۲۰۰۶ منتشر شدند و شامل داده‌های عمق‌سنجی در بازه‌های دقیق عرضی و طولی جغرافیایی می‌باشند. داده‌ها فقط در نواحی که هیچ پوشش اطلاعاتی از جداول دریایی در دسترس نبود استفاده شده‌اند.

شبکه مدل که داده‌های به‌دست آمده از تمام منبع‌های عمق‌سنجی یاد شده در بالا را در برمی‌گیرد، شامل شبکه‌هایی درشت‌تر در نواحی عمیق و دیگری شبکه‌هایی ریزتر در نواحی نیمه‌عمیق و کم‌عمق می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. المان‌های شبکه انعطاف‌پذیر دارای مساحت‌هایی در بازه  $۱۰۸ \times ۲/۳۳$  مترمربع در میانه خلیج فارس تا  $۱۳۱/۴$  مترمربع در نواحی آب کم‌عمق برای مجموعاً ۲۷۱۳۲ المان است. محدوده محاسباتی، کل خلیج فارس را با مرزی باز در سیریک همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در بر گرفته است.



شکل ۴- شبکه بندی هیدروگرافی مدل  
Fig. 4 - Hydrographic model grid

### نتایج مدل عددی

پارامتر خروجی اصلی به کار گرفته شده در مطالعه جاری، تراز سطح جزرومدی بوده است که پس از محاسبه با اندازه‌گیری‌های میدانی برای ایستگاه اندازه‌گیری ۱ و ۲ معرفی شده در بخش قبلی، مقایسه شده‌اند. مقایسه میان نتایج مدل MIKE21 HD و اندازه‌گیری ۱ (سرعت و جهت جریان) در شکل ۹ و برای ۲ (تغییرات تراز) انجام شده است تا مدل کالیبره شود.

### تحلیل آماری نتایج شبیه‌سازی

تحلیل آماری میان سطوح جزرومدی پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده است. لازم به ذکر است که دستگاه اندازه‌گیری در ایستگاه ۱ جریان سنج بوده و لذا برای این نقطه داده‌های سرعت و جهت جریان در دسترس می‌باشد. همچنین برای ۲ داده‌های دستگاه اندازه‌گیری جزرومدسنج در اختیار بوده که تغییرات تراز مورد بررسی قرار گرفته است.

### حساسیت‌سنجی مدل

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، برای انجام مدل‌سازی و کالیبراسیون مدل، نیاز به انجام آزمون حساسیت‌سنجی است. این آنالیز برای سنجش حساسیت مدل به پارامترهای مورد استفاده آن است که برخی از این پارامترها همان پارامترهای مورد استفاده برای کالیبره کردن مدل‌اند که با تغییرات آنها مدل با شرایط موجود تطبیق داده می‌شود. بنابراین شناسایی پارامتر مؤثر امری لازم برای مرحله کالیبراسیون است.

در این تحقیق پارامترهای مورد بررسی در این آنالیز شامل ابعاد شبکه، ضرایب لزجت گردابه افقی، زبری بستر و گام زمانی حل معادلات هستند. در این مرحله بازه‌ای برای این پارامترها تعیین و میزان تغییر نتایج بررسی شده و در نهایت پارامتر مؤثر انتخاب شده است که در این تحقیق زبری بستر تأثیر بیشتری داشته، ولی تفاوت آن با تأثیر لزجت گردابه‌ای زیاد نبوده است، بنابراین این دو پارامتر در کالیبراسیون مدل متغیر بوده و نقش آفرینی کرده‌اند.

جدول ۲- خلاصه شاخص‌های همبستگی آماری میان نتایج ترازهای جزرومدی و سرعت جریان‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده برای ایستگاه‌های ۱ و ۲

Table 2- Summary of statistical correlation indices between measured and modeled tidal level results and current velocities for stations 1 and 2

Station	Parameter	Number of Evaluated Data	CC	RMSE (m)
1	Current Speed	22694	0.754	858
2	Water Level	12912	0.939	0.1581

### شناسایی و تعیین محدوده اثر آلودگی تخلیه‌کننده‌های مرتبط با فاضلاب‌های شهری بندرعباس بر سواحل پذیرنده

بررسی محدوده اثر آلودگی تخلیه‌کننده‌های مرتبط با فاضلاب‌های شهری بندرعباس بر سواحل پذیرنده با اتخاذا شوری به‌عنوان مسیریاب آلودگی در منطقه انجام شده است. پس از تعریف منبع تخلیه فاضلاب تصفیه شده در خور و مدل‌سازی هیدرودینامیک جریانات جزرومدی منطقه، با بررسی شوری و میزان رقیق‌شدگی آن در محیط محدوده اثر آلودگی تعیین شده است.

