



Effectiveness of saltwater intrusion control approaches in coastal aquifers under climate change conditions

Mohammad Salahi Jaffari,¹  Hamid Kardan Moghadam,^{2*}  Ahmad Sharafati,³ 

1. Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad. Email: Mohammadjafari1984@gmail.com

2. Department of Water resources studies and research, Water Research Institute, Tehran, Iran. Email: h.kardan@wri.ac.ir

3. Associate Professor, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad. Email: asharafati@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 05 October 2025

Revised 15 November 2025

Accepted 09 December 2025

Available online 22 December 2025

Keywords:

Climate change,
Saltwater Intrusion,
SEAWAT model,
quality sustainability index,
Sari-Neka aquifer.

ABSTRACT

Research Topic: Evaluation of climate change in saltwater intrusion.

Objective: In this study, the assessment of climate change adaptation strategies in the Sari-Neka coastal aquifer was analyzed using the qualitative sustainability index.

Method: The results of the climate simulation showed that the temperature and precipitation in the region have increased. Given the characteristics of the region, increasing temperature is effective in increasing the humidity of the region and increasing precipitation. Quantitative simulation of the aquifer was performed using the MODFLOW model, and to simulate the effect of saltwater intrusion in the outlet section of the aquifer, quantitative and qualitative simulations were performed simultaneously. Accordingly, the MT3DMS qualitative model was used to simulate the chloride concentration at the surface, and the SEAWAT model was used to simulate the concentration at the depth of the aquifer.

Results: The results obtained showed that in the current situation, there is saltwater intrusion of 660 meters. The results of the aquifer simulation, considering 3 release scenarios, showed that in the SSP 126 scenario, the invasion rate was estimated to be 710 meters, in the SSP 245 scenario, the invasion rate was 740 meters, and in the SSP 585 scenario, the invasion rate was estimated to be 820 meters. Due to the increase in saltwater intrusion in the aquifer, 8 adaptation strategies were examined in the form of two issues: reducing aquifer exploitation and increasing recharge to the aquifer. The results showed that the strategies related to the outlet section of the aquifer had the most effects due to the short distance, and the two strategies of reducing 30% of withdrawal from the aquifer in the outlet section and artificial recharge in the outlet section had the most effects compared to other strategies.

Conclusions: The results showed that the strategy of reducing 30% of withdrawals in the outlet section of the aquifer led to a 53% improvement in the quality sustainability index.

Cite this article: Salahi Jaffari, M., Kardan moghaddam, H., Sharafati, A. (2025). Effectiveness of saltwater intrusion control approaches in coastal aquifers under climate change conditions. *Journal of ECOHYDROLOGY*, 12(4), 981-991. <http://doi.org/10.22059/ije.2025.397627.1874>



© Mohammad Salahi Jafari, Hamid Kardan Moghadam, Ahmad Sharafati.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2025.397627.1874>

Introduction

Water supply in Iran faces major challenges due to climate stress and unplanned development, especially in coastal regions. Over-extraction of groundwater has disrupted aquifer balance, leading to seawater intrusion. Climate change worsens the situation by reducing recharge and increasing water demand. Effective coastal aquifer management under future climate scenarios is crucial.

Method

This study was defined and analyzed in five main steps:

Step 1: Study Area Assessment: The Sari-Neka aquifer in northern Iran, known for its agricultural potential, has also seen significant industrial growth. In recent years, planned developments have created challenges in meeting water demands for various uses.

Step 2: Development of a Numerical Groundwater Flow Model Using MODFLOW: A quantitative simulation of the aquifer was performed using the MODFLOW model under both steady-state and transient conditions.

Step 3: Groundwater Quality Modeling: Based on the concentration of quality parameters over different periods, qualitative simulation was conducted using the MT3DMS model. Considering the density difference between saline and fresh water, the three-dimensional SEAWAT model was used to simulate the impact of density on groundwater quality behavior.

Step 4: Climate Change Simulation and Its Effects on Saltwater Intrusion: Based on existing studies, a suitable climate model was selected. Downscaling was performed using data from the Sari synoptic station to analyze future trends in precipitation and temperature.

Step 5: Remedial Strategies and Effectiveness Evaluation: After developing the quantitative and qualitative models and assessing the impacts of climate change, remedial strategies were proposed and analyzed to control saltwater intrusion.

Simulation of groundwater

A conceptual model of the Sari-Neka aquifer was developed as the first step in quantitative groundwater simulation using MODFLOW in GMS v10. The model domain was discretized into 250×250 m grids with 5 vertical layers, and calibrated under steady and transient conditions from 2016 to 2020. Validation was done using groundwater level data from 2020–2021. For saltwater intrusion simulation, SEAWAT requires prior MODFLOW and MT3DMS models. The qualitative model focused on chloride concentration, with initial conditions based on field data and sea boundary values. Parameters such as hydraulic conductivity, porosity, and dispersion were adjusted during calibration.

Chloride was selected as the key parameter for groundwater quality simulation due to its relation to salinity changes in the coastal zone. The MT3DMS model was used for solute transport, and SEAWAT was applied to simulate density-driven saltwater intrusion. SEAWAT combines MODFLOW and MT3DMS to model 3D variable-density groundwater flow. The governing equation considers freshwater head, salinity, porosity, and fluid density. Based on field data, the average saline water density was 1013 kg/m³ with 33 kg/m³ salt concentration, resulting in a density–concentration slope of 0.39.

Climate change

Climate change significantly affects the hydrological cycle, impacting groundwater recharge and levels. Using IPSL-CM6A-LR and CNRM-CM6 climate models, temperature and precipitation were simulated for 1990–2015, then downscaled with the Delta Change Factor method. Adjusted climate data were projected for 2020–2040 to evaluate future impacts. These changes were incorporated into MODFLOW by updating recharge and boundary conditions. The groundwater table response was then assessed under different climate scenarios.

Results

Future Climate Assessment: Climate models IPSL-CM6A-LR and CNRM-CM6 project increased temperature and precipitation in the Sari-Neka region from 2021 to 2040 under three scenarios, potentially impacting the hydrological cycle.

Quantitative Groundwater Simulation: MODFLOW modeling of the aquifer's coastal outlet showed groundwater flow from south to north toward the sea, with good calibration accuracy (RMSE < 1m). Hydraulic conductivity and specific yield decrease toward the coastal area, where high permeability supports significant flow. **Qualitative Simulation and Saltwater Intrusion:** MT3DMS and SEAWAT simulations indicated chloride concentration increased notably in the aquifer center, with saltwater intrusion extending 660 m over 5 years due to heavy groundwater extraction.

Climate Change Effects on Groundwater: Simulations considering climate impacts predicted groundwater table declines of 0.57 m to 1.89 m, enhancing saltwater intrusion risks and salinity increases in the coastal zone. **Saltwater Intrusion under Climate Scenarios:** Saltwater intrusion length increased from 660 m (current) up to 820 m in the most severe climate scenario (SSP 5.8.5), threatening water quality and well usability. **Adaptation Strategies:** Reducing groundwater withdrawal by 5-30% and implementing artificial recharge (2-6.6 million m³/year) were evaluated. Results show that withdrawal reduction near the coastal outlet combined with recharge provides the greatest improvement in saltwater intrusion control, increasing the quality stability index up to 53.5%.

Conclusions

Saltwater intrusion has significantly increased in coastal areas due to intensified development and groundwater exploitation. This disrupts subsurface flow gradients, reducing and sometimes reversing hydraulic gradients, which enhances saltwater intrusion. This study investigated saltwater intrusion in the Sari-Neka coastal aquifer and climate change impacts through numerical modeling. Results showed groundwater level declines between 0.57 m and 1.89 m under various climate scenarios, with increased precipitation and temperature affecting recharge. Saltwater intrusion was simulated up to 660 m currently, extending to 710–820 m under future climate scenarios, threatening groundwater quality and usability. Eight adaptation strategies focused on reducing withdrawals and increasing recharge were evaluated, revealing that a 30% reduction in extraction at the aquifer outlet can reduce saltwater intrusion by up to 53%, highlighting the critical sensitivity of the coastal zone for management.

