چهارمین کنفرانس بین‌المللی
دانشجویان مهندسی معدن، زمین‌شناسی و متالورژی
4th International Conference
Students of Mining Engineering Geology and Metallurgy
www.mgm.cdsts.ir

تحلیل فرایند های هیدروژئوشیمیایی در تکامل آب های زیرزمینی ایران

عبدالحمید انصاری [۱]

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

خلاصه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، نقشی حیاتی در پایداری اقتصادی، کشاورزی و زیست‌محیطی کشور دارند. با این حال، بهره‌برداری بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و ویژگی‌های زمین‌شناسی متنوع ایران موجب تغییرات چشمگیر در ترکیب شیمیایی و کیفیت این منابع شده است. هدف از این پژوهش، شناسایی و تحلیل فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر تکامل آب‌های زیرزمینی در ایران است. در این راستا، داده‌های هیدروشیمیایی و اطلاعات زمین‌شناسی موجود با استفاده از دیاگرام‌های کلاسیک نظیرPiper ، Gibbsو Wilcox تحلیل شدند تا منشأ یون‌های اصلی، نوع آب‌ها و مسیر تکامل آن‌ها مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد که در مناطق کوهستانی زاگرس و البرز، آب‌های زیرزمینی غالباً از نوع کلسیم–بیکربناته ($Ca–HCO_3$) با کیفیت بالا هستند، در حالی‌که در دشت‌های مرکزی و شرقی، تحت تأثیر انحلال کانی‌های تبخیری، تبادل یونی در خاک‌های رسی و تبخیر شدید، ترکیب آب به‌تدریج به سدیم–کلریدی ($Na–Cl$) تغییر می‌یابد. همچنین، در مناطق ساحلی، نفوذ آب شور دریا و تماس با نهشته‌های نمکی، عامل اصلی افزایش شوری و سدیمی شدن آبخوان‌ها است. فعالیت‌های انسانی مانند مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و برداشت بیش از حد از چاه‌ها نیز کیفیت آب را به‌ویژه از نظر نیترات و شوری به‌شدت کاهش داده‌اند. یافته‌ها بیانگر آن است که تکامل شیمیایی آب‌های زیرزمینی ایران نتیجه‌ی هم‌زمان فرآیندهای طبیعی و انسانی است و درک دقیق این فرآیندها می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت پایدار و جلوگیری از شورشدگی و آلودگی منابع آب زیرزمینی کشور فراهم آورد.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، هیدروژئوشیمی، تبادل یونی، تبخیر، شوری، مدیریت منابع آب

۱. مقدمه

آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژی، در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران، نقش حیاتی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی ایفا می‌کند[۱] در کشورهایی با محدودیت منابع آب سطحی، شناخت ویژگی‌ها و رفتار شیمیایی آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایران با میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر، جزو مناطق خشک و کم‌آب محسوب می‌شود؛ در نتیجه، وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد.[۲] در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان‌ها، سبب افت سطح ایستابی، تغییر جهت جریان‌های

زیرسطحی و تغییرات شیمیایی قابل ملاحظه در آب‌های زیرزمینی کشور شده است .[۳]

تکامل شیمیایی آب زیرزمینی فرآیندی است که در طی آن، ترکیب یونی آب در اثر واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی میان آب و سنگ بستر دچار تغییر می‌شود.[۴] این تغییرات می‌تواند ناشی از انحلال یا رسوب کانی‌ها، تبادل یونی بین فازهای جامد و مایع، تبخیر، اکسیداسیون و احیاء مواد معدنی، نفوذ آب‌های شور و حتی فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از کودهای شیمیایی باشد.[۵] بررسی این فرآیندها از دیدگاه هیدروژئوشیمیایی، امکان تفسیر منشأ یون‌های محلول، مسیر جریان زیرزمینی، و مکانیسم‌های کنترل‌کننده کیفیت آب را فراهم می‌سازد

