

Research Paper

Spatial and Temporal Changes in Groundwater Quantity, Flow Direction, and Representative Hydrograph of the Coastal Aquifer of Minab Plain, Hormozgan Province

Reza Razmpoor¹ Adnan Sadeghi-Lari^{1*}

^{1*}Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran Email: rezarazmpoor28@gmail.com
Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran Email: rezarazmpoor28@gmail.com



10.22125/iwe.2026.587726.1929

Received:
June 20, 2026
Accepted:
August 19, 2026
Available online:
September 7, 2026

Keywords:
Water table,
Representative
hydrograph,
Integrated management,

Abstract

In conditions of intensifying water stress, persistent decline of aquifers, and increasing hydrogeological vulnerability in arid and semi-arid regions, monitoring water table changes and identifying patterns of decline is essential for sustainable water resources management. This study aimed to evaluate the temporal-spatial trend of groundwater table changes in the Minab Plain over a 25-year period between 1381 and 1404. Kendall rank correlation test, hydrograph analysis, and geographic information system (GIS) were used to examine the trend of changes, spatial zoning of groundwater levels, and extraction of groundwater flow direction in four four-year periods in 1390–1393, 1393–1397, 1397–1401, and 1401–1404. The results showed that groundwater levels in all observation wells of the Minab Plain had a significant negative correlation with time at a 99% confidence level. The overall hydrograph of the aquifer and the zoning maps of the four-year time periods also showed that the groundwater level decline is progressing with great intensity. The direction of groundwater flow did not show any noticeable changes during the study period. Human and climatic factors, including increasing water demand, unbalanced physical development, changing patterns of water resource exploitation, and the effects of climate change, play a very prominent role in deepening this trend. Therefore, the findings of this study emphasize the need to establish integrated aquifer management strategies, control withdrawals, and set programs compatible with the aquifer capacity.

Introduction

Water scarcity has been a serious concern in many countries. governments are still trying to access more water resources and meet the needs of households, agriculture and industry. The imbalance between water supply and demand lead to reduction in the quantity of groundwater resource. accordingly, the present study was conducted to better understand the quantitative status of groundwater in MINab aquifer located in the east of Hormozgan province.

Materials and Methods

The location of the study area in Hormozgan province and the location of the observation wells in the Minab aquifer are shown in Figure 1. In this study, precipitation data and groundwater level were used to analyze the representative hydrograph of Minab plain and map the groundwater level and flow direction maps during

* **Corresponding Author:** Adnan Sadeghi-Lari

Address: Department of Water Science and Engineering, University of Hormozgan, Iran

Email: Adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir

Tel: +989177124100

four four-year periods. In addition, Kendall rank correlation coefficient was applied to determine the statistical correlation between time variables and groundwater level measured at each observation well.

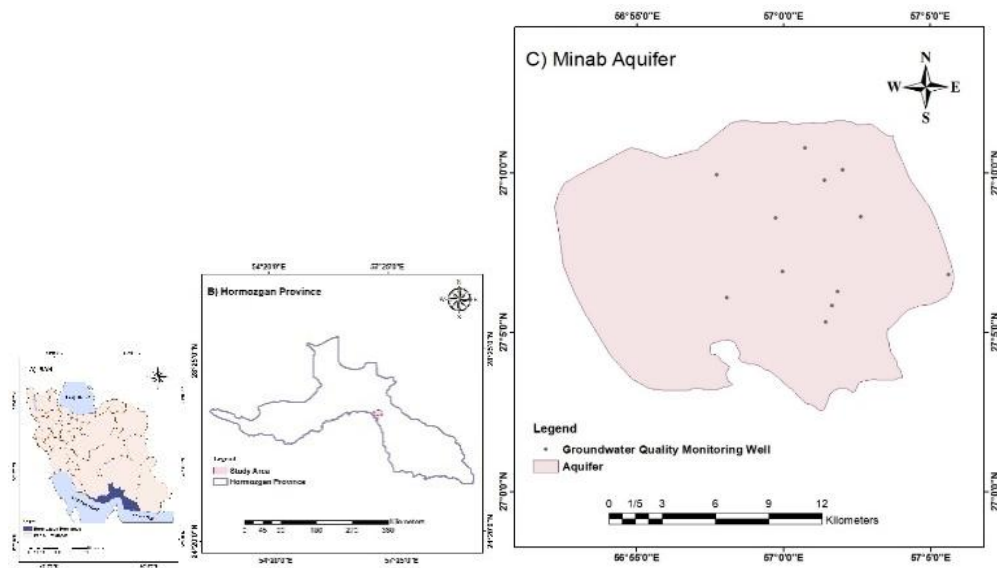


Fig 1. The Geographical Position of the Study Area in Hormozgan Province

Results and Discussion

The representative hydrograph of the Minab Plain showed that the overall trend of the groundwater level during a 24-year period (2002-2026) is downward (Figure 2). The decreasing trend groundwater level indicates excessive extraction of groundwater and improper recharge of the aquifer. The significant negative correlation coefficient (at 99% confidence level) with the time variable also confirms its decreasing trend during the 24 years of the study period. The zoning map of groundwater level showed that the highest and lowest groundwater levels belong to the first and fourth periods, respectively. In each four periods, the highest and lowest groundwater levels were observed in the northeastern and southwestern parts of the aquifer, respectively. The flow direction maps showed that the dominant flow direction in this plain is from the north area towards the south part of the aquifer.

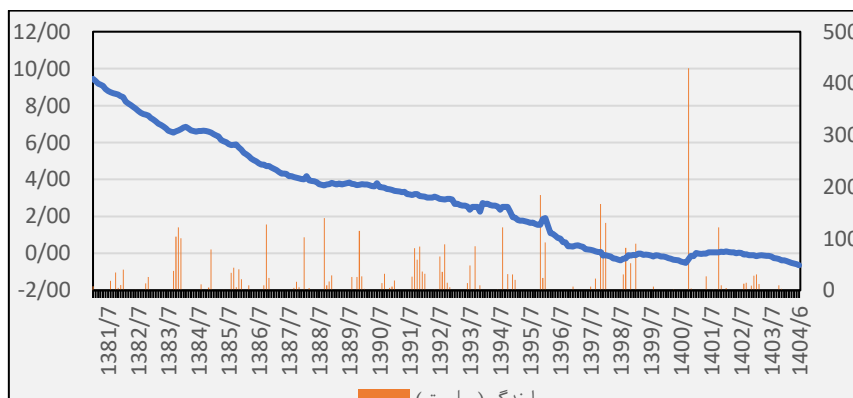


Fig 2 . The Representative hydrograph of the study area

Analysis of groundwater level maps of the study area showed that in all four four-year time periods, a decreasing trend of groundwater level is clearly seen in the entire aquifer. Considering that in the first period, a large area of the area, especially the southern, northern and western areas, was affected by higher levels, which indicates suitable recharge conditions at that time (Figure 3). However, in the zonal maps of groundwater level in the second and third periods, the foci of decline appeared more widely in the central and eastern parts, which indicates an increase in pressure on groundwater resources in these areas (Figures 3).

