



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Investigation of different evaporation scenarios in the Caspian Sea on water level and salinity of Gorgan Bay using a hydrodynamic model

Behnaz Ghafouri¹, Mehdi Mazaheri^{2*}

¹ Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2025/10/11

Revised: 2025/10/11

Accepted: 2025/10/11

Keywords:

Gorgan Bay

Caspian Sea

Increased Evaporation

Climate Change

Hydrodynamic Model

*Corresponding author:

✉ m.mazaheri@modares.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objectives: The Caspian Sea, as the largest enclosed inland water body in the world, plays a crucial role in regulating the water level of its coastal zones and surrounding wetlands. The water level of this lake is strongly influenced by various climatic factors, particularly evaporation. Since the Caspian Sea lacks a natural outlet to the world's oceans, evaporation represents the primary mechanism for water loss. Variations in evaporation rates can significantly impact the sea level and coastal ecosystems, including the Gorgan Bay. Gorgan Bay, the largest gulf of the Caspian Sea, holds substantial environmental and economic importance and is highly sensitive to water level fluctuations. This study aims to investigate the effects of different evaporation increase scenarios on the water level and salinity of Gorgan Bay through hydrodynamic modeling.

Methods: In this study, a hydrodynamic model was employed to simulate the effects of evaporation changes on the water level and salinity of the Caspian Sea and Gorgan Bay. The model incorporates key parameters such as temperature, evaporation, wind, and water level fluctuations, allowing for the analysis of their interactions across various temporal and spatial scales. It provides accurate predictions of ecological changes and water resource dynamics. Three climate-based evaporation increase scenarios (10%, 20%, and 30%) were applied over the period from 2020 to 2040 to evaluate their impact on regional water levels and salinity. This study is the first to utilize the Delft3D numerical model for an integrated simulation of the entire Caspian Sea and Gorgan Bay system. Evaporation scenarios were calculated based on long-term climatic data, and the effects of inflowing rivers, including the Volga River and other major tributaries, were also incorporated into the modeling process to better capture their influence on water balance and salinity distribution.

Findings: The results of this study demonstrate that increased evaporation leads to a significant reduction in the water level of the Caspian Sea and Gorgan Bay. In the scenario with a 10% increase in evaporation, the water level drops to -28.3 meters, causing the Chapoghli Channel to dry up, which reduces the area of the bay to 230 km². In the 20% evaporation increase scenario, the water level decreases to -28.7 meters, and in addition to the Chapoghli Channel, the Ashuradeh Channel also dries up, further reducing the bay's area to 200 km². In the scenario with a 30% increase in evaporation, the water level reaches -29.1 meters. From 2032 onwards, the water connection between the bay and the Caspian Sea is completely severed, with the bay's area shrinking to 175 km². The salinity modeling results also indicate an increasing trend in salinity in Gorgan Bay across all three scenarios. In the 30% evaporation increase scenario, the salinity in the center of the bay reaches 23.6 ppt, marking a substantial rise compared to the current level.

Conclusion: Based on the results obtained, the management of water resources in Gorgan Bay and the monitoring of its hydrological changes appear to be essential. To prevent the bay from drying up under the predicted critical conditions, it is recommended to dredge the connecting channels with minimal damage to the wetlands and bird habitats. Given that the sedimentation rate in the Chapoghli Channel is lower than in other channels, this channel could be the primary candidate for dredging. Additionally, transferring water from the Caspian Sea to Gorgan Bay via a secure pipeline or channel in the central region of the Miankaleh Peninsula, due to its more favorable morphological conditions, is proposed as a cost-effective solution. These measures could play a crucial role in mitigating the negative effects of increased evaporation on the ecosystem and water resources of Gorgan Bay.



NUMBER OF TABLES

1



NUMBER OF FIGURES

13



NUMBER OF REFERENCES

26

مقاله پژوهشی

بررسی سناریوهای مختلف اثرات تبخیر در دریای خزر بر تراز سطح آب و میزان شوری خلیج گرگان با استفاده از مدل هیدرودینامیک

بهناز غفوری^۱، مهدی مظاهری^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران^۲ دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

پیشینه و اهداف: دریای خزر به عنوان بزرگترین دریاچه بسته جهان، نقش مهمی در تنظیم تراز سطح آب سواحل و تالابهای پیرامونی خود ایفا می کند. تراز سطح آب این دریاچه تحت تأثیر عوامل اقلیمی مختلفی به ویژه تبخیر قرار دارد. از آنجا که دریای خزر فاقد خروجی طبیعی به اقیانوس ها است، تبخیر تنها مسیر خروج آب محسوب می شود. تغییرات در میزان تبخیر می تواند تأثیرات قابل توجهی بر تراز آب و اکوسیستم های ساحلی، از جمله خلیج گرگان، داشته باشد. خلیج گرگان، به عنوان بزرگترین خلیج دریای خزر، از نظر زیست محیطی و اقتصادی اهمیت بالایی دارد و نسبت به نوسانات تراز سطح آب بسیار حساس است. هدف این تحقیق، بررسی اثر سناریوهای مختلف افزایش تبخیر بر تراز آب و شوری خلیج گرگان با استفاده از مدل سازی هیدرودینامیکی است.

روش ها: در این پژوهش از مدل هیدرودینامیکی برای شبیه سازی تأثیر تغییرات تبخیر بر سطح آب و شوری دریای خزر و خلیج گرگان استفاده شد. این مدل با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر دما، تبخیر، باد و تغییرات سطح آب، اثرات متقابل آن ها را در مقیاس های زمانی و مکانی مختلف تحلیل کرده و پیش بینی های دقیقی از تغییرات اکولوژیک و منابع آبی ارائه می دهد. در این مطالعه سه سناریوی مختلف افزایش تبخیر (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) که بر پایه داده های اقلیمی در نظر گرفته شده اند در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ اعمال و تأثیر آن ها بر سطح آب و شوری منطقه ارزیابی شد. این مطالعه برای نخستین بار از مدل عددی Delft3D جهت شبیه سازی یکپارچه دریای خزر و خلیج گرگان استفاده کرده است. همچنین، سناریوهای افزایش تبخیر بر اساس داده های اقلیمی محاسبه و اعمال شده و اثر رودخانه های ورودی از جمله رود ولگا و رودخانه های اصلی در تعیین تراز در فرآیند مدل سازی در نظر گرفته شده است.

یافته ها: یافته های این تحقیق نشان می دهند که افزایش تبخیر باعث کاهش قابل توجه سطح آب دریای خزر و خلیج گرگان می شود. در سناریوی افزایش ۱۰ درصدی تبخیر، سطح آب به تراز منفی ۲۸/۳ متر رسیده و کانال چپقی خشک می شود که مساحت خلیج را به ۲۳۰ کیلومترمربع کاهش می دهد. با افزایش ۲۰ درصدی تبخیر، سطح آب به منفی ۲۸/۷ متر افت کرده و علاوه بر کانال چپقی، کانال آشوراده نیز خشک می شود که مساحت خلیج را به ۲۰۰ کیلومترمربع کاهش می دهد. در سناریوی ۳۰ درصد افزایش تبخیر، سطح آب به منفی ۲۹/۱ متر رسیده و از سال ۲۰۳۲ ارتباط آبی خلیج با دریای خزر کاملاً قطع می شود و مساحت خلیج به ۱۷۵ کیلومترمربع کاهش می یابد. نتایج مدل سازی شوری نیز نشان می دهد که در هر سه سناریو، روند افزایش شوری در خلیج گرگان مشاهده خواهد شد. در سناریوی افزایش ۳۰ درصدی تبخیر، میزان شوری در مرکز خلیج به ۲۳/۶ ppt می رسد که نشان دهنده افزایش قابل توجهی نسبت به مقدار فعلی است.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج حاصل، مدیریت منابع آبی خلیج گرگان و پایش تغییرات هیدرولوژیکی آن ضروری به نظر می رسد. برای جلوگیری از خشکی خلیج در شرایط بحرانی پیش بینی شده، پیشنهاد می شود لایروبی کانال های ارتباطی با در نظر گرفتن حداقل آسیب به تالاب ها و زیستگاه های پرندگان انجام شود. با توجه به اینکه سرعت رسوب گذاری در کانال چپقی کمتر از سایر کانال ها است، این کانال می تواند گزینه اول برای لایروبی باشد. همچنین، انتقال آب دریای خزر به خلیج گرگان از طریق یک خط لوله یا کانال ایمن در ناحیه مرکزی شبه جزیره میانکاله، به دلیل شرایط مورفولوژی مناسب تر، به عنوان راهکاری مقرون به صرفه پیشنهاد می شود. این اقدامات می توانند در کاهش اثرات منفی افزایش تبخیر بر اکوسیستم منطقه و منابع آبی خلیج گرگان نقش مهمی ایفا کنند.

واژگان کلیدی:

خلیج گرگان
دریای خزر
افزایش تبخیر
تغییرات اقلیم
مدل هیدرودینامیک

*نویسنده مسئول

✉ m.mazaheri@modares.ac.ir

مقدمه

دریای خزر، بزرگترین پهنه آبی داخلی جهان، با مساحت حدود ۳۷۱،۰۰۰ کیلومترمربع در یک حوضه بسته میان اروپا و آسیا قرار دارد و

یکی از مناطق ساحلی مهم در جنوب دریای خزر، خلیج گرگان است که به شدت تحت تأثیر تغییرات سطح دریا قرار دارد. خلیج گرگان، بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر، در جنوب شرقی این دریا و در محدوده استان گلستان ایران واقع شده است. این خلیج به دلیل پیشروی و گسترش شرقی شبه‌جزیره میانکاله شکل گرفته و وسعتی حدود ۴۰۰ کیلومترمربع دارد [۸]. نوسانات سطح آب دریای خزر تأثیر مستقیمی بر وضعیت هیدرولوژیکی خلیج گرگان دارد. در سال‌های اخیر، کاهش سطح آب دریا، ناشی از عواملی همچون کاهش جریان ورودی از رودخانه ولگا و تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش تبخیر و کاهش بارش، وضعیت آبی خلیج گرگان را با تهدید مواجه کرده است. در حال حاضر، تنها راه ارتباطی خلیج گرگان با دریای خزر، دهانه آشوراده است که عمق این مسیر نیز به دلیل رسوب‌گذاری کاهش یافته و مانع از ورود حجم کافی آب به خلیج شده است [۹].

خلیج گرگان، تنها خلیج دریای خزر در محدوده جغرافیایی ایران، در استان گلستان و در گوشه جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است (شکل ۱). این خلیج بین طول‌های جغرافیایی ۵۳°۲۵' تا ۵۴°۰۶' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۴۶' تا ۳۷°۰۰' شمالی قرار دارد. خلیج گرگان در سال ۱۳۵۵ به همراه تالاب میانکاله و لپوی زاغمرز به عنوان نخستین مجموعه تالاب بین‌المللی جهان در فهرست تالاب‌های کنوانسیون رامسر به ثبت رسید. این امر نشان‌دهنده اهمیت زیست‌محیطی خلیج گرگان و نواحی اطراف آن، شامل شبه‌جزیره میانکاله (پناهگاه حیات وحش) و تالاب بین‌المللی گمیشان، به عنوان یک مجموعه اکولوژیکی ارزشمند است.

این خلیج با مساحت تقریبی ۵۵۰ کیلومترمربع، طولی در حدود ۵۵ تا ۶۰ کیلومتر و عرضی بین ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر دارد و شکلی مثلثی دارد که رأس آن در بخش غربی قرار گرفته است. خلیج گرگان کم‌عمق بوده و حداکثر عمق آن در شرایط بالآمدگی آب به ۴/۵ متر می‌رسد. عمق آب به تدریج از غرب به شرق افزایش می‌یابد و در ضلع جنوبی شبه‌جزیره آشوراده به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این خلیج کاملاً در منطقه فلات قاره واقع شده و دارای شیب بسیار ملایمی است، به طوری که کوچک‌ترین تغییر در تراز آب دریای خزر می‌تواند تغییرات مورفولوژیکی گسترده‌ای؛ مانند غرقاب شدن یا خشک شدن سواحل و جابه‌جایی صدها متر از خط ساحلی را به همراه داشته باشد. راه ارتباطی اصلی خلیج گرگان با دریای خزر از طریق دهانه آشوراده - بندر ترکمن است که عرضی حدود ۲۵۰۰ متر و عمقی حداکثر ۳/۳ متر دارد. این کانال در سال‌های افزایش تراز سطح آب دریای خزر، نقش مهمی در ارتباط هیدرولوژیکی خلیج با دریا ایفا می‌کند. خلیج گرگان به وسیله شبه‌جزیره میانکاله از دریای خزر جدا شده است. جالب توجه است که شبه‌جزیره میانکاله، به همراه مجمع‌الجزایر آشوراده، ۶۲ سال پیش به دلیل بالآمدن تراز سطح آب دریای خزر به یکدیگر متصل شده‌اند و اکنون یک واحد زیست‌محیطی یکپارچه را تشکیل می‌دهند [۱۰].

توسط پنج کشور روسیه، قزاقستان، ترکمنستان، ایران و آذربایجان محصور شده است (شکل ۱). سطح متوسط این دریا در حال حاضر حدود ۲۸ متر پایین‌تر از سطح دریاهای آزاد بوده و طی قرون گذشته نوسانات قابل‌توجهی را تجربه کرده است [۱]. دریای خزر به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود که از نظر عمق و حجم تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند. خزر شمالی، کم‌عمق‌ترین بخش دریا، با پوشش ۲۹٪ از مساحت آن، کمتر از ۱٪ از حجم کل را دربر می‌گیرد و عمق متوسط آن تنها ۶ متر است. در مقابل، خزر میانی با ۳۶٪ از مساحت دریا، دارای عمق متوسط ۱۷۵ متر و حداکثر عمق ۷۹۰ متر بوده و ۳۵٪ از حجم کل را شامل می‌شود. خزر جنوبی، عمیق‌ترین و حجیم‌ترین بخش دریا، ۳۵٪ از مساحت را دربر گرفته و با عمق متوسط ۳۰۰ متر و حداکثر عمق ۱۰۲۵ متر، ۶۴٪ از حجم کل دریای خزر را تشکیل می‌دهد. این تفاوت‌های ساختاری تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های فیزیکی، دینامیک هیدرولوژیکی و اکوسیستم‌های هر منطقه دارند [۲].

