

Numerical Modeling of Salinity Changes in the Desalination Stage of a Coastal Reservoir

Mojtaba Karimaei Tabarestani ^{1*}, Hesam Fouladfar ²

1- Assistant Professor of Water and Hydraulic Structure Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.

2- PhD in Water Engineering, Director of River and Coastal Engineering Unit, Iran Water and Power Resources Development Company, Elahieh, Tehran, Iran.

* Karimaei@sru.ac.ir

Received: 19 April 2021, Accepted: 16 June 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In recent years, population growth and rapid economic development have exacerbated the problem of water shortage, especially in the coastal areas, to the point that meeting freshwater demand has become a serious challenge for coastal communities (Herrera-Leon et al., 2018; Phan et al., 2018). This situation is further complicated by the irregular spatial and temporal distribution of freshwater resources in these areas. A coastal reservoir is defined as a water storage structure constructed at river estuary or other coastal area to store fresh water and control water resources. One of the obvious advantages of coastal reservoirs is providing additional fresh water storage capacity for water supply networks (Xu, 2001). In areas under water stress, coastal reservoirs, which are often the basis of local economic development, can help reduce water shortage (Li and Chen, 2005). Many coastal reservoirs have been constructed in China, South Korea, Hong Kong and Singapore (Yuan et al., 2007).

Despite the importance of coastal reservoirs, there is few research on this issue in the literature and no studies have been conducted in this regard in Iran. In addition, there are many issues on the performance of these reservoirs that have attracted widespread attention worldwide. One of the most important issues is salinity changes in the coastal reservoir, which is the main focus of the present study. Accordingly, in this study, numerical simulation of flow and salinity transfer in a coastal reservoir along the Caspian Sea is developed as a case study.

Methodology: In Tajan river is one of the most important rivers in the Caspian Sea watershed, which originates from 3251 meters above the northern slope of the Alborz mountain range in the south of Sari city, north of Iran. This river flow is influenced by hydraulic structures built at the upstream of river, such as Shahid Rajaei Dam. In March 2016, due to heavy rains in the upstream basins, a large flood occurred in this river. Measurements showed that the peak discharge of flood was 880 m³/s and the maximum volume of flood was 3112560 m³. The return period of this flood was more than 1000 years.

The modeling region in the present study is located between the estuary of Tajan river to the Caspian Sea and Neka river. The dimensions of the coastal reservoir in this study include 1 Km wide and 9 Km long (along the coastline) and the water supply is provided through a flood channel from the Tajan river. In the present study, MIKE3 which is a 3D numerical model was used. Two different models were developed and the results of each were studied. Model No.1 where desalination of the coastal reservoir was considered by average monthly

discharge of the Tajan river (Inflow boundary condition) and bottom outlets (Outflow boundary condition). The simulation period in this model was determined as 1 year. On the other hand, in Model No. 2 desalination of the coastal reservoir was considered by a 1000 year return period flood in Tajan river (Inflow) and an Ogee spillway (Outflow). Finally, similar to the water quality of the Caspian Sea, the initial salinity in the reservoir was considered as 12 PSU.

Results and Discussion: In this part, the results obtained from the both models No. 1 and No. 2 are presented and analyzed. The results of different models are also compared. Results in Model No. 1 showed that changes in water level and current speed were negligible with the maximum current speed of about 0.08 m/s. In addition, after 1000 hours from the start of the simulation, the salinity in the reservoir was about 8 PSU, and after 3000 hours it was about 3.5 PSU and after 8760 hours it was reached a maximum value of about 2 PSU. On the other hand, results in Model No. 2 showed that the current speed in the flood channel was about 7 m/s. However, the current speed inside the reservoir was low with a maximum value of about 0.2 m/s. This is about 10 times more than the current speed in Model No.1. Furthermore, results showed that at time step of the flood peak entry, significant decrease in salinity of the reservoir happened. Actually, the salinity of nearly half of the reservoir was less than 3 PSU in this time step. Finally, at the end of the simulation, the salinity of the reservoir was less than 1 PSU.

Conclusion: A numerical study was carried out on the dynamic of salinity transfer and diffusion in a coastal reservoir under desalination condition. Two numerical models were developed. In Model No. 1, flow and salinity changes during one year simulation period with average monthly discharge of Tajan river were studied. In Model No. 2, changes in the flow and salinity of the reservoir under a historical flood flow condition with peak discharge of nearly 200 times the average monthly discharge were studied. Salinity profiles in the depth of the reservoir and at different time steps showed that desalination occurred in the depth of the reservoir. In addition, the comparison of the two models showed that the salinity stratification in model No. 2 was more intense due to the rapid changes in the hydrograph flow. In both models, the salinity difference at the surface and depth of reservoir decreased over time from the beginning of modeling.

Keywords: Coastal reservoir, Tajan River, Salinity, Numerical modeling, Historical flood.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدل سازی عددی تغییرات شوری مخزن ساحلی در مرحله آب شویی و نمک زدایی

مجتبی کریمایی طبرستانی^{۱*}، حسام فولادفر^۲

۱- استادیار گروه ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، لویزان، تهران، ایران
۲- دکترای مهندسی آب، مدیر بخش مهندسی رودخانه و سواحل، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، الهیه، تهران، ایران

* Karimaei@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: مخازن ساحلی یک راه حل موثر برای مسائل مربوط به تامین و مدیریت آب در مناطق ساحلی می باشند. فرآیند آب شویی و نمک زدایی از این مخازن قبل از بهره برداری، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق اقدام به بررسی دینامیک جریان و تغییرات شوری در یک مخزن ساحلی در شرایط آب شویی مخزن با استفاده از نرم افزار عددی سه بعدی MIKE3 شد. مطالعه موردی در این تحقیق شامل یک مخزن ساحلی است که در ساحل دریای خزر و در نزدیکی محل مصب رودخانه تجن قرار دارد. جریان ورودی به مخزن از طریق یک کانال دسترسی از رودخانه تجن تامین می شود. جهت انجام این تحقیق دو مدل ساخته شد. در مدل اول با هدف بررسی جریان و تغییرات شوری مخزن، از شبیه سازی یکساله با دبی متوسط ماهانه در رودخانه تجن استفاده شد. در مدل دوم نیز شبیه سازی جریان و تغییرات شوری مخزن در شرایط یک سیلاب تاریخی نزدیک به ۲۰۰ برابر متوسط دبی ماهانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده که بر خلاف مدل اول، لایه بندی شوری شدیدی در عمق مخزن در شرایط مدل دوم اتفاق می افتد و این لایه بندی با افزایش جریان ورودی شدیدتر می شود. همچنین در پایان دوره شبیه سازی حداکثر مقدار شوری در کل مخزن از مقدار اولیه ۱۲ گرم بر لیتر (که مربوط به شوری پایه دریای خزر است) به مقداری کمتر از ۲ گرم بر لیتر در مدل اول و ۱ گرم بر لیتر در مدل دوم کاهش می یابد.

کلید واژگان: مخزن ساحلی، رودخانه تجن، شوری، مدلسازی عددی، سیلاب تاریخی.

