تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال بیست و یکم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴
Volume 21, No.2, Summer 2025 (IR-WRR)
۷۱-۵۳

تهیه الگوی مدیریت پایدار آب زیرزمینی در مناطق آبرفتی-ولکانیک (منطقه مطالعاتی: آبخوان اردبیل)

سید مهدی حسینی[۱]، مجید خلقی[۲*] و عبدالحسین هورفر[۳]

چکیده

با توجه به مشخصات خاص هر دشت، مدیریت آب‌های زیرزمینی نمی‌تواند صرفاً از الگوهای تدوین‌شده در سایر کشورها پیروی کند. مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در آبخوان ولکانیک—آبرفتی به‌دلیل ناهمگنی شدید ساختاری، تخلخل ثانویه بالا و حساسیت به شرایط اقلیمی، نیازمند رویکردی بومی و ناحیه‌محور است. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی بومی و عملیاتی برای مدیریت پایدار آبخوان آبرفتی—ولکانیک دشت اردبیل انجام شد. در سال آبی ۹۷—۱۳۹۶، سطح آب زیرزمینی به‌طور میانگین ۰/۵۷ متر افت داشته و کسری حجم مخزن برابر با ۲۰/۰۹ میلیون مترمکعب برآورد شد. برای طراحی سیاست‌های مدیریت پایدار، آبخوان به سه ناحیه مدیریتی، بر اساس شدت افت و تبادل رودخانه—سفره تقسیم شد. مدل MODFLOW-NWT توسعه یافته، واسنجی و صحت‌سنجی شد. در گام اول، طراحی سناریوها براساس کاهش برداشت از دشت و در گام دوم طبق دوره‌های اقلیمی، طراحی و در مدل اعمال شد. افق زمانی مدیریت با توجه به روند فزاینده برداشت‌های غیرمجاز و تغییرات اقلیمی، ۵ ساله درنظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در سناریوی بهینه، کاهش ۱۰ و ۵ درصدی برداشت در نواحی فوق‌بحرانی و بحرانی، افت سالانه را به ۰/۴ متر و کسری مخزن را به ۱۵/۵ میلیون مترمکعب کاهش داد. این رویکرد، با کاهش برداشت، با حفظ فعالیت اقتصادی کشاورزان، مقبولیت اجتماعی سیاست‌های پایدار را افزایش می‌دهد. نتایج این مطالعه علاوه بر ارائه الگویی اجرایی برای مناطق مشابه، قابلیت استفاده در سیاست‌گذاری در سطوح استانی، به‌ویژه در شرایط خشک‌سالی و تنش آبی را داشته و چارچوبی تلفیقی برای پایداری هیدروژئولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: آبخوان ولکانیک، شبیه‌سازی، مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، مدل‌سازی MODFLOW، ناحیه‌بندی هیدروژئولوژیکی.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۲/۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۳/۱۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

Sustainable Groundwater Management Framework in Alluvial–Volcanic Regions (Case Study: Ardabil Aquifer)

S. M. Hosseini[1], M. Kholghi [2]and A. Hoorfar [3]*

Abstract

Implementing groundwater management strategies from other countries is often ineffective due to the distinct characteristics of each plain. In volcanic–alluvial aquifers like the Ardabil Plain, effective groundwater governance requires a localized approach because of structural heterogeneity, significant secondary porosity, and sensitivity to climate variability. This study developed a tailored strategy for sustainable groundwater management specific to the Ardabil Plain. During the 2017–2018 hydrological year, the aquifer experienced an average water level decline of 0.57 meters and a storage deficit of 20.09 million cubic meters. In this study, to support targeted decision-making, the aquifer was divided into three management zones based on water level decline severity and surface–groundwater interactions. A MODFLOW-NWT model was developed, calibrated, and validated to simulate aquifer behavior. Management scenarios were designed initially based on reducing groundwater extraction. These were later refined to consider varying climatic conditions. A five-year planning horizon was adopted to account for the increasing unauthorized withdrawals and climatic shifts. Results indicated that under the optimal scenario—featuring respective 10 and 5 percent reduction in extraction in supercritical and critical zones—annual drawdown was limited to 0.4 meters and the storage deficit was reduced to 15.5 million cubic meters. This strategy not only alleviates pressure on the aquifer but also maintains agricultural productivity, promoting greater public acceptance of sustainable policies. The approach presented here offers a replicable framework for other regions facing similar hydrogeological and climatic challenges, supporting integrated policy development that balances environmental, economic, and social sustainability in water-scarce settings.

Keywords: MODFLOW Modeling, Simulation, Sustainable Groundwater Management, Volcanic Aquifer, Hydrogeological Zoning.
Received: April 26, 2025
Accepted: June 3, 2025

1- M.Sc. Graduate, Irrigation and Reclamation Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Colleges of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Kraj, Iran. E-mail: mahdi.hoseini@ut.ac.ir
2- Professor, Irrigation and Reclamation Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Colleges of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Kraj, Iran. E-mail: kholghi@ut.ac.ir
3- Professor, Irrigation and Reclamation Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Colleges of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Kraj, Iran. E-mail: hoorfar@ut.ac.ir
*- Corresponding Author

Doi: 10.22034/iwrr.2025.519415.2855

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، نقش اساسی در تأمین نیازهای آبی بیش از دو میلیارد نفر در سراسر جهان ایفا می‌کنند (eau, 2022). با رشد جمعیت و محدودیت منابع آب سطحی، فشار بر آبخوان‌ها افزایش یافته و منجر به چالش‌هایی مانند افت سطح ایستابی، کاهش حجم مخزن، افت کیفیت آب و فرونشست زمین شده است (Famiglietti, 2014; Herrera-García et al., 2021; Jasechko & Perrone, 2021). این چالش‌ها لزوم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را بیش‌ازپیش آشکار کرده‌اند (Bairami et al., 2024a; Hoseini & khoshsimaie Chenar, 2025; Kord et al., 2019).

مدیریت منابع آب زیرزمینی شامل دو رویکرد اصلی است: برداشت مطمئن[1]، که هم ترازی و تعادل آبخوان را دیکته می‌کند و حد حداکثر بهره‌برداری بدون آسیب به آبخوان را مدنظر دارد و مدیریت پایدار[2]، که بر حفاظت و توسعه منابع بدون پیامدهای معنی‌دار محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی تأکید می‌کند (Alley & Leake, 2004; Sophocleous, 2000). در این راستا، مطالعات مختلفی انجام شده است. (Borowiecka et al., 2024) تأثیر بهره‌برداری بی‌رویه بر کاهش سطح ایستابی و تغییر اکوسیستم‌های وابسته را بررسی کرده‌اند. Yadeta et al. (2024) از GIS و سنجش از دور برای شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی بهره برده و بر اهمیت تحلیل مکانی در مدیریت منابع تأکید کرده‌اند. همچنین، Alao et al. (2024) نشان داده‌اند که برداشت بیش‌ازحد و تغییرات اقلیمی منجر به افزایش شوری آب زیرزمینی در قطر شده و مدیریت این منابع با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب و GIS ضروری است.

علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در تحلیل و مدل‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی، هنوز خلأهای علمی قابل‌توجهی در درک دقیق و مدیریت پایدار آبخوان‌های ولکانیک وجود دارد (Sbarbati et al., 2025). بیشتر مطالعات پیشین عمدتاً بر روی آبخوان‌های آبرفتی و کارستی متمرکز بوده‌اند، که به‌دلیل همگنی نسبی، تخلخل اولیه بالا، و رفتار هیدرولیکی قابل پیش‌بینی‌تر، شرایط مناسبی را برای شبیه‌سازی عددی و طراحی سناریوهای مدیریتی فراهم کرده‌اند (Goldscheider, 2015; Yin et al., 2021). در مقابل، آبخوان‌های ولکانیک با ویژگی‌هایی چون ناهمگنی ساختاری پیچیده، تخلخل ثانویه غالب، و وابستگی شدید به شکستگی‌ها و زون‌های گسلی، چالش‌های بنیادی در تعیین ساختار جریان، برآورد پارامترهای هیدرولیکی، و طراحی مدیریت بهره‌بردارانه ایمن و پایدار ایجاد می‌کنند (Cabrera & Custodio, 2004; Custodio, 2007; Jódar et al., 2020). به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای جامع بر روی آبخوان ولکانیک آمیتا در ایتالیا، نتایج نشان دادند که ناهمگنی لیتولوژیکی و ارتباط ساختاری با سامانه‌های زمین‌گرمایی زیرین، کنترل‌کننده‌های اصلی جریان آب زیرزمینی هستند (Doveri et al., n.d.). مطالعه دیگری در منطقه سالاک–پانگرانگو در اندونزی، بر اهمیت تحلیل ایزوتوپی و ژئوالکتریک در شناسایی پیوستگی هیدرولیکی لایه‌های ولکانیک تأکید کرد (Silohadi et al., 2025). همچنین، Walraevens et al. (2025) در بررسی خود بر روی متمرو در تانزانیا، نشان دادند که لایه‌های متناوب گدازه‌های شکسته و پیروکلاستیک، رفتار هیدرولیکی غیرخطی و پاسخ‌پذیری بالایی به تغییرات اقلیمی دارند. این شواهد ضرورت توسعه مدل‌های ترکیبی، مبتنی بر داده‌های چندمنظوره و همگرا، را برای مدیریت مؤثر آبخوان‌های ولکانیک بیش از پیش آشکار می‌سازند.

در برخی مناطق، به‌ویژه در دامنه‌های آتشفشانی و پای‌آب‌سنگ‌های کوهستانی، شرایط زمین‌ساختی و فرآیندهای رسوبی منجر به تشکیل آبخوان‌های ترکیبی ولکانیک–آبرفتی شده‌اند. این سامانه‌ها شامل لایه‌های درهم‌تنیده‌ای از گدازه‌ها، پیروکلاستیک‌ها و رسوبات آبرفتی هستند که اهمیت شکاف دانشی در خصوص این سامانه‌ها از آن‌جا ناشی می‌شود که به‌دلیل ناهمگنی شدید، تخلخل ثانویه غالب، و وابستگی بالا به شکستگی‌ها، دارای رفتار هیدرولیکی پیچیده و غیرخطی هستند. عدم شناخت کافی از این ویژگی‌ها می‌تواند به مدل‌سازی نادرست، برآورد ناصحیح بیلان، و نهایتاً سیاست‌گذاری‌های ناکارآمد منجر شود؛ که پیامدهایی مانند افت شدید سطح ایستابی، شوری منابع، کاهش پایداری اکولوژیکی و شکست در برنامه‌های مدیریت بحران خشک‌سالی را به دنبال دارد (Cabrera & Custodio, 2004; Sbarbati et al., 2025). در این نوع آبخوان‌ها، لایه‌های شکسته‌ی ولکانیک معمولاً مسیرهای هدایت‌کننده جریان و لایه‌های آبرفتی، نواحی ذخیره‌ساز با تخلخل بالا هستند؛ این ترکیب ناهمگون موجب بروز رفتار هیدرولیکی غیرخطی، جریان‌های چندمسیری و تفاوت شدید در مقادیر پارامترهای کلیدی مانند T و K می‌شود، که مدیریت، مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد آبخوان را به‌مراتب دشوارتر از آبخوان‌های همگن‌تر آبرفتی یا کارستی می‌سازد (Cabrera & Custodio, 2004; Sbarbati et al., 2025). در مطالعه‌ای (Husna et al., 2023) در منطقه رنتو اندونزی نشان دادند که این ترکیب ساختاری نشان‌دهنده ویژگی‌های پیچیده هیدرولیکی آبخوان‌های ترکیبی بود. نتایج این مطالعه نشان داد که لایه‌های ولکانیک به‌عنوان زون‌های هدایت‌کننده، جریان آب را از طریق شکستگی‌ها و ساختارهای تکتونیکی تسهیل می‌کنند، در حالی که لایه‌های آبرفتی، به‌ویژه در نواحی شهری و توسعه‌یافته، به‌عنوان مناطق

ذخیره‌ساز با تخلخل بالا عمل کرده و ذخیره آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این سامانه‌ها به دلیل تفاوت‌های شدید در ویژگی‌های هیدرولیکی و ارتباط پیچیده بین لایه‌ها، نیازمند مدل‌های پیچیده‌تر برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار جریان و پایداری منابع آب هستند. با وجود اهمیت فزاینده این نوع سامانه‌ها در تأمین آب برای مناطق کوهپایه‌ای و حاشیه‌نشین، مطالعات جامع در مقیاس منطقه‌ای با رویکرد یکپارچه همچنان اندک است و نیاز به تحقیقات بیشتری برای مدیریت منابع آبی در این مناطق وجود دارد.

