

بررسی انتشار آلودگی پساب آب‌شیرین‌کن ایمواسکو به دریای عمان با استفاده از مدل CORMIX

فاطمه رجائی*

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸)

چکیده

یکی از مسائل محیط‌زیستی مربوط به آب‌شیرین‌کن‌ها و به‌ویژه آب‌شیرین‌کن‌های اسمز معکوس در مناطق ساحلی، تخلیه پساب فوق شور به محیط دریا است. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی پخش شوری پساب آب‌شیرین‌کن ایمواسکو با استفاده از مدل عددی CORMIX است تا بتوان طرحی بهینه برای ترقیق تخلیه پساب و نیز مکان‌های آب‌گیری و تخلیه پساب ارائه نمود. در این راستا، سناریوهای متنوعی بر اساس تخلیه پساب به صورت تک دریچه‌ای و چند دریچه‌ای، جهت و زاویه دریچه‌ها، تأثیر سرعت‌های مختلف جریان، بررسی اثر عمق بر رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت بررسی گردید. بر اساس نتایج مدل‌سازی، تخلیه پساب در عمق ۵ متری و نیز به صورت تک دریچه‌ای پیشنهاد نمی‌شود. هم‌چنین، نتایج نشان داد استفاده از دریچه‌های تناوبی باعث افزایش انتشار هاله آلودگی و برگشت پساب شور به سمت ساحل خواهد شد و دریچه‌های هم‌جهت نتایج بهتری ارائه می‌دهند. نتایج مدل‌سازی با سرعت‌های مختلف جریان محیط اختلاف زیادی در انتشار هاله آلودگی شوری پساب نشان نداد. با توجه به میزان رقیق‌شدگی، ضخامت عمودی هاله آلودگی و میزان افزایش شوری محیط در شعاع‌های مختلف، بهترین سناریو فاصله آب‌گیری در ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متر) و فاصله تخلیه پساب از خط ساحلی ۳۲۵ متر (عمق ۸ متر) است.

واژه‌های کلیدی: ایمواسکو، آب‌شیرین‌کن، پساب شور، مدل CORMIX

مقدمه

نیاز روزافزون به آب آشامیدنی و تغییرات اقلیمی پیش رو موجب شده است که برنامه‌ریزی برای دستیابی به منابع آبی در اولویت کشورها قرار گیرد. امروزه ۶۰ درصد از جمعیت جهان، که بیشتر آنها در کشورهای خشک زندگی می‌کنند، از کمبود آب رنج می‌برند (۱). در نتیجه، منابع آب نامتعارف مانند صنعت آب‌شیرین‌کن به‌طور فزاینده‌ای به منابع اجتناب‌ناپذیری برای کاهش کمبود آب تبدیل شده است (۳۳). در سال‌های اخیر توجه به این صنعت به خصوص در میان کشورهای خاورمیانه بیشتر شده است. به لحاظ شرایط اقلیمی خاورمیانه، بیش از ۶۰ درصد از آب‌شیرین‌کن‌های دنیا در خلیج‌فارس و دریای عمان واقع شده‌اند که بخش اعظم آن متعلق به سه کشور عربستان، امارات و قطر است. ایران نیز در کمربند خشک کره زمین قرار دارد و شدت تأثیرات تغییرات اقلیمی آن هر روز مشهودتر می‌شود، به‌طوری‌که در دهه‌های اخیر ایران با فشار به منابع آب داخلی و سفره‌های آب زیرزمینی تمام این منابع را در معرض نابودی قرار داده است و بخش عظیمی از دشت ایران با بحران بیلان منفی تراز آب روبرو است.

با این‌حال، این صنعت با چندین اثر محیط‌زیستی بالقوه همراه است که شاید مهم‌ترین آن‌ها تخلیه آب شور تغلیظ شده به محیط دریایی باشد. افزایش شوری به‌تنهایی باعث افزایش چگالی آب می‌شود و در حالت ایستا این افزایش چگالی باعث پایین رفتن پساب و تغلیظ آن در نزدیکی بستر دریا می‌شود که می‌تواند سبب تخریب اکوسیستم آن منطقه شود (۲). تخلیه مداوم پساب‌های شور از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن می‌تواند برای حیات دریایی از جمله جوامع کف‌زی، زیستگاه‌های علف دریایی، سایر گونه‌های دریایی مانند مایسیدها و توتیای دریایی کشنده باشد (۲۲، ۲۳ و ۲۸). برای کمینه کردن اثرات ناشی از آلودگی پساب و نیز بازدهی بهتر آب‌شیرین‌کن‌ها لازم است نحوه پخش پساب شور و نیز محل تخلیه پساب، محل آبگیری و پیکربندی سیستم خروجی آن به‌طور مناسبی تحت شرایط حاکم موجود محیطی ارزیابی شوند. در حالت کلی عواملی

مانند میزان حجم پساب خروجی، محل تخلیه، چگالی و غلظت پساب خروجی و شرایط محیطی دریا (شدت جریان‌های منطقه، میزان آمیختگی پساب با آب دریا، سرعت باد و ...) در مقدار و نحوه پخش پساب اثرگذار است (۱۸، ۳۰ و ۳۱).

در مطالعه‌های آزمایشگاهی و میدانی به بررسی اثرگذاری‌های فراسنجه‌های پساب خروجی شامل سرعت تخلیه، زاویه تخلیه، قطر نازل، چگالی جت، نرخ رقیق‌سازی و شناسایی رفتار جت حاصل از تخلیه پساب پرداخته شده که منجر به ارائه رابطه‌ها و محدودیت‌هایی در مبحث تخلیه پساب شور شده است. اما به دلیل هزینه‌های زیاد، وقت‌گیر بودن، دشواری اندازه‌گیری و نبود امکان اصلاح ساختار نازل‌ها پس از ساخت و خطای اندازه‌گیری در این روش‌ها، مدل‌های عددی و رایانه‌ای رواج یافتند. این مدل‌ها بسیار مقرون‌به‌صرفه بوده و این قابلیت را به طراحان داده که پیش از ساخت خروجی‌های دریایی، از طریق شبیه‌سازی محیط تخلیه و مدل‌سازی خروجی‌ها، رفتار و مسیر جت را برآورد کرده و مناسب‌ترین مکان و فراسنجه‌های هندسی را برای طراحی نازل‌ها انتخاب کنند تا اثرات محیط‌زیستی وارد بر اکوسیستم منطقه تخلیه تا حد ممکن کاهش یابد. در این میان مدل CORMIX به سبب کاربری آسان و سریع بسیار توسط محققان مختلفی برای بررسی تأثیر فراسنجه‌های هندسی جت بر میزان رقیق‌سازی پساب شور، در طراحی خروجی‌ها و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و ارائه دستور کارهای طراحی بهینه استفاده شده است (۲۵، ۳۰ و ۳۲).

