چالش های مدیریت منابع آب زیرزمینی در ایران از دیدگاه زمین شناسی و تغییرات اقلیمی

عبدالحمید انصاری [۱]

[۱] استادیار، گروه مهندسی نفت، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، لامرد، ایران؛ ab.ansari@iau.ac.ir

خلاصه

منابع آب زیرزمینی ایران، به‌عنوان حیاتی‌ترین منبع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، در دهه‌های اخیر با بحرانی چندبعدی مواجه شده‌اند که ریشه در تعامل پیچیده میان عوامل زمین‌شناسی، تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی دارد. این پژوهش با رویکردی تحلیلی، چالش‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی را از دو منظر اصلی زمین‌شناسی و اقلیمی بررسی می‌کند. داده‌ها و شواهد علمی حاصل از گزارش‌های ملی و مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که بیش از ۴۰۰ دشت کشور در وضعیت بحرانی یا ممنوعه قرار دارند و نرخ نشست زمین در برخی مناطق، مانند ورامین و مهیار اصفهان، از ۳۰ سانتی‌متر در سال فراتر رفته است. از دیدگاه زمین‌شناسی، ناهمگنی لیتولوژیکی و ساختاری سفره‌ها، وجود سازندهای تبخیری، شکستگی‌ها و گسل‌های فعال، موجب رفتار غیرخطی و ناپیوسته در جریان آب زیرزمینی شده است. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی با کاهش میانگین بارش، افزایش دما و تبخیر–تعرق، و افزایش فرکانس خشکسالی‌ها، به‌طور مستقیم موجب کاهش تغذیه طبیعی (Recharge) و تشدید افت سطح ایستابی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که هم‌افزایی میان ویژگی‌های زمین‌شناسی ریزدانه و اقلیم گرم و خشک، عامل اصلی نشست زمین، شوری آب، و افت دائمی ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها در ایران است. این مطالعه تأکید می‌کند که مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تنها از طریق رویکرد تلفیقی و داده‌محور، مبتنی بر شناخت دقیق ساختار زمین‌شناسی، مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی و تحلیل روندهای اقلیمی، امکان‌پذیر است. در غیر این صورت، تداوم روند فعلی به کاهش جبران‌ناپذیر ذخایر زیرزمینی و تهدید امنیت آبی کشور منجر خواهد شد.

کلمات کلیدی: منابع آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی، زمین‌شناسی ایران، نشست زمین، مدیریت پایدار آب، شوری

۱. مقدمه

منابع آب زیرزمینی در ایران نقشی حیاتی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی دارند. بیش از ۶۰ درصد از کل آب مصرفی کشور از سفره‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و این وابستگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک حتی به بیش از ۸۰ درصد نیز می‌رسد.[۱] با توجه به اینکه میانگین بارندگی سالانه ایران حدود ۲۴۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر است—یعنی کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی- ایران در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد.[۲] توزیع مکانی و زمانی بارش‌ها نیز بسیار نامتوازن است؛ به‌طوری که بیش از دو سوم بارش‌ها در کمتر از یک‌سوم

مساحت کشور رخ می‌دهد و الگوی زمانی بارندگی در بسیاری از مناطق با نیاز آبی فصلی همخوانی ندارد.[۳]

در شرایطی که منابع آب سطحی محدود، فصلی و وابسته به بارندگی‌های کوتاه‌مدت هستند، آب زیرزمینی به‌عنوان منبعی پایدارتر و در دسترس‌تر نقش جبران‌کننده‌ای دارد. در طول قرن‌ها، فناوری‌های بومی مانند قنات، از هوشمندانه‌ترین سازوکارهای برداشت پایدار آب زیرزمینی بوده‌اند، اما طی نیم قرن گذشته با گسترش چاه‌های عمیق، رشد جمعیت، و توسعه‌ی کشاورزی آبی، بهره‌برداری بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی جایگزین روش‌های سنتی شد.[۴]

به‌ویژه در مناطق مرکزی ایران مانند دشت‌های یزد، کرمان، اصفهان، فارس و سمنان، افزایش برداشت و کاهش تغذیه طبیعی باعث افت شدید سطح ایستابی و شور شدن منابع آب شده است. گزارش وزارت نیرو (۱۴۰۲) نشان می‌دهد که بیش از ۴۰۰ دشت از ۶۰۹ دشت کشور در وضعیت بحرانی یا ممنوعه قرار دارند و مجموع کسری بیلان آب زیرزمینی در کشور به بیش از ۶ میلیارد مترمکعب در سال رسیده است.[۵] این روند نگران‌کننده در بسیاری از دشت‌ها منجر به نشست زمین (Land Subsidence) شده است؛ به‌گونه‌ای که در برخی مناطق جنوب غرب تهران، ورامین، و مهیار اصفهان نرخ نشست به بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال رسیده است.[۶]