تجارب جهانی نشان می‌دهند که کشورهای مختلف با توجه به ساختار حکمرانی، شرایط اقلیمی و میزان فشار بر منابع آب زیرزمینی، رویکردهای متنوعی را برای مدیریت پایدار اتخاذ کرده‌اند. در ایالات متحده آمریکا، ایالت‌هایی نظیر آریزونا، کالیفرنیا و کانزاس با تصویب قوانین خاص مانند قانون مدیریت فعال آب زیرزمینی[3] (AMA) از سال ۱۹۸۰ در آریزونا و قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی[4] (SGMA) در کالیفرنیا از سال ۲۰۱۴، اقدامات مهمی در جهت تنظیم برداشت، تغذیه مصنوعی و منطقه‌بندی مدیریت منابع انجام داده‌اند (Babbitt et al., 2018; Traylor et al., 2024; Ward, 2025). در اروپا، چارچوب‌های سیاستی نظیر دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا از سال ۲۰۰۰ منجر به توسعه برنامه‌های حفاظتی در بسیاری از کشورها شده است. در اسپانیا نیز با اتخاذ الگوی مدیریت مشارکتی از سال ۲۰۰۴، بهبود بهره‌وری و شفاف‌سازی فرآیند تخصیص آب زیرزمینی حاصل شده، هرچند مشکلاتی چون برداشت غیرمجاز همچنان پابرجاست (Narimani et al., 2025; Ross & Martinez-Santos, 2010). این تجارب، به‌ویژه در مواجهه با سامانه‌های هیدروژئولوژیکی پیچیده، نشان می‌دهند که تلفیق ابزارهای سیاست‌گذاری، مشارکت ذی‌نفعان و سازوکارهای نظارتی می‌تواند در دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مؤثر باشد (Ross & Martinez-Santos, 2010; Ward, 2025). بااین‌حال، تطبیق این سیاست‌ها با شرایط خاص آبخوان‌های ولکانیک–آبرفتی، به‌ویژه به‌دلیل ناهمگنی ساختاری، پیچیدگی دینامیک جریان، و تفاوت‌های منطقه‌ای، همچنان نیازمند بررسی‌های موضعی و بومی‌سازی دقیق است (Cabrera & Custodio, 2004; Sbarbati et al., 2025).

این پژوهش با هدف ارائه الگویی جامع برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های ولکانیک–آبرفتی انجام شده است. در این مطالعه، شاخص‌های پایداری با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از آبخوان در سال‌های اخیر تعیین شده و روش ناحیه‌بندی به‌عنوان رویکردی نوین برای تحلیل شرایط هیدرولوژیکی و مدیریتی به کار گرفته شده است. این پژوهش با ترکیب داده‌های میدانی، مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیل مکانی، رویکرد جامعی برای ارزیابی و مدیریت آبخوان‌های ولکانیک ارائه می‌دهد. شاخص‌ها تحت سناریوهای مختلف مدیریتی و اقلیمی ارزیابی شده‌اند تا امکان پیش‌بینی تغییرات منابع آب زیرزمینی در آینده بررسی شود. درنهایت، با انتخاب سناریوی برتر، الگویی برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در مناطق آبرفتی–ولکانیک ارائه شده است که می‌تواند به‌عنوان راهکاری برای مدیریت منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری هم‌زمان سه مؤلفه: شاخص‌گذاری پایداری، مدل‌سازی عددی، و ناحیه‌بندی مکانی برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی در یک سامانه آبخوان ولکانیک–آبرفتی است، رویکردی که پیش‌تر در مطالعات مشابه با این سطح از جامعیت و دقت در مناطق هیدروژئولوژیکی ناهمگن کمتر گزارش شده است. علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه می‌توانند در بهبود برنامه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب، طراحی راهکارهای سازگار با تغییرات اقلیمی و تدوین سیاست‌های منطقه‌ای برای افزایش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

آبخوان دشت اردبیل با مساحت ۹۶۹ کیلومتر مربع، واقع در شمال غرب ایران، بخشی از استان اردبیل، با مساحت۴۸۰۴/۷ کیلومترمربع است. این دشت بین عرض‌های جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد. از نظر توپوگرافی، منطقه شامل ارتفاعات به وسعت ۳۷۳۰/۰۷ کیلومترمربع و دشت به وسعت ۱۰۷۴ کیلومترمربع بوده و تنها خروجی آن، رودخانه قره‌سو با میانگین جریان سالانه ۴۶ میلیون مترمکعب است (Bairami et al., 2024b). این دشت از شمال به ارتفاعات مرزی ایران و آذربایجان، از شرق به ارتفاعات تالش، از جنوب به آرپاچای و از غرب به دامنه‌های کوه سبلان محدود می‌شود. با توجه به داده‌های ایستگاه هواشناسی اردبیل، نمین و آبی‌بیگلو، میانگین بارش وزنی (براساس تیسن‌بندی) سالانه منطقه ۲۷۳ میلی‌متر بوده که بیشترین میزان بارندگی در اردیبهشت با ۴۴/۵ میلی‌متر و کمترین مقدار در مرداد با ۴/۵ میلی‌متر ثبت شده است. بر اساس ایستگاه سینوپتیک اردبیل، میانگین دمای سالانه ۱۸/۸ درجه سلسیوس است و بیشینه و کمینه دمای ثبت‌شده به‌ترتیب ۳۸/۲ درجه سلسیوس در تابستان و ۱۴/۴- درجه سلسیوس در زمستان گزارش شده است. با توجه به شاخص دومارتن اقلیم اردبیل از نوع اقلیم خشک و نیمه‌خشک است (Tavosi & Delara, 2010).

دشت اردبیل از نظر زمین‌شناسی در سه واحد اصلی قرار می‌گیرد. زون ساختاری فرونشست اردبیل که بخشی از فلات آذربایجان بوده و از نهشته‌های آتشفشانی ائوسن پوشیده شده و تحت تأثیر رسوبات دشت قرار دارد. زون چین‌خورده و بالاآمده غربی که عمدتاً از نهشته‌های مزوزوئیک تشکیل شده و مهم‌ترین ساختار آن تاقدیس عنبران است. زون بالاآمده تالش که به‌صورت یک تاقدیس شمالی–جنوبی توسعه یافته و از رسوبات آواری و مواد آتشفشانی تشکیل شده است (Aghazadeh et al., 2017). آبخوان دشت اردبیل که در برگیرنده حدود ۹۰ درصد از کل دشت است از نوع آزاد بوده و میانگین عمق لایه آبدار آن ۵۳ متر و حداکثر ضخامت آن ۲۲۰ متر در بخش جنوبی است. جهت جریان آب زیرزمینی از مناطق جنوبی و غربی به‌سمت شمال غربی است. در این آبخوان ۲۴۸۳ حلقه چاه، ۱۴ دهنه چشمه و ۲۶ رشته قنات شناسایی شده که تأمین‌کننده نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب منطقه هستند. برداشت سالانه از این آبخوان ۱۶۲/۲۳ میلیون مترمکعب است که ۱۳۲/۶۴ میلیون مترمکعب آن (۸۱/۸ درصد) به مصارف کشاورزی اختصاص دارد (Hoseini & Khoshsimaie Chenar, 2025).

براساس مطالعات صورت گرفته، آبخوان اردبیل به‌دلیل برداشت بی‌رویه، بروز خشک‌سالی و تغییر اقلیم، دچار مشکلاتی شده‌است. به‌گونه‌ای که تراز سطح ایستابی در طی سال‌های آبی ۸۴–۱۳۸۳ تا ۹۷–۱۳۹۶، ۶/۱۲ متر افت با متوسط افت سالانه ۰/۴۷ متر را تجربه کرده‌است. کاهش حجم مخزن طی سال‌های مذکور به‌طور متوسط سالانه ۱۹/۶ میلیون مترمکعب بوده است (Daneshvar Vousoughi1 et al., 2011; Nourani et al., 2023). علاوه بر این، رودخانه قره‌سو که به‌عنوان اصلی‌ترین رودخانه جاری در دشت محسوب می‌شود، دچار نوساناتی شده است. بخش‌هایی از این رودخانه به‌عنوان منبع تغذیه‌کننده آبخوان عمل می‌کند، اما در سال‌های آبی ۱۳۸۴–۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷–۱۳۹۶ میزان تغذیه رودخانه به سفره به مقدار متوسط سالانه ۱/۸۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. این تغییرات نشان‌دهنده غیر پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه بوده و ضرورت اجرای راهکارهای مدیریتی مؤثر را بیش‌ازپیش برجسته می‌کند.

بر پایه مطالعات هیدروژئولوژیکی، ساختار زمین‌شناسی آبخوان اردبیل شامل لایه‌های درهم‌تنیده‌ای از گدازه‌های آتشفشانی، خاکستر، لاهار و رسوبات آبرفتی است که ساختاری ناهمگن و چندلایه ایجاد کرده است (Kord & Moghaddam, 2014). در بخش‌های غربی دشت، لایه‌های آتشفشانی با تخلخل ثانویه بالا، مسیرهای اصلی هدایت جریان را فراهم می‌کنند، در حالی‌که لایه‌های آبرفتی به‌عنوان زون‌های ذخیره‌ساز عمل می‌کنند. این ترکیب موجب رفتار هیدرولیکی غیرخطی و متغیر شده که شبیه‌سازی جریان زیرزمینی را نسبت به آبخوان‌های صرفاً آبرفتی دشوارتر می‌سازد. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که مقدار تراوایی در این آبخوان بین ۵۰ تا ۲۲۰۰ متر مربع در روز و ضریب ذخیره‌سازی در بازه ۰/۰۲۱ تا ۰/۱۴ متغیر است (Kord & Moghaddam, 2014). علاوه بر آن، افت سطح ایستابی بیش از ۱۲ متر و نرخ فرونشست سالانه تا ۴۵ میلی‌متر در جنوب شرق دشت گزارش شده است (Ghorbani et al., 2022).

پایش مداوم وضعیت آبخوان از طریق ۴۸ حلقه چاه مشاهداتی نشان می‌دهد که روند افت سطح ایستابی همچنان ادامه داشته و در صورت عدم اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب، این روند می‌تواند به کاهش توان بهره‌برداری پایدار و افزایش مخاطرات زیست‌محیطی منجر شود. این شرایط لزوم اجرای سیاست‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و اعمال محدودیت‌های برداشت همراه با تقویت تغذیه مصنوعی را برای حفظ تعادل هیدرولوژیکی آبخوان اردبیل ضروری می‌سازد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت اردبیل و موقعیت چاه‌های مشاهداتی را مشخص می‌کند.