اثربخشی رویکردهای کنترل تهاجم آب شور در آبخوان ساحلی تحت شرایط تغییر اقلیم

محمد سلامی جعفری^۱، حمید کاردان مقدم^۲، احمد شرافتی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. ایمیل: Mohammadjafari1984@gmail.com

۲. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. ایمیل: h.kardan@wri.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. ایمیل: asharafati@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p>	<p>موضوع: در این مطالعه ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم در آبخوان ساحلی ساری - نکا با استفاده از شاخص پایداری کیفی آنالیز شد.</p>
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱</p>	<p>هدف: آنالیز و تدوین سیاست بهره‌برداری در آبخوان ساحلی به عنوان رویکرد علاج‌بخشی مورد بررسی قرار گرفت.</p> <p>روش تحقیق: شبیه‌سازی کمی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW و برای شبیه‌سازی اثر تهاجم آب شور در بخش خروجی آبخوان، شبیه‌سازی کمی و کیفی توأمان انجام گرفت. بر این اساس، مدل کیفی MT3DMS با شبیه‌سازی غلظت کلراید در سطح و مدل SEAWAT برای شبیه‌سازی غلظت در عمق آبخوان استفاده شد.</p> <p>یافته‌ها: نتایج به‌دست آمده نشان داد در وضعیت فعلی تهاجم آب شور به میزان ۶۶۰ متر وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی آبخوان با در نظر گرفتن ۳ سناریوی انتشار مشخص شد که در سناریوی SSP 126 میزان تهاجم ۷۱۰ متر، در سناریوی SSP 245 میزان تهاجم ۷۴۰ متر و در سناریوی SSP 585 میزان تهاجم ۸۲۰ متر برآورد شد. با توجه به افزایش تهاجم آب شور در آبخوان، ۸ راهکار سازگاری در قالب دو موضوع کاهش بهره‌برداری از آبخوان و افزایش تغذیه به آبخوان با توجه به نظرات متولیان و بهره‌برداران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد راهکارهای مربوط به بخش خروجی آبخوان به دلیل فاصله کم بیشترین تأثیرات را داشته و دو راهکار کاهش ۳۰ درصد برداشت از آبخوان در بخش خروجی و تغذیه مصنوعی در بخش خروجی نسبت به سایر راهکارها بیشترین تأثیر را دارد.</p>
<p>کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تهاجم آب شور، مدل SEAWAT، شاخص پایداری کیفی، آبخوان ساری - نکا.</p>	<p>نتیجه‌گیری: راهکار کاهش ۳۰ درصد برداشت در بخش خروجی آبخوان باعث بهبود ۵۳ درصد در شاخص پایداری کیفی می‌شود.</p>

استناد: سلامی جعفری، محمد؛ کاردان مقدم، حمید؛ شرافتی، احمد. اثربخشی رویکردهای کنترل تهاجم آب شور در آبخوان ساحلی تحت شرایط تغییر اقلیم. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲(۴)، ۹۶۴-۹۸۱.

<http://doi.org/10.22059/ije.2025.397627.1874>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © محمد سلامی جعفری، حمید کاردان مقدم، احمد شرافتی.



آب زیرزمینی ساحلی در شهرستان بالدوین، آلاباما را بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد توفان‌ها می‌توانند باعث پیشروی قابل توجه آب شور به داخل خشکی شوند و برداشت بیش از حد آب، این پیشروی را تشدید می‌کند (Gholizadeh et al., 2025). Armanuos و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از مدل‌های MODFLOW و SEAWAT، تأثیر برداشت آب و تهاجم آب شور در سفره آب زیرزمینی مغره را شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد افزایش نرخ برداشت آب باعث پیشروی بیشتر آب شور به داخل خشکی می‌شود. همچنین، استفاده از روش‌های مقابله‌ای مانند تزریق مجدد آب شیرین و برداشت آب شور می‌تواند تأثیرات منفی را کاهش دهد (Armanuos et al., 2025). نتایج مطالعات مختلف نشان داد رویکردهای افزایش تغذیه آبخوان و کاهش برداشت در نوار ساحلی می‌تواند در مدیریت تهاجم آب شور تأثیرگذار باشد. یکی از چالش‌های نواحی ساحلی بحث تهاجم آب شور در این مناطق است که باعث تخریب محیط زیست و شور شدن چاه‌های این منطقه شده است. این چالش با توجه به اضافه‌برداشت و تنش‌های اقلیمی تشدید شده که لزوم ارزیابی مبتنی بر ابعاد مختلف برای راهبردهای آبی بسیار حساس و حائز اهمیت است. بر این اساس، در این مطالعه با نگاه چندوجهی چالش تهاجم آب شور در آبخوان ساری - نکا به عنوان یک قطب کشاورزی - اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات مختلف لزوم بررسی چندگانه را نشان داده که در این مطالعه اثربخشی راهکارهای مدیریتی با استفاده از مدل‌سازی عددی در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

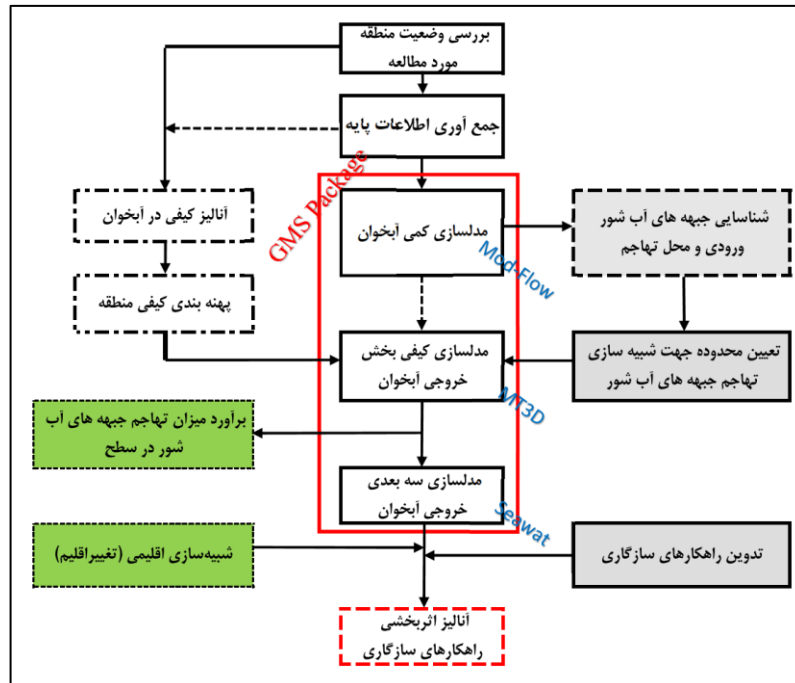
این پژوهش در ۵ گام تعریف و مورد بررسی قرار گرفت.

گام اول: بررسی منطقه مورد مطالعه: آبخوان ساری - نکا در شمال کشور علاوه بر قابلیت مناسب در کشاورزی، مصارف صنعتی نیز در این منطقه رشد زیادی را داشته و در سال‌های اخیر با توسعه‌های برنامه‌ریزی شده چالش تأمین آب برای مصارف مختلف وجود دارد.

گام دوم) تهیه مدل عددی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW: شبیه‌سازی عددی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW به صورت کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام می‌گیرد.

گام سوم) مدل‌سازی کیفی آبخوان: با توجه به غلظت پارامترهای کیفی در دوره‌های مختلف، شبیه‌سازی کیفی در سطح آبخوان با استفاده از مدل MT3DMS و با توجه به تغییر چگالی آب شور نسبت به آب شیرین، از مدل سه‌بعدی SEAWAT برای شبیه‌سازی اثر چگالی بر رفتار کیفی آبخوان استفاده می‌شود.

گام چهارم) شبیه‌سازی تغییر اقلیم و اثرات آن در تهاجم آب شور: با توجه به مطالعات انجام‌شده، مدل منتخب برای شبیه‌سازی اقلیمی انتخاب و براساس ایستگاه سینوپتیک ساری، ریزمقیاس‌نمایی برای تحلیل آینده بارش و دما در این منطقه انجام می‌گیرد. گام پنجم) ارائه راهکارهای علاج‌بخشی و بررسی اثربخشی: پس از تهیه مدل کمی و کیفی آبخوان و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر آن، راهکارهای علاج‌بخشی به منظور کنترل تهاجم آب شور مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل ۱. روندنمای انجام تحقیق

محدوده مطالعاتی ساری - نکا به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این محدوده بین طول‌های جغرافیایی $52^{\circ} 33'$ تا $44^{\circ} 54'$ شرقی و $35^{\circ} 56'$ تا $36^{\circ} 52'$ شمالی در جنوب محدوده بهشهر - بندرگز قرار دارد. مساحت آن حدود $6946/4$ کیلومتر مربع است که $1068/6$ کیلومتر آن دشت و بقیه ($5877/8$ کیلومتر مربع) شامل ارتفاعات است. سه رودخانه اصلی تجن، نکارود (شرق)، سیاهرود (غرب) آبخوان ساحلی تجن را تغذیه می‌کند. رودخانه تجن از بخش میانی این دشت عبور می‌کند که در نواحی جنوبی دشت را تغذیه کرده و در بخش‌های شمالی نقش زهکش دشت را ایفا می‌کند. در دشت ساری - نکا خطوط تراز آب زیرزمینی با راستای تقریباً شرقی - غربی بوده و رقوم آن‌ها از 35 متر در مخروط‌افکنه تجن و 25 متر در مخروط‌افکنه نکا تا 25 - متر در اراضی غربی واقع در پایاب دشت متغیر است. در دشت ساری - نکا منحنی‌های هم قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی با راستای شرقی - غربی است و رقوم آن‌ها بین 100 تا 2000 متر مربع در روز متغیر بوده و بیشینه قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی مربوط به اراضی مخروط‌افکنه‌ای رودخانه تجن واقع در غرب است. به طور کلی، میزان قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی در نیمه جنوبی و اراضی مخروط‌افکنه‌ای دشت بیشتر از نیمه شمالی و اراضی ساحلی دشت است.

