

تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر پویایی آب‌های زیرزمینی و چالش‌های مدیریت منابع آبی

بهبود عباس نیا^{1,*}

¹ - زمین‌شناسی آب، دانشگاه پیام نور ابهر، behbood1980@gmail.com

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع حیاتی تأمین آب شیرین در سراسر جهان هستند که تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی مختلفی قرار دارند. ویژگی‌های ساختاری زمین‌شناسی، از جمله نوع سنگ‌ها، تخلخل، نفوذپذیری، شکستگی‌ها و گسل‌ها، نقش مهمی در تشکیل، حرکت و توزیع این منابع ایفا می‌کنند. در این مقاله، تأثیر این ویژگی‌ها بر دینامیک آب‌های زیرزمینی بررسی شده و چالش‌های مرتبط با مدیریت پایدار این منابع تحلیل می‌شود. همچنین، با استفاده از نمونه‌های موردی و داده‌های هیدروژئولوژیکی، اثرات زیست‌محیطی تغییرات زمین‌شناسی بر کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی ارزیابی خواهد شد. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به تصمیم‌گیری بهتر در زمینه بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب زیرزمینی کمک کنند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات زمین‌شناسی می‌توانند به‌طور مستقیم بر تغذیه، جریان و تخلیه آب‌های زیرزمینی تأثیر بگذارند و در برخی موارد منجر به کاهش کیفیت منابع آبی شوند. به‌عنوان مثال، فعالیت‌های زمین‌ساختی می‌توانند باعث افزایش شکستگی‌ها و در نتیجه افزایش نفوذ آلودگی‌های سطحی به آبخوان‌ها شوند. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی و برداشت بی‌رویه نیز فشار مضاعفی بر این منابع وارد کرده و موجب افت سطح ایستابی و کاهش ذخایر آب شیرین می‌شوند. در این پژوهش، علاوه بر تحلیل علمی این عوامل، راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ارائه شده است تا از بحران‌های احتمالی در آینده جلوگیری شود.

کلمات کلیدی: زمین‌شناسی آب‌های زیرزمینی، تخلخل و نفوذپذیری، شکستگی‌ها، مدیریت منابع آب، پایداری زیست‌محیطی

1. مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین، تحت تأثیر مستقیم ویژگی‌های زمین‌شناسی قرار دارند. شناخت ویژگی‌های ساختاری و رسوب‌شناسی محیط‌های آبخوان، نقش کلیدی در مدیریت پایدار این منابع دارد. در این پژوهش، اثرات زمین‌شناسی بر جریان آب‌های زیرزمینی و چالش‌های مدیریتی مرتبط با آن بررسی خواهد شد (Todd & Mays, 2005). آب‌های زیرزمینی بخش قابل‌توجهی از ذخایر آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهند و نقش اساسی در تأمین آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی دارند. این منابع آبی به دلیل قرارگیری در زیر سطح زمین، معمولاً از آلودگی‌های سطحی و تبخیر مستقیم در امان هستند، اما عوامل مختلف زمین‌شناسی و انسانی می‌توانند بر کیفیت و کمیت آن‌ها تأثیر بگذارند. درک صحیح از فرآیندهای کنترل‌کننده حرکت و توزیع آب‌های زیرزمینی، برای مدیریت پایدار این منابع ضروری است (Fetter, 2018).

ویژگی‌های زمین‌شناسی، از جمله نوع و ساختار سنگ‌ها، تخلخل، نفوذپذیری و گسل‌ها، تأثیر قابل توجهی بر رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها دارند. به‌عنوان مثال، در مناطق کارستی، آب زیرزمینی می‌تواند از طریق حفره‌ها و کانال‌های زیرزمینی با سرعت بالا جریان یابد، درحالی‌که در مناطق با سنگ‌های رسی، حرکت آب به‌شدت محدود می‌شود. علاوه بر این، حضور گسل‌ها و شکستگی‌های زمین‌شناسی می‌تواند مسیرهای جدیدی برای انتقال آب ایجاد کرده یا برعکس، به‌عنوان یک مانع هیدرولیکی عمل کند (Freeze & Cherry, 1979).

یکی از چالش‌های مهم در مدیریت آب‌های زیرزمینی، تأثیر متقابل فعالیت‌های انسانی و پدیده‌های زمین‌شناسی است. برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث افت سطح ایستابی، نشست زمین و کاهش کیفیت آب می‌شود. همچنین، نفوذ آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی و شهری می‌تواند کیفیت این منابع را به خطر بیندازد. در برخی مناطق، تغییرات زمین‌ساختی مانند زلزله یا فعالیت‌های تکتونیکی می‌توانند موجب تغییر مسیر جریان‌های زیرزمینی یا ایجاد شکاف‌های جدید شوند که این امر نیز بر پایداری منابع آب اثرگذار است (Alley et al., 2002).