۲-۲- جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

در این پژوهش، به‌دلیل شناخت نتایج نامطلوب رخ داده در سطح آبخوان، تهیه الگوی مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی و تهیه مدل عددی از داده‌های هواشناسی، زمین‌شناسی، آب‌های سطحی و زیرزمینی، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و مقادیر چاه‌های بهره‌برداری بهره گرفته شد. به همین منظور، داده‌ها از طریق شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل گردآوری شده و از آزمون‌های آماری برای پایش وجود گپ آماری، داده‌های ناقص و نرمال‌بودن داده‌ها استفاده شد. بر همین اساس با بهره‌گیری از روش حداقل مربعات و رگرسیون خطی به بررسی وجود خلا آماری و داده‌های پرت پرداخته و برای بررسی نرمال‌بودن داده‌ها آزمون کولموگروف–اسمرینوف و آزمون ران تست به کار رفت.

۲-۳- ناحیه‌بندی آبخوان

در این پژوهش رویکرد ناحیه بندی گسترده آبخوان به منظور مدیریت ناحیه‌ای پیشنهاد می‌شود تا بتواند به عملیاتی کردن الگوهای مدیریت آب‌های زیرزمینی در هر دشت نزدیک‌تر شود. به عبارت دیگر تفکر این است که در مقیاس هر ناحیه بتوان نسخه‌های فنی را با مشارکت مردمی در مقایسه با نسخه‌های تهیه شده برای کل دشت، بهتر اجرا کرد. چرایی این ایده را می‌توان به وسعت آبخوان‌ها، تغییرات افت و کیفیت آب‌های زیرزمینی در مکان‌های مختلف یک آبخوان، ورودی و خروجی‌های مختلف در هر ناحیه از

آبخوان، کاربری‌های مختلف اراضی در یک دشت و مهم‌تر از همه مشارکت مردمی براساس فرهنگ مردم در نواحی مختلف آبخوان نام برد. برای ناحیه‌بندی مدیریتی هر دشت، ابتدا می‌بایست مشکلات آب زیرزمینی با دقت لازم و کافی مشخص شده و سپس براساس آن، ناحیه‌بندی به صورت ویژه انجام گیرد که این عمل نشانگر ویژگی خاص ناحیه‌بندی آبخوان‌ها است.

مشکلات شناسایی‌شده در آبخوان دشت اردبیل را می‌توان در افت تراز سطح آب‌های زیرزمینی به‌دلیل برداشت بیش‌ازحد از آبخوان، کاهش حجم مخزن، کاهش تبادل آب رودخانه–سفره و به‌طور خلاصه ناترازی آب زیرزمینی دشت خلاصه‌کرد. دشتی که بر اساس سنت دیرین آن بر پایه کشاورزی استوار بوده و در حال حاضر با وجود توسعه کشاورزی (مبتنی به وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی) و تغییر اقلیم، میزان مقادیر ورودی آب زیرزمینی (چه طبیعی و چه مصنوعی) نسبت به مقادیر خروجی به مراتب کمتر است. به منظور ناحیه‌بندی آبخوان اردبیل، داده‌های هم‌افت طی یک دوره هفت‌ساله بررسی شد. بر همین اساس طبق شکل ۲، در بازه کوتاه مدت هفت (۲۰۱۲–۲۰۱۱ لغایت ۲۰۱۸–۲۰۱۷) متوسط افت سالانه ۰/۳۶ متر است.

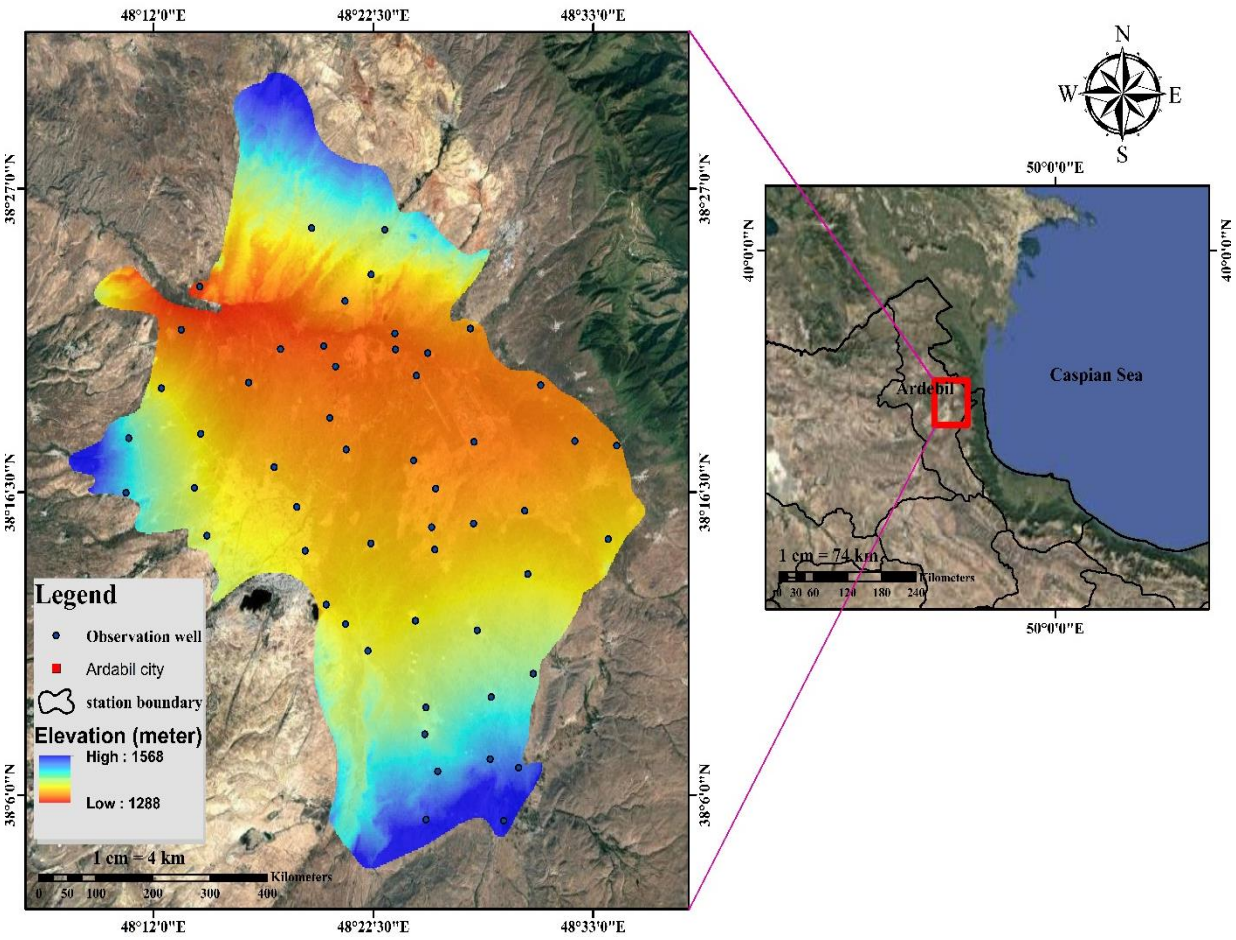

Fig. 1- Observation wells in Ardabil aquifer

شکل ۱- چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان اردبیل

علت درنظر گرفتن دوره کوتاه‌مدت این است که در تحلیل بلندمدت داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی، مقدار افت سرشکن شده و وزن افت سال‌های اخیر در دوره بلندمدت مشاهده نمی‌شود. شکل ۳ نتایج حاصل از تحلیل نقشه هم‌افت هفت‌ساله آبخوان را نشان می‌دهد که نواحی شرقی دشت اردبیل بیشترین افت سطح ایستابی را تجربه کرده‌اند. مطالعات میدانی تأیید می‌کند که این بخش از دشت، قطب اصلی کشاورزی منطقه بوده و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی دارد.

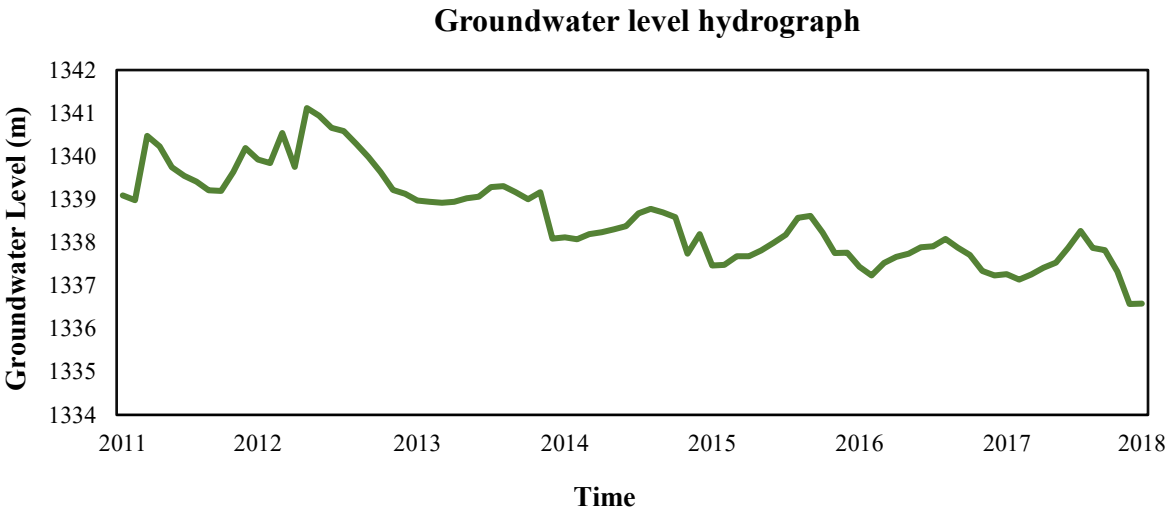

Fig. 2- Hydrograph of the Ardabil Plain aquifer (water years 2011-2012 to 2017-2018)

شکل ۲- آبنمود آبخوان دشت اردبیل (سال‌های آبی ۹۱-۱۳۹۰ لغایت ۹۷-۱۳۹۶)

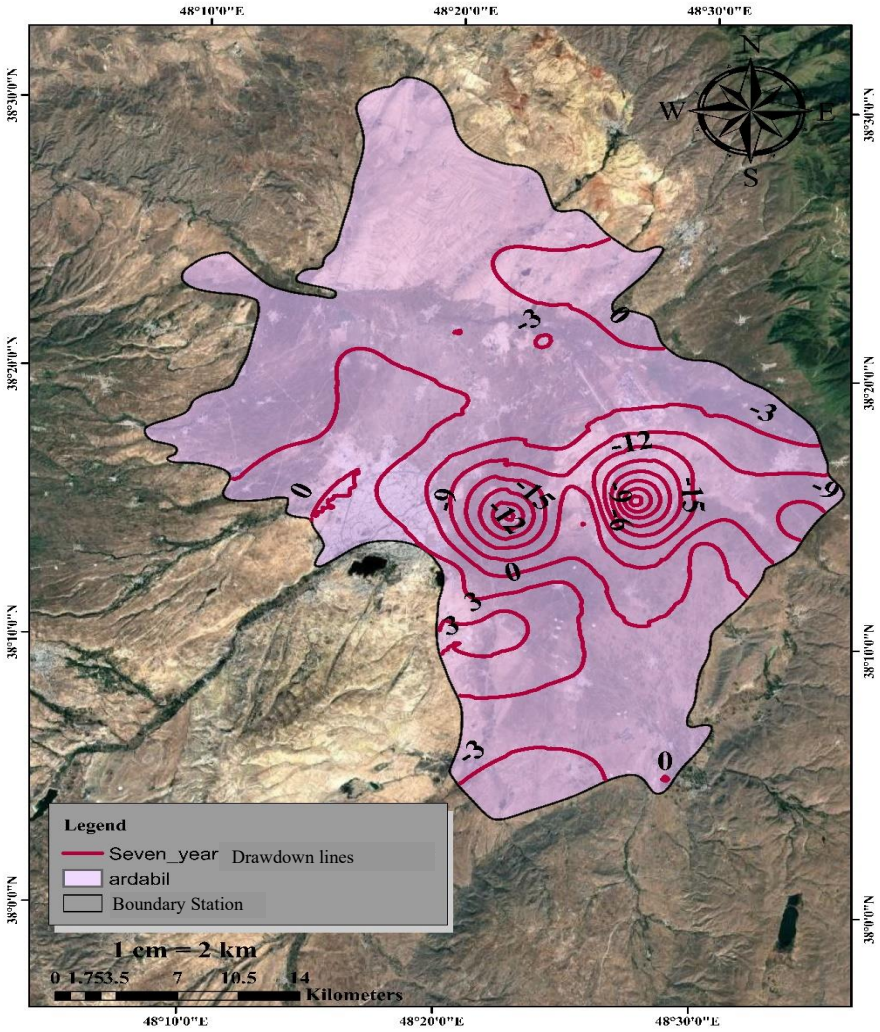

Fig. 3- Seven-year drawdown map of Ardabil aquifer (2011-2012 to 2017-2018)

