



Research Article

## Investigation of Brine Dispersion of Desalination Plants in the Vicinity of Kish Island Port Using Field Measurements and Numerical Modeling

Omid Pourabdollah<sup>1</sup> and Reza Ghiassi<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* corresponding author: ([rghiassi@ut.ac.ir](mailto:rghiassi@ut.ac.ir))

### Article Info

#### Article history:

Received: 11 May 2025

Revised: 4 August 2025

Accepted: 5 August 2025

#### Keywords:

Numerical modeling,  
field study,  
coastal desalination plants,  
environmental impact.

### Abstract

Desalination of seawater is one of the most effective methods, and in some cases, the only possible method for producing drinking water. The combined effect of desalination plants and port structures on the coastal environment can sometimes have specific environmental consequences. The dispersion from the desalination plants, especially the changes in salinity and temperature, has significant effects on coral reefs. In this paper, the effect of the commercial port of Kish Island with regard to the desalination plants was investigated using field measurements and numerical modeling. In 3 stages of field measurement, water quality parameters were measured from 24 different points near the northern coast of Kish Island. The speed and direction of the current were also measured to verify the accuracy of the numerical modeling. The current and dispersion of thermal and salinity pollution were modeled using the MIKE21 two-dimensional model. The computational domain was about 30 square kilometers in size and was discretized into four zones using four different element sizes. Comparison of the numerical modeling results with field measurements indicated acceptable accuracy. The results of the modeling of the salinity diffusion pattern indicate a significant spread in the zone surrounding the outfall of desalination plants and the Kish Island commercial port. Around the outfall, the average temperature and electrical conductivity (EC) increased by 16% and 14%, respectively. This is due to the effect of the west breakwater on current reduction, which resulted in increasing brine concentration. The ultimate point where the ambient temperature has increased by 3 degrees is 170 meters from the outfall. Therefore, considering the impact of temperature changes on coral reefs is critically important. Given the absence of measured data on water quality parameters, current, and velocity direction across various tides at this location, the findings of this study contribute to a better understanding of the environmental status of the area.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing.

### To Cite this article:

Pourabdollah, O. and Ghiassi, R. 2026. Investigation of brine dispersion of desalination plants in the vicinity of kish island port using field measurements and numerical modeling, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 17-30 .  
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.66751.3425>



## بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی

امید پورعبداله<sup>۱</sup> و رضا غیائی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران.

<sup>۲</sup> دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول ([rghiassi@ut.ac.ir](mailto:rghiassi@ut.ac.ir))

### چکیده

شیرین‌سازی آب دریا، یکی از بهترین یا در برخی مناطق، یگانه روش ممکن جهت تولید آب مصرفی است. تأثیر توأم تأسیسات آب شیرین‌کن و سازه‌های بندری در محیط‌زیست ساحل می‌تواند بعضاً تبعات خاص زیست‌محیطی به همراه داشته باشد. پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن و مشخصاً تغییرات میزان شوری و دما، آثار قابل‌توجهی در مجموعه‌های مرجانی دارد. در نوشتار حاضر، اثر توأم بندر تجاری جزیره‌ی کیش و تأسیسات آب شیرین‌کن در تغییرات کیفی آب محدوده‌ی مرتبط، بررسی میدانی و عددی شده است. در ۳ مرحله، نمونه‌برداری میدانی از ۲۴ نقطه‌ی مختلف نزدیک ساحل شمالی جزیره‌ی کیش، پارامترهای کیفی آب اندازه‌گیری شده‌اند. سرعت و جهت جریان نیز جهت راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام‌شده اندازه‌گیری شده‌اند. مدل‌سازی جریان و پراکنش آلودگی حرارتی و شوری با استفاده از مدل دوتبعی در پلان ۲۱ MIKE انجام شده است. میدان محاسباتی به ابعاد حدود ۳۰ کیلومترمربع و با کاربرد ۴ اندازه‌ی مختلف المان در ۴ ناحیه منقطع شده است. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی، نشانگر دقت قابل‌قبول است. نتایج مدل‌سازی الگوی انتشار شوری، بیانگر گستره‌ی قابل‌توجه در منطقه‌ی پیرامونی محل خروجی پساب و بندرگاه تجاری کیش است. به‌طوری‌که در محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی پساب، میزان شوری و دما به‌دلیل وجود موج‌شکن غربی، کاهش سرعت جریان، و عدم‌تغییر محل خروجی، ۱۵-۱۶ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده بوده است. دورترین نقطه‌ای که در آن دمای خروجی آب موجب افزایش ۳ درجه‌ای محدوده شده است، ۱۷۰ متر از محل خروجی بوده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

### واژگان کلیدی:

مدل‌سازی عددی،

اندازه‌گیری میدانی،

آب شیرین‌کن ساحلی،

آثار زیست‌محیطی.

### ۱. مقدمه

زیست‌محیطی مهم است. برای درک کیفی وضعیت موجود نوار ساحلی و نحوه‌ی پراکندگی پساب آب شیرین‌کن، جمع‌آوری داده‌های میدانی، مانند: سرعت و جهت جریان در جزر و مدهای مختلف، هیدروگرافی، و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای مرتبط انجام‌پذیر است. سهم قابل‌توجهی از آب شیرین‌کن‌های موجود در دنیا و عملاً تمامی آن‌ها درکشورمان به دو روش اسمز معکوس (RO) و تقطیری (MED) شیرین‌سازی آب دریا را انجام می‌دهند؛ که در هر دو روش مذکور در کنار مصرف انرژی، پساب خروجی باعث افزایش دما و شوری می‌شود. با توجه به اهمیت موارد زیست‌محیطی و عدم شناخت کافی نحوه‌ی انتشار پساب آب شیرین‌کن‌ها در موقعیت‌های مکانی مختلف، در طی سال‌های گذشته، مطالعات متنوعی در بخش برداشت‌های میدانی و تحلیلی کیفیت آب سواحل انجام شده است.

شیرین‌سازی آب دریا، یکی از بهترین یا در برخی مناطق مانند مناطق ساحلی، یگانه روش ممکن جهت تولید آب شیرین است. مناطق اخیر معمولاً برای تأمین نیازهای اقتصادی، اجتماعی، و حمل‌ونقل شامل سازه‌های بندری و دریایی هستند. شیرین‌سازی سایر فرآیندهای مهم صنعتی و عمرانی، آثار زیست‌محیطی دارند. تأثیر توأم تأسیسات آب شیرین‌کن و سازه‌های بندری و دریایی در محیط‌زیست ساحل می‌تواند بعضاً تبعات خاص زیست‌محیطی به همراه داشته باشد. با توجه به ماهیت پدیده‌ی انتقال و انتشار یک ماده در ماده‌ی دیگر، که معمولاً با حجم بیشتری نسبت به ماده‌ی انتقال‌یافته یا منتشرشده است، پدیده‌ی انتشار پساب تأسیسات آب شیرین‌کن‌ها به‌دلیل افزایش دو پارامتر اصلی دما و شوری در کنار سایر پارامترهای مؤثر

استناد به این مقاله:

پورعبداله، امید و غیائی، رضا، ۱۴۰۵. بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی. مهندسی عمران شریف،

صص ۳۰-۱۷. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.66751.3425>



با در نظر گرفتن پارامترهای جزر و مد و باد و اندازه‌گیری میدانی خلیج فارس، نتایج مدل‌سازی را واسنجی کرده‌اند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی جریان جزر و مدی با اندازه‌گیری میدانی، دقت قابل قبولی داشته و تأثیر توأمان باد و جزر و مد در کیفیت آب خلیج چابهار اثر قابل توجهی داشته است.

آبه‌سی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۹]</sup> آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی جت‌های متراکم خروجی پساب آب شور به صورت مایل در آب‌های کم‌عمق با نازل‌هایی در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور افقی انجام داده و تغییرات تمرکز غلظت در مسیر پرتاب را با روش سه‌بعدی فلورسانس القایی لیزر اندازه‌گیری کرده‌اند. سولا<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۰]</sup> در بررسی اثر زیست‌محیطی ۳۰ عدد آب شیرین کن در کشور اسپانیا مابین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹، به ارزیابی کیفی طرح‌های زیست‌محیطی مانیتورینگ تأسیسات آب شیرین کن کشور اسپانیا پرداخته‌اند. الزام‌های مانیتورینگ پساب خروجی و طراحی با گذشت زمان بهبود یافته است؛ ولی بازنگری در الزام‌های مذکور، در سطح ملی جهت یکسان‌سازی توصیه شده است. این استانداردسازی باید بیشتر متوجه تأسیسات آب شیرین کن با ظرفیت بالا باشد، زیرا احتمال تأثیرگذاری بیشتری در محیط دریا دارند.

در زمینه‌ی مطالعات عددی کیفیت آب ساحلی، آنتون<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۷۱)<sup>[۱۱]</sup> جهت شناسایی معیار نحوه‌ی انتشار پساب خروجی تأسیسات آب شیرین کن در اقیانوس از مدل ساده‌شده‌ی ریاضی جریان یک‌بعدی در میدان سه‌بعدی استفاده کرده‌اند. استیدمن و کریج<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۳)<sup>[۱۲]</sup> با مشاهده‌های اندازه‌گیری جریان در مطالعه و مدل‌سازی وضعیت گردش جریان آب در منطقه‌ی Cockburn Sound تحت تأثیر شرایط مختلف وزش باد، مانند نسیم ساحلی و طوفان زمستانی، نشان داده‌اند که میانگین سرعت کمتر از ۰/۰۵ متر بر ثانیه در منطقه‌ی مذکور و ۰/۰۷ متر بر ثانیه در آب‌های آزاد ساحلی مجاور بوده است. همچنین، بیشینه‌ی جریان ناشی از جزر و مد نیز بسیار کم و با بزرگی ۰/۰۱ متر بر ثانیه بوده است.

پایو<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۱۳]</sup> در بررسی تأثیر باد و امواج در رقیق شدن پساب خروجی دو تأسیسات آب شیرین کن در ساحل آلیکانته واقع در جنوب شرقی اسپانیا دریافته‌اند که خروجی پساب دو تأسیسات ذکر شده با یک کانال مشترک به نزدیکی ساحل انتقال می‌یابند. مدیران تأسیسات باید قبل از تخلیه‌ی پساب، آن را با آب دریا رقیق کنند تا مقادیر شوری کاهش یابد. ایشان برای درک بیشتر، سناریوی منحصر به فرد اثر باد و امواج در روند اخیر مخلوط کردن در نزدیکی ساحل را ارائه کرده‌اند؛ که عملکرد موج حاکی از کاهش میزان شوری بوده است. نه فقط ارتفاع موج، بلکه مدت زمان طوفان نیز نقش مهمی را ایفا کرده است.