شبیه‌سازی کمی آب زیرزمینی

اولین گام برای شبیه‌سازی مدل آب زیرزمینی، تهیه مدل مفهومی آبخوان است. تهیه مدل مفهومی مستلزم تلفیق دقیق داده‌ها، اطلاعات و گزارش‌های مربوط به آبخوان و جریان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است (Kardan Moghaddam et al., 2021). به این منظور، ابتدا محدوده مطالعاتی با توجه به پارامترهای بیلان در قالب یک مدل مفهومی تحلیل می‌شود. در این مدل، شرایط مرزی مبتنی بر جبهه‌های ورودی و خروجی زیرزمینی، شرایط اولیه تعریف می‌شود. منحنی‌های تراز آب زیرزمینی بیانگر محدوده‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی است که از تحلیل این منحنی‌ها، جبهه‌های ورودی و خروجی تعیین می‌شود. از طرف دیگر، با انتخاب گام زمانی ماهانه برای شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن مهر 1395 به عنوان گام زمانی شروع، شبیه‌سازی در حالت ماندگار و برای 48 ماه برای حالت ناماندگار تعریف شد. با استفاده از مدل MODFLOW در محیط نرم‌افزاری GMS v10 شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان انجام گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص شبیه‌سازی تهاجم آب شور، بخش خروجی آبخوان ساری - نکا برای شبیه‌سازی سه بعدی با توجه به مطالعات Nasiri و همکاران (2021) انتخاب و شبیه‌سازی

کمی برای این منطقه انجام گرفت (Nasiri et al., 2021). در بخش خروجی آبخوان (نوار ساحلی) بعد سوم در عمق آبخوان با توجه به ضخامت آبخوان در ۵ لایه طراحی شد. تعداد ۵ لایه با توجه به لوگ‌های حفاری موجود در نظر گرفته شد که بر این اساس شبکه‌بندی مدل با ابعاد 250×250 متری در سطح و $2/5$ متری در عمق تعریف شد (Perdikaki et al., 2024a). واسنجی مدل مبتنی بر حداقل اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. مدل واسنجی شده با استفاده از اطلاعات در دسترس از مهر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰ برای تراز آب زیرزمینی صحت‌سنجی شد. برای شبیه‌سازی نفوذ آب شور توسط پکیج SEAWAT، لازم است ابتدا مدل کمی (MODFLOW) و مدل کیفی (MT3DMS) آبخوان تهیه شود. از این‌رو، دوره مدل‌سازی کمی و کیفی از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ به مدت پنج سال در نظر گرفته شد. بسته‌های در نظر گرفته شده در کد MODFLOW شامل جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی و خروجی از نوع GHB، تغذیه از سطح آبخوان شامل جریان‌های برگشتی (براساس گزارش‌های بیلان آبخوان) و نفوذ از بارش و رواناب و تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری است که مقادیر کمی آن براساس بیلان منابع و مصارف آب در این منطقه که در گزارش‌های وزارت نیرو منتشر شده است استفاده شد.

شبیه‌سازی کیفی آبخوان

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در مدل کیفی، شامل توزیع غلظت اولیه در قسمت مرزی آبخوان بوده که غلظت در ماه‌های مختلف تغییر کرده و مرز مشترک بین آبخوان و دریا در بخش شمالی است که اندرکنش غلظت بین آبخوان و دریا است. در این مطالعه، فرایند مدل‌سازی کیفی براساس تغییرات پارامتر کیفی کلراید انجام شد. بر اساس طبقه‌بندی مطالعات کیفیت آب، مقادیر کلراید در آب دریای اطراف ۱۰ هزار میلی‌گرم در لیتر تخمین زده می‌شود (Phillips et al., 2012). همچنین، مقادیر غلظت اولیه با استفاده از مقادیر غلظت کلراید خوانده شده در چاه‌های مشاهده کیفیت در ابتدای شبیه‌سازی (مهر ۱۳۹۵) به مدل اعمال شد. پراکندگی عرضی ($TH\alpha$) و پراکندگی طولی ($TV\alpha$) به ترتیب $0/1$ و $0/01$ در امتداد محور عمودی با توجه به مطالعات Lyu و همکاران در نظر گرفته شده است (Lyu et al., 2024). در ابتدای شبیه‌سازی، مقدار تخلخل $0/3$ است و ضریب انتشار مولکولی روی ۱ تنظیم می‌شود. این مقادیر طی فرایند کالیبراسیون تصحیح می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای ورودی به مدل

واحد	مقدار	پارامترهای مدل - Parameters
Kg/m ³	35	غلظت نمک دریا - Concentration of Salt in sea (Cs)
m ² /s	10 ⁻⁹	ضریب پخش مولکولی مؤثر - Effective molecular diffusion coefficient (D _m)
--	0.3	تخلخل - Prosimy
m ² /s	9.8	گرانش زمین - Gravitational acceleration (g)
Kg/m ³	1013	چگالی آب شور دریا - Density of sea water (ρ)
Kg/m ³	1000	چگالی آب شیرین - Density of fresh water (ρ)
Kg/m.s	0.001	ویسکوزیته - Viscosity μ
M	0.1	نرخ زمان انتقال ذرات - TRPT
M	0.01	نرخ زمان انتقال ذرات فرار - TRPV
M	22-50	ضریب پخشیدگی طولی - Longitudinal dispersion α _L

شبیه‌سازی نهاجم آب شور

به منظور شبیه‌سازی کیفی آبخوان پارامتر کلراید با توجه به در دسترس بودن داده‌ها و ارتباط با تغییرات شوری در نوار ساحلی انتخاب شد. برای بررسی تغییرات کیفی در سطح از مدل کیفی MT3DMS و برای شبیه‌سازی تغییرات ناشی از چگالی آب شور از مدل SEAWAT استفاده شد. این مدل عددی یک کد محاسباتی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی سه‌بعدی تغییر چگالی در

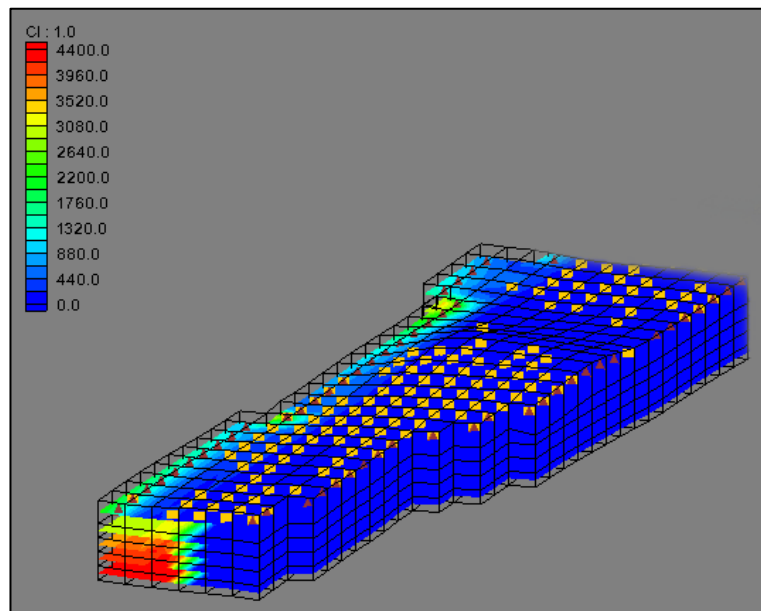
جریان آب زیرزمینی است که با توجه به تغییر غلظت و حرارت شبیه‌سازی را انجام می‌دهد. این برنامه برای شبیه‌سازی انتقال آب شور در سفره‌های آب زیرزمینی و ورود آب شور به آبخوان‌های ساحلی به کار برده می‌شود. این مدل شبیه‌سازی را براساس فشار استاتیک آب شیرین، ارتفاع، شتاب گرانشی و غیره مطابق رابطه شبیه‌سازی می‌کند. SEAWAT با ترکیب دو جریان آب زیرزمینی (MODFLOW) و انتقال املاح (MT3DMS) رایج توسعه داده شده است. معادله حاکم برای جریان آب زیرزمینی وابسته به چگالی بر حسب هد آب شیرین، که توسط MODFLOW در کد SEAWAT حل شده، توسط گوو و لانگوین^۱ (۲۰۰۲) به شرح زیر استخراج شده است (رابطه ۱).