در ایران، تنوع زمین‌شناسی و ساختاری بسیار بالاست؛ از سنگ‌های آتشفشانی و آذرین در شمال‌غرب، تا رسوبات تبخیری و آهکی در مرکز و جنوب کشور. این تنوع لیتولوژیکی سبب شده تا ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف بسیار متفاوت باشد. در بسیاری از دشت‌های مرکزی مانند یزد، اردکان، سمنان و قم، سازندهای تبخیری (همچون سازند گچساران و سری قم (نقش اصلی را در افزایش شوری و غلبه یون‌های Na^{+} ، Cl^{-}و SO_4^{2-} دارند. در مقابل، در مناطق کوهستانی و نواحی تغذیه (نظیر البرز و زاگرس)، آب‌ها معمولاً از نوع $Ca\text{-}HCO_3$ هستند که بیانگر تماس آب تازه با سنگ‌های کربناته و واکنش‌های انحلالی محدود است .[۶]

مطالعات پیشین در ایران نشان داده‌اند که فرآیندهای انحلال دولومیت و کلسیت، تبادل یونی کلسیم–سدیم در خاک‌های رسی، و تأثیر تبخیر در مناطق پست و گرم، مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب‌های زیرزمینی کشور محسوب می‌شوند .[۳] همچنین، نفوذ آب‌های شور از دریا در مناطق ساحلی خوزستان و هرمزگان، و از نهشته‌های نمکی در دشت‌های داخلی، یکی از عوامل اصلی افزایش هدایت الکتریکی (EC) و کل املاح محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی است[۷].

از سوی دیگر، تغییر اقلیم و افزایش دما در سال‌های اخیر موجب کاهش بارش مؤثر، افزایش تبخیر و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها شده است.[۸] در نتیجه، در بسیاری از حوضه‌ها، فرآیندهای تمرکز املاح و تغییر نوع هیدروشیمیایی آب شدت یافته است. به عنوان مثال، مطالعات انجام‌شده در دشت ورامین، قم و رفسنجان نشان می‌دهد که آب در مسیر حرکت از کوهپایه به دشت، از نوع $Ca\text{-}HCO_3$ به Na-Cl تغییر یافته است؛ این موضوع بیانگر تکامل ژئوشیمیایی آب در مسیر جریان و افزایش تماس با مواد تبخیری است .[۶]

مطالعه هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی، نه تنها در شناخت وضعیت کیفی فعلی آب‌ها اهمیت دارد، بلکه ابزار کلیدی برای پیش‌بینی تغییرات آتی و مدیریت منابع آب است.[۴] با تحلیل دقیق فرآیندهای حاکم، می‌توان روندهای شورشدگی، آلودگی نیتراتی، و تغییر نوع آب را شناسایی و از تخریب تدریجی کیفیت آبخوان‌ها جلوگیری کرد. به‌ویژه در ایران، که بسیاری از آبخوان‌ها با بحران کیفی و کمی مواجه‌اند، درک مکانیزم‌های کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب برای تدوین راهبردهای مدیریتی ضروری است.[۲و۷]

بنابراین، هدف این پژوهش شناسایی و تحلیل فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر تکامل آب‌های زیرزمینی در ایران است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا انواع فرآیندهای کنترل‌کننده ترکیب آب (نظیر انحلال، تبادل یونی، تبخیر، و احیاء–اکسیداسیون) معرفی و بررسی می‌شوند؛ سپس با استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی و ابزارهای ترسیمی نظیر دیاگرام‌هایPiper ، Gibbsو Wilcox ، نوع آب‌ها و مسیر تکامل آن‌ها تحلیل خواهد شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و تعیین مناطق آسیب‌پذیر از نظر کیفی در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

۲. ارسال شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی ایران و تأثیر آن بر آب‌های زیرزمینی

ایران یکی از کشورهای با تنوع زمین‌شناسی و اقلیمی بسیار بالا در جهان است. این تنوع باعث شده که آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف کشور از نظر کیفیت و ترکیب شیمیایی تفاوت‌های چشمگیری داشته باشند.[۱] از منظر زمین‌شناسی، ایران شامل واحدهای تبخیری، رسوبی، آذرین و دگرگونی است که هرکدام اثرات مستقیمی بر ویژگی‌های آب زیرزمینی دارند.