شکل ۳- نقشه هم‌افت هفت ساله آبخوان اردبیل (سال‌های آبی ۹۱-۱۳۹۰ لغایت ۹۷-۱۳۹۶)

به‌منظور مدیریت کارآمد آب‌های زیرزمینی در منطقه، آبخوان به سه ناحیه مدیریتی شامل ناحیه افت بحرانی، ناحیه تبادل رودخانه–سفره و سایر نواحی آبخوان تقسیم شد. در داخل هر ناحیه به‌منظور امکان عملیاتی کردن برنامه مدیریتی، شبکه‌های ۵*۵ کیلومتری تقسیم شد. موقعیت مکانی هر یک از نواحی مدیریتی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

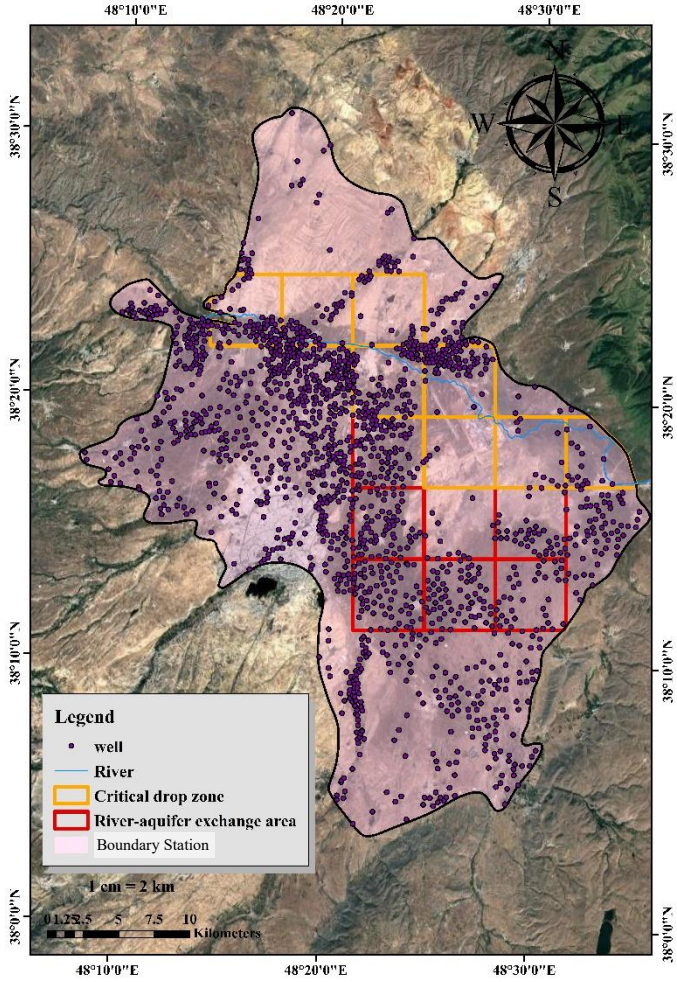

Fig. 4- Zoning map of Ardabil aquifer
شکل ۴- نقشه ناحیه‌بندی آبخوان دشت اردبیل

مشخصات کمی نواحی مدیریتی تعیین‌شده طی سال‌های آبی ۱۳۹۱–۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷–۱۳۹۶ در جدول ۱ ارائه می‌شود. این جدول اطلاعاتی مانند تعداد شبکه‌های مشاهده‌ای، مساحت هر ناحیه، تعداد چاه‌های بهره‌برداری و متوسط آبدهی برداشت از چاه و میانگین افت سطح ایستابی در هر ناحیه را نشان می‌دهد.

۲-۴- مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی

مدل‌سازی عددی یکی از ابزارهای مهم در تحلیل رفتار سامانه‌های هیدروژئولوژیکی و مدیریت منابع آب زیرزمینی است. آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع پنهان، نیازمند روش‌های مدل‌سازی برای تحلیل شرایط مرزی و ارزیابی تغییرات سطح ایستابی است. مدل‌سازی آبخوان شامل دو بخش مدل مفهومی و مدل ریاضی است. مدل مفهومی، بیان‌کننده فیزیک مسئله بوده که خود شامل ویژگی‌هایی از جمله شرائط مرزی، سیستم ورودی و خروجی آبخوان، جهت جریان و ساختار زمین‌شناسی آبخوان است. در تهیه مدل ریاضی آب زیرزمینی در گام اول معادلات حاکم بر پایه مدل مفهومی آبخوان انتخاب شده و در گام بعد جهت حل این معادلات، روش عددی مناسب ا این معادلات ارائه می‌شود (Rojas et al., 2023; Todd & Mays, 2004).

Table 1- Characteristics of management areas in Ardabil aquifer
جدول ۱- ویژگی‌های کمی هر یک از نواحی مدیریتی آبخوان اردبیل

Management areas	Number of networks	Area (km^2)	Number of exploitation wells	Average water flow (liters/second)	Average drawdown (m)
Critical drop	7	175	363	60	0.6
River-aquifer exchange	8	191	271	65	0.58
Other areas	1	603	761	14	0.44

۲-۴-۱- معادلات حاکم و مدل شبیه‌سازی

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای آبخوان آزاد در حالت غیرماندگار، سه‌بعدی، غیریکنواخت و ناهمگن به‌صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(T_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S\frac{\partial h}{\partial t}\pm R(x.y.z.t) \quad (۱)$$

طبق رابطه ۱، T_x، T_y و T_z به ترتیب مقادیر قابلیت انتقال آب زیرزمینی در جهت x، y و z ($\frac{L^2}{T}$)، h سطح آب زیرزمینی (L)، R و S به ترتیب بیان‌کننده مقدار تخلیه یا تغذیه نسبت به زمان در مختصات x.y.z ($\frac{L}{T}$)، ضریب ذخیره آبخوان (بدون بعد) و t زمان (T) است (Todd & Mays, 2004). در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از مدل عددی MODFLOW که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS[5]) توسعه یافته، استفاده شد (McDonald & Harbaugh, 1988). با توجه به وجود مطالعات پایه آب زیرزمینی دشت اردبیل، سال مدل‌سازی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ درنظر گرفته شد. به منظور ساخت مدل عددی در ابتدا فرآیند شبکه‌بندی مدل (یک کیلومتر در یک کیلومتر) با مجموع ۶۸۸ سلول انجام شد. در ادامه شرایط مرزی آبخوان (مرز ورودی در نواحی شرقی، جنوبی و جنوب غربی و یک مرز خروجی در بخش غربی) تعیین شده و بارگذاری داده‌های مدل عددی انجام شده است. سپس در ابتدا مدل عددی برای حالت ماندگار و پس از آن با درنظر گرفتن گام‌های زمانی ماهانه، برای حالت غیرماندگار اجرا و واسنجی پارامترهای آن انجام شد. پس از واسنجی، فرایند صحت‌سنجی نتایج مدل برای سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ انجام و مدل شبیه‌سازی شده آبخوان دشت اردبیل آماده برای اعمال سناریوهای مدیریتی شد.

۲-۵- سناریوهای مدیریتی

سناریوهای مدیریتی متناسب با نواحی افت بحرانی، تبادل رودخانه-سفره و کل آبخوان طراحی و در مدل شبیه‌سازی اعمال شد. در این فرایند، نواحی مدیریتی به چهار بخش شامل افت فوق بحرانی، افت بحرانی، تبادل رودخانه-سفره و سایر نواحی آبخوان تقسیم شدند. در این تقسیم‌بندی، نواحی با افت بیش از ۰/۵ متر به‌عنوان مناطق فوق بحرانی و نواحی با افت کمتر از ۰/۵ متر به‌عنوان مناطق بحرانی درنظر گرفته شدند. این آستانه بر اساس تحلیل سری زمانی افت سطح ایستابی آبخوان و شرایط محلی تعیین شده است. در ناحیه تبادل رودخانه-سفره نیز، نواحی با افت بیش از ۰/۵ متر به‌عنوان مناطق بحرانی تبادل رودخانه-سفره دسته‌بندی شده و نواحی با افت کمتر از این مقدار، در گروه سایر مناطق آبخوان قرار گرفته‌اند.

با توجه به نواحی مدیریتی تعیین‌شده، سناریوهای مدیریت بهره‌برداری از آبخوان دشت اردبیل، بر اساس کاهش درصد برداشت آب زیرزمینی و با توجه به وابستگی شدید کشاورزی منطقه به آب زیرزمینی طراحی شد. نحوه اعمال این سناریوها به مدل، که از کمترین مقدار درصد کاهش شروع و پس از بررسی رفتارسنجی عملکرد آبخوان توسط مدل شبیه‌سازی، به مقدار درصد کاهش برداشت به تدریج افزوده شد. سپس براساس نتایج، سناریو برتر از بین سناریوهای مدیریتی انتخاب شده که در جدول ۲ ارائه می‌شود.