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left\{ \rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \right\} = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{\rho} q_s \quad (1)$$

که در آن α ، β و γ محورهای مختصات عمود بر هم در جهت‌های اصلی نفوذپذیری، $K_{f\alpha}$ ، $K_{f\beta}$ و $K_{f\gamma}$ هدایت هیدرولیکی در سه جهت اصلی (m/s)، چگالی سیال ρ (kg/m^3)، چگالی آب شیرین ρ_f (kg/m^3)، هد آب شیرین (m)، ارتفاع بالای مرکز سلول مدل (m)، S_f ضریب ذخیره (1/m)، θ تخلخل مؤثر (بدون بعد)، C غلظت املاح (kg/m^3)، چگالی آب ورودی از منبع تغذیه یا خروجی از طریق منبع تخلیه (kg/m^3) q_s نرخ حجمی جریان بر واحد حجم با توجه به تغذیه و تخلیه آب در واحد زمان (1/s) و t زمان (s) است.

با توجه به مطالعات انجام‌شده و اندازه‌گیری به‌عمل‌آمده، متوسط چگالی آب شور در بخش خروجی آبخوان ۱۰۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان غلظت نمک ۳۳ کیلوگرم در هر مترمکعب مشخص شده است. بر این اساس، مقدار تغییرات شیب چگالی نسبت به غلظت که به عنوان پارامتر زیر معرفی می‌شود براساس رابطه ۲ به دست آمد.

$$\text{Density/concentration . slop(DRHODG)}: \frac{1013(\text{kg/m}^3) - 1000(\text{kg/m}^3)}{33(\text{kg/m}^3) - 0(\text{kg/m}^3)} = 0.39 \quad (2)$$



شکل ۲. مدل مفهومی سه‌بعدی بخش خروجی آبخوان

بررسی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی

تغییرات اقلیمی بر وضعیت چرخه هیدرولوژیکی تأثیرگذار بوده و در ارزیابی منابع آب بی‌شک نقش مهمی را خواهد داشت. بارش به عنوان مهم‌ترین عامل در چرخه هیدرولوژیکی بر میزان تغذیه آبخوان اثرگذار است و واکنش آبخوان‌های آبرفتی به تغییرات

اقلیمی سبب تغییر در تراز آب زیرزمینی می‌شود (Zektser & Loaiciga, 1993). سناریوهای اقلیمی در قالب مدل‌های مختلف مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. با توجه به مطالعات انصاری و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی و اولویت‌بندی مدل‌های اقلیمی در حوضه‌های آبریز کشور و انتخاب مدل‌های منتخب، از مدل IPSL-CM6A-LR به منظور شبیه‌سازی دما و از مدل CNRM-CM6 برای شبیه‌سازی بارش استفاده شد (Ansari et al., 2022). مدل CNRM-CM6 توسط مرکز ملی تحقیقات جوی فرانسه (CNRM) توسعه داده شده و در پیش‌بینی تغییرات جوی، هیدرولوژیکی و اقلیمی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای کاربرد دارد. این مدل شامل فرایندهای جوی، اقیانوسی، یخچالی و بیوژئوشیمیایی است که برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی بلندمدت (برای مثال، قرن‌ها) استفاده می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل، پیش‌بینی تغییرات دما، بارش و وضعیت پوشش یخ‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای کاربرد دارد. مدل IPSL-CM6A-LR یکی دیگر از مدل‌های پیشرفته تغییرات اقلیمی است که توسط Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) توسعه داده شده است. این مدل شبیه‌سازی اقلیمی جامع است که شامل فرایندهای جوی، اقیانوسی، چرخه کربن و زیست‌شناسی اقیانوسی است و برای مطالعه تغییرات در پارامترهای اقلیمی همچون دما، بارش و پوشش یخ‌ها به کار می‌رود و می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری در مورد تغییرات اقلیمی فراهم کند.

به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، شبیه‌سازی دوره پایه برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ انجام می‌شود و نتایج براساس شاخص‌های آماری مورد سنجش قرار می‌گیرد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده می‌شود. در این روش برای پارامتر حداکثر و حداقل دما، تغییر براساس تفاضل و برای بارش براساس نسبت داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو استفاده شد. این روش ابتدا در دوره پایه ارزیابی و پس از تأیید برای دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبه عامل تغییر، برای دما عامل تغییر به مقدار دمای دوره پایه اضافه شده و برای بارش عامل تغییر در مقدار بارش دوره پایه ضرب می‌شود تا مقادیر تصحیح‌شده دما و بارش برای دوره پیش‌بینی به دست آید. نحوه محاسبه به صورت روابط ۳ و ۴ ارائه شده است.

$$T_0^f = T_0 + (\mu_m^f - \mu_m^c) \quad (3)$$

$$P_0^f = P_0 * \frac{\mu_m^f}{\mu_m^c} \quad (4)$$

در این روابط T دما برحسب درجه سانتی‌گراد، P مقدار بارش برحسب میلی‌متر، f دوره آینده، c دوره پایه، m داده‌های مدل و 0 داده‌های مشاهداتی است. تغییرات اقلیمی موجب تغییر در وضعیت تغذیه آبخوان شده و تأثیرات آن در مدل مفهومی آبخوان برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم باید بررسی شود. به همین دلیل، ابتدا اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای ورودی به مدل آب زیرزمینی را ارزیابی کرده و سپس مقادیر جدید برای لایه‌های River، General Head و Recharge را وارد مدل MODFLOW می‌کنیم (Dubois et al., 2022). تغذیه آبخوان تحت تأثیر جبهه‌های ورودی زیرزمینی در بخش جنوبی و آب نفوذیافته از رواناب و آب برگشتی است که در قالب Recharge در مدل تعریف شده است. پس از اعمال مقادیر جدید این لایه‌ها با توجه به تغییر اقلیم تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف، مدل را Run کرده و در نهایت وضعیت تراز آب زیرزمینی آبخوان در شرایط مختلف ارزیابی می‌شود.

نتایج و بحث

ارزیابی شرایط آتی تحت تغییر اقلیم

با توجه به استفاده از مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR برای شبیه‌سازی دما و مدل CNRM-CM6 به منظور شبیه‌سازی بارش، میزان تغییرات بارش و دما برای دوره آینده ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ در سه سناریوی اقلیمی به صورت جدول‌های ۲ و ۳ شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی شده است.

جدول ۲. مقادیر متوسط ماهانه بارش تحت سناریوهای مختلف مدل CNRM-CM6 برای دوره آینده - mm

Model	Scenarios	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Annual
CNRM-CM6	SSP 1.2.6	79.4	72.4	95.6	42.5	31.2	30.1	26.8	36.1	72.1	110.8	123.4	90.2	810.6
	SSP 2.4.5	75.1	68.8	92.4	46.8	34.8	30.6	25.2	35.2	70.2	108.3	119.7	88.1	795.2
	SSP 5.8.5	73.2	64.1	91.2	49.7	37.2	31.2	24.5	34.4	69.9	106.9	116.6	84.3	783.2
Base (2000-2019)		71.8	67.5	82.9	47.1	29	26.5	26.2	33.8	64.6	107.8	114	79.9	751.1

جدول ۳. مقادیر متوسط ماهانه تحت سناریوهای مختلف مدل IPSL-CM6A-LR برای دوره آینده - °C

Model	Scenarios	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Annual
IPSL-CM6A-LR	SSP 1.2.6	3.9	4.6	7.3	10.9	16.6	20.7	23.9	23.7	20.9	15.8	10	6	13.7
	SSP 2.4.5	4	4.8	7.4	11	16.7	20.8	24.1	23.8	21	15.9	10.1	6.1	13.8
	SSP 5.8.5	4.2	4.9	7.5	11.2	16.8	20.9	24.3	23.9	21.1	16.1	10.2	6.2	13.9
Base (2000-2019)		3.7	4.5	7.5	11.2	16.7	20.9	23.3	23.5	20.9	15.6	9.5	5.4	13.55

نتایج به دست آمده از شبیه سازی بارش در دوره های آتی نشان می دهد میزان بارش در این منطقه افزایش داشته و در خوشبینانه ترین حالت میزان بارش به ۸۱۰/۶ میلی متر و در بدبینانه ترین سناریو به ۷۸۳/۲ میلی متر می رسد. تغییرات بارش در سناریوهای مختلف بیانگر افزایش میزان بارش در این منطقه است که بی شک می تواند بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه تأثیرگذار باشد. تحلیل وضعیت مقادیر متوسط دما در دوره های آتی نشان می دهد میزان دما در هر سه سناریو افزایش دارد. این موضوع با توجه به میزان افزایش بارش از این منظر حائز اهمیت است که افزایش دما رابطه مستقیم با افزایش رطوبت در این منطقه داشته و سبب تشدید میزان بارش در این محدوده می شود. بررسی های نشان می دهد بین ۳ تا ۷ درصد میزان بارش با توجه به افزایش یک درصدی دما رشد خواهد داشت.