۱- مقدمه

غالباً زیربنای توسعه اقتصادی محلی هستند، می توانند به کاهش کمبود آب کمک کنند (Li and Chen, 2005). تعدادی مخازن ساحلی در چین، کره جنوبی، هنگ کنگ و سنگاپور ساخته شده اند (Yuan et al., 2007).
 به رغم اهمیت مخزن های ساحلی، تحقیقات نه چندان در مورد این موضوع در مراجع وجود دارد و تاکنون هیچگونه مطالعه ای در این زمینه در داخل کشور انجام نشده است. همچنین مسئله های زیادی در مورد عملکرد این مخزن ها وجود دارد که توجه گسترده ای را در سطح جهانی به خود جلب کرده است. یکی از مهم ترین مسایل تغییرپذیری شوری در مخازن ساحلی است که تمرکز اصلی این تحقیق است. بر این مبنا در این بررسی، ضمن بررسی پویایی جریان و انتقال شوری در مخزن ساحلی و معرفی عامل های موثر بر آن، اقدام به شبیه سازی

در سال های اخیر، افزایش جمعیت و توسعه سریع اقتصادی، مسئله کمبود آب را به ویژه در منطقه های ساحلی تشدید کرده است، تا جایی که تامین تقاضای آب شیرین تبدیل به یک چالش جدی برای جامعه ساکن در منطقه های ساحلی شده است (Herrera-Leon et al., 2018; Phan et al., 2018). این وضعیت با پراکنش نامنظم مکانی و زمانی منابع آب شیرین در این منطقه های پیچیده تر می شود. یک مخزن ساحلی به عنوان یک سازه ذخیره آب ساخته شده در مصب یک رودخانه یا سایر منطقه های ساحلی برای ذخیره آب شیرین و کنترل منابع های آب تعریف می شود. از مزیت های بارز مخازن ساحلی، تأمین ظرفیت اضافی ذخیره آب شیرین برای شبکه های آبرسانی است (Xu, 2001). در مناطق تحت تنش های آبی، مخازن ساحلی که

می‌شوند (Liu and Jeng, 2007). در دریاچه‌های عمیق‌تر، اختلاط کامل در ستون آب توسط لایه‌بندی دمایی پایدار (به ویژه در تابستان) و لایه‌بندی کنترل شده با شوری محدود است (Yeates and Imberger, 2003)، که باعث محدود شدن اختلاط و مبادله‌های عمودی می‌شود (Li and Chen, 2005). عامل پنجم نفوذ آب دریا به مخزن است که تا حد زیادی به طراحی مهندسی و کیفیت ساخت مخزن بستگی دارد (Li et al., 2005). در نهایت عامل ششم تبادل بین مخزن ساحلی و آب زیرزمینی است که بیشتر در کناره‌های مخزن، بستر و سمت دریا رخ می‌دهد (شکل ۱). تبادل بین مخزن ساحلی و آب‌های زیرزمینی به اندازه کافی بررسی نشده است (Jin et al., 2019). با این حال، بررسی‌های پیشین در مورد تبادل بین تالاب‌های ساحلی و آب‌های زیرزمینی، به دلیل شباهت در شرایط مرزی با مخزن ساحلی می‌تواند بینشی از چگونگی عملکرد و تبادل بین مخزن ساحلی و آب زیرزمینی بدست دهد (Moran et al., 2014).

۳- بررسی‌های عددی انجام شده بر روی انتقال و انتشار شوری

عمده تحقیقاتی که در این زمینه وجود دارد مربوط به انتقال و انتشار شوری مابین آب شور دریا و آب شیرین موجود در لایه‌های آبدار زیر زمینی در ناحیه‌های ساحلی است و کمتر به لایه‌بندی شوری ناشی از ورود جریان سطحی به درون مخزن پرداخته شده است. (Shafee et al., 2017) اقدام به مدل‌سازی عددی احداث یک بازدارنده زیر زمینی بر تبادل جریان زیر زمینی در ناحیه ساحلی با استفاده از نرم افزار SEAWAT نمودند. ایشان به بررسی تاثیر تغییر موقعیت، ارتفاع و ضخامت این بازدارنده بر انتقال شوری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین موقعیت مانع در نزدیکی خط ساحلی است و ضخامت آن تاثیر ناچیزی بر انتقال شوری دارد.

Mabrouk et al. (2018) تاثیر افزایش تراز سطح آب دریا و برداشت آب زیر زمینی را بر روی کیفیت آب زیر زمینی شیرین در دلتای رودخانه نیل بررسی کردند. آنان پس از بررسی سناریوهای مختلف به این نتیجه رسیدند که برداشت آب زیر زمینی تاثیر بیشتری بر روی کیفیت آب نسبت به بالا آمدن تراز آب دریا دارد. (Mastrocicco et al., 2019) اقدام به مدل‌سازی عددی نفوذ شوری در یک آبخوان ساحلی در کشور ایتالیا ناشی

عددی جریان و انتقال شوری در یک مخزن ساحلی در کناره دریای خزر به عنوان بررسی موردی می‌شود.

۲- پویایی جریان در مخزن‌های ساحلی و فاکتورهای موثر بر انتقال و انتشار شوری

از آنجایی که شرایط مرزی مخازن ساحلی به طور بالقوه متاثر از عامل‌های چندی مانند بارش، تبخیر، جریان رودخانه، تراز آب‌های زیرزمینی، سطح آب مخزن، امواج و جزر و مد و هندسه مخزن هستند، در نتیجه، بررسی پویایی جریان و فرآیندهای انتقال و انتشار شوری حاصل در مخزن در زمره مسئله‌های پیچیده هیدرولیکی قرار دارند.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عامل‌های پویایی مختلفی در تبادل آب/نمک در طول مرزهای مختلف نقش دارند که در ادامه بحث می‌شود. عامل اول شرایط اقلیمی است. بارش و تبخیر بر میزان ورود آب به درون و یا خروج آب از مخزن تأثیرگذار است (Berghuijs et al., 2017)، که به نوبه خود بر شوری آب مخزن موثر می‌باشند. شارژ دوباره مخزن با بارندگی منجر به کاهش شوری آب مخزن می‌شود، در حالی که تبخیر منجر به افزایش شوری می‌شود (Pan et al., 2004). عامل دوم رسوب و ناحیه کرانه‌ای است. کف مخزن اغلب حاوی رسوباتی با غلظت بالای نمک است (Zhang et al., 2014)، که می‌تواند به شور شدن آب در مخزن به‌خصوص در مرحله آبشویی (نسبت به مرحله بهره‌برداری) کمک کند (Mao et al., 2005). عامل سوم رودخانه‌های بالادست هستند. کمیت و کیفیت آب در این رودخانه‌ها به عنوان منبع اصلی تغذیه مخزن ساحلی، نقش مهمی در کنترل شوری آب مخزن ایفا می‌کنند. همچنین ممکن است جریان رودخانه میزان زیادی رسوب حاوی نمک را به داخل مخزن وارد کند. افزون بر این، مخزن‌های ساحلی که به طور معمول آب‌های تخلیه‌شده از پایین‌دست رودخانه‌ها را دریافت می‌کنند، به علت ورود فاضلاب صنعتی و خانگی به این رودخانه‌ها که حاوی ترکیب‌هایی از نمک‌ها و مواد آلاینده هستند، در معرض شور شدگی هستند (Li and Chen, 2005). عامل چهارم چگونگی اختلاط آب شور- آب شیرین است که به میزان آب ورودی، باد و عمق مخزن بستگی دارد. به طور کلی، جریان‌های با سرعت بالا، سرعت باد زیاد و آب کم عمق باعث اختلاط کامل شوری در مخزن و به احتمال بین آب مخزن و رسوب‌های کف

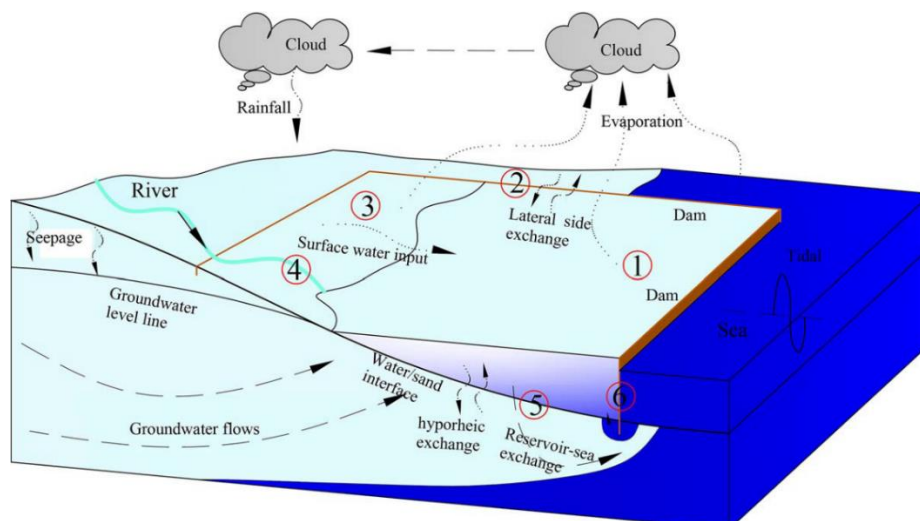


Fig. 1 Schematic diagram of a typical coastal reservoir: (1) water surface, (2) lateral side, (3) intertidal zone, (4) inflow rivers, (5) bottom, and (6) dam. (Jin et al., 2019)

شکل ۱ نمودار شمای کلی از یک مخزن معمولی ساحلی: (۱) سطح آب، (۲) سمت جانبی، (۳) منطقه بینابینی، (۴) رودخانه‌های ورودی، (۵) کف مخزن و (۶) سد (Jin et al. 2019).

