

Mega-Desalination Projects as Drivers of Coastal Land Use Change and Marine Ecosystem Impacts: A Systematic Review of Global Evidence with Implications for the Persian Gulf and the Sea of Oman

Mohsen Dehghani Ghanatghehstani^{1*}; Akbar Ghodousiyan¹

¹. Department of Environment, B.A. C. Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran.

^{*}Email Address: m.dehghani933@iaua.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Review Paper	Mega-desalination projects have become a central strategy for addressing water scarcity in arid coastal regions, yet their broader spatial and governance implications remain insufficiently examined. While prior studies have largely focused on operational impacts such as brine discharge, limited attention has been given to desalination-driven coastal land use change and its cumulative ecological and social consequences. This systematic review synthesizes global evidence on how mega-desalination projects act as drivers of coastal land transformation and assesses their impacts on marine and coastal ecosystems as well as emerging socio-environmental conflicts. Following PRISMA guidelines, peer-reviewed articles and authoritative international reports published in this decade were systematically screened across major scientific databases. Thirty high-relevance studies were included and analyzed using an integrated framework that links land use change, ecosystem impacts, and governance dynamics. The findings indicate that mega-desalination projects often serve as spatial anchors for industrial clustering and shoreline hardening, resulting in habitat degradation, increased salinity and thermal stress, and reduced ecosystem resilience. Furthermore, governance gaps—characterized by centralized planning, limited stakeholder participation, and unequal cost–benefit distribution—emerge as key drivers of conflict between governments, local communities, and environmental systems. These insights are particularly relevant for the Persian Gulf and the Sea of Oman, where rapid desalination expansion intersects with ecological vulnerability and contested coastal governance.
Article History:	
Received Date: 2026/06/27	
Revised Date: 2026/09/16	
Accepted Date: 2026/10/21	
Published Date: 2026/10/21	
Keywords: Mega-desalination, Coastal land use change, Environmental governance, Socio-environmental conflict, Persian Gulf, Sea of Oman.	
Cite this article:	Mohsen Dehghani Ghanatghehstani, Akbar Ghodousiyan (2026) Mega-Desalination Projects as Drivers of Coastal Land Use Change and Marine Ecosystem Impacts: A Systematic Review of Global Evidence with Implications for the Persian Gulf and the Sea of Oman, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(2), Pages 11307-11325.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The rapid expansion of large-scale seawater desalination has become a cornerstone of water security strategies in arid and semi-arid coastal regions, particularly in the Persian Gulf and the Sea of Oman. In these regions, desalination now constitutes the dominant source of municipal and industrial freshwater supply. Despite its strategic importance, desalination is still largely framed as a technical response to water scarcity, overlooking its broader role as a systemic coastal intervention that simultaneously reshapes land use, marine ecosystem structure, and governance configurations. Recent literature increasingly indicates that mega-desalination facilities function not as isolated infrastructures but as spatially embedded components of industrial coastal corridors. These include co-located power plants, petrochemical industries, ports, and logistics hubs. This co-location drives long-term coastal land use change through shoreline hardening, land reclamation, restricted access zones, and the progressive industrialization of coastal landscapes. However, the cumulative implications of these transformations for marine ecosystem resilience and socio-environmental conflict—especially in semi-enclosed seas such as the Persian Gulf—remain insufficiently synthesized.

Methods and Analytical Framework

This study conducts a systematic review of 30 peer-reviewed international and Persian-language sources focusing on desalination impacts, coastal land use change, marine ecosystem responses, and governance structures in arid coastal systems. The dataset integrates empirical field investigations, remote sensing and GIS analyses, oceanographic modelling studies, life-cycle assessments, and governance-oriented research. A socio-ecological systems framework is applied to synthesize evidence across four interlinked dimensions: technological scale, spatial planning dynamics, ecological stress pathways, and institutional governance capacity. The Persian Gulf and Sea of Oman are used as focal case regions due to their extreme environmental baseline conditions (high temperature, salinity, and evaporation rates) and exceptionally high density of desalination infrastructure.

Results and discussion

Desalination as a Driver of Coastal Land Use Transformation: Evidence consistently demonstrates that desalination plants act as anchoring infrastructures that restructure coastal land use patterns. Site selection is typically driven by proximity to energy systems, deep-water access, and industrial zones, reinforcing coastal industrial clustering. This process converts multifunctional or ecologically sensitive shorelines into permanently industrialized landscapes. Remote sensing studies confirm accelerated shoreline modification, land reclamation, and loss of natural buffers along the southern Iranian coast and Arabian Peninsula. These transformations generate path dependency, constraining future coastal planning and locking regions into high-impact development trajectories.

Ecological Impacts Beyond Brine Discharge: While brine discharge remains a central concern, the literature indicates that ecological impacts arise from interacting stressors rather than single-point pollution. Field evidence from the Persian Gulf shows elevated salinity, temperature, and heavy metal concentrations near outfalls, accompanied by declines in benthic biodiversity and shifts in community composition. Modelling studies suggest that although basin-scale salinity changes may appear moderate, localized ecological thresholds are frequently exceeded in shallow coastal zones. Importantly, land use change—particularly shoreline armoring and habitat removal—reduces ecosystem resilience by eliminating mangroves, seagrass beds, and tidal flats, thereby amplifying cumulative ecological stress.

Governance and Socio-Environmental Conflict: Environmental degradation does not automatically translate into overt conflict; rather, governance structures mediate its emergence. Desalination-intensive regions are characterized by centralized decision-making, fragmented sectoral mandates, and limited stakeholder participation. Environmental impact assessments remain largely project-based, failing to capture cumulative land-sea interactions and long-term coastal transformation. Consequently, coastal communities often experience reduced shoreline access, declining fisheries, and ecological degradation, while benefits are redistributed to distant urban and industrial users. This distributional asymmetry reframes impacts as issues of procedural justice and legitimacy, generating latent socio-environmental conflict even in politically stable contexts.

Integrated Conceptual Model: The synthesis leads to a four-component conceptual model in which desalination-driven conflict emerges from misalignments between: (1) technological-spatial drivers (plant scale and industrial co-location), (2) ecological stress

accumulation, (3) governance filters (institutional coordination and regulatory coherence), and (4) socio-distributional dynamics. Conflict is therefore structural and systemic rather than episodic.

Conclusion

The study demonstrates that desalination sustainability challenges are fundamentally spatial, ecological, and institutional. Addressing them requires a shift from project-level mitigation toward cumulative impact assessment, conflict-sensitive governance, and ecosystem-based coastal planning. Such an integrated approach is essential for maintaining environmental integrity and social legitimacy in desalination-dependent regions



پروژه‌های مگا آب شیرین کن به عنوان محرک تغییر کاربری اراضی ساحلی و اثرات آن بر اکوسیستم‌های دریایی: مرور سیستماتیک شواهد جهانی با دلالت‌هایی برای خلیج فارس و دریای عمان

محسن دهقانی قنات‌عستانی^{۱*}، اکبر قدوسی‌ان^۱

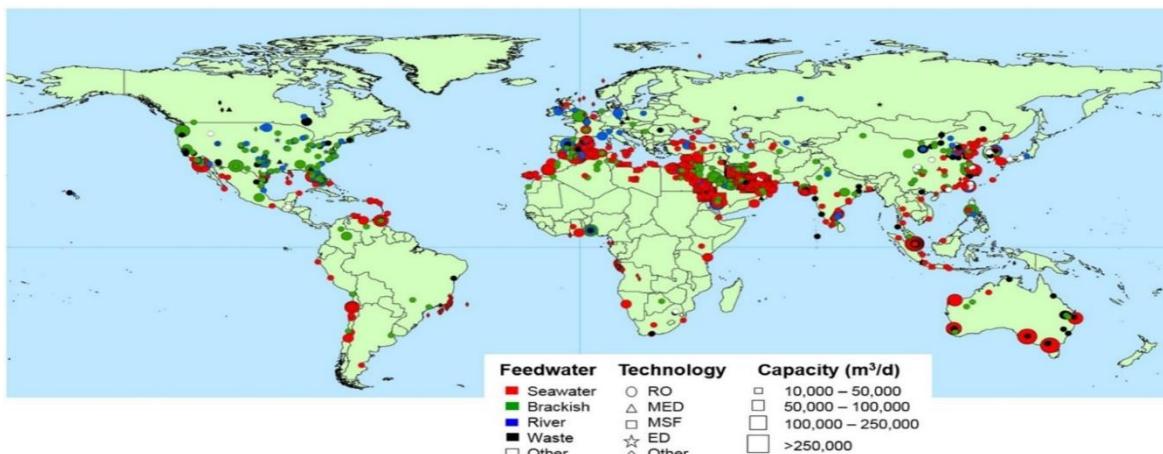
^{۱*} - گروه محیط زیست، واحد بندر عباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.dehghani933@iaau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
گسترش روز افزون پروژه‌های مگا آب شیرین کن (نمک‌زدایی بزرگ مقیاس) در مناطق خشک و نیمه‌خشک ساحلی، به‌ویژه در خلیج فارس و دریای عمان، پیامدهایی فراتر از تأمین آب شیرین ایجاد کرده است که تاکنون این پیامدها به‌صورت روشمند و منسجم مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. این مطالعه با بهره‌گیری از یک مرور سیستماتیک، به بررسی پیوندهای ساختاری میان نمک‌زدایی بزرگ‌مقیاس، تغییر کاربری اراضی ساحلی، تخریب اکوسیستم‌های دریایی و بروز تعارضات اجتماعی-زیست‌محیطی می‌پردازد. با تحلیل چند وجهی مطالعات بین‌المللی و منطقه‌ای در سامانه‌های دریایی با شرایط اقلیمی، اقیانوس‌شناختی و نهادی مشابه خلیج فارس و دریای عمان، نشان داده می‌شود که نمک‌زدایی نه تنها یک فناوری تأمین آب، بلکه محرک فضایی-نهادی برای بازآرایی سرزمینی سواحل است. یافته‌ها حاکی از آن است که هم‌مکانی تأسیسات نمک‌زدایی با خوشه‌های صنعتی ساحلی، موجب تثبیت الگوهای صنعتی کاربری زمین، کاهش انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌ها و تشدید اثرات تجمعی زیست‌محیطی می‌شود. در دریاها و نیمه‌بسته‌های مانند خلیج فارس، این فرایندها از طریق برهم‌کنش با شوری و دمای زمینه‌ای بالا، دامنه و شدت اثرات اکولوژیکی را تقویت می‌کنند. افزون بر این، ساختارهای حکمرانی متمرکز و بخشی، با ناتوانی در مدیریت اثرات تجمعی و مشارکت ذی‌نفعان محلی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تبدیل فشارهای محیطی به تعارضات نهفته اجتماعی ایفا می‌کنند. این مطالعه با ارائه یک مدل مفهومی یکپارچه، نشان می‌دهد که تعارضات مرتبط با نمک‌زدایی حاصل ناهماهنگی میان مقیاس فناوری، ظرفیت اکولوژیکی و سازوکارهای حکمرانی است. نتایج بر ضرورت بازتعریف نمک‌زدایی در چارچوب مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی و برنامه‌ریزی حساس به تعارض تأکید دارد و مسیرهایی برای کاهش ریسک‌های بلندمدت زیست‌محیطی و اجتماعی در مناطق ساحلی خشک ارائه می‌کند.	نوع مقاله: مروری تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۲۹ کلید واژه‌ها: مگا آب شیرین کن، تغییر کاربری اراضی ساحلی، حکمرانی زیست‌محیطی، منازعات اجتماعی- زیست‌محیطی، خلیج فارس، دریای عمان.