Table 2-Sustainable Groundwater Management Scenarios
جدول ۲- سناریوهای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی

Management scenarios	The percentage of harvest reduction in the area of supercritical area	The percentage of harvest reduction in the critical area	Percentage reduction in the river-aquifer exchange area	Percentage of harvest reduction in other areas
Scenario 1	0	0	0	0
Scenario 2	10	5	0	0
Scenario 3	15	10	5	0
Scenario 4	15	10	5	5
Scenario 5	10	5	5	5
Scenario 6	10	2	5	0
Scenario 7	10	2	0	0
Scenario 8	10	2	2	2

۲-۶- سناریوهای اقلیمی

پس از اعمال سناریوهای مدیریتی و انتخاب سناریوی برتر، برای ارزیابی عملکرد مدل تحت شرایط مختلف اقلیمی، سناریوهای ترسالی-خشک‌سالی طراحی شد. این سناریوها بر اساس بیشترین و کمترین میزان بارندگی در طی دوره آماری و مقایسه با سال مدل (۱۳۹۶-۱۳۹۷) تنظیم شده‌اند. بیشترین بارندگی ثبت‌شده در دشت، در سال ۱۳۶۴-۱۳۶۳ برابر با ۳۸۱ میلی‌متر و کمترین آن در سال ۱۳۶۵-۱۳۶۶ برابر با ۱۲۷ میلی‌متر بوده است. در سال مدل، میزان بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر ثبت شده است. بر این اساس، سناریوی خشک‌سالی معادل ۵۰ درصد کاهش بارش نسبت به سال مبنا و سناریوی ترسالی معادل ۵۰ درصد افزایش بارش نسبت به سال مبنا درنظر گرفته شد. هدف از تدوین این سناریوها، ارزیابی تأثیرپذیری سناریوی برتر از تغییرات اقلیمی و بررسی امکان‌پذیری اجرای آن در شرایط نوسانات بارندگی است. این تحلیل می‌تواند مبنایی برای توسعه استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی باشد. جزئیات این سناریوها در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۷- مراحل تهیه الگوی مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی

به‌منظور توسعه الگوی جامع و پایدار برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق آبرفتی-ولکانیک، این پژوهش بر پایه رویکرد مرحله‌ای، تلفیقی و مبتنی بر داده طراحی شده است. فرآیند تحقیق شامل شش مرحله اساسی است که از گردآوری و پردازش داده‌های پایه آغاز شده و تا تحلیل نهایی سناریوهای مدیریتی و ارزیابی پیامدهای آن‌ها ادامه می‌یابد. در طراحی این الگو، ضمن بهره‌گیری از داده‌های میدانی و مدل‌سازی عددی، مرور سیاست‌ها و تجربیات کشورهای مختلف در حوزه مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نیز مورد توجه قرار گرفت. بررسی نمونه‌های موفق در کشورهایی نظیر آفریقای‌جنوبی، ایالات متحده و اسپانیا نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های منطقه‌ای و مبتنی بر ریسک می‌تواند در ارتقای اثربخشی برنامه‌های مدیریتی مؤثر باشد. همچنین، نتایج پژوهش‌های پیشین پیرامون شاخص‌های پایداری، پاسخ به تغییرات اقلیمی، و تحلیل مکانی داده‌ها نیز در ساختاردهی به چارچوب پیشنهادی این تحقیق مؤثر بوده‌اند.

نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی و پیاده‌سازی رویکرد ناحیه‌بندی مسئله محور برای هر ناحیه و به نوعی بومی‌شدن آن مبتنی بر شاخص‌های هیدروژئولوژیکی است. رویکردی که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای با این ترکیب و ساختار به‌کار گرفته نشده است. این ناحیه‌بندی امکان ارائه راهکارهای مدیریتی تفکیک‌شده و

متناسب با شرایط مکانی را فراهم ساخته و پایه‌ای علمی برای ارتقاء بهره‌برداری بهینه و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی فراهم می‌آورد. شکل ۵، توالی گام‌های اساسی پژوهش را نمایش می‌دهد و نمایانگر چارچوب یکپارچه‌ای است که از جمع‌آوری داده‌ها تا تدوین راهکارهای مدیریتی را شامل می‌شود.

Table 3- Wet-Dry Climate Scenarios
جدول ۳- سناریوهای اقلیمی ترسالی-خشک‌سالی

Wet-Drought Scenarios	First year	Second year	Third year	Fourth year	Fifth year
Scenario 1	Dry	Normal	Dry	Normal	Dry
Scenario 2	Dry	Dry	Normal	Normal	Normal
Scenario 3	Dry	Dry	Dry	Normal	Normal
Scenario 4	Normal	Dry	Normal	Wet	Wet
Scenario 5	Wet	Normal	Wet	Dry	Dry

Fig. 5-Stages of preparing a sustainable groundwater management model
شکل ۵- مراحل تهیه الگو مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی

۲-۸- ارزیابی مدل

در این پژوهش به منظور تحلیل و ارزیابی فرآیند مدل‌سازی در گام‌های واسنجی و صحت‌سنجی از شاخص‌های آماری استفاده شده است. شاخص‌های آماری ضریب همبستگی R^2، نسبت انحراف استاندارد RMSE و میانگین خطای مطلق MAE برای بررسی تناسب میان داده‌های مشاهداتی و محسباتی مورد استفاده قرار گرفته شده است. در ادامه در روابط (۲)، (۳) و (۴) به‌ترتیب بیانگر روابط شاخص‌های آماری است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - P_i)}{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \overline{P})} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(S_i - P_i)} \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|S_i - P_i| \quad (۴)$$

در معادلات فوق مقادیر S_i، P_i و $\overline{P}$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی، متوسط مقادیر مشاهداتی، محاسباتی و متوسط محاسباتی است.

۳- نتایج

به‌منظور اطمینان از دقت و اعتبار مدل توسعه‌یافته برای آبخوان اردبیل، بعد از ساخت مدل مفهومی ابتدا فرآیند واسنجی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار صورت گرفت. در این مرحله، مدل با داده‌های تاریخی کالیبره شد تا میزان انطباق نتایج محاسباتی با داده‌های میدانی سنجیده شود. در صورتی که شاخص‌های آماری خطا در محدوده قابل‌قبول قرار می‌گرفتند، مدل وارد فاز صحت‌سنجی می‌شد تا عملکرد آن بر روی داده‌های مستقل ارزیابی شد. تنها پس از تأیید صحت مدل، از آن برای تحلیل سناریوهای مدیریتی و تدوین الگوی پیشنهادی بهره‌برداری شد.

۳-۱- ساخت مدل مفهومی و عددی آبخوان اردبیل

ساخت مدل مفهومی آبخوان اردبیل با توجه به ویژگی‌های ولکانیک–آبرفتی آن، نیازمند تعریف دقیق شرایط مرزی، تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی و طراحی شبکه‌بندی متناسب با ساختار زمین‌شناسی ناهمگن منطقه بود. محدوده مدل‌سازی شامل ۶۸۸ سلول با ابعاد ۱×۱ کیلومتر بود که با هدف پوشش مناسب چاه‌های مشاهداتی و بهینه‌سازی زمان محاسبات انتخاب شد. شرایط مرزی مدل با استفاده از خطوط هم‌تراز ترسیمی از داده‌های چاه‌های مشاهداتی سال آبی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ تعیین شد؛ به‌طوری که مرزهای شرقی، جنوبی، غربی و جنوب‌غربی به‌عنوان مرزهای ورودی و مرز غربی به‌عنوان مرز خروجی تعریف شد.

از مهم‌ترین ملاحظات مدل مفهومی، تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی در بستر ولکانیک–آبرفتی بود. با توجه به داده‌های دریافتی از شرکت آب منطقه‌استان اردبیل، داده‌های آزمایش پمپاژ از ۴۲ چاه (شامل ۳۸ چاه اکتشافی و ۴ چاه بهره‌برداری) نشان داد که ضریب انتقال در آبخوان بین ۱۰۰ تا ۲۵۰۳ متر مربع در روز متغیر است، و بیشترین مقادیر در بخش مرکزی آبخوان، که لایه‌های ولکانیکی ضخیم‌تری دارد، مشاهده شد. این توزیع غیر یکنواخت، بیانگر اثر مستقیم ساختار ولکانیکی در افزایش تخلخل ثانویه و قابلیت انتقال است. میانگین ضریب ذخیره نیز در سطح آبخوان حدود ۴ درصد برآورد شد. این ناهمگنی در پارامترها، ضرورت استفاده از روش ناحیه‌بندی و کالیبراسیون دقیق را ایجاب نمود.

برای ساخت مدل، کلیه لایه‌های اطلاعاتی (زمین‌سطح، سنگ کف، هدایت هیدرولیکی، تغذیه، تبخیر، برداشت، رودخانه و غیره) به فرمت شیپ‌فایل وارد محیط GMS شد. نوع بسته انتخابی در MODFLOW برای حل جریان، بسته LPT و ساختار شبکه با تفکیک زمانی روزانه تعریف شد. در فرآیند شبیه‌سازی، استفاده از مدل MODFLOW-NWT به‌جای نسخه کلاسیک MODFLOW به‌دلیل پایداری بیشتر در شرایط اشباع–ناآشباع، عملکرد مدل را در شرایط ولکانیکی بهبود بخشید. در ادامه شکل ۶ بیانگر نقشه شبکه‌بندی آبخوان است.

۳-۲- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

به منظور بررسی دقت مدل ساخته‌شده، ابتدا مدل آبخوان اردبیل، در حالت ماندگار و سپس در حالت غیر ماندگار تحت واسنجی قرار می‌گیرد. سپس در صورت قابل بودن خطای ارزیابی مدل تحت صحت‌سنجی واقع می‌شود تا در صورت موفقیت مدل در این گام، سناریوهای مدیریتی جهت تهیه الگو مدیریت پایدار مورد سنجش قرار گیرد.

۳-۲-۱- واسنجی مدل در شرایط ماندگار

اجرای اولیه مدل منجر به خطای ۱۷/۵۹ متر شد که نشان‌دهنده تنظیم نادرست مقادیر جریان ورودی از مرزهای آبخوان و مقدار تغذیه بود. همچنین، نتایج آزمایش پمپاژ دارای عدم قطعیت بالا بودند که نیاز به اصلاح داشت. برای واسنجی مدل، پارامترهای General Head، تغذیه از سطح و رودخانه، و هدایت هیدرولیکی آبخوان تنظیم شدند. در فرآیند واسنجی مدل، از میان چاه‌های مشاهداتی در دسترس، ۲۶ چاه به دلیل عدم همخوانی شدید با خروجی مدل و ویژگی‌های خاص محلی حذف شدند. این تصمیم صرفاً بر مبنای محاسبات عددی اتخاذ نشده، بلکه بر پایه تحلیل آماری ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده بوده است؛ به‌طوری که مقدار R^2 در این چاه‌ها کمتر از ۰/۲۵ بود که نشان‌دهنده ناپایداری شدید و ضعف ارتباط دینامیکی با رفتار کلی آبخوان است (Sun et al., 2020). علاوه بر این، بررسی‌های مکانی نشان داد که این چاه‌ها در نزدیکی گسل‌های فعال یا در مناطق دارای خشک‌سالی ممتد واقع شده‌اند که به خشک‌شدگی طولانی‌مدت، نقص جدی در داده‌ها و اختلال در سری‌های زمانی منجر شده است؛ عواملی که به‌طور مستند می‌توانند منجر به رفتار هیدرودینامیکی موضعی و غیرقابل بازنمایی در مدل‌های عددی شوند (Anderson et al., 1997; Refsgaard et al., 2012). با توجه به این ملاحظات، حذف این چاه‌ها از فرآیند واسنجی با هدف افزایش پایداری مدل، کاهش خطای کل و اجتناب از بایاس در نتایج نهایی انجام شد. با بهینه‌سازی پارامترها، خطای مدل به ۰/۳۹ متر کاهش یافت که دقت قابل قبولی برای واسنجی در حالت ماندگار محسوب می‌شود. شکل ۶ بیان‌کننده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده آبخوان اردبیل در شرایط ماندگار است.