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی به عنوان عامل تسریع‌کننده بحران آب زیرزمینی عمل می‌کند. نتایج مطالعات اقلیمی نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه ایران طی پنج دهه اخیر حدود ۱.۵ درجه سلسیوس افزایش یافته و میانگین بارش سالانه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش داشته است.[۳و۷] این تغییرات سبب افزایش تبخیر، کاهش نفوذ آب به لایه‌های زیرسطحی، و کاهش تغذیه طبیعی سفره‌ها (Recharge) شده است. در نتیجه، آبخوان‌ها به‌ویژه در نواحی مرکزی و شرقی کشور مانند سیستان، خراسان، یزد و کرمان دچار افت شدید سطح ایستابی و تخلیه ذخایر استاتیک شده‌اند.

به‌علاوه، افزایش فرکانس و شدت خشکسالی‌ها، تمرکز بارش‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه، و بارش‌های سیل‌آسا با نفوذپذیری پایین خاک، سبب کاهش بیشتر نرخ نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی می‌شود.[۸] بنابراین، تغییرات اقلیمی نه تنها بر کمیت منابع آب تأثیر دارد، بلکه کیفیت آن‌ها را نیز از طریق افزایش شوری و غلظت یون‌های محلول تغییر می‌دهد.[۹]

از دیدگاه زمین‌شناسی، ایران با ساختارهای تکتونیکی فعال، گسل‌های گسترده و سازندهای ناهمگن رسوبی و کارستی روبه‌رو است.[۱۰] این ویژگی‌های زمین‌شناسی باعث شده‌اند که جریان آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق غیرخطی، ناپیوسته و وابسته به شکستگی‌ها باشد. گسل‌ها گاه مسیرهای هدایت‌کننده آب را تشکیل می‌دهند و گاه به‌عنوان موانع جریان عمل می‌کنند.[۱۱] همچنین سازندهای رسی و مارنی در فلات مرکزی موجب کاهش نفوذپذیری و کندی جریان آب زیرزمینی شده‌اند. چنین شرایطی مدل‌سازی، پایش و مدیریت این منابع را به چالشی بزرگ تبدیل کرده است.

در مجموع، ترکیب سه عامل اصلی—ساختار زمین‌شناسی پیچیده، تغییرات اقلیمی و فشار انسانی ناشی از برداشت بی‌رویه—موجب بحران چندوجهی در منابع آب زیرزمینی ایران شده است. درک تعامل این عوامل برای ارائه راهکارهای پایدار در مدیریت منابع آب، یک ضرورت علمی و سیاستی است. هدف این پژوهش، بررسی دقیق‌تر چالش‌های زمین‌شناسی و اقلیمی در مدیریت منابع آب زیرزمینی ایران و تحلیل راهکارهای ممکن برای کنترل روند تخریب و افت این منابع حیاتی است.

۲. چالش های زمین‌شناسی در مدیریت منابع آب زیرزمینی

۲.۱. ناهمگنی ساختاری و لیتولوژیکی سفره‌ها

زمین‌شناسی ایران یکی از پیچیده‌ترین ساختارهای تکتونیکی جهان را دارد؛ چراکه در محل تلاقی صفحه‌ی عربی، اوراسیایی و صفحه‌ی خرد آفریقایی قرار گرفته است.[۱۰] این وضعیت باعث ایجاد مجموعه‌ای از کمربندهای چین‌خورده، گسل‌خورده، و کوه‌زایی فعال شده است. چنین شرایطی موجب ناهمگنی گسترده در سازندهای زمین‌شناسی و لیتولوژی آبخوان‌ها در سراسر کشور شده است.

به‌طور کلی، آبخوان‌های ایران به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱ .آبخوان‌های آبرفتی :(Alluvial Aquifers) این نوع آبخوان‌ها در دشت‌های سیلابی و پای‌کوهی تشکیل شده‌اند (مانند دشت‌های یزد–اردکان، ورامین و رفسنجان). در این مناطق، رسوبات ریزدانه‌ی سیلتی و رسی در بخش‌های مرکزی دشت‌ها سبب کاهش نفوذپذیری، افت کند ولی پیوسته سطح ایستابی و کاهش تغذیه طبیعی می‌شود.[۱۲]

۲ .آبخوان‌های کارستی :(Karstic Aquifers) این آبخوان‌ها که بیشتر در نواحی آهکی زاگرس، شمال خراسان و البرز جنوبی توسعه یافته‌اند، دارای نفوذپذیری بالا و جریان‌های سریع، متمرکز و غیرخطی هستند. جریان آب در این سیستم‌ها از طریق شکستگی‌ها و حفرات کارستی انجام می‌شود و به‌دلیل هدایت بالا، حساسیت زیادی نسبت به آلودگی و افت سطح دارند.[۱۳]