علیشیری و طیبی (۲۰۱۴)<sup>[۱۴]</sup> به بررسی مفهومی فرآیندهای شیرین‌سازی آب دریا و ارائه‌ی الگوریتم مدل‌سازی غیرخطی معکوس در هوش مصنوعی با هدف اتخاذ تصمیم‌های اساسی جهت انتخاب بهینه‌ی فرآیند آب شیرین کن و به کاربرد مناسب‌ترین سیستم آب شیرین کن متناسب با پارامترهای مختلف

در یکی از قدیمی‌ترین مطالعات، فالکونر<sup>۱</sup> (۱۹۹۲)<sup>[۱]</sup> یک مدل ریاضی دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق را برای پیش‌بینی مشخصات جریان توسعه داده است؛ که در آن، ارتفاع آب، سرعت میانگین در عمق، و توزیع غلظت در رودخانه‌ها، مصب‌ها، و آب‌های ساحلی قابل محاسبه بوده است.

مورتن<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۷)<sup>[۲]</sup> آثار زیست‌محیطی ساحلی تأسیسات آب شیرین کن را با فرآیند اسمز معکوس در مقایسه با روش تقطیری بررسی و میزان مصرف آب ورودی، دما، و میزان غلظت مواد شیمیایی پساب خروجی آب‌شیرین کن را ارزیابی کرده‌اند.

بررسی آثار پساب آب شیرین کن ساحل بارانکو دل تورو<sup>۳</sup> واقع در جنوب جزایر قناری جهت شناسایی آثار ناشی از تخلیه بر روی جانوران و گیاهان منطقه، با توجه ویژه به وجود گونه‌ی گیاهی دریایی موجود در بستر شنی آن منطقه با انجام مطالعات ژرفاسنجی جهت شناسایی نحوه‌ی هدایت خروجی با توجه به تغییر عمق توسط تالاورا و رویز<sup>۴</sup> (۲۰۰۱) انجام شده است.<sup>[۳]</sup> دانون<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷)<sup>[۴]</sup> آثار پساب تأسیسات آب شیرین کن در حیات دریا را بررسی کرده و دریافته‌اند که شوری، دما، و نوسان‌های قلیایی کل به دلیل تخلیه‌ی پساب از تأسیسات شیرین‌سازی می‌توانند نقش بسزایی در فراوانی و توزیع گونه‌های گیاهی و جانوری داشته باشند. تورکومادا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۵]</sup> با انجام بررسی‌های میدانی، پردازش داده‌ها، و مدل‌سازی در نرم افزار ArcGIS به اعتبارسنجی و ارزیابی مطالعات و مدل‌های ارائه‌شده‌ی پراکندگی پساب تأسیسات آب شیرین کن‌های غربی دریای مدیترانه به روش اسمز معکوس پرداخته‌اند.

کوداله<sup>۷</sup> (۲۰۱۰)<sup>[۶]</sup> در ارزیابی تأثیر توسعه‌ی بندر و تغییرات در خط ساحلی و نیاز به حفاظت آن دریافته است که خط ساحلی به‌طور طبیعی تحت تأثیر جزر و مد و تغییرات فصلی مؤثر در امواج و باد است، که در مورفولوژی نوار ساحل تأثیرگذار است. درک صحیح از شناخت روند سواحل و پیش‌بینی وقایع، پیش از رخداد، اهمیت بسیاری دارد. تغییرات در تأسیسات ساحلی مستلزم توجه به موضوع لایروبی و در معرض قرار گرفتن فعالیت‌ها جهت حفظ عمق مورد نیاز بندر است. روش عبور رسوب (Sand bypassing) به عنوان یکی از بهترین روش‌ها جهت کاهش رسوب‌گذاری پیشنهاد شده است.

مرجانی و جمالی (۲۰۱۴)<sup>[۷]</sup> در بررسی تأثیر تبادل جریان در دریاچه‌ی ارومیه، با توجه به اینکه یک جاده‌ی ۱۵ کیلومتری دریاچه را به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم می‌کند، دریافته‌اند که تفاوت‌های سطح آب و چگالی میان دو قسمت شمالی و جنوبی دریاچه در بهار به دلیل ورود حجم زیادی از آب شیرین به دریاچه‌ی جنوبی افزایش می‌یابد. با توجه به تبخیر زیاد در تابستان، آن‌ها با ادغام نتایج نظریه‌ی هیدرولیک نشان داده‌اند که جریان تبادل از طریق شکاف میان دو قسمت، تفاوت‌های سطح آب و شوری دو دریاچه را کاهش می‌دهد و بنابراین به احیاء وضعیت پیش از ساخت دریاچه تا پایان پاییز کمک می‌کند.

سلطان‌پور و دیباچ‌نیا (۲۰۱۵)<sup>[۸]</sup> با ایجاد یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیک و

<sup>7</sup> Kudale

<sup>8</sup> Abessi

<sup>9</sup> Sola

<sup>10</sup> Anton

<sup>11</sup> Steedman & Craig

<sup>12</sup> Payo

<sup>1</sup> Falconer

<sup>2</sup> Morton

<sup>3</sup> Barranco del Toro Beach

<sup>4</sup> Talavera & Ruiz

<sup>5</sup> Danoun

<sup>6</sup> Torquemada

حدود ۹۵۰ پروفیل دمایی آب را در تابستان (ژوئیه تا سپتامبر)، تجزیه و تحلیل کرده‌اند.

نیا<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۲۲]</sup> رویکرد تحلیلی جهت پیش‌بینی تغییرات فصلی شوری در خورها را ارائه کرده‌اند. پیش‌بینی دقیق تغییرات فصلی شوری برای ارزیابی سلامت اکوسیستم خورها، اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل‌های سنتی استفاده‌شده برای پیش‌بینی تغییرات شوری معمولاً نیاز به داده‌های گسترده و محاسباتی قابل توجه دارند. برای حل چالش‌های اخیر، آن‌ها یک مدل جدید با پیچیدگی کاهش یافته را ارائه کرده‌اند. مطالعات مشابه دیگری نیز توسط برخی پژوهشگران انجام شده است، که در آن‌ها مروری بر مطالعات مدل‌سازی‌های انجام‌شده بر خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن صورت گرفته است؛ که توسط احمد<sup>۲۲</sup> و همکاران (۲۰۲۲)<sup>[۲۳]</sup> به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی کاربرد قابل توجهی در علوم مهندسی داشته است. نمونه‌ای از کاربرد هوش مصنوعی در مباحث مهندسی سواحل مطالعات امینی و همکاران (۲۰۲۵)<sup>[۲۴]</sup> در استفاده‌ی مدل‌های پیش‌بینی هوش مصنوعی برای چرخش‌های روزانه و فصلی در دریاچه‌های کم‌عمق است. اگرچه کاربرد هوش مصنوعی نمی‌تواند جایگزین اندازه‌گیری‌های میدانی و تحلیل‌های هیدرودینامیک باشد، ولی به عنوان یک ابزار کمکی در کنار روش‌های موجود جهت کاهش زمان و هزینه‌های اندازه‌گیری می‌تواند مفید باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، اثر موج‌شکن‌های بندر در خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن بررسی شده و با توجه به موقعیت خاص محیط زیست سواحل مرجانی منطقه، انجام پروژه‌ی مذکور، ویژه و توجیه‌پذیر است.

## ۲. منطقه‌ی مطالعه‌شده

### ۱.۲. جزیره‌ی کیش

جزیره‌ی مرجانی کیش، یکی از جزایر تاریخی و مهم خلیج فارس، همچون دیگر مناطق تحت تأثیر شرایط محیطی و ویژگی‌های جغرافیایی پیرامون خود قرار دارد؛ که با شکلی تقریباً بیضوی، مساحتی بالغ بر ۹۱ کیلومتر مربع دارد. طول آن حدود ۱۵/۵ کیلومتر و عرض آن در حدود ۷/۵ کیلومتر است، و بیش از ۳۵ کیلومتر خط ساحلی دارد. نزدیک‌ترین بندر برای تردد دریایی مسافر و بار، بندر آفتاب و بندر چارک هستند (شکل ۱).

مرجانی‌بودن سواحل جزیره‌ی کیش اهمیت ویژه‌ای برای بررسی عوامل تغییرات زیست‌محیطی دارد. ذخایر مرجانی کیش نه فقط به دلیل جذابیت‌های



شکل ۱. موقعیت جزیره‌ی کیش در خلیج فارس.

پرداخته‌اند. پتل<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۵]</sup> در مدل‌سازی عددی پراکندگی آب شور در آب‌های کم عمق ساحلی نشان داده‌اند که جهت بهره‌برداری بهینه از تأسیسات شیرین‌سازی آب، نحوه‌ی قرارگیری مکان ورودی و خروجی باید به‌گونه‌ای باشد که گردش جریان شوری خروجی در ورودی به میزان کمینه برسد. بدین منظور، پراکندگی پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن در پروژه‌های متداول با استفاده از روش مدل‌سازی عددی باید ارزیابی شود.

بوتل‌هو<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۶]</sup> در مطالعه‌ی موردی شبیه‌سازی عددی پراکندگی پساب خروجی مرحله‌ی دوم ساخت تأسیسات آب شیرین‌کن شهر پرتس استرالیا، نتایج شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفیت آب را جهت بررسی پراکندگی پساب خروجی توأمان بخش اول تأسیسات شیرین‌سازی و بخش پیشنهادی دوم تأسیسات مذکور بر منطقه‌ی Cockburn Sound را ارائه کرده‌اند. جهت راستی‌آزمایی نتایج مدل‌سازی عددی نیز برداشت‌های میدانی در فاصله‌های دور و نزدیک انجام داده‌اند. وود<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۱۷]</sup> در مدل‌سازی نحوه‌ی انتشار چند منبع خروجی پساب آب شیرین‌کن در نوار ساحل شرقی مدیترانه، آثار روش انتشار توده‌ی پساب در محدوده‌های دور و نزدیک از ساحل را بیان کرده‌اند. بررسی اثر پیش ترکیب‌کردن آب استفاده‌شده‌ی خنک‌سازی تأسیسات و پساب خروجی، حاکی از کاهش آثار منفی شناوری توده‌ی پساب و جلوگیری از گسترش آن بوده و این درحالی است که پساب خروجی پخش‌کننده‌ها در محدوده‌ی دور از ساحل به‌صورت جریان‌هایی با چگالی بالای شوری، به‌صورت نامنظم انتشار یافته است.