پورناما و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از یک معادله دوبعدی انتشار، نتیجه گرفتند که تخلیه آب نمک از طریق یک خروجی سطحی، بر آب‌های ساحلی تأثیر منفی می‌گذارد و نفوذ آب شور را افزایش می‌دهد (۳۱). از سوی دیگر، بررسی خروجی کارخانه آب‌شیرین‌کن الجریا در عربستان سعودی بر جامعه پلانکتون در خلیج‌فارس، تغییر قابل‌توجهی در توزیع فیتو و زئوپلانکتون نشان نداد، که به نرخ زیاد رقیق‌سازی با استفاده از یک خروجی آبشاری به طول ۱/۸ کیلومتر نسبت داده شد (۴)،

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی طرح احداث سازه آبگیر و تأسیسات شیرین سازی ایمواسکو در نوار ساحلی و جاده مرزی چابهار به گوآتر و در کیلومتر ۱۰ روستای رمین از توابع شهرستان چابهار و در مختصات جغرافیایی $25^{\circ} 15' 1.58'' N$ و $50' 38'' E$ و 60° واقع گردیده است (شکل ۱). مکان کارخانه آب شیرین کن ایمواسکو در حوضه آبخیز دشت لیپار، زیر حوزه منطقه نگور و دشت لیپار قرار دارد. رودخانه‌ای در محدوده مطالعاتی و نزدیکی سایت وجود ندارد و تعدادی مسیل و آبریز مشهود است که به طور معمول در اواخر پاییز و اواسط زمستان به وجود می‌آیند. دما و آب دریا در محدوده آب شیرین کن ۲۹ درجه سانتی‌گراد است (۷). متوسط بارندگی در منطقه به ۱۲۰ میلی‌متر می‌رسد و در خشک‌سالی این میزان بارندگی می‌تواند به رقم نازل ۲۰ میلی‌متر نیز برسد. اقلیم منطقه به روش اقلیم نمای آمبرژه بیابانی گرم شدید دانست (۱۴).

معرفی مدل

مدل نیمه تجربی CORMIX-v11، معروف‌ترین مدل بر اساس تحلیل ابعادی و استدلال‌های شاخص طولی می‌باشد که جریانات پساب را مدل‌سازی می‌نماید (۳۱). کورمیکس مدل تجاری است که در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه کورنل آمریکا به عنوان یک پروژه توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا کمک‌هزینه شد. CORMIX یک مدل منطقه اختلاط هیدرودینامیکی می‌باشد که برای پیش‌بینی رفتار تخلیه آلاینده‌ها در محیط‌های آبی مختلف به کار می‌رود. این سیستم به طور عمده هندسه و مشخصات ترقیق را در منطقه اختلاط اولیه با توجه به محدودیت‌های قانونی کیفیت آب پیش‌بینی می‌نماید. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از نتایج آزمایشگاهی و میدانی، یک پایگاه داده تخصصی دقیق و قوی فراهم نموده است که بین هر

هم‌چنین داده‌های پایش تنوع زیستی در فاصله ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری خروجی کارخانه آب شیرین کن داکلیا در قبرس نشان داد که جانوران و گیاهان ساحلی تحت تأثیر تخلیه آب شور قرار گرفته‌اند. مطالعات مختلف دیگری در زمینه شبیه‌سازی انتشار پساب آب شیرین کن‌ها در نقاط مختلف جهان از جمله در سواحل عمان، آب شیرین کن کنارک (۲۹)، سواحل فورت‌الزا برزیل (۳۰) و خلیج فارس (۱۷)، شمال غرب آفریقا (۲)، ساحل جنوب شرقی دریای سرخ، عربستان (۴) و ترکیه (۸) صورت گرفته است. مطالعات مذکور نشان دادند که با طراحی بهینه تخلیه پساب می‌توان اثرات محیط‌زیستی پساب شور را به حداقل برساند. در مطالعات مذکور بیشتر به ارزیابی اثرات محیط‌زیستی بر حیات دریایی و یا شبیه‌سازی وضعیت موجود پرداخته شده است و کمتر به ارزیابی سناریوهای مدیریتی کاهش اثرات پساب شور پرداخته شده است.

بنابراین هدف اصلی مطالعه حاضر مقایسه و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تخلیه پساب شور بر رفتار و درک نحوه پخش هاله آلودگی آلاینده، آگاهی از غلظت و ترقیق آلاینده در فواصل مختلف از منبع تخلیه و برهم‌کنش آن با محیط در مطالعه موردی پساب کارخانه آب شیرین کن ایمواسکو با استفاده از مدل عددی CORMIX است تا بتوان طرحی بهینه تخلیه پساب این کارخانه و نیز مکان‌های آب‌گیری و تخلیه مناسب را ارائه نمود که کم‌ترین اثرات سوء محیط‌زیستی را بر محیط دریا و موجودات آبری حساس داشته باشد. در این راستا، سناریوهای متنوعی بر اساس ویژگی‌های تخلیه، ویژگی‌های عمق‌سنجی و ژئومورفولوژیکی محل و ویژگی‌های سیستم تخلیه و شرایط متغیر در زمان برای شبیه‌سازی رفتار هاله آلودگی و تغییرات غلظت شوری پساب و نیز تعیین موقعیت ورودی و خروجی آبگیر جهت ترقیق بهتر و نزدیک شدن به استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست بررسی گردید. نتایج خروجی با محدودیت‌های استاندارد محیط‌زیست مقایسه شده است و هم‌چنین بر اساس نتایج به دست آمده پیشنهادهایی برای پخش بهتر پساب و کاهش اثرات محیط‌زیستی ارائه شد.



شکل ۱. موقعیت مکانی کارخانه آب شیرین کن شرکت ایمواسکو (مأخذ: گوگل ارث)

این فرآیند را انتشار نام‌گذاری نموده‌اند که در آن پخش شدن ذرات پساب بر اثر ترکیب شدن اثرات برشی و اختلاف پتانسیل است. معادلات اساسی حاکم بر پخش شدن پساب را می‌توان به شکل ذیل بیان کرد (۷):

