




Numerical study of brine plumes discharged from a desalination plant at different depths in the coastal waters of the Caspian Sea

Mehri Gavabari, F.¹  | Bohluly, A.²  | Aliakbari-Bidokhti, A. A.³ 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: fatemeh.mehri94@ut.ac.ir

2. **Corresponding Author**, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bohluly@ut.ac.ir

3. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bidokhti@ut.ac.ir

(Received: 30 April 2022, Revised: 10 Sep 2022, Accepted: 4 Oct 2022, Published online: 14 June 2023)

Summary

In Reverse Osmosis (RO) desalination plants, the most important problem is the increase of salinity near the outfall. In this study, different scenarios of brine waste dispersion discharge of a desalination plant in terms of the depths of outlet system positions and physical properties of discharge system that meet the standard criteria of the Department of Environment of Iran are investigated.

In this work, the effect of the desalination effluent discharge site in terms of the depth of discharge location and emission of pollutants on a Caspian Sea coastal area (Neka) has been investigated and various scenarios have been implemented and proposed. Here the effectiveness of desalination effluent discharge depths of different scenarios, using a numerical model, have been considered. The model simulates unsteady 3D flows, by taking into account density variations, currents and other hydrographic conditions. The model has a dynamical nesting facility which gives a possibility of making an increase in resolution in areas of special interest. For increasing numerical efficiency, structured nested grids with three sizes of 90, 30, and 10 meters and uniform vertical mesh size equals to 0.5 meters have been used. In comparison with other common works, in this research, using a 3D non-hydrostatic (fully hydrodynamic) mathematical model to simulate the dispersion of saline water effluent, is an important feature. The effective density variation between the effluent and the receiving environment and generation of vertical flows resulting from this density variation, cannot be simulated using simplified mathematical models as they may face serious errors. Lack of the rapid diffusion and ideal conditions for plume development, illustrates that the worst condition for brine dispersion is a calm sea with minimum currents in coastal areas. So, the effects of the sea waves have been neglected and longshore wind induced current has been assumed to be a minimum of approximate value of 0.03 m/s.

The mean salinity in the southern Caspian Sea is about 12.5 gr/lit and the desalination brine salinity has been considered as 25 gr/lit and the rate of fresh water and brine waste water production is about 6 m³/s. With these assumptions for rate of effluent discharge and sea conditions, different scenarios have been investigated using a 3D numerical model including different velocities and directions of a pair of jet fluxes in outlet system and outlet installation Reverse Osmosis (RO) desalination plants salinity near the outfall. In this study, depths of outlet system positions and physical properties of discharge system are mainly investigated.

The results show that in acceptable scenarios (with higher jet discharge speed and vertical direction of 30° to the vertical axis), the receiving environment has high brine concentrated area with a radius less than 200 meters. The results of different scenarios of discharge depths show that regarding the depths of discharge studied in this work (5, 10 and 15 meters), when the jet injection is closer to the horizontal direction, there is no significant difference between the results of different depths. But, in selected conditions, i.e. conditions where the angle of the effluent discharge jet is closer to the vertical axis (vertical direction of the jets is 30° to the vertical axis), deeper discharges create better conditions in terms of salinity propagation horizontally in the environment.

Keywords: Caspian Sea, desalination discharge, numerical model.

Cite this article: Mehri Gavabari, F., Bohluly, A., & Aliakbari-Bidokhti, A. A. (2023). Numerical study of brine plumes discharged from a desalination plant at different depths in the coastal waters of the Caspian Sea. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 229-242. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2022.341980.1007421>

بررسی ساختار پلوم پساب یک آب شیرین کن در عمق‌های مختلف به روش عددی در آب‌های ساحلی دریای خزر

فاطمه مهری گوابری^۱ | اصغر بهلولی^۲ | عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۳

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: fatemeh.mehri94@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bohluly@ut.ac.ir

۳. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bidokhti@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۷/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

چکیده

در آب شیرین کن‌ها، اثرات ناشی از تخلیه آب‌نمک غلیظ بسیار حائز اهمیت است. دفع پساب این تأسیسات، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر کیفیت آب محیط پذیرنده است. میزان تأثیر بر کیفیت آب محیط دریایی بسته به نوع سیستم نمک‌زدایی و سیستم تخلیه پساب آن متفاوت است؛ به گونه‌ای که در انواع حرارتی، علاوه بر افزایش شوری، دمای پساب نیز از دمای محیط پذیرنده بالاتر است اما در روش اسمز معکوس مهم‌ترین مسئله افزایش شوری است. در این پژوهش با توجه به اهمیت تأمین ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست در مورد تخلیه پساب، چگونگی پخش آلاینده اصلی یعنی شوری (کل املاح آب) مورد بررسی قرار گرفته است.

یک سؤال مطرح در این زمینه، میزان تأثیرگذاری تخلیه پساب آب‌شور متناسب با عمق محل تخلیه است. لذا در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار مایک سه‌بعدی، اثر محل تخلیه پساب آب شیرین کن به لحاظ موقعیت عمقی تخلیه و نحوه انتشار در سواحل جنوب شرقی دریای خزر مورد بررسی قرار گرفته و سناریوهای مختلفی مطرح و اجرا شده است. نتایج سناریوهای بررسی شده نشان می‌دهد که با شرط تأمین ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست تخلیه پساب در سه عمق بررسی شده نزدیک ساحل با تمهیداتی قابل اجرا است. در مورد اعماق بررسی شده در این پژوهش یعنی اعماق ۵ متر، ۱۰ متر و ۱۵ متر، نتایج در برخی شرایط نشان می‌دهد اختلاف محسوسی بین نتایج این سه عمق وجود ندارد؛ اما در شرایط برگزیده یعنی شرایطی که زاویه جت تخلیه پساب به محور قائم نزدیک‌تر است، موقعیت‌های عمیق‌تر شرایط بهتری را به لحاظ انتشار شوری در محیط افقی ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن، پساب شور، اثرات محیط زیستی، دریای خزر.

۱. مقدمه

کیفیت زیست کفزیان دریایی اثرگذار است. در حالی که پساب دستگاه‌های حرارتی به علت دمای بالا و چگالی پایین تر تمایل بیشتری به شناور ماندن دارد و عمدتاً بر بهره‌وری جانداران محیط میانی دریایی تأثیرگذار است (لاتمن، ۲۰۱۰). در حال حاضر اسمز معکوس یکی از پرطرفدارترین روش‌های نمک‌زدایی است که در آن آب شامل مواد محلول با قرار گرفتن در مجاورت غشای نیمه‌تراوا به دو بخش آب بدون مواد محلول و آب با مواد محلول با غلظت بیشتر تفکیک می‌شود (لی و نانس، ۲۰۱۶).