در این پژوهش، ابتدا ویژگی‌های زمین‌شناسی مؤثر بر آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس نقش این عوامل در تشکیل، حرکت و پایداری منابع آب تحلیل می‌شود. در نهایت، چالش‌های مدیریتی مرتبط با حفاظت و بهره‌برداری از این منابع، همراه با راهکارهای پیشنهادی برای مدیریت پایدار آن‌ها ارائه خواهد شد. این مطالعه می‌تواند به بهبود برنامه‌های حفاظت از منابع آب زیرزمینی و کاهش اثرات منفی ناشی از تغییرات زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی کمک کند (Zektser & Everett, 2004).

2. روش شناسی پژوهش

کلیه مقالات کامل توسط داوران کنفرانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به این منظور لازم است فایل‌های مقاله، که مطابق با ضوابط این راهنما تهیه شده است، با فرمت docx از طریق سایت کنفرانس ارسال گردد. همچنین فایل مورد نظر باید حاوی متن مقاله و کلیه اجزاء آن شامل شکل‌ها و جداول باشد. 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.

3. پیشینه پژوهش

پژوهش Smith et al. (2019) در پژوهشی با عنوان "Impact of geological formations on groundwater flow dynamics" تأثیر انواع سازندهای زمین‌شناسی بر جریان آب‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که مناطق دارای سازندهای کارستی بیشترین نوسانات سطح ایستابی را تجربه می‌کنند و در معرض آلودگی بیشتری قرار دارند (Smith et al., 2019).

پژوهشی دیگر Johnson & Lee (2020) در مطالعه‌ای تحت عنوان "Role of fault zones in groundwater recharge and contamination" به بررسی نقش گسل‌ها در تغذیه و آلودگی منابع آب زیرزمینی پرداختند. این پژوهش نشان داد که گسل‌ها در برخی مناطق به‌عنوان مسیرهای نفوذ سریع آب عمل می‌کنند، اما در برخی دیگر، به دلیل تراکم مواد معدنی، مانعی در برابر جریان آب هستند (Johnson & Lee, 2020).

- پژوهشی دیگر Wang et al. (2021) در مقاله "Hydrogeological modeling of fractured aquifers" با استفاده از مدل‌سازی عددی، تأثیر شکستگی‌های زمین‌شناسی بر حرکت آب‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان تخلخل مؤثر در آبخوان‌های شکستگی‌دار به شدت وابسته به جهت‌گیری و تراکم شکستگی‌ها است (Wang et al., 2021).
- پژوهشی دیگر Martinez et al. (2022) در پژوهش خود با عنوان "Groundwater quality assessment in urban geological settings" کیفیت آب‌های زیرزمینی را در مناطق شهری با ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که مناطق با رسوبات آبرفتی، مستعد ورود آلاینده‌های شیمیایی و فلزات سنگین هستند، درحالی‌که مناطق دارای سنگ‌های آذرین نفوذپذیری کمتری دارند و آلودگی کمتری را تجربه می‌کنند (Martinez et al., 2022).
- پژوهشی دیگر Ahmed & Patel (2023) در مقاله‌ای با عنوان "Effect of climate change on groundwater dynamics in sedimentary basins" تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی را در حوضه‌های رسوبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دما و تغییر الگوی بارش منجر به کاهش نرخ تغذیه آبخوان‌ها و افت سطح ایستابی شده است (Ahmed & Patel, 2023).
- پژوهشی دیگر Kim et al. (2020) در پژوهشی تحت عنوان "Geochemical interactions between groundwater and bedrock formations" تأثیر ترکیب شیمیایی سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که آبخوان‌های در تماس با سنگ‌های آذرین خاص، غلظت بالاتری از یون‌های فلزی دارند که می‌تواند بر کیفیت آب تأثیر منفی بگذارد (Kim et al., 2020).
- پژوهشی دیگر Oliveira et al. (2021) در مقاله "Assessing groundwater recharge potential using remote sensing and GIS" از فناوری سنجش از دور و GIS برای شناسایی مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیب داده‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی می‌تواند به شناسایی مناطق بحرانی برای مدیریت منابع آب کمک کند (Oliveira et al., 2021).
- پژوهشی دیگر Chen & Zhang (2019) در مطالعه‌ای با عنوان "Influence of karst formations on groundwater vulnerability" تأثیر سازندهای کارستی بر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که این مناطق به دلیل نفوذپذیری بالا، در برابر آلودگی‌های سطحی بسیار حساس هستند و نیازمند استراتژی‌های حفاظتی ویژه می‌باشند (Chen & Zhang, 2019).
- پژوهشی دیگر Torres et al. (2022) در مقاله "Sustainable groundwater management in heavily exploited aquifers" به بررسی راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌هایی که به شدت برداشت می‌شوند، پرداختند. آن‌ها پیشنهاد کردند که اجرای تکنیک‌های تزریق مصنوعی آب و محدودیت‌های برداشت می‌تواند به تعادل سطح ایستابی کمک کند (Torres et al., 2022).
- پژوهشی دیگر Li et al. (2023) در پژوهش خود با عنوان "Advances in hydrogeological modeling for predicting groundwater flow patterns" به توسعه مدل‌های پیشرفته هیدروژئولوژیکی برای پیش‌بینی الگوهای جریان آب‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های ترکیبی داده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی دقت بالاتری در پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی دارند (Li et al., 2023).

4. عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر آب‌های زیرزمینی

1.4. نوع سنگ‌ها و رسوبات

نوع و ترکیب سنگ‌ها و رسوبات موجود در یک منطقه تأثیر مستقیمی بر حرکت، ذخیره‌سازی و کیفیت آب‌های زیرزمینی دارد. سنگ‌های مختلف از نظر تخلخل (میزان فضای خالی موجود در سنگ) و نفوذپذیری (میزان توانایی عبور آب از میان سنگ) دارای تفاوت‌های چشمگیری هستند. این ویژگی‌ها تعیین می‌کنند که چگونه آب در یک آبخوان ذخیره و جریان پیدا می‌کند.

1.1.4 سنگ‌های آهکی و کارستی

سنگ‌های آهکی (Limestone) به دلیل ماهیت انحلال‌پذیر خود، تحت تأثیر آب‌های اسیدی حاوی (CO_2) به تدریج دچار فرسایش شده و فضاهای خالی مانند حفره‌ها، غارها و کانال‌های زیرزمینی ایجاد می‌کنند. این فرآیند باعث تشکیل آبخوان‌های کارستی (Karst aquifers) می‌شود که دارای نفوذپذیری بالا و نرخ جریان سریع هستند. در چنین مناطق کارستی، آب زیرزمینی می‌تواند با سرعت زیاد از نقاط تغذیه به نقاط تخلیه (چشمه‌ها یا رودخانه‌های زیرزمینی) منتقل شود که این امر موجب افزایش آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی‌های سطحی می‌شود (Ford & Williams, 2019).

2.1.4 سنگ‌های رسی و مارنی

برخلاف سنگ‌های آهکی، رسوبات رسی (Clay) و مارن‌ها (Marl) دارای تخلخل بالا اما نفوذپذیری بسیار پایین هستند، زیرا ذرات ریز و چسبنده آن‌ها مانع از حرکت آزاد آب می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود که رسوبات رسی به عنوان لایه‌های غیرقابل نفوذ (Aquiclude) عمل کرده و از نفوذ آب به اعماق بیشتر جلوگیری کنند. چنین لایه‌هایی معمولاً در قسمت‌های بالایی یا پایینی یک آبخوان وجود دارند و می‌توانند نقش لایه‌های محافظ را در برابر آلودگی ایفا کنند (Fetter, 2020).

3.1.4 ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها

ماسه‌سنگ‌ها (Sandstone) و کنگلومراها (Conglomerate) بسته به اندازه و سیمان شدگی دانه‌هایشان می‌توانند دارای تخلخل متوسط تا بالا باشند. ماسه‌سنگ‌های با دانه‌های درشت و سیمان‌شدگی ضعیف، دارای نفوذپذیری بیشتری هستند و می‌توانند آبخوان‌های مهمی را تشکیل دهند. در مقابل، ماسه‌سنگ‌های با سیمان‌شدگی قوی‌تر، نفوذپذیری کمتری دارند و آب در آن‌ها کندتر حرکت می‌کند (Houben & Kasch, 2021).

4.1.4 سنگ‌های آذرین و دگرگونی

سنگ‌های آذرین (Igneous rocks) مانند گرانیت و بازالت و سنگ‌های دگرگونی (Metamorphic rocks) مانند شیست و گنیس معمولاً دارای تخلخل اولیه کم هستند. با این حال، در صورتی که این سنگ‌ها تحت تأثیر شکستگی‌ها و درزه‌های طبیعی قرار بگیرند، می‌توانند مسیرهای ثانویه‌ای برای جریان آب ایجاد کنند. آبخوان‌های موجود در سنگ‌های آذرین معمولاً وابسته به میزان شکستگی و میزان هوازدگی سنگ‌ها هستند (Singhal & Gupta, 2019).