دریای خزر در طول قرن بیستم، تقریباً ۳ متر نوسان سطح را تجربه کرده است؛ در حالی که سطح دریاهای جهانی در همین دوره حدود ۲۰ سانتی‌متر تغییر داشته‌اند [۳]. این نوسانات سطح دریا تأثیرات چشمگیری بر شکل‌گیری تالاب‌ها، تغییر ساختار آن‌ها و تغییر خطوط ساحلی داشته که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین واکنش‌های مناطق ساحلی به افزایش سریع سطح دریا محسوب می‌شوند [۴]. تالاب‌ها و خلیج‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود از جمله زیستگاه ماهیان، حیات وحش، کنترل سیلاب، حفاظت از طوفان، جزئی از اکولوژی ساحلی جهانی محسوب می‌شوند [۵]. در سال‌های اخیر، بسیاری از تالاب‌های کشور با تغییرات منفی گسترده‌ای مواجه شده‌اند که منجر به کاهش قابل توجه در سطح و عمق آن‌ها شده است. این تغییرات ناشی از عوامل مختلفی است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته طبیعی و انسانی تقسیم کرد. از جمله عوامل طبیعی، می‌توان به تغییرات اقلیمی، کاهش میزان بارندگی و افزایش نرخ تبخیر به دلیل گرمایش جهانی اشاره کرد. در کنار این موارد، فعالیت‌های انسانی نیز تأثیر چشمگیری داشته‌اند؛ به‌ویژه ساخت سدها که جریان طبیعی آب را مختل کرده و موجب کاهش تغذیه آب تالاب‌ها شده است. در مورد تالاب‌های ساحلی، این تغییرات به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوسانات تراز آب دریاها قرار می‌گیرند که خود می‌تواند نتیجه ترکیبی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی باشد. این مجموعه عوامل باعث شده تا تالاب‌ها و خلیج‌ها، که از ارزشمندترین زیست‌بوم‌های طبیعی کشور به شمار می‌آیند، با تهدیدات جدی روبرو شوند [۶].

میانگین سالانه تبخیر در بخش‌های مختلف دریای خزر متغیر است. در خزر شمالی این مقدار حدود ۸۷۸ میلی‌متر، در خزر میانی ۱۰۱۹ میلی‌متر و در خزر جنوبی ۱۱۳۴ میلی‌متر است. حداقل و حداکثر میزان تبخیر نیز بسته به شرایط جوی و موقعیت جغرافیایی هر منطقه متفاوت بوده و بیشترین مقدار ثبت‌شده در خزر جنوبی به ۱۷۶۶ میلی‌متر می‌رسد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر عوامل محیطی بر الگوی تبخیر در مناطق مختلف دریای خزر است [۷].

بررسی نوسانات سطح آب دریای خزر و تأثیرات آن بر شرایط هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی این منطقه پرداختند. نتایج این مطالعه، که مبتنی بر داده‌های ECMWF در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ است، نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دما، کاهش بارندگی و افزایش تبخیر، از عوامل کلیدی کاهش سطح آب دریای خزر محسوب می‌شوند. این روند کاهشی تراز آب، در آینده نیز ادامه خواهد یافت و می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی برای اکوسیستم‌های ساحلی و هیدرولوژی مناطق اطراف داشته باشد [۱۵]. شربتی و قانقرمه با مدل‌سازی تحت دو سناریوی کاهش ۵/۲ و ۱۰/۵ سانتی‌متری تراز سطح آب دریای خزر نشان دادند که در سناریوی اول ارتباط خلیج با دریای خزر در سال ۱۴۱۰-۱۴۱۱ و در سناریوی دوم در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳ به طور کامل قطع می‌شود [۱۸]. تحقیقی دیگر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که کاهش ۱۵۰ سانتی‌متری سطح آب دریای خزر از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ موجب کاهش ۱۷۶ کیلومترمربعی وسعت خلیج گرگان شده است. همچنین تغییرات مورفولوژیکی و شدت جابه‌جایی خطوط ساحلی خلیج را با مشاهدات میدانی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای بررسی شد [۱۶].

جعفری و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل دو بعدی Mike21 نشان دادند که الگوی جریان خلیج گرگان غالباً پادساعت‌گرد است و کاهش تراز آب می‌تواند به خشکی کامل بخش‌های غربی خلیج در افق ۵ ساله و قطع ارتباط کامل آن با دریای خزر در افق ۱۰ ساله منجر شود. مطالعات دیگری نیز بر اثرات تغییرات اقلیمی، افزایش تبخیر و کاهش بارش در وضعیت هیدرولوژیکی خلیج تأکید داشته‌اند [۱۷].

مطالعات اقلیمی اخیر، به‌ویژه مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی مانند CMIP6 نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی به طور فزاینده‌ای موجب افزایش دما و تغییرات چشمگیر در الگوهای بارش و تبخیر در مناطق مختلف، از جمله حوضه دریای خزر، شده است. این تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما، مستقیماً بر افزایش نرخ تبخیر تأثیرگذار هستند. پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی در قالب سناریوهای مختلف، به‌ویژه در چارچوب گزارش‌های اخیر IPCC، نشان می‌دهند که در آینده نه تنها دما افزایش خواهد یافت، بلکه الگوهای بارش نیز تغییر کرده و در بسیاری از مناطق با کاهش بارندگی و افزایش تبخیر همراه خواهند بود [۱۸]. این تغییرات به‌ویژه برای مناطق ساحلی و تالاب‌ها مانند خلیج گرگان که از نظر هیدرولوژیکی بسیار حساس هستند، تهدیدات بزرگی به شمار می‌آیند.

نقش تبخیر در تغییرات سطح آب دریای خزر به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه آبی این دریا بسیار حائز اهمیت است. تبخیر، با تأثیر مستقیم بر تراز آب دریای خزر، تعادل آبی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های وابسته، از جمله خلیج گرگان، داشته باشد. در خلیج گرگان، تغییرات نرخ تبخیر علاوه بر تشدید کاهش سطح آب، به تغییر شوری و شرایط هیدرودینامیکی این زیست‌بوم حساس منجر می‌شود. درک عمیق از رابطه میان تبخیر و شرایط هیدرودینامیکی خلیج گرگان نه تنها برای مدیریت منابع آبی این منطقه، بلکه برای پیش‌بینی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ضروری است. با

ویژگی‌های خاص جغرافیایی و اقلیمی خلیج گرگان تأثیرات مهمی بر شوری آب آن دارند. در بخش‌های غربی خلیج، به دلیل عمق کم و میزان بالای تبخیر، شوری آب بیش‌تر از شوری آب دریای خزر است. در مقابل، در مصب رودخانه‌ها به دلیل ورود آب شیرین، شوری آب کاهش می‌یابد. به‌طورکلی، توزیع جغرافیایی و دینامیک خلیج گرگان تابعی از سطح آب دریای خزر در مقیاس‌های زمانی بلندمدت و کوتاه‌مدت است و این ویژگی‌ها، نقش مهمی در شکل‌گیری اکوسیستم‌های منحصربه‌فرد منطقه ایفا می‌کنند.

همان‌طور که گفته شد خلیج گرگان از طریق شمال شرقی حداث‌دهانه آشوراده - چپقلی به دریای خزر متصل است؛ لذا نوسانات سطح آب علاوه بر تأثیرپذیری موقت از ورود رودخانه‌های بالادست، با سطح دریای خزر در حال تعادل است و کمبود آب تبخیری آن از طریق دریای خزر تأمین می‌شود. این وضع باعث شده است که یک جریان شدید طولانی از دریا به خلیج و یک جریان ضعیف و کوتاه‌مدت از خلیج به دریا، از طریق تنگه بندر ترکمن - آشوراده برقرار شود. دریای خزر در ۱۰۰ سال گذشته شاهد بیش از ۴ متر نوسانات تراز سطح آب و در سالیان اخیر شاهد افت تراز سطح آب بوده است. این نوسانات در بخش‌های عمیق دریا، تأثیر چندانی از خود به‌جای نمی‌گذارد، اما در نواحی ساحلی مانند خلیج گرگان که عمقی کمتر از ۴ متر دارد باعث تغییرات زیادی از لحاظ هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی و در نهایت تغییرات زیست‌محیطی می‌گردد [۱۱].

مطالعات گوناگون نشان داده‌اند که تغییرات در میزان تبخیر تأثیر قابل‌توجهی بر نوسانات تراز آب دریای خزر دارد.

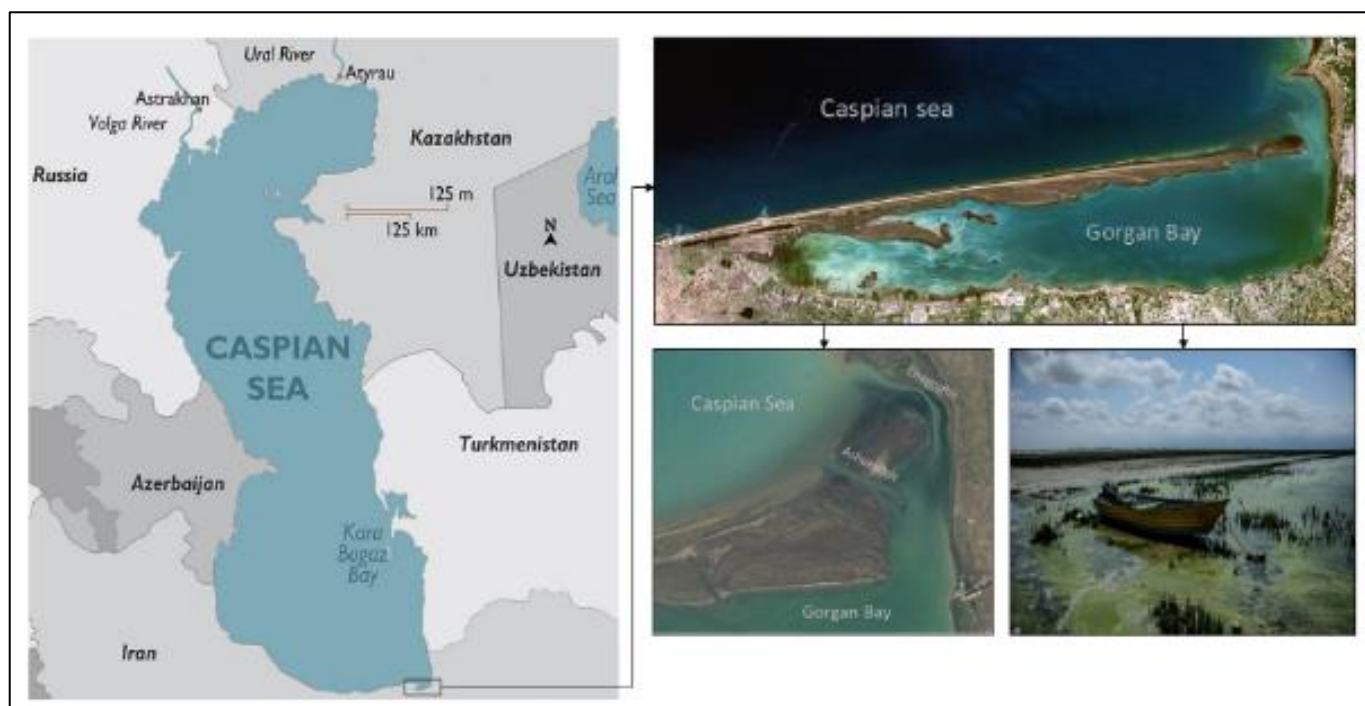
از آنجا که دریای خزر یک حوضه کاملاً بسته است و هیچ جریان خروجی به اقیانوس‌ها ندارد، تبخیر تنها مکانیسمی است که می‌تواند آب را از این دریاچه خارج کند. این فرآیند نقش تعیین‌کننده‌ای در تعادل آبی منطقه دارد و هرگونه تغییر در میزان تبخیر می‌تواند مستقیماً سطح آب، مساحت سواحل و پایداری اکوسیستم‌های پیرامونی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، بررسی اثرات سناریوهای مختلف افزایش تبخیر نه تنها برای درک تغییرات هیدرولوژیکی دریای خزر ضروری است، بلکه می‌تواند پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از زیست‌بوم‌های حساس منطقه داشته باشد. چن و همکاران تغییرات سطح آب دریای خزر را در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که افزایش نرخ تبخیر نقش اساسی در کاهش سطح آب این دریا داشته و پیش‌بینی می‌شود که این روند کاهشی، تحت تأثیر سناریوهای گرمایش جهانی، در آینده ادامه یابد [۱۲]. دای و همکاران نیز با بررسی علل خشکسالی و کاهش تراز سطح آب دریاچه‌های بسته، به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی و افزایش نرخ تبخیر از عوامل اصلی این پدیده محسوب می‌شوند [۱۳]. همچنین، گینزبورگ و گوستانو تغییرات سطح آب دریای خزر را در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ تحلیل کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در این مدت، تراز سطح آب دریای خزر حدود یک متر کاهش یافته است [۱۴]. علی محمدی و همکاران در پژوهش خود به

لحاظ ویژگی‌های زمانی و مکانی جریان، به صورت کامل پیاده‌سازی می‌کنند. این ویژگی به مدل اجازه می‌دهد تا تعامل پیچیده بین پارامترهای دینامیکی، نظیر توزیع فضایی جریان، عمق متغیر، اثرات باد و اصطکاک بستر، را به دقت شبیه‌سازی کند.

ویژگی مهم دیگر مدل عددی، توانایی آن در شبیه‌سازی فرآیندهای دینامیک در نواحی کم‌عمق است؛ نواحی‌ای که تأثیر تغییرات تبخیر و دبی رودخانه‌ها در آن‌ها به مراتب محسوس‌تر بوده و به علت جغرافیای خاص شمال دریای خزر و نزدیکی به محل ورودی اصلی رودخانه ولگا، رفتار سیستم نسبت به تغییرات اقلیمی بسیار حساس است. در چنین شرایطی، کاهش سطح آب موجب تغییر مکان خط ساحلی، تغییر ناهمگونی‌های توزیع عمق، و در نهایت دگرگونی جریان‌ها می‌شود؛ مسائلی که در روش‌های ساده مبتنی بر بیلان حجمی قابل لحاظ نمی‌باشند یا با خطای بالا همراه هستند. بنابراین، انتخاب مدل‌سازی عددی نه تنها به منظور دقت بیشتر، بلکه به جهت ضرورت تحلیل رفتار دینامیکی سامانه آبی دریای خزر و خلیج گرگان در پاسخ به سناریوهای اقلیمی توجیه‌پذیر و ضروری بوده است.

توجه به ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی منحصربه‌فرد این منطقه، پژوهش‌های مداوم برای پایش و ارزیابی این تعاملات حیاتی بوده و بررسی سناریوهای افزایش تبخیر می‌تواند بینشی جامع از تأثیر تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم آبی خلیج گرگان ارائه دهد.