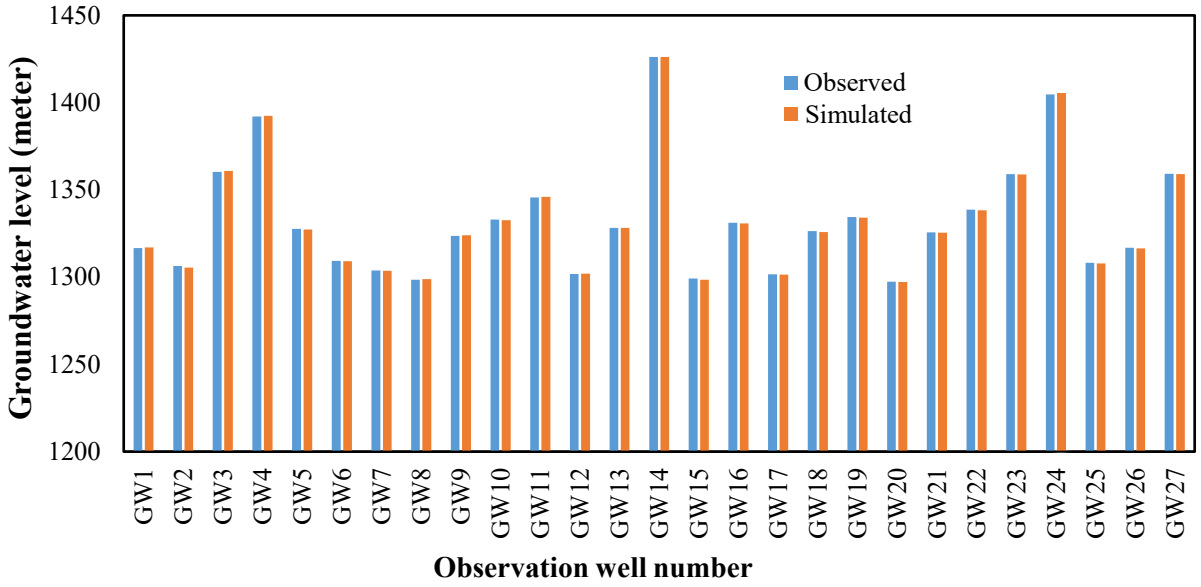

Fig. 6- Observed and simulated groundwater levels in steady state

شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی چاه‌های مشاهداتی در حالت ماندگار

۳-۲-۲- واسنجی مدل در شرایط غیرماندگار

در گام بعدی، مدل عددی برای شرایط غیرماندگار[۶] واسنجی شد تا دقت شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی در طول زمان بررسی گردد. با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های پیوسته و قابل اطمینان در منطقه مطالعه، فرآیند واسنجی مدل عددی بر اساس داده‌های مربوط به سال آبی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ به‌صورت ماهانه انجام گرفت. سال ۹۷۱۳–۱۳۹۶ از نظر توزیع مکانی و زمانی داده‌های بارش، سطح ایستابی و اطلاعات برداشت، یکی از کامل‌ترین و پایدارترین سال‌ها در بین سال‌های موجود بود و از سوی شرکت آب منطقه‌ای اردبیل نیز به‌عنوان آخرین سال دارای داده‌های برداشت از چاه‌های بهره‌برداری معرفی شده است (Khadri & Pande, 2016; Najjar Ghabel et al., 2019; Thorndahl & Nielsen, 2024). بر این اساس، مقدار خطای RMSE در این مرحله برابر با ۰/۶۵ متر محاسبه شد که نشان‌دهنده همخوانی قابل قبول بین داده‌های مشاهده‌ای و خروجی مدل در مقیاس زمانی غیرایستا است. در جریان واسنجی در شرایط غیرماندگار، دو چاه دیگر نیز به دلیل کیفیت پایین داده‌های زمانی حذف شدند. بررسی سری‌های زمانی این چاه‌ها نشان داد که به‌دلیل خشک شدگی‌های متناوب، ناپیوستگی در ثبت داده و رفتار غیرعادی نسبت به نوسانات تغذیه و برداشت، ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در این نقاط به‌مراتب پایین بود ($R^2 < 0.35$). از آنجا که درشرایط غیرماندگار، تحلیل پاسخ زمانی چاه‌ها به عوامل دینامیکی (نظیر تغذیه، پمپاژ، بارش) نقش کلیدی در صحت واسنجی دارد، تداوم استفاده از این چاه‌ها موجب افزایش خطای کلی مدل و بروز بایاس در برآورد پارامترها می‌شد. همچنین، برای افزایش دقت مدل، پارامترهایی نظیر تغذیه سطحی، هدایت هیدرولیکی و جریان از مرزهای مدل مورد تنظیم قرار گرفتند. اصلاحات انجام‌شده موجب بهبود شبیه‌سازی تغییرات زمانی سطح ایستابی شد و مدل توانست نوسانات فصلی و میان‌مدت را با دقت قابل قبولی بازسازی کند. شکل ۷ مقایسه بین تراز مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده را برای چند چاه منتخب در شرایط غیرماندگار نمایش می‌دهد.

۳-۲-۳- صحت‌سنجی مدل

پس از اتمام مرحله واسنجی، مدل عددی در شرایط غیرماندگار برای سال آبی ۱۳۹۸–۱۳۹۷ صحت‌سنجی شد. در این مرحله، مقادیر پارامترهای مدل بدون تغییر باقی ماند و داده‌های مشاهده‌ای مستقل از دوره واسنجی جهت ارزیابی عملکرد مدل به‌کار گرفته شدند. مقدار خطای RMSE در این مرحله برابر با ۰/۸ متر محاسبه شد که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج مدل و داده‌های واقعی در این بازه زمانی است.

هرچند دقت مدل در صحت‌سنجی در سطح قابل قبولی قرار گرفت، اما در برخی نواحی فاقد داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، نشانه‌هایی از عدم قطعیت باقی مانده است. با این وجود، خروجی‌های مدل نشان داد که روند کلی تغییرات سطح ایستابی به‌خوبی بازسازی شده و مدل توانایی شبیه‌سازی دینامیک سیستم را دارد. به‌کارگیری مدل

در سناریوهای مدیریتی مختلف و تحلیل رفتار آینده آبخوان بر پایه این اعتبارسنجی علمی، از اعتبار کافی برخوردار است. جدول ۴ شاخص‌های آماری مدل شامل R^2، RMSE و MAE را در مراحل مختلف کالیبراسیون و صحت‌سنجی نشان می‌دهد.

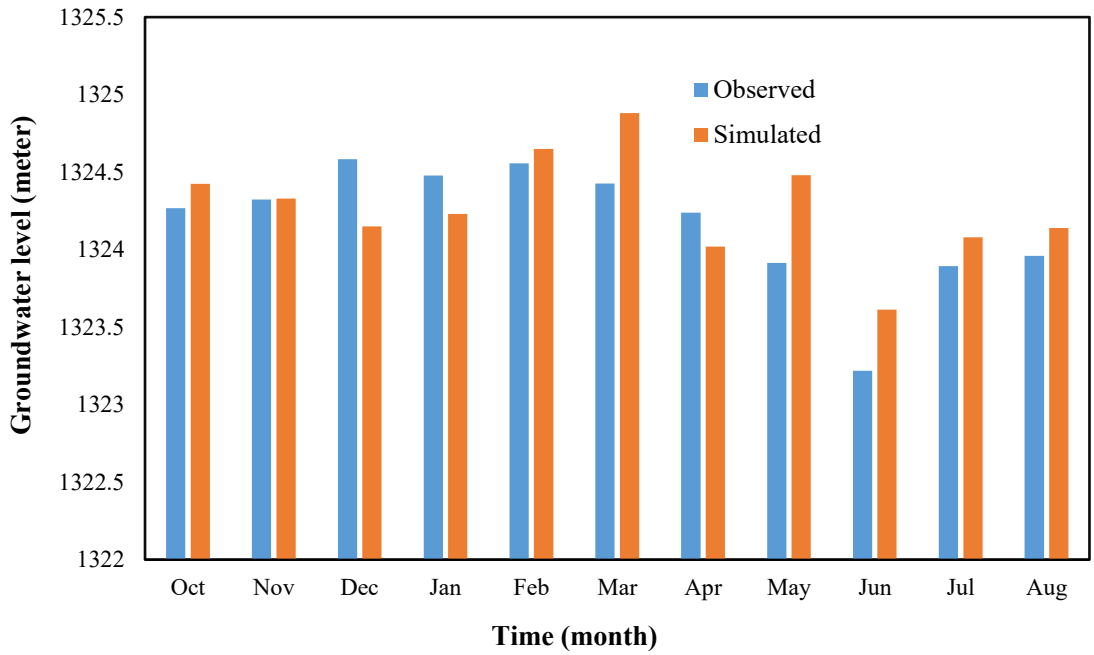

Fig. 7– Observed and simulated groundwater levels in transient state
شکل ۷- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده تراز سطح آب زیرزمینی در حالت غیرماندگار

Table 4- Evaluation indicators in calibration and validation
جدول ۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی در واسنجی و صحت‌سنجی

Step	R^2	RMSE (m)	MAE (m)
Calibration, steady	0.99	0.39	0.34
Calibration, unsteady	0.98	0.65	0.26
Verification	0.95	0.8	0.39

بر اساس شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۴، عملکرد مدل در تمامی مراحل مدل‌سازی در سطح قابل قبول و علمی قرار دارد. مقدار RMSE از ۰/۳۹ متر در واسنجی ماندگار به ۰/۶۵ متر در شرایط غیرماندگار افزایش یافته که با توجه به رفتار دینامیک آبخوان در شرایط زمانی، منطقی و قابل انتظار است. در مرحله صحت‌سنجی نیز RMSE برابر با ۰/۸ متر گزارش شد که با توجه به مقیاس منطقه‌ای مدل، دقت مناسبی محسوب می‌شود. مقدار ضریب تعیین (R^2) در همه مراحل بالاتر از ۰/۹۵ بوده، که بیانگر تطابق قوی بین داده‌های مشاهداتی و نتایج شبیه‌سازی است. همچنین، شاخص MAE نیز در محدوده کمتر از ۰/۴ متر باقی مانده و دقت پیش‌بینی مدل را تأیید می‌کند. بر این اساس، می‌توان مدل عددی توسعه‌یافته را واجد اعتبار علمی کافی برای تحلیل سناریوهای مدیریتی و پیش‌بینی رفتار سیستم در آینده دانست.

۳-۲-۴- بررسی بیلان مدل عددی و اعتبار آن

به‌منظور ارزیابی انسجام عملکرد مدل عددی، بیلان جرمی آبخوان برای سال آبی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ بر اساس خروجی مدل محاسبه و تحلیل شد. مجموع جریان‌های ورودی برابر با ۱۵۳/۴۲ میلیون

مترمکعب، جریان‌های خروجی ۱۶۹/۷۵ میلیون مترمکعب و کسری مخزن ۱۶/۳۳ میلیون مترمکعب به‌دست آمد. برای ارزیابی دقت این مقادیر، یک بیلان محاسباتی مستقل نیز با استفاده از داده‌های میدانی برداشت، بارندگی و سطح ایستابی موجود تهیه شد. در این بیلان، مقادیر متناظر به‌ترتیب ۱۵۳/۲۵، ۱۶۹/۴۳ و ۱۶/۱۸ میلیون مترمکعب گزارش شده‌اند که همخوانی مناسبی با بیلان مدل‌شده دارد. تطابق این مقادیر در کنار عملکرد آماری مناسب مدل در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی، بیانگر انسجام عددی، پایداری جرمی و قابلیت اعتماد مدل برای تحلیل سناریوهای مدیریتی در منطقه مورد مطالعه است.

۳-۳- ارزیابی سناریوهای مدیریتی

در این بخش به تحلیل نتایج حاصل از اجرا سناریوهای مدیریتی پرداخته شده‌است. به همین منظور با استفاده از مدل شبیه‌سازی آبخوان برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶، شرایط آبخوان برای پنج سال آبی (۱۴۰۲-۱۴۰۱ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷) پیش‌بینی شد. سپس سناریوهای مدیریتی طبق ضوابط ناحیه‌بندی اعمال شده است. اطلاعات دریافتی در بخش‌های قبل بیان‌کننده حساسیت بالای آبخوان به میزان برداشت و تغذیه است به همین منظور، سناریوهای مدیریتی معطوف به سناریوهای کاهش برداشت شد. در ادامه تغییرات حاصله تحت هر یک از سناریوهای مدیریتی در شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۳-۱- بررسی سناریوهای مدیریتی و انتخاب سناریوی برتر

در راستای ارزیابی اثربخشی راهکارهای مختلف در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، هشت سناریوی مدیریتی با سطوح مختلف کاهش برداشت، طراحی و مدل‌سازی شدند. تمرکز اصلی این سناریوها بر کنترل افت سطح ایستابی و کاهش کسری حجم مخزن، به‌ویژه در نواحی فوق‌بحرانی و بحرانی آبخوان اردبیل بود. سناریوی اول به‌عنوان وضعیت پایه، شرایط موجود را بدون مداخله مدیریتی شبیه‌سازی کرد. در این حالت، افت متوسط سالانه ۰/۵۷ متر و کسری مخزن حدود ۸۷/۹۸ میلیون مترمکعب بود. این نتایج معیار مقایسه‌ای برای سناریوهای دیگر فراهم ساخت.

