



Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems

Masoud Sadrinasab^{a*}, Neda Torabi^a

^aDepartment of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: masoud.sadri@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-5137-4200>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Freshwater scarcity has intensified the need for desalination plants in coastal regions as a reliable alternative for water supply. However, the discharge of concentrated brine effluents into marine environments has raised serious environmental concerns. This study aims to review previous research on the cumulative impacts of desalination plant effluents and to examine their major environmental consequences on marine ecosystems and coastal water resources. This study was conducted using a descriptive–analytical and review-based approach. Relevant scientific literature concerning the cumulative impacts of desalination plant discharges was systematically reviewed. In addition, results from a numerical modeling study conducted in the Persian Gulf were analyzed to illustrate the significance of considering the simultaneous effects of multiple desalination facilities. The findings indicate that the continuous discharge of saline and warm effluents from desalination plants can lead to increased salinity and seawater temperature, deterioration of water quality, and adverse impacts on marine ecosystems. Numerical modeling results from the Persian Gulf further demonstrate that cumulative effects resulting from the operation of multiple desalination units may considerably intensify environmental pressures on coastal and marine environments. The study highlights the necessity of incorporating cumulative impact assessments into future planning, environmental evaluations, and management strategies for desalination projects. Considering the combined effects of multiple desalination plants is essential for ensuring the sustainable management of marine resources and minimizing long-term environmental risks.
Article history: Received: 2026/03/22	
Received in revised form: 2026/04/19	
Accepted: 2026/04/30	
Available online: 2026/05/21	
Keywords: Desalination plant, Desalination plants, Cumulative effects of wastewater, Water resources, Persian Gulf.	

Introduction

Given the increasing population growth, increasing demand for fresh water, and limited fresh water resources in the world, the construction of desalination plants in coastal areas has been proposed as one of the main solutions for supplying water to these areas. The countries bordering the Persian Gulf, including Saudi Arabia, the United Arab Emirates, and Iran, currently meet a significant portion of their water needs through these units. However, the extensive and unplanned development of desalination plants has raised serious concerns about their environmental impacts. The most important aspect of the environmental impacts of desalination plants is related to the concentrated effluent (brine) that is discharged into the marine environment. This effluent, which has a salinity of 1.5 to 2 times the natural salinity of seawater and a temperature of 5 to 10 degrees Celsius higher than the surrounding water, also contains chemicals, heavy metals, and other pollutants. The continuous discharge of these brackish and warm effluents has raised concerns about cumulative impacts on the marine environment and coastal water resources. Existing knowledge gaps include (1) a lack of integrated studies that examine the simultaneous effects of multiple desalination units in a region, (2) insufficient attention to the synergistic effects of effluents in semi-enclosed areas such as the Persian Gulf where water exchange is limited, and (3) the lack of regional assessment frameworks rather than local and single-unit assessments. The main objective of this study is to review and analyze the cumulative impacts of desalination plant development on water resources and the marine environment, with emphasis on the Persian Gulf as one of the most important areas affected by this industry. The importance of the study is that by combining a systematic review of the literature and 3D numerical modeling, it provides a comprehensive picture of the cumulative consequences and highlights the need to revise approaches to environmental assessment and sustainable management of coastal water resources.

Method

This study employed a combined methodology integrating a systematic literature review and numerical modeling. In the review phase, relevant studies published between 2015 and 2025 were retrieved from international databases (ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar) as well as Persian databases (SID, Magiran, and Civilica) using keywords related to desalination plants, brine discharge, cumulative impacts, and marine environments in both English and Persian. From an initial pool of 112 studies, 40 articles were selected based on relevance to quantitative effluent characteristics and applicability to semi-enclosed marine systems such as the Persian Gulf. In the modeling phase, the COHERENS 3D hydrodynamic model was applied to simulate the spatial distribution of salinity and temperature resulting from desalination effluents in the Persian Gulf. Input parameters included a 5 PSU increase in salinity and a 7°C rise in temperature relative to ambient seawater, along with site-specific data on plant location, capacity, and discharge volume obtained from international databases. Seasonal boundary conditions were incorporated based on winter circulation patterns, and simulations were conducted for both surface and bottom layers, with emphasis on winter conditions due to stronger density-driven accumulation. Unlike previous studies that examined desalination plants individually, this research simultaneously modeled multiple operational units to assess cumulative and synergistic impacts. A key limitation of the study was the lack of synchronized field measurements across all desalination facilities, necessitating reliance on averaged datasets and modeling assumptions, which were partially addressed through validation against comparable studies.

Results

A systematic review of the literature shows that research on desalination effluents can be grouped into two main categories: single-unit studies and a limited number of studies on cumulative impacts of multiple desalination plants. Single-unit studies generally report that brine salinity is about 1.5–2 times higher than natural seawater and discharge temperatures are approximately 5–10°C higher. In semi-enclosed seas such as the Persian Gulf, these discharges can gradually increase salinity in deeper layers, reduce dissolved oxygen, and disturb marine ecological balance. A key gap identified in the literature is the lack of studies addressing cumulative impacts in regions where multiple desalination plants operate in close proximity. In such conditions, the combined effect of multiple discharges becomes more significant than individual impacts. Numerical modeling results confirm that during winter conditions, lower temperatures and higher water density lead to accumulation of saline effluents in bottom layers. While surface waters experience relatively faster dilution due to currents, bottom layers show higher salinity accumulation and more extensive affected zones. Model results indicate that the highest salinity concentrations occur in the southern Persian Gulf, where desalination plants are densely located. Average salinity increases of about 2–3 PSU above natural levels were observed, effectively expanding the spatial extent of impacted areas compared to single-plant scenarios. The results also show that variations in individual plant discharge rates have limited influence on overall dispersion patterns, mainly affecting intensity rather than spatial distribution. From an economic and management perspective, these findings suggest that ignoring cumulative impacts may lead to reduced fishery productivity, decreased tourism income, and increased costs for marine infrastructure maintenance. Overall, the results emphasize the importance of considering regional-scale cumulative effects in environmental assessment and coastal planning.