پریتر<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۱۵)<sup>[۱۸]</sup> مدل‌سازی خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن فورت‌آلزا<sup>۱۷</sup> برزیل را انجام داده و دریافته‌اند که مدل‌سازی تخلیه‌ی پساب در کیفیت آب سواحل فورت‌آلزا مؤثر بوده است. در مطالعه‌ی اخیر، ارزیابی رقیق‌سازی توده‌ی شوری در حوزه‌ی میدانی نزدیک ساحل و مدل‌سازی هیدرودینامیکی جهت ارزیابی رقیق‌سازی در محدوده‌ی دور ارائه شده و نتایج نشان داده است که توده‌ی پساب از خروجی بستر دریا بیش از ۲ کیلومتر از نزدیک‌ترین ساحل فاصله داشته است.

پرادهان<sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۲۲)<sup>[۱۹]</sup> در مدل‌سازی همزمان هیدرودینامیک و کیفیت آب در آب‌های ساحلی چنای<sup>۱۹</sup> در سواحل شرقی هند، پارامترهای کیفیت آب را در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی برای فصول مختلف برای دما، شوری، اکسیژن محلول، و کلروفیل شبیه‌سازی کرده و نتایج مدل‌سازی را با اندازه‌گیری‌های مکرر واسنجی کرده‌اند. به‌طوری که عملکرد مدل هیدرودینامیک و کیفیت آب تا سه روز پیش‌بینی قابل‌قبولی انجام داده است.

بررسی هیدرودینامیک فرآیند انتقال شوری در دریاچه‌ی ارومیه به‌عنوان یک دریاچه با شوری بالا (بیش از ۴۰۰ PSU) توسط صفایی و جماعت (۲۰۲۴)<sup>[۲۰]</sup> با در نظر گرفتن فعالیت‌های انسانی و شرایط تغییر اقلیم به‌صورت مطالعه‌ی موردی انجام شده است.

تغییرات میانگین دمای آب دریاچه‌ی کونوسی فنلاند در فصل تابستان در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ توسط جیا<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۲۱]</sup> بررسی شده و

<sup>18</sup> Pradhan  
<sup>19</sup> Chennai  
<sup>20</sup> Jia  
<sup>21</sup> Nia  
<sup>22</sup> Ahmed

<sup>13</sup> Patel  
<sup>14</sup> Botelho  
<sup>15</sup> Wood  
<sup>16</sup> Pereira  
<sup>17</sup> Fortaleza



شکل ۳. (a) بندر تجاری کیش در سال ۱۹۸۷، (b) بندر تجاری کیش در سال ۲۰۲۴.



شکل ۴. عکس هوایی و جانمایی ورودی و خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن.

خورشیدی، ساخت اسکله‌ی ۱۲۰۰۰ تنی آغاز شده است. همان‌طور که در شکل ۳- a مشاهده می‌شود، در ابتدا حوضچه‌ی بندرگاه شمالی کیش به شکل مربع مستطیل و با ورودی در قسمت شمال شرقی بوده است. محل ورودی آب شیرین‌کن در بخش شمال غربی حوضچه‌ی بندرگاه و آب خروجی به بیرون از موج‌شکن‌های بندرگاه به دو صورت مسیر روباز و لوله در سطح خط ساحلی به دریا انتقال می‌یابد.

شرایط فعلی در سال ۱۴۰۴ از نظر موقعیت موج‌شکن‌ها و مرز خشکی و دریا مشابه شکل ۳- b است، با این تفاوت که تأسیسات در خشکی افزایش یافته و پُرکردن بخش استحصال‌شده نیز تقریباً تکمیل شده است. پُرکردن بخش اخیر سبب نفوذ مصالح از لابه‌لای موج‌شکن غربی حوضچه به داخل آن و متعاقباً ورودی آب شیرین‌کن شده است، که نیازمند تمهیدات بیشتری جهت کنترل ورودی است. در شکل ۴، جانمایی ورودی و خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن مشاهده می‌شود.

#### ۴.۲. مشخصات فنی محدوده‌ی مطالعاتی

در بخش اول، مشخصات فنی محدوده‌ی مطالعاتی، میدان مطالعاتی، و محاسباتی، شامل مشخصات هندسی و هیدروگرافی و در بخش دوم، تعریف متغیرهای هیدرولیکی و کیفی آب دریا ارائه شده است.

#### ۴.۲.۱. میدان مطالعاتی و محاسباتی

مطابق شکل ۵، عمق آب در نواحی ساحلی اطراف بندرگاه کیش از مقادیر بسیار کم آغاز می‌شود و تا رسیدن به دهانه‌ی بندر، عمق میانگین به حدود ۱۲



شکل ۲. موقعیت مکانی بندر شمالی و نیروگاه آب و برق کیش.

توریستی و اکوتوریسم مورد توجه‌اند، بلکه نقش آن‌ها در تعادل و پایداری اکوسیستم دریایی پیرامونی، حیاتی است. متأسفانه در سال‌های اخیر پدیده‌ی سفیدشدن مرجان‌ها، که به معنای آسیب یا مرگ آن‌هاست، در اثر تغییرات زیست‌محیطی شدت یافته است. فرایند ساخت و توسعه‌ی بندر معمولاً پیامدهای زیست‌محیطی به همراه دارند، لذا لازم است که براساس پارامترهای زیست‌محیطی و ضوابط قانونی، میزان آثار مذکور به میزان کمینه برسد. در اطراف بندر تجاری کیش، تأثیرات قابل توجهی مشاهده می‌شود، که عمدتاً ناشی از مجاورت آن با تأسیسات آب شیرین‌کن و خروجی پساب است. به‌طوری که، شرایط محیط پیرامون بخش مذکور، مسیر جریان پساب را تغییر داده است؛ که در نتیجه‌ی آن، دما و شوری آب در محدوده‌ی خروجی افزایش یافته است.

#### ۲.۲. موقعیت آب شیرین‌کن شمالی و بندر تجاری

در ناحیه‌ی شمالی جزیره‌ی کیش، تأسیسات مشترک نیروگاه برق و آب (نیروگاه آب و برق کیش) واقع شده است، که مسئول تأمین بخش عمده‌ای از نیازهای برقی و آبی جزیره‌ی کیش است. همچنین، بندر تجاری کیش، که به‌عنوان بندرگاه اصلی جزیره شناخته می‌شود، در منطقه‌ی مذکور و در مختصات جغرافیایی  $26^{\circ}33'43''$  شمالی و  $53^{\circ}59'40''$  شرقی قرار گرفته است.

با افزایش تدریجی توسعه‌های صورت‌گرفته طی چند دهه‌ی اخیر، نیاز پایدار به تأمین منابع آب مصرفی، استفاده از روش‌های شیرین‌سازی آب دریا را ضروری ساخته است. نیروگاه شمالی جزیره، که به نام نیروگاه آب و برق کیش معروف است (شکل ۲)، نخستین تأسیسات تولید هم‌زمان برق و آب شیرین در شمال جزیره به‌شمار می‌رود. این پروژه از سال ۱۳۵۳ آغاز به کار کرده و با نصب ۴ دستگاه آب شیرین‌کن، فرایند شیرین‌سازی آب دریا را کلید زده است. در حال حاضر، تأسیسات اخیر قادر به تولید متوسط روزانه حدود ۲۲۰۰۰ مترمکعب آب شیرین از طریق دو روش MED (شیرین‌سازی چندمرحله‌ای) و RO (اسمز معکوس) هستند. فرایند کار به این صورت است که در هر ساعت، حدود ۵۰۰۰ مترمکعب آب دریا وارد سیستم و تقریباً ۱۰۰۰ مترمکعب آب شیرین تولید می‌شود.

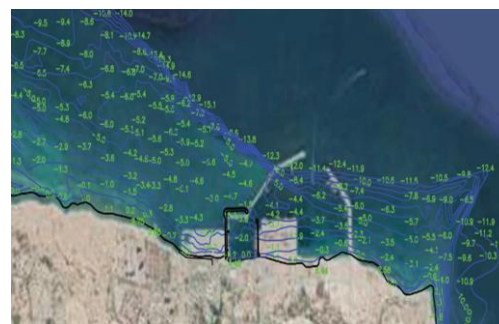
تفاوت دمایی میان آب ورودی و خروجی، بسته به فصل سال متغیر است؛ به‌عنوان مثال، در فصل تابستان، دمای آب ورودی به حدود  $36^{\circ}\text{C}$  رسیده و دمای پساب خروجی تا  $50^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شده است.

#### ۳.۲. پلان بندر تجاری

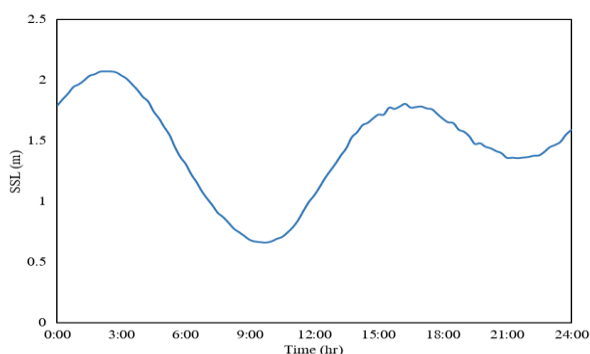
در دهه‌ی ۶۰ خورشیدی، اجرای بندر تجاری کیش شروع و طی سال‌های اخیر، جهت استحصال زمین، با لایروبی‌های انجام‌شده از درون حوضچه و اطراف بندرگاه، بخش جدیدی در ضلع غربی به محوطه‌ی باراندازی آن اضافه شده است. طول اسکله‌های بندر بیش از ۲۰۰۰ متر بوده و در دهه‌ی ۸۰



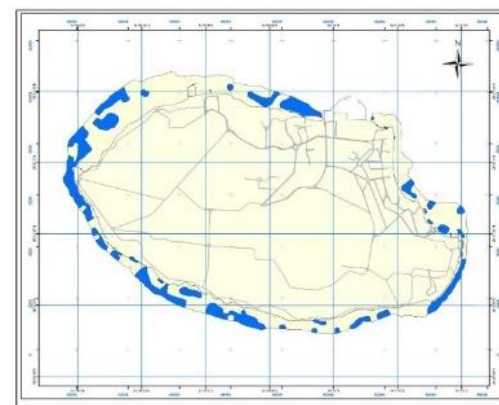
شکل ۷. محدوده‌ی مدل‌سازی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری.



شکل ۵. هیدروگرافی ناحیه‌ی شمالی پیرامون بندرگاه کیش.