آب شیرین کن‌ها مانند هر صنعتی دارای اثرات زیست‌محیطی مرتبط با ساخت و بهره‌برداری هستند و باید مورد ارزیابی محیطی زیستی قرار گیرند (برکان و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش شوری در پساب در انواع فرآیندهای نمک‌زدایی اتفاق می‌افتد ولی میزان آن وابسته به راندمان سیستم متغیر است. در حالی که افزایش دمای پساب به نوع سیستم مورد استفاده بستگی دارد. در دستگاه‌های اسمز معکوس (RO) افزایش شوری از یک طرف و عدم افزایش قابل توجه دما باعث افزایش چگالی می‌شود لذا پساب سیستم اسمز معکوس به علت سقوط به نزدیکی بستر بر

تخلیه شده و در فاصله ۲ تا ۵/۵ کیلومتری ساحل در عمق ۷-۹ متر از MSL انجام شده است. نتایج با ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی مانند امواج، جزر و مد و جریان منطقه و همچنین باد و سایر پارامترهای محیطی محلی نشان داد هیچ گونه پساب نمکی وجود ندارد که به سمت ساحل حرکت کرده باشد و تفاوت در شوری آب نمکی که پراکنده شده است در حدود ۰/۱۵-۰/۰۱ psu از آب دریا است که با شرایط محیط تفاوت چندانی ندارد و قابل قبول است (دنیس و همکاران، ۲۰۱۵).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با وجود اختلاف چگالی مؤثر بین جریان پساب و محیط پذیرنده که شکل خاصی از انتشار پساب را موجب می‌شود، اکثر مطالعات شبیه‌سازی در زمینه انتشار پساب آب شیرین کن‌ها با مدل‌های دوبعدی انجام می‌شود. مدل‌های ریاضی دوبعدی با توجه به فرض ثابت در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و کیفی در عمق، می‌تواند موجب خطای قابل توجهی در شبیه‌سازی در این نوع شبیه‌سازی شود. متأسفانه خطای مدل‌های دوبعدی در راستای خوبی نیست و شرایط به صورت غیر واقع بینانه‌ای خوب نمایش داده می‌شود. دلیل این موضوع این است که در مدل‌های دوبعدی کل پساب خروجی در محل تخلیه به صورت ناگهانی در کل عمق حل شده فرض می‌شود، در حالی که در واقعیت این‌طور نیست و پلوم ناشی از پساب می‌تواند به صورت جریان غلیظ و بدون اینکه در محیط پذیرنده به صورت کامل مخلوط شود، می‌تواند تا فاصله قابل توجهی از محل تخلیه دور شده و آن مناطق را تحت تأثیر قرار دهد. در عین حال کارهای متعددی نیز با مدل‌های سه‌بعدی انجام شده است که در ادامه به نمونه‌هایی از آن اشاره می‌شود.

بلوچی و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی کوه‌رنس، پخش شوری و حرارت ناشی از پساب وارد شده از کارخانه در دست‌ساخت بندرعباس در دریا، مورد بررسی قرار دادند و نمودارهایی جهت بررسی بهتر تغییرات شوری و دمای آب در اطراف محل تخلیه

با توجه به فرآیند تولید آب شیرین از آب دریا، پساب تولید شده مجدداً همراه با شوری بیشتر (برای راندمان ۵۰ درصد، دو برابر شوری اولیه) وارد محیط زیست دریایی می‌شود. این جریان شورتر می‌تواند محدوده‌ای از محیط دریایی را تحت تأثیر قرار دهد. بزرگی محدوده تحت تأثیر پساب، به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله می‌توان به توپوگرافی کف دریا، عمق نازل تخلیه، سرعت و امتداد جت تخلیه، سرعت جریان محیط و ... اشاره کرد. با توجه به اهمیت آثار محیط زیستی همواره پژوهش‌هایی در این زمینه انجام می‌شود. به عنوان نمونه منفرد و حمزه‌ای با استفاده از مدل مایک دوبعدی (MIKE 21) تحقیقی برای یافتن نقطه‌ای بهینه برای ورودی و خروجی پساب آب شیرین کن در سواحل شهر بوشهر انجام دادند. با شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل ریاضی دوبعدی مشخص شد آبرگیری از لبه‌ی داخلی خور بوشهر و تخلیه پساب در لبه‌ی بیرونی خور مکان مناسبی است (منفرد و حمزه‌ای، ۲۰۱۶). در سواحل شرقی هند (ساحل خلیج بنگال) تحقیق مشابهی انجام شده است. در آن از مدل مایک دوبعدی برای تعیین مناسب‌ترین مکان ورودی آب دریا و خروج پساب آب شیرین کن استفاده کرده‌اند (پاتل و همکاران، ۲۰۱۶).

در تحقیق دیگری در خلیج فارس مدل‌سازی کیفیت آب و مطالعات اکولوژیکی در مجاورت آب شیرین کن انجام شده است. در این پژوهش، مقدار اکسیژن حل شده، کلر باقی مانده و شوری و دمای آب دریا مدل‌سازی شدند و مشخص شد که افزایش این پارامترها تأثیراتی بر کیفیت آب و محیط زیست دریایی دارند اما این اثرات استانداردهای محیطی زیستی را تأمین می‌کند (محمد، ۲۰۰۹).

دنیس و همکاران (۲۰۱۵)، در منطقه توتیکورین هند مدل مایک ۲۱ را برای شبیه‌سازی پساب خروجی آب شیرین کن به کار گرفتند. در این پژوهش با در نظر گرفتن منبع نقطه‌ای به عنوان نقطه خروج، پساب خروجی با سرعت ۱/۵۸ متر مکعب در ثانیه به محیط دریایی

پساب ترسیم شد و مشخص شد با توجه به جهت جریان‌های حاکم در منطقه، پخش به سمت غرب محل تخلیه صورت گرفته و حداقل تا فاصله ۱۰ کیلومتری از محل تخلیه افزایش شوری و حرارت محسوس است (بلوچی و همکاران، ۲۰۱۴).

در سال ۲۰۱۰ در دانشگاه فنی باری (ایتالیا) مطالعاتی روی مدل‌سازی پخش پساب انجام شد که هدف اصلی آن تعیین محل بهینه تخلیه پساب بوده است. در مطالعه مذکور از مدل سه‌بعدی (MIKE 3-HD) برای شبیه‌سازی تخلیه آب‌نمک در منطقه ساحلی جنوب ایتالیا در محدوده حضور گونه‌های گیاهی حفاظت‌شده، استفاده شده است. نتایج نشان دادند که پساب شور به دلیل جریان ناشی از باد پخش می‌شوند و چمنزارهای اقیانوسی که در عمق حدود ۸ متر قرار دارند تنها تا حدی تحت تأثیر پساب شور قرار می‌گیرند (مالکانجیو و پتریلو، ۲۰۱۰).

بین مدل‌های سه‌بعدی نیز گاهی مدل‌های ریاضی ساده‌شده با فرض فشار هیدرو استاتیک و عدم وجود جریان قائم، بعضاً استفاده می‌شوند. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد، انتشار مصنوعی در عمق و در عرض که در مدل‌های ریاضی ساده‌شده محتمل می‌باشد می‌تواند منجر به ایجاد خطاهایی گمراه‌کننده بازهم در جهت بهتر نشان دادن نتایج در مقایسه با واقعیت شود؛ بنابراین صرف استفاده از مدل‌های ریاضی سه‌بعدی برای بررسی این پدیده کفایت نمی‌کند.