Conclusions

A systematic review of the literature and numerical modeling results indicate that the simultaneous development of multiple desalination plants in coastal regions can generate more severe environmental impacts than single-plant scenarios due to cumulative effects. Gradual increases in salinity and temperature near brine discharge zones alter the physical and chemical properties of seawater, threatening sensitive marine ecosystems such as corals, mangroves, and benthic communities. These impacts are particularly critical in semi-enclosed seas like the Persian Gulf, where high evaporation rates and limited water exchange intensify the persistence and spread of saline and warm effluents, reducing dissolved oxygen levels and disrupting benthic life. The findings confirm that cumulative impacts of multiple desalination units are significantly greater than the simple sum of individual effects, highlighting the importance of considering synergistic interactions in environmental assessments. From a practical perspective, the results underscore the need to move beyond single-plant evaluation frameworks toward regional-scale assessment approaches. Key recommendations include adopting Integrated Coastal Zone Management (ICZM), applying 3D numerical modeling for predicting salinity and temperature distribution, implementing continuous environmental monitoring, optimizing brine discharge systems using deep-water diffusers, establishing regional standards for allowable salinity and temperature levels, and restricting the placement of new plants in environmentally sensitive areas. Future research should focus on climate change impacts, interactions among coastal pollutants, economic evaluation of environmental costs, and circular economy approaches for brine recovery. Overall, the study highlights that neglecting cumulative impacts in desalination planning can worsen environmental degradation and threaten the long-term sustainability of coastal water resources.



بررسی اثرات تجمعی تخلیه پساب آب شیرین کن ها بر اکوسیستم های دریایی

مسعود صدری نسب^a، ندا ترابی^a

^aگروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: masoud.sadri@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کمبود منابع آب شیرین، استفاده از کارخانه های آب شیرین کن را به عنوان یکی از راهکارهای مطمئن تأمین آب، به ویژه در مناطق ساحلی، افزایش داده است. با این حال، تخلیه مداوم پساب غلیظ و شور حاصل از فرایند نمک زدایی به محیط های دریایی، نگرانی های قابل توجهی را در زمینه پیامدهای زیست محیطی ایجاد کرده است. هدف این پژوهش، بررسی مطالعات پیشین درباره اثرات تجمعی تخلیه پساب کارخانه های آب شیرین کن و ارزیابی مهم ترین پیامدهای زیست محیطی آن بر اکوسیستم های دریایی و منابع آب ساحلی است. این پژوهش با استفاده از رویکردی توصیفی-تحلیلی و بر پایه مرور مطالعات انجام شد. در این راستا، منابع علمی مرتبط با اثرات تجمعی تخلیه پساب کارخانه های آب شیرین کن به صورت نظام مند بررسی و تحلیل شد. همچنین، نتایج یک مطالعه مدل سازی عددی انجام شده در خلیج فارس، با هدف بررسی اهمیت هم زمانی اثرات ناشی از فعالیت چندین تأسیسات آب شیرین کن، مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته ها نشان داد که تخلیه مداوم پساب های شور و گرم کارخانه های آب شیرین کن می تواند موجب افزایش شوری و دمای آب دریا، کاهش کیفیت آب و ایجاد پیامدهای نامطلوب برای اکوسیستم های دریایی شود. همچنین، نتایج مدل سازی عددی در خلیج فارس نشان داد که فعالیت هم زمان چندین واحد آب شیرین کن می تواند اثرات تجمعی قابل توجهی ایجاد کرده و فشارهای زیست محیطی وارد بر محیط های ساحلی و دریایی را تشدید کند. بر این اساس، در نظر گرفتن اثرات تجمعی و هم زمان چندین تأسیسات نمک زدایی در برنامه ریزی های آتی، ارزیابی های زیست محیطی و تدوین راهبردهای مدیریتی ضروری است. توجه به این اثرات می تواند نقش مهمی در کاهش خطرات زیست محیطی بلندمدت و دستیابی به مدیریت پایدار منابع دریایی و مناطق ساحلی داشته باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱	
کلیدواژه ها: آب شیرین کن ها، اثرات تجمعی پساب، خلیج فارس، کارخانه نمک زدایی، منابع آب.	

مقدمه

با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب شیرین ناگزیر به استفاده از آب دریا برای تامین آب شیرین هستیم به همین دلیل روش‌های متعددی برای نمک‌زدایی از آب دریا ابداع گردیده‌است. استفاده از آب‌شیرین‌کن‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین راهکارهای تامین آب شیرین، به ویژه در مناطق خشک و ساحلی، به سرعت گسترش پیدا کرده‌است (Rasoulpour & Akbari, 2024). عربستان سعودی، امارات متحده عربی و ایران، امروز بخش قابل توجهی از نیاز آبی خود را از طریق این واحدها تامین می‌کنند. با این وجود، توسعه گسترده و بدون برنامه آب‌شیرین‌کن‌ها نگرانی‌هایی را در مورد تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها به وجود آورده‌است (Sharifinia et al., 2025).

کارخانه‌های نمک‌زدایی با توجه به نوع روش شیرین‌سازی و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها می‌توانند اثرهای کیفی مختلفی را بر محیط اطراف خود داشته‌باشند و به صورت کوتاه‌مدت و یا بلندمدت آثار نامطلوب زیست‌محیطی را بر اکوسیستم آبی داشته‌باشند (Stein et al., 2021). در حال حاضر، تلاش‌های کمی در جهت بررسی و تعیین اثرات سوء ناشی از تخلیه پساب به دریا صورت گرفته‌است. خروج این پساب‌ها بیشترین آثار منفی زیست محیطی ناشی از آب شیرین آن‌ها را دربر دارد. سه عامل شوری، حرارت و مواد شیمیایی مهم‌ترین عواملی هستند که از طریق پساب‌های کارخانه‌های نمک‌زدایی وارد دریا می‌شوند (Backer et al., 2022; Omerspahic et al., 2022).

با توجه به این که محیط‌زیست دریا بخش مهمی از اکوسیستم ما را تشکیل می‌دهد و در صورت آسیب دیدن این بخش از اکوسیستم، پیامدهای ناگواری حیات انسان را بر روی زمین تهدید می‌کند.