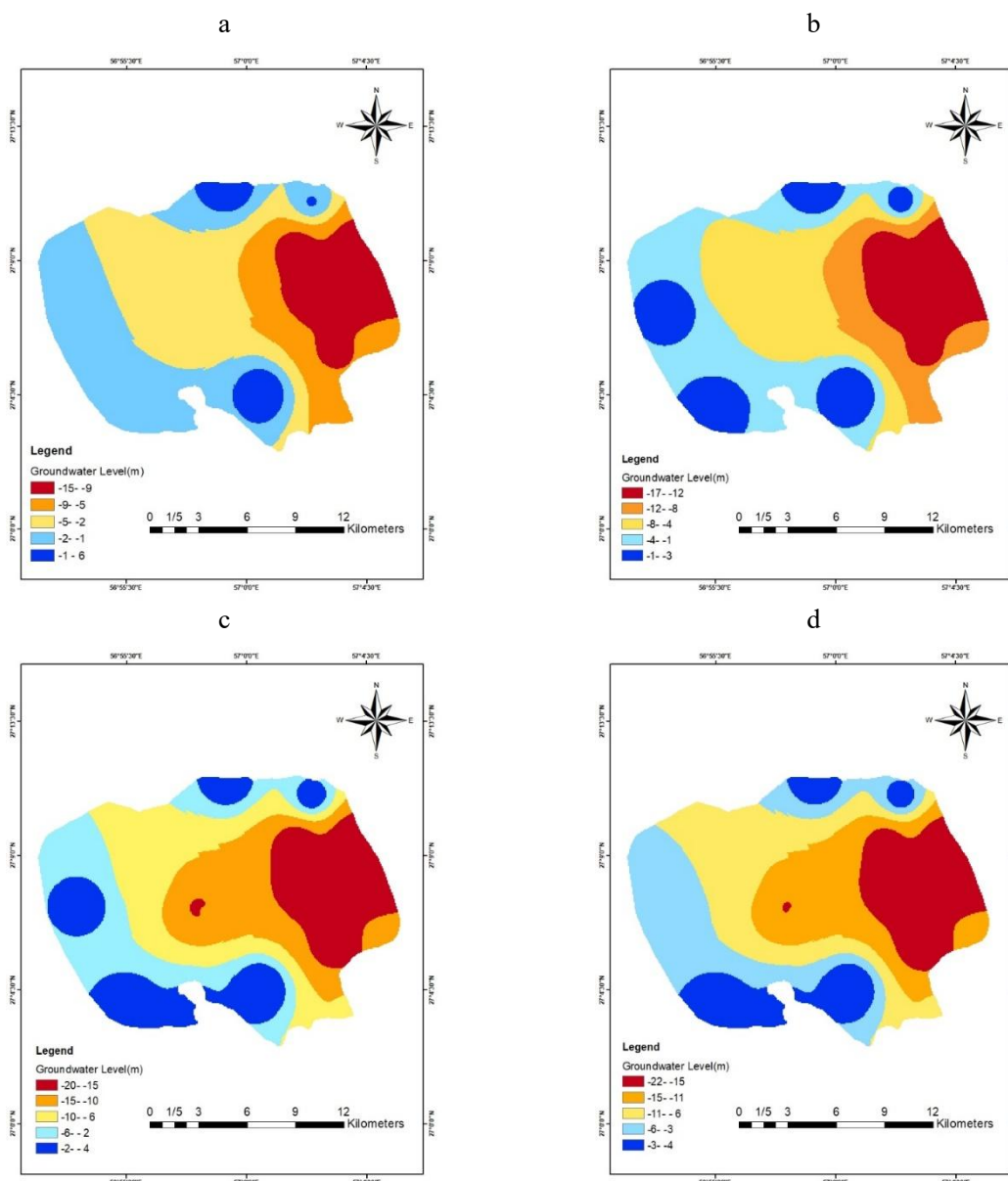


Fig 3. Average groundwater level in the third period of the 2011-2014 (a) , 2015-2018 (b), 2019-2022 (c), 2023-2026 (d) water year

Conclusion

The representative hydrograph of Minab plain had a downward trend during the 24-year period and groundwater level showed a drop of more than 8 meters during this period. The groundwater level in all observation wells demonstrated a strong positive correlation with time. The investigation of the zoning maps of the groundwater level indicated a significant drop in the last four years of the studied period, which was attributed to the uncontrolled withdrawals from the aquifer. The general direction of the groundwater flow in the studied area was from the north to the south, which in the first two periods of the study, the flow direction was aligned with the direction of the dominant slope of the plain, but in the last two periods, the flow direction was reversed, which was attributed to the high density of production wells, excessive withdrawals and inappropriate recharge.

تغییرات مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی، جهت جریان و هیدروگراف معرف آبخوان ساحلی دشت میناب استان هرمزگان

رضا رزم‌پور^۱، عدنان صادقی لاری^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

مقاله پژوهشی

چکیده

در شرایط تشدید تنش آبی، افت پایدار آبخوان‌ها و افزایش آسیب‌پذیری هیدروژئولوژیک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پایش تغییرات سطح ایستابی و شناسایی الگوهای افت، برای مدیریت پایدار منابع آب امری ضروری است. این پژوهش باهدف ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی تراز سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در دشت میناب طی یک دوره زمانی بلندمدت صورت پذیرفت. از آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال، تحلیل هیدروگراف و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) جهت بررسی تغییرات و پهنه‌بندی مکانی تراز آب زیرزمینی و استخراج جهت جریان آب زیرزمینی در چهار دوره زمانی چهار ساله در سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۲، ۱۳۹۳-۱۳۹۶، ۱۴۰۰-۱۳۹۷ و ۱۴۰۴-۱۴۰۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که تراز آب زیرزمینی در ۸۲ درصد از چاه‌های مشاهداتی تراز آب زیرزمینی دارای همبستگی منفی معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد با زمان است. ترسیم هیدروگراف کلی آبخوان و نقشه‌های پهنه‌بندی دوره‌های زمانی چهار ساله نیز نشان داد که افت تراز آب زیرزمین با شدت زیادی در حال پیشرفت می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در طول دوره مطالعاتی تغییرات محسوسی نشان نداد. عوامل انسانی و اقلیمی از جمله افزایش تقاضای آب، توسعه کالبدی نامتوازن، دگرگونی الگوی بهره‌برداری از منابع آب و اثرات تغییر اقلیم، در نرخ کاهش تراز آب زیرزمینی نقش بسیار پررنگی دارند. ازاینرو یافته‌های این پژوهش بر لزوم استقرار راهبردهای مدیریت یکپارچه آبخوان، کنترل برداشت و تنظیم برنامه‌های سازگار با ظرفیت آبخوان تأکید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تراز آب زیرزمینی، هیدروگراف معرف، مدیریت یکپارچه

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، پست الکترونیکی: rezarazmpoor58@gmail.com

^{۲*} دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، پست الکترونیکی:

adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir (نویسنده مسئول)



مقدمه

کمبود منابع آب زیرزمینی که بخش اعظم ذخایر آب شیرین قابل دسترس کره زمین را تشکیل می‌دهند، به مثابه شریان‌های حیاتی برای بقا، توسعه اقتصادی و حفظ پایداری جوامع بشری عمل می‌کنند. این مخازن عظیم زیرسطحی، نقشی کلیدی در تأمین نیازهای اساسی انسان ایفا کرده و بر اساس آمارها، حدود نیمی از آب آشامیدنی مورد نیاز جهانی و بیش از ۴۰ درصد از آب مصرفی در بخش کشاورزی که مستقیماً امنیت غذایی را تضمین می‌کند، از این منابع تأمین می‌شود. (Karunanidhi et al., 2019). اهمیت استراتژیک آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف جهان، که اغلب با کمبود منابع آب سطحی یا دسترسی محدود به آن‌ها مواجه هستند، دوچندان می‌شود. بنابراین، مدیریت صحیح و پایدار این منابع، نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک الزام اقتصادی و اجتماعی برای تضمین رفاه نسل حاضر و آینده محسوب می‌گردد. (Rodell et al., 2024) با این وجود، این منابع گران‌بها در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی و فزاینده‌ای روبرو شده‌اند که پایداری آن‌ها را به طور جدی تهدید می‌کند. تخلیه بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و افت مستمر تراز آبخوان‌ها، در کنار کاهش چشمگیر کیفیت آب، به یک معضل جهانی بدل گشته است. مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی در بروز این بحران دخیل هستند؛ از جمله رشد تصاعدی جمعیت که منجر به افزایش تقاضا برای آب در مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی می‌شود، توسعه‌ی گسترده و عمدتاً ناپایدار بخش کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی که با مصرف زیاد آب و تولید پساب‌های آلاینده همراه است، و در نهایت، اثرات پیچیده و روزافزون تغییرات اقلیمی. این عوامل دست در دست هم داده و باعث شده‌اند تا بسیاری از آبخوان‌ها با سرعتی بیش از نرخ تجدید طبیعی خود، تخلیه شوند. (Kareem SL, 2021) پیامدهای منفی این بهره‌برداری ناپایدار، ابعاد گسترده‌ای دارد و تنها به کاهش سطح آب محدود نمی‌شود. کاهش تراز آبخوان‌ها به تدریج منجر به فشردگی سنگ و رسوبات لایه‌های زیرین شده و پدیده‌ای مخرب به نام "فرونشست زمین" را به دنبال دارد. این پدیده، که در بسیاری از دشت‌های کشورمان

مشاهده می‌شود، غیرقابل بازگشت بوده و علاوه بر آسیب به زیرساخت‌های عمرانی و شهری (مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها و شبکه‌های تأسیساتی)، ظرفیت طبیعی مخزن آبخوان را برای ذخیره‌سازی آب در آینده به طور دائمی کاهش می‌دهد. (Miroofi and Meghlooli Bayat, 2009) در مناطق ساحلی، کاهش فشار آب شیرین در سفره‌های زیرزمینی، امکان نفوذ آب شور دریا به داخل این مخازن را فراهم آورده و پدیده‌ی شوری آب زیرزمینی را تشدید می‌کند؛ این امر آب قابل استفاده برای مصارف شرب و کشاورزی را محدود و غالباً غیرقابل استفاده می‌سازد. (Barani and Karami, 2019) علاوه بر تغییرات کمی، افت کیفیت آب زیرزمینی نیز یک چالش جدی دیگر است. ورود آلاینده‌های طبیعی که از انحلال سنگ‌ها حاصل می‌شوند (مانند آرسنیک و فلوراید) و یا آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی (مانند نیترات حاصل از کودهای شیمیایی در کشاورزی، و آفت‌کش‌ها و پساب‌های صنعتی) می‌تواند کیفیت آب را به حدی تنزل دهد که استفاده از آن برای شرب یا حتی مصارف کشاورزی، خطرات جدی برای سلامت عمومی و محیط زیست به همراه داشته باشد (Adimalla and Taloor, 2020). تغییرات اقلیمی نیز به عنوان یک عامل تشدیدکننده، نقش بسزایی در تشدید بحران آب زیرزمینی ایفا می‌کند. تغییر در الگوهای بارش، افزایش فراوانی و شدت دوره‌های خشکسالی، و بالا رفتن دمای کره زمین که منجر به افزایش تبخیر و تعرق از سطح خاک و منابع آبی می‌شود، همگی باعث کاهش قابل توجه در نرخ تغذیه‌ی طبیعی آبخوان‌ها شده و در مقابل، تقاضا برای آب را، به ویژه در بخش کشاورزی، افزایش می‌دهند. این روند نگران‌کننده، منجر به پیش‌بینی کاهش قابل توجه در منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر در بسیاری از مناطق جهان تا اواسط قرن حاضر شده است. (Bahrami et al., 2020; Mehrabinejad et al., 2025). در این میان، مطالعات علمی و تحقیقاتی متعددی در سراسر جهان، به بررسی جنبه‌های مختلف بحران آب زیرزمینی و ارائه راهکار پرداخته‌اند. در ایران، مطالعه آبخوان دشت کهورستان در یک بازه زمانی ۱۹ ساله، کاهش پایدار تراز آب را با افت بیش از ۵ متر نشان داد و همچنین وارونگی