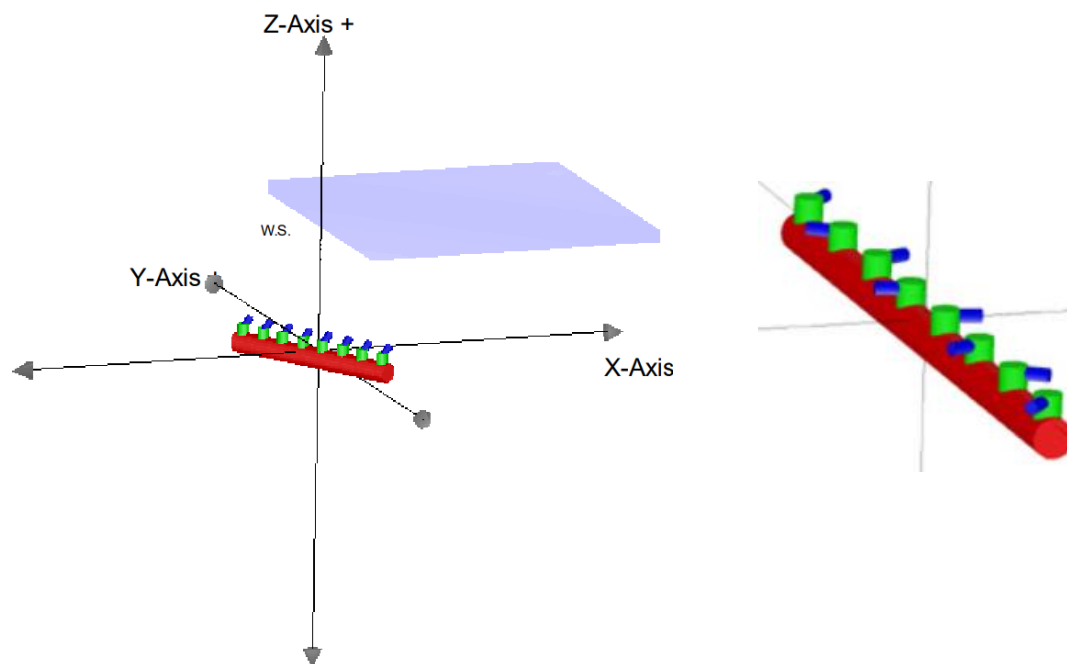
$$\frac{\partial C}{\partial t} = F_h = F_v - \left(\frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$F_h = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که F_h تابع انتشار پساب سطحی در راستای x, y ، F_v تابع انتشار پساب عمقی در راستای z هستند. C میزان غلظت پساب، u, v, w میزان سرعت آب در راستای x, y, z است. D_h مقدار ضریب انتشار در سطح، D_v مقدار ضریب انتشار پساب عمقی،

الگوهای جریان هیدرودینامیکی متعدد که ممکن است رخ دهند، تمایز قائل می‌شود. برای کلاس جریان، مدل مجموعه‌ای از ماژول‌های شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مناسب را می‌تواند اجرا نماید که این توانایی را ایجاد می‌نماید که ویژگی‌های مسیر و رقیق‌سازی جریان‌ات پیچیده را پیش‌بینی نماید. معادلات حاکم مورد استفاده در مدل CORMIX در مطالعات دیگر گزارش شده‌اند (۱۹، ۲۰ و ۲۱). مقایسه گسترده با داده‌های میدانی و آزمایشگاهی موجود نشان داده است که پیش‌بینی‌های سیستم CORMIX در مورد رقیق‌سازی هاله آلودگی برای اکثر موارد قابل اعتماد است (۶). خروجی‌های CORMIX هم‌زمان شامل تصویر سه‌بعدی از هاله آلودگی، توصیه‌های طراحی، ویژگی جریان و گزارش مبتنی بر تحلیل ناحیه اختلاط و رعایت مقررات است (۱۱، ۱۲ و ۱۳). زمانی که پساب از یک منبع نقطه‌ای درون یک محیط تخلیه می‌گردد، بر پایه خصوصیت آلاینده، دمای محیط، وزش باد، غلظت مواد داخل آب و ویژگی پساب تخلیه شده، شروع به پخش شدن می‌کند.



شکل ۲. طرز قرارگیری دریچه‌ها به صورت هم جهت و تناوبی (آلترناتیو)

را با سرعت به محیط سیال دریافتی، تزریق می‌نماید (۲۷). در این مطالعه از بین دیفیوزرهای چند دریچه‌ای، دیفیوزرهای یک جهت و تناوبی بررسی گردید (شکل ۲). نرخ تخلیه پساب شور برای آب شیرین کن ایمواسکو ۵۵ مترمکعب در ثانیه و چگالی آن ۱۰۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌های در دو عمق ۵ و ۸ متری صورت گرفت. سرعت باد منطقه ۳ متر در ثانیه و ضریب دارسی (Darcy-Weisbach Coefficient) ۰/۱ در نظر گرفته شد. بر اساس اطلاعات اخذ شده از سازمان بنادر و کشتیرانی متوسط سرعت جریان ۰/۱ متر بر ثانیه است. سایر مشخصات محیط و دبی مورد استفاده به عنوان ورودی مدل در میدان نزدیک تحت سناریوهای مختلف در پیوست شماره ۱ نمایش داده شده است.

- ظرفیت نهایی شیرین سازی: ۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰ مترمکعب بر سال

- ظرفیت نهایی آبیگری از دریا با فرض بازده ۳۰ درصد برای آب شیرین کن: ۲,۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰ مترمکعب بر سال

k_p نرخ میرایی پساب و C_s غلظت پساب در منبع ورودی تعریف می‌شوند. $C_s S$ هم مقدار پساب است که وارد محیط می‌شود.

داده‌های ورودی مدل

داده‌های ورودی برای بررسی نحوه پخش و پراکندگی پساب شور به دو دسته پارامترهای محیطی (سیستم مختصات، اطلاعات باد منطقه، ضریب مانینگ، عمق تخلیه، نرخ و چگالی پساب آب شور، اطلاعات جریان و ...) و پارامترهای سیستم تخلیه تقسیم شده است. مشخصات تخلیه با ساختار سازه خروجی، لوله‌ای با قطر مشخص می‌باشد که در کف بستر سیال محیطی قرار می‌گیرد. آتفال‌های (Outfall) دریایی خط لوله‌ای برای تخلیه فاضلاب به زیر دریا می‌باشد و معمولاً در انتها دارای یک بخش پراکنده‌کننده به نام دیفیوزر است که جریان را به جت‌های کوچک تقسیم می‌کند و به محیط خارجی تخلیه می‌نماید. دیفیوزر در انتهای آتفال بر روی لوله نازل‌هایی با فاصله مساوی قرار گرفته که جت‌های توربولنت نزدیک به هم