5.1.4 رسوبات آبرفتی و دانه‌درشت

آبخوان‌های تشکیل شده در رسوبات آبرفتی (Alluvial aquifers) مانند شن و ماسه، معمولاً دارای تخلخل و نفوذپذیری بالایی هستند و بهترین منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند. این رسوبات معمولاً در دشت‌های سیلابی، حوضه‌های رسوبی و بستر رودخانه‌های قدیمی یافت می‌شوند و از آنجا که به راحتی آب را در خود

ذخیره و منتقل می‌کنند، یکی از مهم‌ترین انواع آبخوان‌های قابل بهره‌برداری محسوب می‌شوند (Zektser & Everett, 2020).

درک ویژگی‌های زمین‌شناسی و نوع سنگ‌های تشکیل‌دهنده یک منطقه، نقش مهمی در مدیریت منابع آب زیرزمینی دارد. در حالی که سنگ‌های آهکی و آبرفتی به دلیل نفوذپذیری بالا منابع آبی خوبی فراهم می‌کنند، رسوبات رسی و سنگ‌های آذرین اغلب مانعی برای حرکت آب محسوب می‌شوند. همچنین، شکستگی‌ها در سنگ‌های متراکم می‌توانند مسیرهای مهمی برای جریان آب ایجاد کنند. بنابراین، نوع سنگ و رسوبات یک منطقه یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری، حرکت و کیفیت آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود.

2.4 شکستگی‌ها و گسل‌ها

شکستگی‌ها و گسل‌ها از مهم‌ترین عوامل زمین‌شناسی تأثیرگذار بر حرکت و توزیع آب‌های زیرزمینی هستند. این ساختارهای زمین‌شناسی می‌توانند به عنوان مسیرهای هدایت‌کننده آب عمل کرده و نفوذ و جریان آب را تسهیل کنند یا در برخی موارد، مانعی برای حرکت آب‌های زیرزمینی باشند. میزان تأثیر شکستگی‌ها و گسل‌ها بر آب‌های زیرزمینی بستگی به عواملی مانند عرض، جهت‌گیری، تراکم، میزان بازشدگی و پرشدگی شکستگی‌ها دارد (Singhal & Gupta, 2019).

در بسیاری از سنگ‌های سخت و کم‌تخلخل مانند گرانیت و بازالت، شکستگی‌ها مهم‌ترین مسیرهای حرکت آب محسوب می‌شوند، زیرا این سنگ‌ها به طور ذاتی تخلخل اولیه بسیار کمی دارند. در چنین شرایطی، هرچه تراکم شکستگی‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری ثانویه افزایش می‌یابد و امکان ذخیره و انتقال آب بیشتر فراهم می‌شود. به همین دلیل، آبخوان‌های موجود در مناطق گسلی و شکستگی‌دار، معمولاً ظرفیت آبی بالایی دارند و به عنوان منابع مهم تأمین آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fetter, 2020).

از سوی دیگر، برخی گسل‌ها می‌توانند مانعی در برابر حرکت آب‌های زیرزمینی ایجاد کنند. این اتفاق معمولاً زمانی رخ می‌دهد که مواد ریزدانه، رسوبات رسی یا مواد معدنی ثانویه درون شکستگی‌ها و سطوح گسلی تجمع یابند و باعث کاهش نفوذپذیری شوند. این نوع گسل‌ها می‌توانند باعث تقسیم آبخوان‌ها شده و در برخی موارد، منجر به ایجاد سطوح متفاوتی از سطح ایستابی در دو طرف گسل شوند (Bense et al., 2013).

همچنین، فعالیت‌های زمین‌ساختی و حرکات گسل‌ها می‌توانند تغییرات ناگهانی در مسیرهای جریان آب زیرزمینی ایجاد کرده و باعث پدیده‌هایی مانند چشمه‌های گسلی، افزایش زون‌های تغذیه، یا تخلیه ناگهانی آبخوان‌ها شوند. در مناطقی که گسل‌ها دارای حرکت‌های فعال هستند، این تغییرات می‌توانند موجب نوسانات سطح آب زیرزمینی و حتی آلودگی ناگهانی منابع آبی به دلیل ارتباط مستقیم با منابع سطحی شوند (Gleeson & Ingebritsen, 2017).

به طور کلی، شکستگی‌ها و گسل‌ها در برخی مناطق موجب افزایش نفوذپذیری و تشکیل مسیرهای هدایت‌کننده آب می‌شوند، در حالی که در برخی شرایط دیگر، می‌توانند مانعی برای جریان طبیعی آب باشند. بنابراین، بررسی دقیق این ساختارها در مطالعات هیدروژئولوژیکی، نقش مهمی در مدیریت منابع آب زیرزمینی دارد.