مدل‌سازی هیدرودینامیکی نقش مهمی در تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی و انسانی بر اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کند. مدل‌های هیدرودینامیک به دلیل توانایی در حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان و انتقال شوری، ابزار دقیقی برای شبیه‌سازی دینامیک سیستم‌های آبی هستند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن فرآیندهای پیچیده‌ای مانند دما، تبخیر، باد و تغییرات سطح آب، تعاملات بین متغیرهای محیطی را به طور همزمان تحلیل می‌کنند. اگرچه استفاده از معادله بقای جرم به صورت ساده شده و با فرض سطوح مبنای ورودی و خروجی (از جمله دبی رودخانه‌ها و نرخ تبخیر) می‌تواند تخمینی اولیه از تغییرات تراز سطح آب دریا ارائه دهد، اما این روش در مقایسه با مدل‌سازی عددی هیدرودینامیک از دقت و جزئیات پایین‌تری برخوردار است. در واقع، مدل‌های هیدرودینامیک علاوه بر معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنوم را نیز در مقیاس دیفرانسیلی و با



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی دریای خزر و خلیج گرگان

و واکنش سیستم به تغییرات اقلیمی را فراهم ساخته است. این مدل، بر پایه حل عددی معادلات دیفرانسیلی پیوستگی، مومنوم و انتقال جرم توسعه یافته و توانایی شبیه‌سازی اثرات متقابل شوری و جریان را به صورت پویا و وابسته به زمان داراست. همچنین، در این پژوهش سناریوهای مختلف افزایش نرخ تبخیر با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت محاسبه و به طور عددی در مدل اعمال شده‌اند تا پاسخ سیستم آبی در بازه زمانی

علیرغم انجام مطالعات متعدد در زمینه تحلیل تغییرات سطح آب و شوری خلیج گرگان، اغلب پژوهش‌ها به بررسی‌های آماری و کیفی محدود بوده‌اند و از مدل‌سازی عددی یکپارچه و بلندمدت چشم‌پوشی کرده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از مدل عددی پیشرفته Delft3D، برای نخستین بار شبیه‌سازی هم‌زمان دریای خزر و خلیج گرگان به صورت یکپارچه انجام شده است امری که امکان بررسی دقیق‌تر چرخه آب، تبادل جرم (شوری)

$$Q_s = \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{معادله پیوستگی (۱)}$$

که در آن h ارتفاع سطح آب، u و v مولفه های سرعت در جهت های x و y و Q_s نرخ تولید/از بین رفتن جرم به دلیل ورودی ها و خروجی ها مانند تبخیر یا بارندگی هستند.

$$\frac{\partial h}{\partial x} gh = \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hu)}{\partial t} \quad \text{معادلات مومنوم}$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} gh = \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial t} \quad (۲)$$

معادله انتقال شوری

شوری به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای کیفیت آب، نقش مهمی در تعیین ویژگی های اکوسیستم های آب و رفتار جریان ها دارد. مدل سازی شوری به منظور تحلیل تغییرات مکانی و زمانی آن تحت تأثیر فرایندهای محیطی مانند ورود آب های تازه، جزرومد، تبخیر و تعرق انجام می شود.

معادله شوری بر اساس معادله جابه جایی - پراکندگی^۶ بیان می شود:

$$Q_s + \left(\frac{\partial S}{\partial y} K_y h\right) \frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{\partial S}{\partial x} K_x h\right) \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial(Shv)}{\partial y} + \frac{\partial(Shu)}{\partial x} + \frac{\partial(Sh)}{\partial t} \quad (۱)$$

که در آن S غلظت شوری است. K_x و K_y ضرایب پراکندگی در جهت های x و y هستند و Q_s نرخ منابع و مصارف شوری مانند ورودی آب شیرین است [۱۹].

۲. مدل مورد استفاده

نرم افزار Delft3D یکی از ابزارهای پیشرفته و شناخته شده در زمینه مدل سازی هیدرودینامیکی، کیفیت آب، رسوب گذاری، و فرایندهای اکوسیستمی در محیط های آبی است. این نرم افزار از ساختاری ماژولار برخوردار است که امکان مدل سازی دقیق و انعطاف پذیر را برای طیف گسترده ای از مسائل مهندسی و زیست محیطی فراهم می کند. یکی از مهم ترین ماژول های این نرم افزار، ماژول FLOW است که برای شبیه سازی جریان های آبی دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) استفاده می شود. این ماژول معادلات حاکم بر جریان های سطحی آب را با در نظر گرفتن عوامل مختلفی همچون اثرات جزرومدی، باد، تبادل حرارت، انتقال شوری و چگالی، حل می کند.

آینده ارزیابی شود. از دیگر ابعاد نوآورانه این تحقیق، لحاظ کردن هم زمان اثر رودخانه های محلی ایران و رود ولگا به عنوان منبع اصلی ورودی به دریای خزر است که امکان تحلیل دقیق تعامل بین منابع داخلی و خارجی در تعیین وضعیت آبی خلیج گرگان را فراهم کرده است. ترکیب این سه رویکرد مدل سازی عددی هیدرودینامیکی، تحلیل اقلیمی سناریو محور، و در نظر گرفتن هیدرولوژی حوضه بالادست مطالعه حاضر را به یکی از معدود تحقیقات جامع و کاربردی در زمینه مدیریت منابع آبی و پایش اثرات اقلیمی در خلیج گرگان بدل کرده است.

روش پژوهش

۱. معادلات حاکم

مدل سازی هیدرودینامیکی^۱ و انتقال شوری^۲ در سیستم های آبی پیچیده، بر اساس معادلات حاکم توسعه یافته است که اصول بنیادی فیزیک جریان های آب و انتقال جرم^۳ را توصیف می کنند. این معادلات، بیانگر قوانین بقای جرم، مومنتم^۴ و انتقال شوری هستند و امکان شبیه سازی دقیق رفتار سیستم های آبی تحت تأثیر عوامل محیطی و دینامیکی را فراهم می کنند. در این راستا، معادلات پیوستگی برای بقای جرم و تغییرات سطح آب، معادلات مومنوم برای بررسی نیروهای حاکم بر جریان ها، و معادله انتقال شوری برای تحلیل توزیع و جابه جایی شوری به کار گرفته می شوند.

این معادلات با در نظر گرفتن عواملی مانند اثرات گرانش، اصطکاک، نیروهای ناشی از گردش زمین (اثر کوریولیس^۵) و فرایندهای تبخیر و بارندگی توسعه یافته اند. به ویژه در مناطق ساحلی و دریایی، تعاملات پیچیده ای میان جریان های آبی و انتقال شوری وجود دارد که بررسی آن ها نیازمند تحلیل دقیق و جامع است. حل عددی این معادلات در مدل های عددی، ابزار قدرتمندی را برای شبیه سازی رفتار دینامیکی سیستم های آبی فراهم می کند و به درک بهتر فرایندهای هیدرودینامیکی و محیطی کمک می نماید.

در ادامه، معادلات حاکم به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرند تا چگونگی توصیف جریان های آب، تغییرات سطح آب، و توزیع شوری در منطقه مطالعاتی مشخص شود.

معادلات هیدرودینامیک

معادلات هیدرودینامیک بر اساس قوانین بقای جرم و مومنتم، رفتار جریان های آبی را شبیه سازی می کنند. این معادلات شامل معادله پیوستگی برای حفظ جرم و معادلات مومنتم برای توصیف نیروهای مؤثر بر جریان آب هستند.

¹ Hydrodynamic Modeling

² Salinity Transport

³ Mass Transport

⁴ Momentum

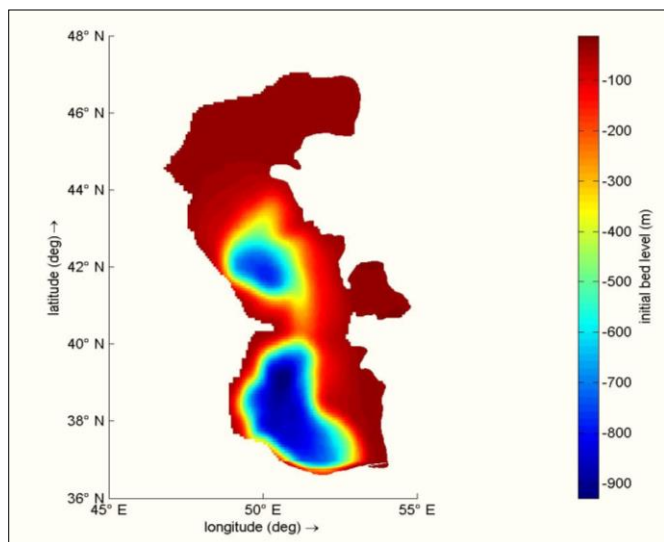
⁵ Coriolis Forces

⁶ Advection-Dispersion

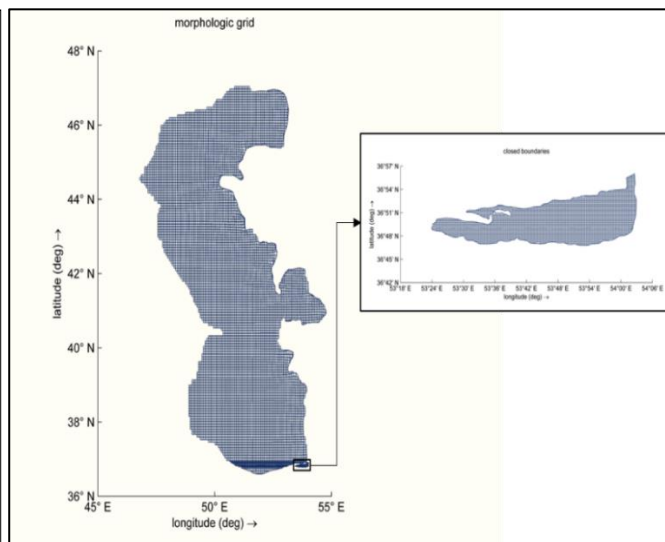
می‌کند و Delft3D را به یکی از نرم‌افزارهای پیشرو در مدل‌سازی هیدرودینامیکی تبدیل کرده‌اند [۱۹].

۳. برپایی مدل

محدوده مورد مطالعه شامل کل دریای خزر و خلیج گرگان می‌باشد به همین منظور برای شبیه‌سازی از شبکه نامنظم استفاده شده است. در این مطالعه چون محدوده اصلی مورد مطالعه خلیج گرگان است ابعاد شبکه‌بندی برای این محدوده کوتاه‌تر در نظر گرفته شده است تا دقت نتایج بیشتر شود (شکل ۲-الف). تعداد کل شبکه برای دریای خزر 174×140 و ابعاد شبکه 5×7 کیلومتر است، همچنین تعداد کل شبکه برای خلیج گرگان 49×198 و ابعاد شبکه تقریباً 370×297 متر در نظر گرفته شده است. با توجه به وسعت بالای منطقه برداشت اطلاعات رقومی از هر نقشه و هماهنگ کردن مختصات نقشه با مدل مستلزم دقت و ممارست بوده و در مجموع یک پروسه بسیار زمان بر جهت آماده‌سازی اطلاعات ورودی رقومی برای مدل می‌باشد و لیکن با نرم‌افزار Delft3D پس از تعیین مرزها نقاط هیدروگرافی که از پایگاه GEBCO تهیه شده به مدل وارد می‌گردد (شکل ۲-ب). برای اطمینان از استقلال نتایج مدل از مش‌سایز، شبیه‌سازی‌ها با چندین اندازه مش مختلف اجرا شدند و نتایج از نظر پایداری و دقت مورد بررسی قرار گرفتند. مقایسه خروجی‌ها نشان داد که با کاهش اندازه مش، تغییرات نتایج ناچیز بوده و مدل به همگرایی رسیده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج نهایی مستقل از مش‌سای هستند و دقت مدل‌سازی تحت تأثیر تغییرات شبکه‌بندی قرار نگرفته است.



(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) شبکه بندی محدوده مورد مطالعه ب) بسیمتری دریای خزر

و ضمن حفظ دقت مدل، سرعت محاسبات را بهینه کند. مدل هیدرودینامیکی در بازه زمانی بلندمدت از ۱ ژانویه ۱۹۹۲ تا ۱ دسامبر ۲۰۲۰ اجرا گردید تا بتوان تغییرات فصلی و سالانه در پارامترهای محیطی

ماژول FLOW قابلیت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی جریان‌ها در مقیاس‌های مختلف را دارد و می‌تواند توزیع سرعت، تراز سطح آب، و سایر پارامترهای مرتبط را با دقت بالا پیش‌بینی کند. این ماژول علاوه بر حل معادلات هیدرودینامیک، امکان مدل‌سازی انتقال شوری، دما، و حتی انتقال رسوبات را نیز فراهم می‌کند. از قابلیت‌های برجسته این ماژول می‌توان به پشتیبانی از شبکه‌های محاسباتی منظم و غیرمنظم، شبیه‌سازی فرایندهای متأثر از تغییرات تراکم (مانند جریان‌های چگالی محور)، و اتصال به سایر ماژول‌های نرم‌افزار مانند WAVE و WAQ اشاره کرد. این ویژگی‌ها ماژول FLOW را به ابزاری ایده‌آل برای مدل‌سازی سیستم‌های آبی پیچیده تبدیل کرده‌اند.

نرم‌افزار Delft3D برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان و انتقال شوری از روش‌های عددی پیشرفته‌ای استفاده می‌کند. این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر روش تفاضلات محدود هستند که برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و مومنتم در شبکه‌های محاسباتی به کار می‌روند. همچنین، برای حل مسائل انتقال و انتشار از الگوریتم‌های پایدار و دقیق مانند روش‌های صریح و ضمنی بهره می‌گیرد. برای گسسته‌سازی زمانی، روش‌های پیشرفته‌ای مانند روش کرنک-نیکلسون به کار گرفته می‌شود که دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های متغیر با زمان فراهم می‌کند. در گسسته‌سازی مکانی، نرم‌افزار از شبکه‌های منظم و غیرمنظم استفاده می‌کند که امکان مدل‌سازی نواحی با هندسه پیچیده را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، در برخی ماژول‌ها از روش حجم محدود برای تضمین بقای جرم و مومنتم در شرایط مرزی استفاده می‌شود. این روش‌ها در کنار یکدیگر پایداری عددی، دقت بالا، و قابلیت حل مسائل پیچیده را تضمین

برای تضمین پایداری و همگرایی عددی مدل، گام زمانی برابر با ۱۰ دقیقه انتخاب شد. این بازه زمانی، با توجه به ویژگی‌های دینامیکی سیستم مورد مطالعه و شرایط مرزی، توانست ناپایداری‌های عددی را به حداقل رسانده

انرژی در راستای عمودی کمک کند. این تنظیمات، همراه با فرایند واسنجی دقیق، مبنای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی خلیج گرگان را فراهم ساخت و شرایط مناسبی را برای تحلیل دقیق و قابل اعتماد وضعیت هیدرودینامیکی این خلیج ایجاد کرد.