۳ .آبخوان‌های درون‌سنگی :(Fractured Rock Aquifers) در مناطق کوهستانی مانند کرمان، خراسان جنوبی و سیستان، نفوذپذیری آب وابسته به شکستگی‌ها، درزه‌ها و زون‌های خردشدگی است. در این مناطق، پراکندگی فضایی منابع آب بالا و مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی دشوار است.[۱۱]

این ناهمگنی‌های لیتولوژیکی و ساختاری باعث می‌شود رفتار هیدروژئولوژیکی سفره‌ها در ایران از منطقه‌ای به منطقه‌ی دیگر تفاوت چشمگیری داشته باشد .برای مثال، در نواحی زاگرس، سرعت جریان آب در سیستم‌های کارستی گاهی بیش از چند صد متر در روز گزارش شده است، در حالی که در دشت‌های آبرفتی مرکزی، نفوذپذیری لایه‌های رسی کمتر از 10^{-6} متر بر ثانیه است.[۹] این تفاوت، طراحی مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی، تخمین بیلان، و مدیریت استخراج را به‌شدت پیچیده می‌سازد.[۳]

افزون بر این، وجود لایه‌های تبخیری (نمک، انیدریت و گچ) در برخی مناطق مانند قم، طبس و حاشیه‌ی دشت کویر، کیفیت آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش شوری و سختی آب می‌شود. بنابراین، شناخت دقیق ساختار زمین‌شناسی، ترکیب لیتولوژیکی و توزیع افقی و عمودی واحدهای آب‌بر برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ضروری است.[۱۴]

۲.۲. شکستگی‌ها، گسل‌ها و تأثیر آنها بر جریان آب زیرزمینی

ایران یکی از لرزه‌خیزترین مناطق جهان است و با بیش از ۳۰۰ گسل فعال اصلی و فرعی شناخته می شود.[۱۵] گسل‌ها از دیدگاه هیدروژئولوژی، می‌توانند نقش دوگانه‌ای داشته باشند:

- در برخی موارد، به‌عنوان مسیرهای هدایت‌کننده‌ی جریان آب عمل کرده و ارتباط بین آبخوان‌های مجاور را برقرار می‌کنند.
- در سایر موارد، با ایجاد زون‌های خردشدگی و رسوب‌گذاری ثانویه(clay gouge zones) ، به‌عنوان مانع جریان عمل می‌کنند.

در نواحی شرقی ایران نشان داده است که در مناطق گسل‌خورده‌ی کرمان و خراسان، گسل‌های نرمال با ایجاد مسیرهای زهکشی عمقی موجب تخلیه‌ی سریع آبخوان‌ها و افت سطح ایستابی شده‌اند. در مقابل، در دشت‌های اصفهان–نجف‌آباد، گسل‌های فشاری و تراکمی باعث حبس آب در حوضه‌های بسته شده‌اند و منجر به افزایش موضعی سطح آب زیرزمینی گشته‌اند.

به‌عنوان نمونه، در سیستم گسلی زاگرس، شکستگی‌های گسترده سبب افزایش نفوذپذیری و اتصال هیدرولیکی بین چشمه‌ها و درزهای آهکی شده‌اند. این وضعیت باعث می‌شود که تغییرات فشار یا بارش در یک نقطه از سیستم به سرعت به نواحی دیگر منتقل شود. چنین رفتار غیرخطی و غیرایزوتروپی در سامانه‌های کارستی و گسلی، مدل‌سازی عددی و پیش‌بینی پویایی آب زیرزمینی را بسیار دشوار می‌کند.[۱۳]

از سوی دیگر، فعالیت لرزه‌ای گسل‌ها نیز می‌تواند موجب تغییرات لحظه‌ای در هدایت هیدرولیکی لایه‌ها و حتی دگرگونی مسیرهای جریان شود. این مسئله به‌ویژه در مناطق فعال لرزه‌ای چون کرمانشاه، فارس و شمال خراسان اهمیت زیادی دارد، زیرا حتی زلزله‌های متوسط نیز قادرند فشار منفذی آب را در لایه‌های اشباع تغییر دهند.

بنابراین، تحلیل ساختاری دقیق شبکه‌های گسل، درز و شکستگی، گامی کلیدی برای طراحی چاه‌های عمیق، مدیریت تغذیه مصنوعی، و جلوگیری از تداخل کیفی آبخوان‌ها محسوب می‌شود.[۴]

۲.۳. پدیده نشست زمین

نشست زمین (Land Subsidence) یکی از آشکارترین نشانه‌های برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در ایران است. بر اساس گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور(GSI, 2023) ، بیش از ۱۸۰ دشت ایران درجاتی از نشست زمین را تجربه می‌کنند و در حدود ۵۰ دشت نرخ نشست بیش از ۱۵ سانتی‌متر در سال دارند.