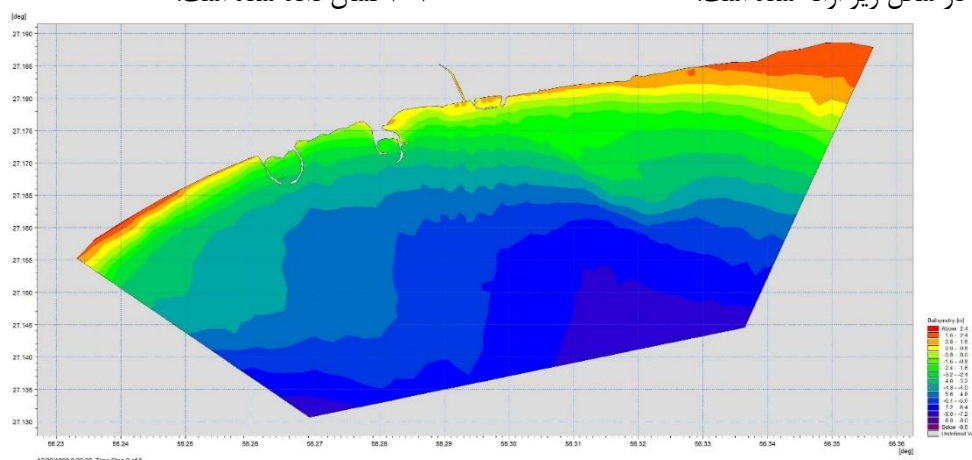
میزان کمینه شوری در طول مدل‌سازی برای فصول مختلف محاسبه و سپس میزان اثر آن بر محیط برحسب درصد بیان شده است. شوری محیط پذیرنده ۳۲ و شوری فاضلاب تخلیه‌شونده ۰ در نظر گرفته شده است. در ادامه تصاویر میزان اثرپذیری نواحی مختلف محیط پذیرنده سواحل بندرعباس در فصل‌های مدل‌سازی شده در طول سال ۲۰۲۰ نشان داده شده است.

### مدل محلی

پس از انجام مدل‌سازی خلیج‌فارس، مدل محلی در ساحل بندرعباس تشکیل و اجرا شده است. علت این کار رسیدن به‌دقت قابل‌قبول در مطالعات و بهینه شدن مدت زمان اجرای مدل کیفیت آب بوده است؛ لذا تراز سطح آب در سه مرز باز این مدل محلی از نتایج مدل‌سازی کل خلیج‌فارس استخراج شده و سپس این مدل اجرا گردیده است.

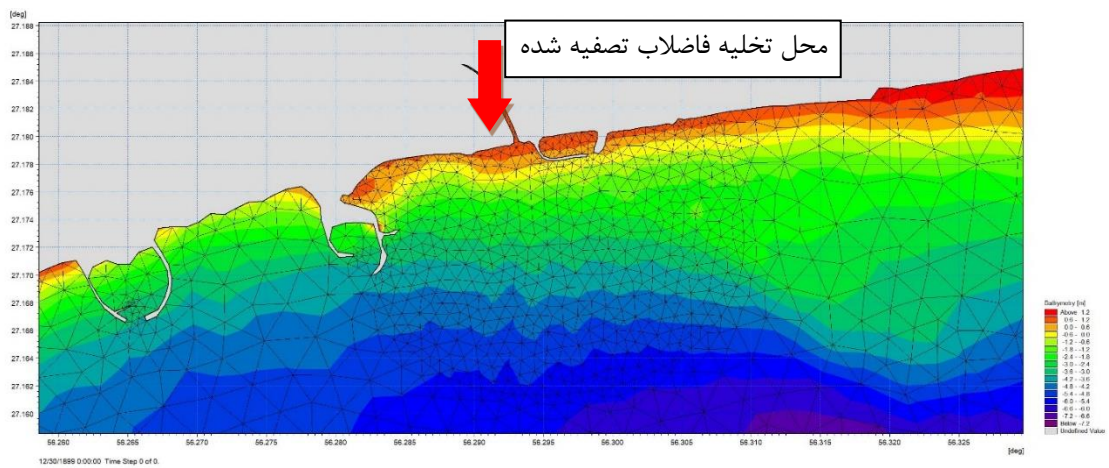
با توجه به مقیاس کوچکتر این مدل از داده‌های عمق آب دقیق‌تری استفاده شده است. بسی متری این مدل در شکل زیر ارائه شده است.

در شکل زیر نیز المان‌های مش‌بندی نمایش داده شده است. برای دقت بیشتر نواحی نزدیک به محل تخلیه و محل‌های پیش‌بینی شده تخلیه آفتال و نواحی کم‌عمق داخل خور گور سوزان دارای مش‌بندی ریزتری هستند. اندازه مش‌بندی بر اساس آنالیز حساسیت به‌دست آورده شده است. نمایش سه‌بعدی توپوگرافی بستر مدل محلی با دید از سمت شرق به غرب در شکل زیر ارائه شده است.



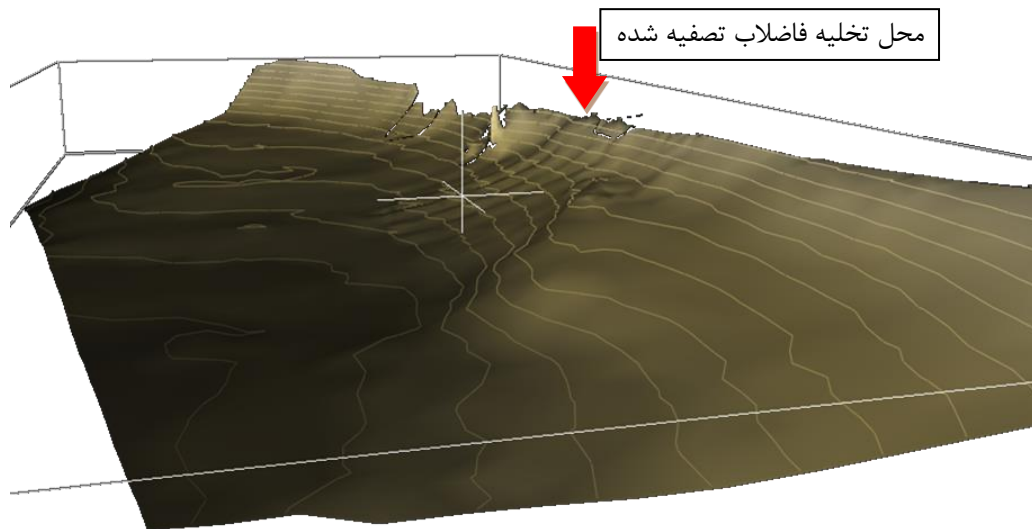
شکل ۵- عمق محدوده مدل محلی در ساحل بندرعباس