۵. اعتبارسنجی الگوی مکانی شوری

با توجه به محدودیت در دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری میدانی معتبر و یکنواخت برای شوری در سطح دریای خزر، اعتبارسنجی مدل شوری به‌صورت غیرمستقیم و از طریق مقایسه با الگوهای مکانی شوری موجود در منابع علمی انجام شد. در ابتدا، شرایط اولیه جریان و توزیع مکانی شوری بر اساس داده‌های موجود در WOA در مدل اعمال شد. سپس مدل برای یک دوره وارم‌آپ به مدت ۵ سال اجرا شد تا اثرات ناشی از خطا در شرایط اولیه به حداقل برسد. شوری ورودی از رودخانه‌ها نیز بر اساس میانگین داده‌های ارائه‌شده در منبع [۲۱] وارد مدل شد و ضرایب دیسپژن شوری با فرض مقادیر متداول و با انجام چند سناریو تنظیم گردید. در پایان دوره وارم‌آپ و با اعمال ضرایب انتقال مناسب، الگوی حاصل از مدل با توزیع مکانی شوری گزارش‌شده در منبع [۲۲] مطابقت قابل‌قبولی داشت. اگرچه به دلیل فقدان داده‌های مشاهده‌ای نمی‌توان صحت مدل را به‌صورت نقطه‌ای ارزیابی کرد، اما تطابق کلی الگوهای مکانی شوری، اعتبار کافی برای تحلیل‌های کیفی و بررسی روندهای بلندمدت را فراهم می‌نماید.

۶. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی مرتبط با دریای خزر و خلیج گرگان بوده که به‌صورت میانگین ماهانه و با وضوح مکانی و زمانی مناسب از پایگاه داده CDS استخراج شده‌اند. این داده‌ها بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ را پوشش داده و برای مدل‌سازی و تحلیل تغییرات هیدرودینامیکی منطقه به کار گرفته شده‌اند. بازه زمانی بلندمدت حدوداً ۳۰ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰) به‌عنوان دوره شبیه‌سازی انتخاب شد؛ این بازه به دلیل فراز و نشیب‌های قابل‌توجه در متغیرهای هیدرولوژیکی و تراز آب دریای خزر و خلیج گرگان، نماینده‌ای مناسب از رفتار بلندمدت این سیستم به‌شمار می‌آید. علاوه بر این، دسترسی به داده‌های جامع، قابل اعتماد و یکپارچه، از جمله اطلاعات ماهواره‌ای، بازتحلیل‌شده و مستندات مرتبط با تغییرات سطح آب در این دوره، امکان تحلیل دقیق‌تر شبیه‌سازی عددی را فراهم کرده است. داده‌های دمای سطح هوا به‌منظور تحلیل تغییرات دما و به‌عنوان ورودی در محاسبات بارش و تبخیر استفاده شدند. داده‌های بارش میانگین ماهانه برای بررسی سهم آب ورودی به دریا و تأثیر آن بر هیدرولوژی منطقه مطالعه به کار رفتند. همچنین، داده‌های تبخیر سطحی ماهانه برای ارزیابی تأثیر تبخیر بر تغییرات سطح آب مورد استفاده قرار گرفتند. در کنار این داده‌ها، اطلاعات مربوط به سرعت و جهت باد نیز به‌صورت میانگین ماهانه تحلیل شدند تا نقش باد در جابه‌جایی آب و تأثیر آن بر تبخیر بررسی شود. این مجموعه داده‌ها مبنای اصلی شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق بوده و به بهبود دقت مدل‌سازی

مانند تراز سطح آب و شوری به خوبی شبیه‌سازی شود. این دوره زمانی همچنین امکان ارزیابی اثر روندهای اقلیمی و تغییرات ورودی‌های هیدرولوژیکی بر دینامیک سیستم را فراهم ساخت. ضمن آنکه برای اطمینان از پایداری و همگرایی مدل و به حداقل رساندن تأثیر شرایط اولیه بر نتایج شبیه‌سازی، دوره وارم‌آپ به مدت پنج سال در نظر گرفته شد. در این بازه زمانی، مدل بدون ثبت نتایج نهایی اجرا شده تا فرایندهای دینامیکی و هیدرودینامیکی سیستم به حالت پایدار برسند. پس از پایان دوره وارم‌آپ، نتایج شبیه‌سازی به منظور تحلیل دقیق‌تر و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

۴. واسنجی مدل هیدرودینامیک

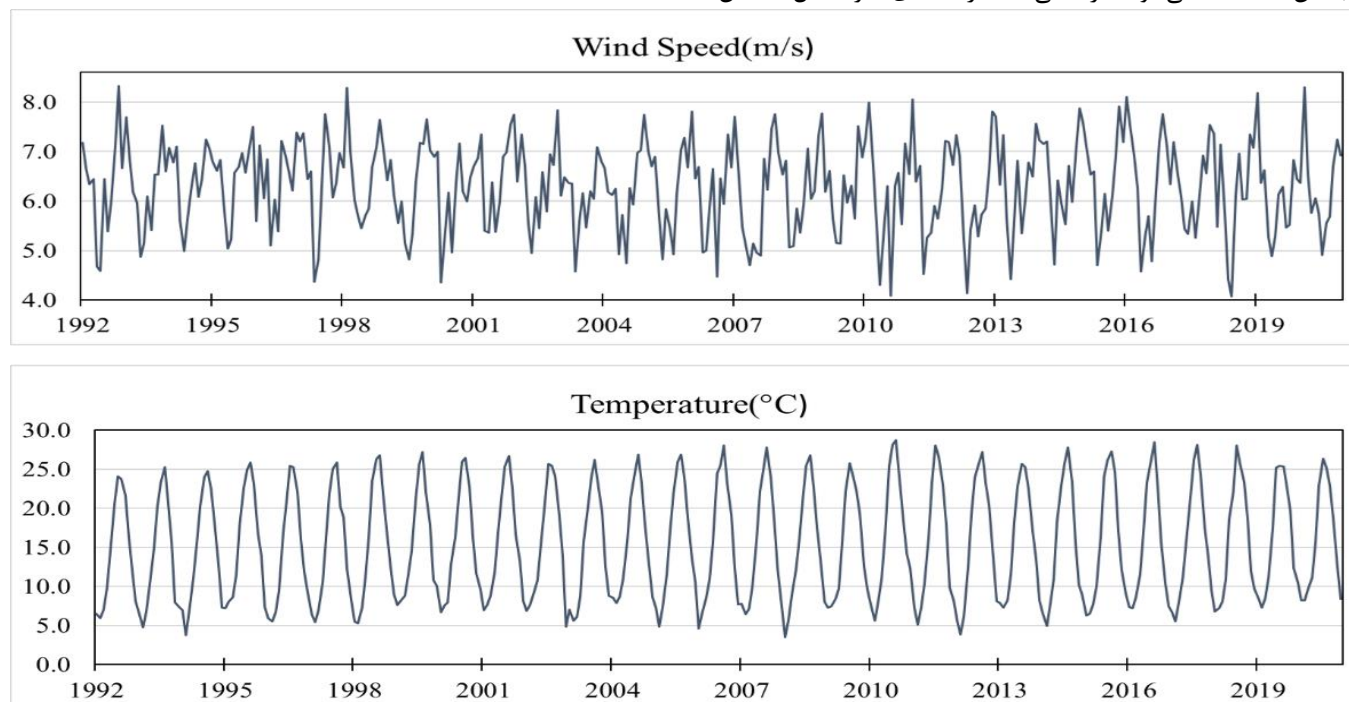
در فرایند شبیه‌سازی هیدرودینامیکی یکی از مهم‌ترین پارامترها، ضریب زبری بستر است که به‌عنوان عاملی برای تعیین میزان تأثیر اصطکاک کف بر الگوی جریان استفاده می‌شود. این ضریب در مدل Delft3D می‌تواند به‌صورت یک مقدار ثابت یا به شکل ماتریسی دوبعدی تعریف شود. در این مطالعه، از ضریب زبری مانینگ برای محاسبه زبری بستر استفاده شد و فرایند واسنجی مدل با تنظیم مقادیر مختلف این ضریب در هر دو جهت افقی و عمودی انجام گرفت. در نهایت، مقدار بهینه ۰/۰۲۵ برای این ضریب انتخاب شد که نتایج قابل‌قبولی را ارائه داد.

ویسکوزیته گردابی نیز به‌عنوان یکی از عوامل مهم در مدل‌سازی هیدرودینامیکی در نظر گرفته شد. این پارامتر به‌صورت یک ابزار ریاضی برای لحاظ کردن اتلاف انرژی ناشی از پدیده‌هایی نظیر آشفتگی جریان، اتلاف انرژی درونی، و حرکات نیمه آشفته در مدل وارد می‌شود. با توجه به ماهیت پیچیده و عملکرد تصادفی این پدیده‌ها، لحاظ دقیق آن‌ها در معادلات شبیه‌سازی دشوار است [۲۰]. نرم‌افزار Delft3D مقادیر پیشنهادی برای ضریب ویسکوزیته افقی را بر اساس اندازه خطوط شبکه ارائه می‌دهد؛ برای خطوط شبکه با فواصل کمتر از ۱۰ متر مقدار پیشنهادی $10^{-1} m^2/s$ و برای مناطق وسیع جزر و مدی با فواصل بیشتر، مقادیر $10^{-1} - 10^{-2} m^2/s$ است [۱۹]. با این حال، در روند شبیه‌سازی حاضر، پس از اجرای مکرر مدل با مقادیر مختلفی از ضریب ویسکوزیته افقی و تحلیل حساسیت نتایج مدل نسبت به این پارامتر، مشخص شد که تغییرات این ضریب تأثیر معناداری بر خروجی‌های مدل (اعم از جریان و توزیع شوری) ندارد. از این‌رو، جهت ساده‌سازی فرایند واسنجی و کاهش زمان محاسبات، مقدار ثابت ۱۰ به‌عنوان مقدار نهایی برای ضریب ویسکوزیته افقی انتخاب و در تمامی شبیه‌سازی‌ها اعمال شد. همچنین برای ویسکوزیته عمودی از روش توربولانس k-E استفاده شده است. این مدل، یکی از پرکاربردترین روش‌های مبتنی بر معادلات انتقالی برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در محیط‌های آبی است و به‌صورت پویا و وابسته به شرایط لایه‌بندی عمودی ستون آب، نرخ اختلاط عمودی را محاسبه و تنظیم می‌کند. استفاده از این مدل به‌ویژه در محیط‌های نیمه‌محصور و با گردان‌های شوری و دمایی بالا (همچون خلیج گرگان) اهمیت دارد، چرا که می‌تواند به بهبود دقت در شبیه‌سازی انتقال جرم و

محسوسی در دما دیده می‌شود. از سوی دیگر، سرعت باد نیز بسته به شرایط جوی منطقه در طول سال تغییرات قابل توجهی داشته و معمولاً در ماه‌های پاییز و زمستان مقدار بیشتری دارد. تغییرات این دو متغیر به‌ویژه در ارتباط با میزان تبخیر از سطح دریا اهمیت دارد، زیرا افزایش سرعت باد و دمای سطح آب می‌تواند نرخ تبخیر را افزایش داده و بر تراز سطح آب تأثیرگذار باشد.

فرایندهای هیدرودینامیکی کمک کرده‌اند. به‌منظور نمایش روند تغییرات این پارامترها در طول زمان، داده‌های جمع‌آوری‌شده در قالب نمودارها و جداول ارائه شده‌اند.

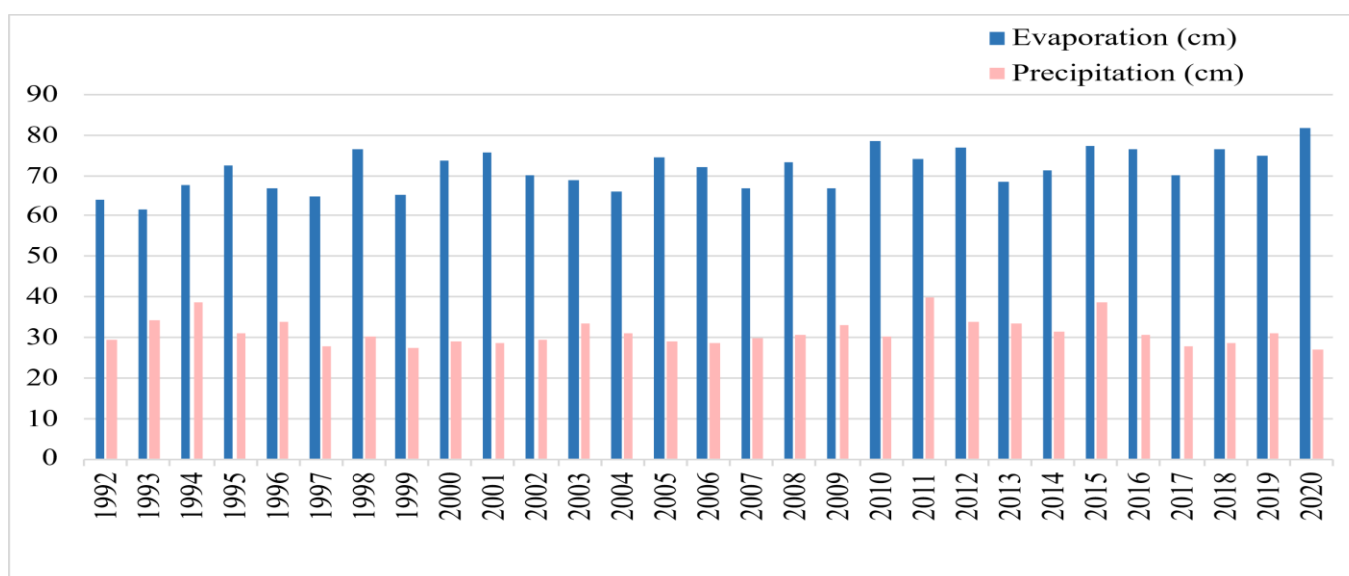
(شکل ۳) تغییرات زمانی دمای سطح آب و سرعت باد را در محدوده مورد مطالعه نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای سطح آب دارای نوسانات فصلی بوده و بیشترین مقدار آن در ماه‌های گرم سال (تابستان) مشاهده می‌شود، در حالی که در ماه‌های سرد سال، کاهش



شکل ۳: سری زمانی مقادیر دمای سطح آب و سرعت باد در محدوده دریای خزر

میانگین تبخیر سالانه به‌طور قابل توجهی کمتر است. این الگو بیانگر یک عدم تعادل هیدرولوژیکی در منطقه است، که نقش مهمی در کاهش منابع آبی و افزایش شوری دریای خزر و خلیج گرگان دارد.