الف) زمین‌شناسی و لیتولوژی

در نواحی مرکزی ایران، از جمله فلات مرکزی، سازندهای تبخیری مانند گچساران و قم بسیار گسترده‌اند. حضور این کانی‌ها باعث شده که آب‌های زیرزمینی این مناطق، حتی در شرایط تأمین کافی آب، دارای شوری نسبتا بالا باشند و اغلب برای شرب و کشاورزی نیازمند تصفیه باشند.[۹] همچنین در نواحی کویری و دشت‌های مرکزی، ترکیب رسوبات رسی و تبخیری باعث ایجاد شرایط تبادل یونی شدید شده و نوع آب را از کلسیمی–بیکربناته به سدیمی–کلریدی تغییر می‌دهد.[۳]

در مقابل، در رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز، سنگ‌های آهکی و دولومیتی غالب‌اند. در این مناطق، آب‌های زیرزمینی معمولاً از نوع کلسیم–بیکربناته هستند که کیفیت مطلوبی برای شرب و کشاورزی دارند.[۶] این ویژگی به دلیل انحلال محدود کربنات‌ها و تماس کمتر با نهشته‌های تبخیری است. بنابراین، نواحی کوهستانی ایران، به‌ویژه غرب و شمال غرب، منابع آب زیرزمینی نسبتاً سالم و پایدار فراهم می‌کنند.[۳]

ب) تأثیر اقلیم

بخش عمده‌ای از ایران تحت اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، با بارش سالانه کمتر از ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و دمای متوسط بالای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دشت‌های مرکزی و شرقی. این شرایط سبب تبخیر شدید و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها می‌شود.[۸] کاهش جریان آب‌های سطحی و محدود شدن نفوذ آب تازه، باعث افزایش غلظت املاح محلول در آب‌های زیرزمینی و افزایش شوری آن‌ها می‌شود.

نواحی ساحلی جنوب ایران مانند خوزستان، هرمزگان و بوشهر تحت تأثیر نفوذ آب شور دریایی و ترکیب با آب‌های زیرزمینی هستند که این پدیده به افزایش شوری و سدیمی شدن آب می‌انجامد.[۷]

ج) اثرات زمین‌شناسی و اقلیم بر تکامل هیدروژئوشیمیایی

ترکیب زمین‌شناسی و شرایط اقلیمی، مسیر تکامل شیمیایی آب‌های زیرزمینی ایران را شکل می‌دهد. در مناطق کوهستانی، آب تازه و با ترکیب ساده ($Ca–HCO_3$) است، ولی با حرکت به سمت دشت‌ها و تماس بیشتر با کانی‌های تبخیری و رسوبات رسی، نوع آب تغییر یافته و به ($Na–SO_4$) و در نهایت ($Na–Cl$) می‌رسد.[۱۰] این روند، نتیجه‌ی زمان ماند طولانی آب، تبخیر شدید و تبادل یونی با خاک‌های رسی است و به‌ویژه در دشت‌های مرکزی و شرقی ایران مشهود است.[۹]

د) پیامدهای کیفی

نتایج مطالعات نشان داده است که بیش از نیمی از آب‌های زیرزمینی دشت‌های مرکزی و شرقی ایران دارای شوری بالا و یون‌های سدیمی غالب هستند، به طوری که استفاده از آن‌ها برای شرب یا کشاورزی

محدود و نیازمند تصفیه است.[۱۱] مناطق کوهستانی و شمالی کشور، به دلیل ترکیب سنگ‌ها و تبخیر کمتر، آب با کیفیت بالاتری فراهم می‌کنند که برای مصارف مختلف مناسب است.