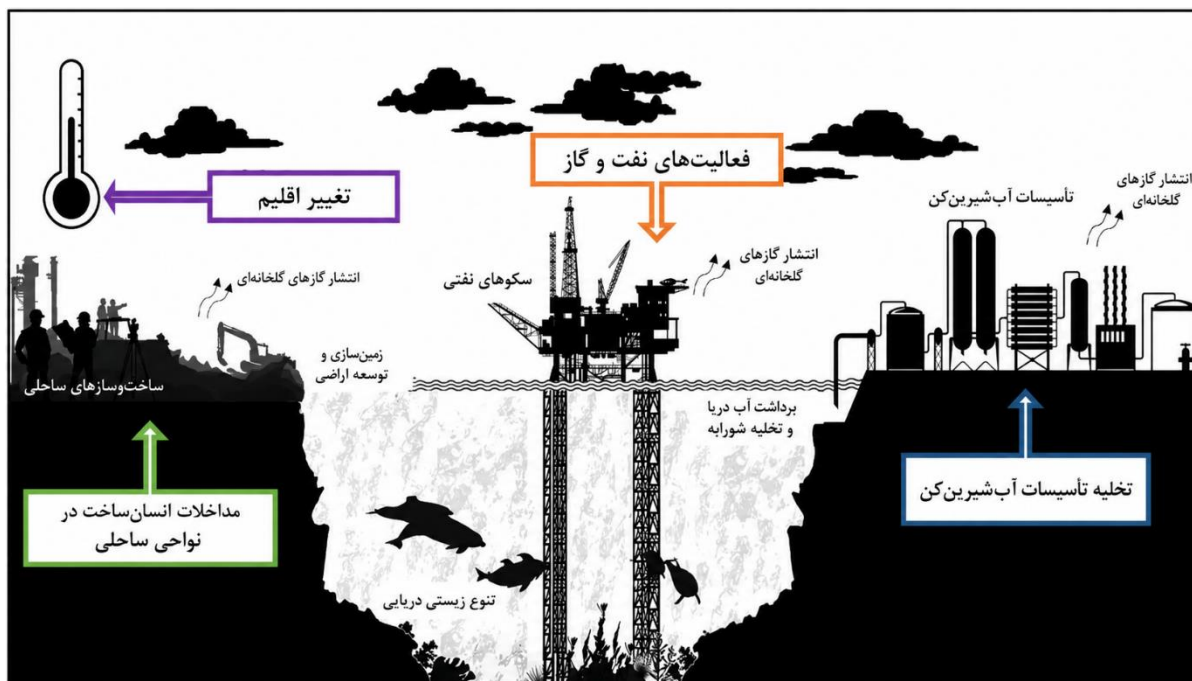
۱- مقدمه

دسترسی پایدار به منابع آب شیرین به یکی از چالش‌های بنیادین قرن بیست و یکم تبدیل شده است؛ چالشی که تحت تأثیر هم‌زمان رشد جمعیت، شهرنشینی شتابان، توسعه صنعتی و تشدید پیامدهای تغییر اقلیم بر چرخه‌های هیدرولوژیکی قرار دارد (Pörtner et al., 2022) (FAO., 2021). کاهش دسترسی به منابع آب سطحی و زیرزمینی متعارف، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بسیاری از کشورها را به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های آب‌شیرین‌کن آب دریا به‌عنوان راهکاری راهبردی برای تأمین امنیت آب سوق داده است (شکل ۱) (UNESCO., 2020). در حال حاضر، فناوری اسمز معکوس (RO) سهم غالب تولید آب شیرین از آب دریا را به خود اختصاص داده و پیش‌بینی می‌شود ظرفیت جهانی آب‌شیرین‌کن‌ها در دهه‌های آینده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد (E. Jones et al., 2019). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزایش شوری و تنش حرارتی ناشی از تخلیه شورابه، می‌تواند آستانه تحمل گونه‌های حساس را در اکوسیستم‌های کم‌عمق ساحلی پشت سر بگذارد و به تغییر ساختار جوامع زیستی، کاهش تنوع زیستی و تضعیف کارکردهای اکوسیستمی منجر شود. علاوه بر این، جانمایی نامناسب سازه‌های برداشت و تخلیه آب، به‌ویژه در مناطق با تبادل آبی محدود، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید یا کاهش شدت این پیامدها ایفا می‌کند (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴) (A. Elsaid et al., 2020).



شکل ۱. پراکنش الگوهای جهانی پروژه‌های مگا نمک‌زدایی و فناوری‌های مرتبط. این شکل توزیع مکانی تأسیسات بزرگ نمک‌زدایی آب (>۱۰۰,۰۰۰ مترمکعب در روز) را بر اساس ظرفیت، نوع آب خوراک و فناوری نمک‌زدایی نشان می‌دهد. فناوری‌های حرارتی نمک‌زدایی آب دریا (MED و MSF) به‌طور عمده در خاورمیانه متمرکز شده‌اند که بازتاب‌دهنده پیوند ساختاری آب و انرژی در این منطقه است. در مقابل، اسمز معکوس (RO) فناوری غالب در اغلب مناطق جهان محسوب می‌شود و با انواع مختلف آب خوراک در سواحل و نواحی داخلی به‌کار گرفته شده است. این الگوهای فضایی تفاوت‌های منطقه‌ای در انتخاب فناوری را برجسته کرده و نقش عوامل انرژی، کیفیت آب و مسیرهای توسعه ساحلی را در شکل‌دهی به گسترش نمک‌زدایی جهانی آشکار می‌سازد (A. Elsaid et al., 2020).

با این حال، بخش عمده ادبیات علمی موجود پیرامون آب‌شیرین‌کن‌ها، بر جنبه‌های فنی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و راهکارهای کاهش آلایندگی متمرکز بوده و نسبت به پیامدهای گسترده‌تر توسعه این تأسیسات بر تغییر کاربری اراضی ساحلی و پویایی‌های اکولوژیکی در مقیاس چشم‌انداز ساحلی توجه کمتری نشان داده است (E. Jones et al., 2019). در واقع، استقرار مگا پروژه‌های آب‌شیرین‌کن غالباً با تبدیل نواحی طبیعی ساحلی به پهنه‌های صنعتی، توسعه زیرساخت‌های انتقال آب و انرژی، و تغییر الگوهای بهره‌برداری از سرزمین همراه است؛ فرایندی که می‌تواند به تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها، تضعیف خدمات اکوسیستمی ساحلی و افزایش فشار بر معیشت جوامع محلی منجر شود. اهمیت این خلأ پژوهشی در پهنه‌هایی نظیر خلیج فارس و دریای عمان به‌عنوان یکی از استراتژی‌ترین کانون‌های اقتصادی جهان دوچندان است. این مناطق به‌دلیل ویژگی‌هایی همچون تبادل آبی محدود، شوری زمینه‌ای بالا و تمرکز بی‌سابقه تأسیسات آب‌شیرین‌کن، و همچنین سایر محرک‌های آلاینده زیست محیطی (نفت و گاز، تغییرات اقلیمی، و ...)، از جمله آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های دریایی جهان در برابر پیامدهای تجمعی تخلیه شورابه و توسعه صنعتی ساحلی محسوب می‌شوند (شکل ۲) (C. Sheppard et al., 2010) (H. A. Naser., 2014). با این وجود، هنوز مرور سیستماتیک و یکپارچه‌ای که نقش آب‌شیرین‌کن‌های مگا صنعتی را به‌عنوان محرک تغییر کاربری اراضی ساحلی و پیامدهای اکولوژیکی آن‌ها بررسی کند، به‌ویژه با تمرکز بر این پهنه‌ها، محدود است. افزون بر ابعاد اکولوژیکی، چارچوب‌های حکمرانی، فرایندهای تصمیم‌گیری و سازوکارهای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی نیز نقش کلیدی در نحوه برنامه‌ریزی، اجرا و پایش پروژه‌های آب‌شیرین‌کن ایفا می‌کنند. ضعف در یکپارچگی نهادی، مشارکت محدود ذی‌نفعان محلی و تمرکز تصمیم‌گیری در سطوح بالادستی می‌تواند به کم‌برآوردی پیامدهای زیست‌محیطی و تشدید تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی در نواحی ساحلی منجر شود. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف مرور سیستماتیک شواهد جهانی، به بررسی نقش پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن به‌عنوان محرک‌های تغییر کاربری اراضی ساحلی و پیامدهای آن‌ها بر اکوسیستم‌های دریایی می‌پردازد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند چارچوبی تحلیلی برای درک بهتر تعاملات زمین-دریا و ارائه دلالت‌های سیاستی جهت برنامه‌ریزی پایدار آب‌شیرین‌کن‌ها، به‌ویژه در مناطقی نظیر خلیج فارس و دریای عمان، فراهم آورد.



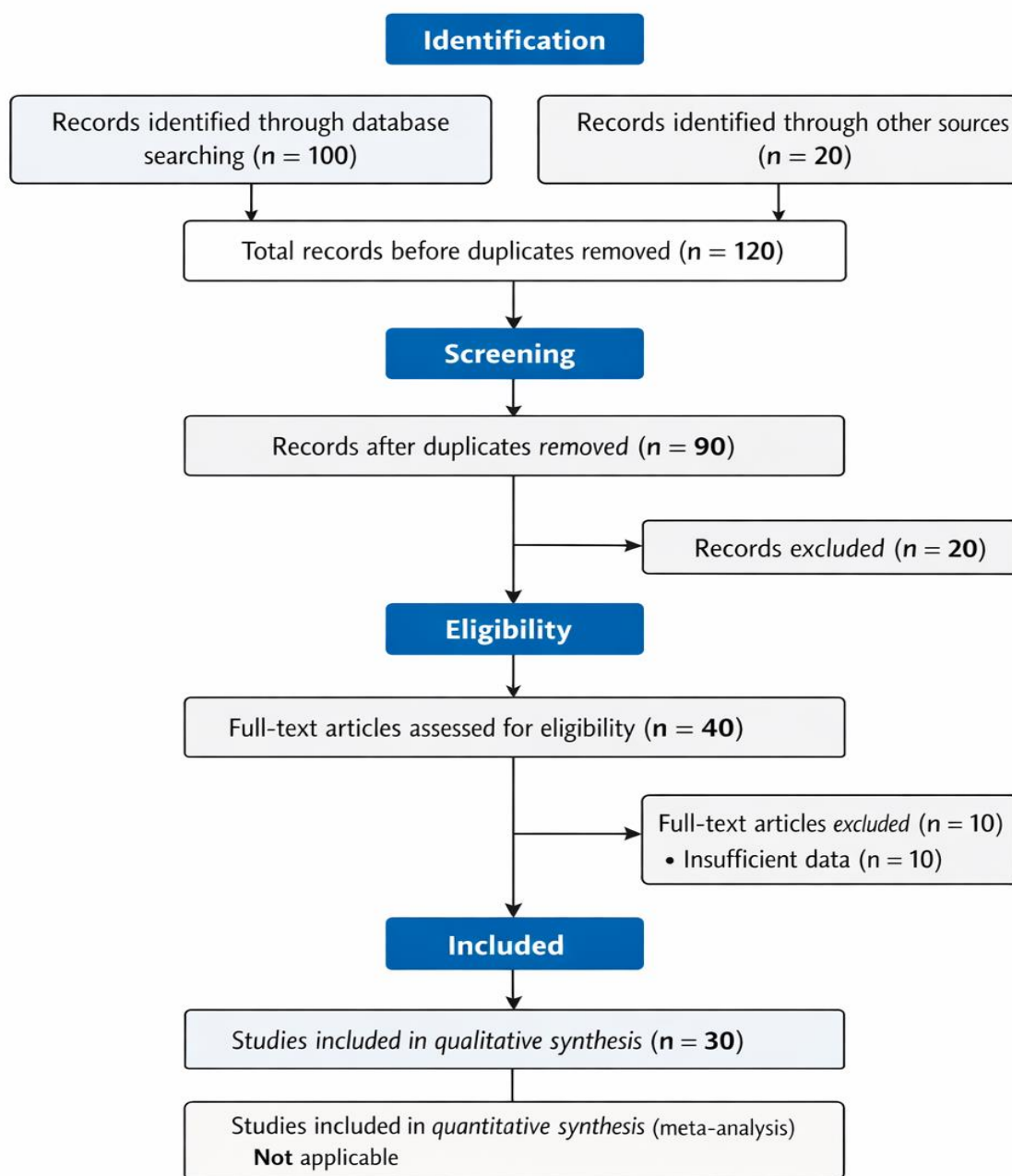
شکل ۲. محرک‌های اصلی تغییرات اراضی و تهدیدات زیست‌محیطی دریایی-ساحلی در خلیج فارس. این شکل محرک‌های اصلی آلودگی در خلیج فارس را به صورت یکپارچه نشان می‌دهد و نقش هم‌زمان تغییر اقلیم، فعالیت‌های نفت و گاز، مداخلات انسانی ساحلی و پروژه‌های بزرگ نمک‌زدایی آب دریا را برجسته می‌کند. این محرک‌ها از طریق مسیرهای مستقیم «مانند تخلیه‌های صنعتی، پساب‌های شور و حرارتی و دگرگونی زیستگاه‌ها» و همچنین سازوکارهای غیرمستقیم نظیر تغییر الگوهای گردش آب، افزایش تنش‌های زمین‌های و انباشت فشارهای اکولوژیکی عمل می‌کنند. شکل نشان می‌دهد که آلودگی در خلیج فارس حاصل برهم‌کنش و تشدید متقابل چندین عامل است، نه نتیجه منابع منفرد، و بر ضرورت رویکردهای مدیریت یکپارچه در مقیاس منطقه‌ای تأکید دارد (H. Hosseini et al., 2021).