شکل ۸. نمودار جز و مد (۱۰ مرداد، ۱۴۰۱).



شکل ۶. نقشه‌ی پراکنش مرجان‌های زنده (محدوده‌های آبی رنگ)

پیرامون جزیره‌ی کیش.



شکل ۹. عقب‌نشینی و تغییرات تراز سطح آب در محدوده‌ی جزیره‌ی کیش.

۵/۸، ۳/۸، و ۷/۷ کیلومتر است. شایان ذکر است طول خط ساحلی، حدود ۴/۶ کیلومتر است.

مسیر و نقاط مراحل سه‌گانه‌ی اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب و سرعت جریان علاوه‌بر شکل ۷، در بخش اندازه‌گیری میدانی نیز به تفکیک ارائه شده‌اند.

## ۲.۴.۲. متغیرهای هیدرولیکی و کیفی آب دریا

به‌منظور مدل‌سازی جریان و کیفیت آب در منطقه‌ی موردنظر، نیاز به تغییرات تراز آب در آنجاست. در محدوده‌ی پیرامونی جزیره‌ی کیش، اختلاف تراز سطح آب در روزهای مشخصی، مقدار قابل‌توجهی است. مثلاً طبق اطلاعات مندرج در سایت سازمان نقشه‌برداری، میانگین سالیانه‌ی اختلاف ارتفاع تراز آب در بازه‌ی ۲۰۲۳/۳/۶ الی ۲۰۲۴/۳/۶ به میزان ۱/۳۷ متر بوده است، که در بازه‌ی کمینه‌ی صفر و بیشینه‌ی ۲/۳۱ متری، به ترتیب ثبت شده است. میزان جز و مد اندازه‌گیری‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشوری در تاریخ ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ مطابق شکل ۸ است. محل نصب دستگاه سنجش تراز آب سازمان نقشه‌برداری کشوری در بخش شمال غربی حوضچه‌ی آرامش بندرگاه کیش بوده است. همچنین، در شکل ۹، میزان تغییرات تراز سطح آب دریا و نیز مقدار

متر می‌رسد. این نتایج بر پایه‌ی آخرین داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی موجود در مرکز اسناد جزیره‌ی کیش است. در فاصله‌ی حدود ۱ کیلومتر از خط ساحلی، عمق به‌طور تقریبی به‌صورت خطی از ۰ تا ۷ متر افزایش می‌یابد؛ سپس افزایش ناگهانی به عمق حدود ۱۲ متر مشاهده می‌شود. با دور شدن از دهانه‌ی بندرگاه، عمق بستر به‌طور چشم‌گیری تا حدود ۲۵ متر افزایش می‌یابد. با توجه به ساختار موج جزر و مد پیرامونی جزیره‌ی کیش و اطراف بندرگاه و مقایسه‌ی آن با عمق محدود محدوده‌ی مذکور، می‌توان از فرضیات ویژه‌ی مدل‌سازی آب‌های کم‌عمق به‌عنوان روش مناسبی در تحلیل استفاده کرد.

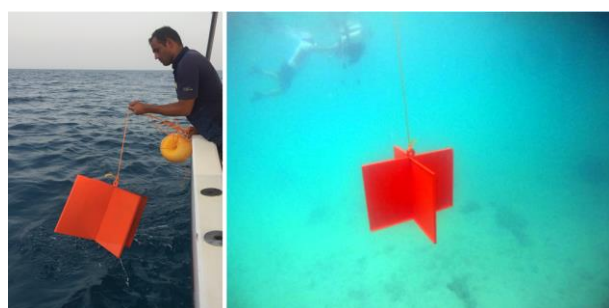
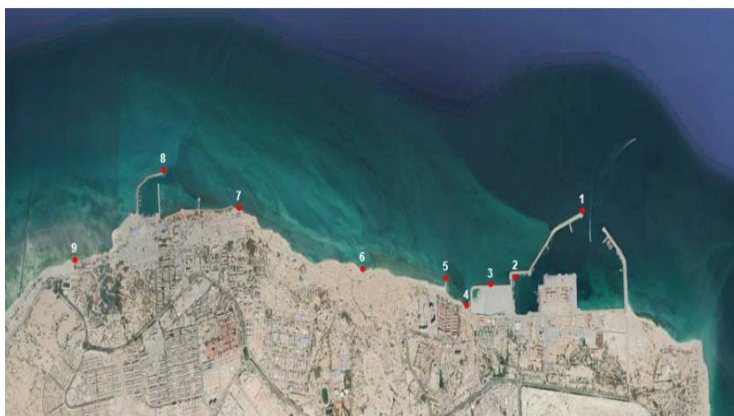
از آنجایی که بستر دریا در منطقه‌ی ذکرشده، تپه‌های مرجانی زیرآبی دارد و ذخایر مرجانی اخیر به‌ویژه در ناحیه‌ی غربی بندرگاه کنونی گسترده‌اند، مطالعه‌ی دقیق محدوده‌ی اخیر، اهمیت بسیاری دارد. عمق متوسط بنادر مرجانی کیش حدود ۵ متر است و مرجان‌های زنده غالباً در عمق بین ۳ تا ۷ متر پراکنده‌اند.

در شکل ۶، نقشه‌ی پراکنش مرجان‌های زنده‌ی پیرامونی جزیره‌ی کیش مشاهده می‌شود. موقعیت قرارگیری جزیره در خلیج فارس و هیدروگرافی اطراف آن و ماهیت مرجانی محدوده سبب شده است که عملاً پدیده‌ی رسوب‌گذاری در ناحیه‌ی مذکور مشاهده نشود.

به‌منظور انجام مدل‌سازی، محدوده‌ی مدل‌سازی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری با توجه به شرایط هندسی محدوده و نحوه‌ی انتشار پساب مطابق با شکل ۷ تعیین شده است. مرز شرق و غرب به‌صورت شمالی-جنوبی و مرز شمالی به‌صورت شرقی-غربی قرار دارد. مرز پایین محدوده‌ی مدل‌سازی محصور به خط ساحلی و بخشی از دریا در سمت شمال شرقی جزیره تعریف شده است. طول امتداد مرزهای جنوب شرقی، شرق، غرب، و شمال به‌ترتیب برابر با ۱/۳،

جدول ۱. اندازه‌گیری اولیه پارامترهای کیفیت آب نوار شمالی جزیره کیش.

| No. | Time  | Temp (°C) | pH  | TDS (g/L) | EC (mS/cm) |
|-----|-------|-----------|-----|-----------|------------|
| 1   | 15:21 | 24        | 7.1 | 36.1      | 50.6       |
| 2   | 15:09 | 22.5      | 7.1 | 26.3      | 50.6       |
| 3   | 14:41 | -         | 7.1 | 35.7      | 50.6       |
| 4   | 15:55 | 42        | 7.4 | 43        | 58.5       |
| 5   | 16:10 | 22.5      | 7.1 | 36.6      | 50.5       |
| 6   | 16:30 | 22        | 7.2 | 36.6      | 50.7       |
| 7   | 16:50 | 22.5      | 7.1 | 36.5      | 50.7       |
| 8   | 17:25 | 22.5      | 7.1 | 36.8      | 51         |
| 9   | 17:40 | 20        | 6.9 | 40        | 54.6       |



شکل ۱۰. شناور پره‌ای سطحی: (چپ) شناور زرد و پرهی قرمز در حال انداختن داخل آب؛ (راست) چهار پره در زیر آب در حال حرکت با جریان دریایی.

عقب‌نشینی در کنار یکی از صخره‌های مرجانی در نزدیکی ساحل مشاهده می‌شود.

### ۳. اندازه‌گیری میدانی

با توجه به نبود اطلاعات در مورد سرعت و جهت جریان، میزان دما، و شوری در محدوده‌ی مطالعه‌شده و همچنین، اهمیت تأثیر جزر و مد و هیدروگرافی محدوده در تغییرات کمیت‌های اخیر، پارامترهای کیفیت آب، سرعت، و جهت جریان به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شده‌اند.

### ۳.۱. روش اندازه‌گیری

به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب و با توجه به امکانات موجود، نمونه‌برداری از عمق کمتر از ۱ متر انجام شده است. دمای آب داخل ظرف توسط دماسنج جیوه‌ای با دقت  $\pm 0.5$  درجه‌ی سانتی‌گراد و بلافاصله پس از نمونه‌برداری (در سایه و دور از تابش مستقیم خورشید) اندازه‌گیری شده است. جهت اندازه‌گیری سایر پارامترهای کیفی آب (شوری، هدایت الکتریکی، و ...)، نمونه‌ها در آزمایشگاه مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری دقیق در جزیره کیش اندازه‌گیری شده‌اند. از دستگاه اندازه‌گیری مدل HACH، که مجهز به سنجنده‌های هدایت الکتریکی و شوری (به‌صورت مجزا) با قابلیت اندازه‌گیری آب دریاست، استفاده شده است. در انتقال و اندازه‌گیری نمونه‌ها، ضوابط استانداردهای مرتبط، مانند میزان دمای محیط جهت جلوگیری از تغییر شرایط نمونه‌ها در انتقال رعایت شده است. تعدادی از نمونه‌ها نیز جهت اندازه‌گیری مجدد در آزمایشگاه آب و محیط‌زیست دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران اندازه‌گیری شده‌اند.

جهت اندازه‌گیری سرعت جریان روش‌های متفاوتی وجود دارد، که متناسب با شرایط محیطی و جغرافیایی استفاده می‌شوند؛ که یکی از آن‌ها، که در مناطق کم‌عمق به کار می‌رود، روش شناور پره‌ای سطحی (Surface Drifter) است، که دقت قابل‌قبولی جهت اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان‌های زیرسطحی دارد.<sup>[۲۵]</sup> در روش اخیر، از طریق کاربرد مبانی روش مختصات لاگرانژی، سرعت جریان اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، متناسب با عمق محدوده‌ی بررسی‌شده، شناور ۴ پره ساخته و استفاده شده است. با توجه به مجهز بودن قایق استفاده‌شده به دستگاه موقعیت‌یاب دقیق و اندازه‌گیری موقعیت شناور پره‌ای در یک بازه‌ی زمانی مناسب، سرعت و جهت جریان در زمان‌ها و نقاط مختلف برداشت شده‌اند.