در مجموع، ترکیب زمین‌شناسی متنوع و اقلیم خشک ایران، عواملی تعیین‌کننده در تکامل هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی هستند. حضور کانی‌های تبخیری، رسوبات رسی، میزان بارش کم و تبخیر شدید، باعث می‌شود که آب‌های دشت‌های مرکزی کشور غنی از سدیم، کلر و سولفات شوند، در حالی که آب‌های مناطق کوهستانی با سنگ‌های آهکی و دولومیتی، کیفیت بهتر و شوری پایین‌تری دارند. شناخت دقیق این ویژگی‌ها برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی مصرف شرب و کشاورزی ضروری است .[۱۲]

۳. فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر تکامل آب زیرزمینی

۳.۱. انحلال کانی‌ها

یکی از اصلی‌ترین فرآیندهای تعیین‌کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، انحلال سنگ‌ها و کانی‌های تبخیری و کربناته است. در مناطق دارای نهشته‌های گچی، نمکی یا مارنی، یون‌های سدیم، کلر و سولفات به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. در مقابل، در مناطق آهکی، یون‌های کلسیم و بیکربنات غلبه دارند.[۹] شدت این فرآیند به زمان تماس آب با سنگ، دما، و نوع کانی‌ها بستگی دارد. هرچه زمان ماند آب در زیرزمین بیشتر باشد، ترکیب یونی پیچیده‌تر می‌شود.[۴]

۳.۲. تبادل یونی

فرآیند تبادل یونی یکی از مکانیزم‌های اصلی در تغییر نوع آب زیرزمینی است. در خاک‌های رسی، یون‌های کلسیم و منیزیم می‌توانند با سدیم و پتاسیم تبادل کنند و موجب تغییر نوع آب از $Ca–HCO_3$ به Na–Clشوند. این پدیده در بسیاری از دشت‌های مرکزی ایران، مانند یزد، قم و رفسنجان مشاهده شده و باعث افزایش سدیمی شدن آب و کاهش کیفیت آن برای کشاورزی شده است.[۳]

۳.۳. تبخیر و تمرکز املاح

در نواحی خشک و نیمه‌خشک ایران، تبخیر بالا و کاهش تغذیه طبیعی از عوامل اصلی تمرکز املاح در آب زیرزمینی است. هرچه نسبت تبخیر به بارندگی افزایش یابد، یون‌های محلول غلیظ‌تر می‌شوند. این فرآیند نه‌تنها موجب افزایش شوری، بلکه تغییر نوع غالب آب از کلسیمی–بیکربناته به سدیمی–کلریدی را نیز به دنبال دارد .

تبخیر بالا باعث افزایش هدایت الکتریکی (EC) و کل املاح محلول (TDS) می‌شود که از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت آب هستند.[۱۲]

۳.۴. اختلاط و نفوذ آب‌های شور

در برخی مناطق، مانند سواحل جنوبی (خوزستان و هرمزگان) و دشت‌های کویری مرکزی، اختلاط آب‌های شور با آب‌های شیرین در اثر نفوذ آب دریا یا تماس با نهشته‌های تبخیری رخ می‌دهد. این فرآیند یکی از عوامل اصلی شورشدگی آبخوان‌ها است و در صورت تداوم، می‌تواند منجر به غیرقابل‌استفاده شدن دائمی منابع آب زیرزمینی شود.[۷]

۳.۵. تأثیر فعالیت‌های انسانی

فعالیت‌های انسانی، از جمله استفاده بیش از حد از کودهای نیتروژنی، تخلیه فاضلاب‌ها و بهره‌برداری بیش از اندازه از چاه‌ها، نقش قابل‌توجهی در تغییر ترکیب آب‌های زیرزمینی دارند. ورود نیترات به آبخوان‌ها، افزایش شوری ناشی از بازگردش پساب‌های کشاورزی و کاهش سطح ایستابی، کیفیت آب را به‌طور جدی تهدید می‌کند. در برخی مناطق، مانند دشت ورامین و خراسان، مقادیر نیترات بیش از حد مجاز گزارش شده است.[۱۱]