در سال‌های اخیر در ایران طرح‌های متعدد شیرین‌سازی مطرح بوده‌اند و البته چالش‌های محیط زیستی نیز به همراه داشته‌اند. طرح انتقال آب از خزر به سمنان یکی از چالشی‌ترین طرح‌های چند سال اخیر کشور بوده و در این رابطه نگرانی‌های زیادی به لحاظ آثار محیطی اجرای این طرح مخصوصاً در محیط دریایی مطرح شده است. یکی از سؤالات مطرح در محیط دریایی این بود که اگر تخلیه‌کننده در اعماق بیشتر قرار گیرد آیا شرایط به لحاظ بزرگی محدوده تحت تأثیر پساب بهتر می‌شود یا خیر؟ و

چقدر؟ برای پاسخ به این سؤال در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی با یک مدل ریاضی هیدرودینامیک، انتشار پساب به لحاظ موقعیت عمقی تخلیه در محدوده ساحلی بررسی شد تا علاوه بر آزمون تأثیر عمق آب در محل تخلیه، مکان و شرایط مناسب برای تخلیه ارائه شود. برای چنین هدفی موقعیت‌هایی که به لحاظ عملیاتی و اجرای طرح امکان‌پذیر بوده‌اند یعنی اعماق ۵، ۱۰ و ۱۵ متر، انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی عمق‌های بیشتر به لحاظ محدودیت‌های اجرایی احداث تخلیه‌کننده از جمله هزینه‌های بالا برای اجرای طرح انتقال در فواصل دور از ساحل در این پژوهش معنی‌دار نبوده است.

۲. روش‌شناسی

با توجه به اهمیت تأمین ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست در مورد تخلیه پساب، چگونگی پخش آلاینده شاخص یعنی شوری و ارتباط آن با شرایط دریایی به کمک مدل عددی سه‌بعدی MIKE3-HD که قابلیت شبیه‌سازی شرایط غیرهیدرواستاتیکی را داراست، در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مدل سه‌بعدی هیدرودینامیک صرفاً به علت فرآیند کاملاً سه‌بعدی انتشار پساب سامانه نمک‌زدایی به داخل محیط دریایی است. اختلاف چگالی پساب با آب دریا باعث ایجاد جریان‌های قائم و همچنین جریان‌های لایه‌ای در محدوده محل تخلیه پساب می‌شود از این رو اگرچه جریان‌های عمومی دریایی معمولاً قابلیت مدل‌سازی با مدل‌های دوبعدی را دارند، اما مدل‌سازی جریان چگال مخصوصاً در محدوده نزدیک به محل تخلیه پساب صرفاً با مدل‌های سه‌بعدی با توان شبیه‌سازی تغییرات چگالی ناشی از حرارت و شوری امکان‌پذیر است و در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های دوبعدی و یا حتی سه‌بعدی ساده‌شده نتایج را دچار اشتباهات جدی و گمراه‌کننده خواهد کرد.

معیار اصلی برای سنجش سناریوهای مختلف ضابطه تخلیه

نکا برای تخلیه پساب و احداث آب شیرین کن در نظر گرفته شده است. غلظت میانگین املاح دریای خزر در این محدوده بر اساس اطلاعات موجود در محدود ۱۲/۵ گرم بر لیتر است (روسوسکا و سیمونت، ۲۰۱۱). جهت جریان عمومی آب در جنوب خزر از سمت شمال غربی به جنوب شرق است (کوروتنکو و همکاران، ۲۰۰۱). مقدار حداقل سرعت با فراوانی بالای از ۵٪ بر اساس داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌های موجود دریایی در حدود ۰/۰۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (ذاکر و همکاران، ۲۰۱۱ و بهلولی و همکاران، ۲۰۱۹). اگرچه سرعت‌های پایین تر و یا صفر می‌تواند شرایط بحرانی تری ایجاد نماید اما عدم فراوانی قابل توجه چنین سرعت‌هایی منجر به دستیابی به نتایج غیرواقعی در جهت بدبینانه می‌شود. چراکه سرعت‌های نزدیک صفر، اگرچه محتمل هستند فراوانی و یا تداوم بسیار محدودی دارند. سرعت بالای جریان‌های دریایی باعث انتشار سریع تر شوری می‌شود و شرایط بهتری را به لحاظ توزیع غلظت شوری و حرارت در محیط ایجاد می‌نماید. از این رو برای در نظر گرفتن بدترین شرایط به لحاظ محیط زیستی، شرایط جریان حداقلی برای جریان‌های دریایی در نظر گرفته شده است. دبی پساب با توجه به طرح اولیه انتقال آب خزر به سمنان که سالیانه ۲۰۰ میلیون مترمکعب است و با فرض راندمان ۵۰٪، ۶ مترمکعب بر ثانیه و غلظت پساب ۲۵ گرم بر لیتر (دو برابر غلظت محیط) فرض شده است. برای سرعت تخلیه نیز دو گزینه ۳ و ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. داده‌های موردنیاز جهت استفاده در عمق سنجی مدل از پروفیل‌های ساحلی که دقیق‌ترین اطلاعات در دسترس از منطقه است استخراج شده است.

اینکه آیا این گونه مدل‌ها باید بتوانند شرایط دریایی مثل جریان‌های اصلی دریایی (و یا امواج) را نیز شبیه‌سازی کنند اگرچه یک مزیت است اما دسترسی به آن الزاماً به معنی تأیید صحت شبیه‌سازی هدف اصلی این نوع مطالعات، یعنی شبیه‌سازی جریان چگال ناشی از تخلیه

پساب مورد تأیید سازمان حفاظت محیط‌زیست بوده است. بر اساس تبصره ۱ ماده پنج آیین‌نامه جلوگیری از آلودگی آب، در صورت تخلیه پساب شور به داخل محیط‌های آبی، غلظت شوری محیط در فاصله بیش از ۲۰۰ متر از محل تخلیه نباید بیشتر از ۱۰ درصد نسبت به شوری محیط پذیرنده افزایش یابد.

۳. معادلات حاکم

پایه ریاضی در مدل سه‌بعدی استفاده شده، معادلات ناویر-استوکس با میانگین رینولدز در سه بعد، شامل اثرات تلاطم و چگالی متغیر، همراه با معادلات شوری و دما است. ماژول هیدرودینامیک مایک سه‌بعدی از تکنیک جهت متناوب ضمنی (ADI) برای ادغام و حل معادلات بقای جرم و تکانه در حوزه فضا-زمان استفاده می‌کند. این معادلات و به همراه معادلات انتقال دما و شوری در روابط (۱) تا (۴) نمایش داده شده است.

$$\frac{1}{\rho C_S^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right\} \right) + u_i SS \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (S u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_S \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + SS \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + SS \quad (4)$$

در این معادلات ρ چگالی سیال، C_S سرعت صوت در آب، u_j سرعت در جهت x_j ، Ω_{ij} تانسور کوریولیس، p فشار سیال، g_i بردار گرانشی، ν_T ویسکوزیته گردابی آشفته، δ_{ij} دلتای کرونکر است. k انرژی جنبشی آشفته، S و T شوری و دما، D_S و D_T ضرایب پراکندگی و t نشان‌دهنده زمان است. SS نیز نشان‌گر منبع حرارت و یا شوری می‌باشد و بنابراین از معادله‌ای به معادله دیگر متفاوت است.