قابل توجهی بین ویژگی‌های کیفی آب و عمق و موقعیت جغرافیایی مشاهده گردید؛ مدل‌های توسعه‌یافته نیز به عنوان ابزاری استراتژیک برای مکان‌یابی طرح‌های توسعه کشاورزی و صنعتی معرفی شدند (Al-Bahrani et al., 2022).

تشدید کمبود آب ناشی از خشک‌سالی‌های پیاپی و تغییرات اقلیمی، ایران را در کنار کشورهایی مانند هند، ایالات متحده، عربستان سعودی و چین با بالاترین نرخ کاهش تراز آب زیرزمینی قرار داده است (Madani et al., 2014; Madani, 2016). علاوه بر این، به دلیل خشک‌سالی‌های اخیر که منجر به افت تراز آب‌های زیرزمینی شده است، کاهش کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی در جنوب ایران نگرانی‌ها و چالش‌های قابل‌توجهی را ایجاد کرده است (Bahrami et al., 2022). کاهش کمی تراز منابع آب زیرزمینی در برخی از نقاط ایران به دلیل پمپاژ بی‌رویه از چاه‌های بهره‌برداری و افزایش میزان املاح آب زیرزمینی تقریباً در همه‌ی آبخوان‌ها مشاهده و اندازه‌گیری شده است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش خطرات امنیتی، اجتماعی، اقتصادی آب در کشورمان است (Goswami et al., 2020; Dastāndāz et al., 2023). استان ساحلی هرمزگان با داشتن ۴۲ دشت ممنوعه، یکی از مناطق ممنوعه منابع آب زیرزمینی کشور محسوب می‌شود که نرخ افزایش عمق سطح آب زیرزمینی در آن بسیار زیاد بوده و ناشی از بهره‌برداری‌های بیش از اندازه و تغذیه پایین است. با این حال، مطالعات انجام شده در این خصوص در آبخوان‌های ساحلی استان هرمزگان بسیار محدود است و مطالعات جامعی که به بررسی متغیرهای کمی منابع آب زیرزمینی شامل بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی و جهت جریان در دوره‌های دراز مدت و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آن‌ها می‌پردازد بیش از گذشته در آبخوان‌های ساحلی این استان پهناور احساس می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی در دوره‌های چهارساله، شناسایی مناطق بحرانی و ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی تراز و جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه انجام گردید.

در بخشی از الگوی جریان آب زیرزمینی را مشاهده کرد که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری شدید این آبخوان در برابر برداشت‌های ناپایدار و بهره‌برداری بی‌رویه بود (Dastāndāz et al., 2023). در سطح بین‌المللی نیز، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است؛ به عنوان مثال، در شهر داکا، بنگلادش، با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته مانند آزمون روند من-کندال اصلاح‌شده و تحلیل نقاط داغ، کاهش معنادار سطح آب زیرزمینی (تا ۱.۱۸ متر در سال) به ویژه در نزدیکی مناطق صنعتی مشاهده شد. این مطالعه همچنین تفاوت در نرخ تغذیه آبخوان بین مناطق روستایی و شهری و غلظت بالای آلاینده‌هایی نظیر منگنز، آهن و آرسنیک را گزارش کرد و نتیجه گرفت که تعاملات پیچیده بین عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی، به ویژه شهرنشینی و صنعتی‌شدن، محرک‌های اصلی تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی هستند (Hossain et al., 2024). پژوهش دیگری با ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، به ارزیابی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و کاربری اراضی پرداخت و حوضه مورد مطالعه را به مناطق با پتانسیل‌های متفاوت تقسیم‌بندی کرد؛ در این تحقیق، مناطقی با رسوبات کوه‌رفتی و آبرفتی، شیب ملایم و خاک نفوذپذیر، بیشترین پتانسیل را برای تغذیه آبخوان نشان دادند (Wu et al., 2026). دیپ و همکاران (۲۰۲۵) در منطقه‌ای دیگر در هند، مطالعه‌ای کاهش شدید سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ را به علت افزایش جمعیت و الگوی کشت متمرکز بر محصولات پرمصرف آب مانند گندم و برنج گزارش کرد؛ به طوری که در سال ۲۰۲۰، حدود ۴۰٪ منطقه شاهد عمق آب زیرزمینی بین ۴۰ تا ۴۵ متر بود، در حالی که در سال ۱۹۹۰، این عمق غالباً زیر ۲۰ متر قرار داشت. این پژوهش راهکارهایی مانند آبیاری کارآمد، تنوع‌بخشی به محصولات کشاورزی، و احیای منابع آبی را پیشنهاد داد (Deep et al., 2025). همچنین، در مطالعه‌ای در شهر نجف عراق، با تلفیق داده‌های سنجش از دور و GIS، نقشه‌های تراز و نوع آب زیرزمینی تهیه شد و همبستگی