پیامدهای زمین‌شناسی و مهندسی نشست زمین شامل موارد زیر است:

- تخریب زیرساخت‌ها)جاده‌ها، خطوط مترو، خطوط لوله و ساختمان‌ها(
- کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها به‌دلیل تراکم دائمی خاک
- افزایش خطر سیلاب و فرونشست ناگهانی
- تغییر در شیب هیدرولیکی و در نتیجه تغییر جهت جریان زیرزمینی

در دشت رفسنجان و کرمان، نرخ نشست متوسط ۲۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است، که با افت سالانه‌ی حدود ۱.۵ متر سطح ایستابی همبستگی دارد .(Khaki et al., 2020) در دشت ورامین، آثار نشست در قالب شکاف‌های سطحی به طول چند کیلومتر قابل مشاهده است که تهدیدی جدی برای اراضی کشاورزی محسوب می‌شود .[۱۶]

پدیده‌ی نشست زمین نه تنها نشانه‌ای از بحران بیلان منفی آبخوان‌هاست، بلکه خود نیز به عنوان یک عامل تشدیدکننده بحران عمل می‌کند؛ زیرا تراکم لایه‌ها موجب کاهش دائمی ظرفیت ذخیره‌سازی و تغذیه مجدد آبخوان می‌شود.[۹]

چگونگی پذیرش مقاله به اطلاع مولف رابط خواهد رسید. با اینحال آخرین وضعیت مقالات در هر لحظه از طریق تارنمای کنفرانس قابل پیگیری می‌باشد. در صورت پذیرش، لازم است مولفین مقاله، اصلاحات خواسته شده داوران را در نسخه نهایی و در مدت زمان خواسته شده اعمال نموده و نسخه نهایی را از طریق تارنمای کنفرانس ارسال نمایند.

۳. تغیرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی ایران

تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی از جنبه‌های مختلف (کمی و کیفی) بروز می‌یابد؛ این تأثیرات شامل کاهش تغذیه(recharge) ، تغییر در الگوی زمانی و مکانی بارش، افزایش تبخیر-تعرق(evapotranspiration) ، افزایش فرکانس و شدت خشکسالی‌ها و پیامدهای ثانویه‌ای مانند افزایش شوری و آلودگی است. در ادامه، هر یک از این مؤلفه‌ها با جزئیات فنی و مبتنی بر شواهد علمی توضیح داده می‌شود.

۳،۱. کاهش تغذیه (recharge) آبخوان‌ها

تغذیه آبخوان‌ها (میزان آبی که از سطح به لایه‌های اشباع نفوذ می‌کند) مهم‌ترین عامل پایدارکننده منابع زیرزمینی است. در ایران، شواهد اخیر نشان می‌دهد که مقدار میانگین تغذیه ملی در دهه‌های اخیر کاهش یافته است. مطالعه‌ی Noori و همکاران (۲۰۲۳) که با تلفیق داده‌های مقیاس‌بزرگ، مدل‌های هیدرولوژیک و مشاهدات ماهواره‌ای انجام شد، کاهش معنی‌دارِ تغذیه آبخوان‌ها را در دوره ۲۰۰۲–۲۰۱۷ گزارش کرده و کاهش سالانه متوسط تغذیه را معادل ≈ −۳.۸ mm/yr اعلام کرده است. نویسندگان نشان می‌دهند که این کاهش بخشاً ناشی از تغییرات اقلیمی (کاهش بارش مؤثر و افزایش تبخیر) و بخش قابل‌توجه دیگری ناشی از مدیریت ناپایدار و برداشت بیش از حد است؛ به‌عبارت دیگر، فشار انسانی اثر اقلیم را تشدید کرده است.[۳]

کاهش تغذیه در مقیاس محلی نیز مستند شده است: مطالعات موردی در دشت‌های مرکزی و شرقی (مثلاً گلپایگان، کرمان و یزد) نشان داده‌اند که تغذیه نفوذی در مقابل بارش‌های شدید و مقطعی ناچیز است، زیرا شدت بارش بالا و نفوذپذیری سطحی پایین، باعث افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ عمقی می‌شود. این پدیده باعث می‌شود که حتی در صورت ثبت بارش‌های سنگین، سفره‌ها تغذیه قابل‌توجهی دریافت نکنند.[۱۷]

۳،۲. تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش — شدت و فشردگی بارش‌ها