۲- روش‌شناسی

پژوهش حاضر از رویکرد مرور سیستماتیک ادبیات علمی به منظور جمع‌آوری و تحلیل شواهد جهانی مرتبط با پیامدهای زیست‌محیطی پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن بهره می‌گیرد؛ با تمرکز ویژه بر نقش این پروژه‌ها در تغییر کاربری اراضی ساحلی و اثرات متعاقب آن بر اکوسیستم‌های دریایی. طراحی روش‌شناسی به گونه‌ای انجام شد که ضمن برخورداری از شفافیت و قابلیت بازتولید، از محدود شدن به ارزیابی‌های صرفاً فنی فناوری‌های آب‌شیرین‌کن پرهیز کرده و ابعاد فضایی، اکولوژیکی و نهادی مرتبط با توسعه زیرساخت‌های بزرگ مقیاس ساحلی را نیز در بر گیرد. فرایند مرور سیستماتیک مطابق با دستورالعمل به‌روزشده 2020¹ PRISMA انجام شد (M. J. Page et al., 2021). جست‌وجوی جامع منابع علمی در پایگاه‌های معتبر داخلی و بین‌المللی شامل Web of Science، Scopus، ScienceDirect، SpringerLink، ResearchGate، SID، Civilica و Magiran صورت گرفت. انتخاب این پایگاه‌ها به دلیل پوشش گسترده پژوهش‌های میان‌رشته‌ای در حوزه‌های مدیریت محیط‌زیست، علوم دریایی، برنامه‌ریزی ساحلی و توسعه زیرساخت‌ها انجام شد. افزون بر مقالات داوری‌شده، تعداد محدودی از گزارش‌های منتشرشده توسط سازمان‌های بین‌المللی معتبر از جمله ROPME، UNEP و غیره نیز وارد فرایند مرور شدند؛ چرا که این گزارش‌ها اغلب اطلاعات ارزشمندی درباره سیاست‌گذاری، حکمرانی و پیامدهای کلان پروژه‌های زیربنایی ارائه می‌کنند که لزوماً در مقالات دانشگاهی بازتاب نمی‌یابد. راهبرد جست‌وجو به صورت مرحله‌ای و تکرارشونده طراحی شد تا توازن مناسبی میان جامعیت و دقت حاصل شود. ترکیب کلیدواژه‌ها حول سه محور مفهومی مرتبط شکل گرفت: زیرساخت‌های آب‌شیرین‌کن، تغییر کاربری اراضی ساحلی، و پیامدهای زیست‌محیطی دریایی. در این راستا، از عملگرهای بولی برای ترکیب عباراتی نظیر seawater desalination، mega-desalination، industrial desalination با واژه‌ها و عبارات مرتبط با نمک‌زدایی، توسعه ساحلی، تعاملات زمین-دریا و اکوسیستم‌های دریایی استفاده شد. به منظور حفظ تمرکز تحلیلی پژوهش، از به‌کارگیری رشته‌های جست‌وجویی که عمدتاً به مطالعات مهندسی فرایند، بهینه‌سازی انرژی یا عملکرد غشاها منتهی می‌شدند، اجتناب گردید. در مرحله جست‌وجو هیچ محدودیت جغرافیایی اعمال نشد تا امکان شناسایی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌های محیطی و نهادی متنوع، از جمله سامانه‌های نیمه‌بسته با شوری بالا مشابه خلیج فارس و دریای عمان، فراهم شود. انتخاب مطالعات از طریق یک فرایند غربالگری چندمرحله‌ای انجام گرفت. پس از حذف رکوردهای تکراری، عناوین مقالات به منظور کنارگذاری منابع نامرتبط بررسی شدند. در مرحله بعد، چکیده‌ها بر اساس معیارهای ورود از پیش تعیین‌شده ارزیابی شدند و در نهایت، متن کامل مقالات منتخب برای تصمیم‌گیری نهایی مورد بررسی قرار گرفت. در این فرایند، تأکید اصلی بر شناسایی مطالعاتی بود که شواهد تجربی یا تحلیلی درباره تعامل

¹. Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

پروژه‌های آب‌شیرین‌کن بزرگ‌مقیاس با الگوهای کاربری اراضی ساحلی، اکوسیستم‌های دریایی یا سازوکارهای حکمرانی ارائه می‌دادند. در مجموع، از میان حدود ۱۲۰ منبع شناسایی‌شده در مرحله اولیه، ۳۰ مطالعه که بیشترین انطباق را با اهداف تحلیلی پژوهش داشتند، وارد مرحله نهایی سنتز شدند (شکل ۳ و جدول پ ۱).



شکل ۳. دیاگرام PRISMA 2020 مراحل سیستماتیک انتخاب منابع و مقالات. این نمودار جریان PRISMA 2020 مراحل شناسایی، غربالگری، ارزیابی صلاحیت و انتخاب نهایی مطالعات را در این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد. در مجموع ۱۲۰ رکورد از جست‌وجو در پایگاه‌های بین‌المللی و فارسی شد. پس از حذف موارد تکراری، ۹۰ رکورد باقی ماند که ۶۰ مورد آن‌ها بر اساس عنوان و چکیده غربالگری شدند و ۲۰ مطالعه در این مرحله حذف گردید. در ادامه، ۴۰ مقاله به‌طور کامل ارزیابی شد که از میان آن‌ها ۱۰ مطالعه به دلیل ناکافی بودن داده‌ها یا عدم انطباق موضوعی کنار گذاشته شدند. در نهایت، ۳۰ مطالعه واجد شرایط در سنتز کیفی (مرور نظام‌مند) وارد شدند. انجام متاآنالیز به دلیل ناهمگنی روش‌شناختی و محتوایی مطالعات امکان‌پذیر نبود.

مطالعاتی در دامنه بررسی قرار گرفتند که به تأسیسات آب‌شیرین‌کن صنعتی یا بزرگ‌مقیاس پرداخته و دست‌کم یکی از ابعاد زیر را مورد توجه قرار داده بودند: تحولات فضایی نواحی ساحلی، سازوکارهای تعامل زمین-دریا (مانند برداشت و تخلیه آب)، پیامدهای اکولوژیکی دریایی یا ساحلی، و چارچوب‌های ارزیابی و حکمرانی زیست‌محیطی. در مقابل، پژوهش‌هایی که صرفاً بر طراحی فنی، عملکرد غشاهای بهره‌وری انرژی یا تحلیل هزینه متمرکز بودند، بدون پرداخت معنادار به پیامدهای فضایی یا زیست‌محیطی، کنار گذاشته شدند. همچنین مطالعات مربوط به سامانه‌های آب‌شیرین‌کن کوچک‌مقیاس، غیرمتمرکز یا غیرساحلی از دامنه بررسی خارج شدند، زیرا چنین سامانه‌هایی معمولاً منجر به تغییرات قابل‌توجه در کاربری اراضی ساحلی نمی‌شوند. استخراج داده‌ها با استفاده از یک قالب استاندارد و هدفمند انجام گرفت که به‌طور خاص برای پاسخ‌گویی به چارچوب مفهومی پژوهش طراحی شده بود. تمرکز استخراج داده‌ها بر متغیرهایی قرار داشت

که مسیرهای علی بین توسعه آب شیرین کن ها و پیامدهای زیست محیطی را منعکس می کنند. از جمله ویژگی های محیطی و جغرافیایی محل پروژه، مقیاس و فناوری تأسیسات، زیرساخت های ساحلی وابسته، الگوهای تغییر کاربری اراضی، و اثرات گزارش شده بر اکوسیستم های دریایی. در مواردی که اطلاعات در دسترس بود، داده های مربوط به ترتیبات نهادی، فرایندهای ارزیابی اثرات زیست محیطی و پیامدهای اجتماعی-معیشتی نیز استخراج شد. مطالعات انجام شده در محیط های نیمه بسته یا دارای محدودیت های اکولوژیکی خاص به طور مشخص علامت گذاری شدند، زیرا این زمینه ها شباهت بالایی با شرایط حاکم بر خلیج فارس و دریای عمان دارند. با توجه به ناهمگونی قبل توجه در طراحی مطالعات، شاخص های مورد استفاده و نوع خروجی ها، انجام فراتحلیل کمی امکان پذیر نبود. از این رو، داده ها از طریق سنتز کیفی مبتنی بر تحلیل مضمون یکپارچه شدند. یافته ها در قالب مضامین مرتبط با چارچوب مفهومی پژوهش کدگذاری شدند؛ از جمله نمک زدایی، الگوهای تغییر کاربری اراضی ساحلی، مکانیسم های تعامل زمین-دریا، انواع و مقیاس های اثرات اکولوژیکی، و چالش های حکمرانی و نهادی. این رویکرد امکان شناسایی الگوهای تکرار شونده در مقیاس جهانی و در عین حال برجسته سازی تفاوت های زمینه مند ناشی از شرایط محیطی و نهادی را فراهم ساخت. در نهایت، کیفیت روش شناختی مطالعات وارد شده به صورت کیفی ارزیابی شد تا نقاط قوت و محدودیت های شواهد موجود در تفسیر نتایج لحاظ شود. این ارزیابی نه به منظور حذف مطالعات، بلکه برای درک بهتر میزان قطعیت نتایج و تأثیر محدودیت هایی نظیر دوره های پایش کوتاه، کمبود داده های تجمعی یا ضعف چارچوب های نظارتی انجام شد. چنین رویکردی به ویژه برای نواحی ساحلی در حال توسعه سریع، که نظام های پایش زیست محیطی در آن ها هنوز به طور کامل تثبیت نشده اند، اهمیت ویژه ای دارد. بدین ترتیب، روش شناسی اتخاذ شده بنیانی تحلیلی مستحکم برای تفسیر شواهد جهانی و استخراج دلالت های مرتبط با سامانه های ساحلی حساس، از جمله خلیج فارس و دریای عمان، فراهم می آورد.

۳- نتایج

• مروری کلی بر رویکرد و موضوعات اصلی مطالعات مرتبط

مرور سیستماتیک منابع نشان می دهد که بدنه مطالعات مرتبط با پروژه های مگا آب شیرین کن و پیامدهای زیست محیطی آن ها ماهیتی ذاتاً میان رشته ای دارد و در تقاطع علوم محیط زیست، بوم شناسی دریایی، برنامه ریزی فضایی ساحلی و حکمرانی منابع آب شکل گرفته است (جدول ۱). ۳۰ مطالعه ای که پس از طی مراحل غربالگری PRISMA وارد تحلیل نهایی شدند، بازه ای زمانی عمدتاً متعلق به دهه اخیر را پوشش می دهند که هم زمان با شتاب گیری جهانی توسعه زیرساخت های نمک زدایی در مناطق خشک و نیمه خشک ساحلی است (جدول پ ۱). از نظر نوع انتشار، بخش عمده مطالعات شامل پژوهش های تجربی میدانی و موردکاوی های منطقه ای است که پیامدهای زیست محیطی آب شیرین کن های صنعتی را در مقیاس محلی و ناحیه ای بررسی کرده اند. در کنار این آثار، چندین مقاله مروری و تحلیلی با رویکرد کلان نیز وجود دارد که به ارزیابی الگوهای جهانی نمک زدایی، تولید شورابه و فشارهای تجمعی بر اکوسیستم های دریایی پرداخته اند (E. Jones et al., 2019) (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴). علاوه بر مقالات علمی، تعداد محدودی از گزارش های معتبر سازمان های بین المللی نظیر UNEP و نهادهای منطقه ای نیز به عنوان منابع مکمل وارد تحلیل شدند. این گزارش ها به ویژه در تبیین ابعاد حکمرانی، سیاست گذاری و خلأهای نهادی نقش مهمی ایفا می کنند. از منظر جغرافیایی، توزیع مطالعات به طور معناداری با پراکنش جهانی پروژه های مگا آب شیرین کن هم راستا است. بیشترین تمرکز پژوهش ها به مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا، حوزه مدیترانه، سواحل جنوب غربی ایالات متحده و بخش هایی از شرق آسیا تعلق دارد. در این میان، مطالعات انجام شده در خلیج فارس، دریای سرخ و سایر پهنه های نیمه بسته سهم قابل توجهی از بدنه شواهد را تشکیل می دهند؛ پهنه هایی که از نظر شوری زمینه ای بالا، گردش محدود آب و حساسیت اکولوژیکی، شباهت های ساختاری مهمی با خلیج فارس و دریای عمان دارند (M. Sharifinia et al., 2025). (Nairobi et al., 2022). از نظر مقیاس پروژه، تقریباً تمامی مطالعات وارد شده به تأسیسات نمک زدایی صنعتی یا مگا پروژه هایی پرداخته اند که برای تأمین آب شهری، صنعتی یا ترکیبی طراحی شده اند. فناوری غالب در این پروژه ها اسمز معکوس (RO) است، اگرچه در برخی مناطق «به ویژه در کشورهای عربی» سیستم های حرارتی مانند MSF و MED یا سامانه های ترکیبی نیز مورد بررسی قرار گرفته اند. نکته مهم آن است که اغلب مطالعات، تأسیسات آب شیرین کن را نه به عنوان واحدهایی منفرد، بلکه به عنوان بخشی از خوشه های صنعتی ساحلی شامل نیروگاه ها، پالایشگاه ها، بنادر و زیرساخت های انتقال آب تحلیل کرده اند؛ امری که درک پیامدهای فضایی و تجمعی را ضروری می سازد (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴). از منظر موضوعی، تمرکز غالب پژوهش ها بر پیامدهای دریایی شورابه، به ویژه تغییرات شوری، دما و کیفیت رسوبات در نزدیکی خروجی ها بوده است. با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات جدیدتر فراتر از اثرات نقطه ای حرکت کرده و به بررسی تغییرات کاربری اراضی ساحلی، دگرگونی الگوهای فضایی خط ساحل و تعاملات خشکی-دریا پرداخته اند. این تغییر رویکرد نشان دهنده گذار تدریجی ادبیات علمی از ارزیابی های محدود زیست فیزیکی به تحلیل های یکپارچه تر اکوسیستمی و فضایی است. از نظر بُعد زمانی، بیشتر مطالعات مبتنی بر پایش های کوتاه مدت یا میان مدت هستند و پژوهش هایی که پیامدهای بلندمدت یا تجمعی توسعه آب شیرین کن ها را بررسی کرده باشند، هنوز محدودند. این خلأ به ویژه در مناطق با توسعه سریع ساحلی مشهود است؛ جایی که تغییر کاربری اراضی و فشارهای صنعتی با سرعتی بیش از ظرفیت پایش و ارزیابی محیط زیستی پیش می روند (M. Sharifinia et al., 2025). با این وجود، شواهد موجود به طور نسبتاً سازگاری نشان می دهند که اثرات زیست محیطی مشاهده شده صرفاً به مرحله