### ۳.۲. اندازه‌گیری مرحله‌ی اول

در مرحله‌ی اول اندازه‌گیری در بهمن ماه سال ۱۴۰۰، نمونه‌برداری در ۹ نقطه، که در شکل داخل جدول ۱ مشاهده می‌شود، در محدوده‌ی خط ساحلی انجام شده است. نمونه‌برداری از نقاط ۵، ۳، ۱، و ۸ از کنار موج‌شکن‌ها و نقطه‌ی ۲ از داخل حوضچه‌ی آرامش صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های پارامترهای کیفیت آب در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که نتایج آزمایش نشان می‌دهند، در نقطه‌ی ۴، که محل خروجی پساب است، تغییرات پارامترهای کیفیت آب کاملاً واضح است. به‌طوری که میانگین پارامترهای دما، PH، و هدایت الکتریکی نقاط ۲ الی ۸ به‌ترتیب ۲۲/۴، ۷/۱، و ۵۰/۶ بوده است، که در نقطه‌ی ۴، پارامترهای مذکور به‌ترتیب افزایش ۸۸، ۴، و ۱۶ درصدی داشته‌اند. عملاً با نزدیکی به محل خروجی پساب، پارامترهای کیفی آب تحت تأثیر قرار گرفته و با دورشدن از ناحیه‌ی مذکور، میزان آثار آن کاهش پیدا کرده است؛ که به‌دلیل افزایش سرعت جریان بوده و در ناحیه‌ی اطراف محل خروجی پساب، همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شده است، کاهش یافته است.

### ۳.۳. اندازه‌گیری مرحله‌ی دوم

پس از اندازه‌گیری مرحله‌ی اول در فصل زمستان و بررسی نتایج اولیه، با درنظرگرفتن شرایط اقلیمی جزیره کیش تصمیم بر اندازه‌گیری در تیرماه سال ۱۴۰۱ به‌دلیل افزایش دمای آب و محیط گرفته شده است. جهت ثبت اطلاعات دقیق‌تر از محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی پساب، نمونه‌برداری در ۱۲ نقطه مطابق شکل ارائه‌شده در جدول ۲ انجام شده است. مطابق نتایج

که تقریباً هر سه شرایط یکسانی داشته‌اند. این درحالی است که در برداشت‌های مرحله‌های اول و دوم، که در نزدیکی خروجی آب شیرین‌کن انجام شده بود، این تغییرات با نزدیک شدن به محل خروجی پساب افزایش قابل توجهی داشته است.

در بازه‌ی زمانی اندازه‌گیری مرحله‌ی سوم، جهت غالب جریان‌های جزر و مدی از سمت شرق به غرب بوده است. جهت اندازه‌گیری سرعت و جهت جریان، همان‌طور که در بخش روش اندازه‌گیری اشاره شده است، در یک بازه‌ی زمانی چند دقیقه‌ای، میزان جابجایی اندازه‌گیری شده است، تا مقادیر متوسط تغییرات سرعت ثبت شوند.

نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران،<sup>[۳]</sup> درخصوص تأثیر پساب آب شیرین‌کن در اجتماعات زیستی محلی و به‌طور مشخص خطر آثار آن در محیط مرجانی در جزیره‌ی کیش منطبق بوده است. همان‌طور که در مطالعه‌ی کودال (۲۰۱۰)،<sup>[۶]</sup> تأکید شده است، ساخت بندار بدون تمهیدات مدیریت رسوب و کیفیت آب، تبعات زیست‌محیطی دارد، و نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی مؤید مطلب اخیر است.

#### ۴. مدل‌سازی جریان و کیفیت آب

به منظور درک بهتر از نحوه‌ی انتشار پساب آب شیرین‌کن و با توجه به شرایط محیطی، المان‌های مرزی و عدم امکان سنجش کامل پهنه‌ی موردنظر، از مدل‌سازی ریاضی جهت مدل‌سازی انتشار پساب استفاده شده است.

#### ۱.۴. معادله‌های دیفرانسیل و نرم‌افزار مدل‌سازی

جهت مدل‌سازی جریان آب و نحوه‌ی انتقال و انتشار از حل عددی معادلات

ارائه‌شده‌ی آزمایش‌های پارامترهای کیفیت آب در جدول ۲، اثر پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن در محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی، به‌دلیل کم‌بودن سرعت جریان در کناره‌ی موج‌شکن واضح است؛ که به‌دلیل احداث موج‌شکن غربی و عدم تغییر محل خروجی پساب بوده است. در ناحیه‌ی تداخل ریختن پساب از لوله و نهر خروجی (نقطه‌های ۸ و ۹)، میانگین پارامترهای دما و هدایت الکتریکی (EC) نسبت به سایر نقاط به ترتیب افزایش ۱۶ و ۱۵ درصدی داشته است. نتایج برداشت این مرحله نسبت به مرحله‌ی قبل، شدت تأثیر پساب خروجی در محیط پیرامونی را دقیق‌تر نشان می‌دهد. به‌طوری که تأثیر محل و نحوه‌ی خروج پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در محیط پیرامونی کاملاً مشهود است.

#### ۴.۳. اندازه‌گیری مرحله‌ی سوم

پس از اندازه‌گیری مرحله‌های اول و دوم، جهت ثبت اطلاعات بیشتری از پارامترهای کیفیت آب در فواصل دورتر از خط ساحلی و همین‌طور سرعت و جهت جریان اندازه‌گیری، مرحله‌ی سوم انجام شده است. بدین منظور در ۳ نقطه که در شکل ارائه‌شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج پارامترهای دما، شوری، مقدار سرعت، و جهت جریان در نقاط مختلف در مردادماه ۱۴۰۱ اندازه‌گیری شده‌اند. در مرحله‌ی سوم سعی شده است با توجه به شرایط تلاطم دریا، هیدروگرافی، تردد شناورها، محدوده‌ی مدل‌سازی عددی زمان و مکانی طوری انتخاب شود که بیان‌گر مناسب‌ترین حالت از وضعیت پارامترهای مدنظر باشد.

همان‌طور که مقادیر پارامترهای دما و شوری نشان می‌دهند، به‌دلیل افزایش سرعت جریان در فاصله‌ی دورتر از محدوده‌ی برداشت مراحل قبل، مقادیر پارامترهای دما، PH، و EC به حالت عادی آب دریا نزدیک شده است؛ به‌طوری

جدول ۲. اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت آب در محدوده نزدیک خروجی پساب.

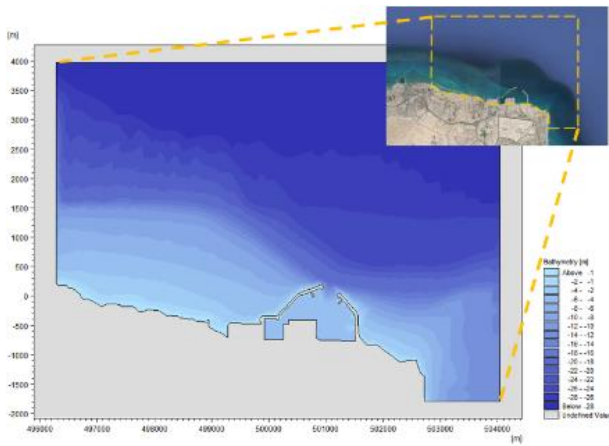
| No. | Time  | Temp (°C) | EC (mS/cm) |
|-----|-------|-----------|------------|
| 1   | 12:30 | 36.5      | 56.6       |
| 2   | 12:35 | 37        | 56.6       |
| 3   | 12:45 | 37        | 55.7       |
| 4   | 12:50 | 37        | 56.4       |
| 5   | 13:05 | 37        | 56         |
| 6   | 13:17 | 38        | 56.9       |
| 7   | 13:22 | 37.5      | 54.9       |
| 8   | 13:26 | 48.5      | 64.3       |
| 9   | 13:34 | 40.5      | 67.9       |
| 10  | 13:37 | 42        | 62.4       |
| 11  | 13:45 | 46        | 61.5       |
| 12  | 13:49 | 37        | 59         |



جدول ۳. نتایج برداشت میدانی مرداد ۱۴۰۱ در اطراف بندر کیش.

| No. | Time  | Temp (°C) | Salinity (psu) | Current Speed (m/s) | Direction (Deg) |
|-----|-------|-----------|----------------|---------------------|-----------------|
| 1   | 13:45 | 35        | 33.6           | 0.31                | 304             |
| 2   | 14:05 | 35        | 32.5           | 0.32                | 301             |
| 3   | 14:16 | 35        | 32.5           | 0.48                | 293.6           |





شکل ۱۱. محدوده‌ی مدل‌سازی و تغییرات تراز بستر دریا در محدوده‌ی ساحل شمال شرقی.

جهت مدل‌سازی و طراحی استفاده می‌شوند. با توجه به هدف مدل‌سازی هر کدام از نرم‌افزارها، مزیت‌های بیشتری جهت استفاده‌ی کاربر دارند. نرم‌افزار مایک ۲۱ (Mike 21) توسط شرکت DHI ارائه شده و یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی در حوزه‌ی سواحل و بنادر است. مدل‌سازی در نرم‌افزار مایک ۲۱، بر پایه‌ی معادلات دو بُعدی متوسط‌گیری‌شده‌ی عمق جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک الگوی جریان طی جزر و مدهای مختلف تعریف شده است. پارامترهای اصلی هیدرودینامیکی استفاده‌شده در مدل‌سازی مطالعه‌ی حاضر، تعیین شرایط مرزی، میزان جزر و مد، ضریب زبری بستر، و چسبندگی هستند. از تغییرات اثر موج و باد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه‌ی مطالعه‌شده صرف‌نظر شده است.

#### ۲.۴. میدان محاسباتی و مش‌بندی

محدوده‌ی میدان محاسباتی مطابق شکل ۷ تعیین شده است. موقعیت بندر و محل خروجی پساب در محدوده‌ی میدانی محاسباتی به ترتیب با فاصله‌های ۳/۵، ۴/۵، و ۴/۳ کیلومتر از مرزهای شرقی، شمالی، و غربی است. مرزهای محدوده‌ی مذکور در فواصل انتخاب شده‌اند که تغییرات دما و شوری در آنجا متصور نباشد. جهت مدل‌سازی دقیق‌تر، اطلاعات هندسی و عمق‌سنجی<sup>۲۳</sup> منطقه‌ی موردنظر در مدل‌سازی تعریف شده است. در شکل ۱۱، موقعیت محدوده‌ی مدل‌سازی در شمال شرقی جزیره‌ی کیش و نیز داده‌های ترسیم‌شده‌ی عمق‌سنجی مشاهده می‌شوند.