۴. تکامل شیمیایی آب های زیر زمینی در ایزان

در تکامل شیمیایی آب‌های زیرزمینی در ایران به‌صورت تدریجی و سیستماتیک از مناطق تغذیه تا مناطق تخلیه رخ می‌دهد و تحت تأثیر ترکیبی از عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است.[۱]
در مناطق کوهستانی، که عمدتاً سنگ‌های آهکی و دولومیتی غالب‌اند، آب‌های زیرزمینی تازه هستند و ترکیب شیمیایی ساده‌ای دارند، معمولاً از نوع کلسیم–بیکربناته .($Ca–HCO_3$) کیفیت آب در این مناطق مناسب و شوری پایین است، که آن را برای مصارف شرب و کشاورزی مطلوب می‌سازد.[۶]
با حرکت آب به سمت دشت‌ها و افزایش تماس با سنگ‌های تبخیری، خاک‌های رسی و کانی‌های سولفاته، ترکیب شیمیایی آب تغییر می‌کند. ابتدا به کلسیم–سولفات($Ca–SO_4$) ، سپس به سدیم–سولفات ($Na–SO_4$) و در نهایت به سدیم–کلرید ($Na–Cl$) تبدیل می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش زمان ماند آب در سفره‌های زیرزمینی، تبخیر شدید سطحی و تبادل یونی بین آب و رسوبات است.[۶]
تحلیل مکانی نشان می‌دهد که اکثر آبخوان‌های مرکزی ایران در مرحله پیشرفته تکامل شیمیایی قرار دارند .این بدان معناست که آب‌ها شوری بالایی پیدا کرده و نسبت سدیم به کلسیم افزایش یافته است، که می‌تواند محدودیت‌هایی برای مصارف شرب و کشاورزی ایجاد کند.[۷]
این روند تکاملی همچنین نشان‌دهنده اثرات فرآیندهای طبیعی و انسانی بر کیفیت آب است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیر شدید و تماس با کانی‌های تبخیری روند تغییر ترکیب آب را تشدید می‌کند،درحالی که برداشت بی‌رویه و آلودگی نیتراتی باعث کاهش کیفیت آب و افزایش ترکیبات مضر می‌شوند .
بنابراین، شناخت مکان و مرحله تکامل شیمیایی آب‌ها برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، انتخاب مناسب مصارف شرب و کشاورزی و پیش‌بینی تغییرات آتی کیفیت آب، ضروری است. این اطلاعات پایه‌ای برای مدیریت پایدار سفره‌های آب زیرزمینی ایران فراهم می‌کند.

۵. روابط کیفیت و قابلیت استفاده از آب های زیر زمینی ایران

تحقیقات متعدد نشان می‌دهند که کیفیت آب‌های زیرزمینی در ایران به‌طور قابل توجهی متغیر است و حدود نیمی از منابع آب زیرزمینی کشور برای شرب نامناسب‌اند. این وضعیت عمدتاً به دلیل افزایش غلظت کلراید، سولفات و TDS است که در بسیاری از دشت‌های مرکزی، شرقی و جنوب کشور، فراتر از استانداردهای سازمان جهانی بهداشت گزارش شده است. آب‌های دارای این ویژگی‌ها، نه تنها برای مصارف شرب و صنعتی محدودیت دارند، بلکه در صورت استفاده نامناسب می‌توانند اثرات طولانی‌مدت بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند.[۱۱]

برای مصارف کشاورزی، شاخص شوری (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) در بسیاری از دشت‌ها، از جمله فلات مرکزی، دشت خوزستان و نواحی ساحلی جنوب، بالا گزارش شده‌اند.[۱۲] افزایش این شاخص‌ها موجب سدیمی شدن خاک و کاهش نفوذپذیری آن می‌شود؛ در نتیجه، جذب آب توسط ریشه‌ها محدود شده و عملکرد گیاهان کاهش می‌یابد.

تحلیل مکانی نشان می‌دهد که در دشت‌های مرکزی و شرقی، تأثیر فرآیندهای طبیعی مانند تبخیر شدید و انحلال کانی‌های تبخیری با اثرات انسانی مانند برداشت بی‌رویه و استفاده گسترده از کودهای شیمیایی ترکیب شده و باعث ایجاد آب‌های بسیار شور و سدیمی شده است. در مناطق کوهستانی و مرطوب‌تر، آب‌های زیرزمینی معمولاً کیفیت بالاتر و شوری پایین‌تری دارند، اما در حاشیه دشت‌ها و مناطق ساحلی، نفوذ آب شور دریایی و تبخیر موجب افزایش شوری و سدیمی شدن آب می‌شود.[۷]

پیامدهای کیفیت پایین آب بر کشاورزی بسیار چشمگیر است. تنها گیاهان مقاوم به شوری، مانند پسته، جو و برخی گونه‌های جو دوسر، قادر به رشد اقتصادی در این شرایط هستند. بسیاری از محصولات حساس مانند گندم، ذرت و سبزیجات، در مواجهه با آب‌های شور، عملکرد و کیفیت خود را از دست می‌دهند.[۱۰] این محدودیت‌ها ضرورت انتخاب گونه‌های مقاوم و مدیریت بهینه آب و خاک را برای حفظ بهره‌وری کشاورزی آشکار می‌سازد.