حاضر با معرفی یک مخزن ساحلی فرضی در دریای خزر به عنوان بررسی موردی، ارزیابی می‌شود.

۴- معرفی بررسی موردی

رودخانه تجن از رودخانه‌های مهم حوضه آبخیز دریای خزر است که از ارتفاع ۳۲۵۱ متری دامنه شمالی سلسله جبال البرز ارتفاعات کورچشمه، بادلره و سرکوه) در جنوب شهرستان ساری از چشمه‌های پرشماری در دهستان پشتکوه سرچشمه می‌گیرد و در نهایت پس از گذر از شرق شهرستان ساری و روستای کردخیل با جهت جریان عمومی جنوب به شمال به دریای خزر می‌ریزد. شکل ۲-ا تصویر ماهواره‌ای از محل اتصال رودخانه تجن به دریای خزر (مصوب رودخانه) را نشان می‌دهد. جریان در این رودخانه تحت تاثیر سازه‌های هیدرولیکی ساخته شده در بالادست آن، مانند سد شهید رجائی قرار دارد. در شکل ۳ دبی میانگین ماهانه رودخانه تجن در محل مصب نشان داده شده است. همچنین بررسی‌های شرکت منابع آب ایران در سال ۱۳۹۴ نشان می‌دهد که بیشینه میزان کل املاح جامد محلول در محل ایستگاه کردخیل و در بالادست مصب کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است که در صورت اعمال همه‌ی املاح محلول به شوری آب میزان شوری برابر با 0.5 PSU¹ خواهد شد (Sadeghi and Jafari, 2013; Iran Water Resources and

از تغییرپذیری‌های اقلیمی با استفاده از مدل SEAWAT نمودند و مشاهده کردند که اثرات اقلیمی تاثیر کمی بر تغییرپذیری و انتقال شوری در این ناحیه دارد. (Hussein et al. 2019) در یک تحقیق مروری اقدام به بررسی بر روی روش‌های مختلف کنترل نفوذ شوری در ناحیه‌های ساحلی کردند. در این تحقیق به روش‌های سازه‌ای و هیدرولیکی مختلفی اشاره شده است. در این تحقیق اشاره شده است که با توجه به مسائل اقتصادی و هزینه‌های اجرایی، به کارگیری روش‌های هیدرولیکی مانند تغدیه مصنوعی آبخوان دارای مردم‌پسندی بیشتری است.

همان‌گونه که اشاره شد بررسی‌های عددی محدودی در مورد تغییرپذیری‌های شوری در مخزن‌های ساحلی ناشی از جریان‌های سطحی وجود دارد. (Chen 2014) با تهیه یک مدل عددی سه بعدی، زمان ماندگاری آب شور در مخزن کینگ‌کوشا در منطقه خور رودخانه یانگ‌تسه را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. این مخزن به دلیل تفاوت‌های مکانی قابل ملاحظه در زمان ماندگاری به شش منطقه تقسیم شده است. نتایج نشان داد که جریان موجود در مخزن به طور عمده توسط جریان تولید شده توسط باد کنترل می‌شود، و به میزان کمتری با جریان‌های ورودی/خروجی کنترل می‌شود.

بر این مبنا با توجه به محدود بودن بررسی‌ها بر روی انتقال و انتشار شوری در مخزن‌های ساحلی، این موضوع در تحقیق

¹ Practical Salinity Unit (gr/lit)



Fig. 2 Satellite images from the Tajan River: (a) River Estuary and (b) Position of the coastal reservoir

شکل ۲ تصویرهای ماهواره‌ای از رودخانه تاجن: (a) مصب رودخانه و (b) موقعیت مخزن ساحلی.

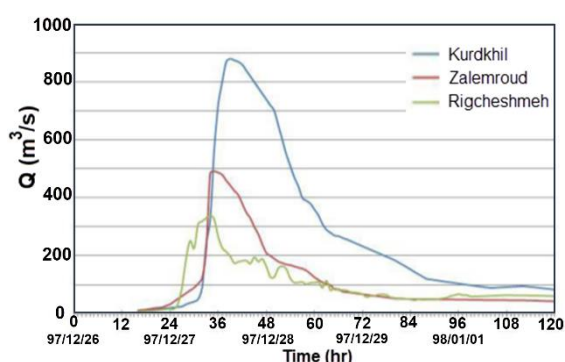


Fig. 4 Hydrograph of Tajan river measured in February 2017 (Emadi et al., 2020)

شکل ۴ آب‌نگار ثبت شده رودخانه تاجن در سیلاب اسفند ۹۷ (Emadi et al., 2020)

ساحلی) است و تامین آب ورودی به آن از طریق یک آبراهه دسترسی به عرض ۲۰ متر از رودخانه تاجن صورت می‌گیرد.

۵- معرفی نرم‌افزار MIKE3

در این بررسی از بسته نرم‌افزاری MIKE مربوط به موسسه هیدرولیک دانمارک استفاده شده است. این نرم‌افزار، شبیه‌سازی قابل اطمینان و رایج در حوزه پدیده‌های دریایی و ساحل‌ها است. در تحقیق حاضر از ماژول MIKE3 این بسته نرم‌افزاری که یک مدل سه‌بعدی است، استفاده شد. علت انتخاب مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی دقیق‌تر گرادیان شوری در عمق مخزن است. مدل MIKE3 معادله‌های ناویراستوکس سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر را با فرض تقریب بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک حل می‌نماید. افزون بر آن، حل معادله‌های انتقال و انتشار شوری نیز انجام می‌شود. در این مدل، همه نیروهای جوی شامل تنش باد و شار امواج کوتاه و بلند در نظر گرفته شده است.

(Management Company, 2015). البته مشخص است که

این مقدار در هنگام پربابی و کم‌آبی نوسان است.

در اسفند ماه ۱۳۹۷ به دلیل بارش‌های شدید در حوضه‌های بالادستی، سیلاب بزرگی در این رودخانه رخ داد. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که دبی اوج سیلاب برابر با ۸۸۰ متر مکعب بر ثانیه و حجم سیلاب با توجه به شکل آب‌نگار در حدود ۸۰ میلیون متر مکعب در ایستگاه کردخیل (که در پایاب رودخانه تاجن قرار دارد) است. شکل ۴ مشخصات آب‌نگار ثبت شده در محل ایستگاه‌های مختلف رودخانه تاجن در این بازه زمانی را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده که دوره بازگشت این سیلاب بیشتر از ۱۰۰۰ سال بوده است (Iran Water and Power Resources Development Company, 2014). محدوده مدل‌سازی در این تحقیق در حد فاصل خروجی رودخانه تاجن به دریای خزر و خروجی رودخانه نکا قرار دارد. شکل ۲-ب این محدوده را نشان می‌دهد. ابعاد مخزن ساحلی در این تحقیق شامل یک کیلومتر عرض و نه کیلومتر طول (در امتداد خط

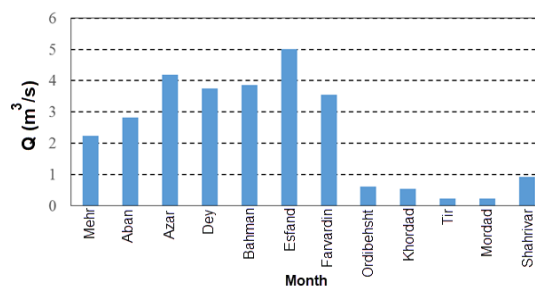


Fig. 3 Monthly average discharge of Tajan River measured at the estuary of river (Iran Water and Power Resources Development Company, 2014).