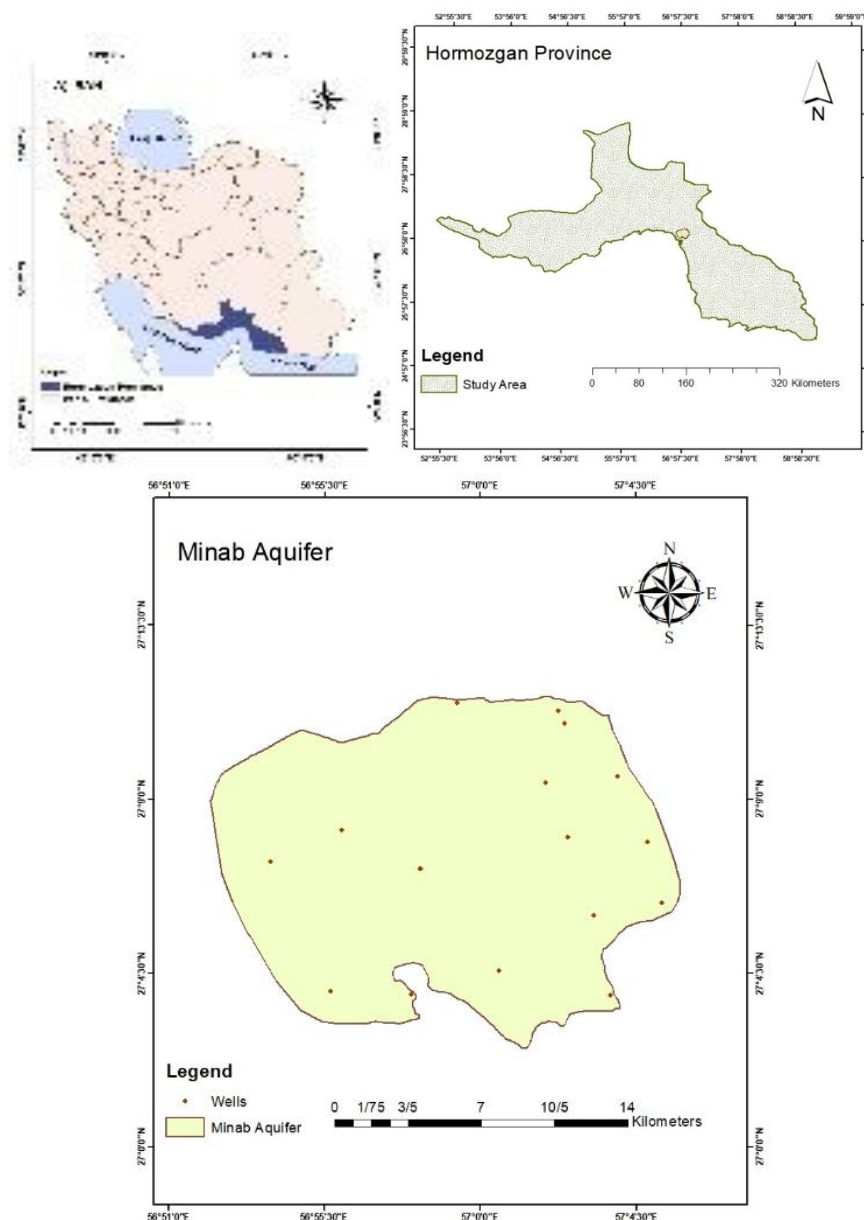


مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت میناب با وسعتی در حدود ۸۵۷ کیلومترمربع در ۹۰ کیلومتری شرق بندرعباس واقع شده و محدوده جغرافیایی آن بین طول‌های ۵۶ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی و عرض‌های شمالی ۲۶ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۲۵ دقیقه قرار دارد. تحلیل توپوگرافی منطقه گویای گرادیان کاهش ارتفاع از شرق به سمت سواحل دریای عمان بوده و ارتفاع از حدود ۳۰ متر در شرق تا زیر سطح تراز دریا در مناطق ساحلی کاهش می‌یابد. نظام هیدرولوژیکی دشت تحت سلطه رودخانه میناب است که از هم‌گرایی دو شاخه رودان و جغین در نزدیکی روستای برنطین تشکیل شده و پس از گذر از جلگه میناب در جنوب

بندر کلاهی به دریا منتهی می‌گردد. میانگین دمای منطقه مورد مطالعه ۲۶/۶ درجه سانتی‌گراد با متوسط رطوبت نسبی ۶۸ درصد است. متوسط بارش سالیانه در این منطقه کمتر از ۲۰۰ میلیمتر و غالباً به صورت رگبارهای شدید به همراه سیلاب‌های مخرب و زودگذر است. این منطقه از مناطق گرم و خشک ایران است و اقلیم آن تحت تأثیر آب و هوای نیمه‌بیابانی و بیابانی قرار دارد و دارای تابستان‌های بسیار گرم و مرطوب است و گاهی نیز دمای آن از ۵۲ درجه سانتیگراد تجاوز می‌کند. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان و موقعیت چاه‌های مشاهداتی در آبخوان میناب در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان

شرکت آب منطقه‌ای استان هرمزگان اخذ گردید. داده‌های تراز آب زیرزمینی به صورت ماهیانه در چاه‌های مشاهداتی حفر شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان هرمزگان در دشت میناب برداشت می‌شود. پس از دریافت داده‌ها، اقدام به رسم هیدروگراف واحد در هر یک از چاه‌های مشاهداتی گردید تا بدین طریق بتوان داده‌های پرت را پیدا و اقدام به

هیدروگراف واحد دشت میناب

به منظور تحلیل تغییرات بلندمدت تراز آب زیرزمینی در دشت مورد مطالعه، داده‌های اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی طی یک دوره‌ی ۲۴ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۴) از



حذف و یا اصلاح آن‌ها نمود. داده‌های گمشده و یا برداشت نشده از چاه‌های با استفاده از روش رگرسیون خطی ساده اقدام به بازسازی آن‌ها گردید. میانگین تراز آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود در دشت (شکل ۱) و با به‌کارگیری روش پلیگون‌بندی تیسن انجام شد. به‌منظور نمایش رفتار زمانی آبخوان، هیدروگراف مربوطه ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت.

تحلیل همبستگی زمانی با آزمون رتبه‌ای کندال

آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال یکی از روش‌های ناپارامتریک برای ارزیابی میزان ارتباط آماری میان دو متغیر است. در این آزمون، ضریب همبستگی، شدت و جهت رابطه بین متغیرها را به‌صورت عددی نشان می‌دهد. هر چه مقدار مطلق این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان وابستگی بین متغیرها بیشتر و رابطه قوی‌تر خواهد بود؛ به‌طوری که ضریب نزدیک به مثبت یک بیانگر وجود همبستگی مستقیم و قوی و ضریب نزدیک به منفی دلالت بر رابطه‌ای معکوس و مستحکم بین دو متغیر دارد (Mann, 1945). در این پژوهش، به‌منظور بررسی ارتباط آماری بین متغیر زمان و تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محدوده آبخوان میناب، از آزمون ناپارامتریک همبستگی رتبه‌ای کندال در سطح اطمینان ۹۹ درصد استفاده گردید. نتایج این آزمون امکان تحلیل و ارزیابی میزان همبستگی متغیر تراز آب زیرزمینی را نسبت به متغیر زمان فراهم می‌سازد.

پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی و جهت جریان

تکنیک‌های متفاوتی برای درون‌یابی داده‌های نقطه‌ای وجود دارد که بااهمیت‌ترین آن‌ها روش‌های کریجینگ و معکوس فاصله وزنی (IDW) است. یکی از ملزومات روش کریجینگ این است که داده‌های مورد استفاده از توزیع نرمال تبعیت کنند. با توجه به اینکه داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در دشت میناب از توزیع نرمال برخوردار نبودند از اینرو روش IDW در راستای درون‌یابی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در روش IDW برای تعیین مقادیر هر سلول در لایه رستر خروجی، از مقادیر نقاط اندازه‌گیری شده مجاور برای محاسبه میانگین نقاط مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچه نقاط نمونه‌برداری شده به مرکز سلول

هدف نزدیک‌تر باشد به آن نقطه وزن بیشتری در برآورد میانگین وزنی نقاط نمونه‌برداری شده مجاور اختصاص داده می‌شود. در حقیقت وزن تأثیرگذار عکس فاصله است، روش کریجینگ مانند روش IDW است با این تفاوت که در روش کریجینگ وزن اعمال‌شده بر روی نقاط، علاوه بر فاصله به نحوه پراکندگی و توزیع مکانی داده‌ها نیز بستگی دارد. تأثیر چیدمان و توزیع مکانی داده‌های با یک خودهمبستگی مکانی بین داده‌ها مشخص می‌شود (Hashim et al., 2021).

در این مطالعه به‌منظور تحلیل فضایی و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی و تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی، از روش IDW در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. براین اساس داده‌های موردنظر با مختصات UTM آن‌ها در نرم‌افزار ArcGIS وارد شدند سپس از منوی GeostatisticalAnalyst و روش IDW بر اساس میزان تغییر تراز سطح آب زیرزمینی، داده‌ها درون‌یابی شدند و نقشه‌های هم‌ارزش تراز آب زیرزمینی با روش IDW تهیه شد. این تحلیل برای شناسایی تغییرات زمانی-مکانی هیدروژئولوژیکی در چهار دوره، شامل دوره‌های آبی در سال های ۱۳۹۲-۱۳۸۹، ۱۳۹۶-۱۳۹۳، ۱۴۰۰-۱۳۹۷ و ۱۴۰۴-۱۴۰۱ انجام پذیرفت. این دوره‌بندی زمانی، امکان پایش دینامیک تراز آب زیرزمین در آبخوان مورد مطالعه را در بازه‌های زمانی مشخص فراهم می‌آورد.

نتایج و بحث

هیدروگراف واحد منطقه مورد مطالعه

هیدروگراف نمایش داده‌شده در شکل ۲ تغییرات ارتفاع مطلق تراز سطح آب زیرزمینی را در مقیاس ماهانه و در مقابل بارندگی‌های ثبت‌شده طی دوره‌ای ۲۵ ساله بین سال‌های ۱۳۸۱ الی ۱۴۰۴ نشان می‌دهد. هدف از ترسیم این نمودار، تحلیل تغییرات میانگین تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در ۱۷ چاه مشاهداتی واقع شده در منطقه مورد مطالعه و میانگین بارندگی بلند مدت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های بارش‌سنج منطقه در طی یک دوره‌ی بلند مدت است. به‌دلیل محدودیت پوشش چاه‌های مشاهداتی و پراکندگی مکانی آن‌ها، از روش پلیگون‌بندی تیسن برای برآورد میانگین وزنی تراز سطح آب زیرزمینی در کل آبخوان