۴. داده‌های ورودی

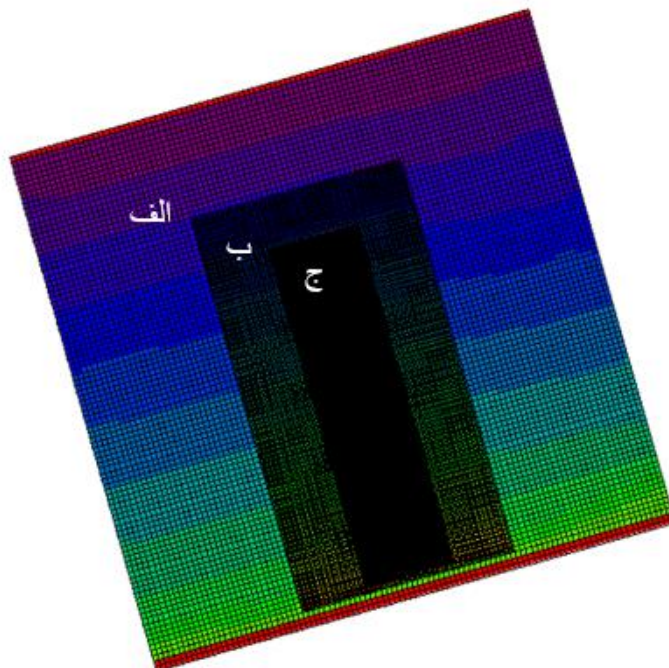
در این پژوهش بر اساس طرح‌های اولیه، منطقه ساحلی

پساب نیست. شبیه‌سازی الگوی انتشار جریان پساب شور با توجه به اختلاف چگالی آن با محیط و همچنین مقیاس آن، در مقایسه با شبیه‌سازی جریان دریایی ناشی از باد و یا انتقال امواج در ناحیه ساحلی، حساسیت‌های متفاوتی دارد. در این صورت حتی اگر بتوان نشان داد که یک مدل می‌تواند الگوی جریان ساحلی را خوب شبیه‌سازی کند به معنی عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی صحیح انتشار پساب نیست. از طرفی با توجه به در نظر گرفتن جریان حداقلی و عدم حضور امواج در مدل حاضر، تلاش برای شبیه‌سازی و صحت‌سنجی این پدیده‌ها کمکی به نتیجه اصلی نخواهد کرد. با این وجود تلاش شده است در برپایی و تنظیم پارامترهای لازم در مدل محلی، از تجارب موجود در زمینه مدل‌های دریایی کارشده در محدوده خزر استفاده شود.

۵. شبکه محاسباتی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های برپایی مدل بخش تولید شبکه محاسباتی است که البته شامل اطلاعات هیدروگرافی نیز می‌باشد. امروزه کاربران معمولاً از مدل‌های با شبکه بدون

ساختار برای شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی استفاده می‌کنند. کاربرانی که از نرم‌افزار مایک استفاده می‌کنند نیز عمدتاً از ابزار محاسباتی با شبکه بدون ساختار بهره می‌برند؛ اما مشکل اصلی مدل سه‌بعدی با شبکه بدون ساختار فرض هیدرواستاتیک بودن فشار و در نتیجه عدم توانایی مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های قائم ناشی از اختلاف چگالی است. به همین خاطر در این پژوهش از نسخه شبکه با ساختار سه‌بعدی مجموعه مایک استفاده شده است. شبکه محاسباتی، برای حفظ دقت و البته حفظ توان محاسباتی، با الگوی شبکه‌های تودرتو (Nested Grid) که از قابلیت‌های خاص مدل سه‌بعدی MIKE3-HD است، تهیه شده است. این شبکه در محدوده تخلیه‌کننده تفکیک بالاتر و در محدوده‌های دورتر دارای تفکیک مکانی کمتری است. در شکل (۱) محدوده‌های در نظر گرفته شده برای شبکه‌های تودرتو نمایش داده شده است. در شبکه‌های تودرتو اندازه سلول‌های محاسباتی در محدوده بزرگ (الف)، ۹۰ متر، در محدوده میانی (ب)، ۳۰ متر و در محدوده داخلی (ج)، ۱۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شبکه محاسباتی تودرتو با ابعاد (الف) ۸۹۱۰۰×۸۸۲۰ متر، (ب) ۳۶۰۰×۶۷۵۰ متر و (ج) ۱۵۳۰×۵۸۵۰ متر و زاویه ۱۶- درجه انحراف نسبت به محور شمال.

عمقی تخلیه، از نتایج مدل سه‌بعدی با فرض کامل هیدرودینامیکی (در مقابل فرض هیدرو استاتیکی)، استفاده شده است. در همین راستا سناریوهای مختلفی مطرح شده است که در هر کدام از آن‌ها از تخلیه کننده دو گانه به صورت مایل و بافاصله محدود استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد سیستم آب شیرین کن RO صرفاً شوری آب را افزایش می‌دهد و در مقایسه با پساب آب شیرین کن حرارتی، پلوم ناشی از پساب RO بیشتر متمایل به حرکت به سمت بستر و انتشار در کف است. لذا در خروجی‌های استخراج شده عمدتاً بر چگونگی انتشار پساب در نزدیک بستر تمرکز شده است. در شکل (۲) شرایط عمومی تخلیه پساب این دو سیستم به صورت مفهومی مقایسه شده است.

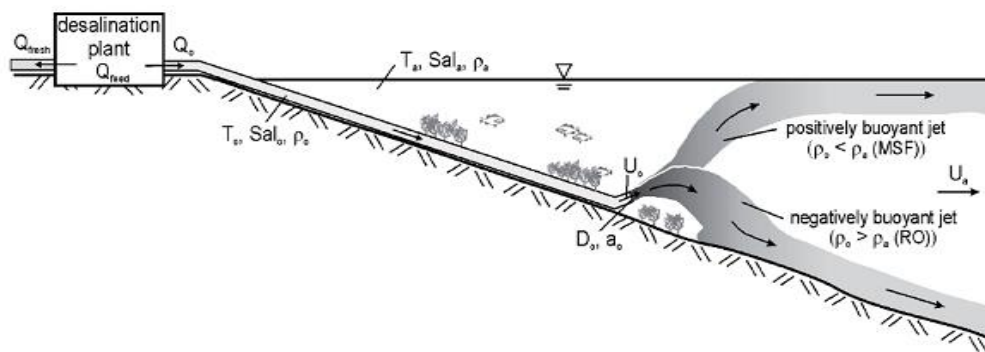
منطقه مورد مطالعه در محدوده ساحلی و عمق‌های کم قرار گرفته است؛ بنابراین چینه‌بندی معنی‌داری در محیط پذیرنده وجود ندارد. در عین حال مدل به علت اینکه می‌تواند اثر تغییرات چگالی را نیز مدل‌سازی کند در صورت وجود چینه‌بندی این شرایط را نیز اعمال خواهد کرد.

شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن ورودی‌های معرفی شده به صورت پیوسته اجرا شده است تا اینکه نتایج به حالت پایدار و تعادلی بین شرایط محیطی و تخلیه پساب نزدیک شود. نهایتاً این شرایط تعادلی به‌عنوان خروجی مدل در سناریوهای مختلف تحلیل و مقایسه شده است. در ادامه نتایج سناریوهای اجرا شده توسط مدل سه‌بعدی و شرایط مربوط به هر یک ارائه شده است.