بهره‌برداری محدود نمی‌شوند و می‌توانند به تغییرات پایدار در ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های ساحلی منجر شوند. در مجموع، مرور مطالعات منتخب نشان می‌دهد که ادبیات علمی موجود، اگرچه از نظر جغرافیایی و روش‌شناختی ناهمگون است، اما تصویر نسبتاً منسجمی از نقش پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن به‌عنوان محرک‌های تغییرات فضایی-اکولوژیک در نواحی ساحلی ارائه می‌دهند. این بدنه شواهد زمینه تحلیلی لازم را برای بررسی دقیق‌تر الگوهای تغییر کاربری اراضی ساحلی فراهم می‌کند. الگویی که در ادامه، به‌طور مشخص در ارتباط با توسعه آب‌شیرین‌کن‌های صنعتی مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

جدول ۱. نتایج کلیدی مطالعات منتخب (با تمرکز بر مکان‌ک‌زدایی، تغییر کاربری اراضی ساحلی و پیامدهای اجتماعی-محیط‌زیستی)

یافته‌های کلیدی مطالعات مرور شده	دلالت‌های فضایی-اکولوژیکی	تعمیم به خلیج فارس و دریای عمان
دامنه و ماهیت ادبیات علمی	بدنه مطالعات ماهیتی میان‌رشته‌ای دارد و در تقاطع بوم‌شناسی دریایی، برنامه‌ریزی فضایی ساحلی، مدیریت محیط‌زیست و حکمرانی آب شکل گرفته است.	هم‌راستا با نیازهای پژوهشی مناطق ساحلی صنعتی و کم‌داده مانند خلیج فارس
بافت جغرافیایی و محیطی مطالعات	تمرکز بر سواحل خشک و نیمه‌خشک و دریاچه‌های نیمه‌بسته (خاورمیانه، دریای سرخ، مدیترانه، استرالیا)	شباهت ساختاری بالا با شرایط اقیانوس‌نگاری خلیج فارس و دریای عمان
مقیاس پروژه و پیگیرندگی فناوریانه	تمرکز بر تأسیسات بزرگ و مگا آب‌شیرین‌کن؛ غلبه فناوری RO همراه با استمرار سامانه‌های حرارتی در کشورهای عربی	بازتاب مستقیم الگوی غالب توسعه نمک‌زدایی در کشورهای GCC
خوشه‌بندی فضایی و صنعتی شدن سواحل	استقرار آب‌شیرین‌کن‌ها عمدتاً در قالب خوشه‌های صنعتی ساحلی در کنار نیروگاه‌ها، بنادر و صنایع سنگین	الگوی مسلط توسعه سواحل در خلیج فارس و دریای عمان
الگوهای تغییر کاربری اراضی ساحلی	تبدیل سواحل طبیعی یا چندمنظوره به پهنه‌های صنعتی با دسترسی محدود؛ گسترش تغییرات غیرمستقیم کاربری	تشدید آسیب‌پذیری سواحل سخت‌سازی‌شده منطقه
پیامدهای اکولوژیک دریایی (مستقیم و غیرمستقیم)	اثرات زیست‌محیطی محدود به شوره نیست؛ تغییر کاربری اراضی مسیرهای اثرگذاری را تشدید می‌کند	بحرانی‌تر تحت شرایط شوری و دمای زمینه‌ای بالای خلیج فارس
اثرات تجمعی و بلندمدت	شواهد قوی از انباشت اثرات در توسعه خوشه‌ای؛ کمبود پایش‌های بلندمدت	ناکارآمدی ارزیابی‌های پروژه‌محور در مدیریت ریسک منطقه‌ای
خلأهای حکمرانی و نهادی	تکه‌تکه‌بودن نهادی، تمرکزگرایی و ضعف پیوند کاربری زمین با حفاظت دریایی	انطباق بالا با ساختارهای حکمرانی غالب در کشورهای حاشیه خلیج فارس
تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی	تعارضات بیشتر ماهیتی حکمرانی‌محور دارند تا فناوریانه؛ شامل ابعاد توزیعی، رویه‌ای و نمادین	توضیح‌دهنده تداوم تنش‌های نهفته در غیاب اعتراضات آشکار
ریسک‌های فرامرزی و منطقه‌ای	ضعف حکمرانی مشترک در دریاچه‌های بسته امکان انباشت فشارهای اکولوژیک را فراهم می‌کند	اهمیت ویژه برای خلیج فارس به‌عنوان پهنه‌ای مشترک و فوق‌صنعتی

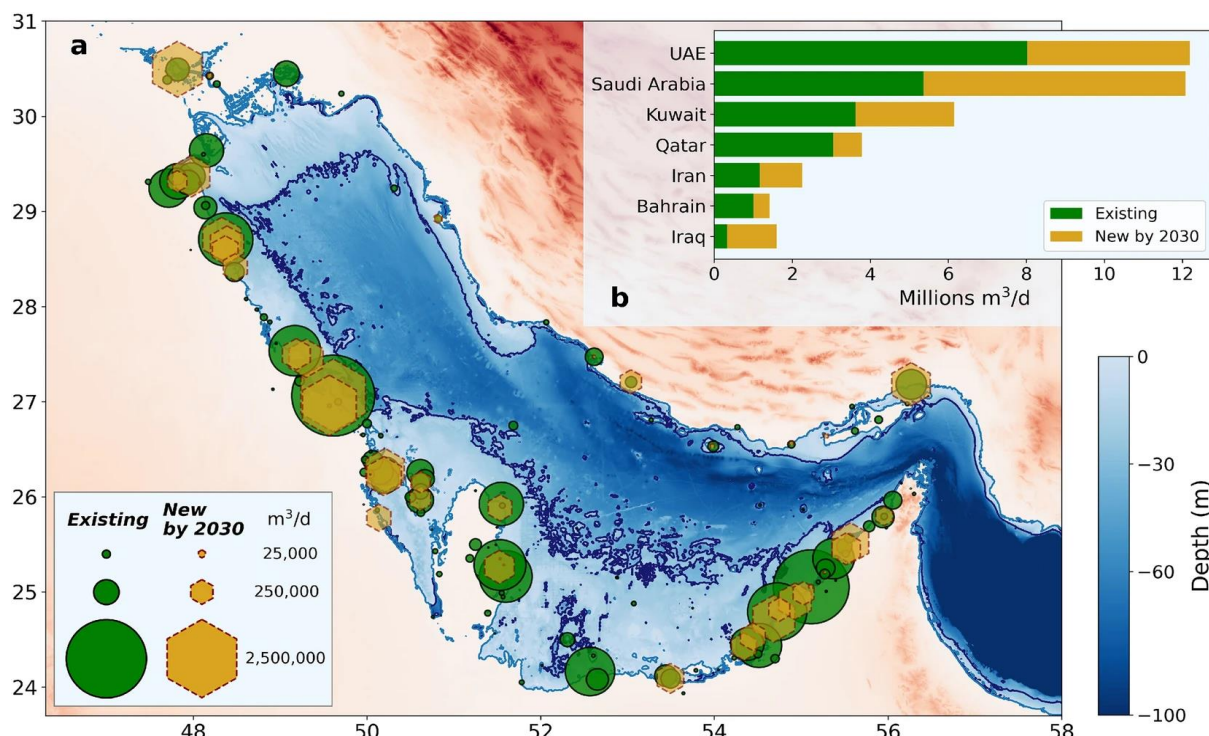
همچنین چارچوب مفهومی پژوهش ما پس از مرور کلی مطالعات و منابع مرجع مرتبط، براساس الگوی ساختار یافته شکل ۴ طراحی و ترسیم گردید، که محوریت اصلی آن بر محرک‌ها و پیامدهای ناشی از تغییر کاربری اراضی ساحلی، با هدف ایجاد پروژه‌های مکان‌ک‌زدایی استوار است.



شکل ۴. چارچوب مفهومی پژوهش. (چارچوب مفهومی روابط علی میان پروژه‌های مگامک‌زدایی، تغییر کاربری اراضی ساحلی، تشدید برهم‌کنش‌های خشکی-دریا، تخریب اکوسیستم‌های دریایی، خلأهای حکمرانی و تعارضات اجتماعی-زیست‌محیطی، با تمرکز ویژه بر سامانه‌های نیمه‌بسته‌ای نظیر خلیج فارس و دریای عمان را به عنوان معیار تحلیل سیستماتیک نتایج قرار داده است.)

• الگوها و انواع تغییر کاربری اراضی ساحلی مرتبط با مگا پروژه‌های آب‌شیرین‌کن (نمک‌زدایی)

شواهد حاصل از مناطق دارای شرایط اقلیمی، اقیانوس‌نگاری و نهادی مشابه با خلیج فارس و دریای عمان نشان می‌دهد که پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن به‌ندرت به‌عنوان زیرساخت‌هایی منفرد و مستقل عمل می‌کنند. در مقابل، این پروژه‌ها اغلب به‌مثابه «لنگرهای فضایی» توسعه ساحلی ایفای نقش کرده و محرک دگرگونی‌های گسترده در کاربری اراضی، مورفولوژی خط ساحل، تراکم زیرساختی و الگوهای گسترش صنعتی و شهری هستند. در نواحی ساحلی خشک و نیمه‌خشک «به‌ویژه در سواحل عربی خلیج فارس و دریای سرخ» زیرساخت‌های نمک‌زدایی طی دهه اخیر به یکی از عوامل اصلی صنعتی‌شدن نوارهای ساحلی بدل شده‌اند (شکل ۵). الگوی غالب تغییر کاربری اراضی در کشورهای عضو شورای همکاری خلیج فارس (GCC)، هم‌مکانی هدفمند تأسیسات مگا آب‌شیرین‌کن با مجتمع‌های انرژی و صنایع سنگین است؛ از جمله نیروگاه‌های تولید برق، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و زیرساخت‌های بندری. این خوشه‌بندی فضایی عمدتاً ناشی از تقاضای بالای انرژی، صرفه‌های مقیاس، و راهبردهای برنامه‌ریزی متمرکز دولتی است که توسعه نوار ساحلی را به‌عنوان پهنه‌ای راهبردی برای زیرساخت‌های کلان تعریف می‌کند (E. Jones et al., 2019). (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴). پیامد این رویکرد، تبدیل بخش‌های وسیعی از سواحل طبیعی یا کم‌استفاده به کریدورهای صنعتی دائمی است که با سازه‌های برداشت و تخلیه آب، خطوط لوله، جاده‌های دسترسی، محوطه‌های ذخیره‌سازی و نواحی حائل با دسترسی محدود مشخص می‌شوند. ادبیات مرور شده نشان می‌دهد که پیامدهای فضایی آب‌شیرین‌کن‌ها به محدوده فیزیکی مستقیم تأسیسات محدود نمی‌ماند. در بسیاری از موارد، اجرای این پروژه‌ها با تغییرات ثانویه و گسترده‌تر در کاربری اراضی همراه است؛ از جمله توسعه سکونتگاه‌های کارکنان، مراکز لجستیک، کریدورهای انتقال انرژی و شبکه‌های حمل‌ونقل. Moreno-Silva و همکاران نشان می‌دهند که این تغییرات غیرمستقیم، به‌ویژه در مناطق دچار تنش شدید آبی، اغلب از نظر وسعت از ردپای فضایی مستقیم آب‌شیرین‌کن‌ها فراتر می‌روند، زیرا آب نمک‌زدایی‌شده خود به عامل تسهیل‌کننده رشد صنعتی و شهری بیشتر بدل می‌شود (C. Moreno-Silva et al., 2025). این چرخه بازخوردی «که در آن آب‌شیرین‌کن هم پاسخی به توسعه است و هم محرکی برای آن» در چندین منطقه ساحلی خشک با ساختارهای حکمرانی مشابه خلیج فارس به‌طور مکرر گزارش شده است.



شکل ۵. باتیمتری خلیج فارس و توزیع ملی ظرفیت نمک‌زدایی. (a) ساختار باتیمتری خلیج فارس بر اساس داده‌های GEBCO 2021 که شرایط کم‌عمق پهنه آبی را نشان می‌دهد (تراز صفر متر به رنگ آبی روشن و ایزوبات ۳۰- متر به رنگ آبی تیره). تأسیسات نمک‌زدایی موجود و آینده (در حال ساخت، تصویب‌شده و برنامه‌ریزی‌شده تا ۲۰۳۰) به ترتیب با دایره و شش ضلعی نمایش داده شده‌اند و اندازه نمادها متناسب با ظرفیت نمک‌زدایی است. تأسیسات با فاصله کمتر از حدود ۱۰ کیلومتر به صورت یک واحد تجمع‌شده نمایش داده شده‌اند. (b) ظرفیت فعلی و آینده نمک‌زدایی به تفکیک کشور که تمرکز شدید توسعه در امتداد سواحل کم‌عمق را نشان می‌دهد. عمان به دلیل سهم بسیار ناچیز ظرفیت نمک‌زدایی در خلیج فارس و نبود برنامه توسعه آبی حذف شده است. این شکل هم‌پوشانی توسعه فشرده نمک‌زدایی با محیط‌های دریایی نیمه‌بسته و حساس از نظر باتیمتری را برجسته می‌سازد (F. Paparella et al., 2022).