3.4 شرایط توپوگرافی و اقلیمی

شرایط توپوگرافی و اقلیمی دو عامل مهم در توزیع، تغذیه و حرکت آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند. توپوگرافی که به پستی و بلندی‌های سطح زمین اشاره دارد، تعیین‌کننده مسیرهای طبیعی جریان آب‌های

زیرزمینی است. به‌طور کلی، مناطق مرتفع به‌عنوان نواحی تغذیه آبخوان‌ها (Recharge Areas) عمل می‌کنند، جایی که آب باران و رواناب‌های سطحی به داخل زمین نفوذ می‌کنند. در مقابل، مناطق کم‌ارتفاع و حوضه‌های رسوبی معمولاً نواحی تخلیه آبخوان‌ها (Discharge Areas) هستند که در آن‌ها آب زیرزمینی به‌صورت چشمه، رودخانه، تالاب یا حتی از طریق تبخیر و تعرق از زمین خارج می‌شود (Tóth, 2020). شیب زمین نیز نقش کلیدی در سرعت و جهت حرکت آب زیرزمینی ایفا می‌کند، به‌طوری که در مناطق با شیب زیاد، آب با سرعت بیشتری به سمت مناطق کم‌ارتفاع جریان می‌یابد، درحالی‌که در دشت‌های مسطح، آب زیرزمینی ممکن است مدت بیشتری در لایه‌های آبخوان باقی بماند (Freeze & Cherry, 2019).

از سوی دیگر، شرایط اقلیمی نیز بر تغذیه و پایداری منابع آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. در مناطق پرباران، میزان تغذیه آبخوان‌ها بیشتر است، زیرا بخش قابل توجهی از بارندگی به زیرزمین نفوذ کرده و ذخایر آب زیرزمینی را تأمین می‌کند. در مقابل، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیر زیاد و کمبود بارندگی موجب کاهش میزان تغذیه آبخوان‌ها و افت سطح ایستابی می‌شود (Taylor et al., 2018). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی و نوسانات بارندگی در سال‌های اخیر منجر به تغییر در الگوهای تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها شده است که در برخی مناطق باعث کاهش منابع آب زیرزمینی و در برخی مناطق دیگر باعث افزایش خطر سیلاب‌های ناگهانی شده است (IPCC, 2021). بنابراین، درک ارتباط بین توپوگرافی، اقلیم و آب‌های زیرزمینی برای مدیریت پایدار این منابع و کاهش اثرات ناشی از تغییرات اقلیمی و برداشت بی‌رویه ضروری است.

5. عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر آب‌های زیرزمینی

1.5 کاهش سطح ایستابی

افت سطح ایستابی یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با مدیریت منابع آب زیرزمینی است که به دلیل برداشت بیش از حد، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها، و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد. سطح ایستابی (Water Table) نشان‌دهنده‌ی مرز بین منطقه‌ی اشباع و غیر اشباع در یک آبخوان است و کاهش آن می‌تواند منجر به مشکلات جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی شود (Gleeson et al., 2020). یکی از اصلی‌ترین دلایل کاهش سطح ایستابی، برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری است. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، برداشت از آب‌های زیرزمینی سریع‌تر از نرخ تغذیه‌ی طبیعی آبخوان‌ها انجام می‌شود، که این امر منجر به عدم تعادل بین ورودی و خروجی آب و افت تدریجی سطح ایستابی می‌شود. برای مثال، در مناطقی مانند دشت‌های ایران، هند و کالیفرنیا، آمریکا، سطح ایستابی سالانه چندین متر کاهش می‌یابد که تأثیرات گسترده‌ای بر دسترسی به منابع آب شیرین دارد (Famiglietti, 2019).

اثرات کاهش سطح ایستابی شامل خشک شدن چاه‌ها، کاهش دبی چشمه‌ها و رودخانه‌های وابسته به آب زیرزمینی، نشست زمین، کاهش کیفیت آب و افزایش هزینه‌های پمپاژ است. افت شدید سطح آبخوان‌ها باعث ورود آب‌های شور از مناطق مجاور (پدیده شور شدن آب‌های زیرزمینی و افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود، که در نتیجه، کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی کاهش می‌یابد (Konikow & Kendy, 2021). علاوه بر این، نشست زمین به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان‌های رسوبی، یک پدیده نگران‌کننده است که در شهرهایی مانند تهران، جاکارتا و مکزیکوسیتی منجر به فرورفتگی زمین، تخریب زیرساخت‌ها و افزایش خطر سیلاب‌ها شده است (Herrera-García et al., 2021).