یکی از پیامدهای تغییر اقلیم در ایران و منطقه خاورمیانه، تغییر در توزیع زمانی بارش‌ها است: بارش‌ها کمتر و در برخی سال‌ها متمرکزتر (کوتاه‌مدت و شدید) شده‌اند. مطالعات اقلیمی نشان می‌دهند که تمرکز بارندگی در بازه‌های زمانی کوتاه افزایش یافته و شاخص‌های تغییرپذیری روزانه و فصلی به نفع بارش‌های ناپایدار حرکت کرده‌اند. این الگوی جدید دو تأثیر مهم دارد: اول، کاهش نفوذ و در نتیجه کاهش تغذیه آبخوان‌ها؛ دوم، افزایش فرسایش و انتقال رسوبات که می‌تواند باعث کاهش نفوذپذیری لایه سطحی و بدتر شدن وضعیت تغذیه آینده شود.

از منظر شواهد بلندمدت، بررسی روند جریان‌های سطحی و بارش در دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که برخی حوضه‌ها کاهش جریان پایه (baseflow) را تجربه کرده‌اند که نشانگر کاهش تغذیه از طریق ورود به آبخوان‌ها است؛ این موضوع مخصوصاً در حوضه‌هایی که بارش به شکل برف-ذوب تغذیه‌کننده چشمه‌ها و آبخوان‌ها بوده، برجسته است (کاهش مدت زمان برف و تغذیه به‌موقع باعث افت چشمه‌ها و منابع تغذیه‌شده از برف می‌شود).[۵]

۳،۳. افزایش دما و تبخیر-تعرق(ET) ؛ اثر بر توازن آبی

افزایش دمای میانگین سالانه موجب افزایش پتانسیل تبخیر و تبخیر-تعرق می‌شود؛ افزایش دما در نواحی کوهستانی می‌تواند مدت زمان پوشش برفی و ذوب تدریجی را کاهش دهد که به نوبه خود تغذیه چشمه‌ها و آبخوان‌های وابسته به برف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب، بخشی از آب بارش که پیش‌تر به تدریج به سفره‌ها وارد می‌شد، اکنون سریع‌تر تبخیر می‌شود یا به صورت رواناب سطحی از دست می‌رود.

از منظر مقادیر عددی، افزایش ET در پهنه‌های خشک ایران به معنی «کاهش مؤثرِ» مقدار آب قابل نفوذ به عمق است؛ این کاهش مؤثر تغذیه می‌تواند حتی در صورت بروز بارش‌های متوسط، تراز ذخیره زیرزمینی را کاهشی سازد. مطالعات منطقه‌ای نیز افزایش جریان تبخیر را به‌عنوان عامل کاهش بارش مؤثر تأیید کرده‌اند.[۱۱]

۳،٤. افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها؛ رویدادهای ترکیبی(Compound events)

شاخص‌های خشکسالی(SPI) ، SPEIو شاخص‌های هیدرولوژیک (نشان می‌دهند که فرکانس و شدت خشکسالی‌ها در کشورهای مدیترانه‌ای و خاورمیانه از جمله ایران در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. خشکسالی‌های طولانی‌مدت باعث کاهش ماندگار سطح ایستابی و تخلیه ذخایر استاتیک می‌شوند؛ در این شرایط، بازگشت به سطح قبلی حتی پس از بازگشت بارش، زمان‌بر یا ناممکن می‌شود (بدلیل کاهش تخلخل و نشست). همچنین ترکیب خشکسالی با برداشت بیش از حد (یک اتفاق ترکیبی) اثر مضاعفی بر منابع آب زیرزمینی دارد.[۱۳]

مطالعات اخیر بر این نکته تأکید می‌کنند که مدیریت تنها بر پایهٔ میانگین‌های بلندمدت کافی نیست؛ زیرا رویدادهای شدید (خشکسالی‌های پی‌درپی یا نوبتی) تأثیر نیرومندی بر ذخایر دارند که میانگین‌ها نمی‌توانند آن‌ها را نمایان کنند. این واقعیت نیازمند طراحی سیاست‌ها و سیستم‌های مقاومتی است که رویدادهای ناگهانی و تجمعی را نیز پوشش دهند.[۶]

۳،۵. اثرات ترکیبی بر کیفیت آب زیرزمینی (شوری، تجمع آلاینده‌ها)

کاهش سطح ایستابی و تغذیه ناکافی می‌تواند منجر به افزایش غلظت یون‌ها و شوری آب شود؛ زیرا کاهش حجم آب معادل افزایش غلظت نمک‌ها می‌شود و در بعضی حوضه‌ها (مجاورت دریا یا لایه‌های تبخیری) نفوذ آب شور به سفره‌های شیرین رخ می‌دهد. مطالعات منطقه‌ای (از جمله در استان‌های کرمان و یزد) افزایش شوری را هم‌زمان با افت سطح ایستابی گزارش کرده‌اند. این امر باعث کاهش قابلیت استفاده آب زیرزمینی برای آبیاری و آشامیدن و افزایش فشار اقتصادی بر کشاورزان و جوامع محلی می‌شود.[۳]