در بافت‌های ساحلی کشورهای عربی، مدل‌های توسعه دولت‌محور و برنامه‌ریزی متمرکز، نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌دهی به این مسیرهای تغییر کاربری دارند. پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن اغلب به‌عنوان زیرساخت‌های راهبردی ملی تعریف می‌شوند و به همین دلیل، فرآیندهای ارزیابی و محدودیت‌های محلی کاربری زمین را یا دور می‌زنند یا به‌طور قابل‌توجهی تسریع می‌کنند. اگرچه این رویکرد موجب افزایش سرعت اجرا می‌شود، اما هم‌زمان امکان ادغام دانش بومی اکولوژیک و اولویت‌های جوامع محلی در تصمیم‌گیری‌های مکانی را کاهش می‌دهد. ارزیابی‌های محیط‌زیستی منطقه‌ای نشان می‌دهد که چنین سازوکارهایی به فرسایش تدریجی فضاهای عمومی ساحلی، محدود شدن دسترسی صیادان خرد و جابه‌جایی فعالیت‌های سنتی ساحلی منجر شده‌اند (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴)، (Nairobi et al., 2022). نکته کلیدی آن است که تغییر کاربری اراضی ناشی از توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها از منظر زیست‌محیطی خنثی نیست. جایگزینی مناظر نفوذپذیر ساحلی با سطوح سخت و صنعتی، دینامیک رسوبی را مختل کرده، ظرفیت طبیعی سواحل برای تعدیل فرسایش را کاهش می‌دهد و حساسیت این سامانه‌ها را نسبت به فشارهای تجمعی افزایش می‌دهد. در پهنه‌های نیمه‌بسته‌ای مانند خلیج فارس «که تبادل آب محدود و تاب‌آوری اکولوژیک آن‌ها از پیش تحت فشار است» این دگرگونی‌های فضایی، پیامدهای تخلیه شورابه و سایر اثرات دریایی مرتبط با آب‌شیرین‌کن‌ها را تشدید می‌کند. پیامدهایی که در بخش‌های بعدی مقاله به‌طور تفصیلی بررسی می‌شوند. در مجموع، شواهد موجود نشان می‌دهد که پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن به‌عنوان کاتالیزورهای فضایی عمل کرده و از طریق ترکیبی از توسعه مستقیم زیرساخت، خوشه‌بندی صنعتی و تصمیمات کاربری زمین مبتنی بر سیاست، ساختار فضایی نواحی ساحلی را بازتعریف می‌کنند. در مناطقی مشابه خلیج فارس و دریای عمان، این الگوها بستر فیزیکی و نهادی شکل‌گیری اثرات اکوسیستمی دریایی و تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی آبی را فراهم می‌سازند و ضرورت نگاه به آب‌شیرین‌کن‌ها نه صرفاً به‌عنوان فناوری تأمین آب، بلکه به‌مثابه محرک‌های تحول بلندمدت سواحل را برجسته می‌کنند.

● پیامدهای تغییر کاربری اراضی ناشی از آب‌شیرین‌کن‌ها بر اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی

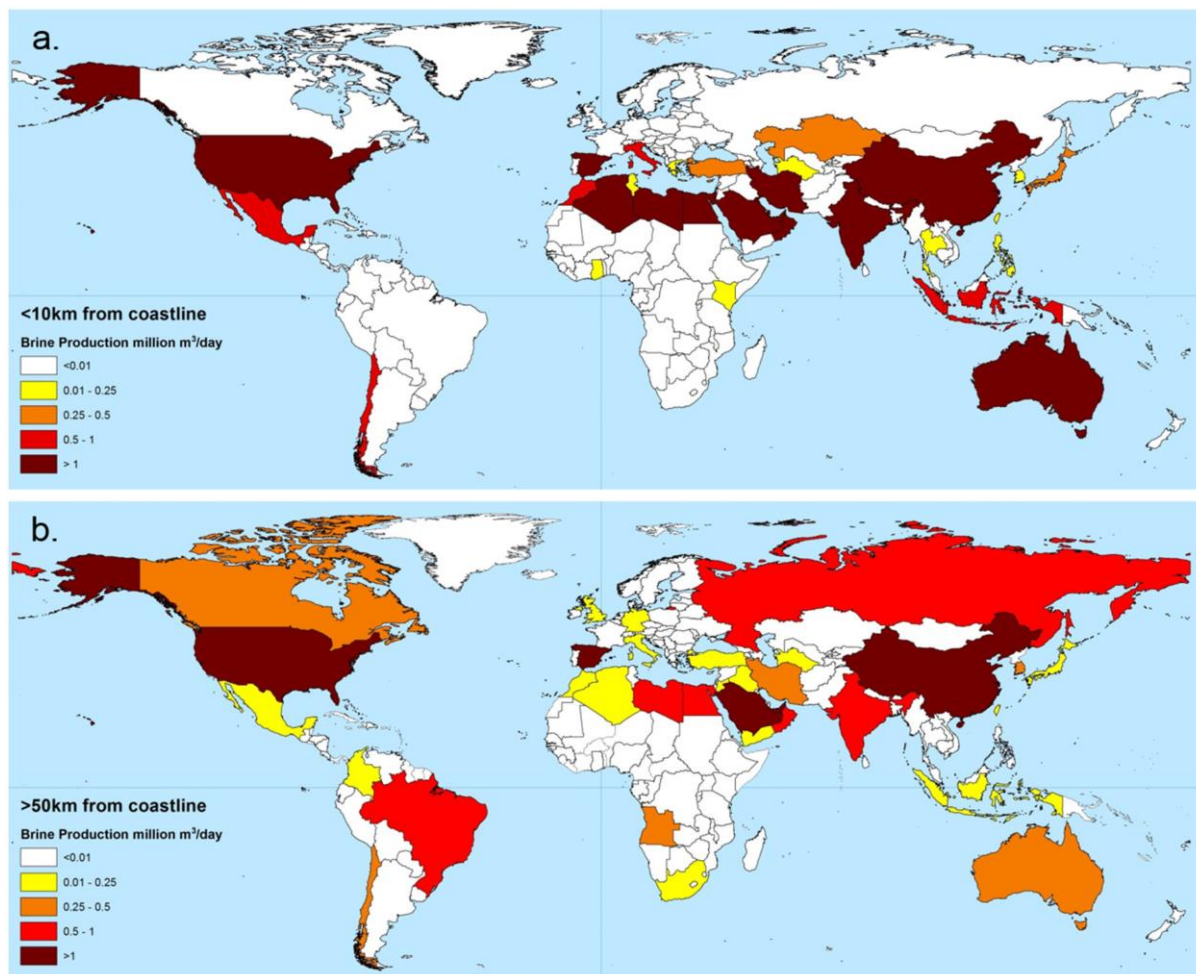
پیامدهای زیست‌محیطی پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن بر اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی، به‌مراتب فراتر از اثرات فیزیکی و شیمیایی مستقیم تخلیه شورابه بوده و به‌طور معناداری از طریق تغییرات کاربری اراضی ساحلی میانجی‌گری می‌شوند. استقرار تأسیسات نمک‌زدایی در بستر مناظر ساحلی صنعتی‌شده، موجب هم‌افزایی میان تغییر در رابط زمین-دریا، دگرگونی الگوهای هیدرودینامیکی و تمرکز فشارهای انسانی می‌شود؛ فرآیندی که به بروز پاسخ‌های اکولوژیک پیچیده، تجمعی و در مواردی پایدار در اکوسیستم‌های ساحلی می‌انجامد (شکل ۶).

	انواع پیامدها	ریسک‌ها و مسائل بحرانی	دسته‌بندی پیامدها
یکی از پیامدها	آلودگی هوا، تخریب اراضی زراعی، کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم‌های دریایی	تغییر کاربری اراضی، استفاده از مواد ساختمانی و مصالح	ساخت و احداث تأسیسات
	پسماندهای صنعتی و تأثیرات بر اکوسیستم‌های دریایی مصنوعی	دفع و استفاده از مواد، بازسازی و احیای اراضی	برچیدن و پایان بهره‌برداری تأسیسات
پیامدهای مستمر	آسیب به موجودات دریایی از جمله جلبک‌ها، ماهیان، عروس‌های دریایی، صدف‌ها، پلانکتون و تخریب اکوسیستم‌های دریایی بومی	اختلال در اکوسیستم‌های آبی، تأثیرات بر کیفیت آب	برداشت (ورود) آب
	تهدیدات ناشی از دما، کدورت، شوری و ترکیبات جانی شورابه (مانند فلزات سنگین و مواد شیمیایی)؛ بسته به ویژگی‌های محیط دریافت‌کننده، منجر به اختلال و تخریب اکوسیستم‌های دریایی، منابع آب زیرزمینی و خاک می‌شود	تأثیرات زیستی و غیرزیستی شورابه بر محیط دریافت‌کننده	تخلیه شورابه (نمک غلیظ)
	آلودگی هوا و سهم در گرمایش جهانی و تغییر اقلیم	انتشار آلاینده‌هایی نظیر گازهای گلخانه‌ای (GHG)	مصرف انرژی
	اختلال در انسان‌ها و موجودات دریایی	ارتعاشات و صدا	آلودگی صوتی
	پیامدهای ویژه سیستم‌های تصفیه پساب و نمک‌زدایی صنعتی؛ کاهش آنها نیازمند فناوری‌های پیشرفته و آزمایش‌های زیادی گسترده است		
	پیامدهای صنعتی عمدتاً قابل حل، غیرخاص نمک‌زدایی		
ماهیت و مقیاس حل‌پذیری پیامدها پیامدهای ناشی از بهره‌برداری و عملکرد مستمر پیامدهای مرتبط با احداث و برچیدن تأسیسات (غیرعملیاتی)			

شکل ۶. نمای کلی پیامدها و اثرات زیست‌محیطی نمک‌زدایی آب دریا. این شکل نمایی یکپارچه از مهم‌ترین اثرات زیست‌محیطی نمک‌زدایی آب دریا ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که شورابه تنها یکی از اجزای مجموعه‌ای از فشارهای به‌هم‌پیوسته است. پیامدهای زیست‌محیطی در مراحل مختلف سامانه نمک‌زدایی «از مکان‌یابی و ساخت تأسیسات گرفته تا برداشت آب، مصرف انرژی، استفاده از مواد شیمیایی و تخلیه شورابه» ایجاد می‌شوند و به‌طور متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند. ویژگی‌های شورابه، از جمله شوری، دما، کدورت و ترکیبات شیمیایی و فلزی، در کنار خصوصیات فیزیکی و اکولوژیکی محیط پذیرنده، نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و گستره اثرات دارند. افزایش شوری و دما می‌تواند از آستانه تحمل موجودات دریایی عبور کرده و به تنش فیزیولوژیک، کاهش رشد، تغییر ساختار اجتماعات زیستی و مرگ‌ومیر منجر شود، در حالی که ترکیبات شیمیایی کیفیت آب و فرآیندهای زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این شکل بر ضرورت درک نمک‌زدایی به‌عنوان یک سامانه فناورانه-اکولوژیکی یکپارچه و نیازمند راهبردهای مدیریتی و نهادی هماهنگ تأکید دارد (M. Al-Saidi et al., 2023)