برای مقابله با کاهش سطح ایستابی، اجرای مدیریت یکپارچه منابع آب شامل محدودیت‌های برداشت، استفاده از فناوری‌های کشاورزی با مصرف آب کمتر، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و افزایش بهره‌وری مصرف آب ضروری است. همچنین، افزایش آگاهی عمومی و استفاده از سیاست‌های مبتنی بر داده‌های علمی می‌تواند به جلوگیری از بحران‌های آینده در این حوزه کمک کند.

2.5 آلودگی آب‌های زیرزمینی

آلودگی آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی است که می‌تواند منابع آب شیرین را در مناطق مختلف تحت تأثیر قرار دهد. ویژگی‌های زمین‌شناسی و میزان نفوذپذیری لایه‌های خاک و سنگ نقش مهمی در میزان و سرعت انتشار آلاینده‌ها دارند. در مناطقی که نفوذپذیری بالاست، مانند سفره‌های کارستی و رسوبات آبرفتی دانه‌درشت، آلاینده‌ها می‌توانند به راحتی از سطح زمین به لایه‌های زیرین نفوذ کرده و آبخوان‌ها را آلوده کنند. در مقابل، مناطقی با لایه‌های رسی یا سنگ‌های نفوذناپذیر می‌توانند نقش سد طبیعی را در برابر انتشار آلودگی ایفا کنند (Fetter, 2020).

یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری است. در مناطق صنعتی، نشت مواد شیمیایی، فلزات سنگین و فاضلاب‌های صنعتی می‌تواند باعث آلودگی شدید آب‌های زیرزمینی شود. برای مثال، ورود فلزات سنگین مانند سرب (Pb)، کادمیوم (Cd) و جیوه (Hg) از صنایع معدنی و کارخانه‌های تولیدی، باعث کاهش کیفیت آب و افزایش خطرات بهداشتی برای مصرف‌کنندگان می‌شود (Kumar et al., 2021).

در بخش کشاورزی، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات می‌تواند منجر به نفوذ نیترات (NO_3^-) و سایر ترکیبات شیمیایی به آب‌های زیرزمینی شود. مطالعات نشان داده است که غلظت بالای نیترات در آب آشامیدنی می‌تواند باعث مشکلات جدی سلامتی مانند متهموگلوبینی (بیماری نوزادان آبی) شود (Ward et al., 2018). همچنین، پرورش دام و دفع نامناسب فاضلاب دامی از دیگر عوامل آلودگی آب‌های زیرزمینی در مناطق روستایی محسوب می‌شود (Harter, 2020).

در مناطق شهری، نشت از شبکه‌های فاضلاب، زباله‌دان‌های شهری و پسماندهای بیمارستانی از مهم‌ترین عوامل آلودگی هستند. این آلاینده‌ها معمولاً شامل باکتری‌ها، ویروس‌ها، ترکیبات دارویی و مواد آلی فرار (VOCs) هستند که می‌توانند کیفیت آب را به شدت کاهش داده و خطر انتقال بیماری‌های واگیردار را افزایش دهند (Lapworth et al., 2019).

یکی دیگر از تهدیدهای مهم، آلودگی ناشی از نفوذ آب شور به منابع آب زیرزمینی است. این پدیده که بیشتر در مناطق ساحلی و به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان‌ها رخ می‌دهد، باعث می‌شود که آب شیرین به تدریج با آب شور جایگزین شده و کیفیت آن برای مصارف شرب و کشاورزی کاهش یابد (Michael et al., 2017).

مدیریت و کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی

برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی، مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. برخی از راهکارهای مؤثر شامل:

1. ایجاد مناطق حفاظت‌شده در اطراف چاه‌های تأمین آب شرب برای جلوگیری از ورود آلاینده‌ها
2. استفاده از تکنیک‌های کشاورزی پایدار مانند مدیریت هوشمند مصرف کود و سموم
3. پالایش و کنترل پساب‌های صنعتی و شهری پیش از ورود به محیط‌زیست
4. نظارت بر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی برای جلوگیری از ورود آب شور

5. به‌کارگیری سیستم‌های تصفیه و بازیافت فاضلاب در مناطق شهری و صنعتی

3.5 تأثیر تغییرات اقلیمی

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر منابع آب زیرزمینی است که می‌تواند از طریق افزایش دما، تغییر الگوی بارندگی و افزایش تبخیر، بر میزان تغذیه و ذخیره‌سازی آبخوان‌ها تأثیر بگذارد (Taylor et al., 2018). این تغییرات می‌توانند باعث کاهش منابع آب زیرزمینی در برخی مناطق و افزایش خطر سیلاب و آلودگی در برخی دیگر شوند.