از دیدگاهی دیگر، کاهش تغذیه نفوذی و افزایش رواناب سطحی موجب افزایش انتقال آلاینده‌های کشاورزی و شهری به آب‌های سطحی و نهایتاً بازخورد آن به سفره‌ها (در نقاط تماس) می‌شود. به‌علاوه، نشست زمین (که خود تا حدی ناشی از افت آب است) می‌تواند مسیرهای زهکشی و حوضه‌های محلی را تغییر دهد و به تمرکز آلودگی در نقاطی از آبخوان بینجامد.

تغییرات اقلیمی باعث کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها می‌شود؛ اما به‌طور مشخص در ایران، ترکیب مدیریت ناپایدار و تغییر اقلیم، فشار مضاعفی ایجاد کرده است—یعنی بخشی از کاهش قابل‌تخصیص به اقلیم و بخش بزرگ‌تر به برداشت‌های انسانی است.

- مدیریت منابع باید بر مبنای داده‌های روندی و نه میانگین‌های تاریخی برنامه‌ریزی شود؛ به‌ویژه برای مقابله با خشکسالی‌های پی‌درپی و وقایع شدید.
- راهکارهای تطبیقی اقلیمی شامل افزایش نفوذ(managed aquifer recharge) ، کنترل برداشت، بازچرخانی پساب، و تطبیق الگوی کشت هستند؛ اما مؤثر بودن آنها مستلزم اطلاع از تغییرات مکان‌محور در بارش، تبخیر و وضعیت آبخوان‌ها است.[۱۲]

جدول 1 روند کاهش ذخیره آب زیرزمینی در ایران

دوره زمانی	کاهش ذخیره آب زیرزمینی کلی (km^3)	نرخ متوسط سالانه (km^3/yr)
2002–2015	74	≈ 5.25
2002–2023	—	۲۹ cm/yr (تقریب به حجم معادل)
2002–2017	—	–20.08 GT/yr (معادل میلیون مترمکعب)

۴. چالش های زمین شناسی و اقلیمی در مدیریت منابع آب زیرزمینی ایران

منابع آب زیرزمینی ایران در معرض دو گروه از فشارهای عمده قرار دارند:

(۱)ویژگی‌های زمین‌شناسی پیچیده و ناهمگن کشور، و

(۲)تغییرات اقلیمی سریع و فزاینده.

ترکیب این دو عامل نه‌تنها آثار هر یک را تشدید می‌کند، بلکه باعث بروز پدیده‌های ترکیبی (compound effects) مانند نشست‌های شتاب‌دار، آلودگی ناگهانی آبخوان‌ها، یا کاهش غیرقابل‌بازگشت ظرفیت ذخیره آب می‌شود.[۴]

در ادامه، اثرات متقابل زمین‌شناسی و اقلیم در سه نوع محیط زمین‌شناسی عمده ایران تحلیل می‌شود.

۴/۱ سازندهای رسی و مارنی: افت سطح آب و تشدید فرونشست

سازندهای رسی و مارنی (که در مناطق وسیعی از دشت‌های مرکزی و شرقی ایران گسترده‌اند) به دلیل تخلخل بالا ولی نفوذپذیری پایین، نسبت به تغییرات رطوبتی و فشار منفذی بسیار حساس‌اند.

در این سازندها، افت سطح آب زیرزمینی (که ناشی از برداشت یا کاهش تغذیه است) باعث کاهش فشار منفذی و تراکم تدریجی لایه‌های رسی می‌شود. این تراکم به‌صورت نشست زمین بروز می‌کند .[۱۷]

افزون بر این، در دوره‌های خشک اقلیمی، تبخیر سطحی خاک‌های رسی افزایش یافته و منجر به خشک شدن، ترک‌خوردگی و انقباض سطحی می‌شود. با شروع بارش‌های بعدی، خاک منبسط شده و باعث ایجاد شکاف‌های عمیق و ناپایداری سازه‌های سطحی می‌شود.[۶]

مطالعات انجام‌شده در دشت‌های ورامین، مهیار و رفسنجان نشان می‌دهد که افت ترکیبی سطح ایستابی (تا حدود ۱.۵ متر در سال) همراه با افزایش دمای میانگین سالانه (حدود ۰.۳ تا ۰.۵ درجه سانتی‌گراد در دهه) منجر به نشست‌های بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال شده است.[۱۶] این نرخ در مقایسه با میانگین جهانی نشست ناشی از افت آب زیرزمینی (۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال) بسیار بالاست و بیانگر شدت هم‌افزایی زمین‌شناسی و اقلیم در ایران است.