شکل ۳ دبی میانگین ماهانه رودخانه تاجن در محل مصب (Iran Water and Power Resources Development Company, 2014)

محاسبه سرعت قائم

$$w = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (6)$$

و دیگر معادله‌های انتقال عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial hwk}{\partial \sigma} = h F_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (7)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial hw\varepsilon}{\partial \sigma} = h F_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) \quad (8)$$

$$h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial hWC}{\partial \sigma} = h F_C + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - hk_p C + h C_s S \quad (9)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial hws}{\partial \sigma} = h F_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + h s_s S \quad (10)$$

که در آن‌ها t : زمان، x, y, z : مختصات کارتزین، η تراز سطح آب، d عمق آب در شرایط بدون موج، h : عمق کل آب یعنی $h = d + \eta$ و u, v, w : مولفه‌های سرعت در جهت‌های x, y, z ، f : ضریب کوریولیس، $\Omega = 2\Omega \sin\phi$: سرعت دورانی زاویه‌ای زمین، ϕ : عرض جغرافیایی، g : شتاب ثقل زمین، p : چگالی آب، ρ_0 : چگالی مرجع آب، $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$: مولفه‌های تانسور تنش شعاعی، v_t : لزجت گردابی قائم، P_a : فشار هوا، S : دبی چشمه یا چاه متمرکز، (u_s, v_s) : مولفه‌های سرعت آبی که به محیط وارد یا خارج می‌شود، F_u و F_v ترم‌های تنش‌های رینولدزی و C : غلظت کمیت اسکالر، S : غلظت شوری، S_s : غلظت چشمه شوری، F_s ترم پخش افقی شوری، k_p : نرخ خطی زوال کمیت اسکالر، C_s : غلظت کمیت اسکالر در منبع، D_v : ضریب پخش آشفتگی قائم، D_h : ضریب پخش آشفتگی افقی، F_c : ترم پخش افقی کمیت اسکالر، k : انرژی جنبشی آشفتگی، ε : هدررفت انرژی جنبشی

در این تحقیق شبکه‌بندی مورد استفاده در راستای افقی به‌صورت نامنظم مثلثی است. با کمک این شبکه‌بندی می‌توان به دقت بیشتر در نتایج و صرفه‌جویی در زمان اجرای برنامه دست یافت. افزون بر این، لایه‌بندی در راستای قائم نیز به صورت ترکیبی از سیگما و تراز z است. روش عددی مورد استفاده برای حل معادله‌ها در این نرم‌افزار به‌صورت روش حجم محدود است و معادله‌های مورد استفاده در حالت سه‌بعدی برای جریان، معادلات ناویر-استوکس با فرض تقریب بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ با تغییر متغیر سیگما به صورت زیر می‌باشند:

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (1)$$

که σ عددی مابین صفر و یک از بستر تا سطح آب تغییر می‌کند. این تبدیل، رابطه‌های بیان شده بین متغیرها را به معادله‌هایی که در ادامه ارائه شده، تبدیل می‌کند:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (2)$$

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial hw}{\partial \sigma} = h S \quad (3)$$

معادله ممنتوم در جهت x

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial huw}{\partial \sigma} = f v h - g h \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x'} \quad (4)$$

$$- \frac{h g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + h F_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + h u_s S$$

معادله ممنتوم در جهت y

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial hvw}{\partial \sigma} = f u h - g h \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y'} \quad (5)$$

$$- \frac{h g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + h F_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + h v_s S$$

آشفتگی، P : متغیر حاصل برش، B : متغیر حاصل شناوری و σ_k , σ_E , C_{1E} , C_{2E} , C_{3E} ضریب‌های ثابت تجربی هستند.

۶- معرفی مدل‌های ساخته شده

در این تحقیق دو مدل مختلف ساخته شد و خروجی‌های هر یک بررسی شد. در ادامه به معرفی ویژگی‌های هر مدل و شرایط مرزی و اولیه آنها اقدام می‌گردد.

۶-۱- مدل آبشویی مخزن با کمک دبی میانگین ماهانه (مدل شماره یک)

در شکل ۵ شمای کلی مخزن و بخش‌های مختلف مرتبط با آن نشان داده شده است. در این مدل یک مخزن رسوبگیر به عرض ۳۵۰ متر در نظر گرفته شده است. طول دیواره مخزن رسوبگیر به گونه‌ای است که اتصال آن با مخزن اصلی در طولی به میزان ۱۰۰ متر در قسمت عمیق مخزن برقرار است. همچنین در بخش غربی مخزن یک سرریز اضطراری اوجی به طول ۹۰ متر (یک درصد از طول ۹ کیلومتری دیواره مخزن) و فاصله آستانه از کف مخزن ۶/۵ متر در نظر گرفته شد. در نزدیکی دیواره غربی مخزن تخلیه‌کننده زیرین در موقعیت کف مخزن قرار گرفته‌اند. در این مدل تغییرپذیری‌های جریان و شوری در شرایط آبشویی یا شستشوی مخزن و استفاده از دبی میانگین ماهانه (شکل ۳) مورد بررسی قرار گرفت.

برای ساخت مدل، در آغاز از نقشه‌های عمق‌یابی (آب‌نگاری) منطقه برای تعیین تغییرپذیری‌های عمق در مخزن استفاده شد. بعد از این مرحله، شبکه‌بندی بر روی محدوده مورد بررسی انجام گرفت. در شکل ۶ تغییرپذیری‌های عمق مخزن در محدوده مدل‌سازی به همراه شبکه‌بندی مثلثی انجام شده نشان داده شده است. در این شکل محورهای افقی و قائم به ترتیب نشان‌دهنده طول و عرض جغرافیایی هستند. شبکه‌بندی با چند اندازه مختلف در ورودی آب به مخزن، بخش‌های میانی مخزن و در محدوده سرریز انجام گرفت. در ورودی مخزن و همچنین محل سرریز به سبب وجود جریان‌های شدیدتر اندازه شبکه کوچک‌تر از دیگر منطقه‌ها در نظر گرفته شد. جهت تحلیل حساسیت میزان شوری مخزن در یک نقطه میانی از کف مخزن و برای بیشینه اندازه شبکه ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ متر مربع در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل

مشخص است تغییرپذیری‌های شوری در این نقطه با اندازه‌های مختلف شبکه انتخابی تغییری نشان نمی‌دهد. در نتیجه بزرگترین اندازه سلول شبکه در مدل نهایی به ۱۰۰۰۰ متر مربع در نقطه‌های میانی مخزن و ۲۰۰۰ متر مربع در نزدیکی سرریز و کانال دسترسی محدود شد. نکته مهم دیگر اینکه شبکه‌بندی کانال دسترسی با استفاده از شبکه‌های چهارضلعی انجام گرفته است. در نهایت جهت بررسی تغییر فراسنجه‌ها در عمق مخزن تعداد پنج لایه در عمق در نظر گرفته شد. البته مشخص است که با افزایش شمار لایه‌ها در عمق دقت محاسبه‌ها افزایش می‌یابد. بررسی‌های بیشتر نشان داد که با توجه به عمق کم مخزن (بیشینه ۶ متر بدون جریان ورودی) افزایش شمار لایه‌های عمقی تاثیر ناچیزی بر روی نتایج دارد.

بازه شبیه‌سازی در این مدل از یک ژانویه ۲۰۱۳ تا یک ژانویه ۲۰۱۴ به مدت یک سال می‌باشد. همچنین با توجه به گام‌های زمانی ۶۰ ثانیه، شمار کل گام‌های شبیه‌سازی برابر با ۵۲۵۶۰۰ محاسبه شد. پس از ساخت و شبکه‌بندی مدل، سه شرط مرزی مختلف به مدل معرفی شد. این مرزها شامل (۱) مرز رودخانه در محل اتصال آبراهه دسترسی از رودخانه تجن به مخزن است که شامل تغییرپذیری‌های زمانی دبی جریان رودخانه تجن در بازه یک ساله می‌شود (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است محدوده تغییرپذیری‌های دبی ماهانه از ۰/۲ تا ۵ متر مکعب بر ثانیه تغییر می‌کند. همچنین با توجه به آنچه پیشتر بیان شد، میزان شوری آب رودخانه برابر با 0.5 PSU در نظر گرفته شد. (۲) مرز دریا در خروجی سرریز به دریا و در سمت دریا است. از آنجا که دریای خزر تحت تاثیر پدیده جزر و مد قرار ندارد، لذا میزان تراز آب دریا برابر با صفر در نظر گرفته شد. (۳) مرز زمین در پیرامون مخزن و همچنین دیواره غربی مخزن می‌باشند، که به صورت شرط مرزی زمین یعنی سرعت قائم برابر با صفر به مدل معرفی شد.