جلوگیری از آلودگی شناگاه‌ها، کاهش هزینه نظارت و عدم در معرض خطر قرار گرفتن سلامت بشر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر تخلیه پساب آب‌شور توسط خط لوله به مناطق دور از ساحل می‌بایست تکنیک‌هایی برای رسیدن به بیش‌ترین میزان ترقیق پساب با آب دریا در نظر گرفته شود. علاوه بر تأثیر پارامترهای محیطی، حداکثر ترقیق اولیه پساب با آب دریا از طریق دیفیوزرها و انتخاب مکان مناسب برای آتفال امکان‌پذیر است. در این راستا، متغیرهای کلیدی و مؤثر در ترقیق پساب شامل تخلیه تک دریچه‌ای و چند دریچه‌ای، جهت و زاویه دریچه‌ها، سرعت‌های مختلف جریان آب و عمق تخلیه پساب، برای تعیین موقعیت ورودی آبگیر و خروجی پساب و نیز ترقیق بهتر و نزدیک شدن به استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست، بررسی گردید. اولین سناریوی مورد بررسی سناریو تأثیر عمق در رفتار هاله آلودگی و رقت شوری پساب است. در این سناریو مدل‌سازی غلظت در امتداد هاله آلودگی در عمق ۵ متری و فاصله ۲۵۰ متری از ساحل برای آب‌شیرین‌کن ایمواسکو مدل‌سازی گردید. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب، درصد میزان افزایش شوری به حدوداً ۳ خواهد رسید. افزایش شوری پساب خروجی اولیه ۱۵/۴۸ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. در شعاع ۲۰۰ متری محور Y، حدود ۱ میلی‌گرم بر لیتر شوری آب افزایش و به ۳۷ می‌رسد. بنابراین، تغییرات افزایش غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) بود، کمتر می‌باشد. همچنین بر اساس مدل‌سازی تغییرات غلظت شوری در محل آبگیری، فاصله ۴۲۵ متری از ساحل (عمق ۱۲ متری) تحت تأثیر نخواهد بود. اما با توجه به این که ارتفاع هاله آلودگی نزدیک به سطح آب خواهد بود، بنابراین عمق ۵ متر پیشنهاد نمی‌شود. بنابراین در ادامه سایر سناریوهای مدل‌سازی پساب شور در فاصله ۳۲۵ متری از ساحل و عمق ۸ متری لحاظ گردید. سناریو دوم مدل‌سازی، خروجی پساب به صورت تک دریچه‌ای است. در مدل‌سازی تک دریچه‌ای، عمق تخلیه

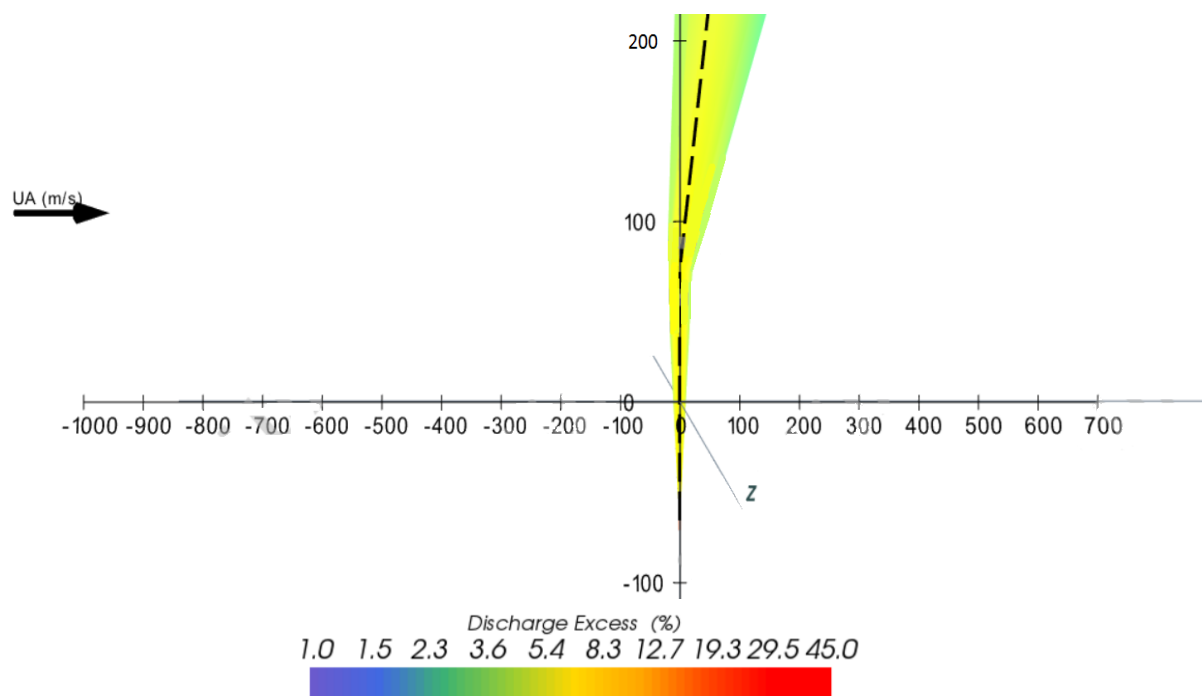
- دبی پساب متناسب با ظرفیت نهایی: ۱,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰ مترمکعب بر سال
- شوری پساب متناسب با ظرفیت نهایی: ۴۳ درصد بیشتر از شوری آب دریا
در ارزیابی شبیه‌سازی پخش شوری به منظور تعیین موقعیت ورودی و خروجی آبگیر معیار آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) مدنظر قرار گرفت (۲۵). که بر اساس اولین معیار شوری آب در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه می‌تواند حداکثر ۱۰ درصد افزایش یابد (با توجه به اینکه شوری آب محیط حدوداً ۳۶ گرم بر لیتر می‌باشد غلظت شوری در شعاع ۲۰۰ متری از خروجی پساب، مجاز است حداکثر به ۳۹/۶ گرم بر لیتر برسد). بنابراین موقعیت و مشخصات خروجی آب‌شور بایستی به گونه‌ای تعیین شود که استاندارد مذکور به دست آید. در این راستا، سناریوهای متنوعی با روش سعی و خطا برای تعیین موقعیت ورودی و خروجی آبگیر، برای ترقیق بهتر و نزدیک شدن به استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست بررسی گردید. ابتدا متغیرهای کلیدی و مؤثر در میزان ترقیق و کاهش غلظت شناسایی و با تغییر متغیرهای کلیدی در مدل کورمیکس شبیه‌سازی مختلفی از رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت به دست آمد.