یکی از مسیرهای اثرگذاری که به‌طور مداوم در ادبیات گزارش شده، تشدید تنش شوری و حرارتی در محیط‌های پذیرنده است. شورابه‌های غلیظ «که در بسیاری از موارد دمایی بالاتر از آب دریا دارند» می‌توانند در نواحی کم‌عمق ساحلی با گردش محدود آب، شوری و دما را فراتر از دامنه نوسانات طبیعی افزایش دهند. مطالعات تجربی در دریاهای نیمه‌بسته، از جمله خلیج فارس و دریای سرخ، نشان می‌دهد که این شرایط می‌تواند از آستانه تحمل گونه‌های حساس کفزی و دیرسال عبور کرده و به کاهش غنای گونه‌ای و تغییر در ساختار اجتماعات زیستی منجر شود (E. Jones et al., 2019) (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴). این اثرات به‌ویژه در سواحل تشدید می‌شوند که تغییر کاربری اراضی «از طریق سخت‌سازی خط ساحل، لایروبی یا زمین‌سازی» فرآیندهای اختلاط و پخش طبیعی را محدود کرده است. شکل ۷ الگویی جهانی از توزیع تولید شورابه نمک‌زدایی در نواحی ساحلی و داخلی را نشان می‌دهد. که نمایی از گستره جهانی و پیامدهای مدیریتی این پدیده نه تنها بر روی اکوسیستم‌های دریایی-ساحلی، بلکه نواحی پیرامونی را نیز به نمایش می‌گذارد. تخریب زیستگاه، دومین پیامد اکولوژیک مهم مرتبط با تغییر کاربری اراضی ناشی از آب‌شیرین‌کن‌ها به شمار می‌رود. تبدیل سواحل طبیعی، پهنه‌های جزرومدی و بسترهای نرم به نواحی صنعتی، زیستگاه‌های کفزی را هم به‌صورت مستقیم (از طریق آشفستگی فیزیکی) و هم به‌طور غیرمستقیم (از طریق تغییر در دینامیک رسوب و کیفیت آب) تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات میدانی در خلیج فارس کاهش تنوع و زی‌توده ماکروبتوز را در مجاورت آب‌شیرین‌کن‌ها گزارش کرده‌اند. اثراتی که در مناطقی با اصلاحات گسترده ساحلی، فراتر از محدوده‌های تخلیه مستقیم شورابه نیز گسترش یافته‌اند (M. Sharifinia et al., 2025). الگوهای مشابهی در سایر مناطق ساحلی خشک مشاهده شده است که در آن‌ها زیرساخت‌های نمک‌زدایی در کنار بنادر، نیروگاه‌ها و توسعه شهری مستقر شده و به تسریع تکه‌تکه‌شدن و از دست رفتن زیستگاه‌ها انجامیده‌اند (B. S. Halpern et al., 2025). فراتر از اثرات موضعی، تغییر کاربری اراضی مرتبط با آب‌شیرین‌کن‌ها می‌تواند تاب‌آوری اکوسیستم‌های دریایی را در مقیاس گسترده‌تر تضعیف کند. اکوسیستم‌هایی که به‌طور مزمن در معرض تنش شوری، ساده‌سازی زیستگاهی و کاهش اتصال اکولوژیک قرار دارند، ظرفیت کمتری برای جذب اختلالات اضافی «نظیر امواج گرمایی دریایی، رویدادهای کم‌اکسیژنی یا پالس‌های آلودگی» از خود نشان می‌دهند. پژوهش‌های متعددی تأکید می‌کنند که این کاهش تاب‌آوری در دریاهای نیمه‌بسته نگران‌کننده‌تر است، زیرا تبادل محدود آب، فرآیندهای بازایی طبیعی را کند می‌کند. در خلیج فارس، که شوری و دمای پایه به‌طور طبیعی بالاست، فشارهای افزوده ناشی از توسعه ساحلی مرتبط با آب‌شیرین‌کن‌ها می‌تواند سامانه‌ها را به آستانه‌های بحرانی یا نقاط واژگونی اکولوژیک نزدیک کند (تقوی و همکاران، ۱۳۹۵) (Riegl et al., 2012) نکته حائز اهمیت آن است که شواهد موجود

نشان می‌دهد این پیامدها به‌ندرت قابل انتساب صرف به فناوری نمک‌زدایی هستند. در عوض، اثرات اکولوژیک از برهم‌کنش میان عملیات آب‌شیرین‌کن و الگوهای غالب تغییر کاربری اراضی ساحلی ناشی می‌شوند. سخت‌سازی سواحل ظرفیت بافری طبیعی را کاهش می‌دهد، تغییر الگوهای گردش آب بر رفتار پلوم‌های شورابه اثر می‌گذارد و خوشه‌بندی صنعتی بار تجمع‌ی آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. این نگاه یکپارچه زمین-دریا توضیح می‌دهد که چرا فناوری‌های مشابه آب‌شیرین‌کن در زمینه‌های جغرافیایی و نهادی متفاوت، پیامدهای اکولوژیک به‌مراتب متفاوتی ایجاد می‌کنند (Nairobi et al., 2022).



شکل ۷. توزیع جهانی تولید شورابه نمک‌زدایی در نواحی ساحلی و داخلی. این شکل حجم شورابه تولیدشده توسط تأسیسات نمک‌زدایی را در مقیاس ملی و بر اساس فاصله از خط ساحلی نشان می‌دهد: (a) کمتر از ۱۰ کیلومتر و (b) بیش از ۵۰ کیلومتر. بخش عمده شورابه در نواحی ساحلی تولید می‌شود، به‌طوری‌که حدود ۸۰ درصد آن در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر از ساحل قرار دارد و دفع در دریا را به روش غالب جهانی تبدیل کرده است. تولید شورابه ساحلی به‌طور عمده در خاورمیانه و شمال آفریقا متمرکز است و کشورهای امارات متحده عربی، عربستان سعودی، قطر و کویت بیش از ۷۰ میلیون مترمکعب در روز شورابه ساحلی تولید می‌کنند. در مقابل، شورابه تولیدی در مناطق داخلی «با وجود حجم کمتر» چالش مدیریتی جدی‌تری ایجاد می‌کند، زیرا گزینه‌های دفع اقتصادی و زیست‌محیطی محدودی دارد و ۶۴ کشور در سطح جهان را درگیر کرده است. چین، ایالات متحده و اسپانیا از مهم‌ترین تولیدکنندگان شورابه داخلی هستند که نشان‌دهنده ناهم‌انگهی فضایی میان گسترش نمک‌زدایی و ظرفیت‌های پایدار مدیریت شورابه است (A. Elsaied et al., 2020).

اگرچه مطالعات پایش بلندمدت همچنان محدودند، شواهد موجود حاکی از آن است که بخشی از این اثرات فراتر از مرحله بهره‌برداری اولیه تداوم می‌یابد. کاهش پایدار تنوع کفزی، تغییر در ساختارهای تروفیک و غلبه اجتماعات مقاوم به تنش، سال‌ها پس از آغاز فعالیت آب‌شیرین‌کن‌ها گزارش شده است؛ موضوعی که نشان می‌دهد در مناطقی که تغییر کاربری اراضی عملاً غیرقابل بازگشت است، بازیابی اکوسیستم ممکن است کند یا ناقص باشد (M. Sharifinia et al., 2025)، (C. Moreno-Silva et al., 2025). در مجموع، ادبیات مرور شده نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی ناشی از توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها نقشی کلیدی در شکل‌دهی پاسخ اکوسیستم‌های دریایی ایفا می‌کند. در شرایطی که پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن در بستر سواحل به‌شدت دگرگون شده مستقر می‌شوند، اثرات زیست‌محیطی از طریق فرآیندهای تجمع‌ی و هم‌افزا تشدید می‌گردد. این پویایی‌ها به‌ویژه برای مناطق محدود از نظر اکولوژیک، مانند خلیج فارس و دریای عمان، اهمیت ویژه‌ای دارد و ضرورت رویکردهای برنامه‌ریزی ساحلی یکپارچه و مدیریت مبتنی بر اکوسیستم را که به‌طور صریح تعاملات زمین-دریا را در نظر می‌گیرند، برجسته می‌سازد. این یافته‌ها زمینه مفهومی لازم برای تحلیل خلأهای حکمرانی و تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی در بخش بعدی را فراهم می‌کنند.

● خلاهای حکمرانی و بروز تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی

پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از تغییر کاربری اراضی ساحلی مرتبط با پروژه‌های مگا آب‌شیرین‌کن، به‌طور تنگاتنگی با ساختارهای حکمرانی و فرآیندهای تصمیم‌گیری نهادی درهم‌تنیده‌اند. در بسیاری از مناطق ساحلی خشک، به‌ویژه در کشورهای عربی حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ، پروژه‌های نمک‌زدایی در چارچوب الگوهای حکمرانی متمرکز و فن‌سالارانه اجرا می‌شوند که در آن‌ها تأمین امنیت آبی و رشد اقتصادی بر ملاحظات مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی اولویت دارد. اگرچه این الگوها امکان توسعه سریع زیرساختی را فراهم کرده‌اند، اما هم‌زمان خلأهای نهادی معناداری ایجاد کرده‌اند که بستر بروز تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی را تقویت می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸. مسیرهای حکمرانی و تنظیم‌گری در پروژه‌های مگا نمک‌زدایی. این شکل تمایز و در عین حال پیوند میان حکمرانی و تنظیم‌گری سامانه‌های نمک‌زدایی با مدیریت شورابه را به‌صورت مفهومی نمایش می‌دهد. دو حوزه مکمل مداخله شامل گزینه‌های فناورانه و عملیاتی برای کاهش اثرات شورابه، و سازوکارهای حکمرانی و مقرراتی برای هدایت تصمیم‌گیری، نظارت و هماهنگی نهادی برجسته شده‌اند. شکل نشان می‌دهد که هم‌افزایی میان راهکارهای فنی و ابزارهای سیاستی، چارچوب‌های مقرراتی و مشارکت ذی‌نفعان، می‌تواند به شکل‌گیری یک عرصه کنش مشترک منجر شود که در آن مدیریت پایدار شورابه از طریق همکاری، حمایت عمومی و حکمرانی کارآمد نمک‌زدایی تسهیل می‌گردد. این رویکرد یکپارچه، منطق تحلیلی مرور حاضر را در پیوند دادن پاسخ‌های فنی و غیرفنی منعکس می‌کند (M. Al-Saidi et al., 2023).

از مهم‌ترین چالش‌های حکمرانی شناسایی‌شده در ادبیات، تکه‌تکه‌بودن اختیارات نهادی در حوزه نمک‌زدایی، کاربری اراضی ساحلی و حفاظت از محیط زیست دریایی است. در بسیاری از کشورهای دارای توسعه گسترده آب‌شیرین‌کن، برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌ها تحت نظارت وزارتخانه‌های ملی آب یا انرژی قرار دارد، در حالی که پهنه‌بندی ساحلی، مدیریت شیلات و مقررات زیست‌محیطی در حوزه اختیارات نهادهای جداگانه‌ای است که اغلب سازوکارهای هماهنگی مؤثری میان آن‌ها وجود ندارد (M. Al-Saidi et al., 2023). (Nairobi et al., 2018). پیامد این گسست نهادی آن است که ارزیابی‌های اثرات زیست‌محیطی معمولاً بر پیامدهای عملیاتی در سطح پروژه متمرکز می‌شوند و از بررسی تغییرات تجمعی کاربری اراضی، اتصال اکولوژیک و دگرگونی‌های بلندمدت ساحلی بازمی‌مانند. این وضعیت در دریاهای نیمه‌بسته‌ای مانند خلیج فارس «که ظرفیت تحمل فشارهای تجمعی محدود است» پیامدهای حادتری به‌همراه دارد. این چالش‌های نهادی با چارچوب‌بندی راهبردی آب‌شیرین‌کن‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی ملی تشدید می‌شود. در کشورهای حاشیه خلیج فارس که با کم‌آبی شدید مواجه‌اند، پروژه‌های نمک‌زدایی اغلب از الزامات مشارکت عمومی یا محدودیت‌های برنامه‌ریزی محلی مستثنا می‌شوند. هرچند این رویکرد موجب تسریع در اجرا می‌شود، اما نقش و صدای ذی‌نفعان محلی «از جمله جوامع ساحلی، صیادان خرد و نهادهای شهری» را در فرآیند تصمیم‌گیری به حاشیه می‌راند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که این حذف نهادی، به‌ویژه در شرایطی که جوامع محلی پیامدهای اکولوژیک پروژه‌ها را تجربه می‌کنند اما دسترسی متناسبی به منافع آب‌شیرین‌شده ندارند، به شکل‌گیری ادراک بی‌عدالتی محیط‌زیستی می‌انجامد (Villada-Canela., 2025). ادبیات موجود نشان می‌دهد که تعارضات اجتماعی-محیط‌زیستی مرتبط با آب‌شیرین‌کن‌ها معمولاً در سه بُعد به‌هم‌پیوسته بروز می‌کنند. نخست، تعارضات توزیعی که به نابرابری در تقسیم ریسک‌ها و منافع مربوط می‌شود؛ به‌گونه‌ای که هزینه‌های زیست‌محیطی «نظیر افت منابع شیلاتی، محدودیت دسترسی به سواحل و کاهش خدمات اکوسیستمی» بر جوامع محلی تحمیل می‌شود، در حالی که منافع آب‌شیرین‌شده عمدتاً به مراکز شهری یا صنعتی دوردست منتقل می‌گردد. دوم، تعارضات رویه‌ای که از شفافیت محدود، مشارکت ناکافی و ضعف پاسخ‌گویی نهادی در انتخاب مکان،

تملک زمین و پایش زیست محیطی ناشی می شود. سوم، تعارضات نمادین که در آن آب شیرین کن ها به نماد الگوهای توسعه نابرابر و اولویت دهی به منافع ملی یا شرکتی بر رفاه محلی بدل می شوند (World Bank., 2025). در بسیاری از بسترهای اجتماعی عربی، این تنش ها لزوماً به شکل تعارضات آشکار بروز نمی کنند. در شرایطی که فضای کنش جمعی محدود است، نارضایتی های اجتماعی اغلب به صورت نهفته باقی می ماند و در قالب کاهش اعتماد نهادی، مقاومت های غیررسمی نسبت به محدودیت های دسترسی ساحلی، یا اختلافات بر سر جبران خسارت و حقوق زمین ظاهر می شوند. مطالعات تطبیقی بین المللی نشان می دهد که این تعارضات نهفته می توانند در بلندمدت مشروعیت پروژه ها را تضعیف کرده و مدیریت تطبیقی محیط زیست را بدون بروز اعتراضات علنی با چالش مواجه سازند (B. Orlove et al., 2010). خلأ های حکمرانی شناسایی شده صرفاً به سطح ملی محدود نمی شوند. در مقیاس منطقه ای، نبود سازوکارهای مؤثر حکمرانی فرامرزی برای مدیریت پیامدهای نمک زدایی، به ویژه در پهنه های آبی مشترکی مانند خلیج فارس، چالش جدی تری ایجاد می کند. اگرچه کنوانسیون ها و پروتکل های منطقه ای به آلودگی دریایی پرداخته اند، اما ابزارهای اجرایی مرتبط با شورابه های نمک زدایی، صنعتی سازی ساحلی و اثرات تجمعی همچنان ضعیف یا ناهمگون باقی مانده اند (ROPME et al., 2013). این عدم تقارن مقرراتی امکان انباشت فشارهای زیست محیطی در مقیاس فراملی را فراهم کرده و خطر تخریب اکولوژیک و تنش های بین دولتی را افزایش می دهد. در مجموع، شواهد موجود نشان می دهد که تعارضات اجتماعی-محیط زیستی مرتبط با پروژه های مگا آب شیرین کن پیامد اجتناب ناپذیر کم آبی یا انتخاب فناوری نیستند، بلکه نتیجه فرآیندهای حکمرانی اند. در شرایطی که توسعه نمک زدایی بدون برنامه ریزی یکپارچه ساحلی، مشارکت معنادار ذی نفعان و هماهنگی منطقه ای دنبال شود، تغییر کاربری اراضی و تخریب اکوسیستم ها به کاتالیزورهای تعارض بدل می شوند. این پویایی ها برای خلیج فارس و دریای عمان «جایی که رشد سریع آب شیرین کن ها با اکوسیستم های نسبتاً بسته و ساختارهای حکمرانی متمرکز تلاقی یافته است» اهمیتی ویژه دارند و ضرورت بازاندیشی در چارچوب های نهادی مدیریت آب و ساحل را برجسته می سازند.