در سناریوی دوم، کاهش ۱۰ درصد برداشت در نواحی فوق‌بحرانی و ۵ درصد در نواحی بحرانی اعمال شد. این سناریو منجر به کاهش افت سالانه به ۰/۵ متر و افت ۱۱ درصد در کسری مخزن نسبت به حالت پایه شد. علاوه بر آن، در نواحی بحرانی و تبـــادل رودخانه—سفره بهبود به ترتیب ۱۹ و ۲ درصد حاصل شد؛ که نشان از اثربخشی بالا در عین سادگی اجرا دارد.

سناریوهای سوم تا هشتم با تغییر در شدت و گستره کاهش برداشت، تحلیل شدند. سناریوی سوم نتایج مشابهی با سناریوی دوم داشت ولی تأثیر کمتری در نواحی تبادل رودخانه—سفره نشان داد. در سناریوی چهارم، کاهش برداشت در کل نواحی مدیریتی لحاظ شد که افت سطح ایستابی را به ۰/۳۷ متر و کسری مخزن را تا ۵۶/۹۸ میلیون مترمکعب کاهش داد؛ اما فشار اقتصادی بیشتری به کاربران تحمیل می‌کرد.

سناریوی پنجم با تعدیل سیاست‌های سخت‌گیرانه، افت ۰/۴۳ متری و کسری ۶۷/۴۴ میلیون مترمکعبی را به همراه داشت، در حالی‌که تعادل بهتری میان حفاظت و مقبولیت اجتماعی ایجاد کرد. در سناریوهای ششم تا هشتم، شدت مداخلات کاهش یافت و نتایج نشان دادند که با وجود افت کمتر در مصرف، کاهش پایداری منابع مشهود بود. سناریوی هشتم با افت سالانه ۰/۴۸ متر و بهبود ۱۶—۲۲ درصدی در نواحی بحرانی، به‌عنوان یک راهکار میانه پیشنهاد شد.

با تحلیل جامع، سناریوی دوم به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب شد. این سناریو به‌طور هم‌زمان سه هدف کلیدی را محقق کرد: کاهش افت و کسری مخزن، حفظ سازگاری اجتماعی و اقتصادی، و امکان‌پذیری اجرایی بالا. از این رو، مبنای توسعه الگوی نهایی مدیریت پایدار در این مطالعه قرار گرفت.

۳-۴- سناریوهای ترسالی-خشک‌سالی

جهت ارزیابی انعطاف‌پذیری سناریو برتر در برابر تغییرات اقلیمی، سناریوهای ترسالی و خشک‌سالی مورد تحلیل قرار گرفتند. در شرایط خشک‌سالی (با کاهش ۵۰ درصدی بارش)، افت سطح ایستابی در نواحی بحرانی تا ۱/۲ متر افزایش یافت. این نتیجه نشان‌دهنده ضرورت مدیریت تطبیقی و اعمال سیاست‌های محدودیت برداشت شدیدتر در دوره‌های خشک‌سالی است. در مقابل، در سناریوی ترسالی (با افزایش ۵۰ درصدی بارش)، تغذیه طبیعی آبخوان افزایش یافته و کاهش قابل‌توجهی در افت سطح ایستابی مشاهده شد. این نتایج بیانگر اهمیت سیاست‌های انعطاف‌پذیر در مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی است. نتایج حاصل از سناریوهای ترسالی-خشک‌سالی در جدول ۵ ارائه شده‌است.

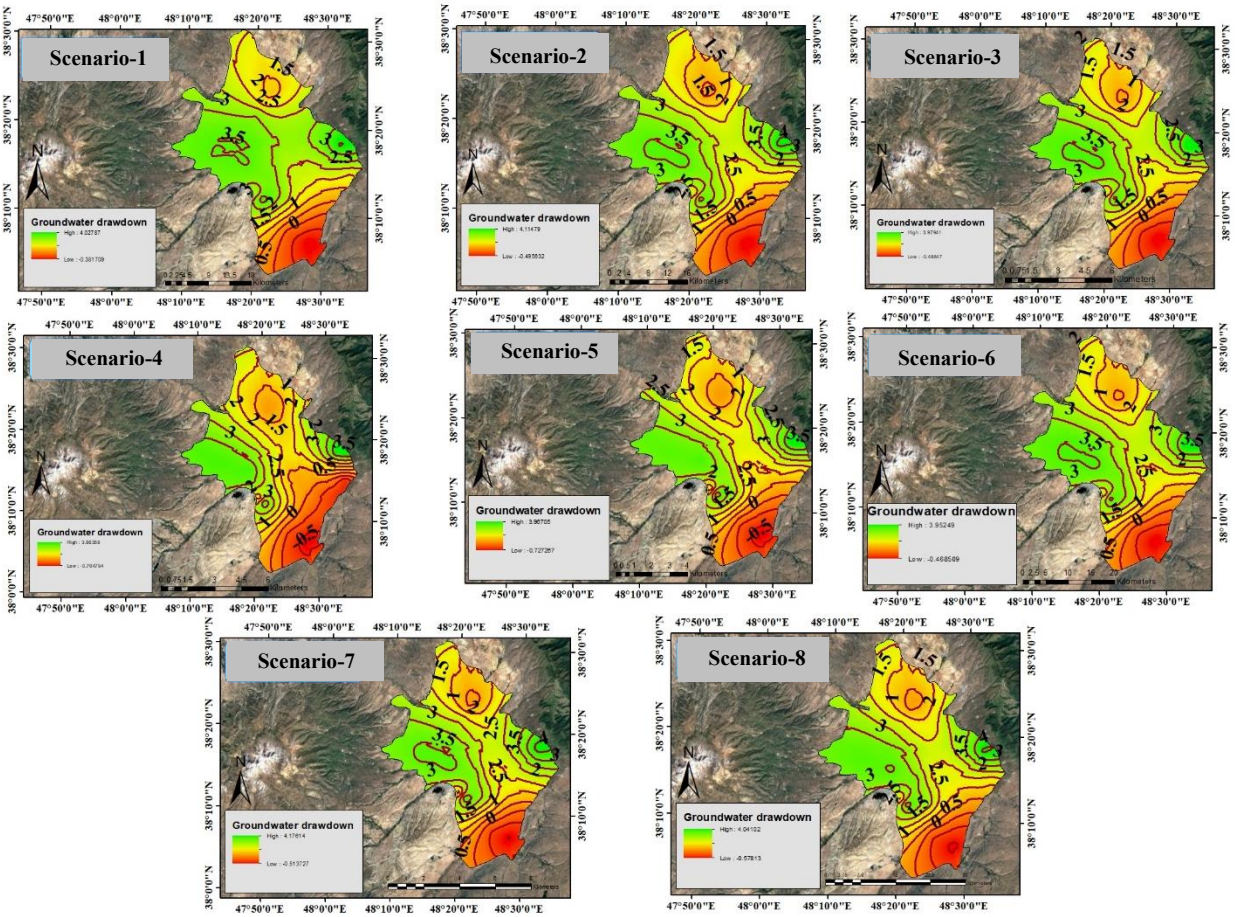

Fig. 8- Groundwater drawdown based on management scenarios (m)

شکل ۸- افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مدیریتی (متر)

Table 5- Simulation results based on climate change scenarios

جدول ۵- نتایج حاصل از اعمال سناریوهای اقلیمی

Climate scenarios	Average annual drawdown	Aquifer volume fraction
Scenario 1	0.55	85.36
Scenario 2	0.53	82.64
Scenario 3	0.54	83.72
Scenario 4	0.45	70.56
Scenario 5	0.42	69.13

۳-۵- الگو نهایی مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل

برداشت بی‌رویه از آبخوان دشت اردبیل منجر به افت شدید سطح ایستابی و کاهش حجم مخزن شده است. به‌منظور کنترل این روند، آبخوان به دو ناحیه مدیریتی تفکیک شد: ناحیه تبادل رودخانه–سفره و ناحیه افت بحرانی. بر این اساس، هشت سناریوی مدیریتی شامل کاهش برداشت در سطوح مختلف طراحی و تحلیل شد. نتایج نشان داد که سناریوی کاهش ۱۰ درصدی برداشت در ناحیه فوق بحرانی و ۵ درصدی در ناحیه بحرانی، مؤثرترین گزینه برای بهبود تعادل هیدرولوژیکی آبخوان است. این سناریو منجر به کاهش افت متوسط سالانه سطح آب از ۰/۵۷ متر به ۰/۴ متر و

کاهش کسری مخزن سالانه از ۲۰/۰۹ میلیون مترمکعب به ۱۵/۵ میلیون مترمکعب شـد. همچنین، تحلـیل سنـاریوهای ترسـالی–خشک‌سالی نشان داد که آبخوان به تغییرات بارش حساس بوده و مدیریت تطبیقی در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی ضروری است.