Fig. 5 - Depth of local model range on the coast of Bandar Abbas



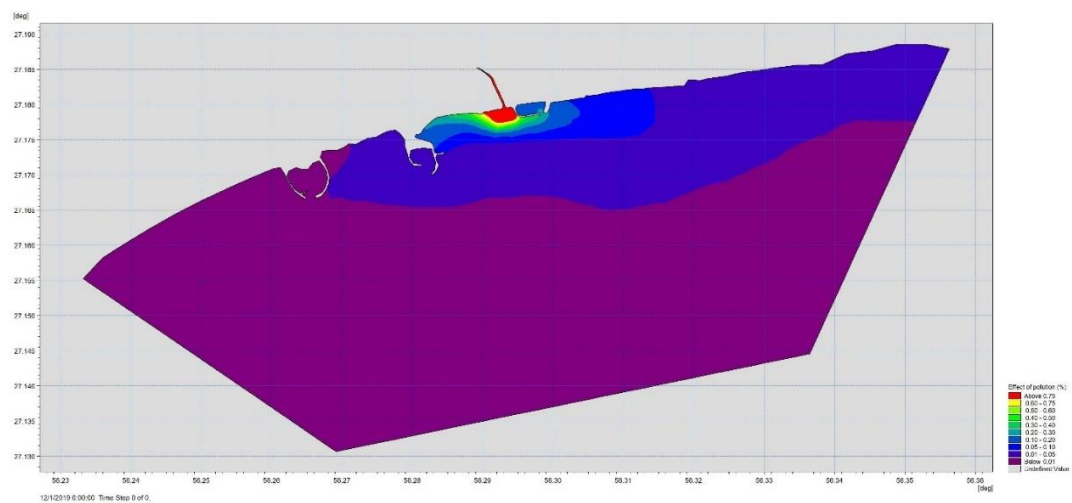
شکل ۶- مش بندی در مدل محلی

Fig. 6 - Meshing in the local model



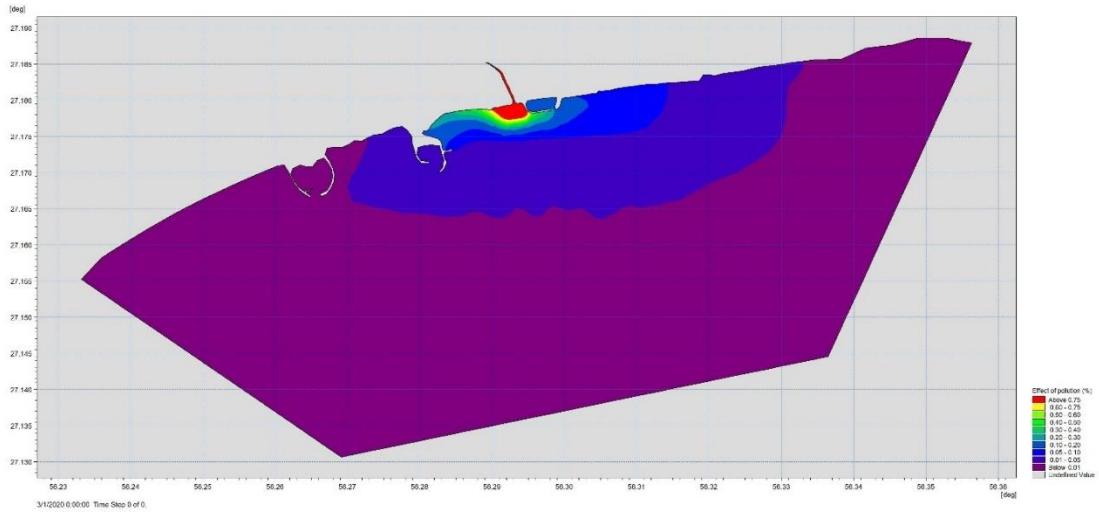
شکل ۷- نمای سه بعدی از توپوگرافی بستر دریا در سواحل بندرعباس