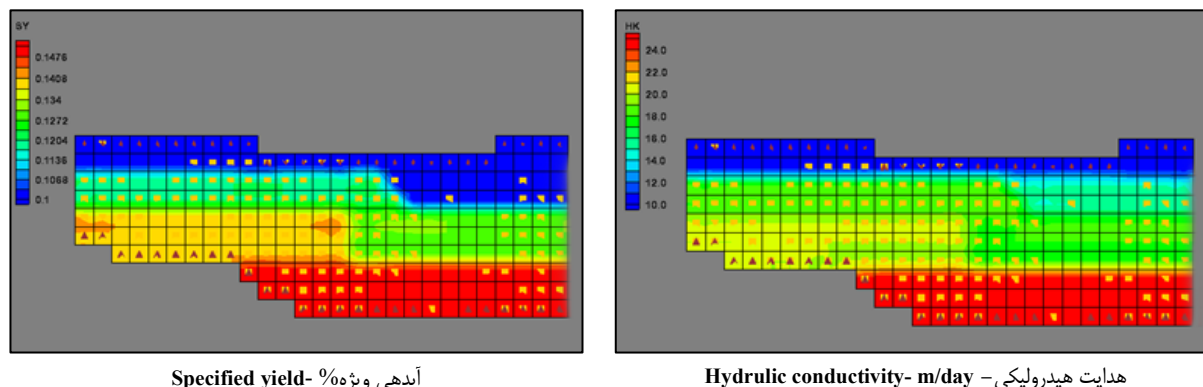
ارزیابی نتایج مدل سازی کمی نوار ساحلی

شبیه سازی بخش خروجی آبخوان ساری - نکا برای بررسی اثر تهاجم آب شور با استفاده از مدل MODFLOW انجام گرفت. مطابق مدل کل آبخوان ساری - نکا، ارزیابی و شناسایی عوامل حساس در شبیه سازی کمی آبخوان انجام شد. ارزیابی مدل براساس معیارهای آماری خطا بین تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده و مشاهداتی مطابق جدول ۴ به دست آمد. نتایج به دست آمده از معیار ارزیابی خطای شبیه سازی کمی آبخوان بیانگر دقت مناسب بوده و میانگین مجذور خطا در سه حالت مدل ماندگار، غیرماندگار و دوره صحت سنجی کمتر از یک متر به دست آمد.

جدول ۴. میزان خطای مدل کمی - متر

شاخص خطا Error index	مدل ماندگار Steady model	مدل غیرماندگار Un steady model	مدل صحت سنجی Verification model
Mean Error - میانگین خطا	0.37	0.56	0.71
Abs M Error - میانگین مطلق خطا	0.45	0.65	0.8
RMSE - میانگین مربعات خطا	0.61	0.72	0.85

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد جریان آب زیرزمینی از بخش جنوبی به طرف شمال و دریا در حرکت است و بیشترین حجم جریان زیرزمینی ورودی در بخش مرکزی این منطقه قرار دارد. پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان دو پارامتر حائز اهمیت در واسنجی مدل در حالت کمی هستند که با روش سعی و خطا انجام می‌شوند. نتایج به دست آمده در شکل ۳ برای این دو پارامتر ارائه شده است.



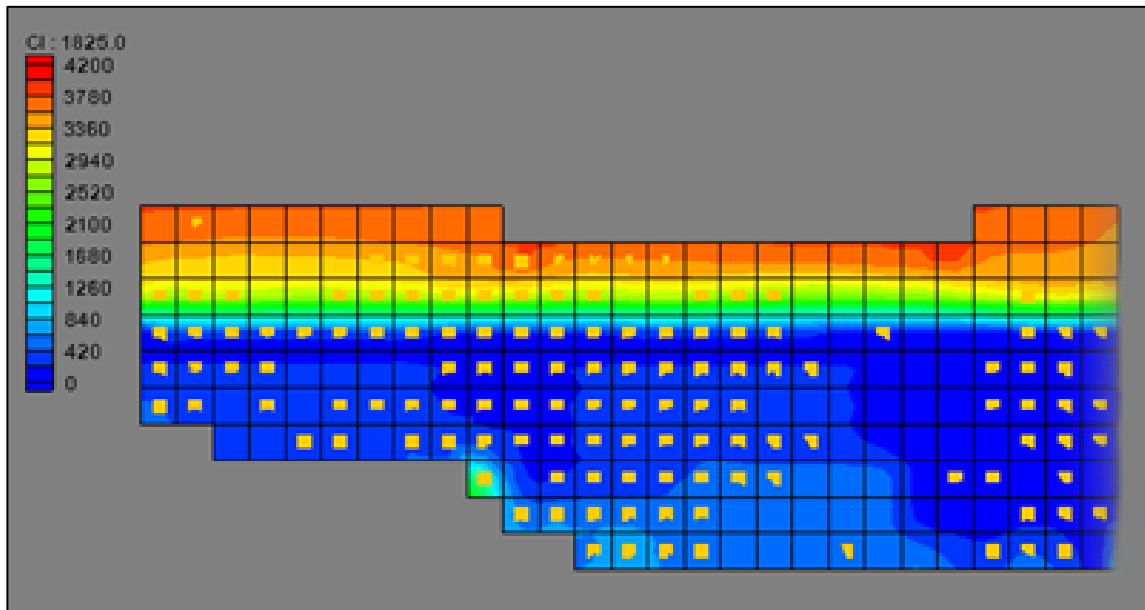
شکل ۳. پارامترهای هیدرودینامیکی واسنجی شده در بخش خروجی آبخوان ساری - نکا

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد همبستگی بین هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در بخش خروجی آبخوان برقرار بوده و در جهت جریان میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کاهش داشته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد حداقل مقدار هدایت هیدرولیکی که ۱۰ متر در روز است در بخش ساحلی قرار داشته و این مقدار در بخش خروجی با توجه به مقدار عددی بالا، امکان انتقال و سرعت جریان را بالا می‌برد. همچنین، نتایج ضریب آبدهی ویژه آبخوان نیز بیانگر این موضوع است که حداقل مقدار ۱۰ درصد بوده که مقدار بالایی است و این موضوع پتانسیل بالای این منطقه برای بهره‌برداری و تعریف راهکارهای علاج بخشی تهاجم آب شور از طرف دریا را میسر می‌کند.

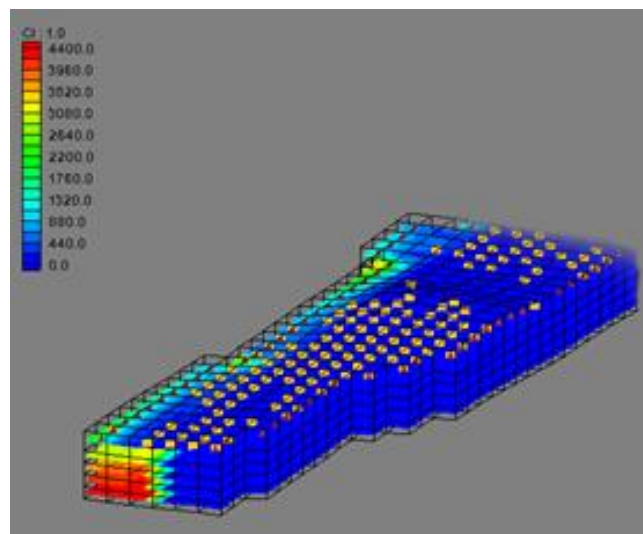
نتایج شبیه‌سازی کیفی و تهاجم آب شور

پس از ارزیابی مدل کمی که شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در بخش خروجی آبخوان ساری - نکا، شبیه‌سازی کیفی در لایه‌های سطحی با استفاده از مدل MT3DMS با در نظر گرفتن غلظت کلراید انجام گرفت. شبیه‌سازی مدل کیفی با در نظر داشتن ۳ جبهه ورود کلراید انجام گرفت. کلراید ورودی از طریق جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به آبخوان، تغذیه ناشی از آب برگشتی از سطح آبخوان و آب زیرزمینی ورودی از طرف دریا به آبخوان مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در نهایت شبیه‌سازی مدل انتقال املاح MT3DMS براساس تغییرات غلظت پارامتر کلراید انجام گرفت. واسنجی در مدل کیفی با روش سعی و خطا انجام و پارامتر ضریب پخشیدگی طولی آنالیز و واسنجی شد. واسنجی ضریب پخشیدگی طولی با توجه به عدم داشتن داده‌های مربوط به انتقال آلودگی براساس میزان هدایت هیدرولیکی و نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه، شیب بخش خروجی آبخوان، کاربری اراضی و استفاده از نمونه‌برداری‌های کیفی انجام گرفت. شکل ۴ بیانگر تغییرات غلظت کلراید در سطح آبخوان در انتهای دوره شبیه‌سازی است. نتایج پس از یک دوره ۵ ساله شبیه‌سازی در بخش خروجی آبخوان نشان داد میزان غلظت کلراید در بخش مرکزی نسبت به سایر بخش‌ها افزایش بیشتری داشته است. بخش مرکزی آبخوان تا فاصله بیش از یک کیلومتری تحت تأثیر تهاجم آب شور دریا قرار گرفته و غلظت کلراید به بیش از ۴ هزار میلی‌گرم در لیتر رسیده است. بررسی شبکه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در بخش مرکزی نسبت به سایر بخش‌ها حجم بالاتری دارد. همین موضوع مهم‌ترین دلیل بر افزایش تهاجم آب شور در آن ناحیه است. پس از شبیه‌سازی تغییرات غلظت کلراید در سطح آبخوان با استفاده از مدل MT3DMS، میزان تهاجم آب شور با استفاده از مدل SEAWAT انجام گرفت. در این مدل با معرفی پارامترهای پکیج VDF در مدل، غلظت اولیه کلراید در آبخوان، غلظت نمک در آب شور و چگالی آب شور و شیرین به عنوان