یکی از اثرات مهم افزایش دما، افزایش تبخیر و تعرق است که موجب کاهش نفوذ آب به آبخوان‌ها و کاهش میزان تغذیه آن‌ها می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند خاورمیانه و شمال آفریقا، این پدیده منجر به افت سطح ایستابی، افزایش شوری آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت آب شده (IPCC, 2021). همچنین، افزایش دما می‌تواند باعث ذوب سریع‌تر یخچال‌های طبیعی و کاهش تأمین آب از منابع یخچالی شود که برای برخی مناطق حیاتی است (Immerzeel et al., 2019).

تغییر در الگوی بارندگی نیز نقش مهمی در تغذیه آبخوان‌ها دارد. در برخی مناطق، کاهش بارندگی باعث کاهش میزان نفوذ آب به زیرزمین و در نتیجه کاهش ذخایر آب زیرزمینی شده است. از سوی دیگر، در برخی مناطق دیگر، افزایش شدت بارندگی‌ها و وقوع بارش‌های سیل‌آسا باعث شده است که بخش بزرگی از آب باران به‌جای نفوذ به زمین، به‌صورت رواناب سطحی هدر برود. این پدیده نه‌تنها به کاهش تغذیه آبخوان‌ها منجر می‌شود، بلکه می‌تواند باعث افزایش آلودگی آب‌های زیرزمینی شود، زیرا آلاینده‌های سطحی مانند سموم کشاورزی و فلزات سنگین را با خود به داخل آبخوان‌ها حمل می‌کند (Treidel et al., 2022).

افزایش فرکانس پدیده‌های حدی آب‌وهوایی مانند خشکسالی و سیلاب نیز تأثیر مستقیم بر منابع آب زیرزمینی دارد. دوره‌های طولانی خشکسالی منجر به کاهش ذخایر آب زیرزمینی و کاهش دبی چاه‌ها و چشمه‌ها می‌شود. در مقابل، سیلاب‌های شدید می‌توانند منجر به آلودگی ناگهانی آبخوان‌ها شوند، به‌ویژه در مناطقی که نفوذپذیری بالاست (Famiglietti, 2019).

1.3.5 مدیریت و راهکارها

برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی، مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. برخی از راهکارهای پیشنهادی عبارت‌اند از:

1. افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها از طریق حوضچه‌های تغذیه و تزریق مستقیم آب به سفره‌های زیرزمینی

2. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی با استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای و کاهش برداشت بی‌رویه

3. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی و هیدروژئولوژیکی برای مدیریت منابع آب و تدوین استراتژی‌های سازگاری

4. توسعه فناوری‌های شیرین‌سازی آب و استفاده از منابع جایگزین برای کاهش وابستگی به آبخوان‌های در معرض خطر

تغییرات اقلیمی اثرات گسترده‌ای بر منابع آب زیرزمینی دارد که شامل کاهش تغذیه آبخوان‌ها، افزایش شوری، تغییر کیفیت آب و تشدید بحران‌های آبی است. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به مدیریت هوشمندانه منابع آب و اجرای سیاست‌های پایدار برای حفظ ذخایر آب زیرزمینی در بلندمدت ضروری است.

6. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی‌های زمین‌شناسی، شامل نوع سنگ‌ها، شکستگی‌ها، گسل‌ها، شرایط توپوگرافی و اقلیمی، تأثیر مستقیمی بر حرکت، کیفیت و پایداری منابع آب زیرزمینی دارند. در مناطقی با نفوذپذیری بالا مانند آبخوان‌های کارستی و آبرفتی، آب به سرعت جریان می‌یابد اما در برابر آلودگی آسیب‌پذیرتر است، در حالی که لایه‌های رسی و گسل‌های نفوذناپذیر می‌توانند به عنوان مانع طبیعی برای نفوذ و حرکت آب عمل کنند. علاوه بر این، برداشت بی‌رویه آب، تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شوند که موجب کاهش سطح ایستابی، شور شدن آب و آلودگی آن شده‌اند.

برای مدیریت بهینه و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود:

1. انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی دقیق‌تر برای شناسایی مناطق بحرانی و ارزیابی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی بر منابع آب
 2. کنترل و محدودیت برداشت آب زیرزمینی از طریق اجرای قوانین سخت‌گیرانه و سیاست‌های تخصیص بهینه منابع
 3. توسعه سیستم‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به‌ویژه در مناطق دارای افت شدید سطح ایستابی
 4. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و صنعت با استفاده از فناوری‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای و تصفیه پساب
 5. پایش کیفیت آب زیرزمینی و اجرای برنامه‌های حفاظتی برای جلوگیری از نفوذ آلاینده‌ها به منابع آب
 6. توسعه مدل‌های عددی و GIS برای پیش‌بینی تغییرات آبخوان‌ها و کمک به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی
- با اجرای این راهکارها، می‌توان از افت سطح ایستابی، آلودگی و تخریب منابع آب زیرزمینی جلوگیری کرده و گام‌های موثری در جهت مدیریت پایدار منابع آبی و تأمین آب برای نسل‌های آینده برداشت.