۴/۲. نواحی کارستی زاگرس: بارش‌های مقطعی، ناپایداری شیب و آلودگی سریع

در مناطق آهکی و کارستی زاگرس (استان‌های فارس، کرمانشاه، لرستان و ایلام)، ساختارهای زمین‌شناسی شامل حفرات کارستی، درزها و شکستگی‌های فعال هستند که هدایت هیدرولیکی بسیار بالایی دارند. در این مناطق، تغییر اقلیم با دو پدیده‌ی کلیدی همراه است:

- افزایش بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت،
- و کاهش بارش‌های ممتد و ملایم.

این الگو سبب می‌شود که آب باران به‌جای نفوذ تدریجی، به‌صورت ناگهانی و متمرکز وارد حفرات شود. نتیجه آن، ناپایداری شیب‌ها، فرونشست موضعی در دهانه‌های کارستی، و ورود سریع آلاینده‌ها به سفره‌های زیرزمینی است.[۱۳]

نواحی جنوبی زاگرس، افزایش بارش‌های ناگهانی موجب بالا آمدن سریع سطح آب در چشمه‌ها و در پی آن، آلودگی لحظه‌ای با نیترات و فلزات سنگین در خروجی‌ها شده است. این وضعیت از نظر سلامت عمومی نگران‌کننده است، زیرا در سیستم‌های کارستی به دلیل فقدان فیلتراسیون طبیعی، زمان اقامت آب بسیار کوتاه است و فرصت طبیعی برای تصفیه وجود ندارد.

همچنین، مدل‌سازی‌های عددی در استان فارس نشان داده‌اند که افزایش دما و کاهش بارندگی‌های ممتد، باعث خشک شدن چشمه‌های فصلی در مناطق کارستی شده است، که خود باعث تغییر جهت جریان زیرزمینی و افت فشار در بخش‌های پایین‌دست می‌شود.[۹]

۴/۳. مناطق کویری و آبرفتی ضخیم: افت فشاری و نشست شدید

در مناطق کویری و دشت‌های آبرفتی با ضخامت زیاد (مانند سیرجان، طبس، یزد و دامغان)، ضخامت رسوبات گاهی به چند صد متر می‌رسد. در چنین مناطقی، افت سطح آب زیرزمینی موجب کاهش فشار منفذی در لایه‌های عمیق و تراکم غیرقابل‌بازگشت در بخش‌های پایین‌دست سفره می‌شود.[۱۲]

در دشت‌های خشک مرکزی، کاهش تغذیه ناشی از تغییر اقلیم همراه با برداشت مستمر باعث افت فشار استاتیک تا حدود ۲ تا ۵ متر در سال شده است. این افت فشاری نه‌تنها موجب نشست سطح زمین می‌شود، بلکه باعث جابجایی عمودی جریان آب شور به سمت بالا می‌گردد — فرآیندی که به «Upconing» معروف است. نتیجه آن، شور شدن آبخوان‌های شیرین‌تر سطحی و کاهش کیفیت آب است.[۳و۱۴]

افزون بر این، به علت دمای بالای اقلیم کویری و تبخیر شدید، شوری سطح خاک افزایش یافته و نفوذپذیری در لایه‌های بالایی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، حتی در صورت وقوع بارندگی‌های نادر، تغذیه سفره‌ها بسیار ناچیز خواهد بود.

۴/۴. تحلیل ترکیبی: اثرات هم‌افزا(Synergistic Effects)

مطالعات اخیر در ایران و سایر مناطق خشک (از جمله عربستان، افغانستان و شمال هند) نشان داده‌اند که تعامل میان اقلیم گرم و زمین‌شناسی ریزدانه یا تبخیری، می‌تواند اثرات چندبرابر بر افت منابع آب زیرزمینی داشته باشد.[۱و۱۹] در ایران، این اثرات ترکیبی در قالب چهار مکانیسم اصلی ظاهر می‌شود:

پیامد نهایی	پاسخ زمین‌شناسی	اثر اقلیمی	مکانیسم
نشست و کاهش تغذیه	تراکم خاک رسی، ترک سطحی	تبخیر بالا، خشکی خاک	افزایش دما
آلودگی و فرسایش	شست‌وشوی رسوبات سطحی	نفوذ سریع، رواناب بالا	بارش‌های شدید و کوتاه
افت دائمی سطح ایستابی	تراکم مارن و رس	کاهش رطوبت زیرسطحی	افت تغذیه
شوری و کاهش کیفیت آب	جابجایی آب شور به بالا	کاهش فشار منفذی	تغییر تراز آب

این هم‌افزایی نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب زیرزمینی در ایران باید همزمان اقلیم، لیتولوژی و دینامیک هیدرولوژیک را در نظر گیرد؛ زیرا در صورت تمرکز صرف بر یک عامل (مثلاً اقلیم یا برداشت انسانی)، سایر عوامل می‌توانند تأثیرات جبران‌ناپذیری ایجاد کنند.