Fig. 7 - 3D view of the seabed topography off the coast of Bandar Abbas

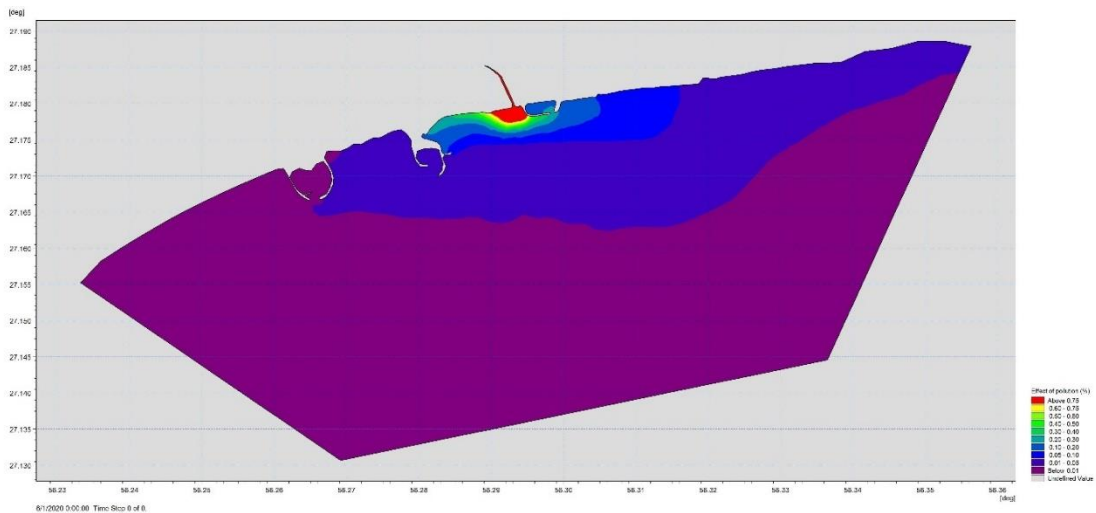


شکل ۸- اثرگذاری تخلیه پساب در نواحی مختلف محیط پذیرنده در فصل زمستان

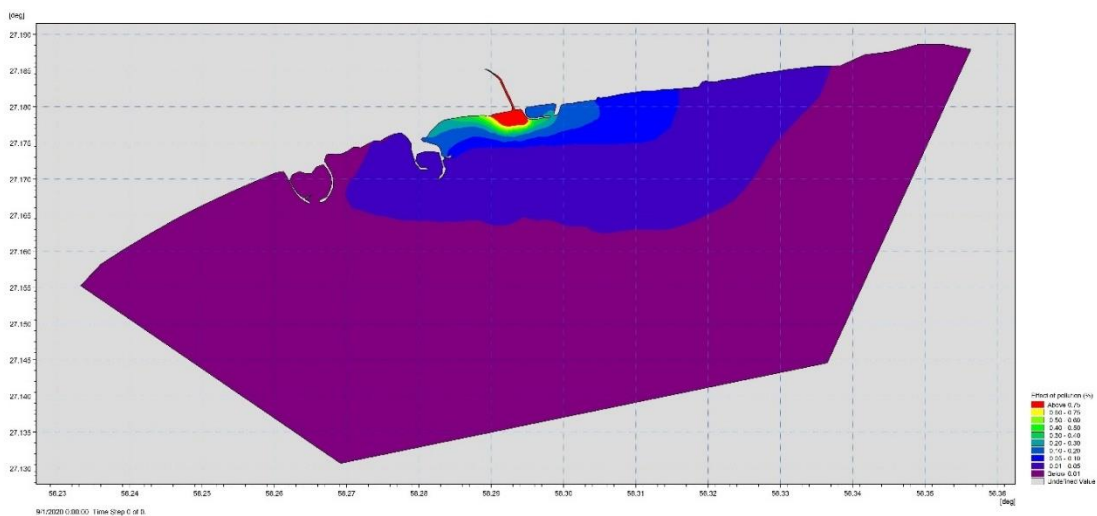
Fig. 8 - Impact of effluent discharge on different areas of the receiving environment in the winter



شکل ۹- اثرگذاری تخلیه پساب در نواحی مختلف محیط پذیرنده در فصل بهار  
 Fig. 9 - Impact of effluent discharge on different areas of the receiving environment in the spring



شکل ۱۰- اثرگذاری تخلیه فاضلاب در نواحی مختلف محیط پذیرنده در فصل تابستان  
 Fig. 10 - Impact of effluent discharge on different areas of the receiving environment in the summer

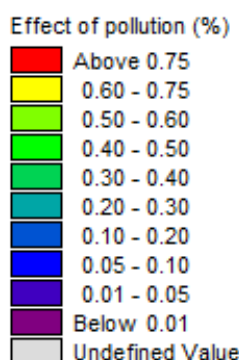


شکل ۱۱- اثرگذاری تخلیه فاضلاب در نواحی مختلف محیط پذیرنده در فصل پاییز  
 Fig. 11 - Impact of effluent discharge on different areas of the receiving environment in the autumn

واحد نتایج به صورت لحظه‌ای متفاوت است. به عبارتی این نتایج بدترین حالت ممکن در طول زمان مدل‌سازی‌ها را در نظر گرفته است.

محدوده اثرگذاری آلودگی در سواحل پذیرنده مطابق تصاویر فوق است. پخش و گسترش این آلودگی به سمت شرق بیشتر از سمت غرب بوده است. علت این نتیجه وجود سازه‌های دریایی اسکله موجود در غرب دهانه خور است. این اسکله با به دام انداختن مواد مغذی در پشت موج‌شکن شرقی خود سبب ازدیاد غلظت مواد مغذی و در نتیجه عدم گسترش آن می‌شود.