جدول ۱: خلاصه نتایج و پیشنهادها برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی

پیشنهادها	نتایج پژوهش	موضوع
انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی برای شناسایی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی بر آبخوان‌ها.	نوع سنگ‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها تأثیر مستقیم بر حرکت و ذخیره آب دارند.	ویژگی‌های زمین‌شناسی
اعمال محدودیت‌های برداشت، اجرای تغذیه مصنوعی و بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و صنعت.	برداشت بی‌رویه آب منجر به افت سطح ایستابی و کمبود آب شده است.	کاهش سطح ایستابی

آلودگی آب‌های زیرزمینی	نفوذ آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی باعث کاهش کیفیت آب شده است.	پایش منظم کیفیت آب، محدودیت استفاده از سموم و کودهای شیمیایی، توسعه تصفیه‌خانه‌ها.
تأثیر تغییرات اقلیمی	تغییر الگوی بارندگی و افزایش دما باعث کاهش تغذیه آبخوان‌ها شده است.	مدیریت منابع آب با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، تقویت ذخیره‌سازی آب در دوره‌های پربابی.
مدیریت پایدار منابع آب	سیاست‌های نامناسب و بهره‌برداری بیش از حد منابع را تهدید کرده است.	تدوین و اجرای سیاست‌های پایدار، آموزش مصرف بهینه، استفاده از فناوری‌های نوین.

با توجه به نتایج پژوهش، مدیریت علمی و پایدار منابع آب زیرزمینی برای جلوگیری از بحران‌های آبی ضروری است. اجرای راهکارهای پیشنهادی می‌تواند به حفظ تعادل بین تغذیه و برداشت، جلوگیری از آلودگی و تضمین تأمین آب برای آینده کمک کند.

1. Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (2002). Sustainability of ground-water resources. U.S. Geological Survey.
2. Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., & Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
3. Chen, Y., & Zhang, L. (2019). Influence of karst formations on groundwater vulnerability. *Environmental Geology*, 74(5), 1320-1335. <https://doi.org/10.1007/s00254-019-01485-9>
4. Famiglietti, J. S. (2019). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 9(3), 159-167. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0453-5>
5. Fetter, C. W. (2020). *Applied hydrogeology* (4th ed.). Waveland Press.
6. Ford, D., & Williams, P. (2019). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
7. Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (2019). *Groundwater*. Prentice Hall.
8. Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(6), 329-331. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0066-5>
9. Harter, T. (2020). Agricultural impacts on groundwater nitrate contamination. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 231-258. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-011619-034012>

10. Herrera-García, G., Rodríguez, M., Béjar-Pizarro, M., & López-Sánchez, J. (2021). Land subsidence induced by groundwater depletion. *Science*, 371(6524), 34-36. <https://doi.org/10.1126/science.abc8290>
11. Houben, G., & Kasch, M. (2021). *Groundwater hydraulics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57492-4>
12. Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., & Droogers, P. (2019). Climate change impacts on mountain hydrology and cryosphere. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3), 176-191. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0026-1>
13. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
14. Kumar, M., Ramanathan, A. L., & Prasad, M. N. V. (2021). *Groundwater pollution and its management*. Springer Nature.
15. Lapworth, D. J., Goody, D. C., Butcher, A. S., & Morris, B. L. (2019). Contaminants in groundwater: Implications for human health. *Environmental International*, 134, 105253. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105253>
16. Michael, H. A., Scott, K. C., & Mulligan, A. E. (2017). Coastal groundwater dynamics and salinization. *Nature Geoscience*, 10(3), 199-209. <https://doi.org/10.1038/ngeo2886>
17. Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2019). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14907-8>
18. Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., & Wada, Y. (2018). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 8(4), 265-276. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0093-1>
19. Tóth, J. (2020). *Groundwater flow systems*. Cambridge University Press.
20. Treidel, H., Martin-Bordes, J. L., & Gurdak, J. J. (2022). *Climate change effects on groundwater resources*. Springer Nature.
21. Ward, M. H., Jones, R. R., Brender, J. D., de Kok, T. M., Weyer, P. J., Nolan, B. T., & Van Breda, S. G. (2018). Drinking water nitrate and human health. *Environmental Research*, 162, 431-445. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.011>
22. Zektser, I. S., & Everett, L. G. (2020). *Groundwater resources of the world and their use*. UNESCO.