۴- بحث و نتیجه گیری

یافته های این مرور سیستماتیک نشان می دهد که پروژه های بزرگ نمک زدایی آب دریا را نمی توان صرفاً به عنوان مداخلات فناورانه برای جبران کمبود آب تفسیر کرد، بلکه این پروژه ها نقش محرک های ساختاری در بازپیکربندی سامانه های ساحلی-دریایی ایفا می کنند. شواهد تلفیق شده از مطالعات بررسی شده نشان می دهد که نمک زدایی بزرگ مقیاس به طور هم زمان بر الگوهای کاربری اراضی ساحلی، پویایی های اکولوژیکی و سازوکارهای حکمرانی اثر می گذارد و از طریق انباشت فشارهای فضایی و نهادی، زمینه بروز تعارضات نهفته اجتماعی-زیست محیطی را فراهم می سازد (E. Jones et al., 2019) (قشقایی و همکاران، ۱۴۰۴) (A. Elsaid et al., 2020). برخلاف رویکردهای پروژه محور که تأسیسات نمک زدایی را سازهایی مستقل در نظر می گیرند، این مرور نشان می دهد که این زیرساخت ها عموماً در قالب خوشه های صنعتی ساحلی و در هم مکانی با نیروگاه ها، صنایع انرژی بر و بنادر توسعه می یابند این الگوی استقرار، نمک زدایی را به زیرساخت لنگر تبدیل می کند که مسیر توسعه آبی سواحل را به صورت وابسته به مسیر قفل کرده و انعطاف پذیری کاربری اراضی را به طور معناداری کاهش می دهد. سخت سازی خط ساحلی، احیای زمین و ایجاد سامانه های برداشت و تخلیه، نه تنها پویایی های ژئومورفولوژیک و اتصال فضایی ساحل را مختل می کند، بلکه دسترسی اجتماعی به سواحل و کارکردهای چندمنظوره آن ها را نیز محدود می سازد. این پیامدها در سامانه های نیمه بسته ای مانند خلیج فارس، که ظرفیت تبادل آبی و توان خودترمیمی اکوسیستم ها محدود است، تشدید شده و اثراتی فراتر از مقیاس پروژه ایجاد می کند (فرمپینی فرهانی و همکاران، ۱۴۰۲) (H. D. Ibrahim et al., 2019). از منظر اکولوژیکی، نتایج این مطالعه نشان می دهد که تمرکز غالب ادبیات بر اثرات پساب شور، تنها بخشی از مسئله را پوشش می دهد. تغییر کاربری اراضی ساحلی مرتبط با نمک زدایی از طریق تخریب زیستگاه ها، تغییر الگوهای هیدرودینامیکی و انباشت آلاینده ها، مسیرهای تنش متعددی ایجاد می کند که به صورت هم افزا عمل می کنند (Nairobi et al., 2022) (C. Moreno-Silva et al., 2025). شواهد تجربی حاکی از آن است که اکوسیستم های حساس «از جمله جوامع بنتیک، علفزارهای دریایی، صخره های مرجانی و مانگروها» در این شرایط بیشترین آسیب را متحمل می شوند، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که این اکوسیستم ها پیشاپیش در آستانه تحمل فیزیولوژیکی قرار دارند. در دریاچه های کم عمق و گرم مانند خلیج فارس و دریای عمان، هم زمانی شوری زمینه ای بالا، دماهای حادی و توسعه صنعتی ساحلی سبب می شود دامنه اثرات نمک زدایی از نواحی مجاور خروجی ها فراتر رود. در نتیجه، تغییر کاربری اراضی نه یک پیامد جانبی، بلکه عامل تقویت کننده کلیدی در تشدید تخریب اکوسیستم های دریایی محسوب می شود (M. Sharifinia et al., 2025) (تقوی و همکاران، ۱۳۹۵)، (M. Sharifinia et al., 2022). این مرور همچنین نشان می دهد که تخریب محیط زیست به طور خودکار به تعارضات اجتماعی-زیست محیطی منجر نمی شود، بلکه این فرایند به شدت تحت تأثیر کیفیت حکمرانی است. در بسیاری از مناطق دارای تراکم بالای نمک زدایی، به ویژه در کشورهای عربی، الگوهای حکمرانی با تمرکزگرایی، تفکیک بخشی نهادی و مشارکت محدود ذی نفعان محلی مشخص می شوند (ROPME et al., 2013) (A. Bond et al., 2012). این ساختارها اگرچه توسعه سریع زیرساخت را تسهیل می کنند، اما در مدیریت اثرات تجمعی، تعاملات خشکی-دریا و ریسک های بلندمدت اکولوژیکی کارآمد نیستند. چارچوب بندی نمک زدایی به عنوان زیرساخت حیاتی ملی، فضای تصمیم گیری مشارکتی را محدود کرده و به

عدم تقارن در توزیع منافع و هزینه‌ها می‌انجامد؛ به‌گونه‌ای که جوامع ساحلی بار تخریب محیط‌زیست، افت کیفیت شیلات و محدودیت دسترسی را متحمل می‌شوند، در حالی که منافع اصلی آب تولیدی به مراکز شهری یا صنعتی دوردست منتقل می‌شود. این شکاف توزیعی، اثرات محیطی را به مسائل عدالت، مشروعیت و اعتماد نهادی پیوند می‌زند و زمینه تعارضات پایدار «بدون بروز اعتراضات آشکار» را فراهم می‌کند (C. Moreno-Silva et al., 2025)، (Villada-Canela., 2025). این چالش‌ها در سامانه‌های دریایی مشترک مانند خلیج فارس، به‌دلیل ضعف هماهنگی فرامرزی و ناهمگونی مقررات، تشدید می‌شوند. برآیند تحلیلی این یافته‌ها نشان می‌دهد که تعارضات ساحلی مرتبط با نمک‌زدایی نه حاصل یک عامل منفرد، بلکه نتیجه ناهم‌آهنگی میان مقیاس و الگوی فضایی فناوری، مسیرهای تنش اکولوژیکی تجمعی، ظرفیت نهادی حکمرانی و پویایی‌های توزیع منافع و هزینه‌ها هستند. زمانی که توسعه فناوریانه از ظرفیت نهادی و اکولوژیکی پیشی می‌گیرد، نمک‌زدایی از یک راه‌حل فنی به منبع ریسک‌های ساختاری تبدیل می‌شود. این تفسیر، نمک‌زدایی را از سطح یک پروژه مهندسی به سطح یک مسئله حکمرانی سرزمینی-اکولوژیکی ارتقا می‌دهد. اگرچه دامنه این مرور جهانی است، پیامدهای آن برای خلیج فارس و دریای عمان اهمیت ویژه‌ای دارد. تمرکز بالای تأسیسات نمک‌زدایی، شکنندگی اکوسیستم‌های دریایی، و تداوم توسعه صنعتی ساحلی در این مناطق، خطر عبور از آستانه‌های اکولوژیکی و تشدید تنش‌های اجتماعی را افزایش می‌دهد. مدل مفهومی استخراج‌شده از این مطالعه می‌تواند به‌عنوان ابزاری پیش‌نگر برای شناسایی ریسک‌های تعارض پیش از بروز آشکار آن‌ها به‌کار رود و گذار از رویکردهای واکنشی به برنامه‌ریزی حساس به تعارض و مبتنی بر اکوسیستم را تسهیل کند. بر این اساس، مطالعه حاضر استدلال می‌کند که کاهش اثرات منفی و پیشگیری از تعارضات پایدار، مستلزم بازاندیشی بنیادین در نحوه برنامه‌ریزی نمک‌زدایی است. ادغام نمک‌زدایی در چارچوب‌های مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی، تقویت ارزیابی اثرات تجمعی، و هم‌راستاسازی مقیاس فناوری با ظرفیت اکولوژیکی و نهادی، از الزامات کلیدی برای پایداری بلندمدت این فناوری در مناطق ساحلی خشک به‌شمار می‌رود. مجموعاً، بر پایه شواهد و مصادیق مستند از مناطق ساحلی خشک و نیمه‌خشک جهان (از جمله خلیج کالیفرنیا، دریای سرخ، مدیترانه شرقی، سواحل استرالیا و شبه‌جزیره عربستان)، یافته‌های این مرور سیستماتیک با قابلیت تعمیم علمی به اکوسیستم‌های ساحلی و دریایی خلیج فارس و دریای عمان، دلالت‌های کلیدی زیر را به اختصار نشان می‌دهد:

- **نمک‌زدایی بزرگ‌مقیاس به‌عنوان محرک ساختاری بازیکربندی کاربری اراضی ساحلی:** شواهد تطبیقی جهانی نشان می‌دهد که مگا‌تأسیسات نمک‌زدایی، به‌ویژه در هم‌مکانی با نیروگاه‌ها و صنایع انرژی‌بر، به‌عنوان زیرساخت‌های لنگر عمل کرده و مسیر توسعه سواحل را به الگوهای صنعتی وابسته به مسیر قفل می‌کنند. این سازوکار با ساختار فضایی سواحل خلیج فارس و دریای عمان هم‌خوان بوده و ریسک حذف پایدار کاربری‌های اکولوژیکی، شیلاتی و چندمنظوره را افزایش می‌دهد.
- **نقش تغییر کاربری اراضی به‌عنوان متغیر واسطه تشدیدکننده اثرات اکولوژیکی نمک‌زدایی:** یافته‌ها نشان می‌دهد که تخریب زیستگاه‌های ساحلی، سخت‌سازی خط ساحلی و کاهش ظرفیت بافرهای طبیعی، اثرات پساب‌های شور و حرارتی را در سامانه‌های دریایی نیمه‌بسته به‌صورت غیرخطی تقویت می‌کند. در خلیج فارس و دریای عمان «با شوری و دمای زمینه‌ای بالا و تبادل آبی محدود» این تعامل می‌تواند به تضعیف سریع‌تر آستانه‌های تحمل اکولوژیکی منجر شود.
- **غلبه اثرات تجمعی بر اثرات موضعی پروژه‌ای:** شواهد جهانی نشان می‌دهد که تمرکز بر ارزیابی‌های پروژه‌محور، اثرات هم‌افزای مکانی و زمانی خوشه‌های نمک‌زدایی را به‌طور سیستماتیک نادیده می‌گیرد. این یافته برای خلیج فارس و دریای عمان «با تراکم بالای تأسیسات فعال و در حال توسعه» نشان می‌دهد که بدون مدیریت تجمعی، حتی پروژه‌های به‌ظاهر کم‌اثر می‌توانند به تخریب‌های منطقه‌ای پایدار منجر شوند.
- **ماهیت حکمرانی محور تعارضات اجتماعی-زیست‌محیطی مرتبط با نمک‌زدایی:** تجربه مناطق مشابه نشان می‌دهد که تعارضات ناشی از نمک‌زدایی بیش از آنکه فناوریانه یا صرفاً زیست‌محیطی باشند، ریشه در تمرکزگرایی نهادی، تفکیک بخشی مسئولیت‌ها و مشارکت محدود ذی‌نفعان محلی دارند. این الگو با ساختارهای حکمرانی غالب در کشورهای حاشیه خلیج فارس هم‌راستاست و تداوم تنش‌های نهفته اجتماعی-زیست‌محیطی را توضیح می‌دهد.
- **عدم تقارن فضایی-اجتماعی در توزیع هزینه‌ها و منافع:** شواهد تطبیقی نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق ساحلی خشک، جوامع محلی هزینه‌های اکولوژیکی و فضایی صنعتی‌شدن سواحل را متحمل می‌شوند، در حالی که منافع آب تولیدی به مراکز شهری یا صنعتی دوردست منتقل می‌شود. این الگوی توزیعی در خلیج فارس و دریای عمان نیز به‌صورت ساختاری مشاهده شده و پیامدهای محیط‌زیستی را به مسائل عدالت، مشروعیت و اعتماد نهادی پیوند می‌زند.
- **تشدید ریسک‌ها در سامانه‌های دریایی مشترک و فرامرزی:** یافته‌های جهانی نشان می‌دهد که در دریاهای مشترک، ضعف هماهنگی فرامرزی و ناهمگونی چارچوب‌های مقرراتی، امکان انباشت فشارهای اکولوژیکی را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کند. این نتیجه به‌طور مستقیم برای خلیج فارس «به‌عنوان یکی از بسته‌ترین و صنعتی‌ترین پهنه‌های دریایی جهان» قابل تعمیم است.
- **ضرورت گذار از رویکرد پروژه‌محور به برنامه‌ریزی یکپارچه ساحلی-دریایی:** کاهش اثرات منفی و پیشگیری از تعارضات پایدار تنها از طریق ادغام نمک‌زدایی در چارچوب‌های مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی، تقویت ارزیابی اثرات تجمعی، و هم‌راستاسازی مقیاس فناوری

با ظرفیت‌های اکولوژیکی و نهادی امکان‌پذیر است؛ الزامی که برای خلیج فارس و دریای عمان شرط بنیادین پایداری بلندمدت امنیت آبی و سلامت اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شود.