بیشتر مطالعات پیشین تنها به بررسی اثرات یک آب‌شیرین‌کن پرداخته‌اند، در حالی که در محدوده‌ای مانند خلیج فارس، حضور هم‌زمان چندین واحد نمک‌زدایی در فاصله‌های نزدیک می‌تواند اثراتی ایجاد کند که نه‌تنها جمع ساده اثرات تکی نیست، بلکه گاهی به صورت هم‌افزا باعث تشدید تغییرات محیطی می‌شود (Nesterov, 2025).

این مقاله با هدف مرور و تحلیل اثرات تجمعی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها بر منابع آب و محیط‌زیست دریا تدوین شده و همچنین ضمن بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، بخشی از نتایج مدل‌سازی شوری و دمای پساب در خلیج فارس نیز ارائه می‌شود تا اهمیت در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان چند واحد آب‌شیرین‌کن در ارزیابی‌های زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری‌های آینده روشن‌تر شود.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، با افزایش استفاده از فناوری نمک‌زدایی برای تأمین آب شیرین در مناطق کم‌آب، توجه به پیامدهای زیست‌محیطی این فناوری نیز افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین آثار زیست‌محیطی فرایند نمک‌زدایی، تخلیه پساب شور یا کنسانتره به محیط دریایی است (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010). این پساب معمولاً دارای شوری و چگالی بیشتری نسبت به آب دریا بوده و بسته به نوع فناوری نمک‌زدایی، می‌تواند حاوی ترکیبات شیمیایی حاصل از فرایند پیش‌تصفیه، مواد ضد رسوب، محلولات شست‌وشوی غشا و سایر ترکیبات باشد (Roberts et al., 2010; Sirota et al., 2024). در نتیجه، تخلیه نامناسب پساب می‌تواند موجب افزایش موضعی شوری و تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب در محدوده پذیرنده شود. شدت این تغییرات به شرایط محل تخلیه و ظرفیت اختلاط و رقیق‌سازی محیط وابسته است (Lattemann & Höpner, 2008). میزان و گستره این اثرات به عواملی همچون حجم و شوری پساب، عمق محل تخلیه، سرعت و جهت جریان‌های دریایی، امواج، جزر و مد، مشخصات بستر و نحوه طراحی سیستم تخلیه وابسته است (Porto Pereira et al., 2024).

با توجه به اهمیت این موضوع، مطالعات متعددی به بررسی نحوه پخش، اختلاط و رقیق‌شدن پساب شور در محیط دریایی پرداخته‌اند. از آنجا که پساب شور دارای چگالی بیشتری نسبت به آب دریا است، پس از تخلیه می‌تواند به‌صورت یک جریان با شناوری منفی در نزدیکی بستر حرکت کرده و تحت تأثیر شرایط هیدرودینامیکی محیط

گسترش یابد (Palomar et al., 2012; Sirota et al., 2024). در صورت کاهش نیافتن مناسب شوری در فاصله کوتاه از محل تخلیه، احتمال ایجاد نواحی با شوری بالاتر و در نتیجه ایجاد فشار بر اکوسیستم های دریایی افزایش می یابد (Clark et al., 2018). علاوه بر شوری، دما و برخی ترکیبات شیمیایی موجود در پساب نیز می توانند بر ویژگی های محیط پذیرنده اثرگذار باشند (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010). در یک مطالعه مروری جدید، Driss et al (2025) پیامدهای زیست محیطی نمک زدایی و به ویژه چالش های مرتبط با مدیریت پساب شور را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که افزایش شوری، تخریب زیستگاه و اختلال در تنوع زیستی از مهم ترین نگرانی های زیست محیطی مرتبط با تخلیه پساب شور هستند. نویسندگان همچنین بر اهمیت توسعه روش های مناسب تصفیه و مدیریت پساب، افزایش بهره وری انرژی و اتخاذ رویکردهای پایدار در توسعه واحدهای نمک زدایی تأکید کردند.

در کنار مطالعات تجربی و مروری، استفاده از مدل های عددی به عنوان ابزاری مؤثر برای پیش بینی رفتار پساب شور و ارزیابی اثرات زیست محیطی آن مورد توجه قرار گرفته است. Porto Pereira et al (2024) یک ابزار مدل سازی برای بررسی همزمان رفتار پساب در میدان نزدیک و میدان دور توسعه دادند. در این مطالعه، مدل میدان نزدیک با یک مدل انتقال لاگرانژی تلفیق شد و اثر عواملی همچون سرعت جریان، مشخصات دیفیوزر، شوری و دمای آب دریا و شرایط موجی بر پراکنش پساب بررسی شد. نتایج نشان داد که ویژگی های سیستم تخلیه، به ویژه زاویه دیفیوزر، می تواند بر میزان رقیق سازی اولیه و طول میدان نزدیک اثر قابل توجهی داشته باشد. این مطالعه همچنین نشان داد که تلفیق مدل های میدان نزدیک و دور می تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی مسیر حرکت توده شور و بررسی شرایط مختلف تخلیه باشد.

در سال های اخیر، توجه به بهینه سازی شرایط تخلیه پساب در مناطق ساحلی نیز افزایش یافته است. Shaghghi et al. (2024) با استفاده از مدل سازی عددی، شرایط تخلیه کنسانتره حاصل از آب شیرین کن های ساحلی را بررسی کردند و نقش عواملی مانند محل و شرایط تخلیه و ویژگی های هیدرودینامیکی محیط را در میزان پراکنش و رقیق سازی پساب مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش بر اهمیت طراحی و انتخاب مناسب شرایط تخلیه برای کاهش اثرات احتمالی پساب بر محیط دریایی تأکید دارد. این مطالعه از آن جهت برای پژوهش های منطقه ای اهمیت دارد که نشان می دهد ارزیابی عددی می تواند برای مقایسه سناریوهای مختلف تخلیه و تعیین شرایط مناسب تر برای کاهش اثرات زیست محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

در مناطق خشک و نیمه خشک، اهمیت این موضوع به دلیل وابستگی بیشتر به فناوری نمک زدایی افزایش می یابد. خلیج فارس یکی از مهم ترین مناطق جهان از نظر تمرکز واحدهای نمک زدایی است و ویژگی های هیدرودینامیکی و اقلیمی خاص آن، از جمله نیمه بسته بودن حوضه، تبخیر زیاد و محدود بودن تبادل آب با آب های آزاد، ضرورت بررسی دقیق تر اثرات تخلیه پساب شور را افزایش می دهد. در چنین شرایطی، بررسی اثر یک واحد نمک زدایی به تنهایی ممکن است برای ارزیابی شرایط واقعی منطقه کافی نباشد؛ زیرا پساب حاصل از واحدهای مختلف می تواند در مقیاس منطقه ای بر الگوی شوری آب اثرگذار باشد.