در این مدل برای آبشویی مخزن از تخلیه‌کننده زیرین استفاده شد، تا آب شور مخزن به دریا منتقل شود. از آنجا که میزان اولیه آب مخزن (آغاز شبیه‌سازی) ۰/۵ متر بالاتر از آب دریا است، لذا با باز شدن دریچه تخلیه‌کننده زیرین امکان انتقال آب اضافی مخزن به دریا فراهم است. تخلیه‌کننده زیرین در سمت شرقی مخزن (عمیق‌ترین ناحیه مخزن) و با معرفی یک چشمه در نزدیکی بستر مدل‌سازی شد. در این تحقیق دبی میانگین ماهانه

انتقال شوری در این مدل به طور کلی همانند با مدل شماره یک است. در این مدل، با توجه به حجم زیاد سیلاب و مسئله‌های مربوط به بهره‌برداری از تخلیه‌کننده زیرین مانند تغییر تراز آب مخزن، مازاد آب از طریق سرریز تخلیه می‌شود. به این ترتیب امکان بررسی عملکرد هر یک از این سامانه‌ها یعنی تخلیه‌کننده زیرین (در مدل شماره یک) و سرریز (در مدل شماره دو) برای تخلیه آب اضافی مخزن فراهم شد. بازه شبیه‌سازی در این مدل با توجه به زمان رخداد سیلاب در رودخانه هشت روز از یک ژانویه ۲۰۱۳ است. همچنین با توجه به گام زمانی ۳۰ ثانیه، شمار کل گام‌های شبیه‌سازی برابر با ۲۳۰۴۰ در نظر گرفته شد.

جریان ورودی به مخزن (شکل ۳) به عنوان دبی خروجی از تخلیه‌کننده در نظر گرفته شد.

۲-۶- مدل آبشویی مخزن با کمک سیلاب (مدل شماره دو)

این مدل همانند با مدل شماره یک بوده ولی شرایط مرزی جریان رودخانه در آن متفاوت است. شرط مرزی رودخانه در محل مخزن، سیلاب ثبت شده در محل ایستگاه کردخیل (شکل ۴) است. در واقع یکی از هدف‌های این مدل مقایسه حالت آبشویی مخزن با استفاده از سیلاب و جریان میانگین رودخانه (مدل شماره یک) است. بر این مبنای تنظیم‌های مدل جریان و

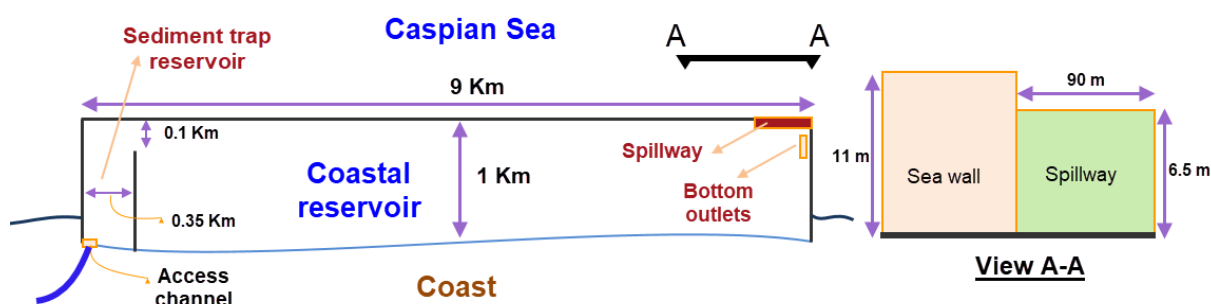


Fig. 5 Schematic of reservoir and its related parts in the present model
شکل ۵ شمای کلی مخزن و بخش‌های مخلف مرتبط با آن در این مدل‌سازی

۷- ارائه و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده از اجرای مدل‌های مختلف ارائه شده و مقایسه قرار می‌شود.

۷-۱- نتایج مدل شماره یک

زمان اجرای این مدل با یک رایانه CORE™ i7-7500U and Intel® 8GB RAM برابر با ۱۰ ساعت بود. در ادامه خروجی‌های به‌دست آمده از این مدل ارائه می‌شود.

الف) مدل‌سازی جریان در مخزن

بررسی تغییرپذیری‌های جریان در زمان‌های مختلف پس از مدل‌سازی نشان می‌دهد که با توجه به حجم و گستره زیاد مخزن، تغییرپذیری‌های سطح آب و سرعت جریان در سطح مخزن ناچیز بوده و شرایط به نسبت آرامی در مخزن حاکم است. همچنین بیشینه سرعت میانگین جریان در حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه در موقعیت‌های نزدیک به ساحل به‌دست آمد.

ب) مدل‌سازی تغییرپذیری‌های شوری در مخزن

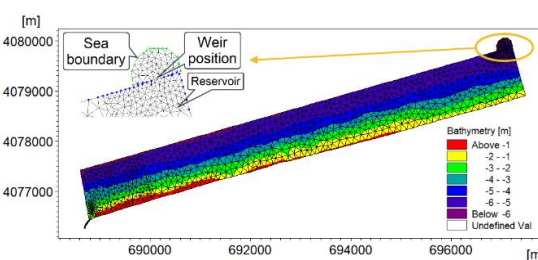


Fig. 6 Bathymetry of the reservoir with grids

شکل ۶ تغییرپذیری‌های عمق مخزن به همراه شبکه‌بندی

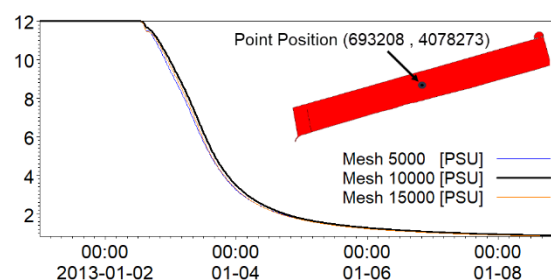


Fig. 7 Sensitivity analysis on mesh size

شکل ۷ تحلیل حساسیت بر روی اندازه شبکه

آن باشد. در نهایت نیز شوری نقطه داخل مخزن رسوبگیر (نقطه P_1) تا حدودی نزدیک به شوری جریان ورودی است. ولی در دیگر نقطه‌ها شوری با هم برابر بوده و کمی بیشتر از نقطه P_1 می‌باشند.

۷-۲- نتایج مدل شماره دو

زمان اجرای این مدل با یک رایانه CORE™ i7-7500U and 8GB RAM Intel® در حدود ۳ ساعت بود. در این مدل با توجه به عبور آب‌نگار سیل سعی شد که در زمان‌های ورود دبی‌های مختلف و مهم مانند دبی اوج سیلاب، خروجی‌های مدل شامل جریان (سرعت و تراز سطح آب) و تغییرپذیری‌های شوری تحلیل شود.

الف) مدل‌سازی جریان سیلابی در مخزن

تحلیل نتایج مدل نشان می‌دهد که با توجه به ابعاد بزرگ مخزن تا حدودی تغییرپذیری‌های موج‌گونه در مخزن مشاهده نمی‌شود و سطح آب در کل مخزن تغییرپذیری‌های ناچیزی دارد (در حدود چند سانتی‌متر)، به گونه‌ای که سطح آب پس از بالا آمدن در مخزن پیش از رخداد اوج سیلاب، از طریق سرریز تخلیه می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که سرعت در آبراهه ورودی با توجه به حجم زیاد سیلاب به حدود ۷ متر بر ثانیه می‌رسد. بیشینه سرعت در مخزن رسوبگیر نیز حدود ۴ متر بر ثانیه در نزدیکی آبراهه دسترسی است. از سویی در درون مخزن سرعت جریان کم بوده و در این شرایط بیشینه سرعت در حدود ۰/۲ متر بر ثانیه است. این میزان در حدود ۱۰ برابر بیشتر از مدل شماره یک است.