بخش‌های دیگر مرتبط با برپایی مدل در ادامه با توجه به سایر اطلاعات ورودی از جمله شرایط مرزی، با ایجاد جریان حداقلی در مرز غربی، ایجاد شرایط مرزی تراز معلوم در سمت شرق و مرز بدون جریان در سمت دریا و خشکی و همچنین فعال‌سازی مدل آشفتگی و زبری بستر به مدل اعمال شد. بدین ترتیب مدل آماده اجرای سناریوهای مختلف شد. لازم به توضیح است در مورد صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی این نوع پدیده، با توجه به عدم وجود چنین سازه‌ای عملاً مقایسه شرایط مدل با شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست؛ اما این نکته نیز قابل توجه است که در مورد دریای خزر با توجه به عدم وجود جریان‌های قطعی مثل جزرومد جریان حداقلی به‌عنوان بدترین شرایط محیطی در نظر گرفته شده است. در مورد سایر پارامترهای مؤثر مثل زبری و یا مدل‌های آشفتگی سعی شده است از تجارب کارهای منطقه‌ای مشابه استفاده شود.

۶. شبیه‌سازی عددی و نتایج

بر اساس مشخصات ذکر شده مدل سه‌بعدی منطقه توسعه یافته و سناریوهای مختلف در آن اجرا شده است. برای بررسی الگوی جریان، عدد رینولدز ($Re = VD/v$) جریان پساب برای تمام سناریوها محاسبه شده است. مقادیر به‌دست آمده این کمیت در تمام سناریوها نشان‌دهنده تلاطمی بودن جریان خروجی است. جهت بررسی امکان‌پذیری تأمین ضوابط محیط زیستی در مورد میزان مجاز انتشار پساب در دریا به لحاظ موقعیت



شکل ۲. مقایسه انتشار پساب دو سیستم گرمایی و غیرگرمایی.

۱-۶. سناریوی‌های اول تا چهارم

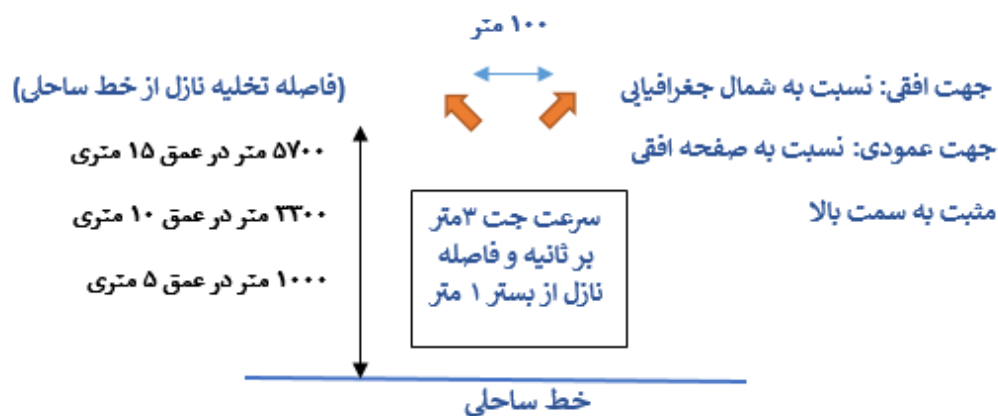
در این سناریو دو تخلیه کننده مایل خلاف جهت هم که نسبت به محور قائم زاویه ۶۰ درجه دارند در نظر گرفته شده‌اند. فاصله این تخلیه کننده‌ها ۱۰۰ متر است و این دو تخلیه کننده با زاویه ۴۵ درجه افقی نسبت به محور عمود بر ساحل و با سرعت ۳ متر بر ثانیه جت می‌شوند که با اعمال زاویه ۱۶- شبکه تودرتو، جت‌ها در مدل نسبت به شمال جغرافیایی زوایای ۶۱- و ۲۹ درجه پیدا می‌کنند. دبی جریان پساب ۶ مترمکعب بر ثانیه با غلظت ۲۵ psu است. شکل (۳) پلان شماتیک موقعیت تخلیه کننده‌ها را نشان می‌دهد. این مدل به مدت یک روز (۲۴ ساعت) شبیه‌سازی تخلیه مداوم پساب را در عمق‌های مختلف در شرایط دریایی و محیطی که قبلاً ذکر شد انجام داده است. پس از گذشت ۲۲ ساعت، شرایط پایدار در نتایج آن مشاهده شده است.

در شکل (۴) شرایط متعادل شده توزیع شوری در صفحه افقی نزدیک بستر را نشان می‌دهد. سه سناریوی مستقل برای مقایسه بهتر در یک شکل ترکیب و نمایش داده است. با توجه به شرایط حاکم مساحت ناحیه آلوده مربوط به محدوده‌ای که غلظت بیش از ۱۰٪ غلظت محیط پذیرنده دارد در نزدیک بستر با شمارش تعداد سلول‌های درگیر و با توجه به مساحت این سلول‌ها، برآورد شده

است. در جدول (۱) برای سه سناریو تخلیه در عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ متر، نتایج تحلیل و با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت شعاع محدوده بحرانی به لحاظ غلظت شوری در اعماق بالا بیشتر از عمق‌های نزدیک به ساحل است و البته در سناریوهای دورتر از ساحل مقداری تجاوز از محدوده مجاز ۲۰۰ متر نیز مشاهده می‌شود. از این جهت در سناریوهای بعدی که در ادامه ارائه شده است زوایای قائم جت‌های تخلیه و همچنین سرعت تخلیه جت تغییر یافت و مجدداً مسئله بررسی شد.

شکل (۴) نیز ابعاد محدوده شوری بحرانی (محدوده با غلظت شوری بیش از ۱/۱ برابر محیط بارنگ قرمز نمایش داده شده است) را در سه سناریو تخلیه در عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری را در صفحه افقی نشان می‌دهد.

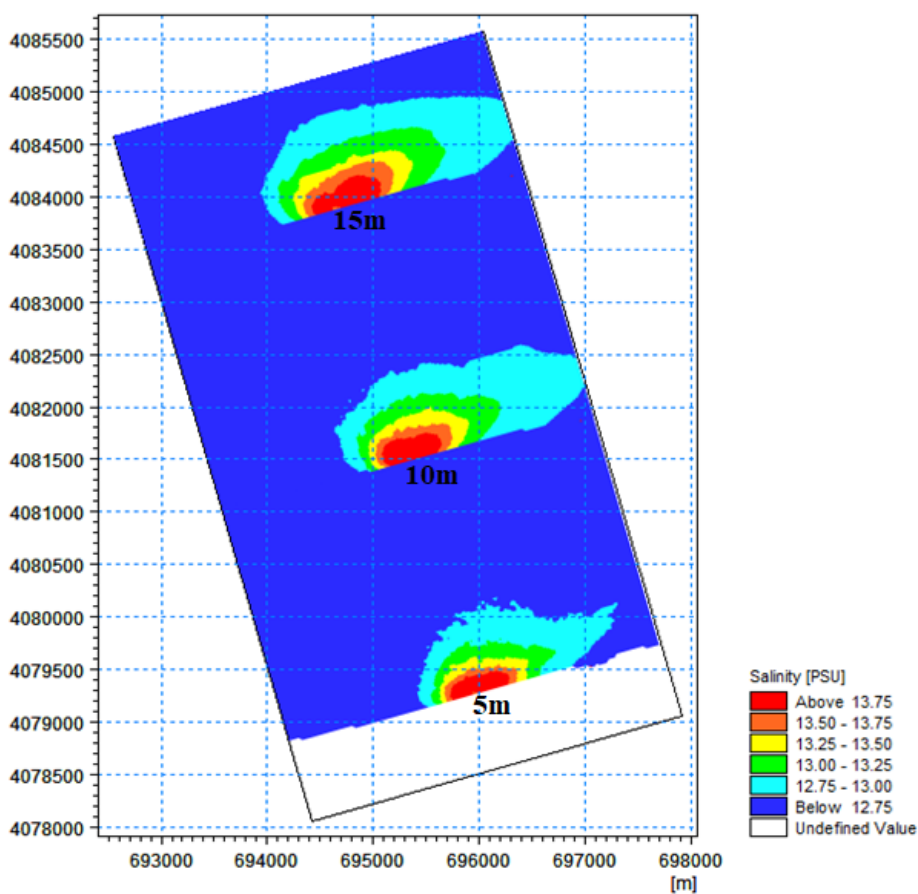
همان‌طور که مشاهده می‌کنید غلظت‌ها در عمق‌های ۵ و ۱۰ متری دقیقاً در محدوده مجاز قرار گرفته و در عمق ۱۵ متری حدود ۱۰ متر از محدوده مجاز تجاوز داشته است که البته تجاوز معنی‌داری نیست و با تمهیداتی قابل اصلاح است. با این وجود با توجه به اینکه نواحی کم عمق نواحی غنی تری به لحاظ محیط زیستی مخصوصاً در نزدیکی بستر هستند تمایل نهادهای تصمیم‌گیر کماکان تخلیه پساب در نواحی عمیق‌تر است.