شرایط اولیه و مرزی انجام گرفت. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی در عمق آبخوان و هجوم آب شور در لایه‌های عمقی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی غلظت کلراید با استفاده از مدل MT3DMS - میلی‌گرم بر لیتر



شکل ۵. شبیه‌سازی مدل کیفی Seawat در بخش خروجی آبخوان - غلظت میلی‌گرم در لیتر

نتایج شبیه‌سازی در عمق آبخوان نشان داد تهاجم آب شور به میزان ۶۶۰ متر طی ۵ سال (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷) انجام گرفته است. این تهاجم بیشتر تحت تأثیر بهره‌برداری از آب زیرزمینی و کاهش گرادیان هیدرولیکی اتفاق افتاده است.

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت کمی آبخوان

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی کمی آبخوان و تغییرات بارش و دما در آبخوان ساری - نکا، شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثرات این موارد در جبهه‌های آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان اعمال و شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به خروجی مدل MODFLOW برای هر مدل و سناریو، تراز آب زیرزمینی در دوره آبی به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده هیدروگراف آبخوان مطابق جدول ۵ محاسبه شد.

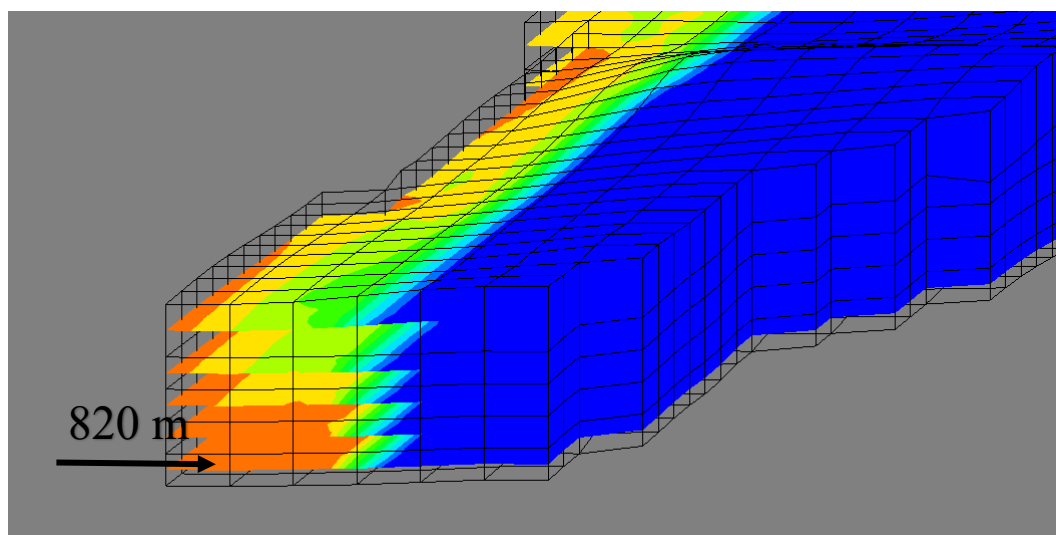
جدول ۵. متوسط ماهانه تراز آب زیرزمینی (متر) در دوره آینده (۲۰۲۱ - ۲۰۴۰)

Scenarios	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
SSP 1.2.6	-7.34	-7.35	-7.36	-7.34	-7.32	-7.3	-7.28	-7.27	-7.27	-7.25	-7.22	-7.24
SSP 2.4.5	-7.38	-7.39	-7.41	-7.4	-7.38	-7.35	-7.31	-7.32	-7.3	-7.27	-7.24	-7.29
SSP 5.8.5	-7.42	-7.44	-7.46	-7.45	-7.42	-7.4	-7.4	-7.41	-7.4	-7.35	-7.34	-7.37
Base period	-7.28	-7.29	-7.31	-7.3	-7.27	-7.24	-7.23	-7.22	-7.22	-7.21	-7.19	-7.21

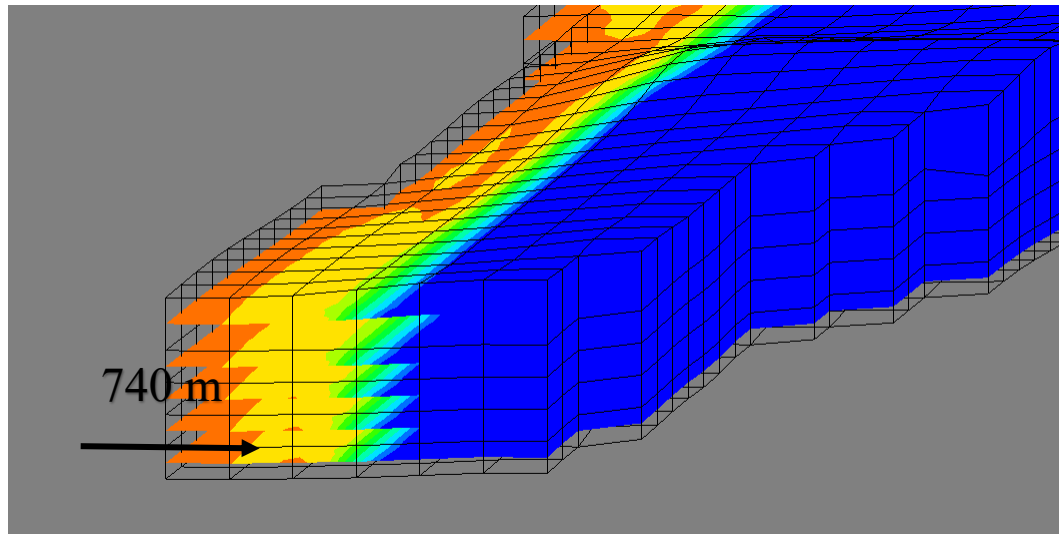
تغییرات تراز آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی دارای افت محسوسی بوده و میزان افت در سناریوی SSP 1-2.6 برابر ۵۷ سانتی‌متر، در سناریوی SSP 2-4.5 برابر با ۱۰۷ سانتی‌متر و در سناریوی SSP 5-8.5 برابر با ۱۸۹ سانتی‌متر برآورد شده است. این تغییرات و کاهش تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساری نکار بی‌شک در بخش خروجی تأثیر بیشتری را داشته و اثرات کمی در این بخش بر نوع و حجم جبهه‌های خروجی تأثیرگذار است. کاهش تراز آب زیرزمینی سبب کاهش شیب هیدرولیکی و تهاجم آب شور در این ناحیه خواهد شد که میزان غلظت املاح افزایش خواهد داشت.