مقادیر سالانه بارش و تبخیر در محدوده خلیج گرگان طی دوره زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۳]. همان‌طور که در این نمودار ترکیبی مشاهده می‌شود، میانگین بارش سالانه در مقایسه با



شکل ۴: مقادیر میانگین سالانه بارش و تبخیر در محدوده دریای خزر

Nov	5700.60	361.29	116.69
Dec	6122.11	430.40	88.85

۷. تعریف سناریوهای مدلسازی

برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر تبخیر سطحی دریای خزر، از نتایج مدل‌های اقلیمی جهانی نسل ششم (CMIP6) تحت سناریوهای مختلف انتشار (Shared Socioeconomic Pathways - SSPs) استفاده شد. بر اساس پیش‌بینی‌های ارائه‌شده میزان تبخیر از سطح دریای خزر در افق سال ۲۱۰۰ می‌تواند تا حداکثر ۳۵ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش یابد [۲۵]. این مقدار در شرایط سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 گزارش شده است. در مقابل، در سناریوهای ملایم‌تر مانند

همچنین در این تحقیق، داده‌های دبی رودخانه‌هایی که به دریای خزر می‌ریزند به منظور تحلیل تأثیرات آن‌ها بر تراز آب دریای خزر مورد استفاده قرار گرفتند. این رودخانه‌ها شامل ولگا، کورا، اورال، ترک، سفیدرود، پلرود، هراز و چالوس بوده که به عنوان منابع اصلی آب ورودی به دریای خزر شناخته می‌شوند. رود ولگا به تنهایی حدود ۸۰ درصد از کل آب ورودی به دریای خزر را تأمین می‌کند و پس از آن کورا و اورال بیشترین سهم آب ورودی به دریای خزر را دارند. در این مطالعه، داده‌های دبی ماهانه این رودخانه‌ها در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ به صورت کامل در مدل اعمال شده است [۲۴]. علاوه بر این، به منظور تحلیل روند تغییرات هیدرولوژیکی و مقایسه الگوهای فصلی، میانگین دبی ماهانه سه رودخانه اصلی (ولگا، کورا و اورال) در این بازه زمانی محاسبه و در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: میزان آب ورودی به دریای خزر بر حسب مترمکعب بر ثانیه

	Volga (m^3s^{-1}) ۱)	Kura (m^3s^{-1}) ۱)	Ural (m^3s^{-1}) ۱)
Jan	5718.21	465.21	83.24
Feb	5982.63	462.92	83.25
Mar	6608.75	466.67	100.68
Apr	7956.79	518.00	421.80
May	17801.79	587.85	815.41
Jun	12204.29	463.21	554.00
Jul	6689.29	292.48	234.53
Aug	5895.00	259.86	148.88
Sep	5567.14	275.04	118.59
Oct	5475.00	304.80	116.38

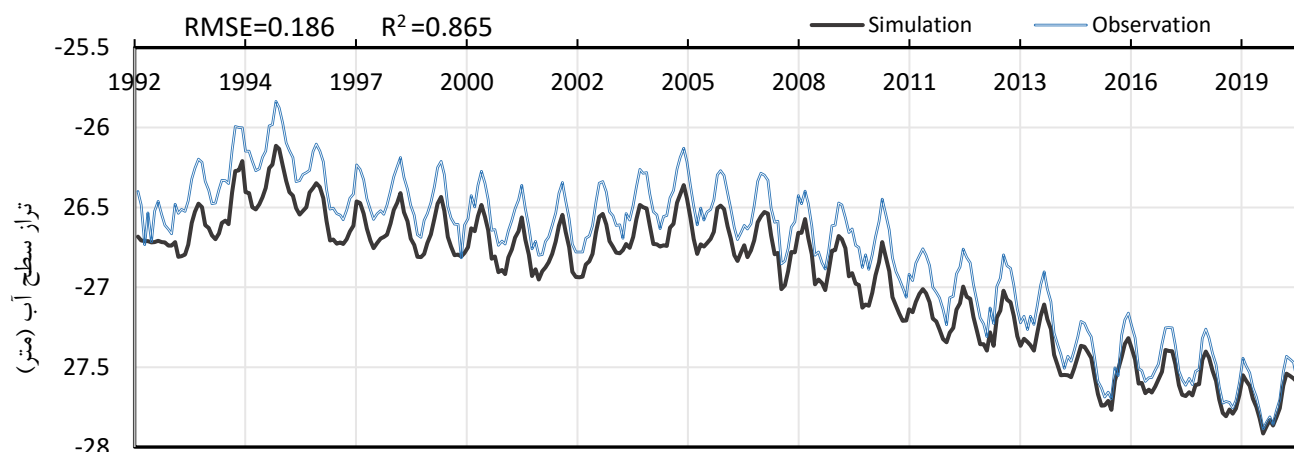
SSP2-4.5 و SSP1-2.6، میزان افزایش تبخیر در بازه‌ای بین ۱۰ تا ۲۵ درصد پیش‌بینی شده است.

با الهام از این نتایج و با هدف پوشش دادن طیفی از شرایط محتمل اقلیمی، از خوش‌بینانه تا بدبینانه، سه سناریوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش تبخیر برای اعمال در مدل‌سازی انتخاب شدند. لازم به ذکر است که سناریوهایی با افزایش کمتر از ۱۰ درصد، تأثیر قابل توجهی بر نتایج مدل‌سازی نداشتند و از این‌رو در تحلیل‌ها لحاظ نشدند. **نتایج و بحث**

در این بخش، ابتدا نتایج واسنجی مدل هیدرودینامیکی ارائه می‌شود. سپس خروجی‌های مدل تحت سناریوهای مختلف افزایش تبخیر در خلیج گرگان و دریای خزر تحلیل می‌گردد. در نهایت، اثرات تغییرات تبخیر و تراز آب بر شرایط هیدرودینامیکی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱. نتایج واسنجی مدل هیدرودینامیک

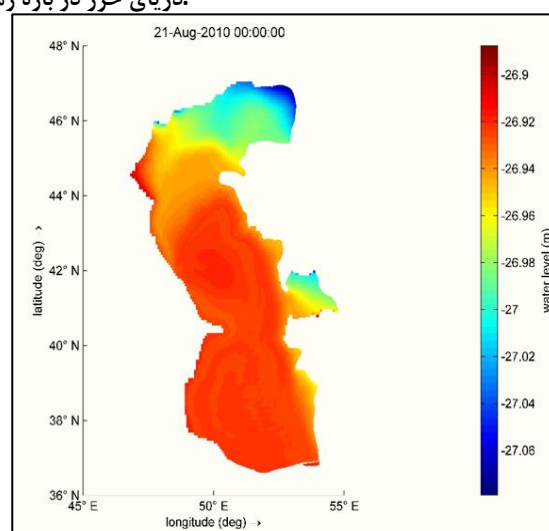
برای ارزیابی صحت مدل هیدرودینامیکی دریای خزر، سطح آب شبیه‌سازی‌شده از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد (شکل ۵). ضریب تعیین R^2 بین مقادیر شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای برابر با ۰/۸۶ به دست آمد که نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل با داده‌های واقعی است. این مقدار بیانگر آن است که مدل توانسته بیش از ۸۶ درصد از تغییرات سطح آب را به درستی شبیه‌سازی کند.



شکل ۵: تراز سطح آب شبیه سازی شده و واقعی دریای خزر با وجود این، انحرافات در برخی نقاط مشاهده شد که می تواند ناشی از فرضیات ساده سازی شده در شبیه سازی، عدم دقت کامل داده های ورودی یا عوامل محیطی ناشناخته باشد. با توجه به این نتایج، عملکرد مدل برای تحلیل تغییرات سطح آب دریای خزر در بازه زمانی مذکور قابل قبول ارزیابی می شود.

شبیه سازی شرایط واقعی سطح آب است. همان طور که مشاهده می شود، سطح آب در شمال دریای خزر پایین تر از مناطق جنوبی آن است. این تفاوت ناشی از عوامل متعددی مانند توپوگرافی بستر دریا، تأثیر بادهای غالب و جریان های دریایی است. مناطق جنوبی به دلیل عمق بیشتر، گرمایش آب و الگوهای جریانی خاص، سطح آب بالاتری نسبت به مناطق شمالی دارند. این شبیه سازی به عنوان پایه ای برای بررسی اثرات سناریوهای مختلف تبخیر در ادامه تحقیق استفاده شده است.

به منظور ارزیابی کیفی عملکرد مدل در شبیه سازی جریان های سطحی، از خروجی مدل هیدرودینامیکی نقشه برداری بردارهای جریان (velocity vectors) برای سطح آب دریای خزر انجام گرفت. شکل ۸-الف الگوی جریان سطحی را در ماه آگوست نمایش می دهد که جهت و شدت جریان ها را در سراسر حوضه دریا به تصویر می کشد. به منظور صحت سنجی کیفی این نتایج، الگوی شبیه سازی شده با داده های ارائه شده [۲۶] مقایسه گردید (شکل ۸-ب).

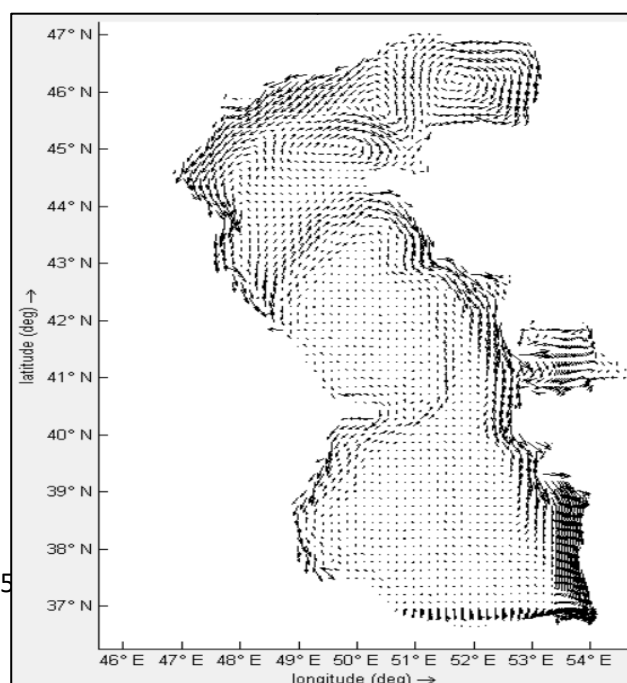


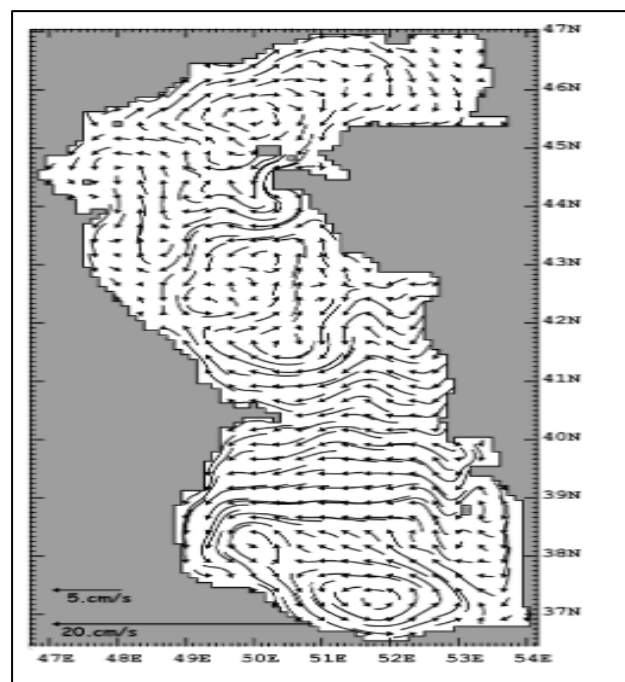
شکل ۶: سطح آب دریای خزر در سال ۲۰۱۰، شبیه سازی شده با مدل

هیدرودینامیکی

مقایسه میان دو شکل نشان می دهد که مدل مورد استفاده در این تحقیق به خوبی توانسته الگوهای چرخشی غالب دریای خزر را بازتولید نماید. از جمله این الگوها می توان به گردش پادساعتگرد در بخش جنوبی و گردش ساعتگرد در نواحی شمالی دریا اشاره کرد که در هر دو نقشه مشاهده می شوند. این تطابق کیفی میان نتایج مدل و داده های موجود، بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در بازسازی دینامیک جریان سطحی در مقیاس حوضه ای است و می تواند پشتوانه ای برای اطمینان بیشتر به قابلیت های مدل در تحلیل سناریوهای آینده باشد.

شکل ۶ سطح آب دریای خزر را در سال ۲۰۱۰ نشان می دهد که با استفاده از مدل سازی هیدرودینامیکی در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ شبیه سازی شده است. هدف از ارائه این نقشه، نمایش دقت مدل در





(الف)

(ب)

شکل ۷: الف) الگوی جریان‌های سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل Delft3D در دریای خزر در ماه آگوست

ب) الگوی جریان‌های سطحی در دریای خزر در ماه آگوست مطابق با نتایج مطالعه قبلی [۲۶]

شدیدترین کاهش سطح آب در سناریوی $S+30\%$ (افزایش ۳۰ درصدی تبخیر) رخ می‌دهد. در این سناریو، سطح آب از $27/8$ متر در سال ۲۰۲۰ به $29/45$ متر در سال ۲۰۴۰ کاهش می‌یابد، معادل افت $1/6$ متر در طول دوره. این نتایج نشان‌دهنده اثر انباشتی و تشدید شده تبخیر در این سناریو است و روند کاهش سطح آب به‌ویژه در سال‌های پایانی شبیه‌سازی شدت بیشتری می‌گیرد.