شکل ۳. پلان شماتیک موقعیت تخلیه کننده‌ها در سناریوی‌های اول تا چهارم.

جدول ۱. ابعاد ناحیه آلوده با غلظت شوری بحرانی در سناریوی‌های اول تا چهارم با اعماق مختلف.

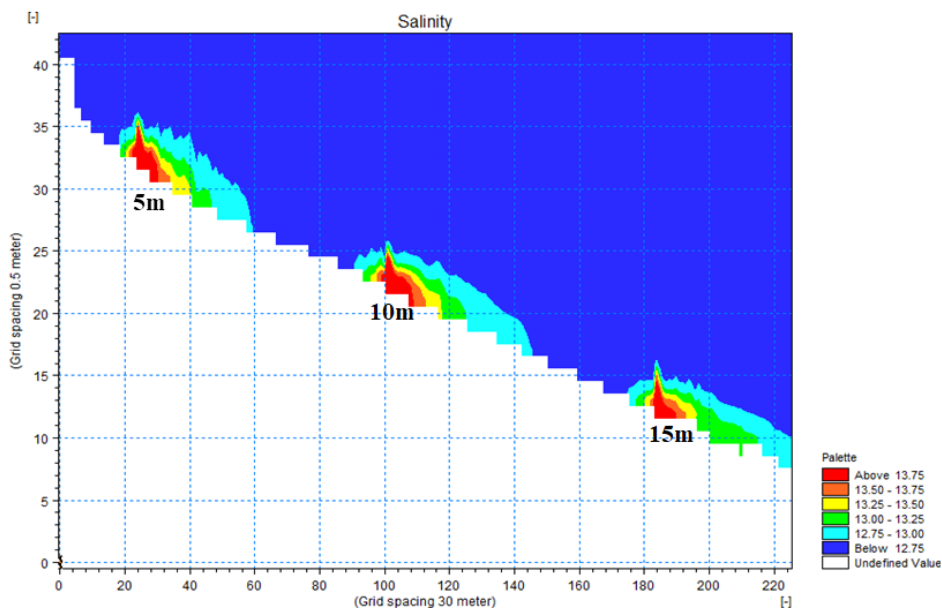
| عمق | ۵ متر | ۱۰ متر | ۱۵ متر |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| زبری بستر | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| ضریب اسماگورنسکی افقی | ۰/۰۸۸ | ۰/۰۸۸ | ۰/۰۸۸ |
| ضریب اسماگورنسکی قائم | ۰/۱۷۶ | ۰/۱۷۶ | ۰/۱۷۶ |
| تعداد سلول‌های شوری بالای ده درصد | ۹۶ | ۱۲۸ | ۱۵۵ |
| مساحت | ۸۶۴۰۰ | ۱۱۵۲۰۰ | ۱۳۹۵۰۰ |
| مجذور شعاع | ۲۷۵۱۵ | ۳۶۶۸۷ | ۴۴۴۲۶ |
| شعاع | ۱۶۵ | ۱۹۱ | ۲۱۰ |
| عدد رینولدز | ۳۳۹۰۰۰۰ | ۳۳۹۰۰۰۰ | ۳۳۹۰۰۰۰ |



شکل ۴. توزیع شوری در صفحه افقی نزدیک بستر در سه عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری در سناریوی‌های اول تا چهارم.

است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود اختلاف معنی‌داری بین نتایج در عمق‌های مختلف نیست فقط در عمق‌های بالاتر، به صورت جزئی محدوده بحرانی نسبت به نواحی کم عمق توسعه پیدا کرده است.

شکل (۵) توزیع شوری در پروفیل عمقی عمود بر ساحل را نشان می‌دهد، همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود محدوده غلظت‌های بیش از ده درصد افزایش، در تمام عمق‌ها کوچک‌تر از محدوده مجاز تعیین شده در ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست



شکل ۵. توزیع شوری در مقطع عمود بر ساحل در اعماق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری در سناریوی‌های اول تا چهارم.

جدول ۲. عرض نواحی بحرانی در پروفیل عمقی عمود بر ساحل در سناریوی‌های اول تا چهارم.

| عمق | ۵ متر | ۱۰ متر | ۱۵ متر |
|-----------------------------|-------|--------|--------|
| تعداد سلول‌ها در امتداد شیب | ۸ | ۱۰ | ۶ |
| عرض | ۲۴۰ | ۳۰۰ | ۱۸۰ |

سناریوی پنجم شرایط مناسب تری را به لحاظ رعایت ضوابط تخلیه پساب ایجاد می‌نماید که در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

در تمام سناریوهای بررسی شده جت‌ها دوگانه بوده و فاصله آن‌ها از بستر یک متر و مجموع دبی جت‌های تخلیه ۶ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین عدد فرود برای تمام سناریوها محاسبه شده است.