با توجه به جدول راهنمای تصاویر بالا که در شکل زیر آورده شده است، محدوده مدل‌سازی شده در بیشتر نواحی کمتر از ۱ درصد تحت تأثیر قرار گرفته است. در پالت رنگ چهارم این میزان بیشتر از ۱۰ درصد است که محدوده اطراف سازه‌های غربی و شرقی دهانه خور، مسافتی در حدود ۱ کیلومتر را دربر گرفته است. این در حالی است که در فاصله ۲۰۰ متری از دهانه خور اثرگذاری آلودگی تخلیه شده برابر است با بیش از ۷۵ درصد و این میزان با داخل خور یکسان است. لازم به ذکر است که این بررسی‌ها بر اساس کمترین میزان رقیق‌شدگی در طول مدل‌سازی‌ها انجام شده و در آن



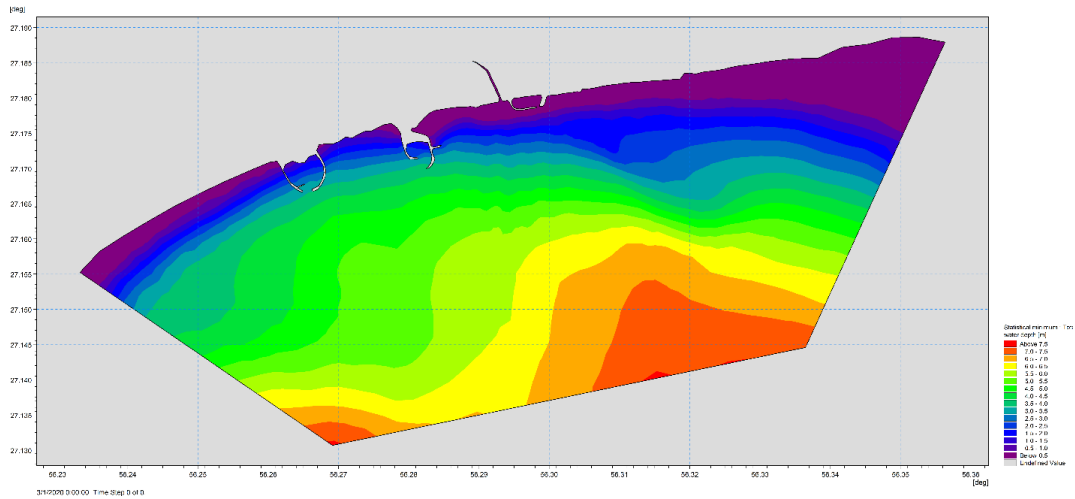
شکل ۱۲- جدول راهنمای محدوده تحت تأثیر آلودگی  
Fig. 12 - Guide table for examining areas affected by pollution

و لذا محیط غلظت کمتری را جهت پالایش دریافت می‌کند. به این ترتیب محدوده تحت تأثیر کاهش می‌یابد. ولی ناگفته نماند که بهترین روش حذف و یا کاهش آلودگی تخلیه‌شونده به محیط دریایی است.

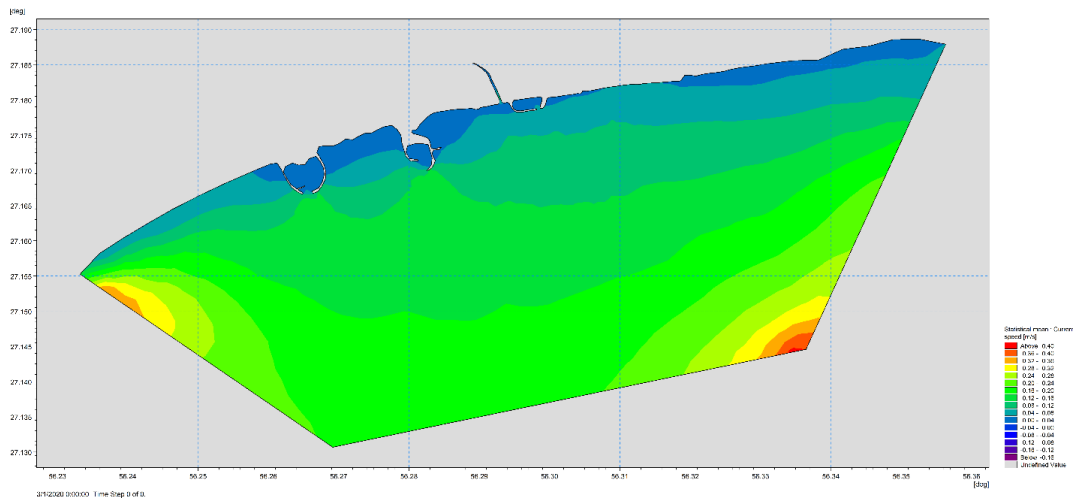
در شکل‌های زیر حداقل عمق آب محاسبه شده، میانگین سرعت جریانات و جهت غالب جریان‌های دریایی جهت انتخاب محدوده اولیه خروجی آتفال ارائه شده است. هر چه عمق و سرعت جریان در نقطه انتهایی خط لوله بیشتر باشد رقیق‌شدگی اولیه بیشتر و در نتیجه اثرات محیط‌زیستی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل جهت جریانات غالب، محدوده‌ای که امکان تخلیه پساب را دارا است عموماً دارای یک جهت بوده و تأثیری در انتخاب محل تخلیه ندارد.