در همین راستا، Nesterov (2025) با استفاده از یک مدل سه بعدی گردش آب، اثر واحدهای نمک زدایی ساحلی بر شوری خلیج فارس را در مقیاس منطقه ای بررسی کرد. در این پژوهش ظرفیت ۷۳۸ واحد نمک زدایی ساحلی در مدل در نظر گرفته شد و نتایج دو شبیه سازی سه ساله، شامل شرایط پایه و شرایط همراه با اثر واحدهای نمک زدایی، با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزایش شوری در مقیاس کل خلیج فارس نسبتاً محدود است، اما در نزدیکی محل های تخلیه و به ویژه در مناطقی با تبادل و تهویه ضعیف، افزایش شوری می تواند به میزان قابل توجهی بیشتر باشد. همچنین اثرات شوری در برخی مناطق می تواند تا فاصله قابل توجهی از محل تخلیه گسترش یابد. این نتایج اهمیت بررسی همزمان چندین واحد نمک زدایی و اثرات تجمعی آن ها را در مقیاس منطقه ای نشان می دهد.

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه انتشار و تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن‌ها انجام شده است. به عنوان مثال، مقاله ارائه‌شده در شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران با استفاده از مدل عددی MOHID Water، نحوه پخش آلاینده‌ها در پیکره‌های آبی دریای عمان و منطقه بندر جاسک را بررسی کرده و نتایج آن نشان داده است که طراحی مناسب سیستم خروجی پساب می‌تواند در کاهش اثرات نامطلوب بر محیط پذیرنده مؤثر باشد (Rabi Purkismi et al., 2016). همچنین مطالعه‌ای ارائه‌شده در اولین همایش ملی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، محیط‌زیست و منابع طبیعی پایدار، به بررسی تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن با استفاده از پخش‌کننده‌های میله‌ای (دیفیوزرها) پرداخته و نشان داده است که استفاده مناسب از سیستم پخش‌کننده می‌تواند با افزایش اختلاط و رقیق‌سازی، موجب کاهش چگالی و شوری توده پساب شود. همچنین افزایش فاصله محل تخلیه از ساحل و افزایش عمق تخلیه می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای رقیق‌سازی پساب فراهم کند (Shaghghi et al., 2024).

با وجود مطالعات متعدد انجام‌شده درباره اثرات زیست‌محیطی آب‌شیرین‌کن‌ها و نحوه انتشار پساب شور، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها بر بررسی یک واحد نمک‌زدایی، یک نقطه تخلیه یا مقیاس محدود پیرامون محل تخلیه تمرکز داشته‌اند. در این مطالعات، رفتار پساب در میدان نزدیک و دور و نقش پارامترهای هیدرودینامیکی و مشخصات دیفیوزر به‌طور گسترده بررسی شده است. با این حال، بررسی اثرات همزمان و تجمعی تعداد زیادی واحد نمک‌زدایی در مقیاس یک حوضه نیمه‌بسته، به‌ویژه با در نظر گرفتن پراکنش مکانی واحدها و شرایط هیدرودینامیکی منطقه، همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است. نتایج مطالعه Nesterov (2025) نیز نشان می‌دهد که اثر واحدهای نمک‌زدایی تنها به محدوده بسیار نزدیک محل تخلیه محدود نمی‌شود و در مناطقی با گردش و تبادل آب ضعیف می‌تواند در مقیاس منطقه‌ای اهمیت بیشتری پیدا کند.

از این رو، با توجه به تمرکز بالای واحدهای نمک‌زدایی در اطراف خلیج فارس و اهمیت شوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اثرگذاری پساب شور، بررسی اثرات تجمعی این واحدها با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌تواند تصویر جامع‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها ارائه دهد. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی، به بررسی نحوه پراکنش پساب شور و اثرات تجمعی ناشی از تخلیه واحدهای نمک‌زدایی در خلیج فارس می‌پردازد و تلاش می‌کند نقش شرایط هیدرودینامیکی و توزیع مکانی واحدهای نمک‌زدایی را در تغییرات شوری محیط دریایی ارزیابی کند.

روش‌شناسی پژوهش

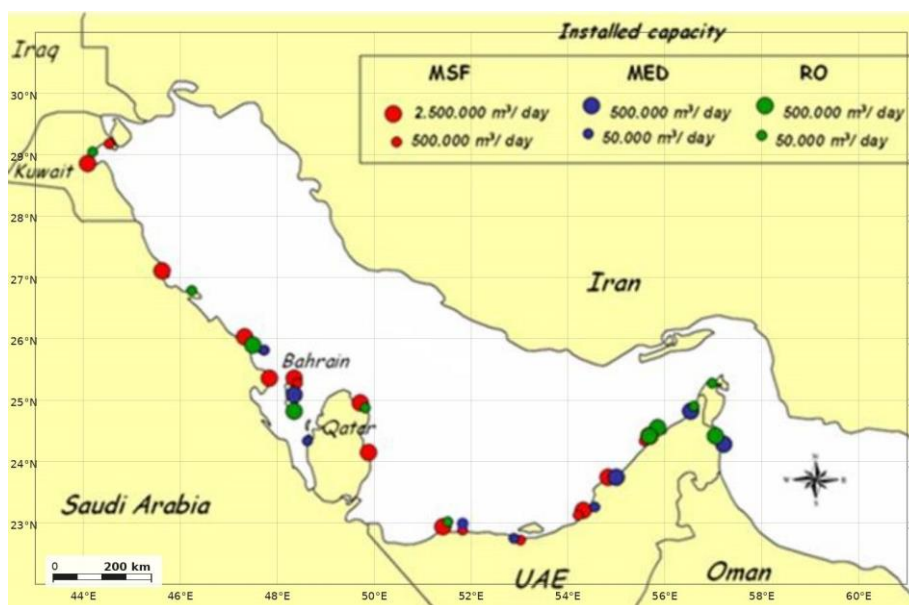
این پژوهش با هدف بررسی اثرات تجمعی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها بر منابع آب و محیط‌زیست دریایی انجام شده است. در این مقاله هم به بررسی مطالعات پیشین پرداخته‌شده و هم مدل‌سازی عددی تا درک کامل‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی حاصل از توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها به دست‌آید. با درک نکات مثبت تحقیقات انجام شده و توجه به نواقص آن‌ها از انجام فعالیت‌های تکراری و اشتباهات رایج جلوگیری به عمل خواهد آمد. علاوه بر این، می‌توان تجارب به دست‌آمده را در جهت بهبود تحقیق پیش رو مورد استفاده قرار داد. به همین جهت در این بخش سعی می‌شود که مروری کلی بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه بررسی پخش آلودگی ناشی از پساب خروجی از کارخانجات و صنایع انجام شود.