برای مدل‌سازی جریان و تغییرات دما در محدوده‌ی مورد مطالعه از ماژول مدل جریان با مش‌های منعطف (Flow Model (FM)) نرم‌افزار مایک استفاده شده است؛ که امکان مدل‌سازی دو بُعدی با در نظر گرفتن تغییرات عمق بستر با مش‌بندی انعطاف‌پذیر را نیز دارد. مش‌بندی انجام‌شده در میدان مذکور از نوع مثلثی با ابعاد متغیر ۷ متری تا ۲۰۰ متری در ۴ بخش مختلف مطابق شکل ۱۲ تقسیم‌بندی شده است.

بخش اول با مش‌های با بُعد بیشینه‌ی ۱۶۰ متر در محدوده‌ی مابین نوار ساحلی به طول بیشینه‌ی ۱/۸۱ کیلومتر و بیشینه‌ی فاصله‌ی ۶۱۰ متر از محل خروجی پساب، بخش دوم متشکل از مش‌هایی با بیشینه‌ی بُعد ۱۹۰ متر با بیشینه‌ی طول ۴/۰۳ کیلومتر و عرض ۱/۳۵ کیلومتر، بخش سوم با بزرگ‌ترین بُعد مش ۲۱۲ متری و بیشینه‌ی طول و عرض ۷/۷ و ۳/۲ کیلومتر، و بخش چهارم با

ریاضی استفاده شده است. معادله‌های هیدرودینامیک تغییر سطح آب و جریان تحت اثر نیروهای مختلف در دریا توسط مدول هیدرودینامیک مشخص می‌شوند. معادله‌های سه بُعدی مذکور با انتگرال‌گیری بر روی عمق (معادله‌های آب کم‌عمق) به معادله‌های دو بُعدی باقی‌جرم و باقی‌حرکت (ناویر-استوکس) به عنوان معادله‌های حاکم تبدیل می‌شوند. معادله‌ی پیوستگی متوسط‌گیری‌شده در عمق، به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\zeta$  تراز سطح آزاد آب،  $H$  عمق جریان،  $U$  و  $V$  سرعت آب در راستای  $x$  و  $y$  که از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آیند:

$$V = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} v dz \quad U = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} u dz \quad (2)$$

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت در جهت  $x$  متوسط‌گیری‌شده در عمق به صورت رابطه‌ی ۳ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U^2H) + \frac{\partial}{\partial y}(UVH) = gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{xz_b}}{r} + \nu^t H \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

و معادله‌ی اندازه‌ی حرکت در جهت  $y$  متوسط‌گیری‌شده در عمق به صورت رابطه‌ی ۴ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2H) = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{yz_b}}{\rho} + \nu^t H \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

که در آن،  $\nu^t$  ویسکوزیته‌ی سینماتیکی آشفتگی است.  $\tau_{xz_b}$  و  $\tau_{yz_b}$  تنش برشی در راستای  $x$  و  $y$  هستند، که مطابق روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$\tau_{xz_b} = \rho \frac{g}{C_{chezy}^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

$$\tau_{yz_b} = \rho \frac{g}{C_{chezy}^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $\rho$  چگالی آب،  $g$  شتاب ثقل، و  $C_{chezy}$  ضریب شزی هستند. معادله‌ی انتقال انتشار متوسط‌گیری‌شده در عمق نیز مطابق رابطه‌ی ۷ است:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HUC) + \frac{\partial}{\partial y}(HVC) = HD_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + HD_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S \quad (7)$$

که در آن،  $C$  غلظت کمیت موردنظر مثل دما یا شوری در هر المان  $D_x$  و  $D_y$  توسط ضریب انتشار در امتداد  $x$  و  $y$  و کمیت  $S$  منابع چشمه یا چاه کمیت موردنظر در هر المان هستند.

در حال حاضر، نرم‌افزارهای مدل‌سازی مختلفی توسط پژوهشگران و مهندسان

بازه‌ی زمانی لازم برای حرکت جزر و مد در فاصله‌ی مکانی حدود ۳ کیلومتر اعمال شده‌اند. اطلاعات مرزی استفاده‌شده در مرزهای شرقی و جنوب شرقی محدوده‌ی مدل‌سازی، داده‌های جزر و مدی اندازه‌گیری‌شده در تاریخ ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ بوده و در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به جریان غالب جزر و مد در خلیج فارس و تنگه‌ی هرمز که از سمت تنگه به سمت خلیج فارس در زمان مد است، با در نظر گرفتن موقعیت جزیره‌ی کیش، محدوده‌ی مدل‌سازی، مستندهای قبلی و مشاهده‌های میدانی جزر و مد مرزهای شرقی و جنوب شرقی با فاصله‌ی زمانی کوتاه به مرز غربی نیز منتقل می‌شود.

### ۳.۳.۴. مشخصات بستر

مقدار ضریب زبری بستر معادل عدد مانینگ به مقدار  $32 (s/m^{1/3})$  و ضریب چسبندگی برابر با  $0.02 (m^2/s)$  با توجه به مشاهده‌های میدانی و برخی مطالعات انجام‌شده،<sup>[۲۸-۲۶]</sup> منظور شده است. ضریب چسبندگی در نرم‌افزار Mike ۲۱ با عنوان ضریب ویسکوزیته‌ی گردابی افقی (Horizontal Eddy Viscosity) تعریف شده است.

### ۴.۳.۴. مشخصات سطح آزاد

با توجه به اینکه هدف از اندازه‌گیری و مدل‌سازی بررسی آثار خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در محیط پیرامونی است، محدوده‌ی مدل‌سازی با وسعت گسترده انتخاب نشده است. زمان انتخابی جهت اندازه‌گیری و مدل‌سازی ورزش باد بسیار کم بوده و از این رو شرایط مرزی خاصی برای ورزش باد به سطح آزاد آب در مدل اعمال نشده است. شایان ذکر است در مدل‌سازی انتشار حرارتی، دمای هوای محیط اعمال شده است.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شده است، پساب خروجی توسط دو مسیر نهر و لوله در مرز خط ساحلی به دریا انتقال پیدا می‌کند و هیچ‌گونه دیفیوژر ندارد.

### ۴.۴. نتایج مدل‌سازی

در ادامه‌ی بخش قبل، پارامترهای مختلف و موردنیاز مؤثر در مدل‌سازی توضیح داده شده‌اند. نتایج مدل‌سازی انتشار شوری و دما در روز ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ به این شرح انجام شده است: مدل‌سازی برای یک روز کامل (۲۴ ساعت) که شامل ۲ جزر و مد بوده است، انجام شده است. جزر و مد اول با هدف آماده‌سازی مدل (warm-up) منظور شده بود، که از آن برای مقایسه‌ی نتایج استفاده نشده است (شکل ۱۳). گام‌های اعلام خروجی نتایج هر ۱۵ دقیقه یکبار تنظیم

بیشینه‌ی بُعد مش ۲۳۳ متر و بیشینه‌ی طول و عرض ۷/۷ و ۲/۶ کیلومتر تعیین شده است.

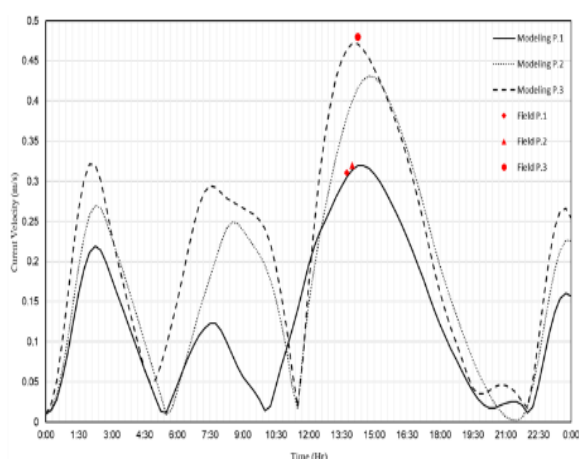
### ۳.۴. شرایط اولیه، مرزی، و بستر

#### ۱.۳.۴. شرایط اولیه

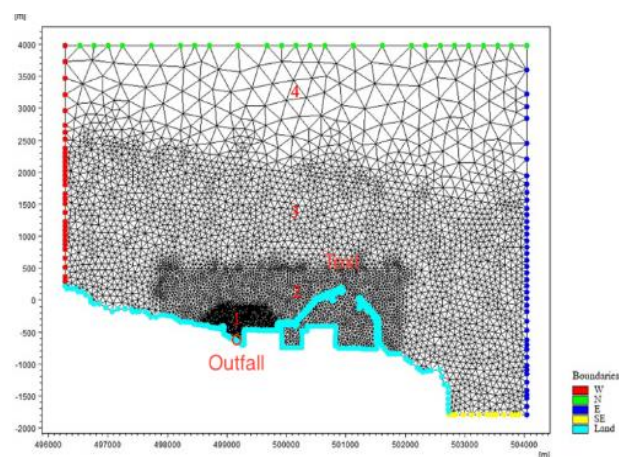
جهت مدل‌سازی، مقدار اولیه‌ی تراز سطح آب ۱/۷۹۲ متر مطابق با مقدار جزر و مد اندازه‌گیری‌شده اعمال شده است. سرعت اولیه در راستای X و Y به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ تعریف شده است. با توجه به اینکه تغییرات شوری در طول یک شبانه‌روز در محدوده‌ی مطالعاتی بسیار اندک بوده است، مقدار شوری مبنا، ۳۲ psu در شرایط اولیه ثابت فرض شده است. در خصوص تغییرات دما، علی‌رغم اینکه تغییرات دما در طول روز متفاوت بوده است، لیکن دمای آب در منطقه تغییرات چندانی نداشته و مقدار دمای اولیه، ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد تعریف شده است. مقدار دبی خروجی پساب  $0.3 m^3/s$  با شوری ۴۵ psu و دمای خروجی ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد فرض شده است. میزان دبی خروجی با توجه به ظرفیت و راندمان تأسیسات آب شیرین‌کن فرض شده است. مقادیر شوری و دمای خروجی نیز با توجه به مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل خروجی پساب در مدل‌سازی اعمال شده است. دبی خروجی به‌صورت نقطه‌یی در محل لوله‌ی خروجی پساب و با آهنگ ثابت در طول مدل‌سازی تعریف شده است.