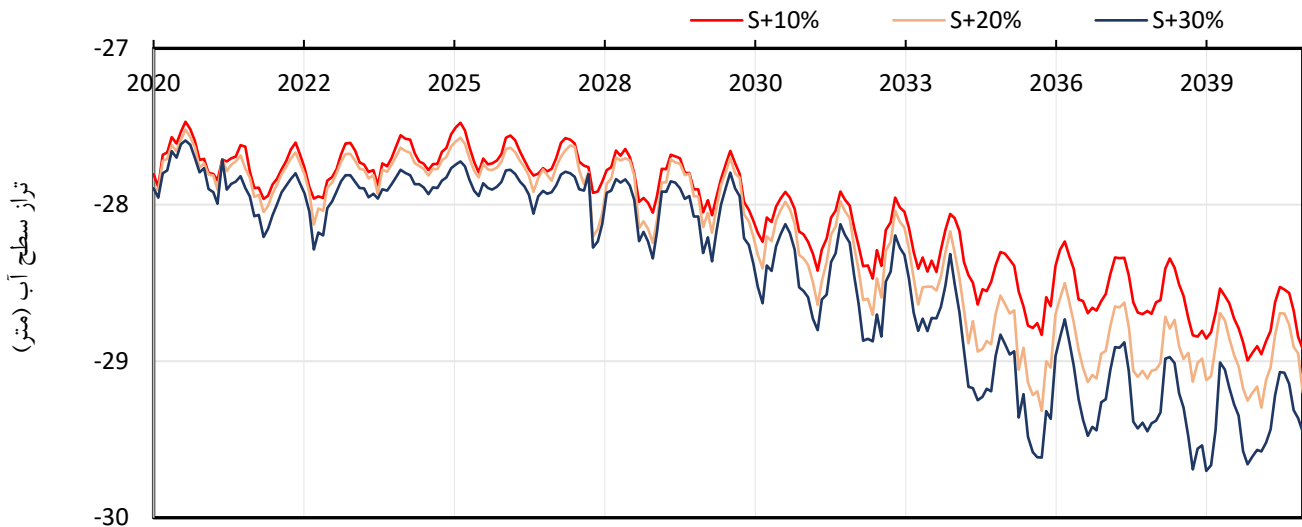
به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که در سال‌های اولیه مدل‌سازی، تغییرات سطح آب در بین سناریوها تا حد زیادی مشابه است، اما با گذشت زمان و افزایش اثرات انباشتی تبخیر، این تفاوت‌ها به طور قابل توجهی گسترش می‌یابند. در تحلیل نتایج مدل‌سازی، یکی از نکات کلیدی که باید به آن توجه شود، رفتار غیرخطی تغییرات سطح آب در پاسخ به افزایش تبخیر است به عبارت دیگر، در حالی که کاهش سطح آب در سناریوهای شدیدتر بیشتر است، این افزایش به‌طور غیرخطی و تدریجی در طول زمان رخ می‌دهد. این امر نشان‌دهنده پیچیدگی‌های بیشتری در روابط میان تبخیر و سطح آب است که ممکن است به دلیل بازخوردهای مختلف سیستم مانند تغییرات در دبی ورودی و دینامیک‌های آبی باشد. بنابراین، تغییرات سطح آب در این سناریوها به‌ویژه در بلندمدت، نه تنها تحت تأثیر شدت افزایش تبخیر، بلکه از تعاملات پیچیده‌تری میان عوامل مختلف ناشی می‌شود که موجب عدم تناسب در کاهش سطح آب می‌گردد. این تغییرات می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی جدی را برای اکوسیستم‌های منطقه، به‌ویژه در خلیج گرگان و سواحل دریای خزر، به همراه داشته باشد

۲. نتایج مدل‌سازی سطح آب دریای خزر و خلیج گرگان تحت سناریوهای تبخیر

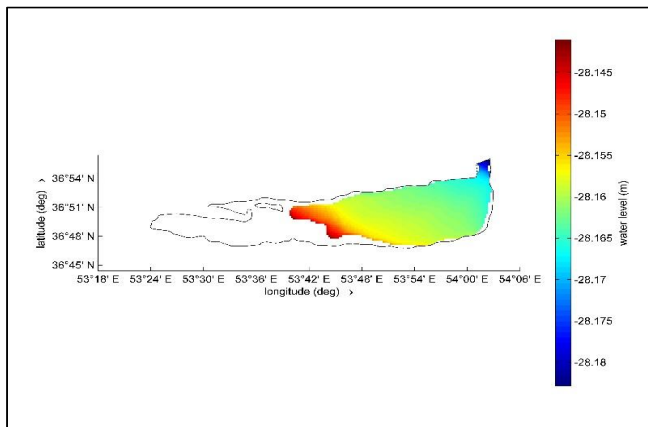
نتایج مدل‌سازی سطح آب دریای خزر و خلیج گرگان تحت سناریوهای مختلف افزایش تبخیر (10% ، 20% و 30%) به وضوح روند کاهش سطح آب این مناطق را در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ نشان می‌دهد (شکل ۸). بررسی نتایج اولیه مدل‌سازی حاکی از آن است که در سال‌های آغازین، تغییرات سطح آب در بین سناریوهای مختلف، همگنی بیشتری دارند، که می‌تواند ناشی از محدود بودن تأثیرات انباشتی تبخیر و تأخیر در واکنش‌های دینامیکی سطح آب به شرایط محیطی باشد.

با گذشت زمان و تأثیرات تجمعی تبخیر، تفاوت‌های قابل توجهی میان سناریوها پدیدار می‌شود. در سناریوی $S+10\%$ (افزایش ۱۰ درصدی تبخیر)، سطح آب که در سال ۲۰۲۰ حدود $27/8$ متر است، تا سال ۲۰۴۰ به حدود $28/9$ متر کاهش می‌یابد، معادل کاهش $1/1$ متر در این بازه زمانی. در این حالت، کاهش سطح آب به صورت تدریجی اما مداوم مشاهده می‌شود و شدت تغییرات در سال‌های اولیه نسبتاً کمتر

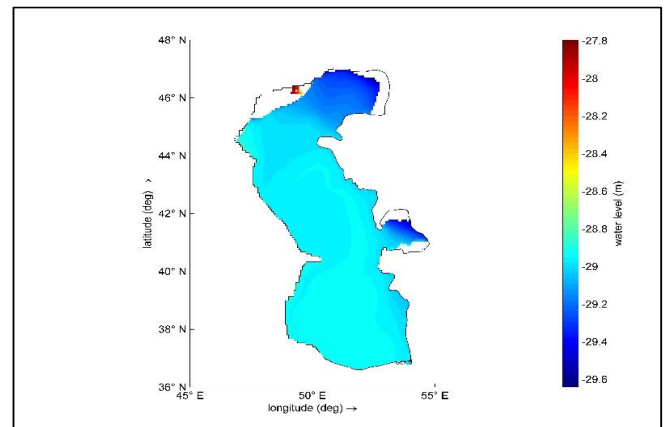
است. در سناریوی $S+20\%$ (افزایش ۲۰ درصدی تبخیر)، میزان کاهش سطح آب چشمگیرتر است. در این سناریو، سطح آب از حدود $27/8$ متر در ابتدای دوره به $29/1$ متر در پایان دوره کاهش می‌یابد که کاهش کلی $1/3$ متر را نشان می‌دهد. این روند حاکی از آن است که تأثیر تبخیر بر سطح آب در این سناریو سریع‌تر و محسوس‌تر از سناریوی قبلی است.



شکل ۸: تغییرات سطح آب تحت سناریوهای افزایش تبخیر به منظور بررسی تأثیر افزایش تبخیر بر سطح آب دریای خزر و خلیج گرگان، نتایج مدلسازی در دو منطقه به صورت مجزا ارائه شده است. تصاویر زیر توزیع مکانی سطح آب را در هر دو منطقه نشان می‌دهند. این تصاویر دوبعدی و به صورت رنگی ارائه شده‌اند تا تغییرات سطح آب به وضوح نمایش داده شوند. شکل (۹-الف) مربوط به وضعیت دریای خزر در تراز سطح آب ۲۹- و شکل (۹-ب) وضعیت خلیج گرگان را در تراز ۲۸/۱- نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها، مناطق سفید رنگ نشان‌دهنده نواحی خشک شده به واسطه افزایش تبخیر و کاهش سطح آب هستند که منجر به کاهش مساحت دریای خزر و خلیج گرگان می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۹: الف) نقشه دو بعدی سطح آب دریای خزر تحت سناریوی S+30% در ماه نوامبر سال ۲۰۳۴

ب) نقشه دو بعدی سطح آب خلیج گرگان تحت سناریوی S+30% در ماه دسامبر سال ۲۰۲۲

در حالت پایه (S0)، کاهش سطح آب طی ۲۰ سال حدود ۱۰۰ سانتی متر است، اما با اعمال سناریوهای افزایش تبخیر، کاهش سطح آب به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در سناریوی S+30% به حداکثر مقدار خود یعنی حدود ۱۶۰ سانتی متر می‌رسد که این بدان معنی است که افزایش ۳۰ درصدی تبخیر، میزان کاهش سطح آب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و سطح آب حدود ۶۰ سانتی متر بیشتر از حالت پایه کاهش می‌یابد.

در شکل شماره (۱۰) مقادیر کاهش سطح آب (بر حسب سانتی‌متر) در دو بازه زمانی دهه اول مدل‌سازی و کل دوره ۲۰ ساله مدل‌سازی، تحت سناریوهای مختلف افزایش تبخیر و حالت پایه مدلسازی (S0) قابل ملاحظه است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در دهه اول مدل‌سازی مقادیر کاهش سطح آب برای تمام سناریوها همگرایی بیشتری دارند و تفاوت فاحشی بین مقادیر نیست که این موضوع نشان‌دهنده اثرات تجمعی افزایش تبخیر در بازه‌های زمانی طولانی‌تر است.

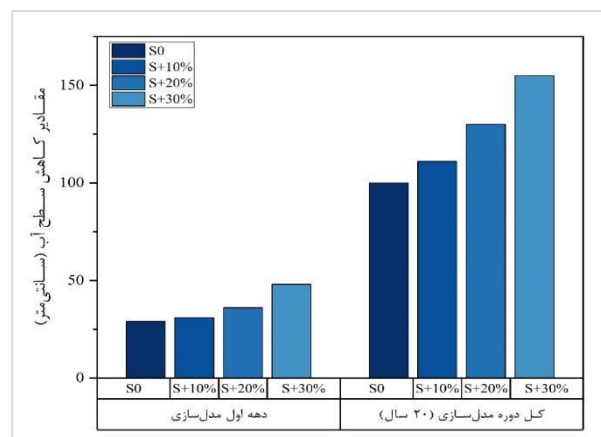
قدری است که در دهه اول مدلسازی کانال چپقلی کاملاً خشک شده و افزایش سطح آب در فصول گرم سال نیز نمی‌تواند سبب بازگشایی مجدد آن شود.

همچنین تأثیر افزایش تبخیر بر مساحت خلیج گرگان در سه سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که تغییرات تبخیر به طور مستقیم بر کاهش مساحت خلیج تأثیر می‌گذارد. در سناریوی اول، با افزایش ۱۰ درصدی تبخیر نسبت به میانگین دو دهه گذشته، مساحت خلیج گرگان به طور قابل توجهی کاهش یافته و در پایان سال ۲۰۴۰ به حدود ۲۳۰ کیلومتر مربع می‌رسد. در این حالت، کاهش مساحت خلیج از بخش‌های غربی آغاز شده و این روند با ادامه تبخیر تشدید می‌شود.

در سناریوی دوم، با افزایش ۲۰ درصدی تبخیر، مساحت خلیج به شکلی گسترده‌تر کاهش یافته و در پایان سال ۲۰۴۰ به حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع می‌رسد. این سناریو نشان‌دهنده اثرات عمیق‌تر تبخیر بر کاهش مساحت آبی است که به مرور زمان خلیج را به یک محیط کوچکتر و محدودتر تبدیل می‌کند.

در سناریوی سوم که افزایش ۳۰ درصدی تبخیر اعمال شده است، کاهش مساحت خلیج به شدت تشدید شده و تا پایان سال ۲۰۴۰، مساحت آن به حدود ۱۷۵ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد. این کاهش شدید مساحت نشان می‌دهد که بخش‌های وسیعی از خلیج به خشکی تبدیل می‌شوند و ساختار هیدرولوژیکی منطقه به طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

نتایج بیانگر این است که از مساحت اولیه خلیج در تراز منفی ۲۷/۸ که تقریباً برابر ۳۱۰ کیلومتر مربع است، در پایان سناریوهای افزایش تبخیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی به میزان ۲۵/۸٪، ۳۵/۵٪ و ۴۳/۵٪ کاسته می‌شود. این کاهش‌ها به صورت خطی نیستند و روند زمان‌بندی کاهش مساحت نیز پیچیده است؛ زیرا عوامل مختلف محیطی و تغییرات مکانی و زمانی اثرات متفاوتی بر مساحت دارند. این کاهش مساحت علاوه بر تأثیرات زیست‌محیطی، بر اکوسیستم منطقه و فعالیت‌های اقتصادی محلی تأثیرات منفی گسترده‌ای خواهد داشت.



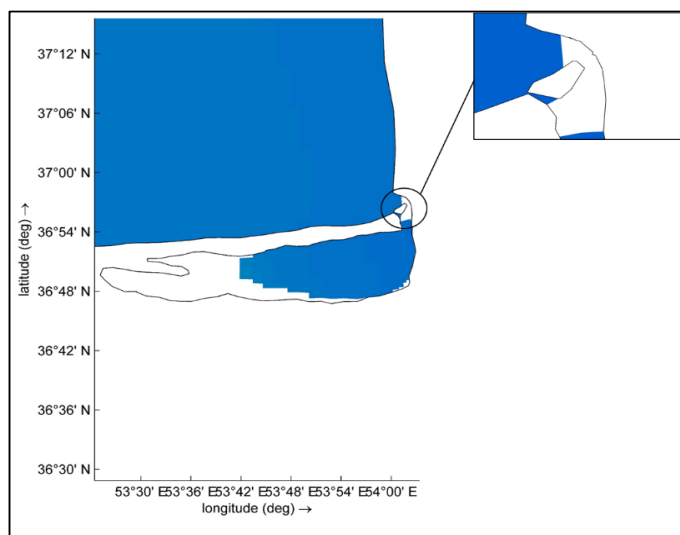
شکل ۱۰: مقایسه مقادیر کاهش سطح آب تحت سناریوهای افزایش تبخیر و حالت پایه

۳. بررسی کاهش سطح آب بر وضعیت هیدرولوژیکی و اکولوژیکی خلیج گرگان

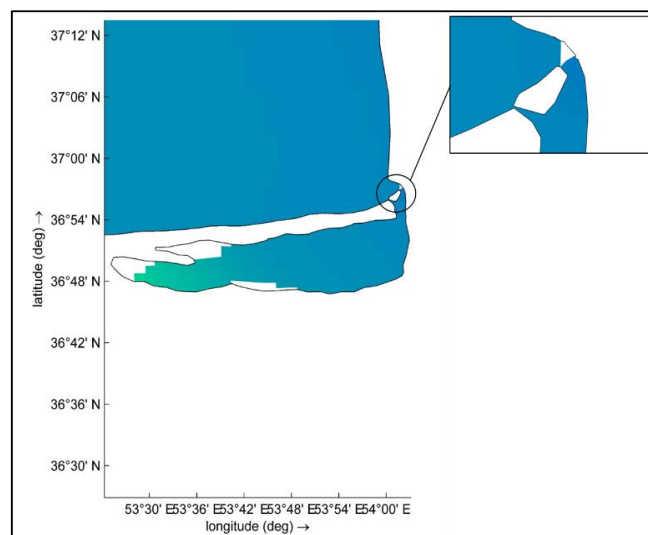
کاهش سطح آب دریای خزر باعث کاهش مستمر مساحت خلیج گرگان و زیستگاه‌های تالابی آن می‌شود. همچنین، کاهش تراز سطح آب ممکن است ارتباط خلیج با دریا را قطع کرده و این امر بر فرایندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب و در نهایت اکوسیستم خلیج تأثیرات منفی بگذارد.