متغیرهای مورد بررسی در سناریوهای شبیه‌سازی شده:

- ۱- بررسی تخلیه پساب به صورت تک دریچه‌ای و چند دریچه‌ای بر رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت
- ۲- بررسی جهت و زاویه دریچه‌ها بر رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت
- ۳- بررسی تأثیر سرعت‌های مختلف جریان بر رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت
- ۴- بررسی عمق بر رفتار هاله آلودگی و میزان غلظت

نتایج و بحث

امروزه گزینه تخلیه پساب به دریاها در نقاط دور از ساحل به دلیل جلوگیری از اثرات ناشناخته بر روی اکولوژی منطقه،



شکل ۳. نمای افقی (محور x و y) تغییرات غلظت در مسیر هاله آلودگی

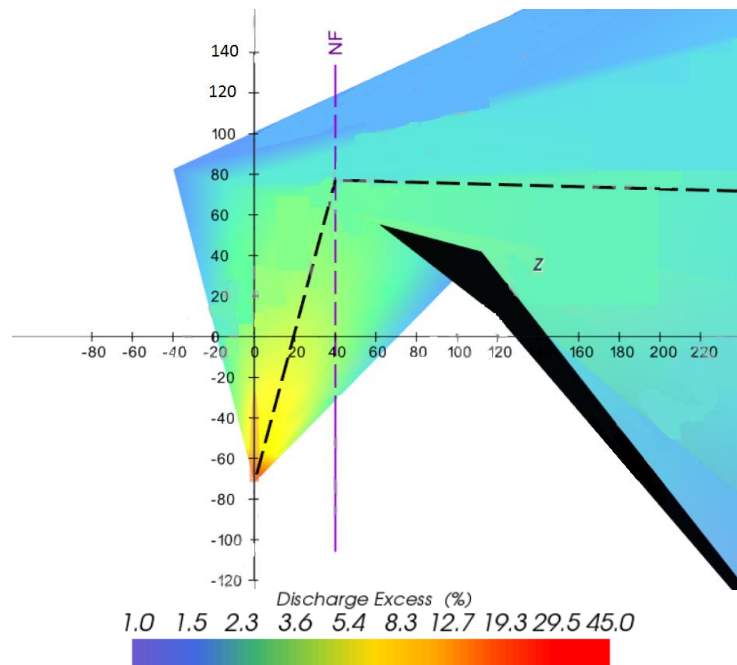
حداکثر و حداقل) به صورت چند دریچه‌ای در راستای محور Y مدل‌سازی گردید. در ادامه خلاصه‌ای از میزان رقت هاله آلودگی و تغییرات شوری محیط در شعاع‌های مختلف محل تخلیه پساب، برای آب شیرین کن ایمواسکو تحت سناریوهای مختلف ارائه شده است.

سناریوی مدل‌سازی پساب به صورت چند دریچه‌ای (هم‌جهت) با سرعت متوسط جریان‌ات محیط (سناریو سوم)

نتایج مدل‌سازی در شکل ۳ نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب با افتال ۳۲۵ متری در عمق ۸ متری، درصد میزان افزایش شوری به حدوداً ۴ خواهد رسید. افزایش شوری پساب خروجی در شعاع ۲۰۰ متری محور Y، ۱/۴ میلی‌گرم بر لیتر افزایش و به ۳۷/۴ می‌رسد. بنابراین، تغییرات افزایش غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) کمتر بود. هم‌چنین تغییرات غلظت شوری در محل

پساب می‌بایست حداقل ۳ برابر قطر لوله تخلیه پساب باشد. قطر لوله تک دریچه‌ای تخلیه پساب ۵/۹ متر محاسبه شده است و در این شرایط عمق تخلیه می‌بایست حداقل ۱۸ متر باشد. با توجه به این که تخلیه در چنین عمقی صرفه اقتصادی ندارد، لذا پیشنهاد نمی‌شود.

علاوه بر متغیر افزایش عمق تخلیه، برای رسیدن به استاندارد مناسب، استفاده از دیفیوزر در انتهای لوله تغذیه می‌تواند میزان انرژی پمپاژ و طول لوله را نسبت به افتال‌های تک دریچه‌ای کاهش دهد. بر همین اساس افتال با دیفیوزر شامل دریچه‌های هم‌جهت و تناوبی (آلترناتیو) در محورهای مختلف بررسی گردید. مشخصات دیفیوزر اثر زیادی در کاهش غلظت پساب شور دارد. هم‌چنین با تغییر چیدمان دریچه‌ها با روش سعی و خطا بهترین گزینه برای ترقیق بهتر و نزدیک شدن به استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست بررسی گردید. علاوه بر متغیر عمق تخلیه و نوع دریچه، متغیر حساس دیگر در نتایج مدل‌سازی سرعت آب محیط است که در این طرح مدل با سرعت‌های جریان مختلف (سرعت متوسط جریان و سرعت



شکل ۴. نمای افقی (محور x و y) تغییرات غلظت در مسیر هاله آلودگی

جریان) با سناریو قبلی (سرعت متوسط جریان) نشان داد با افزایش سرعت جریان مسیر انتشار هاله آلودگی سریع‌تر به سمت ساحل حرکت خواهد کرد هرچند هاله آلودگی تا قبل از رسیدن به ساحل استاندارد حد محیط‌زیستی را دریافت نموده است و نیز افزایش سرعت محیط باعث رقت سریع‌تر پساب شده است.

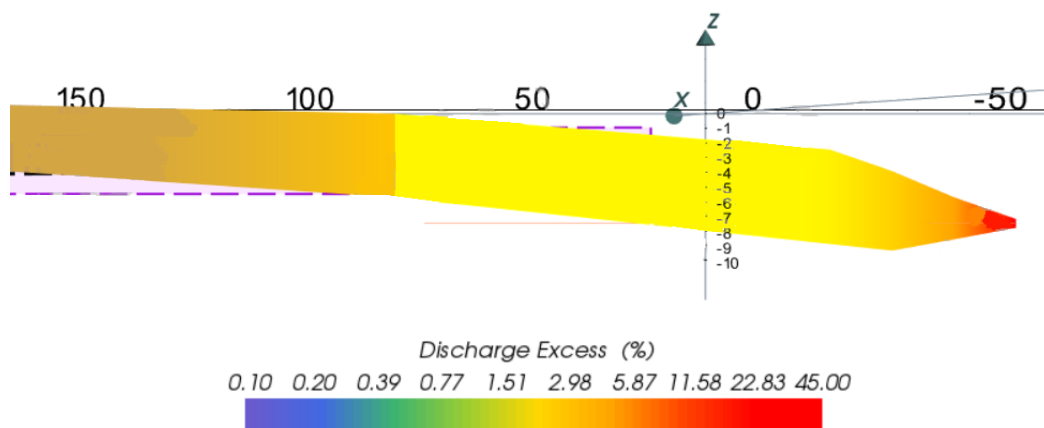
سناریوی مدل‌سازی شوری پساب به صورت چند دریچه‌ای با سرعت حداقل جریان‌ات محیط (سناریوی پنجم)

نتایج مدل‌سازی در شکل ۵ نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب با افتال ۳۲۵ متری در عمق ۸ متری درصد میزان افزایش شوری به حدوداً ۲ خواهد رسید. افزایش شوری پساب خروجی در شعاع ۲۰۰ متری، حدود ۱/۳ میلی‌گرم بر لیتر افزایش و به ۳۷/۳ می‌رسد. بنابراین، تغییرات افزایش غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) کمتر بود. هم‌چنین بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات غلظت شوری در محل آبرگیری به فاصله ۵۰۵ متری از