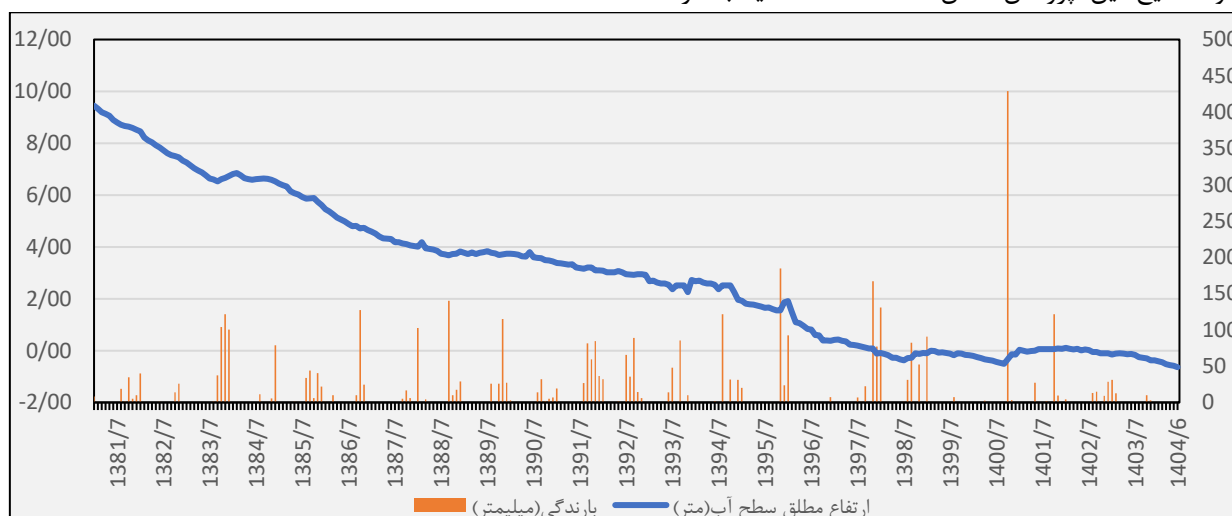
از منابع زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی در محدوده آبخوان. در چنین شرایطی، حتی رخدادهای بارشی نسبتاً مناسب نیز لزوماً به بازسازی کامل ذخیره آبخوان منجر نمی‌شوند؛ زیرا بخش زیادی از بارش پیش از نفوذ عمقی، به رواناب سطحی یا تبخیر از دسترس خارج می‌شود. بنابراین، پاسخ سریع آبخوان به بارش در مقیاس کوتاه‌مدت، نباید به عنوان نشانه پایداری سامانه تلقی شود، بلکه بیانگر حساسیت بالای آن به تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی است. همچنین، روند نزولی سطح ایستابی در این آبخوان نشان می‌دهد که ظرفیت طبیعی ذخیره‌سازی و بازبایی آن در برابر تنش‌های خشکسالی محدود شده است. در آبخوان‌هایی با ضخامت مؤثر کم و پیوستگی هیدرولیکی بالا، افت تراز آب می‌تواند به سرعت موجب تغییر در گرا دیان هیدرولیکی و در نتیجه تشدید حرکت آب شور به سمت نواحی شیرین‌تر شود (Adeli et al., 2018). این مسئله در دشت‌های ساحلی جنوب کشور، به‌ویژه در مجاورت پهنه‌های شور و منابع آبی دریایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر، نوسانات ماهانه هیدروگراف و هم‌زمانی نسبی آن با رخدادهای بارشی، نشان می‌دهد که بخشی از آبخوان هنوز از قابلیت پاسخ‌دهی سریع برخوردار است؛ با این حال، دامنه این پاسخ‌ها برای جبران کسری تجمعی ذخیره کافی نیست. به بیان دیگر، آبخوان در وضعیت «واکنش‌پذیر اما ناپایدار» قرار دارد؛ حالتی که در آن تغذیه کوتاه‌مدت می‌تواند نوسانات موقت ایجاد کند، اما روند غالب بلندمدت همچنان کاهش باقی می‌ماند. این الگو در بسیاری از آبخوان‌های تحت تنش بهره‌برداری شدید مشاهده می‌شود و معمولاً پیش‌درآمد ورود سامانه به مرحله افت مزمن و فرونشست‌پذیری هیدرولیکی است. بر این اساس، مدیریت پایدار آبخوان دشت میناب نیازمند رویکردی تلفیقی است که هم‌زمان بر کنترل برداشت، افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی، حفاظت از مناطق تغذیه و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی متمرکز باشد. علاوه بر این، پایش مستمر تراز آب زیرزمینی، کیفیت آب و تغییرات مکانی-زمانی بارش برای ارزیابی اثربخشی اقدامات مدیریتی ضروری

استفاده گردید. با توجه به هیدروگراف رسم‌شده در شکل ۲ تراز سطح آب زیرزمینی در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه (سال ۱۴۰۴) حدود ده متر نسبت به ابتدای دوره زمانی مورد مطالعه (سال ۱۳۸۱) کاهش یافته است. پاسخ سریع تراز آب زیرزمینی به رخدادهای بارش، نمایانگر نفوذپذیری بالا و ضخامت محدود آبخوان است. این ویژگی بیانگر وجود مسیرهای نفوذ مؤثر همچون سازندهای کارستی، آبرفت‌های درشت‌دانه و شکستگی‌های متعدد بوده و نشان از هدایت هیدرولیکی زیاد دارد که موجب انتقال سریع بخش قابل‌توجهی از بارندگی به آبخوان می‌شود. بررسی هیدروگراف نشان داد که با وجود نوسانات فصلی و واکنش نسبتاً هم‌زمان به بارش، آبخوان در بلندمدت تحت فشار برداشت‌های زیاد و تغذیه ناکافی قرار دارد. تحلیل سری زمانی سطح آب زیرزمینی طی دو دهه اخیر، روندی افتان و پایدار را نشان می‌دهد. این وضعیت بیانگر عدم تعادل قابل‌توجه بین مؤلفه‌های ورودی (تغذیه طبیعی و بارش) و خروجی (برداشت و زهکشی) آبخوان است. الگوی نامنظم و شدید بارش‌ها سبب شده بخش قابل‌توجهی از آن به رواناب تبدیل شده و فرصت نفوذ مؤثر به سفره از دست رود. در نتیجه، پایداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی منطقه با تهدید جدی مواجه شده است. افت حدود ده متری تراز آب زیرزمینی طی ۲۵ سال، منجر به کاهش شدید حجم ذخیره قابل‌دسترس و کاهش انعطاف‌پذیری سفره در برابر خشکسالی‌های آینده شده است. از آنجا که دشت میناب در مجاورت خلیج فارس قرار دارد، کاهش تراز آب زیرزمینی موجب افت فشار هیدرولیکی آب شیرین و افزایش احتمال نفوذ افقی یا عمودی آب شور به سفره می‌شود. این پدیده در دشت‌هایی نظیر کهورستان نیز مشاهده شده، است لذا خطر شورشدگی آبخوان‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. این شرایط ضرورت تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریتی جامع برای کاهش برداشت و افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان را آشکار می‌سازد. از منظر هیدروژئولوژیکی، افت مستمر سطح آب زیرزمینی در دشت میناب را می‌توان حاصل برهم‌کنش چند عامل هم‌زمان دانست؛ از جمله کاهش تغذیه مؤثر در سال‌های خشک، افزایش تبخیر و تعرق، توسعه بهره‌برداری



وضعیت شکننده هیدرولوژیکی قرار دارد و تداوم این وضعیت می‌تواند آثار برگشت‌ناپذیری بر تعادل کمی و کیفی آبخوان برجای گذارد. از این‌رو، تدوین برنامه‌های مدیریتی مبتنی بر داده‌های پایش، محدودسازی برداشت در دوره‌های بحرانی، و تقویت تغذیه آبخوان از طریق سازوکارهای طبیعی و مصنوعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای حفظ پایداری منابع آب منطقه است.

است. به‌کارگیری مدل‌های عددی جریان و انتقال املاح نیز می‌تواند در پیش‌بینی رفتار آینده آبخوان و ارزیابی خطر پیشروی شوری نقش مهمی ایفا کند (Miroofi and Meghlouli Bayat, 2009). در مجموع، شواهد حاصل از این هیدروگراف بیانگر آن است که بدون مداخلات مدیریتی فوری و هدفمند، روند افت سطح آب زیرزمینی و تهدید شوری در دشت میناب می‌تواند در سال‌های آینده تشدید شود. نتایج این پژوهش نشان داد که دشت میناب در



شکل (۲): هیدروگراف معرف منطقه مورد مطالعه

با متغیر زمان، نشان‌دهنده کاهش پیوسته تراز سطح آب با متغیر زمانی در سطح کل دشت است. افت مداوم تراز سطح آب زیرزمینی، حاکی از عدم تعادل بین تخلیه و تغذیه آبخوان است و نشان‌دهنده‌ی قرارگیری دشت میناب در وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی است [۲، ۴، ۹]. این یافته‌ها با تحلیل هیدروگراف بلندمدت کاملاً همسو است، زیرا هیدروگراف نیز کاهش کلی تراز را تأیید می‌کند [۱، ۵]. لذا، اقدامات مدیریتی برای تعادل‌بخشی به منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از تشدید مخاطرات زیست‌محیطی، از جمله شورشدگی آبخوان، ضروری است.