با توجه به این شرایط، مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی ایران نیازمند رویکردی چندبعدی است:

۱. پایش مستمر کیفیت آب و خاک با استفاده از شاخص‌های شوری، نیترات و سایر یون‌های اصلی، برای شناسایی مناطق حساس و پیش‌بینی روند تغییرات.

۲. مدیریت یکپارچه آب‌های زیرزمینی و کشاورزی شامل کاهش برداشت بی‌رویه، اصلاح الگوی آبیاری و انتخاب گونه‌های مقاوم به شوری.

۳. تغذیه مصنوعی و احیاء آبخوان‌ها در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک با استفاده از رواناب‌های سطحی و ذخیره بارش برای کاهش افت سطح ایستابی و کنترل شوری آب.

۴. آموزش و مشارکت جوامع محلی برای ارتقای استفاده بهینه از منابع آب و بهبود بهره‌وری کشاورزی در مناطق تحت فشار شوری.

در مجموع، تحلیل کیفیت آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که تنها با شناخت دقیق فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی علمی و عملی می‌توان از کاهش کیفیت آب، شورشدگی خاک و تهدید امنیت آبی کشور جلوگیری کرد.[۸]

۶. راهکارهای پیشنهادی

با توجه به شرایط موجود، برای حفظ کیفیت و پایداری منابع آب زیرزمینی ایران، اقدام‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. پایش مستمر کیفیت آب در آبخوان‌های حساس و تهیه نقشه‌های تغییرات هیدروشیمیایی.[۳]

۲. مدیریت برداشت با استفاده از کنتورهای هوشمند و سهمیه‌بندی بر اساس توان تجدیدپذیر آبخوان.[۱۲]

۳. کنترل شوری و آلودگی نیتراتی از طریق بهبود الگوهای آبیاری و مصرف بهینه کودها.[۸]

۴. احیاء و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها با رواناب‌های سطحی در فصول پرباران.[۱]

۵. آموزش و مشارکت جوامع محلی در برنامه‌های مدیریت آب برای ارتقای آگاهی عمومی و کاهش برداشت غیرمجاز.

۷. نتیجه گیری

تحلیل فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی ایران نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آب‌ها حاصل اثرات هم‌زمان فرآیندهای طبیعی و انسانی است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، مانند دشت‌های مرکزی و شرقی، انحلال کانی‌های تبخیری، تبخیر شدید و تبادل یونی با خاک‌های رسی، مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب هستند.[۳و۹] این فرآیندها باعث می‌شوند که آب‌های زیرزمینی این مناطق غنی از یون‌های سدیم، کلر و سولفات شده و استفاده از آن‌ها برای شرب و کشاورزی بدون تصفیه محدود باشد.

در مقابل، در مناطق کوهستانی و مرطوب مانند زاگرس و البرز، سنگ‌های آهکی و دولومیتی غالب‌اند و آب‌های زیرزمینی عمدتاً از نوع کلسیم–بیکربناته هستند. در این مناطق، انحلال کربنات‌ها فرآیند غالب است و کیفیت آب مناسب‌تر است.[۳و۶] بنابراین، تکامل هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی در ایران ارتباط مستقیم با شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی هر منطقه دارد.

علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی تأثیر بسزایی بر کیفیت آب دارند. برداشت بی‌رویه از چاه‌ها، استفاده گسترده از کودهای شیمیایی و تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی باعث افزایش غلظت نیترات و سایر آلاینده‌ها شده و بسیاری از آبخوان‌ها را در معرض شورشدگی و آلودگی نیتراتی قرار داده است.[۱۲] این تغییرات نه تنها سلامت انسان و کشاورزی را تهدید می‌کند، بلکه قابلیت بهره‌برداری پایدار از آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد.