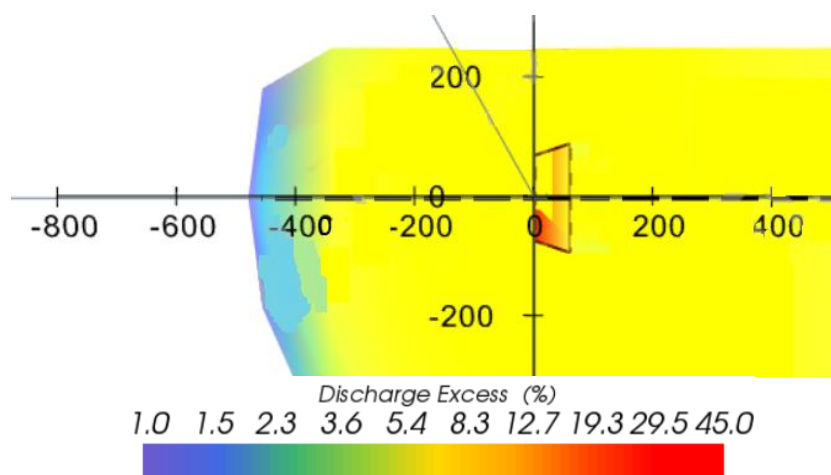
آبرگیری به فاصله ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متری) به حدوداً ۱/۱ میلی‌گرم بر لیتر خواهد رسید.

سناریوی مدل‌سازی شوری پساب به صورت چند دریچه‌ای (هم‌جهت) با سرعت حداکثر جریان‌ات محیط (سناریوی چهارم)

نتایج مدل‌سازی در شکل ۴ نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب با افتال ۳۲۵ متری در عمق ۸ متری، درصد میزان افزایش شوری به حدوداً ۲ خواهد رسید. افزایش شوری پساب خروجی در شعاع ۲۰۰ متری محور X، حدود ۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر افزایش و به ۳۶/۸ می‌رسد. بنابراین، تغییرات افزایش غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) کمتر بود. هم‌چنین بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات غلظت شوری در محل آبرگیری به فاصله ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متری) با توجه به این‌که هاله آلودگی به سمت محور X (ساحل) منحرف خواهد شد، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. مقایسه نتایج این سناریو (سرعت حداکثر



شکل ۵. نمای افقی (محور x و y) تغییرات غلظت در مسیر هاله آلودگی



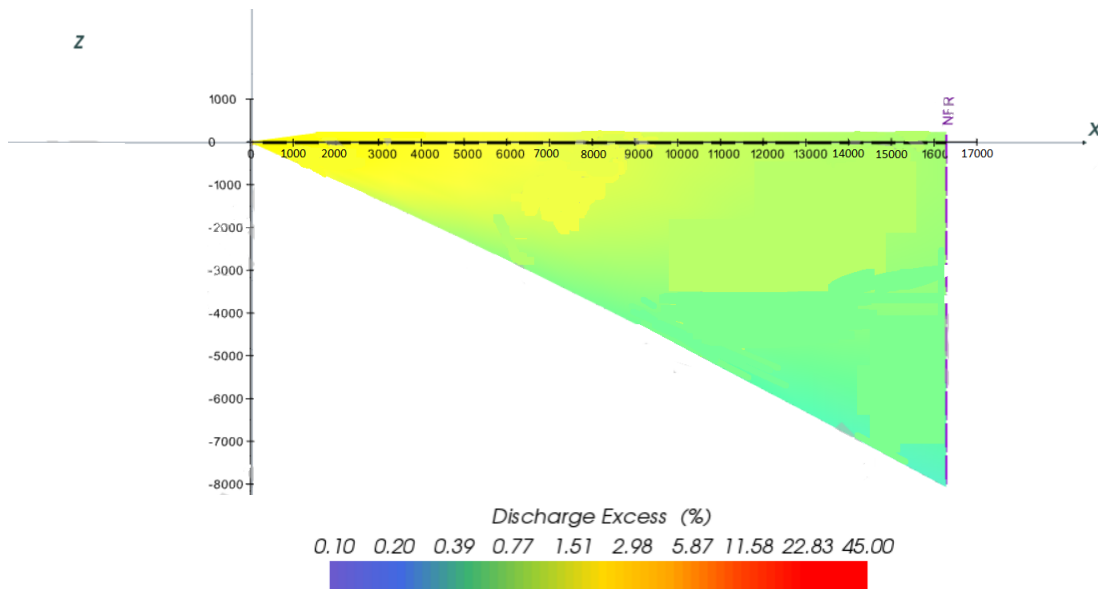
شکل ۶. نمای افقی (محور x و y) تغییرات غلظت در مسیر هاله آلودگی

سناریوی مدل‌سازی شوری پساب به صورت چند دریچه‌ای با دریچه آلترناتیو (سناریو ششم)

نتایج مدل‌سازی در شکل ۶ نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب با افتال ۳۲۵ متری در عمق ۸ متری درصد میزان افزایش شوری در محور Y به حدوداً ۶ خواهد رسید. در شعاع ۲۰۰ متری محور X، حدود ۲ میلی گرم بر لیتر افزایش و به ۳۸ می‌رسد با توجه به بای پس پساب در خلاف جهت جریان غلظت شوری در ۴۸۰ متری محور x به ۴۳ درصد خواهد رسید (۱۵/۴ میلی گرم در لیتر). بنابراین، تغییرات افزایش

ساحل (عمق ۱۶ متری) به حدوداً ۱/۶ میلی گرم در لیتر افزایش است.

نتایج مدل‌سازی با سرعت‌های مختلف جریان محیط (سرعت متوسط جریان، سرعت حداکثر و حداقل) اختلاف زیادی در انتشار هاله آلودگی شوری پساب نشان نداد. احتمالاً به این دلیل است که در میدان نزدیک فرآیند اختلاط اولیه در اثر نیروی شناوری و مومنتوم صورت می‌گیرد و کمتر تحت تأثیر سرعت جریان محیط است.