برای جمع‌آوری منابع، جست‌وجوی عظیمی در پایگاه‌های داده بین‌المللی از جمله ScienceDirect و Google Scholar و همین‌طور پایگاه‌های فارسی مثل Civilica و SID انجام گرفت. برای رسیدن به جدیدترین یافته‌ها بازه زمانی مطالعات بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد. تا بروزترین یافته‌ها درباره اثرات شوری، دما و ترکیبات شیمیایی پساب پوشش داده شود. معیار انتخاب مقالات بررسی اثرات پساب بر محیط‌های نیمه‌محصور (به

ویژه خلیج فارس) و ارائه داده‌های کمی از ویژگی‌های پساب بود. در آخر، از میان منابع یافت شده، حدود ۴۰ مقاله که ارتباط بیشتری با موضوع داشتند انتخاب و تحلیل شدند.

در ادامه، ابتدا مشخصات هر آب شیرین کن از جمله حجم و دمای پساب، ظرفیت تولید، میزان شوری خروجی و موقعیت مکانی در منطقه ساحلی استخراج شد. سپس با بهره‌مندی از مدل‌سازی عددی، الگوی احتمالی انباشت شوری و دما در حضور چندین واحد فعال بررسی شد. در نهایت این تحلیل باعث شد تا نواحی حساس و محدوده تاثیر تجمعی شناسایی شود. برای اعتبار بیشتر یافته‌های مرور ادبیات، بخشی از داده‌ها و نتایج مدل‌سازی عددی حاصل از پایان‌نامه‌ی نویسنده نیز مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب این داده‌ها با مرور مطالعات موجود، دیدگاه دقیق‌تری از نحوه اثر هم‌زمان چند واحد نمک‌زدایی بر محیط دریا ارائه می‌دهد.

بر اساس این تحلیل‌ها، چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی اثرات تجمعی در طرح‌های توسعه پایدار آینده ارائه شده است که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت از محیط‌زیست دریایی کمک کرد. برای بررسی تاثیر تجمعی واحدهای آب شیرین کن، موقعیت و ظرفیت آن‌ها در سواحل خلیج فارس بررسی شد (شکل ۱). همان‌طور که مشخص است، تراکم این واحدها در سواحل جنوبی به ویژه در عربستان و امارات بیش‌تر است که می‌تواند بر تغییرات شوری منطقه اثرگذار باشد.



شکل ۱. موقعیت و ظرفیت بهره‌برداری از سیستم‌های RO، MSF و MED در سواحل حاشیه خلیج فارس
 Figure 1. Location and operational capacity of RO, MSF, and MED systems on the Persian Gulf coast
 (Al-Barwani and Purnama, 2008)

یافته‌ها و بحث

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که پدیده پخش شوری در محیط‌های آبی یک فرایند پیچیده است که به عوامل و پارامترهای مختلفی بستگی دارد. کارهای آزمایشگاهی انجام‌شده در این زمینه به بررسی برخی از این عوامل پرداخته‌اند. همچنین بکارگیری مدل‌های عددی دو و سه بعدی بطوری گسترده‌ای در پروژه‌های تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌است و مدل‌های مختلفی برای این منظور طرح و توسعه داده شده‌اند. نتایج این مدلسازی‌ها

نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند تعریف گویا و شناخت کافی از منطقه مورد مطالعه و تاثیر عوامل محیطی بر پخش شوری را ارائه دهد (Bashitialshaer, 2011).

یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که شوری پساب معمولاً بین ۱/۵ تا ۲ برابر شوری طبیعی آب دریا است و دمای آن نیز حدود ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است. این موضوع، به ویژه در مناطق نیمه‌محصور و کم عمق مانند خلیج فارس، می‌تواند سبب افزایش تدریجی شوری در لایه‌های پایینی آب و کاهش اکسیژن محلول و در نتیجه تغییر در تعادل محیط‌زیست دریا شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد کمی از تحقیقات به اثرات تجمعی چند واحد نمک‌زدایی در یک منطقه پرداخته است در صورتی که در بسیاری از مناطق ساحلی، چندین آب‌شیرین‌کن در فواصل کم از یکدیگر قرار دارند در این شرایط اثرات پساب آب‌شیرین‌کن‌ها به صورت تکی معنا ندارد و پیامدهای حاصل از فعالیت تمام واحدها می‌تواند شدت و گستره آلودگی را چند برابر کند. (Chenoweth & Al-Masri, 2022; Chow et al., 2019). برای روشن‌تر شدن موضوع، نتایج مدل‌سازی عددی انجام‌شده در خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نحوه پخش شوری و حرارت ناشی از پساب کارخانه کارخانه‌های نمک‌زدایی خلیج فارس بررسی شد و نحوه پخش این آلاینده‌ها در محیط آبی توسط مدل هیدرودینامیکی سه بعدی کوه‌رنس شبیه‌سازی شد. در این مقاله، تمرکز اصلی بر تحلیل اثرات تجمعی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها در خلیج فارس قرار گرفته است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که اثر هر واحد را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، در این پژوهش اکثر واحدهای فعال در محدوده ساحلی به طور همزمان در مدل وارد شدند تا تاثیر هم‌افزایانه پساب‌ها بر تغییرات شوری و دمای آب بررسی شود.