#### ۲.۳.۴. شرایط مرزی جریان

تعریف مناسب شرایط مرزی در مدل‌سازی، اهمیت ویژه‌ی دارد. از این رو با توجه به اطلاعات و مدل‌سازی‌های انجام‌شده و قابل استناد در پهنه‌ی گسترده‌ی خلیج فارس، جهت دقت بیشتر مدل‌سازی و با توجه به نبود اطلاعات از پارامترهای محیطی در محدوده‌ی مطالعه‌شده، شامل خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن و بندر تجاری کیش، محدوده‌ی مدل‌سازی مطابق با شکل ۱۲ تعریف شده است. برای اطراف میدان محاسباتی، پنج مرز تعریف شده است: (۱) مرز خط ساحلی، موج‌شکن‌ها، و حوضچه‌ی بندرگاه (Land) به رنگ آب آسمانی، که از نوع مرز خشکی است و سرعتی عمود بر آن وجود ندارد. (۲) و (۳) مرز جزر و مد در شرق east به رنگ آبی و جنوب شرقی south-east به رنگ زرد، که داده‌های آن‌ها با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ی جزر و مد در کناره‌ی موج‌شکن اعمال شده‌اند. (۴) مرز باز در شمال north به رنگ سبز، که امکان عبور جریان از آن وجود دارد. (۵) مرز جزر و مد در غرب west به رنگ قرمز، که داده‌های آن با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ی جزر و مد با احتساب



شکل ۱۳. تغییرات سرعت مدل عددی و اندازه‌گیری میدانی.



شکل ۱۲. محدوده‌ی مدل‌سازی و مش‌بندی.

جدول ۴. مقادیر میزان دمای اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی.

| No. | Temp (°C) Field | Temp (°C) Model |
|-----|-----------------|-----------------|
| 1   | 35              | 34              |
| 2   | 35              | 34              |
| 3   | 35              | 34              |

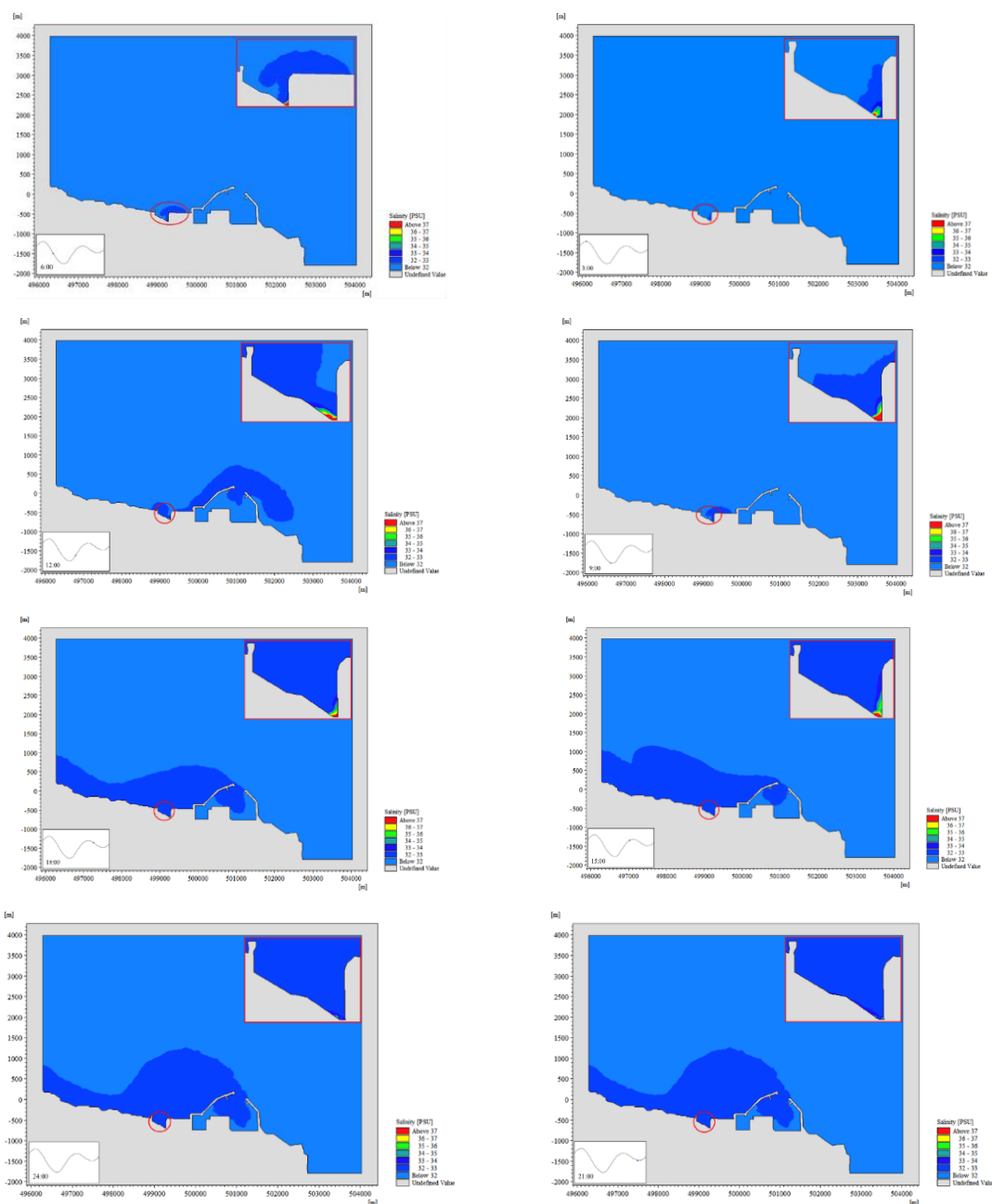
ارائه شده است. همان‌طور که دمای اندازه‌گیری شده در سه نقطه ثابت است، در مدل‌سازی نیز با اختلاف ۱ درجه، تغییرات دمایی در سه نقطه‌ی مذکور وجود ندارد.

در شکل ۱۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که نتایج مدل عددی می‌توانند معیار مناسبی از شرایط موجود در واقعیت باشد. در شکل ۱۴، الگوی انتشار شوری در ساعت‌های مختلف مدل‌سازی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، گستره‌ی قابل توجهی از محدوده‌ی مدل‌سازی تحت تأثیر پساب خروجی آب شیرین‌کن

شده است. کمینه و بیشینه‌ی گام زمانی حل معادله‌ها در مدل‌سازی ۰/۰۱ و ۳۰ ثانیه به ترتیب انتخاب شده است. نرم‌افزار Mike ۲۱ به صورت خودکار، پایداری Courant را کنترل و در صورت نیاز گام‌های محاسباتی را اصلاح می‌کند.

از آنجا که دقت مدل‌سازی باید با روشی دیگر واسنجی شود، نتایج مدل با اندازه‌گیری میدانی مقایسه شده است. در شکل ۱۳، تغییرات سرعت در مدل عددی و مقدار اندازه‌گیری شده در برداشت میدانی سوم مشاهده می‌شود.

مطابق شکل اخیر، اختلاف میزان سرعت در مدل‌سازی و مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه‌های ۱ و ۳ در زمان‌های موردنظر تقریباً بر هم منطبق هستند. در نقطه‌ی ۲، به دلیل موقعیت ورودی بندرگاه و تغییر جهت‌های احتمالی، میزان سرعت اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی با مقدار مدل‌سازی اختلاف دارد. در جدول ۴ نیز مقدار دما در سه نقطه‌ی اندازه‌گیری شده در برداشت سوم و مدل عددی



شکل ۱۴. الگوی انتشار شوری در ساعت‌های مختلف مدل‌سازی.

کیش دقت خوبی دارد. نتایج آزمایش‌های ۲۴ نقطه‌ای مختلف از پارامترهای کیفیت آب در محدوده ساحل شمالی جزیره کیش نشان می‌دهد که در نزدیکی محل خروجی پساب آب شیرین‌کن، دما و شوری افزایش قابل توجهی داشته است. به‌طوری که دما و شوری آب در نزدیکی خروجی، حدود ۱۵ الی ۱۶ درصد بالاتر از مقادیر طبیعی اندازه‌گیری شده و مدل عددی نیز همین حدود افزایش را تأیید کرده است.

در صورتی که ملاحظات لازم در محل خروجی پساب با توجه به موج‌شکن‌های بندر رعایت شده باشد؛ جریان در محدوده نزدیک ساحل، سرعت به مراتب بیشتری داشته و میزان اختلاط آب گرم خروجی از تأسیسات آب شیرین‌کن و آب دریا بسیار بهتر و در محدوده کوچکی اتفاق افتاده است. در نتیجه، آب گرم خروجی آب شیرین‌کن سریع‌تر با آب دریا مخلوط و زودتر محو می‌شده است. لیکن با توجه به وجود موج‌شکن‌ها در نزدیکی محل خروج پساب آب شیرین‌کن، میزان سرعت جریان در نزدیکی ساحل به شدت کاهش یافته و محدوده وسیع‌تری تحت اثر دمای بالاتر قرار گرفته است.

به‌طوری که در ناحیه‌ی تداخل ریختن پساب از لوله و نهر خروجی، میانگین پارامترهای دما و هدایت الکتریکی نسبت به سایر نقاط پیرامونی به ترتیب افزایش ۱۵/۸۶ و ۱۴/۸ درصد داشته است. همان‌طور که نتایج مدل عددی نشان داده است، گستره‌ی قابل‌توجهی از محدوده‌ی مدل‌سازی تحت تأثیر پساب خروجی آب شیرین‌کن قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به نظر می‌رسد لازم باشد برای کاهش آثار منفی زیست‌محیطی، بازنگری لازم نسبت به نحوه‌ی پخش پساب فعلی در داخل آب دریا اقدام شود. یکی از راهکارهای مناسب می‌تواند نصب دیفیوزر یا افشانه در دهانه‌ی لوله‌ی خروجی باشد، تا پساب به‌طور مناسب‌تری از لحاظ نحوه‌ی پخش وارد دریا شود و اختلاط اولیه بهبود یابد. در بلندمدت نیز بهتر است محل تخلیه به منطقه‌های دورتر از ساحل و نقاطی با سرعت آب بیشتر انتقال یابد.

همچنین در صورت وجود طرح توسعه برای تأسیسات آب شیرین‌کن جزیره کیش، توصیه می‌شود محل آبرگیر آب شیرین‌کن تغییر یابد.

جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که اعمال تغییرات شبانه‌روزی دما، کاربرد تئوری‌های مختلف آشفتگی و بررسی شرایط انتشار بدون وجود موج‌شکن‌های جدید در مدل‌سازی مدنظر قرار گیرد و تأثیر بلندمدت انباشت شوری در رسوب‌های بستر و تأثیر آن در زیست بوم نیز بررسی شود.