شکل ۷. نمای افقی (محور x و y) تغییرات غلظت در مسیر هاله آلودگی

افزایش شوری پساب خروجی در شعاع ۲۰۰ متری محور X، حدود ۱/۴ میلی‌گرم بر لیتر افزایش و به ۳۷/۴ می‌رسد. بنابراین، تغییرات افزایش غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) کمتر بود. هم‌چنین بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات غلظت شوری در محل آبرگیری به فاصله ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متری) تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. نتایج مطالعه نادری نژاد و همکاران (۲۰۱۳) در خصوص تأثیر شرایط محیطی بر رقیق‌شدگی با سرعت آب، عمق و فاصله تا ساحل ارتباط دارد (۲۶). از سوی دیگر تحقیق عزیزی و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد افزایش دبی پساب خروجی آب‌شیرین‌کن منجر به افزایش پخش شوری می‌گردد (۷). هم‌چنین نتایج نشان داد در حالت‌هایی می‌توان این پخش را با سرعت جریان و زمان جزر و مد مدیریت نمود، به طوری‌که افزایش دبی تأثیر کم‌تری روی پخش پساب شور در دریا گذارد. هم‌چنین مطالعه فرناندز و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد استفاده از دیفیوزر، فرایند رقیق‌سازی را در میدان نزدیک افزایش می‌دهد و در میدان دور، افزایش میزان رقیق‌شدگی در

غلظت شوری از معیار حدی محیط‌زیستی که در این پروژه ۳۹/۵ گرم در لیتر (افزایش حداکثر ۱۰ درصد شوری دریا) بیشتر خواهد بود. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات غلظت شوری در محل آبرگیری که در راستای محور Y است، به فاصله ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متری) تحت تأثیر قرار نخواهد گرفت و تغییرات خاصی در محل آبرگیری نخواهیم داشت. استفاده از دیفیوزر تناوبی باعث انتشار بیشتر هاله آلودگی در راستای محور X خواهد شد. قابل ذکر است در صورت استفاده از دیفیوزر آلترناتیو پخش شوری به سمت ساحل خواهد بود هرچند مقدار شوری در ساحل در حد استاندارد محیط‌زیست خواهد بود. با توجه به نتایج این نوع دیفیوزر پیشنهاد نمی‌شود.

سناریوی مدل‌سازی شوری پساب به صورت چند دریچه‌ای هم‌جهت در راستای محور X با سرعت جریان متوسط محیط (سناریو ۷)

نتایج مدل‌سازی در شکل ۷ نشان می‌دهد در شعاع ۲۰۰ متری محل تخلیه پساب با افتال ۳۲۵ متری در عمق ۸ متری درصد میزان افزایش شوری به حدوداً ۳/۹ خواهد رسید.

یک کیلومتری نقطه تخلیه پساب حدوداً ۱۷ برابر افزایش می‌یابد (۱۵). در تأیید نتایج این مطالعه تحقیق النجار (۲۰۲۲) نیز نشان داد استفاده از پخش‌کننده‌های چند دریچه‌ای، بازدهی را بهینه و نیز اثرات محیط‌زیستی پساب آب شیرین کن در ساحل دریای مدیترانه را کاهش می‌دهد (۳). یافته‌های ماسریا و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان می‌دهد که پخش‌کننده‌های یک جهته چند دریچه‌ای عملکرد بهتری برای رسیدن به استانداردهای EPA نسبت به پخش‌کننده‌های تک دریچه‌ای دارند (۲۵). نتایج تحقیقات بوتیا و همکاران (۲۰۲۲) پیشنهاد نمود که تغییر مکان نقطه آبیگیری آب شیرین کن و افزایش فاصله بین نقطه آبیگیری و نقطه تخلیه پساب از ۲۹۰ متر به حداقل ۵۰۰ متر می‌تواند در رقیق‌سازی پساب بسیار تأثیرگذار باشد (۹). نتایج مطالعه آمیناچ و همکاران (۲۰۲۲) در ایالت تیپازا (الجزایر) در خصوص افزایش قابل توجه شوری در ساحل به دلیل رقیق‌سازی ناکافی، انحراف ستون پساب شور و تأثیر پساب شور بر نقطه آبیگیری نشان داد، سرعت باد و جریان آب، نقش مهمی در رقیق‌سازی پساب شور ایفا می‌کنند (۴). نتایج شبیه‌سازی‌های در سرعت‌های مختلف جریان، افزایش سرعت تخلیه و افزایش تعداد نقاط تخلیه را برای اطمینان از رقیق‌سازی مناسب پیشنهاد نمود.

شور به سمت ساحل و بای پس هاله آلودگی در منطقه می‌شود و دریچه‌های هم‌جهت نتایج بهتری ارائه می‌دهند. از سوی دیگر نتایج مدل‌سازی با سرعت‌های مختلف جریان محیط (سرعت متوسط جریان، سرعت حداکثر و حداقل) اختلاف زیادی در انتشار هاله آلودگی شوری پساب نشان نداد. با توجه به میزان رقت، ضخامت عمودی هاله آلودگی و میزان افزایش شوری محیط در شعاع‌های مختلف، فاصله آبیگیری در ۵۰۵ متری از ساحل (عمق ۱۶ متر) و فاصله تخلیه پساب از خط ساحلی ۳۲۵ متر (عمق ۸ متر) برآورد گردید. عمق مورد اشاره جهت آبیگیری بر اساس اثرگذاری میزان خروجی پساب است و عمق بلوم پلانکتونی و پدیده کشند قرمز در این مطالعه در نظر گرفته نشده است، لذا تعیین عمق آبیگیری صرفاً بر اساس این مدل‌سازی پیشنهاد نمی‌شود و می‌بایست سایر فاکتورها نظیر عمق بلوم پلانکتونی نیز در نظر گرفته شود. هم‌چنین سرعت تخلیه بیش‌تر، ترقیق و اختلاط بیش‌تری را به همراه دارد اما ممکن است منجر به ایجاد میدان نزدیک ناپایدار شده، الگوی اختلاط نامطلوبی را به وجود آورد که پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی بررسی گردد.

قدردانی

مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با کد پ/۱۴۹۰۵۴ تحت عنوان "پهنه‌بندی و تعیین پتانسیل کاربری‌های مختلف در محدوده منطقه آزاد تجاری-صنعتی چابهار" است. از آقای دکتر محمود سینایی بابت راهنمایی و مساعدت در اخذ اطلاعات لازم جهت مدل‌سازی قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

سناریوهای با افعال‌های چند دریچه‌ای (دریچه‌های هم‌جهت و تناوبی) نشان داد استفاده از دریچه‌های تناوبی (آلترناتیو) باعث افزایش انتشار هاله آلودگی و برگشت پساب

منابع

1. Alameddine, M., and El-Fadel, A. 2007. Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. *Desalination*, 214: 241–260.
2. Aljohani, N. S., Kavil, Y. N., Shanas, P. R. and Al-Farawati, R. K. 2022. Environmental impacts of thermal and brine dispersion using hydrodynamic modelling for Yanbu desalination plant, on the Eastern coast of the Red Sea. *Sustainability*, 14: 4389.