طبق شبیه‌سازی‌ها، در تراز منفی ۲۸/۳ متر، کانال چپقلی خشک می‌شود (شکل ۱۱-الف) و خلیج گرگان تنها از طریق کانال اشوراده با دریای خزر ارتباط خواهد داشت. در تراز منفی ۲۸/۷ متر، کانال اشوراده نیز خشک می‌شود و ارتباط خلیج گرگان با دریای خزر به طور کلی قطع می‌شود (شکل ۱۱-ب).

با توجه به نتایج در هر سه سناریو در پایان مدلسازی ارتباط خلیج گرگان از طریق آبراهه شرقی و غربی با دریای خزر به طور کامل قطع خواهد شد. اما در سناریوی اول این قطع ارتباط در اواخر مدلسازی اتفاق می‌افتد در حالی که در اواسط دوره مدلسازی تراز آب به منفی ۲۸/۳ می‌رسد و کانال چپقلی خشک می‌شود؛ اما در فواصل گرم با افزایش سطح آب مجدداً بازگشایی می‌شود. اما در سناریوی سوم تأثیر تبخیر بر کاهش سطح آب به



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: الف) وضعیت خلیج گرگان در تراز ۲۸/۳- و خشک شدن کانال چپقلی در نوامبر ۲۰۲۷ تحت سناریوی S+30%

ب) وضعیت خلیج گرگان در تراز ۲۸/۷- و خشک شدن کانال آشوراده در ژانویه ۲۰۳۱ تحت سناریوی S+30%

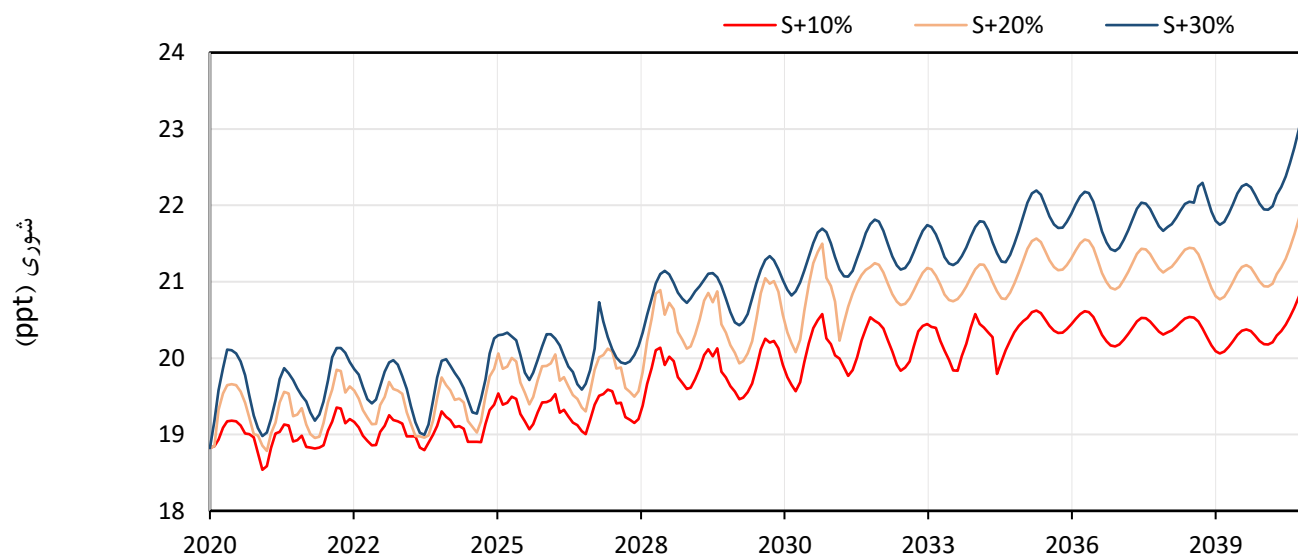
بر غلظت نمک است. با این حال، در سناریوی S+20%، روند افزایش شوری شدت بیشتری یافته و تأثیرات قابل توجهی در کاهش حجم آب ورودی به خلیج مشاهده می‌شود. نهایتاً، در سناریوی S+30%، بالاترین میزان شوری ثبت شده که نشان‌دهنده تأثیر تشدید یافته تبخیر بر کاهش حجم آب و تمرکز شوری است.

در طول دوره مدلسازی، نتایج نشان می‌دهد که در فصل‌های گرم، به دلیل افزایش جریان ورودی رودخانه‌ها، حجم آب خلیج افزایش یافته و غلظت شوری کاهش می‌یابد. برعکس، در فصل‌های سرد، با کاهش جریان ورودی، غلظت شوری به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در پایان دوره مدلسازی، شوری در مرکز خلیج برای سناریوی S+10% به حدود ۲۱/۲ ppt، برای سناریوی S+20% به حدود ۲۲/۳ ppt و برای سناریوی S+30% به بیش از ۲۳/۶ ppt رسیده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم افزایش تبخیر بر دینامیک شوری خلیج گرگان است که با کاهش حجم آب و افزایش غلظت شوری همراه بوده و می‌تواند پیامدهای جدی برای اکوسیستم منطقه به همراه داشته باشد.

۴. نتایج مدلسازی شوری آب خلیج گرگان تحت سناریوهای تبخیر

شوری آب یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین کیفیت آب خلیج‌ها و اکوسیستم‌های ساحلی است. تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه افزایش تبخیر ناشی از گرمایش جهانی، می‌توانند تعادل شوری را در محیط‌های آبی مختل کرده و اثرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌های وابسته به این مناطق داشته باشند. در این مطالعه، اثر افزایش تبخیر بر تغییرات شوری آب خلیج گرگان با استفاده از سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

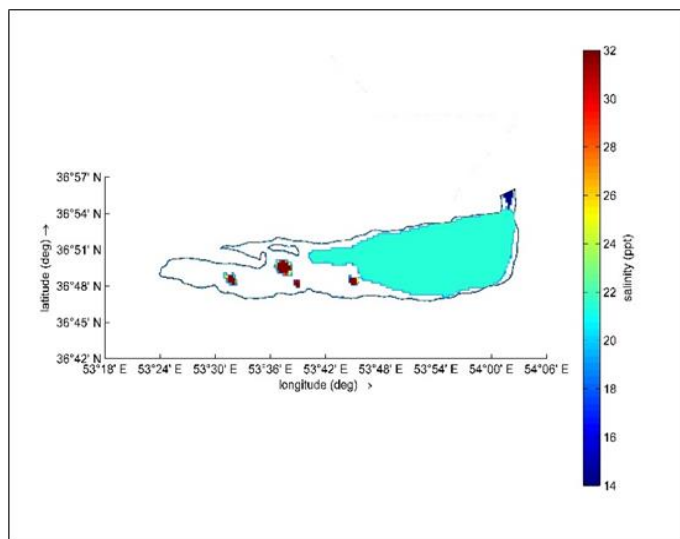
شکل ۱۲ تغییرات زمانی شوری در مرکز خلیج گرگان را تحت سه سناریوی افزایش تبخیر نشان می‌دهد. نتایج مدلسازی بیانگر افزایش شوری آب در تمامی سناریوها بوده که این تغییرات به صورت تصاعدی با درصد افزایش تبخیر شدت می‌یابند. در سناریوی S+10%، شوری به آرامی افزایش پیدا کرده و تغییرات نشان‌دهنده تأثیر محدود افزایش تبخیر



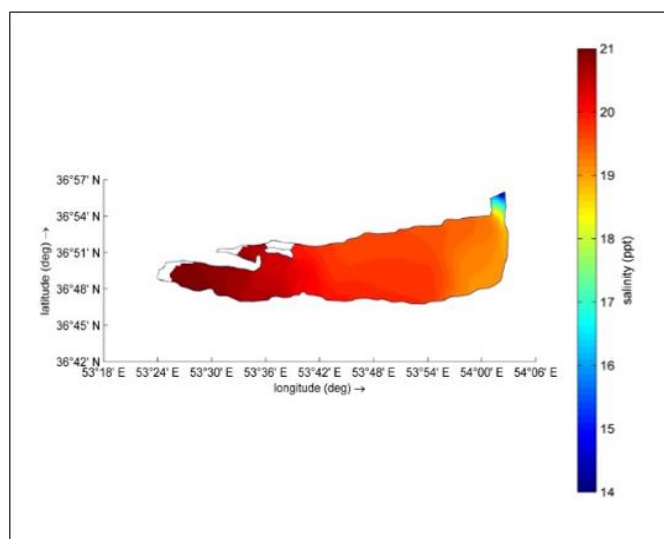
شکل ۱۲: تغییرات شوری در عمیق ترین قسمت خلیج گرگان تحت سناریوهای افزایش تبخیر در ادامه، دو نقشه دوبعدی از توزیع شوری در خلیج گرگان برای ترازهای مختلف سطح آب ارائه شده‌اند. این نقشه‌ها تغییرات مکانی شوری را در خلیج گرگان به‌وضوح نمایش می‌دهند.

شرقی و دهانه خلیج غلظت شوری کمتر از سایر بخش‌ها می‌باشد و این موضوع در هر دو شکل قابل مشاهده است. همچنین، لکه‌های قرمز در شکل (۱۳-ب) نشان‌دهنده نواحی با شوری بالاتر حدود ۳۲ ppt هستند که می‌توانند ناشی از کاهش تعویض آب، افزایش تبخیر موضعی یا تغییرات دینامیک جریان‌های داخلی باشند. این الگو تأثیر مهمی بر اکوسیستم‌های محلی و همچنین مدیریت منابع آبی خلیج گرگان خواهد داشت

با توجه به نقشه‌های (شکل ۱۳) مشاهده می‌شود که بخش غربی خلیج گرگان دارای مقادیر شوری بسیار بیشتری نسبت به سایر نواحی خلیج است. این تفاوت به دلیل حجم آب کمتر در این بخش و تجمع نمک در نتیجه کاهش تبادل آب با سایر قسمت‌ها می‌باشد. در نتیجه، غلظت نمک در این منطقه بیشتر شده و به دلیل کم‌عمق بودن، این بخش از خلیج در معرض خشک شدن سریع‌تر قرار دارد. با توجه به اینکه آب ورودی از دریای خزر به خلیج گرگان دارای شوری حدود ۱۳/۶ ppt است، در نواحی



(ب)



(الف)

سطح آب ۸

(ب): توزیع شوری در خلیج گرگان در تراز سطح آب ۲۹- تحت سناریوی S+30% در ماه نوامبر سال ۲۰۲۴

پایین‌تر از منفی ۲۸/۷ به دلیل خشک شدن کامل راه های ارتباطی، تبادل آب بین خلیج و دریا متوقف شده و خلیج گرگان به‌تدریج به‌سوی خشکی کامل می‌رود. در چنین شرایطی، شوری آب خلیج از شرایط

همان‌طور که در شکل‌های بخش نتایج نشان داده شده است، در شرایط برقراری ارتباط هیدرولیکی میان دریای خزر و خلیج گرگان، تراز سطح آب خلیج معادل تراز آب دریای خزر در آن زمان خواهد بود. در ترازهایی

متغیرهای اقلیمی، تأکید کرده‌اند که افزایش دما، کاهش بارندگی و تشدید تبخیر از عوامل اصلی کاهش تراز آب دریای خزر در سه دهه اخیر بوده‌اند. یافته‌های مدل‌سازی حاضر نیز بر نقش غالب تبخیر در افت تراز آب خزر صحنه می‌گذارد و نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی تبخیر می‌تواند به کاهش قابل توجه سطح آب و قطع ارتباط آبی خلیج گرگان با دریای خزر منجر شود. این هم‌راستایی میان داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، اعتبار و انسجام علمی نتایج تحقیق حاضر را تقویت می‌کند.

از منظر تحلیل تأثیر افت تراز آب بر ساختار فیزیکی خلیج، نتایج تحقیق با یافته‌های جعفری و همکاران [۶] هم‌خوانی دارد. آن‌ها با استفاده از مدل عددی، پیش‌بینی کردند که در صورت ادامه روند فعلی کاهش تراز آب، بخش‌های غربی خلیج گرگان طی افق زمانی کوتاه‌مدت خشک خواهند شد و در افق میان‌مدت نیز ارتباط کامل خلیج با دریای خزر از بین خواهد رفت. همچنین، خوشروان [۱۱] با استفاده از داده‌های سنجش از دور، کاهش ۱۵۰ سانتی‌متری تراز آب خزر را عامل کاهش حدود ۱۷۶ کیلومترمربعی از مساحت خلیج گرگان معرفی کرده است؛ این مقدار با سناریوی ۳۰ درصد افزایش تبخیر در پژوهش حاضر که کاهش مساحت خلیج به حدود ۱۷۵ کیلومترمربع را پیش‌بینی می‌کند، هم‌پوشانی قابل توجهی دارد.

در مطالعه‌ای دیگر، حمزه و ترابی [۲۳] با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، همبستگی بالایی میان کاهش تراز آب خزر و کاهش پهنه آبی خلیج گرگان شناسایی کردند این یافته‌ها به‌صورت کیفی مؤید نتایج عددی تحقیق حاضر است که کاهش سطح آب خزر را مستقیماً با افزایش شوری، خشکی کانال‌ها و کاهش وسعت خلیج مرتبط می‌داند. در همین راستا، خوشروان و همکاران [۱۲] نیز پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از افت تراز آب و افزایش شوری در خلیج گرگان را برجسته کرده‌اند. پژوهش حاضر با مدل‌سازی دقیق توزیع مکانی شوری و تحلیل رفتار خلیج در سناریوهای اقلیمی، نشان می‌دهد که بخش‌های غربی خلیج بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به این تغییرات دارند؛ یافته‌ای که تأییدی کمی بر هشدارهای کیفی مطالعات پیشین است.

