بررسی و مدل‌سازی اثرات شیرین‌سازی آب بر توزیع مکانی و زمانی شوری آب دریای خزر

The Impact and Modeling of Desalination on Spatial and Temporal Salinity of Caspian Sea

ندا رضاوند منفرد[1] | مهدی مظاهری[2]| سید مصطفی سیادت موسوی[3]

۱.دکترای سازه‌های آبی دیارتمان مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران .رایانامه: n.rezavand@modares.ac.ir

۲. دانشیار دیارتمان مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: m.mazaheri@modares.ac.ir

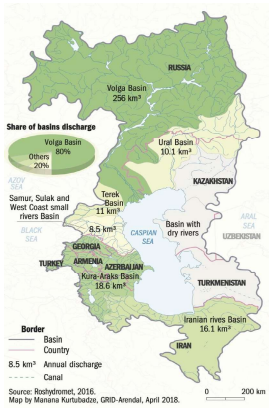
۳. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: siadatmosavi@iust.ac.ir

Abstract

دریای خزر در سال‌های اخیر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کاهش سطح آب و فعالیت‌های انسانی دچار تغییرات محیطی قابل توجهی شده است. این مطالعه رفتار هیدرودینامیکی و توزیع شوری آینده را تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، همراه با ارزیابی اثرات آب‌شیرین‌کن‌ها بررسی می‌کند. برای این منظور، یک مدل عددی مبتنی بر Delft3D با استفاده از سناریوهای SSP126 تا SSP585 به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم موجب تغییر الگوی جریان‌ها، تراز آب و توزیع شوری می‌شود، در حالی که آب‌شیرین‌کن‌ها باعث افزایش موضعی شوری در نزدیکی مناطق تخلیه شده که به‌تدریج به دلیل اختلاط در فاصله‌های دورتر کاهش می‌یابد. این مطالعه از برنامه‌ریزی پایدار سواحل و توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها پشتیبانی می‌کند.

The Caspian Sea has undergone significant environmental changes driven by climate change, declining water levels, and human activities. This study examines future hydrodynamic behavior and salinity distribution under different climate scenarios while assessing the impacts of seawater desalination. A Delft3D-based numerical model was applied using SSP126–SSP585 scenarios. Results show that climate change alters circulation, water levels, and salinity patterns, while desalination causes localized salinity increases near discharge zones that diminish offshore due to mixing. The study supports sustainable coastal and desalination planning.

Introduction

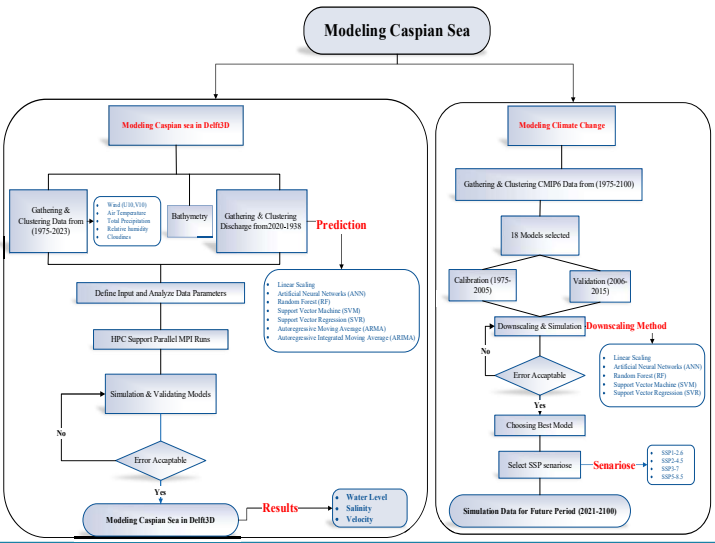


حوضه‌های آبریز ورودی به دریای خزر و سهم نسبی هر حوضه در تخلیه سالانه آب. حوضه ولگا با بیشترین سهم (حدود ۸۰٪) مهم‌ترین منبع ورودی آب به دریای خزر محسوب می‌شود، در حالی که سایر حوضه‌ها شامل اورال، کورا-ارس، رودخانه‌های کوچک ساحلی ایران و قفقاز، و مناطق با رودخانه‌های فصلی سهم کمتری در تغذیه آبی این دریا دارند.

دریای خزر به عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی بسته جهان، نقش مهمی در توسعه زیست‌محیطی و اقتصادی کشورهای ساحلی ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، کاهش سطح آب و افزایش تقاضای آب شیرین نگرانی‌هایی را درباره شرایط آینده هیدرودینامیکی و کیفیت آب ایجاد کرده است. همچنین توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها می‌تواند بر الگوی شوری و جریان‌های ساحلی تأثیر بگذارد. از این رو، ارزیابی اثرات همزمان تغییرات اقلیمی و توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها برای مدیریت پایدار مناطق ساحلی ضروری است.