۵. چالش های مدیریتی و انسانی مرتبط

در کنار عوامل طبیعی، عوامل انسانی نیز بحران را تشدید کرده‌اند:

- برداشت بی‌رویه از چاه‌های غیرمجاز :بیش از ۴۰۰ هزار چاه غیرمجاز در کشور فعال است.
- نبود نظام دقیق پایش :کمبود داده‌های هیدروژئولوژیک و مدل‌های به‌روزشده، تصمیم‌گیری علمی را دشوار کرده است.
- آلودگی منابع زیرزمینی :نفوذ پساب‌های صنعتی و کشاورزی، شورشدن و آلودگی شیمیایی آبخوان‌ها را افزایش داده است.
- فقدان مدیریت یکپارچه منابع آب :(IWRM) تصمیم‌گیری‌های بخشی و محلی به جای سیاست‌های جامع ملی، منجر به تضاد منافع بین استان‌ها شده است.[۱۴]

۶. نتیجه گیری

منابع آب زیرزمینی ایران در نقطه بحرانی قرار دارند. ترکیب عوامل زمین‌شناسی پیچیده با تغییرات اقلیمی و فشار انسانی، موجب شده است که بخش بزرگی از آبخوان‌ها در وضعیت کسری شدید باشند. بدون اصلاح ساختار مدیریتی، تقویت مطالعات زمین‌شناسی-اقلیمی و مشارکت جوامع محلی در حفاظت از منابع آب، پایداری زیست‌محیطی کشور در خطر خواهد بود.

بنابراین، مدیریت علمی و تلفیقی منابع آب زیرزمینی با تکیه بر دانش زمین‌شناسی، مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی و تحلیل تغییرات اقلیمی، تنها مسیر پایدار برای عبور از بحران آب در ایران است.

۷. مراجع

1.Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 9135. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y
2. Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4, 315–328.
3. Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., & Heggy, E. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*, 14(1), 279. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35613-4
4.Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas, M., & Baer, G. (2017). Quantifying groundwater exploitation-induced subsidence in Iran using InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 199, 246–258.
5. Iran Water Resources Management Company (IWRMC). (2023). *Annual report on groundwater resources and aquifer balance in Iran*. Tehran: Ministry of Energy.
6. Haghshenas Haghighi, M., Motagh, M., & Walter, T. R. (2024). Satellite observation of land subsidence due to groundwater depletion in Iran. *Science of Remote Sensing*, 14, 100497.
7. Alizadeh, A., & Keshavarz, A. (2005). Status of agricultural water use in Iran. *Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*, National Academies Press, Washington, D.C.
8. Tabari, H., & Talaee, P. H. (2018). Temporal variability of precipitation over Iran: Spatio-temporal patterns and possible connections to large-scale climate signals. *International Journal of Climatology*, 38(1), 97–113.
9. Tavakoli, M., Rahmani, M., & Ramezani, S. (2024). Groundwater quality and salinization trends in Kerman Province, Iran. *Water*, 16(4), 1122.
10. Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210–265.
11. Khodaei, K., Ghafoori, M., & Amini, A. (2022). Fault control on groundwater flow in Iran's sedimentary basins. *Journal of Hydrogeology*, 30(4), 453–466.
12. Eslamian, S., & Ostad-Ali-Askari, K. (2017). A review of the management of groundwater resources in Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 3(4), 543–562.
13. Ford, D. C., & Williams, P. (2013). *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
14. Ahmadi, A., Gholami, V., & Kazemi, M. (2020). Hydrochemical assessment of groundwater salinity in arid regions of central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(6), 140.
15. Nowroozi, A. A., Mohajer-Ashjai, A., & Mirzaei, N. (2019). Active faulting and seismicity in Iran: Implications for groundwater management. *Tectonophysics*, 758, 42–58.
16. GSI (Geological Survey of Iran). (2023). *Annual report on land subsidence in Iran's plains*. Tehran: Ministry of Industry, Mine and Trade.
17. Karimi, H., Raeisi, E., & Zare, M. (2016). Characterization of karst aquifers in the Zagros Mountains, Iran. *Hydrogeology Journal*, 24(8), 2207–2223.
18. Khaki, M., Forootan, E., & Kuhn, M. (2020). Quantifying land subsidence and groundwater storage changes in Iran using InSAR and GRACE data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111522.
19. IPCC. (2022). Chapter 4: Water. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* — Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. IPCC+1

20. Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., de Linage, C., Rodell, M., & Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management. *Water Resources Research*, 49(2), 904–914.