تحلیل مکانی نشان می‌دهد که تکامل شیمیایی آب‌ها در مسیر حرکت از کوهستان به دشت‌ها به‌طور تدریجی افزایش می‌یابد .آب‌های تازه مناطق کوهستانی با ترکیب ساده و شوری پایین، با عبور از سازندهای تبخیری و خاک‌های رسی، به تدریج سدیمی و کلریدی می‌شوند. در مناطق ساحلی و دشت‌های خشک، اثرات تبخیر و نفوذ آب شور دریایی شدت یافته و آب‌ها به آب‌های بسیار شور و سدیمی تبدیل می‌شوند. این روند نشان می‌دهد که فرآیندهای طبیعی و انسانی با هم ترکیب شده و کیفیت آب را شکل می‌دهند.[۷]

برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ایران، لازم است که رویکردی چندبعدی اتخاذ شود:

۱. پایش مستمر کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های شوری، نیترات و سایر یون‌های اصلی، برای شناسایی مناطق حساس و پیش‌بینی تغییرات ترکیب شیمیایی .

۲. مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی با کاهش برداشت بی‌رویه، هماهنگی بین بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب، و اعمال سیاست‌های سهمیه‌بندی و تعرفه‌گذاری.

۳. احیاء و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها با بهره‌گیری از رواناب‌های سطحی و بارش مصنوعی، جهت کاهش افت سطح ایستابی و کنترل شوری آب.

۴. اصلاح الگوی مصرف آب و کودهای شیمیایی در کشاورزی برای کاهش نفوذ نیترات و سایر آلاینده‌ها به سفره‌های زیرزمینی.

۵. ارتقای مشارکت جامعه محلی و آموزش عمومی برای مدیریت بهینه منابع آب و افزایش همکاری در پایش و حفاظت از آبخوان‌ها.[۳و۸]

در نهایت، تحلیل فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی در ایران نشان می‌دهد که تنها با شناخت دقیق اثرات زمین‌شناسی، اقلیم و فعالیت‌های انسانی و اجرای راهکارهای مدیریتی علمی و یکپارچه می‌توان از شورشدگی و آلودگی آب‌های زیرزمینی جلوگیری کرده و امنیت آبی کشور را حفظ نمود.[۱۲]

۸. مراجع

1.Custodio, E., & Llamas, M. R. (2016). *Groundwater intensive use: Selected papers*. CRC Press.

2.Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences, 4*(4), 315–328.

3.Ebrahimi, M., Hashemi, H., & Berndtsson, R. (2018). Hydrogeochemical analysis of groundwater resources in an arid region of Iran. *Hydrological Sciences Journal, 63*(1), 27–43.

4.Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). CRC Press.

5.Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall. Hounslow, A. W. (1995). *Water quality data: Analysis and interpretation*. CRC Press.

6.Ahmadipour, F., Aghazadeh, N., & Feiznia, S. (2015). Hydrogeochemical evolution and quality assessment of groundwater in the Arak plain, Iran. *Environmental Earth Sciences, 73*(12), 8575–8590.

7.Shamsi, S. R., Ghadimi, H., & Mirzavand, M. (2020). Hydrochemical evaluation and seawater intrusion in coastal aquifers of southern Iran. *Environmental Earth Sciences, 79*(12), 351.

8.Fereidoon, M., Azadi, M., & Shaban, M. (2019). Assessment of climate change impact on groundwater quality in central Iran. *Journal of Water and Climate Change, 10*(2), 327–338.

9.Kargar, R., Taghipour, M., & Ghassemi, M. (2019). Geochemical processes affecting groundwater chemistry in the Yazd–Ardakan basin, central Iran. *Environmental Monitoring and Assessment, 191*(5), 307

10. Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany, 57*(5), 1017–1023.

11. WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). World Health Organization.

12. Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences, 4*(4), 315–328.

13. US Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agriculture Handbook No. 60.