ب) مدل‌سازی تغییرپذیری‌های شوری در مخزن

شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های شوری در لایه پنجم (لایه سطحی) در درون مخزن را در گام زمانی ورود اوج سیلاب نشان می‌دهد. تغییرپذیری‌های شدید شوری با ورود سیلاب به درون مخزن به وضوح مشخص است. به گونه‌ای که در این گام زمانی میزان شوری نزدیک به نیمی از مخزن کمتر از 3 PSU است. همچنین پس از عبور سیلاب در انتهای شبیه‌سازی، میزان شوری مخزن به کمتر از 1 PSU خواهد رسید که این میزان کمتر از مدل شماره یک است. شکل ۱۲ رخ‌نمای شوری در موقعیت میانی و در عرض مخزن را در گام‌های زمانی ۱۵۲ (ورود اوج سیلاب به مخزن)، ۲۱۰ (بیشینه تراز آب در مخزن و ۲۲

در آغاز شبیه‌سازی، شوری در تمام مخزن همانند با آب دریای خزر و برابر با 12 PSU (۱۲ گرم نمک در یک کیلوگرم آب دریا) است و به تدریج میزان شوری از محل ورود رودخانه به مخزن در حال کاهش است. در شکل ۸ تغییرپذیری‌های شوری در لایه‌های سطحی (لایه ۵) و چسبیده به کف (لایه ۱) در مدت ۵۰۰ ساعت ارائه شده است. با توجه به این شکل، کاهش شوری در لایه‌ها مختلف تا حدودی مشابه هم می‌باشد. علت این موضوع می‌تواند جریان ضعیف سطحی و عمقی آب در مخزن باشد. همچنین بررسی تغییرپذیری‌های شوری در لایه سطحی در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که کاهش شوری به صورت تدریجی در مخزن رخ می‌دهد. از سویی تغییرپذیری‌های شوری در مخزن رسوبگیر با شدت بیشتر و در مخزن ساحلی با شدت کمتری همراه است. پس از ۱۰۰۰ ساعت از آغاز شبیه‌سازی میزان شوری در مخزن در حدود 8 PSU است و پس از ۳۰۰۰ ساعت در حدود 3.5 PSU و پس از ۸۷۶۰ ساعت به بیشینه میزانی در حدود 2 PSU رسیده است.

در ادامه تغییرپذیری‌های شوری در عرض مخزن و در موقعیت وسط مخزن با زمان‌های مختلف بررسی می‌شود. شکل ۹ رخ-نمای عرضی تغییرپذیری‌های شوری در زمان‌های ۵۰۰ و ۶۰۰۰ ساعت پس از آغاز مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، لایه‌بندی شوری به مقدار ناچیزی (شکل ۸-a) در عمق مخزن رخ می‌دهد و در اکثر زمان‌ها (شکل ۸-b) میزان شوری در عمق مخزن یکسان است.

در نهایت تغییرپذیری‌های شوری در ۴ نقطه از سطح مخزن و در زمان‌های مختلف بررسی می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ موقعیت این نقطه‌ها بر روی یک خط راست در طول مخزن قرار دارد. همانگونه که در این شکل مشخص است، با حرکت از نقطه P_1 در مخزن رسوبگیر به سمت نقطه P_4 در نزدیکی تخلیه‌کننده زیرین میزان شوری در یک زمان مشخص افزایش می‌یابد که این موضوع به علت دورتر بودن نقاط نسبت به شرط مرزی رودخانه در ورودی است. همچنین در زمان‌های میانی (از April تا October) به علت کاهش جریان ورودی (شکل ۳) تغییرپذیری‌های در میزان شوری نقطه‌های مختلف قابل ملاحظه نیست. نوساناتی در نقطه P_1 مشاهده می‌شود که علت آن می‌تواند کوچک بودن مخزن رسوبگیر نسبت به مخزن اصلی و برخورد جریان ورودی به جداره‌های مخزن رسوبگیر و بازگشت

همان‌گونه که مشخص است شوری در لایه‌های مختلف یکسان شده و نزدیک به میزان شوری جریان ورودی رودخانه به مخزن می‌شوند.

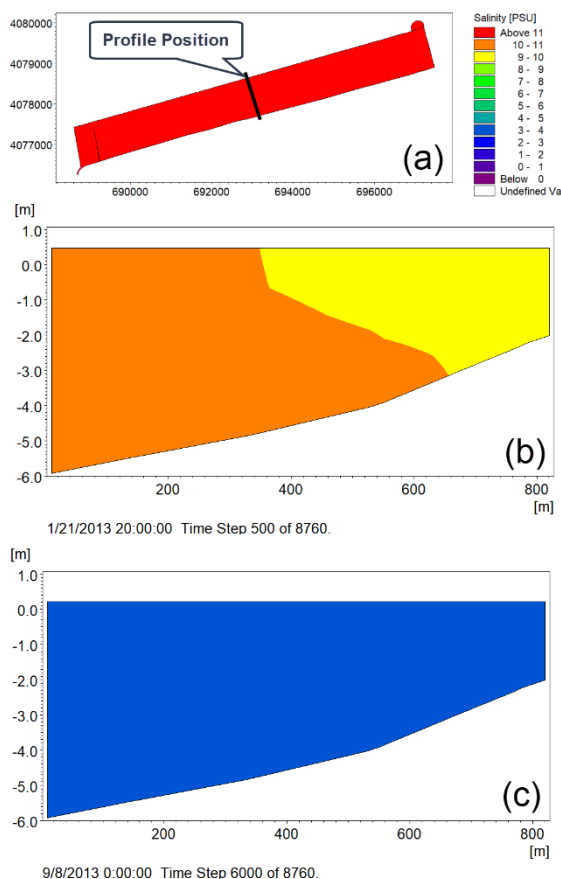


Fig. 9 Salinity in depth of reservoir along a transverse line in Model No. 1: (a) the position of the cross section (b) 500 hours later, (c) 6000 hours later

شکل ۹ تغییرپذیری‌های شوری در عمق مخزن در امتداد یک خط عرضی در مدل شماره یک: (a) موقعیت مقطع عرضی، (b) ۵۰۰ ساعت بعد، (c) ۶۰۰۰ ساعت بعد

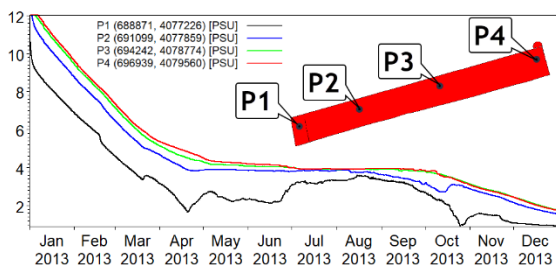


Fig. 10 Time variation of salinity at different points of the reservoir surface in Model No. 1

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های زمانی شوری در نقاط مختلف سطح مخزن در مدل شماره یک

ساعت پس از ورود اوج سیلاب) و ۳۸۴ (پس از حدود ۴ روز از شبیه‌سازی یا نصف زمان شبیه‌سازی سیلاب) نشان می‌دهد. بررسی این رخ‌نماها نشان می‌دهد که لایه‌بندی شدیدی در عمق مخزن در این لحظه‌ها رخ می‌دهد و هر چه به منطقه‌های عمیق‌تر مخزن می‌رویم، لایه‌بندی شدیدتر می‌شود. علت این موضوع را می‌توان ورود جریان شدید سیلاب ورودی دانست همچنین پس از گام زمانی ۳۸۴ تا حدودی شوری در عمق مخزن یکسان بوده و نزدیک به شوری جریان ورودی می‌رسد.