همچنین از آنجایی که بررسی داده‌های میدانی در ۲۰ سال گذشته ارتباط مستقیم افزایش شوری با کاهش تراز سطح آب را اثبات می‌نماید این پدیده نشان‌دهنده تأثیرات منفی کاهش منابع آبی بر کیفیت آب است. افزایش شوری به عنوان یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی و افزایش تبخیر، می‌تواند اثرات منفی زیادی بر منابع آبی داشته باشد و باعث کاهش کیفیت آب و تهدید به اکوسیستم‌های آبی گردد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در پایان دوره مدل‌سازی، شوری در مرکز خلیج در سناریوی $S+10\%$ به حدود $21/2 \text{ ppt}$ ، در سناریوی $S+20\%$ به حدود $22/3 \text{ ppt}$ و در سناریوی $S+30\%$ به بیش از $23/6 \text{ ppt}$ رسیده است. این مقادیر به‌طور خاص تأثیر افزایش تبخیر و کاهش جریان ورودی آب را در تشدید شوری نشان می‌دهد و اهمیت اتخاذ تدابیر مدیریتی برای کاهش اثرات این تغییرات را برجسته می‌کند. علاوه بر این، تحلیل توزیع مکانی شوری در خلیج گرگان نشان می‌دهد که بخش‌های غربی خلیج، به دلیل حجم

طبیعی خارج شده و ممکن است به شدت افزایش یابد. در چنین شرایطی، شوری آب خلیج از شرایط طبیعی خارج شده و به دلیل تبخیر شدید و نبود تبادل با دریای خزر، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که پس از قطع ارتباط، تمرکز نمک در خلیج می‌تواند تا حدودی نزدیک به شرایط هایدروگرافیک افزایش یابد که این موضوع تهدیدی جدی برای اکوسیستم منطقه محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که تغییرات سطح آب دریای خزر تحت سناریوهای افزایش تبخیر تأثیرات قابل توجهی بر وضعیت هیدرولوژیکی و اکوسیستم خلیج گرگان داشته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در صورتی که روند کاهش سطح آب و افزایش تبخیر ادامه یابد، احتمال خشکی کامل بخش‌های غربی خلیج و قطع ارتباط آن با دریای خزر در افق‌های زمانی کوتاه‌مدت و میان‌مدت وجود دارد. این پیش‌بینی‌ها با نتایج مدل‌های قبلی مطابقت دارند که کاهش سطح آب دریای خزر را منجر به کاهش قابل توجه در وسعت خلیج گرگان معرفی کرده‌اند.

در این تحقیق، مدل هیدرودینامیکی برای بررسی تأثیر افزایش تبخیر بر سطح آب خلیج گرگان شبیه‌سازی شد و سناریوهای مختلف افزایش تبخیر مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در صورت افزایش ۱۰ درصدی تبخیر نسبت به دو دهه گذشته، بخش غربی خلیج گرگان در تراز میانگین منفی $28/3$ متر دچار خشکی می‌شود. در این شرایط، کانال چپ‌لی خشک شده و ارتباط خلیج با دریای خزر محدود می‌شود. با ادامه کاهش سطح آب، از اواخر سال 2038 ارتباط خلیج با دریا به‌طور کامل قطع شده و تا پایان سال 2040 ، تراز آب به منفی $28/9$ متر می‌رسد و خلیج گرگان به یک محیط آبی بسته تبدیل خواهد شد که مساحت آن به حدود 230 کیلومتر مربع کاهش می‌یابد.

در سناریوی دوم، با افزایش ۲۰ درصدی تبخیر، از فصول سرد سال 2032 تراز سطح آب به حدود منفی $28/3$ متر رسیده و کانال چپ‌لی خشک می‌شود، اما افزایش سطح آب در فصل گرم سال بعد، سبب بازگشایی موقت آن خواهد شد. با این حال، از ژانویه 2035 افت شدید سطح آب رخ داده و قطع ارتباط خلیج با دریای خزر دائمی می‌شود، به‌طوری که هر دو کانال چپ‌لی و آشوراده خشک خواهند شد. در پایان سال 2040 ، تراز آب به منفی $29/1$ متر رسیده و مساحت خلیج به حدود 200 کیلومتر مربع کاهش خواهد یافت.

نتایج سناریوی سوم نشان می‌دهد که خشکی موقت کانال چپ‌لی از اواخر سال 2027 آغاز شده و از اوایل سال 2032 ، کاهش سطح آب باعث قطع دائمی ارتباط خلیج گرگان با دریای خزر خواهد شد. در این شرایط در پایان سال 2040 ، تراز سطح آب به منفی $29/45$ متر خواهد رسید. در این وضعیت، بخش وسیعی از خلیج دچار خشکی شدگی شده و مساحت آن به حدود 175 کیلومتر مربع کاهش خواهد یافت.

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین در حوزه بررسی تغییرات تراز سطح آب دریای خزر و پیامدهای آن بر خلیج گرگان هم‌راستاست. برای مثال، علی‌محمدی و همکاران [۱۰] با بررسی روند بلندمدت

۳. انتقال ایمن آب دریای خزر به خلیج گرگان از طریق کانال یا خط لوله

با توجه به مورفولوژی مناسب منطقه مرکزی شبه‌جزیره میانکاله، انتقال آب از دریای خزر به خلیج گرگان از این مسیر، یکی از روش‌های کم‌هزینه و نسبتاً مؤثر برای جبران کاهش تراز آب خلیج محسوب می‌شود. این طرح باید با ارزیابی‌های زیست‌محیطی دقیق و بررسی اثرات اکولوژیکی همراه باشد.

۴. ضرورت حل مسئله کاهش دبی رودخانه ولگا در سطح بین‌المللی:

رودخانه ولگا، به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع ورودی آب به دریای خزر، طی دهه‌های اخیر با کاهش قابل‌توجه دبی مواجه شده است. این کاهش که ناشی از توسعه بی‌رویه سدسازی، تغییرات اقلیمی و مدیریت ناهماهنگ منابع آبی در روسیه است، موجب افت تراز آب دریای خزر و به تبع آن، کاهش تراز آب و افزایش شوری خلیج گرگان شده است. پیگیری این مسئله در سطح بین‌المللی از طریق مجامع محیط‌زیستی مانند UNECE، ESCAP و برنامه محیط زیست سازمان ملل (UNEP)، و تدوین توافق‌نامه‌های چندجانبه منطقه‌ای برای مدیریت یکپارچه منابع فرامرزی می‌تواند گامی مؤثر در راستای حفاظت از دریای خزر و پهنه‌های وابسته نظیر خلیج گرگان باشد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول به عنوان محقق اصلی وظیفه جمع‌آوری داده‌ها، اجرای مدل و پیش‌نویس مقاله را برعهده داشتند. نویسنده دوم به عنوان استاد راهنما و مسئول هدایت تحقیق را برعهده داشتند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع

- [1] N. Aladin and I. Plotnikov, "The Caspian Sea," *Lake Basin Manag. Initiat. Themat. Pap.*, pp. 1–29, 2004.
- [2] S. Zahraei, K. Khoshhal Dastjerd, Q. Qanqermeh, and A. Abdolazim, "Estimation of evaporation from the surface of the Caspian Sea and its spatiotemporal analysis," *Journal of Physical Geography Research*, vol. 50, no. 3, pp. 425–441, 2018.
- [3] S. B. Kroonenberg *et al.*, "Solar-forced 2600 BP and little ice age highstands of the Caspian sea," *Quat. Int.*, vol. 173, pp. 137–143, 2007.
- [4] A. Cazenave and G. Le Cozannet, "Sea level rise and its

کمتر آب و تأثیرپذیری بیشتر از تبخیر و کاهش جریان‌های ورودی، دارای شوری بسیار بالاتری نسبت به سایر نواحی هستند. این بخش‌ها نه‌تنها سریع‌تر تحت تأثیر افزایش شوری قرار می‌گیرند، بلکه به دلیل شرایط بحرانی‌تر، مستعد خشک شدن زودتر نیز هستند. این یافته‌ها بر ضرورت مدیریت ویژه این نواحی و اتخاذ تدابیر مؤثر برای جلوگیری از پیامدهای مخرب زیست‌محیطی تأکید دارند.

خطرناک‌ترین عامل افزایش تبخیر بر مبنای سه سناریوی محتمل در نظر گرفته شده است و قطعاً در صورت در نظر گرفتن تمام سناریوهای تغییر اقلیم از جمله افزایش دما و کاهش میزان بارش و تغییر در دبی‌های ورودی به دریای خزر کاهش سطح آب دریای خزر و عمق خلیج گرگان و قطع ارتباط خلیج با دریای مادری بسیار سریع‌تر از آنچه در مقاله حاضر ارائه گردیده است خواهد بود. با توجه به محدودیت‌های موجود در این تحقیق و پیچیدگی‌های مدل‌سازی هیدرودینامیکی، پیشنهاد می‌شود که در آینده از مدل‌های پیشرفته‌تر با دقت بالا برای تحلیل وضعیت هیدرولوژیکی خلیج گرگان و دریای خزر استفاده شود. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اجرایی در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به موارد ذکر شده فوق، نیاز به مدیریت منابع آبی خلیج گرگان و پیگیری تغییرات هیدرولوژیکی در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. در راستای مدیریت و نجات خلیج گرگان از خشکی در شرایط بحرانی پیش‌بینی شده، پیشنهاد می‌شود مجموعه‌ای از راهکارهای اجرایی، حقوقی و دیپلماتیک برای مدیریت پایدار منابع آبی ورودی به خلیج و کاهش روند تخریب اکولوژیکی آن اتخاذ شود:

۱. حفظ و تقویت ورودی آب از رودخانه‌های محلی به خلیج گرگان

یکی از مهم‌ترین اقدامات، جلوگیری از کاهش یا مسدودسازی جریان رودخانه‌هایی است که از نواحی داخلی ایران به خلیج گرگان وارد می‌شوند. به عنوان نمونه، رودخانه قره‌سو نقش مهمی در تأمین جریان آب شیرین خلیج دارد و محدود کردن برداشت یا تغییر مسیر این رود و سایر رودها می‌تواند توازن هیدرولوژیکی خلیج را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. لذا حفظ جریان طبیعی و حتی افزایش دبی این رودخانه‌ها، به‌ویژه در دوره‌های کم‌بارش، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲. لایروبی منظم مصب‌های ورودی و مسیرهای اتصال رودخانه‌ها به خلیج

یکی دیگر از اقدامات ضروری، لایروبی دوره‌ای و هدفمند مصب ورودی رودخانه‌ها به خلیج است. رسوب‌گذاری در دهانه‌های ورودی موجب انسداد جریان و کاهش تبادل آب شیرین با دریاچه می‌شود. این مسأله نه‌تنها موجب کاهش ورودی آب و افزایش شوری می‌شود، بلکه فرآیند احیای اکوسیستم خلیج را نیز مختل می‌سازد. اجرای پروژه‌های لایروبی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی می‌تواند جریان رواناب و ورود رسوبات را کنترل کند. با توجه به اینکه بر اساس مشاهدات سرعت رسوب‌گذاری در کانال چپ‌قلی کمتر است گزینه اول برای لایروبی می‌تواند این کانال باشد.

- 141–157.
- [16] H. Khoshhravan, "Spatial and temporal changes of coastal habitats of Gorgan Bay under the influence of Caspian Sea fluctuations," *Geographical Information Quarterly Sepehr*, vol. 2020, no. xx, pp. xx-xx, 2020.
- [17] H. Khoshhravan, A. Naqinezhad, T. Alinejad-Tabrizi, and T. Yanina, "Gorgan Bay environmental consequences due to the Caspian Sea rapid water level change," *Casp. J. Environ. Sci.*, vol. 17, no. 3, pp. 213–226, 2019.
- [18] V. P. Masson-Delmotte *et al.*, "Ipcc, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change," 2021.
- [19] A. P. Luijendijk, "Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements," *TU Delft, Fac. Civ. Eng. Geosci. Hydraul. Eng.*, 2001.
- [20] E. A. Toorman, "Modelling of turbulent flow with suspended cohesive sediment," in *Proceedings in Marine Science*, vol. 5, Elsevier, 2002, pp. 155–169.
- [21] Kosarev, A. N., & Yablonskaya, E. A. (1994). *The Caspian Sea* (Vol. 20). The Hague: SPB Academic Publishing.
- [22] Mansouri, D., Sadri-Nasab, M., & Akbarinasab, M. (2015). Modeling the structure of temperature and salinity fields in the Caspian Sea using the POM model. *Hydrophysics*, 1(1), 1–13. (In Persian with English abstract)
- [23] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- [24] Caspian Hydrometeorological Service. (2025). Hydrometeorological data chronology. Retrieved from <http://caspcom.com/>
- [25] Hamzeh, S., & Torabi, O. (2021). Investigation of water surface changes in Gorgan Bay and its relationship with precipitation and the Caspian Sea water level using remote sensing data. *Ecohydrology*, 8(2), 475–484.
- [26] Ibrayev, R. A., Özsoy, E., Schrum, C., & Sur, H. I. (2010). Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science*, 6(1), 311-329
- coastal impacts," *Earth's Futur.*, vol. 2, no. 2, pp. 15–34, 2014.
- [5] W. J. Mitsch and J. G. Gosselink, "The value of wetlands: the importance of scale and landscape setting," *Ecol. Econ.*, vol. 35, no. 1, pp. 25–33, 2000.
- [6] S. Hamzeh, E. Akbari, A. A. Kakroodi, and M. Jeihooni, "Investigation the dynamic response of the Anzali lagoon to sea-level changes using multi-sources remotely sensed data," in *The 38th Asian Conference on Remote Sensing*, 2017.
- [7] A. A. Darvishsefat, "Atlas of protected areas of Iran," 2006.
- [8] S. Sharbaty and A. Ghanghermeh, "Forecasting the effect of decreasing long time trend of Caspian Sea water level on the life of Gorgan Bay," *J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 45–59, 2015.
- [9] A. Jafari, M. H. Niksokhan, and M. R. Majdzadeh Tabatabai, "Investigation of Flow Pattern in Gorgan Gulf Considering Changes in Water Level of the Caspian Sea and Using Numerical Model," *J. Environ. Stud.*, vol. 47, no. 3, pp. 361–378, 2021.
- [10] R. Ghayumi, "Environmental Challenges of Gorgan Bay and Miankaleh Wetland and Provide Optimal Protection and Management Strategies 4th International Conference on Environmental Planning and Management. 2017," *Tehran.[Persian]*.
- [11] V. Casulli and R. T. Cheng, "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow," *Int. J. Numer. methods fluids*, vol. 15, no. 6, pp. 629–648, 1992.
- [12] J. L. Chen *et al.*, "Long-term Caspian Sea level change," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44, no. 13, pp. 6993–7001, 2017.
- [13] A. Dai, T. Zhao, and J. Chen, "Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective," *Curr. Clim. Chang. Reports*, vol. 4, pp. 301–312, 2018.
- [14] A. I. Ginzburg and A. G. Kostianoy, "Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s–2017)," *Sovrem. Probl. distantsionnogo Zo. Zemli iz kosmosa*, vol. 15, no. 7, pp. 195–207, 2018.
- [15] Alimohammadi, M., Mehriyar, Q., Nejhad, N. K., Hadi, M., Mohammadi, ..., & Ahmad. (2024). Investigation of atmospheric factors affecting Caspian Sea water level fluctuations from 1992 to 2022. *Climate Research*, 1403(58),

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Ghafouri, B. Master Student, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

✉ b.ghafuri@modares.ac.ir

 0009-0006-1691-8328

Mazaheri, M. Associate Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

✉ m.mazaheri@modares.ac.ir



این قسمت توسط نشریه تکمیل می گردد:

HOW TO CITE THIS ARTICLE



<http://doi.org/10.52547/joc.16.62.6>



<http://joc.inio.ac.ir/>



<https://orcid.org/0009-0006-1691-8328>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.