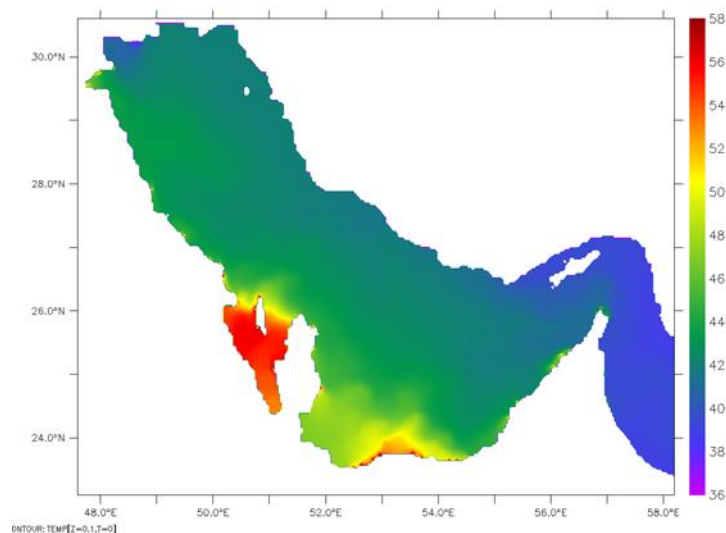
برای مقایسه مفهومی، نتایج پژوهش‌های پیشین مانند Driss et al (2025) و pereira et al (2024) که عملکرد تک‌واحدی را بررسی کرده‌اند، به عنوان مبنایی برای درک تفاوت شدت اثرات استفاده شد.

برای شبیه‌سازی اثرات تجمعی آب‌شیرین‌کن‌ها بر خلیج فارس، دو پارامتر کلیدی یعنی شوری و دمای پساب نسبت به آب محیط در نظر گرفته شد. براساس داده‌های عملیاتی منطقه، شوری پساب به طور میانگین ۵ psu بیشتر و دمای آن ۷ درجه سانتی‌گراد بالاتر از آب دریای پیرامونی فرض شد. سایر شرایط مرزی شامل جریان‌های غالب فصلی و تبادل با دریای عمان از داده‌های میانگین زمستانی استخراج شد. مشخصات اصلی مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

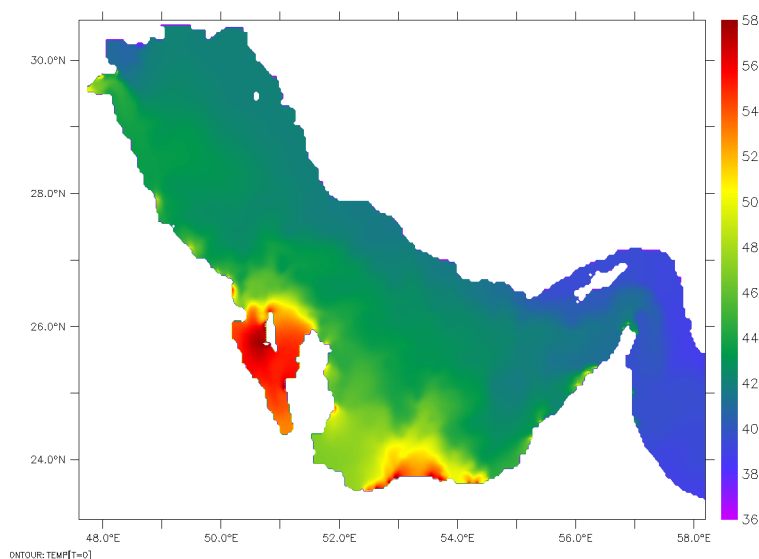
جدول ۱. مفروضات کلیدی مدل

Table 1. Key Model Assumptions

میزان شوری پساب	میزان دمای پساب	فصل شبیه‌سازی شده	لایه‌های بررسی شده
۵ psu بیشتر از شوری محیط	۷ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای محیط	زمستان	سطح و بستر



شکل ۲. پیش بینی پخش شوری توسط مدل در لایه سطحی در فصل زمستان (خروجی مدل عددی)
Figure 2. Prediction of salinity dispersion by the model in the surface layer during winter (numerical model output)



شکل ۳. پیش بینی پخش شوری توسط مدل در لایه بستر در فصل زمستان (خروجی مدل عددی)
Figure 3. Prediction of salinity dispersion by the model in the bottom layer during winter (numerical model output)

شکل ۲ و ۳ پیش بینی پخش شوری را به ترتیب در لایه سطح و بستر در فصل زمستان نشان می دهد. همانطور که می بینیم، بیشترین غلظت شوری در نواحی جنوبی خلیج فارس، به ویژه در نزدیکی سواحل عربستان و امارات، مشاهده می شود که با تراکم بالای واحدهای نمک زدایی در این مناطق مطابقت دارد. در لایه سطحی، پراکندگی شوری نسبتاً محدود است و اثر جریان های سطحی موجب رقیق سازی سریع تر پساب شور می شود. با این حال، در لایه بستر، به دلیل چگالی بالاتر پساب و حرکت کند جریان ها، انباشت شوری قابل توجه تر بوده و نواحی پرخطر به صورت لکه ای و گسترده تر ظاهر می شوند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که در شرایط زمستانی با توجه به کاهش دما و افزایش چگالی آب، بخش عمده‌ای از پساب شور در لایه‌های زیرین تجمع می‌یابد. این موضوع باعث افزایش میانگین شوری در نواحی جنوبی تا حدود ۲-۳ psu بالاتر از مقدار طبیعی شده است. این تغییرات باعث گسترش محدوده اثر پساب تا دو برابر نسبت به حالت تک‌واحد می‌شود. این الگو در سایر مطالعات در دریای سرخ و عمان نیز گزارش شده است.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پساب وارد شده به آب، که شور و چگال می‌باشد به میزان زیادی به عمق رفته، پخش پساب در لایه‌های زیرین آب با سرعت بیشتر صورت می‌گیرد. در صورتی که بخش پساب در لایه‌های سطحی نسبت به بستر کمتر بوده و با توجه به جهت جریان‌های سطحی در تنگه، پساب در سطح در نزدیکی محل تخلیه باقی‌مانده و از انتشار آن جلوگیری می‌شود. پخش پساب با شوری بالا در لایه‌های نزدیک بستر می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست بستر دریا داشته‌باشد و سبب تغییر در اکوسیستم دریایی اطراف محل تخلیه شده و موجب از بین رفتن حیات بسیاری از موجودات دریایی بسترزی شود. زندگی بسیاری از موجودات دریایی که در بستر دریا زندگی می‌کنند مانند مرجان‌ها و سایر سخت‌پوستان و نرم‌تنان مطمئناً با افزایش شوری آب تحت تأثیر قرار گرفته و یا از بین می‌رود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش‌شده توسط [Driss et al \(2025\)](#) و [pereira et al \(2024\)](#) هم‌خوانی دارد و تاکید می‌کند که اثرات تجمعی ناشی از چندین واحد نمک‌زدایی بسیار فراتر از یک واحد تک می‌باشد. این مساله ضرورت انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی منطقه‌ای به‌جای ارزیابی محلی را برجسته می‌کند. از جنبه اقتصادی و مدیریتی نیز نشان می‌دهد که نادیده گرفتن اثرات تجمعی در طرح‌های توسعه می‌تواند باعث کاهش بهره‌وری در شیلات، کاهش توریست و همچنین افزایش هزینه‌های نگهداری تاسیسات دریایی شود. لازم و ضروری است که ارزیابی‌های زیست‌محیطی از سطح تک‌واحد بالاتر رفته و اثر همزمان چندین واحد نمک‌زدایی را در واحد منطقه‌ای بررسی کنند.

نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که توسعه همزمان چندین واحد آب‌شیرین‌کن در مناطق ساحلی می‌تواند در مقایسه با احداث یک واحد منفرد، موجب تشدید و گسترش اثرات تجمعی تخلیه پساب شود. افزایش شوری و دمای آب در مجاورت نقاط تخلیه می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط دریایی را تغییر داده و در صورت تداوم، بر پایداری اکوسیستم‌های حساس ساحلی اثرگذار باشد. این موضوع در مناطق نیمه‌محسوری مانند خلیج فارس، با توجه به نرخ بالای تبخیر و محدودیت نسبی تبادل آب، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

نتایج بررسی سناریوهای مختلف نشان داد که فعالیت همزمان چندین واحد آب‌شیرین‌کن موجب ایجاد نواحی با شوری بالاتر در مجاورت بستر و افزایش گستره اثرگذاری پساب می‌شود. همچنین، تغییر دبی تخلیه پساب در محدوده سناریوهای بررسی‌شده، تأثیر قابل‌توجهی بر الگوی کلی انتشار نداشته و عمدتاً موجب تغییر در مساحت ناحیه تحت تأثیر شده است. افزایش شوری در نزدیکی بستر نیز می‌تواند بر ساختار و ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان اثرگذار باشد. تداوم چنین شرایطی، در صورت عدم مدیریت مناسب، می‌تواند پیامدهایی همچون کاهش کیفیت آب، تغییر شرایط اکولوژیکی بستر، کاهش اکسیژن محلول و ایجاد فشار مضاعف بر زیستگاه‌های حساس از جمله اجتماعات مرجانی و مانگروها را به همراه داشته باشد.

از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز تداوم این روند می‌تواند با کاهش بهره‌وری فعالیت‌های شیلاتی، کاهش جذابیت گردشگری ساحلی و افزایش تعارض میان بخش‌های مختلف بهره‌بردار از منابع آب همراه باشد. بنابراین، در ارزیابی

زیست‌محیطی پروژه‌های جدید آب شیرین کن، بررسی اثرات تجمعی و منطقه‌ای ناشی از استقرار همزمان چندین واحد، در کنار اثرات مربوط به هر واحد به صورت منفرد، ضروری است.

با توجه به نتایج این پژوهش، برای کاهش آثار نامطلوب ناشی از تخلیه پساب آب شیرین کن‌ها، پیشنهاد می‌شود:

محل و نحوه استقرار آب شیرین کن‌های جدید با توجه به شرایط هیدرودینامیکی منطقه، عمق آب، جهت و سرعت جریان و فاصله از زیستگاه‌های حساس تعیین شود.

در طراحی سامانه‌های تخلیه، استفاده از روش‌های افزایش اختلاط و رقیق‌سازی اولیه پساب، از جمله پخش‌کننده‌های چندخروجی و تخلیه در عمق مناسب، مورد توجه قرار گیرد.

به جای ارزیابی مستقل هر واحد، اثرات تجمعی چندین واحد آب شیرین کن در مقیاس منطقه‌ای در مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی لحاظ شود.

پایش مستمر پارامترهایی نظیر شوری، دما، اکسیژن محلول و سایر شاخص‌های کیفی آب در محدوده تخلیه و مناطق پیرامونی انجام شود.

در تعیین ظرفیت توسعه واحدهای آب شیرین کن، ظرفیت طبیعی منطقه برای رقیق‌سازی و انتقال پساب و همچنین حساسیت اکوسیستم‌های ساحلی در نظر گرفته شود.

استفاده مجدد از پساب و بازیابی بخشی از نمک‌ها و مواد با ارزش موجود در پساب، در صورت امکان فنی و اقتصادی، به منظور کاهش حجم پساب دفعی مورد بررسی قرار گیرد.

تصمیم‌گیری درباره توسعه آب شیرین کن‌ها در چارچوب مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی و با در نظر گرفتن همزمان ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی انجام شود.

با توجه به محدودیت‌های مطالعه حاضر، برای تکمیل و توسعه نتایج پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده:

اثرات تخلیه همزمان پساب چندین آب شیرین کن با در نظر گرفتن آرایش‌ها و فواصل مختلف نقاط تخلیه بررسی شود.

سناریوهای مختلف شرایط هیدرودینامیکی، از جمله تغییرات فصلی جریان، باد، جزر و مد و شرایط آرام و طوفانی، در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شود.

اثرات بلندمدت و تجمعی تخلیه پساب بر شوری، دما، اکسیژن محلول و سایر پارامترهای کیفی آب بررسی شود.