تحلیل رابطه تراز آب زیرزمینی با زمان با آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال

نتایج حاصل از آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال نشان داد که در ۸۲ درصد از چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه (۱۴ چاه از مجموع ۱۷ چاه)، متغیر تراز سطح آب زیرزمینی مورد بررسی، دارای همبستگی قوی و منفی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد با متغیر زمان بوده است (جدول ۱) و این بدان معناست که در طول زمان تراز سطح آب زیرزمینی مرتباً در حال کاهش بوده است. در دو چاه مشاهده‌ای دیگر P7 و P8 نیز متغیر تراز سطح آب زیرزمینی دارای همبستگی منفی اما عدم معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد با متغیر زمان بود. تنها در یک چاه مشاهدات P17، متغیر تراز سطح آب زیرزمینی با متغیر زمان دارای همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ بود. نرخ متوسط سالانه کاهش تراز آب زیرزمینی در چاه‌های دارای همبستگی منفی معنی‌دار

جدول (۱): ضریب همبستگی میان متغیر زمان (به عنوان متغیر مستقل) و تراز آب زیرزمینی (به عنوان متغیر وابسته) یا آزمون رتبه ای کندال

چاه مشاهداتی	ضریب همبستگی کندال
Observation well	Kendall correlation coefficient
P1	-۰/۴۲۴**
P2	-۰/۲۸۴**
P3	-۰/۴۷۲**
P4	-۰/۸۹۹**
P5	-۰/۶۴۳**
P6	-۰/۵۱۶**
P7	-۰/۱۴۱
P8	-۰/۰۳۸
P9	-۰/۴۴۸**
P10	-۰/۲۹۳**
P11	-۰/۷۲۰**
P12	-۰/۸۲۴**
P13	-۰/۶۹۰**
P14	-۰/۸۱۸**
P15	-۰/۹۴۱**
P16	-۰/۹۷۷**
P17	۰/۲۲۰

** معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد

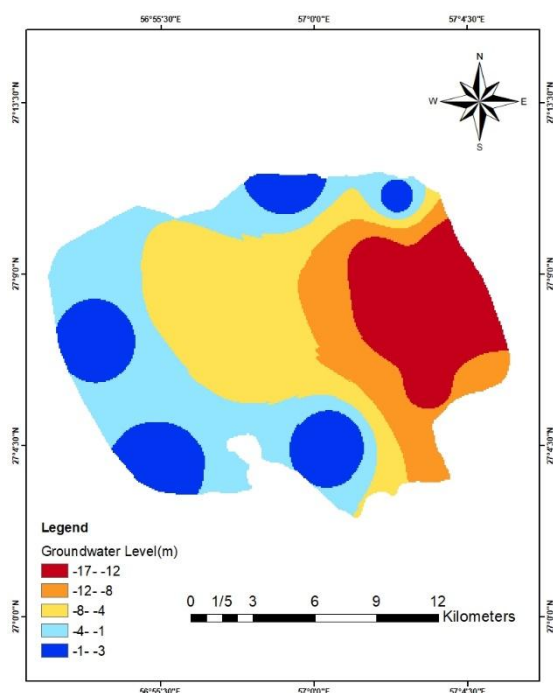
به طوری که نوار وسیعی از حوضه، به ویژه در امتداد مرزهای جنوبی و شرقی، تحت تأثیر ترازهای بسیار پایین سطح آب زیرزمینی در بخش های مرکزی و شرقی قرار گرفته اند که این امر ناشی از فراتر رفتن نرخ برداشت از ظرفیت تغذیه طبیعی آبخوان است (شکل ۵). الگوی کلی تراز سطح آب زیرزمینی حاکی از آن است که مناطق شمالی و شمال غربی آبخوان دارای بیشترین مقدار و مناطق مرکزی و شرقی، کمترین میزان را تجربه کرده اند. این الگو قویاً نشان دهنده تغییر الگوی بهره برداری و تمرکز برداشت در بخش های مرکزی و شرقی آبخوان طی دهه اخیر است که نیازمند مداخله مدیریتی فوری می باشد. بررسی تغییرات کمی و مکانی تراز سطح آب زیرزمینی در طول چهار دوره زمانی مجزا، تصویری واضح از وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی این دشت با اهمیت ارائه می دهد. تحلیل نقشه های پهنه بندی تراز آب زیرزمینی نشان می دهد که این منابع تحت یک فشار تخلیه شدید قرار گرفته اند، به طوری که حداکثر دامنه کلی تغییرات تراز ثبت شده در طول این بازه زمانی، از سطح مثبت ۶ متر (شکل ۳) تا سطح بحرانی منفی ۲۲ متر (شکل ۶) در دوره چهارم گسترش یافته است. این تغییرات افراطی، نمایانگر ناپایداری شدید هیدرولوژیکی است. بررسی نقشه های پهنه بندی نشان داد که در نواحی شرقی آبخوان افت قابل توجه تراز سطح آب زیرزمینی معادل ۷ متر با تغییر از تراز ۱۵- متر در دوره چهارساله اول (شکل ۳) به ۲۲- متر در دوره چهارساله چهارم (شکل ۶) به ثبت رسیده است. در نواحی جنوبی آبخوان نیز کاهش معنی دار تراز سطح آب زیرزمینی معادل ۸ متر با تغییر از تراز ۶+ متر در دوره چهارساله اول (شکل ۳) به ۴- متر در دوره چهارساله چهارم (شکل ۶) مشاهده گردید. به همین ترتیب در نواحی مرکزی آبخوان نیز تراز سطح آب زیرزمینی معادل ۶ متر با تغییر از تراز ۵- متر در دوره چهارساله اول (شکل ۳) به ۱۱- متر در دوره چهارساله چهارم (شکل ۶) ملاحظه گردید. از منظر مکانی، گسترش سطح ترازهای منفی و افزایش عمق آن ها در دوره های بعدی، مؤید تخریب گسترده حجم قابل توجهی از ذخایر آبخوان است. این افت سریع و عمیق، نه تنها امنیت آبی

نقشه پهنه بندی تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در دوره های زمانی مختلف

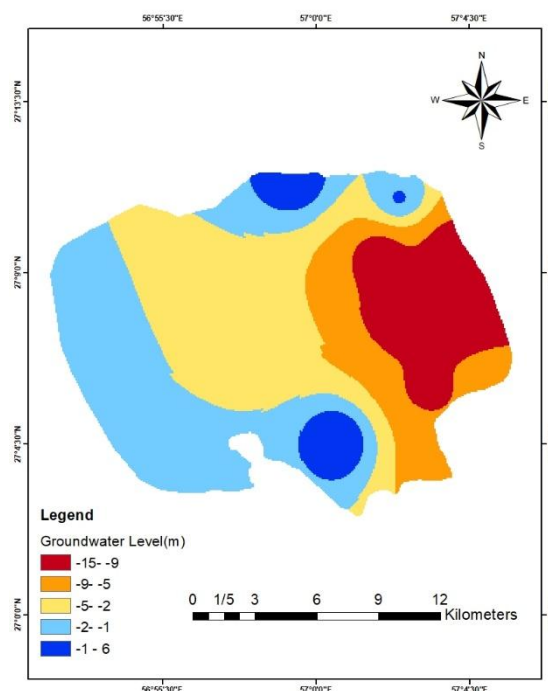
مقایسه نقشه های پهنه بندی تراز سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در شکل های ۳ الی ۶ نشان داد که در هر دوره زمانی چهار ساله تراز آب زیرزمینی در کل آبخوان نسبت به دوره زمانی چهارساله ماقبل آن به وضوح کاهش یافته است. با توجه به در دوره اول، گستره وسیعی از منطقه به ویژه نواحی جنوبی، شمالی و غربی تحت تأثیر ترازهای بالاتر بوده که نشان دهنده شرایط تغذیه مناسب در آن زمان است (شکل ۳). با این حال، نقشه پهنه بندی تراز آب زیرزمینی در دوره های دوم و سوم، کانون های افت (به صورت گسترده تر در بخش های مرکزی و شرقی ظاهر شده اند که بیانگر افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی در این مناطق است (شکل ۴ و ۵). دوره چهارم، اوج فشار را نشان می دهد؛



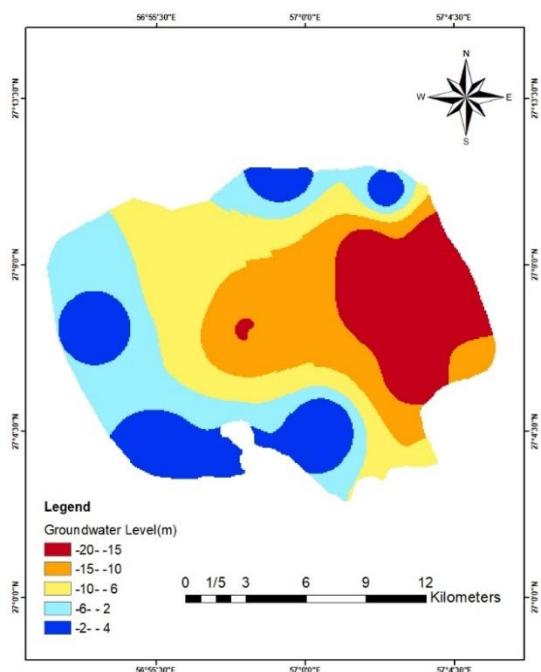
آینده را به خطر می‌اندازد، بلکه دو ریسک عمده زیست‌محیطی را به همراه دارد: افزایش احتمال بروز فرونشست زمین ناشی از فشردگی لایه‌های آبرفتی و در صورت قرارگیری منطقه در نزدیکی منابع آب شور، خطر نفوذ و آلودگی آبخوان شیرین. به طور خلاصه، دامنه تغییرات ثبت شده از +۶ تا -۲۲ متر، یک زنگ خطر جدی است که ضرورت دارد مدیریت منابع آب با اتخاذ تدابیر سخت‌گیرانه و فوری، تعادل بین برداشت و تغذیه آبخوان را مجدداً برقرار سازد تا از پیامدهای غیرقابل بازگشت این افت شدید جلوگیری به عمل آید.