### تعیین محدوده مناسب تخلیه پساب‌ها با توجه به خصوصیات کمی و کیفی پساب‌ها، محیط‌های پذیرنده و جریان‌های دریایی (جذرومد)

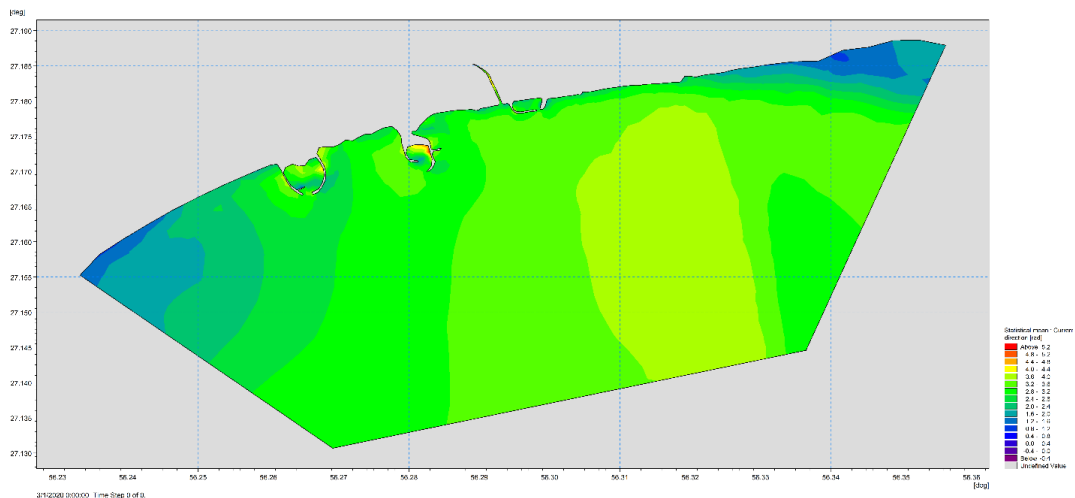
تعیین محدوده مناسب تخلیه بر اساس وضعیت هندسی بستر، داده‌های هیدروگرافی و عمق آب، الگوی جریانات و سرعت آن و همچنین جهت جریان غالب انجام می‌شود. در این مرحله ابتدا محدوده‌های مناسب تعیین و محل دقیق‌تر بر اساس مدل‌سازی و خصوصیات کمی و کیفی پساب تعیین می‌شود. به‌طور خلاصه، عامل اصلی تعیین محل خروجی آتفال میزان رقیق شدن غلظت آلاینده‌هاست. برای کاهش طول آتفال از ساحل و کاهش هزینه‌ها استفاده از دیفیوزر پیشنهاد می‌گردد. عملکرد کلی دیفیوزر به این صورت است که میزان رقیق‌شدگی اولیه را افزایش می‌دهد



شکل ۱۳- حداقل عمق آب محاسبه شده مورد مطالعه  
 Fig. 13 - Calculated minimum water depth of the study case



شکل ۱۴- میانگین سرعت جریان های جزرومدی منطقه مورد مطالعه  
 Fig. 14- Average speed of tidal currents in the study area

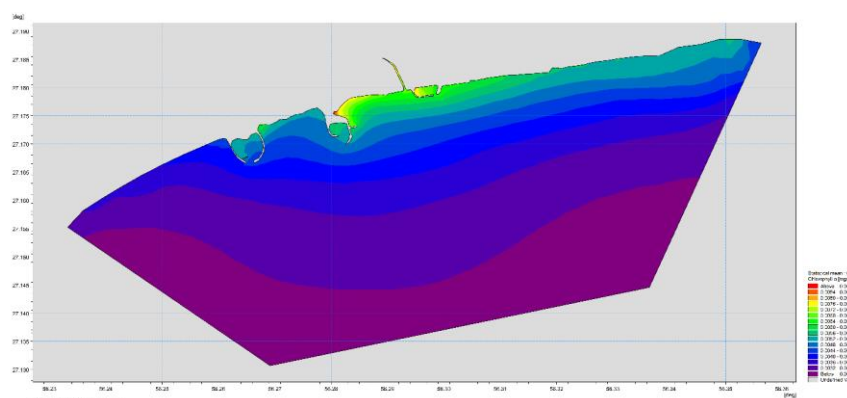


شکل ۱۵- جهت غالب جریانات جزرومدی منطقه مورد مطالعه  
 Fig. 15 - Predominant direction of tidal currents in the study area

نشان می‌دهد که این منطقه مرزی برای تخلیه فاضلاب محسوب می‌شود. شکل زیر میانگین کلروفیل a- در حالت تخلیه فاضلاب با خط لوله ۲۰۰۰ متری را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده میانگین کلروفیل a- در منطقه موردنظر در صورت تخلیه فاضلاب با خط لوله به طول ۲۰۰۰ متر در مختصات E ۵۶.۲۹۱۲۰۴ و N ۲۷.۱۶۳۲۱۶ در مناطق با بیشترین میزان غلظت برابر با ۰/۰۰۸۸ میلی‌گرم در لیتر است. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد مهمترین شاخص به‌وقوع پیوستن یوتروفیکاسیون غلظت کلروفیل a- می‌باشد، لذا استاندارد کیفیت آب غلظت ۰/۰۰۸۵ میلی‌گرم بر لیتر برای کلروفیل a- می‌باشد. طبق شاخص OECD با مرز باز در غلظت مذکور احتمال یوتروفیک و مزوتروفیک بودن محیط برابر بوده که این مسئله بدین معنی است که هیچ‌گاه حالت یوتروفیک در بدنه آبی غالب نمی‌شود و یوتروفیکاسیون اتفاق نخواهد افتاد. محل تخلیه در شکل زیر نشان داده شده است.