قرار گرفته است. میزان شدت تغییرات پارامترهای کیفیت آب همان‌طور که در اندازه‌گیری‌های میدانی در جدول‌های ۱ و ۲ نیز ارائه شده است، در اطراف محل خروجی پساب مشهود است. این درحالی است که نتایج ارائه‌شده در نوشتار حاضر، مدل‌سازی انجام‌شده برای یک روز است و طبیعتاً آثار خروجی پساب در طی ادوار گذشته و در آینده مقادیر قابل‌توجهی است. همان‌طور که ابعاد محدوده‌ی مدل‌سازی نشان می‌دهد، از محل خروجی پساب تا ورودی بندرگاه در سمت شرق و تا انتهای محدوده‌ی غربی مدل به ترتیب فواصلی بیش از حدود ۲ و ۳ کیلومتر است. این میزان تحت تأثیر قراردادن شوری و دما در خط ساحلی، حوضچه‌ی بندرگاه، و متعاقباً حجم کرانه‌ی ساحلی تأثیر قابل‌توجهی در محیط‌زیست دریا خواهد داشت. این در حالی است که ورودی تأسیسات آب شیرین‌کن نیز در این محدوده قرار دارد، که باید در بهترین مکان ممکن از لحاظ کیفیت آب ورودی قرار داشته باشد.

بررسی توزیع حرارت در زمان‌های مختلف در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که فاصله‌ی دورترین نقطه‌ای که در آن دمای خروجی آب موجب افزایش ۳ درجه‌ای محدوده شده است، ۱۷۰ متر از محل خروجی است. براساس توصیه‌ی مراجع علمی معتبر، به‌منظور پرهیز از آثار مخرب محیط‌زیستی ناشی از تغییرات دما لازم است میانگین افزایش دما در فاصله‌ی ۳۰۰ متری از محل خروج پساب از یک درجه تجاوز نکند.<sup>[۲۹]</sup> با عنایت به اینکه دما در محدوده‌ی کمتر از ۳۰۰ متر تا حدود ۳ درجه افزایش یافته است، می‌توان گفت شرایط فعلی از نظر توصیه‌نامه‌های معتبر،<sup>[۳۰]</sup> مشکل دارد.

در صورتی که ملاحظات لازم در محل خروجی پساب با توجه به موج‌شکن‌های بندر رعایت شده باشد؛ جریان در محدوده‌ی نزدیک ساحل، سرعت به مراتب بیشتری داشته و میزان اختلاط آب گرم خروجی از تأسیسات آب شیرین‌کن و آب دریا بسیار بیشتر بوده است، آب گرم خروجی آب شیرین‌کن سریع‌تر با آب دریا اختلاط پیدا می‌کرد، و زودتر محو می‌شد. لیکن در حال حاضر به‌علت تطویل موج‌شکن‌ها، میزان سرعت جریان در نزدیکی ساحل به شدت کاهش یافته و محدوده‌ی وسیع‌تری تحت اثر دمای بالاتر قرار گرفته است.

## ۵. نتیجه‌گیری

با توجه به راستی‌آزمایی نتایج حاصل از مدل‌سازی با اندازه‌گیری میدانی، این نتیجه به‌دست آمده است که الگوی مدل‌سازی‌شده‌ی انتشار شوری در محدوده‌ی اطراف خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن شمالی جزیره

## References- منابع

1. Falconer, R. A., 1992. Flow and water quality modelling in coastal and inland water. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), pp.437-452 .  
[doi.org/10.1080/00221689209498893](https://doi.org/10.1080/00221689209498893)
2. Morton, A.J., Callister, I.K. and Wade, N.M., 1997. Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. *Desalination*, 108 (1-3), pp.1-10 .

[doi:10.1016/S0011-9164\(97\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00002-7).

3. Talavera, J.P. and Ruiz, J.Q., 2001. Identification of the mixing processes in brine discharges carried out in Barranco del Toro Beach, south of Gran Canaria (Canary Islands). *Desalination*, 139 (1-3), pp.277-286.  
[doi:10.1016/S0011-9164\(01\)00320-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00320-4).
4. Danoun, R., 2007. Thesis. Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life.

5. Fernández-Torquemada, Y., González-Correa, J.M., Loya, A., Ferrero, L.M., Díaz-Valdés, M. and Sánchez-Lizaso, J.L., 2009. Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 5(1-3), pp.137-145. [doi:10.5004/dwt.2009.576](https://doi.org/10.5004/dwt.2009.576).
6. Kudale, M.D., 2010. Impact of port development on the coastline and the need for protection. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 39(4), pp. 597-604.
7. Marjani, A. and Jamali, M., 2014. Role of exchange flow in salt water balance of Urmia Lake. *Dynamics of atmospheres and oceans*, 65, pp.1-16 [doi:10.1016/j.dynatmoce.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2013.10.001).
8. Soltanpour, M. and Dibajnia, M., 2015. Field measurements and 3D numerical modeling of hydrodynamics in Chabahar Bay, Iran. *International journal of maritime technology*, 3, pp.49-60. [doi:10.1016/j.ijmte.2015.3.0.1.3](https://doi.org/10.1016/j.ijmte.2015.3.0.1.3).
9. Abessi, O. and Roberts, P.J., 2016. Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), p.04015033. [doi: 10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001057).
10. Sola, I., Zarzo, D. and Sánchez-Lizaso, J.L., 2019. Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain. *Desalination*, 471, p.114132. [doi: 10.1016/j.desal.2019.114132](https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114132).
11. Anton, J., Tse, E. and Wells, C., 1971, September. Parameter identification criteria for salt brine dispersion from desalination plant ocean outfalls. In IEEE 1971 Conference on Engineering in the Ocean Environment (pp. 313-316). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1971.1161030>
12. Steedman, R.K. and Craig, P.D., 1983. Wind-driven circulation of Cockburn Sound. *Marine and Freshwater Research*, 34(1), pp.187-212. [doi:10.1071/MF9830187](https://doi.org/10.1071/MF9830187).
13. Payo, A., Cortés, J.M., Antoranz, A. and Molina, R., 2010. Effect of wind and waves on a nearshore brine discharge dilution in the east coast of Spain. *Desalination and Water Treatment*, 18(1-3), pp.71-79. [doi:10.5004/dwt.2010.1335](https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1335).
14. Tayyebi, S. and Alishiri, M., 2014. The control of MSF desalination plants based on inverse model control by neural network. *Desalination*, 333(1), pp.92-100. [doi:10.1016/j.desal.2013.11.022](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.022).
15. Patel, Y.B., Nimbalkar, P.T., Nagendra, T. and Shukla, V.K., 2016. Numerical modeling of brine dispersion in shallow coastal waters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(3). [doi:IJCET 07 03 031](https://doi.org/10.1016/j.ijcet.2016.03.031).
16. Botelho, D.A., Singh, A., Mccall, E., Vos, C., Coletti, J., Bruce, L., Lyons, S., Gartner, A., Bailey, M., Atkinson, B. And Mccreath, A., 2016. Numerical simulations of brine dispersion associated with the discharge of the proposed stage 2 of the Perth Seawater Desalination Plant. In 2019 E-proceedings of the 38th IAHR World Congress (Panama City), Global Trends. [http://dx.doi.org/10.3850/38WC092019-1344](https://doi.org/10.3850/38WC092019-1344)
17. Wood, J.E., Silverman, J., Galanti, B. and Biton, E., 2020. Modelling the distributions of desalination brines from multiple sources along the Mediterranean coast of Israel. *Water Research*, 173, p.115555. [doi:10.1016/j.watres.2020.115555](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115555).
18. Pereira, S.P., Rosman, P.C.C., Alvarez, C., Schetini, C.A.F., Souza, R.O. and Vieira, R.H.S.F., 2015. Modeling of coastal water contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). *Water Science and Technology*, 72(6), pp.928-936. [doi:10.2166/wst.2015.292](https://doi.org/10.2166/wst.2015.292).
19. Pradhan, U., Panda, U.S., Naik, S., Mishra, P., Kumar, D.S., Begum, M. and Murthy, M.R., 2022. Coupled hydrodynamic and water quality modeling in the coastal waters off Chennai, East Coast of India. *Frontiers in Marine Science*, 9, p.987067. [doi: 10.3389/fmars.2022.987067](https://doi.org/10.3389/fmars.2022.987067).
20. Safaie, A. and Jamaat, A., 2024. Numerical study of hydrodynamics and salinity transport processes in a hypersaline lake: A case study of Lake Urmia. *Advances in Water Resources*, 185, p.104632. [doi:10.1016/j.advwatres.2024.104632](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104632).
21. Jia, Y., Yang, X., Jiang, H., Lu, B., Tuo, Y., Deng, Y., Zhang, X. and Li, J., 2024. Effect of two-dam coexistence on thermal regime: A special withdrawal measure in Fengman reservoir, China. *Ecological Informatics*, 82, p.102716. [doi:10.1016/j.ecoinf.2024.102716](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102716).
22. Nia, M.Y., Canestrelli, A., Klammler, H., Annable, M.D., Pinton, D. and Jawitz, J.W., 2024. An analytical approach to predict seasonal salinity variations in estuaries. AGU24 (New Orleans).
23. Ahmed, S.I.A., Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M.S. and Balah, A., 2022. Review on Hydrodynamic Modelling of Desalination Plants Brine Effluent Marine Outfalls. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 8, p.7. [doi:10.22161/ijaems.87.3](https://doi.org/10.22161/ijaems.87.3)
24. Amini, H., Lam, M.Y. and Ahmadian, R., 2025. Artificial Intelligence predictive models for diurnal and seasonal shallow lake turnovers. Copernicus Meetings. No. EGU25-20975. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-20975>.
25. Lumpkin, R., Özgökmen, T. and Centurioni, L., 2017. Advances in the application of surface drifters. *Annual review of marine science*, 9(1), pp.59-81. [doi: 10.1146/annurev-marine-010816-060641](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060641).
26. Mishra, P., Panda, U.S., Pradhan, U., Kumar, C.S., Naik, S., Begum, M. and Ishwarya, J., 2015. Coastal

water quality monitoring and modelling off Chennai city. *Procedia Engineering*, 116, pp.955-962.

[doi:10.1016/j.proeng.2015.08.386](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.386).

27. Kulkarni, R.R., 2013. Numerical Modelling of Coastal Erosion using MIKE21, Master's thesis, Institutt for bygg, anlegg og transport.

28. Nunes, V. and Pawlak, G., 2008. Observations of bed roughness of a coral reef. *Journal of Coastal Research*, 24-2B pp.39-50.

[doi:10.2112/05-0616.1](https://doi.org/10.2112/05-0616.1).

29. Khordagui, H., 1997. Environmental aspects of brine reject from desalination industry in the ESCWA region. *ESCWA*, Beirut, 3.

30. Mundial, B., 2007. Environmental, Health, and Safety (EHS) Guidelines.