جدول (۳) مشخصات جت تخلیه کننده و همچنین شعاع بحرانی در اعماق مختلف و در تمام سناریوها را نشان می‌دهد. تمام شرایط سناریوی اول در سناریوی دوم حاکم است با این تفاوت که سرعت تخلیه جت ۵ متربرثانیه در نظر گرفته شده است. در سناریوی سوم و چهارم اثر زاویه جت بررسی شده است همچنین برخلاف دو سناریوی قبل امتداد جت‌ها نسبت به هم همگرا است و در نهایت

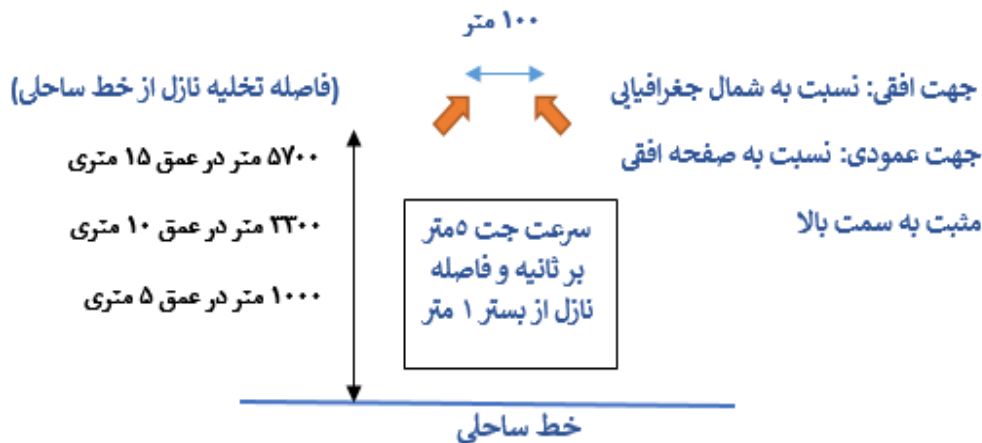
جدول ۳. مشخصات و شرایط سناریوها.

| شماره سناریو | سرعت (m/s) | زاویه تا محور قائم (درجه) | زاویه تا محور افقی (درجه) | امتداد جت‌ها نسبت به هم | عدد فرود | شعاع بحرانی در عمق ۵ متری | شعاع بحرانی در عمق ۱۰ متری | شعاع بحرانی در عمق ۱۵ متری | درصد تغییر به ازای هر ۵ متر افزایش عمق |
|--------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| ۱ | ۳ | ۶۰ | ۴۵ | واگرا | ۰/۳۲ | ۱۶۵ | ۱۹۱ | ۲۱۰ | ۱۳٪ |
| ۲ | ۵ | ۶۰ | ۴۵ | واگرا | ۰/۷۲ | ۱۰۷ | ۱۰۹ | ۱۲۳ | ۷٪ |
| ۳ | ۵ | ۶۰ | ۳۰ | همگرا | ۱/۱۶ | ۱۵۴ | ۱۶۳ | ۱۸۷ | ۱۰٪ |
| ۴ | ۵ | ۳۰ | ۴۵ | همگرا | ۱/۶۲ | ۹۴ | ۸۱ | ۷۹ | -۸٪ |
| ۵ | ۵ | ۳۰ | ۶۰ | همگرا | ۱/۹۷ | ۵۰ | ۶۱ | ۴۴ | -۳٪ |

۲-۶. سناریوی پنجم

در این سناریو دو تخلیه کننده مایل در جهت هم که نسبت به محور قائم زاویه ۳۰ درجه دارند در نظر گرفته شده‌اند. فاصله این تخلیه کننده‌ها ۱۰۰ متر است و این دو تخلیه کننده با زاویه ۶۰ درجه افقی و با سرعت ۵ متر بر ثانیه جت می‌شوند که با اعمال زاویه ۱۶- درجه شبکه تودرتو، جت‌ها در مدل نسبت به شمال جغرافیایی زوایای ۷۶- و ۴۴ درجه پیدا می‌کنند. شکل (۶) موقعیت تخلیه کننده‌ها را نشان می‌دهد. این مدل به مدت یک روز (۲۴ ساعت) شبیه‌سازی تخلیه مداوم پساب را در عمق‌های

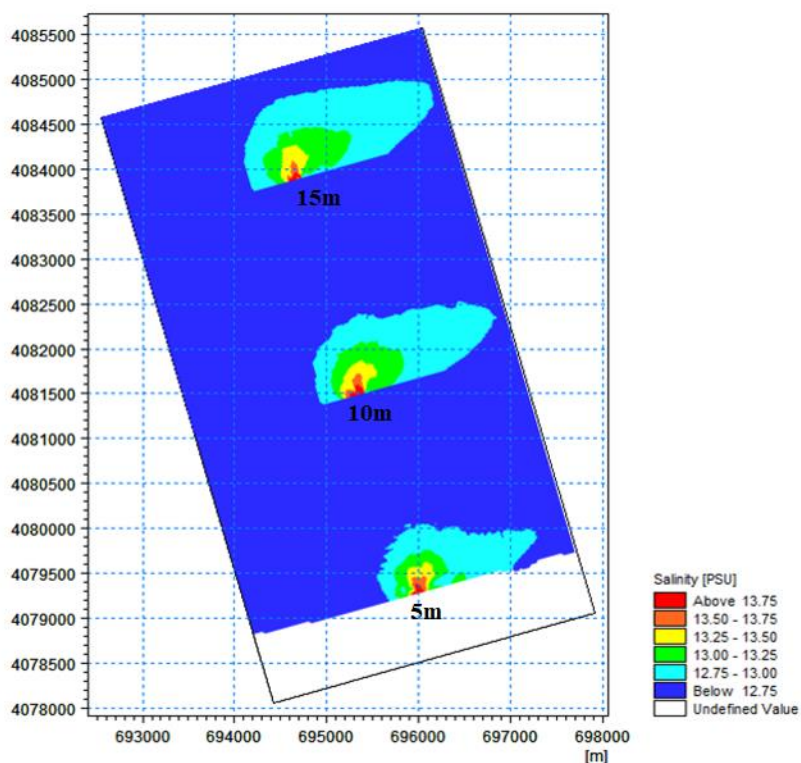
مختلف انجام داده است که پس از گذشت ۲۲ ساعت، شرایط پایدار در آن مشاهده شده است. جدول (۴) مقادیر اعمال شده بر مدل و مساحت و شعاع محدوده شوری بحرانی را نشان می‌دهد. شکل (۷) ابعاد شوری بحرانی در سه سناریو تخلیه در عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در نواحی عمیق انتشار پساب نسبت به نواحی کم عمق کمتر توسعه پیدا کرده است و لازمه این امر استفاده از تخلیه کننده دو گانه با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور قائم است.



شکل ۶. پلان شماتیک موقعیت تخلیه کننده‌ها در سناریوی پنجم.

جدول ۴. ابعاد ناحیه آلوده با غلظت شوری بحرانی در سناریوی سوم با اعماق مختلف.

| عمق | ۵متر | ۱۰متر | ۱۵متر |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| زبری بستر | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| ضریب اسماگورنسکی افقی | ۰/۰۸۸ | ۰/۰۸۸ | ۰/۰۸۸ |
| ضریب اسماگورنسکی قائم | ۰/۱۷۶ | ۰/۱۷۶ | ۰/۱۷۶ |
| تعداد سلول‌های شوری بالای ده درصد | ۹ | ۱۳ | ۷ |
| مساحت | ۸۱۰۰ | ۱۱۷۰۰ | ۶۳۰۰ |
| مجدور شعاع | ۲۵۷۹ | ۳۷۲۶ | ۲۰۰۶ |
| شعاع | ۵۰ | ۶۱ | ۴۴ |
| عدد رینولدز | ۴۳۷۰۰۰۰ | ۴۳۷۰۰۰۰ | ۴۳۷۰۰۰۰ |