در نهایت، این بررسی مروری سیستماتیک نشان می‌دهد که نمک‌زدایی بزرگ‌مقیاس در خلیج فارس و دریای عمان باید نه به‌عنوان یک راه‌حل مهندسی منفرد، بلکه به‌مثابه فرآیندی فضایی-اکولوژیکی-حکمرانی با پیامدهای چندمقیاسی درک و مدیریت شود. این تغییر پارادایم، پیش‌شرط اساسی برای جلوگیری از تخریب تدریجی اکوسیستم‌های دریایی و شکل‌گیری تعارضات پایدار در یکی از حساس‌ترین پهنه‌های دریایی جهان (خلیج فارس و دریای عمان) است.

پیوست

جدول پ ۱. منابع منتخب مورد استفاده در فرآیند غربالگری و اعتباربخشی مرور سیستماتیک (PRISMA 2020)

موضوع / بحث کلیدی	نویسندگان	
رشد نمایی نمک‌زدایی و فشار تجمعی ساحلی	Jones et al. (2019)	۱
ناکارآمدی EIA پروژه‌محور	Lattemann & Hopner (2008)	۲
پس‌آب نمک‌زدایی در تنوع و تعادل زیستی دریایی-ساحلی	Gupta et al. (2026)	۳
افزایش شوری موضعی فراتر از آستانه زیستی	Ibrahim & Eltahir (2019)	۴
تخریب ماکروبن‌توز و آلودگی رسوب	Sharifinia et al. (2022)	۵
کاهش تنوع زیستی کفزی	Sharifinia et al. (2025)	۶
تغییر کاربری ساحلی = تشدید اثرات اکولوژیک	Moreno-Silva et al. (2025)	۷
ضرورت مدیریت یکپارچه ساحلی	UNEP (2018)	۸
ضعف حکمرانی در اثرات تجمعی	Bond et al. (2012)	۹
فشار صنعتی فرامرزی	ROPME (2019)	۱۰
تعارضات اجتماعی توزیعی نمک‌زدایی	Villada-Canela (2025)	۱۱
تهدیدات پایداری اکوسیستم دریایی خلیج فارس	Al Abri et al. (2025)	۱۲
پیوند نمک‌زدایی و هزینه‌ها	Matters (2022)	۱۳
فشار تجمعی ساحلی نادیده گرفته می‌شود	Missimer & Maliva (2018)	۱۴
تغییر شکل‌های مورفولوژی و نظام اجتماعی کفزی دریایی	Sirota et al. (2024)	۱۵
اثرات شورابه بر بوم‌سازگان نزدیک	Roberts et al. (2010)	۱۶
چشم انداز و چالش‌های نمک‌زدایی آب دریا	Shokri & Sanavi Fard (2023)	۱۷
حکمرانی و اقتصاد نمک‌زدایی	World Bank (2025)	۱۸
رویکرد انسان‌شناختی - منابع پایدار آب (نمک‌زدایی)	Orlove & Caton (2010)	۱۹
اثر تجمعی و اثر منفرد پروژه‌ها بر اکوسیستم‌های دریایی	Halpern et al. (2025)	۲۰
ضعف پیوند سیاست اجرایی و نظارتی-محیط زیست	Shemer & Semiat (2017)	۲۱
حاکمیت نمک‌زدایی-نظام‌سازی نظارتی و اجتماعی-فنی	Al-Saidi et al. (2023)	۲۲
تأثیرات بلند مدت نمک‌زدایی در خلیج فارس/عربستان	Paparella et al (2022)	۲۳
چالش‌های مدیریت ساحلی و دریایی	Botero et al. (2025)	۲۴
تمرکزگرایی و ریسک تعارض (فناوری‌های نمک‌زدایی)	Elsaid et al. (2020)	۲۵
هم‌افزایی شوری، دما و صنعت بر (تنوع اکوسیستم دریایی در خلیج فارس)	Naser (2014)	۲۶
اثرات آب شیرین‌کن‌های صنعتی بر اکوسیستم آبی خلیج فارس	تقوی و همکاران (۱۳۹۵)	۲۷
سنجش تغییر کاربری اراضی ساحلی هرمزگان	فرمehینی و همکاران (۱۴۰۲)	۲۸
ارزیابی چرخه عمر نمک‌زدایی (مطالعه موری چاپهار و کنگان)	بخشایش و همکاران (۱۳۹۹)	۲۹
تأثیر نمک‌زدایی بر جوامع ماکروبن‌تیک در خلیج فارس	قشقایی و همکاران (۱۴۰۴)	۳۰

- A. Bond, J. Morrison-Saunders, and R. Howitt (Eds.), *Sustainability Assessment: Pluralism, Practice and Progress*. London, U.K.: Routledge, 2012
- A. Elsaid, M. Kamil, M. A. Sayed, and M. A. Abdelkareem, “Environmental impact of desalination technologies: A review,” *Science of the Total Environment*, vol. 748, Art. no. 141528, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- A. Shokri and M. Sanavi Fard, “Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 169, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007>
- B. Orlove and S. C. Caton, “Water sustainability: Anthropological approaches and prospects,” *Annual Review of Anthropology*, vol. 39, pp. 401–415, 2010, <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.012809.105045>
- B. S. Halpern, F. Frazier, and co-authors, “Cumulative impacts to global marine ecosystems projected to more than double by mid-century,” *MARINE ECOLOGY*, vol. 389, 2025, <https://doi.org/10.1126/science.adv2906>
- C. M. Botero e, and co-authors, “The Multiple Challenges Faced by Coastal and Marine Governance,” *Water*, vol. 17, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17152322>
- C. Moreno-Silva, L. Pagliero, N. McIntyre, et al., “Environmental and social impacts from desalinated water supply projects,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 115, Art. no. 107961, Aug. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107961>
- C. Sheppard, A. Al-Husiani, F. Al-Jamali, F. Al-Yamani, R. Baldwin, J. Bishop, et al., “The Gulf: A young sea in decline,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, no. 1, pp. 13–38, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.10.017>
- D. A. Roberts, E. L. Johnston, and N. A. Knott, “Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies,” *Water Research*, vol. 44, no. 18, pp. 5117–5128, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>
- E. Jones, M. Qadir, M. T. H. van Vliet, V. Smakhtin, and S.-M. Kang, “The state of desalination and brine production: A global outlook,” *Science of the Total Environment*, vol. 657, pp. 1343–1356, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- F. Paparella, M. Barretta, A. Berti, and co-authors, “Long-term, basin-scale salinity impacts from desalination in the Arabian/Persian Gulf,” *Scientific Reports*, vol. 12, Art. no. 20549, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25167-5>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point (SOLAW 2021)*. Rome, Italy: FAO, 2021. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bc8810ae-2a13-4cfe-b019-339158c7e608/content/cb7654en.html>
- G. Matters, “The desalination process gives us freshwater—at a huge environmental cost,” *World Economic Forum*, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/stories/2022/12/desalination-process-freshwater-negative-environmental-cost/>
- H. A. Naser, “Marine Ecosystem Diversity in the Arabian Gulf,” in *Environmental Change in the Arabian Gulf*, IntechOpen, 2014, <https://doi.org/10.5772/57425>
- H. D. Ibrahim, and co-authors, “Impact of brine discharge from seawater desalination plants on Persian Gulf salinity,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 145, no. 9, 2019, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001604](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001604)
- H. Hosseini, M. Naderloo, A. Danekar, and co-authors, “Marine health of the Arabian Gulf: Drivers of pollution and assessment approaches focusing on desalination activities,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 164, Art. no. 112085, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112085>
- H. Shemer and R. Semiat, “Sustainable RO desalination – Energy demand and environmental impact,” *Desalination*, vol. 424, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.021>
- I. Al Abri, and co-authors, “Assessing marine sustainability in the Gulf Region: A comparative analysis using the ocean health index with a focus on Oman,” *Food and Humanity*, vol. 5, Art. no. 100942, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100942>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner et al., Eds. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2022, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

- M. Al-Saidi, I. Saadaoui, and R. Ben-Hamadou, "Governing desalination, managing the brine: A review and systematization of regulatory and socio-technical issues," *Water Resources and Industry*, vol. 30, Art. no. 100225, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100225>
- M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. no. n71, 2021, <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- M. R. Riegl and J. A. Purkis, Eds., *Coral Reefs of the Gulf: Adaptation to Climatic Extremes*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-3008-3>
- M. Sharifinia, M. Keshavarzifard, P. Hossein Khezri, et al., "Impact of desalination plant brine discharge on macrobenthic communities in the Persian Gulf," *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 230, Art. no. 105465, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2025.105465>
- M. Sharifinia, M. Keshavarzifard, P. Hosseinkhezri, M. H. Khanjani, C. K. Yap, W. O. Smith, M. Daliri, and A. Haghsheenas, "The impact assessment of desalination plant discharges on heavy metal pollution in the coastal sediments of the Persian Gulf," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 178, Art. no. 113599, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113599>
- M. Villada-Canela, "Understanding social aspects on desalination for community adaptation and resilience in Baja California, México," *Social Sciences*, vol. 14, no. 2, Art. no. 110, 2025, <https://doi.org/10.3390/socsci14020110>
- P. Gupta and M. D. Arciniegas-Perez, "Impact of Brine Discharge from Desalination Plants on Marine Ecosystems: A Review," *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 49, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100693>
- R. Sirota, and co-authors, "Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, 2024, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07748>
- Regional Organization for the Protection of the Marine Environment (ROPME), *State of the Marine Environment Report (SOMER): Sustainability Message to Decision-Makers*. Kuwait City, Kuwait: ROPME, 2013.
- S. Lattemann and T. Höpner, "Environmental impact and impact assessment of seawater desalination," *Desalination*, vol. 220, nos. 1-3, pp. 1-15, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- T. M. Missimer and R. G. Maliva, "Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls," *Desalination*, vol. 434, pp. 198-215, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP), *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris, France: UNESCO, 2020.
- United Nations Environment Programme (UNEP), *Consolidated Background Paper of the Discussion Papers Presented at the First Meeting of the Ad Hoc Open-Ended Expert Group on Marine Litter and Microplastics*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2018.
- United Nations Environment Programme (UNEP), *Desalination and the Environment: Impacts, Mitigation and Governance*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2022.
- World Bank, "Governance and Economics of Desalination and Reuse," *Governance and Economics of Desalination and Reuse* Washington, D.C., 2025.
- پ. قشقایی، م. صفاری، و. دلیری، و. کامرانی، «بررسی پیامدهای زیست‌محیطی تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن‌ها بر اکوسیستم‌های دریایی و اثرات آن بر سلامت انسان: یک مطالعه مروری»، فصلنامه طب دریا، سال ۷، شماره ۳، ۱۴۰۴ <https://doi.org/10.30491/7.3.174>
- ل. تقوی و همکاران، «بررسی اثرات ناشی از آب‌شیرین‌کن‌های صنعتی بر اکوسیستم آبی خلیج فارس»، نشریه پایداری، توسعه و محیط زیست، ۱۳۹۵ <https://www.magiran.com/p1690877>
- م. فرمپه‌نی‌فرهانی و همکاران، «سنجش پیشروی کاربری اراضی شهری و انسان ساخت به سمت خط ساحلی در محدوده ساحلی استان هرمزگان»، فصلنامه محیط زیست جانوری، ۱۴۰۲، دوره: ۱۵، شماره: ۱، <https://aejournals.org/index.php/AEJ/article/view/480/475>
- مرتضی بخشایش، مریم فرهانی، و آریتا بهبهانی‌نیا، «بکارگیری ارزیابی چرخه حیات (LCA) در مقایسه اثرات محیط زیستی سامانه های نمک زدایی اسمز معکوس با آبگیری مستقیم از دریا و چاه‌های ساحلی در سامانه‌های نمک زدایی چاهبار و کنگان»، مجله تحقیقات منابع آب ایران، دوره: ۱۶، ش: ۱، ۱۳۹۹ <https://sid.ir/paper/403384/fa>