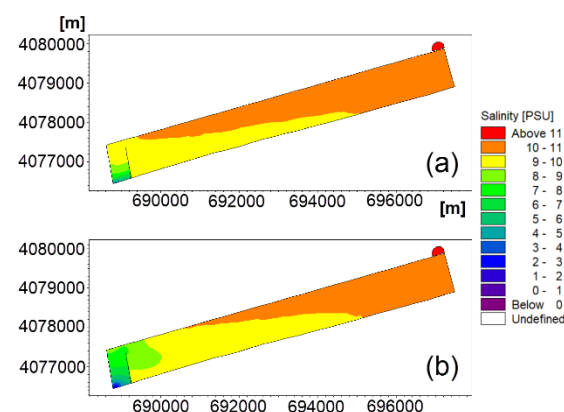


Fig. 8 Variation of salinity in the coastal 500 hours after the start of modeling in Model No. 1: (a) the first layer (near the bed), (b) the fifth layer (water surface)

شکل ۸ تغییرپذیری‌های شوری در مخزن ساحلی ۵۰۰ ساعت پس از آغاز مدل‌سازی در مدل شماره یک: (الف) لایه اول (کف مخزن) و (ب) لایه پنجم

مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۲ نیز نشان می‌دهد که لایه‌بندی شدیدتری در حالت سیلاب رخ می‌دهد. در واقع با توجه به ورود جریان سیلابی و بالاتر بودن سرعت جریان در لایه‌های سطحی، محدوده کاهش شوری در سطح مخزن نسبت به لایه‌های عمقی دارای دامنه‌ی بیشتری است.

در نهایت در شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های زمانی شوری در یک نقطه میانی از سطح مخزن و در لایه‌های مختلف نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که افت شدید شوری در شرایط عبور شاخه بالارونده آب‌نگار در مخزن رخ می‌دهد. همچنین با حرکت از لایه سطحی به سمت لایه عمقی شیب منحنی شوری کاهش یافته و لایه عمقی در مدت زمان طولانی‌تری کاهش شوری را تجربه می‌کند.

در لایه سطحی نیز پس از گذشت مدت زمانی کوتاه از عبور اوج سیلاب، میزان شوری به کمتر از 1 PSU می‌رسد. در نهایت

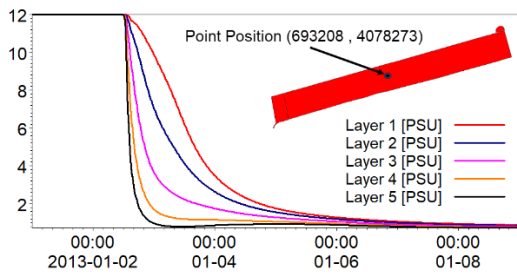


Fig. 13 Time variation of salinity at different layers at a point of the reservoir in Model No. 2

شکل ۱۳ تغییرپذیری های شوری در یک نقطه از بخش میانی مخزن در لایه های مختلف در مدل شماره دو

۸- نتیجه گیری

مخزن های ساحلی راه حلی جدید برای ذخیره سیلاب ها هستند که می توانند مسئله کمبود آب شیرین را در منطقه های ساحلی به میزان قابل توجهی مرتفع نمایند. در این تحقیق بررسی عددی بر روی پویایی جریان، انتقال و انتشار شوری در یک مخزن ساحلی در شرایط آبشویی (نمک زدایی) انجام گرفت. برای انجام این تحقیق دو مدل عددی ساخته شد. در مدل اول تغییرپذیری های جریان و شوری در طول یکسال با دبی میانگین ماهانه رودخانه تجن به عنوان بررسی موردی بررسی شد. در مدل دوم نیز تغییرپذیری های جریان و میزان شوری در مخزن در شرایط یک سیلاب تاریخی نزدیک به ۲۰۰ برابر میانگین دبی ماهانه بررسی شد. خلاصه نتایج به دست آمده از این تحقیق شامل موارد زیر است:

(۱) در هر دو مدل با توجه به گستره و حجم زیاد مخزن، تغییرپذیری های سطح آب و سرعت جریان در سطح مخزن کم بوده و شرایط بسیار آرامی در مخزن حاکم است. همچنین پیشینه سرعت جریان در مدل شماره دو در حدود ۰/۲ متر بر ثانیه در موقعیت های نزدیک به ساحل بدست آمد که این میزان در حدود ۱۰ برابر بیشتر از مدل شماره یک است.

(۲) بررسی تغییرپذیری های شوری در لایه سطحی و در زمان های مختلف نشان می دهد که در انتهای شبیه سازی مدل شماره یک، پیشینه میزان این فراسنجه در سطح مخزن حدود ۲ PSU است. این در حالیست که پس از عبور سیلاب در انتهای مدل شماره دو میزان شوری در سطح مخزن به کمتر از ۱ PSU خواهد رسید.

(۳) بررسی رخ نمای شوری در عمق مخزن و در لحظه های مختلف نشان می دهد که لایه بندی شوری در عمق مخزن در

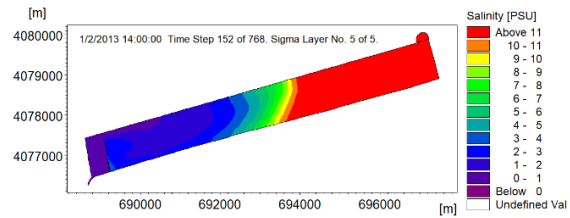


Fig. 11 Salinity at the surface of the reservoir at the time of peak flood entry into the reservoir in Model No. 2

شکل ۱۱ تغییرپذیری های شوری در سطح مخزن در لحظه ورود اوج سیلاب در مدل شماره دو

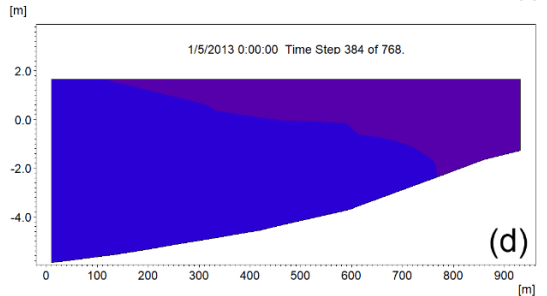
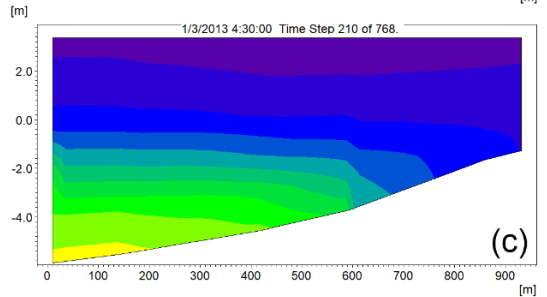
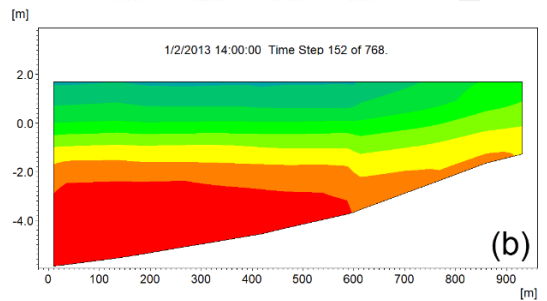
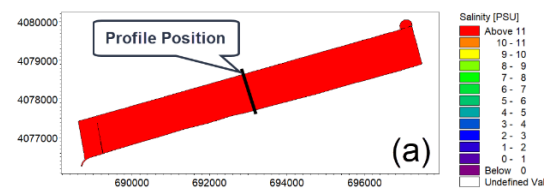


Fig. 12 Salinity profile in a cross section in Model No. 2 (a) the position of the cross section (b) Time for flood peak entry, (c) Time for maximum water level in the reservoir and (d) After half of the flood duration entry

شکل ۱۲ تغییرپذیری های شوری در یک رخ نمای عرضی از مدل شماره دو (الف) موقعیت رخ نمای عرضی، (ب) لحظه ورود اوج سیلاب به مخزن، (ج) لحظه پیشینه تراز مخزن و (د) پس از گذشت نیمی از زمان سیلاب

Ω	سرعت دورانی زوایه‌ای زمین [1/s]
ϕ	عرض جغرافیایی
g	شتاب ثقلی زمین [m/s ²]
ρ	چگالی آب [Kg/m ³]
ρ_0	چگالی مرجع آب [Kg/m ³]
S_{xx}, S_{xy}	مولفه‌های تانسور تنش تشعشعی [Kg/s ²]
S_{yx}, S_{yy}	
v_t	لزجت سنماتیکی گردابی قائم [m ² /s]
P_a	فشار هوا [N/m ²]
S	اندازه دبی چشمه یا چاه متمرکز [1/s]
(u_s, v_s)	مولفه‌های سرعت آبی که به محیط وارد یا خارج می‌شود [m/s]
F_u و F_v	ترم‌های تنش‌های رینولدزی [m/s ²]
C	غلظت کمیت اسکالر
s	غلظت شوری
s_s	غلظت چشمه شوری
F_s	ترم پخش افقی شوری [1/s]
k_p	نرخ خطی زوال کمیت اسکالر [1/s]
C_s	غلظت کمیت اسکالر در منبع
D_v	ضریب پخش آشفتگی قائم [m ² /s]
D_h	ضریب پخش آشفتگی افقی [m ² /s]
F_c	ترم پخش افقی کمیت اسکالر [1/s]
K	انرژی جنبشی آشفتگی [J/Kg]
ε	هدررفت انرژی جنبشی آشفتگی [J/Kg.s]
P	متغیر حاصل برش [J/Kg.s]
B	متغیر حاصل شناوری [J/Kg.s]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}$	ضریب‌های ثابت تجربی

۱۱- منبع‌ها

Berghuijs, W.R., Larsen, J.R., Van Emmerik, T.H.M. and Woods, R.A. (2017). A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors. *Water Resources Research*, 53(10), 8475–8486.