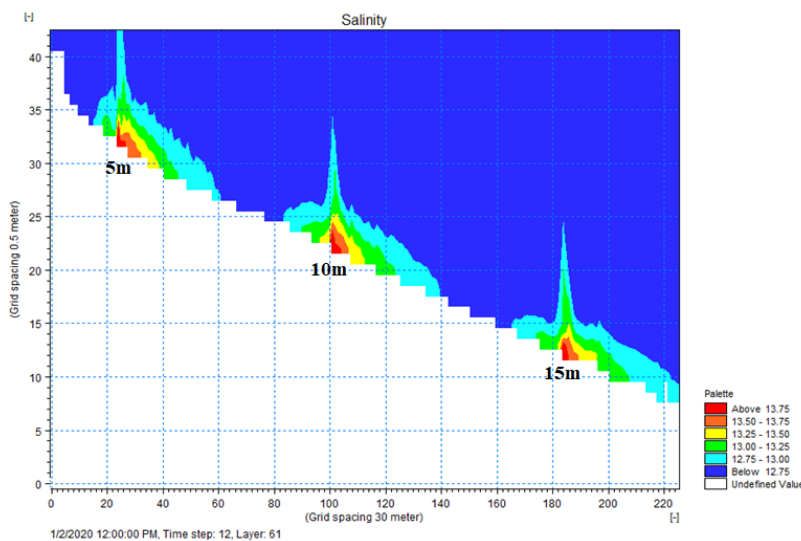
شکل ۷. توزیع شوری در صفحه افقی نزدیک بستر در سه عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری در سناریوی پنجم.

جدول ۵. عرض نواحی بحرانی در پروفیل عمقی عمود بر ساحل در سناریوی پنجم.

| عمق | ۵ متر | ۱۰ متر | ۱۵ متر |
|-----------------------------|-------|--------|--------|
| تعداد سلول‌ها در امتداد شیب | ۳ | ۴ | ۲ |
| عرض | ۹۰ | ۱۲۰ | ۶۰ |

نواحی کم عمق نسبت به عمق‌های بالاتر بیشتر توسعه یافته است.

همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌کنید در پروفیل عمقی عمود بر ساحل نیز محدوده بحرانی در



شکل ۸. توزیع شوری در مقطع عمود بر ساحل در اعماق ۵، ۱۰ و ۱۵ متری در سناریوی پنجم.

موردنظر سازمان حفاظت محیط‌زیست برای تخلیه پساب سامانه نمک‌زدایی امکان‌پذیر است ضمن اینکه انتشار پساب در عمق‌های بررسی شده می‌تواند با تمهیداتی شرایط موردنظر استانداردهای موجود را تأمین نماید. در دو سناریوی انتهایی که زاویه جت تخلیه پساب نسبت به محور قائم ۳۰ درجه است مشاهده شد که تغییر عمق تأثیر محسوس تری بر نتایج دارد به نحوی که در عمق ۱۵ متری به نسبت دو عمق قبل دامنه محدوده غیرمجاز کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. بعلاوه با توجه به اهمیت حیات موجودات زنده دریایی، تخلیه پساب در نواحی کم عمق خطرات بسیاری را به همراه دارد. قابل ذکر است که در نواحی کم عمق به دلیل وجود نور کافی و اکسیژن موردنیاز تراکم حیات موجودات دریایی بیشتر از نواحی عمیق است؛ بنابراین انتشار پساب در اعماق بالاتر باعث کاهش تأثیرپذیری موجودات دریایی نسبت به نواحی کم عمق می‌شود. لازم به توضیح است تأثیر سایر عوامل تأثیرگذار بر محیط مثل مواد افزودنی که در مراحل تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز لازم است در محدوده تخلیه کننده پساب در نظر گرفته شود اما در این مطالعه صرفاً اثر شوری که مهم ترین شاخص در پساب می‌باشد در نظر گرفته شده است.

منابع

- Baluchi, S., Mohammad Mehdizadeh, M., & Pakhereh Zan, M. (2014). Modeling the effect of desalination on marine pollution (Case study of desalination in Bandar Abbas). The 7th National Conference and Specialized Environmental Exhibition.
- Berkün, M. (2016). Coastal environmental impact overview of desalination plants.
- Bohluly, A., Esfahani, F. S., Namin, M. M., & Chegini, F. (2018). Evaluation of wind induced currents modeling along the Southern Caspian Sea. *Continental Shelf Research*, 153, 50-63.
- Danish, D.R., Mudgal, B.V., Dhinesh, G., Ramanamurthy, M.V. (2015). Mathematical Model Study of the Effluent Disposal from a Desalination Plant in the Marine Environment at Tuticorin, India. *InRecent Progress in*

در شکل (۸) برای سناریوی شماره ۵ توزیع شوری در پروفیل عمقی عمود بر ساحل برای شرایط مختلف تخلیه نمایش داده شده است، با توجه به شکل محدوده غلظت‌های بالای ده درصد افزایش، در محدوده مجاز مورد تأیید استاندارد تخلیه پساب قرار می‌گیرد.

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

در مطالعه انجام شده، سناریوهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است تا اولاً تأثیر عمق ناحیه تخلیه پساب مورد بررسی قرار گیرد و بعلاوه تعیین شود چه سناریوهایی و با چه شرایطی ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست را تأمین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که اولاً با توجه به شرایط دریایی منطقه هر نوع تخلیه‌ای الزاماً شرایط موردنظر ضوابط سازمان حفاظت محیط‌زیست را تأمین نمی‌کند؛ اما در برخی از سناریوهایی که دارای جت‌های با سرعت بالای سه متر بر ثانیه و نزدیک به محور قائم (زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور قائم) دارند شرایط را بهتر تأمین می‌کنند. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از تخلیه کننده دو گانه به صورت مایل و بافاصله محدود و سرعت جت بالاتر، شرایط مناسب تری را به لحاظ رعایت ضوابط تخلیه پساب ایجاد می‌نماید. بررسی نتایج شبیه سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد تأمین ضوابط اولیه

Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems 2015, Springer, Cham. 333-347.

Korotenko, K. A., Mamedov, R. M., & Mooers, C. N. K. (2001). Prediction of the transport and dispersal of oil in the south Caspian Sea resulting from Blowouts. *Environmental Fluid Mechanics*, 1, 383-414.

Latteman, S. (2010). Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants. CRC press.

Le, N. L., & Nunes, S. P. (2016). Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 7, 1-28.

Mohamed, K. A. (2009). Environmental impact of desalination plants on the environment. In

- Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC, 13(2009), 951-964.
- Monfared, A., & Hamzeei, P. (2016). Simulation of the best point of the sea for dewatering and disposal of desalination effluent in Bushehr (Iran) using Mike software. The first conference on marine regions, development and water resources of the coastal areas of the Persian Gulf
- Malcangio, D., and Petrillo, A. F. (2010). Modeling of brine outfall at the planning stage of desalination plants. *Desalination*, 254(1-3), 114-125.
- Patel, Y. B., Nimbalkar, P. T., Nagendra, T., & Shukla, V. K. (2016). Numerical Modelling of Brine Dispersion In Shallow Coastal Waters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(3).
- Rucevska, I., & Simonett, O. (2011). Vital Caspian Graphics 2. *Opportunities, Aspirations and Challenges. Arendal*.
- Zaker, N. H., Ghaffari, P., Jamshidi, S., & Nouranian, M. (2011). Currents on the southern continental shelf of the Caspian Sea off Babolsar, Mazandaran, Iran. *Journal of Coastal Research*, 1989-1997.