شکل (۴): میانگین تراز سطح آب زیرزمینی در دوره دوم سال
آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۶



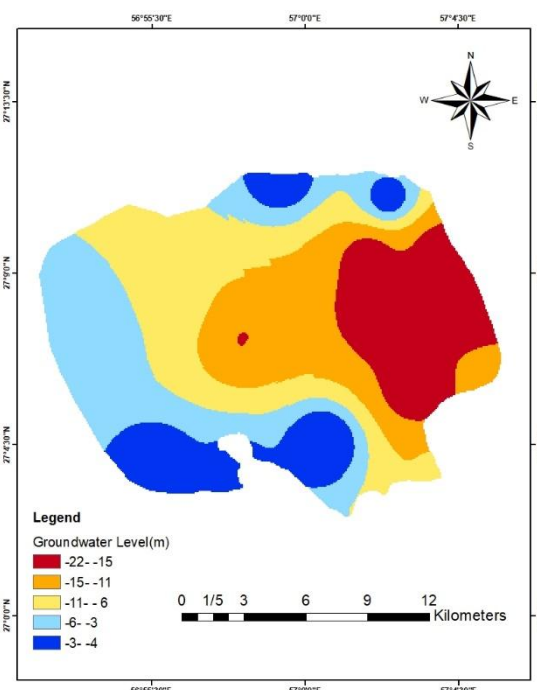
شکل (۳): میانگین تراز سطح آب زیرزمینی در دوره اول سال
آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۲



شکل (۵): میانگین تراز سطح آب زیرزمینی در دوره سوم سال
آبی ۱۳۹۷-۱۴۰۰

در دوره سوم نیز الگوهای جریان هم‌چنان در سطح دشت پایدار مانده و شواهدی مبنی بر تغییر جهت جریان ناشی از افت تراز آب زیرزمینی در کل دشت پدیدار نگردید (شکل ۹). همگرایی پیکان‌ها در مرکز منطقه به سمت یک کانون افت جدید و گسترش نواحی با تراز سطح آب زیرزمینی بیشتر در مناطق شرقی و مرکزی، گویای افزایش شیب هیدرولیکی و شتاب گرفتن حرکت آب به سمت این نواحی بود. این تغییرات، حاکی از افزایش تنش بر آبخوان مورد مطالعه بود. در دوره چهارم، نرخ افت تراز آب زیرزمینی به طور محسوسی تشدید شده است (شکل ۱۰). گسترش نواحی با پایین‌ترین سطح آب زیرزمینی (افت شدید) به ویژه در شرق و جنوب شرقی نقشه، نشان‌دهنده تخلیه و برداشت قابل توجه منابع آب زیرزمینی است. نواحی بالاترین سطح آب (تغذیه مناسب) عمدتاً به غرب و شمال غرب محدود شده و وسعت آن‌ها نسبت به دوره‌های پیشین کاهش چشمگیری یافته است. جهت جریان آب‌های زیرزمینی هم‌چنان از غرب به شرق و از شمال و جنوب به سمت مرکز دشت بوده و الگوی جهت جریان تقریباً مانند دوره‌های چهار ساله‌ی قبلی است، اما به طور فزاینده‌ای به سمت مناطق با افت شدید سطح آب (مناطق کم‌عمق در شرق) هدایت می‌شود که این امر، تمرکز برداشت‌ها یا اثرات نامساعد هیدروژئولوژیکی را در این مناطق نشان می‌دهد. در مجموع، مقایسه تراز سطح آب زیرزمینی از دوره اول تا چهارم، نمایانگر یک سیر نزولی و تخریبی در وضعیت آبخوان مورد مطالعه است به طوری که شرایط آبخوان از حالت نسبتاً مطلوب و پایدار در دوره اول به سمت تشدید افت تراز آب زیرزمینی و کاهش قابل ملاحظه نواحی تغذیه در دوره‌های بعدی تغییر پیدا کرده است لذا اوضاعیت اکنون آبخوان ضرورت بازنگری جدی در مدیریت منابع آب زیرزمینی، کنترل برداشت‌ها و اتخاذ راهکارهای پایدار برای احیای منابع آب را به شدت مورد تأکید قرار می‌دهد.

تنها پژوهشی انجام شده در ارتباط با مطالعه حاضر در استان هرمزگان مطالعه‌ای است که توسط دست‌انداز و همکاران (۱۴۰۲) صورت پذیرفت. در این پژوهش تراز آب زیرزمینی، جهت جریان و هیدروگراف واحد آبخوان دشت



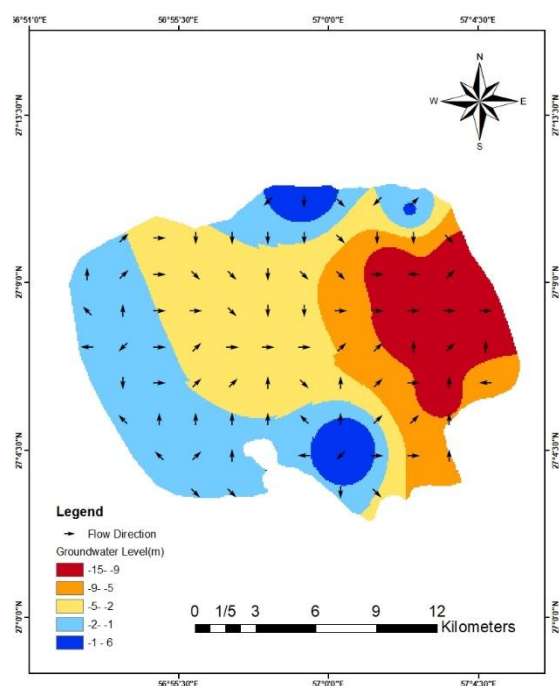
شکل (۶): میانگین تراز سطح آب زیرزمینی در دوره چهارم سال آبی ۱۴۰۴-۱۴۰۱

تحلیل تغییرات دینامیک آب زیرزمینی و جهت جریان در چهار دوره زمانی

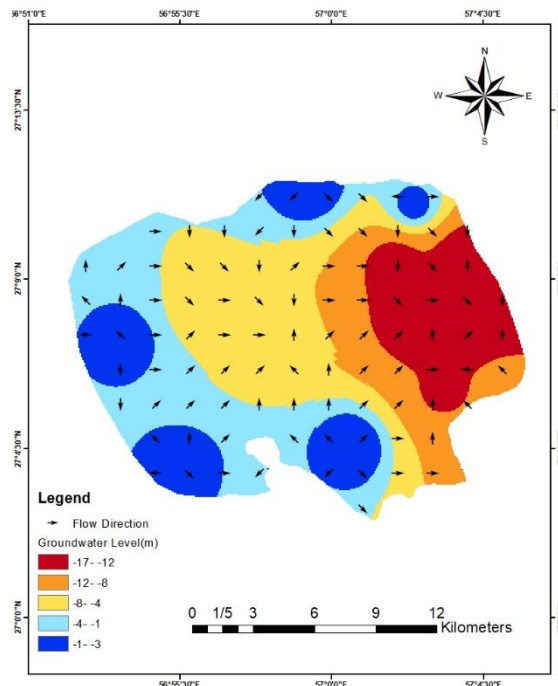
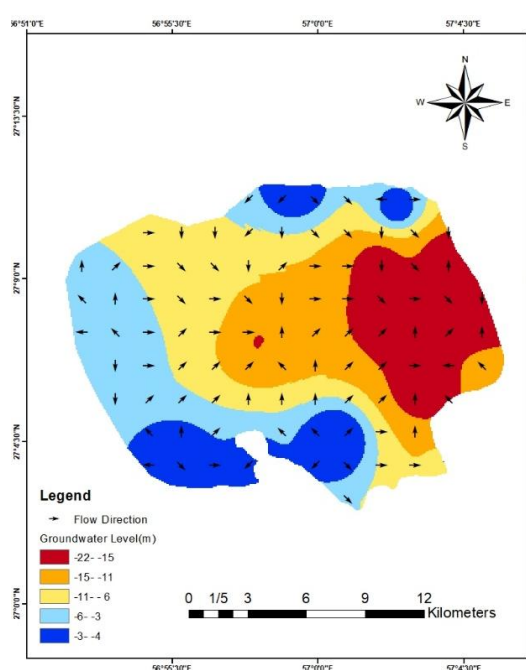
مطالعه مقایسه‌ای چهار دوره زمانی، تحولات قابل‌توجهی را در وضعیت آبخوان منطقه مورد مطالعه، به ویژه در تراز آب زیرزمینی، به تصویر می‌کشد. در دوره چهارم، اول، نشانه‌هایی از وضعیت مطلوب منابع آب زیرزمینی مشهود است؛ تراز آب در بخش‌های وسیعی از منطقه، خصوصاً نواحی مرکزی، شمالی و غربی آبخوان، در سطوح بالاتری قرار داشته که حاکی از تغذیه مناسب بوده است (شکل ۷). جهت جریان عمدتاً از غرب به سمت شرق و از شمال به جنوب به سمت مرکز بوده که پویایی سیستم و غنی بودن منابع در آن زمان را نشان می‌دهد. با ورود به دوره دوم، هم‌چنان جهت کلی جریان آب زیرزمینی شبیه به دوره‌ی بوده و با وجود افت تراز آب زیرزمینی نسبت به دوره‌ی چهارم، اول الگوی جریان نسبتاً پایدار و یکنواخت به نظر می‌رسد، که نشان‌دهنده حرکتی مشخص به سمت مناطقی با تراز سطح آب زیرزمینی پایین‌تر است (شکل ۸).