برهم‌کنش پساب آب شیرین کن با رسوبات بستر و تغییرات احتمالی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات مورد مطالعه قرار گیرد.

نتایج مدل عددی با داده‌های پایش میدانی در نقاط مختلف منطقه اعتبارسنجی و عدم قطعیت نتایج مدل ارزیابی شود. اثرات زیست‌محیطی تخلیه پساب بر زیستگاه‌های حساس مانند اجتماعات مرجانی، مانگروها و سایر جوامع کفزی به صورت کمی بررسی شود.

سناریوهای مختلف مدیریت و دفع پساب، از جمله رقیق‌سازی، استفاده از پخش‌کننده‌های مناسب، تخلیه در اعماق مختلف و روش‌های کاهش حجم پساب، از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی با یکدیگر مقایسه شوند.

اثرات تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دمای آب دریا، تغییر الگوی تبخیر و تغییرات احتمالی در هیدرودینامیک منطقه، بر پراکنش و ماندگاری پساب در مطالعات آتی لحاظ شود.

در نهایت، توسعه پایدار فناوری آب شیرین کنی در مناطق ساحلی مستلزم آن است که تصمیم‌گیری درباره احداث و بهره‌برداری از واحدهای جدید، نه به صورت منفرد، بلکه در چارچوب ظرفیت اکولوژیکی منطقه و اثرات تجمعی فعالیت‌های موجود و آتی انجام شود. تلفیق مدل‌سازی عددی، پایش مستمر محیطی و مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی می‌تواند زمینه را برای کاهش آثار زیست‌محیطی تخلیه پساب و بهره‌برداری پایدارتر از منابع آب فراهم کند.

References

- Al-Barwani, H. H., & Purnama, A. (2008). Evaluating the effect of producing desalinated seawater on hypersaline Arabian Gulf. *European Journal of Scientific Research*, 22(2), 279–285. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134065014>
- Backer, S. N., Bouaziz, I., Kallayi, N., Thomas, R. T., Preethikumar, G., Takriff, M. S., Laoui, T., & Atieh, M. A. (2022). Brine solution: Current status, future management and technology development. *Sustainability*, 14(11), 6752.
- Bashitlshaer, R. (2011). *Analysis and modelling of desalination brines* (1052 ed.) [Doctoral thesis (compilation), Division of Water Resources Engineering]. Lund University.
- Chenoweth, J., & Al-Masri, R. A. (2022). Cumulative effects of large-scale desalination on the salinity of semi-enclosed seas. *Desalination*, 526, 115522. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115522>
- Chow, A. C., Verbruggen, W., Morelissen, R., Al-Osairi, Y., Ponnumani, P., Lababidi, H. M. S., Al-Anzi, B., & Adams, E. E. (2019). Numerical prediction of background buildup of salinity due to desalination brine discharges into the Northern Arabian Gulf. *Water*, 11(11), 2284. <https://doi.org/10.3390/w11112284>
- Clark, G. F., Knott, N. A., Miller, B. M., Kelaher, B. P., Coleman, M. A., Ushiamo, S., & Johnston, E. L. (2018). First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics. *Water Research*, 145, 757–768. DOI: 10.1016/j.watres.2018.08.071
- Driss, A., Mabrouki, J., Fahdi, G., & El Hajjaji, S. (2025). Environmental sustainability of desalination: A critical review of brine treatment challenges and mitigation strategies. *Water Conservation & Management*, 9(1), 55–60. <https://doi.org/10.26480/wcm.01.2025.55.60>
- Global Water Intelligence. (n.d.). *IDA desalination plants inventory*. Retrieved June 28, 2026, from <https://www.desaldata.com>
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15. DOI: 10.1016/j.desal.2007.03.009
- Nesterov, O. (2025). An assessment of seawater desalination impact on salinities in the Arabian/Persian Gulf using a 3D circulation model. *Ocean Modelling*, 194, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2025.102503>
- Omerspahic, M., Al-Jabri, H., Siddiqui, S. A., & Saadaoui, I. (2022). Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian Gulf: A review. *Frontiers in Marine Science*, 9, 845113. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>
- Palomar, P., Lara, J. L., Losada, I. J., Rodrigo, M., & Álvarez, A. (2012). Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination*, 290, 14–27. DOI: 10.1016/j.desal.2011.11.037
- Porto Pereira, S., Rodrigues, M. F., Rosman, P. C. C., Rosman, P., Bleninger, T., Lima Neto, I. E., Teixeira, C. E. P., Sola, I., & Sánchez Lizaso, J. L. (2024). A novel tool for modeling the near- and far-field dispersion of brine effluent from desalination plants. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1377252. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1377252>
- Rabi Purkismi, R., Mohammadvali Samani, J., Mazaheri, M., & Hamidi Razi, H. (2016). *Investigating the distribution of desalination effluents in the Oman Sea in Bandar Jask region using the numerical model of MOHID Water*. The 16th Iranian Hydraulics Conference, Ardabil, Iran.
- Rasoulpour, S., & Akbari, H. (2024). Development of desalination plants within the semi-enclosed Persian Gulf. *Applied Water Science*, 14, 189. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02251-x>
- Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research*, 44(18), 5117–5128. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.036
- Shaghaghi, G., Javid, A. H., Allahyaribeik, S., & Mashinchian Moradi, A. (2024). Determining the optimization of seawater concentrate discharge of coastal desalination plants into the marine environment, based on numerical modeling. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 22(2), 555–567. <https://doi.org/10.1007/s40201-024-00914-0>
- Sharifinia, M., Keshavarzifard, M., & Hosseinkhezri, P. (2025). Impact of desalination plant brine discharge on macrobenthic communities in the Persian Gulf. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 221, 105465.

- Sirota, R., Winters, G., Levy, O., Marques, J., Paytan, A., Silverman, J., Sisma-Ventura, G., Rahav, E., Antler, G., & Bar-Zeev, E. (2024). Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58(13), 5631–5645. DOI: 10.1021/acs.est.3c07748
- Stein, S., Michael, H., & Dugan, B. (2021). Injection of desalination brine into the saline part of the coastal aquifer; environmental and hydrological implications. *Water Research*, 207, 117820. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117820>