ارزیابی میزان تهاجم آب شور در شرایط تغییر اقلیم

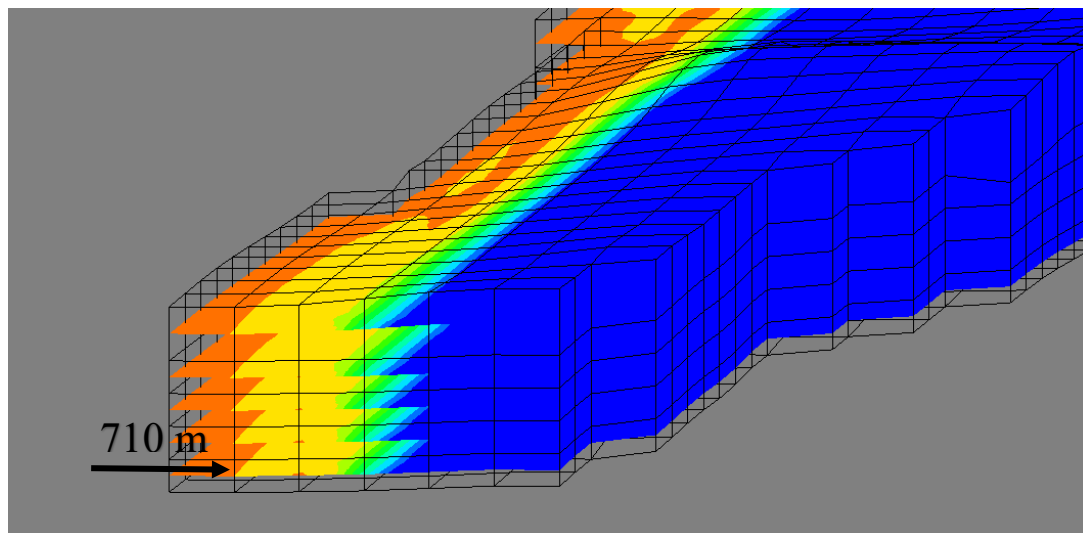
با توجه به کاهش تراز آب زیرزمینی بر اثر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، شبیه‌سازی میزان تهاجم آب از طرف دریا با استفاده از مدل SEAWAT انجام گرفت. نتایج ارائه شده برای توزیع افزایش غلظت کلراید در سه سناریوی اقلیمی مطابق شکل ۷ شبیه‌سازی شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی تهاجم آب شور در بخش خروجی آبخوان نشان می‌دهد بیشترین میزان تهاجم آب شور در سناریوی SSP 5-8.5 برآورد شده است. نتایج اولیه شبیه‌سازی نشان داد تهاجم آب شور ۶۶۰ متر شبیه‌سازی شده که این فاصله طولی در سناریوی SSP 1-2.6 برابر با ۷۱۰ متر، سناریوی SSP 2-4.5 برابر با ۷۴۰ متر و در سناریوی SSP 5-8.5 برابر با ۸۲۰ متر است. این افزایش غلظت در بخش خروجی بی‌شک بر نوع بهره‌برداری و شور شدن چاه‌ها تأثیرگذار است. لذا برنامه‌ریزی و تدوین رویکردهایی برای کنترل تهاجم آب شور در بخش خروجی حائز اهمیت است.



سناریوی SSP 585



سناریوی SSP 245



سناریوی SSP 126

شکل ۶. اثر سناریوهای اقلیمی در تغییرات تهاجم آب شور در آبخوان ساری - نکا

ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم در آبخوان ساری - نکا

با توجه به نتایج به دست آمده از میزان تهاجم آب شور مشخص شد که بخش خروجی آبخوان تحت تأثیر جبهه‌های آب شور قرار داشته و میزان املاح در نوار ساحلی آبخوان افزایش داشته است. این افزایش غلظت بی‌شک بهره‌برداری در نوار ساحلی و با توجه به تمرکز جمعیت و چاه‌های بهره‌برداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به این منظور ۲ رویکرد کاهش بهره‌برداری در سطوح ۵، ۱۰، ۱۵ درصد در کل آبخوان (سناریوی S1، S2 و S3) و ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در بخش خروجی آبخوان (S4، S5 و S6) مورد آنالیز قرار گرفت. از طرفی نیز تغذیه مصنوعی با توجه به افزایش حجم تغذیه آبخوان نیز می‌تواند در کنترل تهاجم آب شور تأثیرگذار باشد. تعریف این راهکارها مبتنی بر شرایط منطقه با توجه به محدودیت کمی و کیفی در منابع آب مطابق با طرح تعادل بخشی تعریف شده است. بر این اساس، در محدوده بخش خروجی آبخوان نیز متناسب با بیلان آبخوان، حجم ۲ میلیون مترمکعب از آورد رودخانه که به دریا وارد می‌شود به عنوان حجم تغذیه مصنوعی در نظر گرفته می‌شود (سناریوی S7). از طرفی نیز با توجه به گزارش بیلان منطقه و گزارش طرح تغذیه مصنوعی دشت ساری - نکا، میزان اثرگذاری تغذیه مصنوعی بر تراز آب زیرزمینی آبخوان برابر حجم ۶/۶ میلیون مترمکعب در سال در قسمت‌های ابتدای ورودی آبخوان و بخش‌های میانی آبخوان ساری - نکا

در نظر گرفته شد. با افزایش تغذیه آبخوان در مدل مفهومی، میزان اثرگذاری این راهکار در مدل تحت اعمال سناریوهای تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت (سناریوی S8). به منظور ارزیابی نتایج ۸ راهکار علاج بخشی از شاخص پایداری کیفی که توسط Beheshti و همکاران (۲۰۲۲) ارائه شد استفاده می‌شود. مبنای اصلی این شاخص بر اساس میزان طول تهاجم آب شور تعریف می‌شود. شاخص به صورت رابطه ۵ به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\alpha_L = 100 * \left(\frac{L_{Int} - L_{qs}}{L_{Int}} \right) \quad (5)$$

در این رابطه L_{qs} میزان تهاجم آب شور پس از اعمال سناریو (متر/کیلومتر) و L_{Int} میزان تهاجم آب شور در شرایط اولیه (بدون اعمال سناریو) در آبخوان (متر/کیلومتر) و α_L شاخص پایداری کیفی تهاجم آب شور (%) است. رنج تغییرات این شاخص بین +۱ تا $-\infty$ است. هر چه میزان این شاخص به +۱ نزدیک‌تر باشد، وضعیت کیفی آبخوان از نظر هجوم آب شور بهبود یافته و موجب پسروری آب شور می‌شود. و پسروری آب شور باعث کاهش این شاخص می‌شود. طول تهاجم آب شور در شرایط اولیه و پس از اعمال سناریوها براساس نتایج شبیه‌سازی مدل SEAWAT به دست می‌آید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مطابق جدول ۶ میزان پسروری آب دریا و شاخص پایداری کیفی محاسبه شده است.

جدول ۶. شاخص‌های پایداری کیفی آبخوان و میزان پسروری آب شور

Scenarios						Strategy
SSP 5.8.5		SSP 2.4.5		SSP 1.2.6		
Quality index	Decrease-m	Quality index	Decrease-m	Quality index	Decrease-m	
3.7	30	5.4	40	7.0	50	کاهش برداشت ۵٪ از آبخوان - S1
11.6	95	14.2	105	16.9	120	کاهش برداشت ۱۰٪ از آبخوان - S2
22.0	180	25.7	190	29.6	210	کاهش برداشت ۱۵٪ از آبخوان - S3
12.8	105	16.2	120	19.7	140	کاهش برداشت ۱۰٪ در بخش خروجی آبخوان - S4
25.6	210	31.1	230	36.6	260	کاهش برداشت ۲۰٪ در بخش خروجی آبخوان - S5
36.6	300	44.6	330	53.5	380	کاهش برداشت ۳۰٪ در بخش خروجی آبخوان - S6
25.6	210	32.4	240	38.0	270	تغذیه مصنوعی در بخش خروجی - S7
7.3	60	9.5	70	12.7	90	تغذیه مصنوعی آبخوان - S8

بررسی نتایج ۸ راهکار سازگاری با تغییر اقلیم برای کنترل تهاجم آب شور از طرف دریا در آبخوان ساری - نکا نشان می‌دهد حداقل میزان شاخص پایداری ۳/۷ درصد در سناریوی SSP 585 با راهکار S1 تا حداکثر ۵۳/۵ درصد در سناریوی SSP 126 با راهکار S6 به دست آمد. نتایج به صورت کلی نشان می‌دهد کاهش برداشت و تغذیه مصنوعی در بخش خروجی آبخوان که منتهی به دریا است بیشترین تأثیر را در مقایسه با سایر راهکارها دارد.

نتیجه‌گیری

موضوع تهاجم آب شور در نواحی ساحلی در سال‌های اخیر با توجه به افزایش توسعه در نوار ساحلی بسیار رشد داشته است. این توسعه مستلزم تأمین آب به عنوان یک زیرساخت حیاتی است که با توجه به موضوع کیفیت بسیار حساس است. رشد بهره‌برداری در آبخوان‌های ساحلی به واسطه همین موضوع سبب شده تا تبادل جریان‌های زیرسطحی و زیرزمینی کاهش یابد و شیب هیدرولیکی جریان در این نواحی به شدت کاهش و در برخی مناطق معکوس شود. این کاهش شیب سبب شده حجم جریان خروجی کاهش و به واسطه به هم خوردن تبادل، میزان تهاجم آب شور از طرف دریا افزایش داشته است. این مطالعه به بررسی تهاجم آب شور در آبخوان ساحلی ساری - نکا و اثر تغییر اقلیم بر میزان افزایش آن دارد. بر این اساس، شبیه‌سازی کمی و کیفی