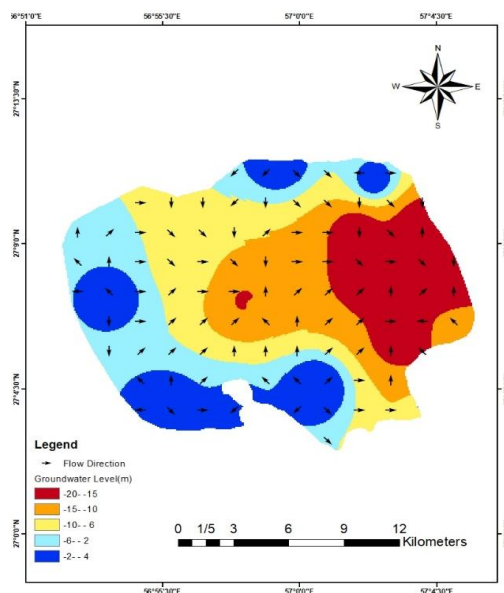
کهورستان واقع در شمال غرب استان هرمزگان در مقیاس- های زمانی و مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Dastāndāz et al., 2023). یافته‌های این محققین حاکی از آن بود که هیدروگراف واحد دشت کهورستان در طی یک دوره ۱۹ ساله دارای یک روند کاهشی است و با افت تراز آب زیرزمینی بیش از ۵ متر مواجه است. نتایج آنان نشان داد که تراز آب زیرزمینی در تمامی چاه‌های مشاهداتی از همبستگی منفی قوی با زمان برخوردار است. همچنین ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در این آبخوان نشان از افت قابل توجه آن در ده سال انتهایی دوره مورد مطالعه داشت و دلیل اصلی این امر را به برداشت‌های بی‌رویه و کنترل نشده از آبخوان نسبت دادند. تفسیر خروجی نقشه‌های جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت نشان داد که در دو دوره ابتدایی مطالعه جهت جریان همسو با جهت شیب غالب دشت کهورستان است، اما در دو دوره انتهایی جهت جریان معکوس گردیده است که این امر را به تراکم زیاد چاه‌های بهره‌برداری در بالادست ناحیه مورد مطالعه، برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان، عدم تغذیه آبخوان ارتباط دادند.



شکل (۷): الگوی جریان آب زیرزمینی در دوره اول سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۲



شکل (۸): الگوی جریان آب زیرزمینی در دوره دوم سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۶
شکل (۹): الگوی جریان آب زیرزمینی در دوره سوم سال آبی ۱۳۹۷-۱۴۰۰



شکل (۱۰): الگوی جریان آب زیرزمینی در دوره چهارم سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۴



نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که دشت میناب در بازه ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۴ با کاهش حدود ده متری تراز سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است؛ افتی که از کاهش تاب‌آوری آبخوان و ورود آن به مرحله‌ای بحرانی حکایت دارد. تحلیل‌های همبستگی آماری با آزمون رتبه‌ای کندال نیز بیانگر آن بود که تراز سطح آب زیرزمینی در ۸۲ درصد از چاه‌های مشاهداتی دشت میناب دارای همبستگی منفی معنی‌دار با متغیر زمان بوده که این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش ممتد تراز سطح آب زیرزمینی ناشی از هم‌افزایی عوامل انسانی و اقلیمی است؛ از جمله این عوامل می‌توان به کاهش بارش‌ها، خشکسالی‌های پیاپی، افزایش فشار بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، رشد تقاضای آب، توسعه ناهماهنگ کشت محصولات آب‌بر، تغییرات اقلیمی و

منابع

جایگزینی الگوهای سنتی بهره‌برداری با استخراج پرشدت از چاه‌های عمیق اشاره نمود. ترسیم نقشه‌های پهنه بندی تراز آب زیرزمینی در دوره‌های زمانی چهارساله نشان داد که بیشترین سطح افت آب زیرزمینی مربوط به نواحی شرقی آبخوان میناب به میزان ۷ متر در طول یک دوره ۲۵ ساله می‌باشد. خروجی قشه‌های جهت جریان آب زیرزمینی حاکی از آن بود که الگو و جهت جریان در طول دوره مورد مطالعه تغییر محسوسی نداشته است. شدت افت تراز آب زیرزمینی در پهنه دشت یکنواخت نبود و برخی نواحی با کاهش محسوس‌تری در تراز آب زیرزمینی مواجه بودند. نتایج این پژوهش آشکار ساخت که مدیریت پایدار دشت میناب مستلزم کنترل برداشت‌های مازاد، پایش مستمر سطح آب زیرزمینی، بازتخصیص مبتنی بر ظرفیت آبخوان، و حرکت به‌سوی حکمرانی داده‌محور منابع آب است.

Adeli, B., Kangarani, H., Sadodin, A., Bazrafshan, O. and Armin, M., 2018. Using the WQI method and the Man-Kendall test to assess the qualitative and quantitative status of groundwater aquifers (case study: Sarkhoon plain, Hormozgan province). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5, pp.801–811. (in Persian)

Adimalla, N. and Taloor, A.C., 2020. Groundwater quality and health risk assessment in a rural area of Telangana, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, p.100418.

Al-Bahrani, H.T., Al-Jubouri, H.M. and Al-Mhdawi, A.M., 2022. Integrated remote sensing and GIS approach for groundwater quality assessment and mapping in Najaf Governorate, Iraq. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, p.100861.

Bahrani, H.A., Mousavi, S.F., Hashemi, S.A. and Rezaei, M., 2020. Climate change impacts on groundwater resources: A case study of Iran. *Water Resources Management*, 34(12), pp.3761–3780.

Barani, G.A. and Karami, A., 2019. Seawater intrusion in coastal aquifers: A review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, p.100589.

Bahrani, M., Khaksar, E., & Bahrani, A. (2022). Groundwater quality evaluation for potable and irrigation uses in the semi-arid region of southern Iran. *Irrigation and Drainage*, 71(3), 749–765.

Dastāndāz, M., Safari, A. and Hosseini, M., 2023. Analysis of groundwater level changes and flow pattern in Kahurstan Plain, Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 27(1), pp.155–171.

Deep, A., Kumar, R., Kaur, S. and Kaur, S., 2025. Groundwater level decline in Kurukshetra, Haryana, India: Causes, impacts, and management strategies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), p.33.

Hossain, M.S., Rahman, M.M. and Islam, M.R., 2024. Groundwater quality and quantity assessment in Dhaka, Bangladesh: Impacts of urbanization and industrialization. *Environmental Pollution*, 345, p.120987.

Karunanidhi, S., Kanga, S. and Kumar, A., 2019. Role of groundwater in global water security. In *Sustainable Groundwater Management* (pp. 1–16). Springer, Singapore.

Kareem, S.L., 2021. Global groundwater depletion: Causes and consequences. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 3(1), pp.78–95.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of*

Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315–328.

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016.

Mann, H.B., 1945. Non-parametric analysis of sequential data. *Econometrica*, 13(3), pp.245-260.

Mehrabinejad, S., Zare, M. and Alipour, S., 2025. Projected impacts of climate change on renewable groundwater resources in Iran. *Journal of Arid Environments*, 233, p.114567.

Miroofi, F. and Meghlouli Bayat, M., 2009. Land subsidence in Iran: Causes, consequences, and mitigation. *Natural Hazards*, 51(3), pp.405-418.

Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Bagley, S.W. and Nakai, M.M., 2018. Emerging data sets reveal unprecedented sustained groundwater loss in the world's drylands. *Nature Geoscience*, 11(12), pp.948-954.

Wu, G., Liu, J., Li, S. and Zhang, L., 2026. Groundwater recharge potential mapping using GIS and AHP in a semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 647, p.129543.