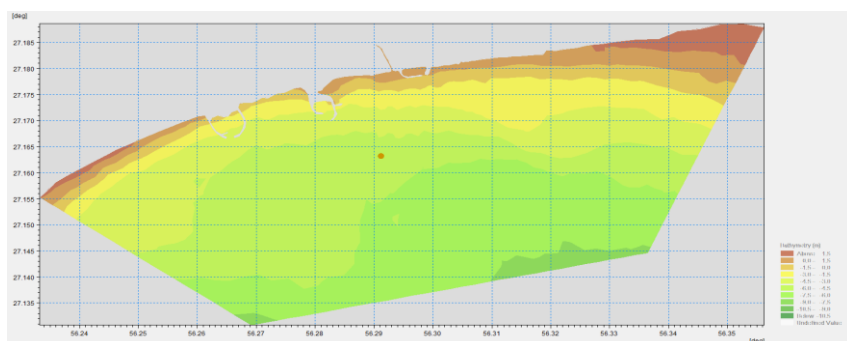
با توجه به این که در نتایج شبیه‌سازی وضع موجود، سازه‌های دریایی موجود سبب در دام افتادن آلودگی و در نتیجه افزایش تمرکز بار آلودگی و غلظت آن شده بودند، پس حداقل فاصله‌ای که باید در نظر گرفته شود برابر با طول موج‌شکن اسکله غربی دهانه خور است. همچنین هر چه فاصله از دهانه خور بیشتر باشد محیط خور که توان خودپالایی کمتری دارد ورود آلودگی کمتری را تحت تأثیر جریانات جزرومدی خواهد داشت.

با توجه به تجربیات مدل‌سازی و الگوی جریانات و عمق در نواحی ساحلی محدوده با فاصله ۲۰۰۰ متری از ساحل به‌گونه‌ای که متمایل به سمت غرب باشد منطقه مناسب پیش‌بینی شده است. زیرا در این حالت نقطه انتهایی خط لوله تخلیه پساب در نواحی عمیق‌تر، با سرعت جریان بیشتر قرار دارد. همچنین نتایج مدل‌سازی این تخلیه برای داده‌های وضع موجود فاضلاب تخلیه‌شونده محیط و بررسی احتمال یوتروفیک بودن منطقه بر اساس شاخص OECD با مرز باز



شکل ۱۶- میانگین کلروفیل a- در حالت تخلیه پساب با خط لوله ۲۰۰۰ متری

Figure 16 - Average chlorophyll-a in the effluent discharge mode with a 2000 meter pipeline



شکل ۱۷- محل نقطه انتهایی خط لوله تخلیه پساب در مسافت ۲۰۰۰ متری از دهانه خور

Fig. 17 - Location of the end point of the effluent pipeline at distance of 2000 meters from the estuary

لازم به ذکر است علاوه بر بررسی‌های ابتدایی عوامل مؤثر در محاسبه طول خط لوله، طول‌های متفاوتی از ۷۰۰ متری تا ۲۰۰۰ متری انتخاب و در فرایند شبیه‌سازی در مدل به کار رفته است. بنابراین مسافت ۲۰۰ متری حاضر حاصل سعی و خطای مهندسی بوده است. شایان ذکر است بررسی‌های دقیق‌تر در این مطالعه و انتخاب نقطه مناسب تخلیه و استفاده از گزینه‌هایی همچون دیفیوزر پیشنهاد می‌گردد. در مدل مورد استفاده رقیق‌شدگی در میدان نزدیک در نظر گرفته نشده است.

### نتیجه‌گیری

این تحقیق شامل سه بخش اصلی با موضوعات متفاوت بود. موضوع اول بررسی فاضلاب تصفیه شده خروجی از تصفیه‌خانه بندرعباس که به داخل خور گورسوزان تخلیه می‌شود بود. اگر چه که با بررسی ویژگی‌های ظاهری محل تخلیه و بوی بد ناشی از آن، کدورت بالا و ایجاد کف در آب خور این موضوع مشهود است.

موضوع دیگر مدل‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی محیط دریایی است. برای این منظور مدل مایک دوبعدی انتخاب شده است. ابتدا محدوده کل خلیج فارس مدل‌سازی هیدرودینامیکی شده است. سپس از نتایج حاصل از مدل کالیبره شده خلیج فارس داده‌های تراز سطح آب در مرز محدوده بندرعباس استخراج و مدل هیدرودینامیکی محلی برپا شده است. سرانجام مدل کیفی براساس محل تخلیه و داده‌های کیفی فاضلاب تخلیه‌شونده به محیط و دیگر داده‌های موجود از نمونه‌برداری‌ها و اندازه‌گیری‌ها برپا و اجرا شده است. بدین ترتیب پخش آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که بیان شده است، الگوی کلی پخش و گسترش آلودگی به سمت سواحل شرقی بندرعباس با کاربری گردشگری می‌باشد. البته درصد اثرگذاری همان‌طور که بررسی شده، بالا نبوده است. این موضوع در بررسی ظرفیت جذب و مقایسه با استاندارد کیفیت آب‌های ایران در انتهای

این فصل تایید می‌شود. موضوع بعدی بررسی نتایج با استاندارد کیفیت آب دریاهای ایران است. بر اساس این مقایسه منطقه شرقی بندرعباس با توجه به کاربری گردشگری و اختصاص طبقه‌بندی خاص خود در استاندارد یاد شده وضعیت مطلوبی دارد. ولی منطقه مرکزی که به محل تخلیه نزدیک است و خور گورسوزان که محل تخلیه فاضلاب است مقادیر به دست آمده از حدود استاندارد تجاوز می‌کنند، لذا شرایط این محدوده‌ها، مخصوصاً خور گورسوزان مطلوب نمی‌باشد.