آبخوان با استفاده از مدل عددی انجام گرفت و تغییرات تراز آبخوان مورد آنالیز قرار گرفت. به منظور بررسی دقیق این موضوع، بخش خروجی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی انجام گرفت که نتایج نشان داد رفتار آبخوان در دوره‌های آبی دارای افت تراز آبخوان است. رفتار هیدروژئولوژی آبخوان نیز با سه سناریوی اقلیمی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج در بدینانه‌ترین شرایط بیانگر افت ۱۸۹ سانتی‌متری آبخوان و در خوشبینانه‌ترین حالت افت ۵۷ سانتی‌متری را دارد. بررسی شرایط اقلیمی در سناریوهای اقلیمی نشان داد میزان دما و بارش روند افزایشی داشته و میزان بارش در منطقه به دلیل افزایش رطوبت قابلیت مناسبی برای افزایش دارد. با توجه به نتایج مدل‌سازی کمی، شبیه‌سازی کیفی آبخوان با استفاده از مدل MT3DMS و SEAWAT برای تحلیل غلظت کلراید در بخش خروجی آبخوان که با دریا در اندرکنش است انجام گرفت. نتایج در این شرایط نشان داد ۶۶۰ متر تهاجم آب شور در آبخوان وجود داشته و به واسطه آن بخشی از چاه‌های منطقه در بخش شمالی برای مصارف مختلف قابلیت مناسبی برای بهره‌برداری ندارد. همچنین، شبیه‌سازی با استفاده از سناریوهای اقلیمی نیز برای ارزیابی شرایط مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد میزان تهاجم آب شور در سناریوهای اقلیمی بین ۷۱۰ تا ۸۲۰ متر دارای عدم قطعیت بوده و این موضوع نیاز به تدوین راهکار سازگاری دارد. نتایج شبیه‌سازی کیفی در حد فاصل دریا و آبخوان با مطالعات مختلف نیز همخوانی داشته که در مقایسه با مطالعات مشابه در زمینه تهاجم آب شور به آبخوان‌های ساحلی، نتایج این مطالعه بر اساس شبیه‌سازی‌های مدل SEAWAT در منطقه ساری - نکا بیانگر تأثیرات معنادار تغییرات اقلیمی بر افزایش تهاجم آب شور است. به طور مشابه، مطالعه Nguyen و همکاران (۲۰۲۲) در ویتنام نشان می‌دهد پمپاژ آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی می‌تواند به‌شدت بر نفوذ شوری در سفره‌های آبی ساحلی تأثیر بگذارد (Nguyen et al., 2022). همچنین، Armanuos و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی مشابه با استفاده از مدل SEAWAT، تأثیر برداشت آب بر نفوذ آب شور را در شرایط مختلف بررسی کرده و نتایج آن با یافته‌های این مطالعه در ارتباط است که کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کنترل تهاجم آب شور داشته باشد (Armanuos, et al., 2022). علاوه بر این، مطالعات Perdikaki و همکاران (۲۰۲۴) و Yu و همکاران (۲۰۲۳) در خصوص شبیه‌سازی تهاجم آب شور در نوار ساحلی با استفاده از مدل‌های مشابه نشان دادند استراتژی‌های مختلف پمپاژ می‌تواند به‌شدت بر پیشروی آب شور تأثیر بگذارند، که مشابه با نتایج این مطالعه در بررسی تأثیر استراتژی‌های کاهش برداشت آب در بخش خروجی آبخوان است (Perdikaki et al., 2024b; Yu et al., 2023). در این مطالعه، نتایج نشان داد کاهش برداشت آب در بخش‌های حساس آبخوان به‌ویژه در شرایط بحرانی تغییر اقلیم، می‌تواند موجب پسروی آب شور و بهبود شاخص‌های پایداری کیفی آبخوان شود، که مشابه با نتایج Gholizadeh و همکاران (۲۰۲۵) است که نشان دادند استراتژی‌های مدیریت منابع آب در مناطق ساحلی می‌تواند به کاهش اثرات منفی تهاجم آب شور کمک کند (Gholizadeh et al., 2025). به طور کلی، مقایسه نتایج این مطالعه با دیگر تحقیقات نشان‌دهنده هم‌راستایی و تقویت راهکارهای سازگاری در کاهش تهاجم آب شور به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم است.

برای کنترل این موضوع، ۸ راهکار در قالب دو مفهوم کاهش برداشت و افزایش تغذیه در دو ناحیه کل آبخوان ساری - نکا و بخش خروجی آبخوان تعریف و مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج ارزیابی راهکارهای سازگاری با استفاده از شاخص پایداری کیفی آبخوان مورد آنالیز قرار گرفت که نتایج نشان داد بخش خروجی آبخوان دارای حساسیت بالاتری برای کنترل تهاجم آب بوده و راهکار کاهش ۳۰ درصد برداشت آب در بخش خروجی تا ۵۳ درصد پسروی آب شور را کنترل می‌کند. این راهکار در واقع بیانگر اهمیت کاهش برداشت و مدیریت در بخش خروجی آبخوان است که مطالعات اقتصادی - اجتماعی و استفاده از رویکردهای حل اختلاف برای دستیابی به این موضوع اهمیت دارد. از طرفی نیز تغذیه آبخوان در این ناحیه با رویکردهای مختلف می‌تواند در کاهش درصد برداشت تأثیرگذار باشد و امکان رسیدن به راهکار پایدار را فراهم سازد.

- 1 Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), 11–24. <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2022.11204>
- 2 Armanuos, A. M., Moghazy, H. E., Zeleňáková, M., & Yaseen, Z. M. (2022). Assessing the Impact of Groundwater Extraction on the Performance of Fractured Concrete Subsurface Dam in Controlling Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. *Water* 2022, Vol. 14, Page 2139, 14(13), 2139. <https://doi.org/10.3390/W14132139>
- 3 Armanuos, A. M., Negm, A. M., Javadi, A. A., Abraham, J., & Gado, T. A. (2022). Impact of inclined double-cutoff walls under hydraulic structures on uplift forces, seepage discharge and exit hydraulic gradient. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101531. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.06.017>
- 4 Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., & Braun, M. (2022). Climate Change Impacts on Groundwater Recharge in Cold and Humid Climates: Controlling Processes and Thresholds. *Climate*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/cli10010006>
- 5 Ferguson, G., & Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change* 2012 2:5, 2(5), 342–345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>
- 6 Gholizadeh, H., Clement, T. P., Green, C. T., Tick, G. R., Plattner, A. M., & Zhang, Y. (2025). Modeling seawater intrusion along the Alabama coastline using physical and machine learning models to evaluate the effects of multiscale natural and anthropogenic stresses. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06613-6>
- 7 Kardan Moghaddam, H., Ghordoyee Milan, S., Kayhomayoon, Z., Rahimzadeh kivi, Z., & Arya Azar, N. (2021). The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10661-021-08961-Y/METRICS>
- 8 Lyu, P., Song, J., Yin, Z., Wu, J., & Wu, J. (2024). Integrated SEAWAT model and GALDIT method for dynamic vulnerability assessment of coastal aquifer to seawater intrusion. *Science of The Total Environment*, 925, 171740. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171740>
- 9 Najafi, S., Sharafati, A., & Moghaddam, H. K. (2023). Impact of climate change adaptation strategies on groundwater resources: a case study of Sari-Neka coastal aquifer, Northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 82(23), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11205-6/METRICS>
- 10 Najafzadeh, M., Homaei, F., & Mohamadi, S. (2022). Reliability evaluation of groundwater quality index using data-driven models. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6), 8174–8190. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-16158-6/METRICS>
- 11 Nasiri, M., Moghaddam, H. K., & Hamidi, M. (2021). Development of Multi-Criteria Decision Making Methods for Reduction of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Using SEAWAT Code. *Journal of Contaminant Hydrology*, 242, 103848. <https://doi.org/10.1016/J.JCONHYD.2021.103848>
- 12 Nguyen, M., Lin, Y. N., Tran, Q. C., Ni, C. F., Chan, Y. C., Tseng, K. H., & Chang, C. P. (2022). Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam. *Engineering Geology*, 299, 106555. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2022.106555>
- 13 Perdikaki, M., Chrysanthopoulos, E., Markantonis, K., & Kallioras, A. (2024a). Groundwater Flow Model Calibration Using Variable Density Modeling for Coastal Aquifer Management. *Hydrology* 2024, Vol. 11, Page 59, 11(4), 59. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY11040059>
- 14 Perdikaki, M., Chrysanthopoulos, E., Markantonis, K., & Kallioras, A. (2024b). Groundwater Flow Model Calibration Using Variable Density Modeling for Coastal Aquifer Management. *Hydrology* 2024, Vol. 11, Page 59, 11(4), 59. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY11040059>
- 15 Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1749–1785. <https://doi.org/10.1007/S10668-018-00307-Y/METRICS>
- 16 Tang, K. H. D. (2019). Climate change in Malaysia: Trends, contributors, impacts, mitigation and adaptations. *Science of the Total Environment*, 650, 1858–1871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.316>
- 17 Yu, W., Baù, D., Mayer, A. S., Mancewicz, L., & Geranmehr, M. (2023). Investigating the Impact of Seawater Intrusion on the Operation Cost of Groundwater Supply in Island Aquifers. *Water Resources Research*, 59(10), e2023WR034798. <https://doi.org/10.1029/2023WR034798>
- 18 Zektser, I. S., & Loaiciga, H. A. (1993). Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *Journal of Hydrology*, 144(1–4), 405–427.