Chen, J. (2014). Current Field, Residence Time and Sources of Saltwater Intrusion at the Water Intake of

شرایط مدل شماره یک ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. این در حالی است که لایه‌بندی شوری در مدل شماره دو با توجه به تغییرپذیری‌های سریع جریان آب‌نگار شدید است. و با گذشت زمان لایه‌بندی شوری از بین رفته و نزدیک به شوری جریان ورودی می‌شود.

(۴) به طور کلی مقایسه نتایج حاصل از دو مدل آبشویی مخزن ساحلی در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سیلاب و به کارگیری سرریز می‌تواند شرایط مخزن را با توجه به انتقال و انتشار شوری در شرایط بهتری قرار دهد. البته این نتیجه‌گیری برای مخزن این تحقیق است و در مخزن‌های ساحلی دیگر با عمق‌های بزرگتر، می‌تواند نتایج دیگری به دست آید.

در این تحقیق سعی شد به بخشی از ابهام‌ها در مورد استفاده از مخازن ساحلی پاسخ داده شود. موضوع‌هایی مانند بررسی روند ورود آلودگی مانند فلزهای سنگین از طریق جریان ورودی رودخانه و چگونگی پخش آلودگی در مخزن در شرایط مختلف، بررسی برهم‌کنش آب سطحی در مخزن ساحلی و آب زیر زمینی در شرایط مختلف آب‌شویی و آبگیری مخزن و الگوی رسوبگذاری در مخزن رسوبگیر و مخزن اصلی می‌توانند در تحقیق‌های آینده مطرح باشند.

۹- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت مدیریت منابع آب و نیروی ایران و در قالب دوره فرصت مطالعاتی در جامعه و صنعت نویسنده اول انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از معاونت فنی و پژوهش‌های آن شرکت که حمایت‌های زیادی برای انجام این تحقیق انجام دادند، قدردانی کنند.

۱۰- فهرست نشانه‌ها

t	زمان [s]
x, y, z	مختصات کارتزین [m]
η	تراز سطح آب [m]
d	عمق آب در شرایط بدون موج [m]
H	عمق کل آب [m]
u, v, w	مولفه‌های سرعت در جهت‌های x, y و z [m/s]
f	فراسنجه کریولیس [1/s]

- Mao, X.Z., Zhu, X.A., Chen, F.Y., Yu, Q.W., and Weng, B.Z. (2005). Study on accelerating water desalination in a polder reservoir for storage of fresh water along the coast. *Advances in Water Science*, 16(6), 773–776.
- Mastrocicco, M., Busico, G., Colombani, G., Vigliotti, M. and Ruberti, D. (2019). Modelling actual and future seawater intrusion in the Variconi coastal wetland (Italy) due to climate and landscape changes, *Water*, 11, 1502, doi:10.3390/w11071502.
- Moran, S.B., Stachelhaus, S.L., Kelly, R.P. and Brush, M.J. (2014). Submarine groundwater discharge as a source of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus to coastal ponds of southern Rhode Island. *Estuaries & Coasts*, 37(1), 104–118.
- Pan, G.E., Huang, L.C., Jin, L.J. and Zhu, X.A. (2004). Study on technology of fresh water storage of reservoirs on coastal areas. *Water Conservancy Planning and Design*, 2, 51–55.
- Sadeghi, S. and Jafary, M. (2013) Estimating the relationship between EC and TDS in Tajan River, The first national conference on drainage in sustainable agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)
- Shafee, R., Mehdizadeh, S.S. and Gooya, A.S. (2017). Mechanism of controlling seawater intrusion at coastal aquifers using subsurface barrier. *European Water*, 57, 407-412.
- Spanoudaki, K., Stamou, A.I. and Nanougiannarou, A. (2009). Development and verification of a 3-D integrated surface groundwater model. *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 410–427.
- Winkel A. (2007). Inverted freshwater/brine aquifer interface and osmotic pressure ridge Pilot Valley, Utah. M.S. Thesis, Brigham Young University, pp 92.
- Xu, L.Z. (2001). Discussion about the struction of coastal reservoir in Northern Jiangsu Province. *Jiangsu Water Resources*, 11, 34–35.
- Yeates, P.S. and Imberger, J. (2003). Pseudo two-dimensional simulations of internal and boundary fluxes in stratified lakes and reservoirs. *International Journal of River Basin Management*, 1(4), 297–319.
- Yuan, W.X., Yang, S.T., and Zhuang, M. (2007). Arguments of the coastal reservoir in RuDong JiangSu Province. *Yangtze River*, 38(6), 35–37.
- Zhang, P., Jiang, C.L., Zhu, X.Q., Li, D.M., Cao, C., Zhu, L.Q., Xing, X.G. and Shen, X.J. (2014). Analysis of sediment salinization degree of the Qingcaosha Reservoir. Shanghai, China: East China Normal University, Master's thesis, 128p.
- Emadi, M., Masoudian, M. and Rottcher, K. (2020). The performance of Tajan rubber dam in Mellal Park in city of Sari during March 2019 flood. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*. 4(4), 60-68. (In Persian)
- Herrera-Le´on, S., Lucay, F., Kraslawski, A., Cisternas, L.A. and Ga´lvez, E.D. (2018). Optimization approach to designing water supply systems in non-coastal areas suffering from water scarcity. *Water Resources Management*, 32(7), 2457–2473.
- Hussain, M., Abd-Elhamid, H., Javadi, A. and Sherif, M. (2019). Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. 11, 2467, doi:10.3390/w11122467.
- Jin, G., Mo, Y., Li, M., Tang, H., Qi, Y., Li, L. and Barry D. A. (2019). Desalination and Salinization: A Review of Major Challenges for Coastal Reservoirs. *Journal of Coastal Research*. 35(3), 664-672.
- Iran Water and Power Resources Development Company. (2014). Desalination plan and transfer of Caspian Sea water to the central plateau of Iran. Part I Basic Studies - Volume II, Final Report of Hydrological Studies. (In Persian)
- Iran Water Resources and Management Company. (2015). Investigating the quality of surface water in the country. (In Persian)
- Li, H.N. and Chen, F.X. (2005). Analysis of water desalting influence factor in tidal land reservoir. *Water Resource & Hydropower of Northeast China*, 23(10), 42–44.
- Liang, D.F., Falconer, R.A., and Lin, B.L. (2007). Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model. *Journal of Hydrology*, 337(1), 147–158.
- Liu, H. and Jeng, D.S. (2007). A semi-analytical solution for random wave-induced soil response and seabed liquefaction in marine sediments. *Ocean Engineering*, 34(08), 1211–1224.
- Mabrouk, M., Jonoski, A., Essink, G. and Uhlenbrook, S. (2018). Impacts of Sea Level Rise and Groundwater Extraction Scenarios on Fresh Groundwater Resources in the Nile Delta Governorates, Egypt. *Water*. 10, 1690, doi:10.3390/w10111690.

proposed reservoir in the coastal area of Tianjin.
Yellow River, 36(1), 67–70.