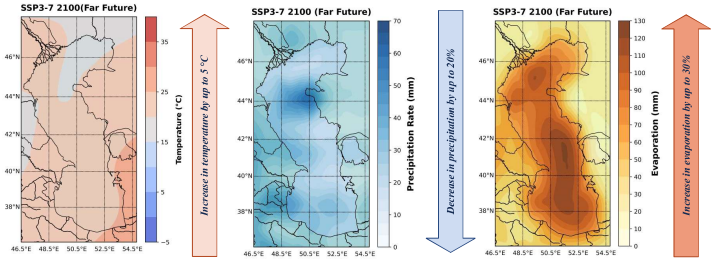
The Caspian Sea, the world's largest enclosed inland water body, plays a vital role in the environmental and economic development of the surrounding countries. In recent decades, climate change, declining water levels, and increasing freshwater demand have raised concerns about future hydrodynamic conditions and water quality. Moreover, the expansion of seawater desalination projects may alter local salinity and circulation patterns. Therefore, evaluating the combined impacts of climate change and desalination activities is essential for sustainable coastal management.

Methods

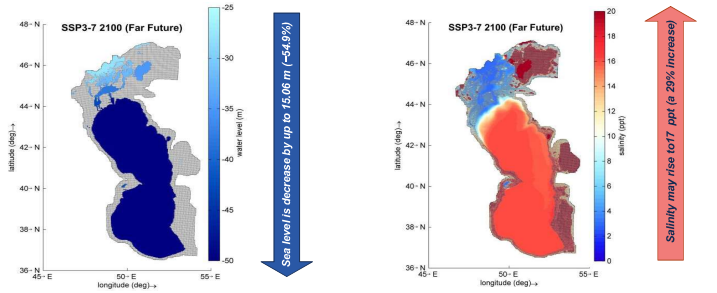


Results

در سناریوهای با انتشار بالا، نیروهای اقلیمی نشان‌دهنده افزایش واضح دمای هوا و تبخیر در حوضه دریای خزر همراه با کاهش بارش هستند. این تغییرات موجب تشدید کسری آب شیرین و افزایش تنش در سیستم هیدرولوژیکی شده و در نتیجه تغییرات هیدرودینامیکی در مقیاس حوضه را تقویت می‌کند.



نتایج مدل نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در تراز آب و توزیع شوری در سناریوهای آینده است. نوسانات سطح آب در شرایط انتشار بالا شدیدتر شده و شوری به‌صورت ناهمگن در فضا توزیع می‌شود؛ به‌طوری‌که در نواحی ساحلی و محل تخلیه آب‌شیرین‌کن‌ها افزایش موضعی دارد و با فاصله گرفتن از ساحل به دلیل فرآیندهای اختلاط کاهش می‌یابد.



Under high-emission climate scenarios, the Caspian Sea basin is projected to experience increased air temperature and evaporation, accompanied by reduced precipitation, leading to an intensified freshwater deficit and greater hydrological stress. These climatic changes significantly influence the basin's hydrodynamics, resulting in more pronounced water level fluctuations and spatial variations in salinity. Model simulations indicate localized salinity increases in coastal areas and around desalination brine discharge points, while hydrodynamic mixing gradually reduces salinity anomalies offshore. Overall, the impacts are considerably more pronounced under the pessimistic scenario (SSP585) than under the optimistic scenario (SSP126).

Conclusion

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی آینده و توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی رژیم هیدرودینامیکی و ساختار شوری دریای خزر را تحت تأثیر قرار دهند. استفاده از مدل‌سازی عددی، ابزاری مناسب برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب ساحلی فراهم می‌کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در انتخاب راهکارهای مناسب برای توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها و مدیریت محیط‌زیستی دریای خزر در شرایط اقلیمی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

The results demonstrate that future climate change and desalination development can substantially influence the hydrodynamic regime and salinity structure of the Caspian Sea. The integrated numerical modeling approach provides valuable insights for evaluating environmental impacts and supports sustainable planning of coastal water resources. These findings can assist decision-makers in selecting environmentally appropriate desalination strategies under future climate conditions.

References

1. **Lesser, G. R., Roelvink, J. A., Van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004).** Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, **51**, 883–915.
2. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021).** *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Cambridge University Press.
3. **Deltares. (2023).** *Delft3D-FM User Manual and Scientific Documentation.*
4. **Hosseini, S. M., & Sultanpour, M.** (2021). *Comparison of spatial interpolation methods for estimating heavy metals in sediments of the Caspian Sea*. Expert Systems with Applications, 38(3), 1632–1649.