3. Alnajjar, H. S. 2015. Numerical modeling of brine disposal for Gaza central seawater desalination plant. MSc Thesis. Civil infrastructure engineering, Islamic University of Gaza. 161P.
4. Amitouche, M., Lefkir, A., Remini B., Sebki, M. and Aissaoui L. 2022. Diagnosis and improvement of diffuser performance of Fouka desalination plant (Algeria). *Desalination and Water Treatment*, 255: 94-100.
5. Anton Purnama, A., Al-Barwania, H. H., Bleningerb, T. and Doneker, R. L. 2011. CORMIX simulations of brine discharges from Barka plants, Oman. *Desalination and Water Treatment* 32: 329-338.
6. Azimi A. H., Azizi, F. and Etemad-Shahidi, A. 2005. A new formulation to estimate initial dilution of dense jet flow, *Proceedings of the 31st IAHR World Congress (Seoul)* , pp. 4241-4248.
7. Azizi, Z., Rezapour M. and Moghadam M. 2022. Numerical study of desalination effluent diffusion using Cormix software. *Journal of Marine Engineering*, 18: 1-12. (In Persian).
8. Balas, L., and Yilmaz, N. 2018. Numerical modeling of near and far field dilution: Edremit sea outfall. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 5: 41-54.
9. Bouthiba, A., Amitouche, M., Moudjeber, D.E., Mahmoudi, H. and Goosen, M.T.F., 2022. Simulation study of the interaction between brine discharge and catchment water of a desalination plant in Tenes, Algeria under various hydrodynamic conditions. *Desalination and water treatment*, 279:16-28.
10. Doneker, R. L., and Jirka, G. H. 1990. Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged single port discharges (CORMIX1), Technical Report EPA/600/3-90/012.
11. Doneker R. L. and Jirka G. H. 2001. CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal. *Desalination*, 139: 263-274.
12. Doneker, R. L., Nash, J. D., and Jirka, G. H. 2004. Pollutant transport and mixing zone simulation of sediment density currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130: 349-359.
13. Doneker R.L. and Jirka, G. H. 2007. CORMIX user manual: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters, Portland, Oregon, USA.
14. Einali, A., and Chegini, V. 2017. Investigation of temporal and spatial changes in the physical parameters of the water of the Gulf of Bazm. *Journal of Marine Sciences and Technologies*, 16: 18-29. (In Persian).
15. Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Vallejo, J.J.Z. and Sánchez-Lizaso, J.L. 2018. Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges. *Desalination*, 431: 27-34.
16. Jirka, G. H., Doneker, R. L., and Hinton, S. W., 1996. User Manual for Cormix: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface water. DeFrees hydraulics laboratory school of civil and environmental engineering. Cornell University Ithaca, New York, US.
17. Hosseini, H., Saadaoui, I., Moheimani, N. and Al Saidi, M. 2021. Marine health of the Arabian Gulf: drivers of pollution and assessment approaches focusing on desalination activities. *Marine Pollution Bulletin*, 164:112085.
18. Moon, J., Son, S., Kim, J. and Park, K., 2025. Critical challenges in high-salinity seawater reverse osmosis systems: Technical, energy, and environmental reviews. *Desalination*, 15:118811.
19. Jirka G.H. and Akar, P. J. 1991. Hydrodynamic classification of submerged multiport diffuser discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117:1113-1128.
20. Jirka G.H. and Doneker, R.L. 1991. Hydrodynamic classification of submerged single port discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (9):1095-1112.
21. Jirka G.H., 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 1: Single round jet, *Environmental Fluid Mechanics*, 4: 1-56.
22. Laspidou, C., Hadjibiros K., and Gialis, S. 2010. Minimizing the environmental impact of sea brine disposal by coupling desalination plants with solar saltworks: A case study for Greece. *Water*, 2: 75-84.
23. Lattemann, S., and Hopner, T. 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220: 1-15.
24. Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L., Marco-Méndez, C., and Martínez-García, E. 2012. Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. *Desalination*, 286: 217-224.
25. Masria, A., Elejla, K., Abualtayef, M., Qahman, K., Seif, A.K. and Alshammari, T.O., 2024. Modeling the dispersion of wastewater pollutants in Gaza's coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 208: 117071.
26. Nezhad naderi M., Khanjani M., Montazemi Vazifeh doust R. Investigation of the method of wastewater discharge from the Bandar Khamir desalination plant site using empirical relationships. *Irrigation and Water Engineering*, 3(4): 23-32. (In Persian).
27. Najafabadi, M.M., Mohammadnezhad, B., Karimi, A. 2021. Validation of CORMIX model in simulation of single port brine discharge into seawater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 16: 93-108.
28. Nikiforakis I. K., and Stamou A. I., 2015. Integrated modelling for the discharge of brine from desalination plants into coastal waters. *Desalination and Water Treatment*, 53:3214–3223.

-
29. Noori, F., Zahedi, M.M., Bayati-Comitaki, A. and Ziyaadini, M., 2021. Study of the salinity and pH dilution pattern of discharged brine of the Konarak desalination plant into the Chabahar bay: a case study. *Applied Water Science*, 11(10):163.
 30. Pereira, S., Cesar, P. and Rosma, C. 2021. Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. *Desalination and Water Treatment*, 234: 22–30.
 31. Purnama, A., Al-Barwani, H.H., and Al-Lawatia, M. 2003. Modeling dispersion of brine waste discharge from a coastal desalination plant. *Desalination*, 155: 41-47.
 32. Roberts, P.J. 2015. Near field flow dynamics of concentrate discharges and diffuser design. In: *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: Innovations and Environmental Impacts* (pp. 369-396). Springer International Publishing.
 33. Reda, A., Amaechi, C.V. and Shahin, M.A., 2025. Optimization approach for sustainable decommissioning of unpiggable subsea pipelines: Insights from the Arabian Gulf. *Journal of Environmental Management*, 375: 124180.
 34. Shrivastava, E. E., Adams, B., Al-Anzi, A. C., and Chow, J. 2021. Confined plunging liquid jets for dilution of brine from desalination plants. *Processes*, 9 (5): 856.

Study of Pollution Release from Imvasco Desalination Plant into the Oman Sea, Using the CORMIX Model

Fatemeh Rajaei*

(Received: August 19-2025; Accepted: November 29-2025)

Abstract

One of the environmental issues associated with desalination plants, particularly reverse osmosis plants in coastal areas, is the discharge of highly saline effluent into the marine environment. The primary objective of this study is to investigate the salinity distribution of effluent from the Imvasco desalination plant using the Cormix numerical model. The goal is to optimize the design of effluent dilution and assess the suitability of water intake and discharge locations. Various scenarios were examined, including single-port and multi-port wastewater discharges, different port angles, the effects of varying flow velocities, and the influence of depth on plume behavior and concentration. The modeling results indicate that, at a depth of 5 meters with a single-port discharge, the configuration is not recommended. The results further suggest that using alternating ports increases plume dispersion toward the shore, while ports aligned in the same direction yield better outcomes. Ambient flow velocities showed minimal impact on the spread of the effluent salinity plume. In the optimal scenario, the water intake should be located approximately 505 meters from the shore at a depth of 16 meters, and the effluent discharge should be positioned about 325 meters from the shore at a depth of 8 meters.

Keywords: Brine discharge, Desalination plant, Cormix model