۴- بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در مناطق آبرفتی–ولکانیک مستلزم درک عمیق از ساختار زمین‌شناسی ناهمگن و اتخاذ رویکردهای ترکیبی برای تحلیل، پایش و تصمیم‌گیری است. ویژگی‌هایی چون تخلخل ثانویه غالب، نفوذپذیری متغیر، و وابستگی به تغذیه ناشی از بارندگی، این آبخوان‌ها را در برابر تغییرات اقلیمی و برداشت‌های بی‌رویه بسیار آسیب‌پذیر می‌کند. بر اساس تحلیل عملکرد سناریوهای مدیریتی ارائه‌شده در بخش نتایج، مشخص شد که واکنش آبخوان به تغییر برداشت در نواحی مختلف، بسته به ویژگی‌های لیتولوژی، گسترش شکستگی‌ها، و شیب هیدرولیکی متفاوت است. در سناریوهای اعمال‌شده، نواحی ولکانیکی با تخلخل ثانویه بالا و زون‌های گسلی، نسبت به نواحی آبرفتی پاسخ متفاوتی در افت سطح ایستابی نشان دادند. این الگو با یافته‌های مطالعات انجام‌شده در مرو در تانزانیا و آمیاتا در ایتالیا مطابقت دارد که در آن‌ها نیز ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده موجب حساسیت بالا به تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری انسانی شده است (Doveri et al., n.d.; Walraevens et al., 2025). مطالعه حاضر با رویکرد ناحیه‌بندی مدیریتی، بر خلاف روش‌های سنتی که کاهش یکنواخت برداشت را در کل دشت اعمال می‌کنند، توانست با تمرکز بر نواحی بحرانی، پایداری آبخوان را با فشار اجتماعی کمتر و اثربخشی بیشتر حاصل کند. به‌ویژه کاهش برنامه‌ریزی‌شده برداشت در نواحی فوق‌بحرانی تأثیر بسزایی در تثبیت سطح ایستابی داشت. این یافته‌ها با مطالعات (Husna et al., 2023) در آبخوان‌های ولکانیک–آبرفتی اندونزی نیز همخوانی دارد. استفاده از داده‌های سنجش از دور، GIS و مدل‌سازی عددی در این مطالعه نیز توانست دید جامعی از رفتار پیچیده آبخوان ارائه داده و تحلیل دقیق‌تری از الگوهای جریان، تغذیه و افت فراهم آورد. همچنین ترکیب داده‌های هیدروژئوفیزیکی با مدل MODFLOW و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند CatBoost-AOA، دقت پیش‌بینی رفتار آینده آبخوان را بهبود داده و عدم قطعیت مدل‌سازی را کاهش داده است (Bairami et al., 2024a).یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که سازندهای ولکانیکی، به‌ویژه به‌دلیل تخلخل ثانویه و شکستگی‌های موجود، ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی دارند. این ویژگی می‌تواند در تدوین راهبردهای تغذیه مصنوعی مانند سدهای زیرزمینی و تغذیه کنترل‌شده مورد بهره‌برداری قرار گیرد (Borowiecka et al., 2024). با این حال، تعیین دقیق ظرفیت ذخیره‌سازی و ارتباط هیدرولیکی سازندهای سخت ولکانیک با واحدهای آبرفتی، نیازمند تحلیل ساختاری و ژئوفیزیکی چندمقیاسی است (Cabrera & Custodio, 2004; Melati et al., 2023). همچنین، بخش‌هایی از یافته‌ها که مربوط به اثرگذاری سناریوهای مدیریتی در بهبود تبادل رودخانه–سفره و کاهش کسری مخزن بود، اثربخشی این اقدامات را تأیید می‌کنند. با این حال، اجرای عملی این سیاست‌ها با چالش‌هایی مواجه است. در سطح محلی، ضعف نظارت، مقاومت بهره‌برداران به‌ویژه در بخش کشاورزی، محدودیت منابع مالی، و نبود چارچوب نهادی یکپارچه از موانع مهم به‌شمار می‌آیند. بنابراین موفقیت اجرای راهکارهای پیشنهادی نیازمند حمایت نهادی، آموزش عمومی، و افزایش مشارکت ذی‌نفعان است. در نهایت، سناریوی سوم که بر کاهش برنامه‌ریزی‌شده برداشت در نواحی فوق‌بحرانی تمرکز داشت، به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، این سناریو موجب کاهش ۳۰ درصدی نرخ افت سطح ایستابی، ۲۹ درصدی افت سالانه حجم مخزن و بهبود تبادل رودخانه–سفره به میزان مشابه شد. این رویکرد، ضمن کاهش فشار بر منابع آبی، با حفظ بهره‌وری کشاورزی و کاهش تنش اجتماعی، الگوی مناسبی برای مدیریت منابع آب در مناطق با ساختار زمین‌شناسی پیچیده ارائه می‌دهد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در سطوح استانی و ملی در تدوین برنامه‌های سازگار با تغییرات اقلیمی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی بسیار کاربردی باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شاخص‌های پایداری و تحلیل مکانی در محیط مدل‌سازی عددی می‌تواند چارچوبی کارآمد برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در سامانه‌های پیچیده ولکانیک–آبرفتی فراهم سازد. با بهره‌گیری از مدل MODFLOW-NWT، داده‌های میدانی و تکنیک‌های تحلیل مکانی، وضعیت منابع در دشت اردبیل شبیه‌سازی و ارزیابی شد. یافته‌ها نشان دادند که سناریوی کاهش برداشت، منجر به بهبود بیلان، کاهش ۳۰ درصدی نرخ افت سطح ایستابی و کاهش ۲۹ درصدی افت سالانه حجم ذخیره آبخوان شد. ناحیه‌بندی مدیریتی نیز به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌سازی فضایی در جهت هدف‌گذاری سیاست‌های بهره‌برداری، عملکرد مناسبی از خود نشان داد.

با این وجود، برخی محدودیت‌ها در فرآیند انجام پژوهش وجود داشت. به‌دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های به‌روز، دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل به سال‌های ۱۳۹۸–۱۳۹۶ محدود شد که می‌تواند اعتبار بلندمدت مدل را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، پراکندگی زمانی و مکانی چاه‌های پمپاژ موجب شد برآورد هدایت هیدرولیکی با عدم قطعیت بالا همراه بوده و فرآیند واسنجی را زمان‌بر و حساس کند. در بعد مدلسازی نیز استفاده اولیه از MODFLOW-2000 به‌دلیل ضعف در حل شرایط غیرماندگار با شکست مواجه شد و نیاز به تغییر به MODFLOW-NWT احساس شد. پیچیدگی ساختار زمین‌شناسی منطقه و ناهمگنی ولکانیک–آبرفتی نیز بر حساسیت مدل نسبت به پارامترهای انتقال اثرگذار بود.

با توجه به این چالش‌ها، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از ترکیب مدل‌های عددی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهبود پیش‌بینی، از فناوری‌هایی مانند سنجش از دور و GIS برای پایش فضایی–زمانی استفاده شود. همچنین، نهادینه‌سازی مدیریت مشارکتی بهره‌برداران و تلفیق آن با برنامه‌ریزی مکانی، می‌تواند پایداری راهکارهای مدیریتی را تضمین کند. به‌طور کلی، یکپارچه‌سازی مؤلفه‌های هیدروژئولوژیکی، اقلیمی، فناورانه و نهادی، شرط اصلی موفقیت در مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق مشابه به‌شمار می‌رود.

پی‌نوشت‌ها

1- Safe yield
2- Sustainable management
3- Active Management Area
4- Sustainable Groundwater Management Area
5- United States Geological Survey
6- Transient

۶- مراجع

Aghazadeh N, Chitsazan M, & Golestan Y (2017) Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. Applied Water Science 7(7):3599–3616

Alao J O, Bello A Y, Lawal H A, & Abdullahi D (2024) Assessment of groundwater challenge and the sustainable management strategies. Results in Earth Sciences 2:100049

Alley W M & Leake S A (2004) The journey from safe yield to sustainability. Groundwater 42(1):12–16

Anderson MP, Woessner WW, and Hunt RJ (1997) Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. 2nd Edition, Academic Press, Cambridge, 535-564

Babbitt CH, Gibson KEB, Sellers S, Brozovic N, Saracino A, Hayden A, Hall M, and Zellmer S (2018) The future of groundwater in California: Lessons in sustainable management from across the West. Daugherty Water for Food Global Institute

Bairami M, Khajavi H, and Rastgoo A (2024a) Assessing groundwater behavior and future trends in the Ardabil Aquifer: A comparative study of groundwater modeling system and categorical gradient boosting hybrid model. Expert Systems with Applications 255:124728

Bairami M, Khajavi H, and Rastgoo A (2024b) Assessing groundwater behavior and future trends in the Ardabil Aquifer: A comparative study of groundwater modeling system and categorical gradient boosting hybrid model. Expert Systems with Applications 255:124728

Borowiecka M, Alcaraz M, and Manzano M (2024) Assessment of ecosystem services with numerical modelling to support groundwater dependent ecosystems and aquifer management: A demo study in the Medina del Campo Groundwater Body, Spain. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 10:100914

Cabrera MC and Custodio E (2004) Groundwater flow in a volcanic–sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. Hydrogeology Journal 12:305–320

Custodio E (2007) Groundwater in volcanic hard rocks. Groundwater in Fractured Rocks, CRC Press, 111–124

Daneshvar Vousoughi1 F, Dinpashoh Y, and Aalami MT (2011) Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil Plain). Water and Soil Science 21(4):165–179 (In Persion)

Doveri M, Menichini M, Raco B, Masetti G, Irace A, Lelli M and Nisi B ((n.d.)) Project of Strategic Interest NEXTDATA.

Programme mondial pour l'évaluation des ressources en (2022) Groundwater: Making the invisible visible. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Famiglietti JS (2014) The global groundwater crisis. Nature Climate Change, Nature Publishing Group UK London 4(11):945–948

Ghorbani Z, Khosravi A, Maghsoudi Y, Mojtahedi FF, Javadnia E, and Nazari A (2022) Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. Scientific Reports, Nature Publishing Group UK London 12(1):13998

Goldscheider N (2015) Overview of methods applied in karst hydrogeology. Karst Aquifers-Characterization and Engineering 127–145

Herrera-García G, Ezquerro P, Tomás R, Béjar-Pizarro M, López-Vinielles J, Rossi M, Mateos RM, Carreón-Freyre D, Lambert J, and Teatini P (2021) Mapping the global threat of land subsidence. Science, American Association for the Advancement of Science 371(6524):34–36

Hoseini SM and Khoshsimaie Chenar M (2025) Application of machine learning algorithms in groundwater level prediction in the Ardabil aquifer. Iranian Journal of Soil and Water Research 56(4):1041-1057 (In Persion)

Husna A, Akmalia R, Rohmat FIW, Rohmat FIW, Rohmat D, Wijayasari W, Alvando PV, and Wijaya A (2023) Groundwater sustainability assessment against the population growth modelling in Bima City, Indonesia. Water, MDPI 15(24):4262

Jasechko S and Perrone D (2021) Global groundwater wells at risk of running dry. Science, American Association for the Advancement of Science 372(6540):418–421

Jódar J, González-Ramón A, Martos-Rosillo S, Heredia J, Herrera C, Urrutia J, Caballero Y, Zabaleta A, Antigüedad I, and Custodio E (2020) Snowmelt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain). Science of the Total Environment 748:141363

Kord M, Asghari Moghaddam A, and Nakhaei M (2019) Numerical modeling of the Ardabil plain aquifer and its management using optimization of Groundwater extraction. Hydrogeology 4(1):153–167 (In Persion)

Melati MD, Athayde GB, Fan FM, Garcia LH, and de Vasconcelos Muller Athayde C (2023) Monitoring groundwater storage in a fractured volcanic aquifer system. Environmental Monitoring and Assessment 195(3):385

Nourani V, Ghareh Tapeh AH, Khodkar K, and Huang JJ (2023) Assessing long-term climate change impact on spatiotemporal changes of groundwater level using autoregressive-based and ensemble machine learning models. Journal of Environmental Management 336:117653

Refsgaard JC, Christensen S, Sonnenborg TO, Seifert D, Højberg AL, and Troldborg L (2012) Review of strategies for handling geological uncertainty in groundwater flow and transport modeling. Advances in Water Resources 36:36–50

Sbarbati C, Paoletti M, and Piscopo V (2025) The role of the heterogeneity of volcanic aquifer properties in assessing sustainable well yield: Study Cases from Latium (Central Italy). Water, MDPI 17(3):409

Silohadi SIT, Kusumayudha SB, Prasetyadi C, Yatini and Karmadi MA (2025) The interconnection of the volcanic aquifer layers influences the interaction of hydrogeological and hydrology systems on Cisadane River. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics

Sun R, Hernández F, Liang X, and Yuan H (2020) A calibration framework for high-resolution hydrological models using a multiresolution and heterogeneous strategy. Water Resources Research 56(8):e2019WR026541

Traylor JP, Duncan LL, Leaf AT, Weisser AR, Dietsch BJ, and Guira M (2024) Inset groundwater-flow models for the cache and grand prairie critical groundwater areas, northeastern Arkansas. US Geological Survey

Walraevens K, Bennett G, Alfarrah N, Gebreyohannes T, Berhane G, Hagos M, Hussien A, Nigate F, Belay AS, and Birhanu A (2025) Assessing the potential of volcanic and sedimentary rock aquifers in Africa: Emphasizing Transmissivity, Water Quality, and Recharge as Key Evaluation Metrics. Water, MDPI 17(1):109

Ward F (2025) Water in the West: Ten policy challenges facing resource managers in the American West. Available at SSRN 5201202

Yin J, Tsai FT-C, and Kao S-C (2021) Accounting for uncertainty in complex alluvial aquifer modeling by Bayesian multi-model approach. Journal of Hydrology 601:126682