با توجه به سه بررسی صورت گرفته در بالا و با توجه به این که الگوی جریانات در محدوده خور گورسوزان به صورت رفت و برگشتی بوده و شدت جریانات با فاصله گرفتن از دهانه خور کمتر و در نتیجه تبدلات سخت‌تر صورت می‌گیرند، زمان ماند در خور بالا است. با توجه به نتایج بررسی ظرفیت جذب این محیط که مقادیر پایینی را نشان می‌دهد این خور مستعد ایجاد شرایط یوتروفیک است و توانایی تحمل فاضلاب تصفیه‌شده حتی در صورت تصفیه پیشرفته را نیز نخواهد داشت. از طرفی، خروجی تصفیه فاضلاب در تصفیه‌خانه مربوطه با توجه به داده‌های دریافت شده نشان‌دهنده مقادیر بالای آلاینده‌ها است. علاوه بر این مقادیر آلاینده‌ها در این خور از حدود مجاز هم متجاوز است.

با توجه به نتایج به دست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که تخلیه فاضلاب تصفیه‌شده به این خور و حتی خارج از خور و در نزدیکی ساحل مشکلات این منطقه را حل نخواهد کرد با توجه به سعی و خطاهای صورت گرفته و بررسی عمق و متوسط سرعت و جهت جریانات در منطقه، تنها راه حل استفاده از آتفال با طول حداقلی ۲۰۰۰ متر و عمق حدود ۷ متری می‌باشد. در این صورت احتمال ایجاد شرایط یوتروفیک در محیط خور و نواحی ساحلی بندرعباس به واسطه تخلیه فاضلاب تصفیه‌شده به شدت کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است محدوده پیشنهاد شده تقریبی است

## سپاسگزاری

این پژوهش در راستای مطالعات رساله دکتری دانشگاه تهران می‌باشد که توسط دانشجو و تحت نظارت استاد راهنما انجام شده است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری شرکت مهندسی آب و فاضلاب هرمزگان بابت همکاری مفید و همچنین داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی ارزشمند سپاسگزاری نمایند.

## پی‌نوشت‌ها

- <sup>1</sup> Passive tracer
- <sup>2</sup> Depth
- <sup>3</sup> Temperature
- <sup>4</sup> Transparency
- <sup>5</sup> Chlorophyll-a
- <sup>6</sup> NO<sub>2</sub>
- <sup>7</sup> NO<sub>3</sub>
- <sup>8</sup> NH<sub>4</sub>
- <sup>9</sup> Total Coliform
- <sup>10</sup> Fecal Coliform
- <sup>11</sup> Biological Oxygen Demand (BOD)
- <sup>12</sup> Dissolved Oxygen
- <sup>13</sup> PO<sub>4</sub>

## References

- Bahadur, R., Amstutz, D.E., & Samuels, W.B. (2018). Water Contamination Modeling-A Review of the State of the Science. *Journal of Water Resource and Protection*. (5), 142-155. doi:10.4236/jwarp.2013.52016
- De Serio, F., Ben Meftah, M., & Mossa, M. (2020). Monitoring and modelling of coastal currents and wastewater discharge: A case study. *Geo Eco Marina*.
- James, I.D. (2016). Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review, *Environmental modelling and software*, 17(4) 363-385. doi:10.1016/S1364-8152(01)00080-9
- Kregting, L., & Elsaber, B. (2020). A hydrodynamic modelling framework for strandford Lough part 1: Tidal model. *Journal of marine science and engineering*. 2(1), 46-65. doi:10.3390/jmse2010046

و تعیین محل دقیق، نیازمند اندازه‌گیری‌های دریایی جریان‌سنجی، هیدروگرافی، مطالعات رسوب و مطالعات زیستی و اکولوژیکی از جمله بررسی جوامع کفزی و پوشش بستر در این منطقه است. در انتها تاکید می‌شود در مرحله اول توقف تخلیه به خورگورسوزان و انتقال محل تخلیه به ناحیه دور از ساحل (فاصله حداقل ۲ کیلومتری از دهانه خور) به صورت آتفال، ضرورت محیط‌زیستی بالایی دارد و ادامه این شرایط خسارات جبران‌ناپذیری را به همراه خواهد داشت. در مرحله دوم ارتقا و بهبود فرایند تصفیه در تصفیه‌خانه فاضلاب بندرعباس به خصوص در نظر گرفتن حذف مواد مغذی، اهمیت بالایی دارد. همچنین بررسی دیگر منابع آلاینده این خور در نواحی بالادست موجب تصمیم‌گیری جامع‌تر و موثرتر در راستای بهبود شرایط این منطقه خواهد بود.

## منابع

- Lari, K., Khaniki, K., Torabi Azad, M., & Abdolhasani, M. (2016). Investigation and analysis of wave breaking pattern in Bushehr beaches. *Environmental science and technology Journal*, 14(4) 89-104
- Mahmoodi, S. (2019). 3D modeling of pollution spread in the Persian Gulf (MSc. Thesis), Khorramshahr University of Marine Science and Technology
- Sadrinasab, M., & Hosseini, S.T. (2019). Numerical modelling of surface and near bottom currents in the Bushehr Bay. *Journal of the Persian Gulf*. doi:10.1109/ICNIT.2010.5508448

