خالی شدن سفره‌های آب زیرزمینی

علت‌ها و استراتژی‌های مقابله

اندیشکده تدبیر آب ایران
اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی کرمان

خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی

علت‌ها و استراتژی‌های مقابله

نوشتار حاضر ترجمه‌ای است از:

Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. Werner Aeschbach-Hertig and Tom Gleeson. Nature Geoscience. Vol 5, December 2012.

طراحی و صفحه‌بندی: دبیرخانه اندیشکده تدبیر آب ایران

چاپ اول: آذر ۹۶

کلیه حقوق این مقاله، محفوظ و متعلق به اندیشکده تدبیر آب ایران است. استفاده از مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.
دیدگاه‌های طرح‌شده در این نوشتار، لزوماً به معنای دیدگاه‌های اندیشکده تدبیر آب ایران نیست.

نشانی: تهران. خیابان کریمخان. خیابان نجات‌اللهی شمالی. روبروی بیمارستان یاس. پلاک ۲۱۲. طبقه ۴. واحد ۴.
تلفن: ۸۸۹۴۷۴۰۰- ۸۸۹۴۷۳۰۰

www.iwpri.ir

اندیشکده تدبیر آب ایران
اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی کرمان

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- مقدمه	۱
۲- گستره جهانی و منطقه‌ای خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی	۲
۳- برقراری توازن در بیلان آب زیرزمینی	۱۰
۴- پایداری و حکمرانی آب زیرزمینی	۱۶
۵- استراتژی‌های بلندمدت در مناطق مختلف	۲۰

۱- مقدمه

در سطح گسترده‌ای این اعتقاد وجود دارد که آب، یک منبع حیاتی و آسیب‌پذیر است و آب زیرزمینی در این مسئله پیچیده، نقش محوری ایفا می‌کند. از آنجا که مشاهده مستقیم آب زیرزمینی تا اندازه زیادی امکان‌ناپذیر است، درک کامل ماهیت پویا و به هم‌پیوسته آن، حتی برای متخصصان دشوار است. آب زیرزمینی با سرعتی آهسته در منفذهای موجود در واحدهای زمین‌شناختیِ نفوذپذیر که آبخوان نامیده می‌شود، جابجا می‌شود و بخش فعال چرخه آب به شمار می‌آید و غالباً پیوند نزدیکی با پیکره‌های آب سطحی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا تالاب‌ها دارد، ولی جریان، ذخیره و زمان ماندگاری آن در مقایسه با دیگر بخش‌های چرخه آب، تفاوت بارزی دارد (شکل ۱الف).

آب زیرزمینی بزرگترین ذخیره نامنجمد آب شیرین در کره زمین به شمار می‌آید (شکل ۱الف). در سطح گسترده‌ای دسترس‌پذیرتر است و نسبت به تنزل کیفیت و خشکسالی‌ها، در مقایسه با آب سطحی، آسیب‌پذیری کمتری دارد. آب زیرزمینی حتی در مناطقی که آب سطحی فراوان است، غالباً منبع مهم تأمین آب شرب به شمار می‌آید. در سطح جهان حدود ۹۰ درصد استفاده مصرفی آب به آبیاری تعلق دارد و حدود ۴۰ درصد نیاز آبیاری از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در بخش‌های خشک جهان، آب زیرزمینی غالباً تنها منبع آب در دسترس برای پشتیبانی یا افزایش تولید کشاورزی است. از آنجا که کشاورزی آبی حدود ۴۰ درصد تولید جهانی غذا را بر عهده دارد، افزایش برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری نقش چشمگیری در انقلاب سبز و افزایش تأمین غذا در سطح جهان داشته است. با این همه، به خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی (کاهش ذخیره، یعنی حجم آب موجود در آبخوان‌ها برای همیشه) در بسیاری از بخش‌های جهان منجر شده است. با اینکه تأثیر برداشت آب زیرزمینی در مقیاس‌های محلی، شدیدترین و آشکارترین نمود را دارد، خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی را به سبب توزیع گسترده آن و پیامدهای بالقوه آن برای امنیت آب و غذا و بالاآمدن تراز دریا، می‌توان یک مشکل جهانی دانست.

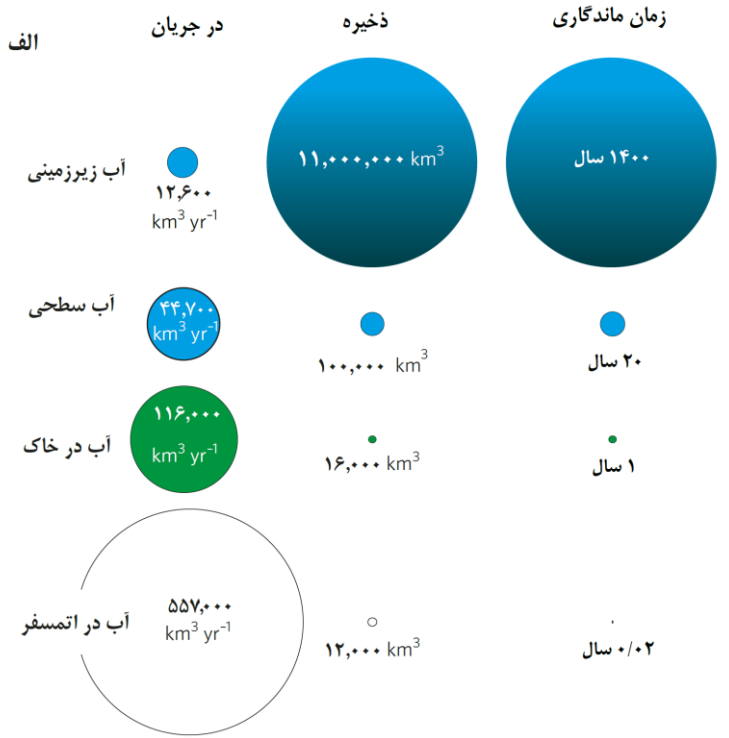
اثرات خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی پیچیده هستند و به آبخوان بستگی دارد، با این همه شماری از مشکلات را می‌توان برشمرد که در همه‌جا متداول است. مستقیم‌ترین تأثیر، اُفت سطح آب زیرزمینی است. اُفت سطح به افزایش هزینه پمپاژ یا خشک‌شدن چاه‌ها، و

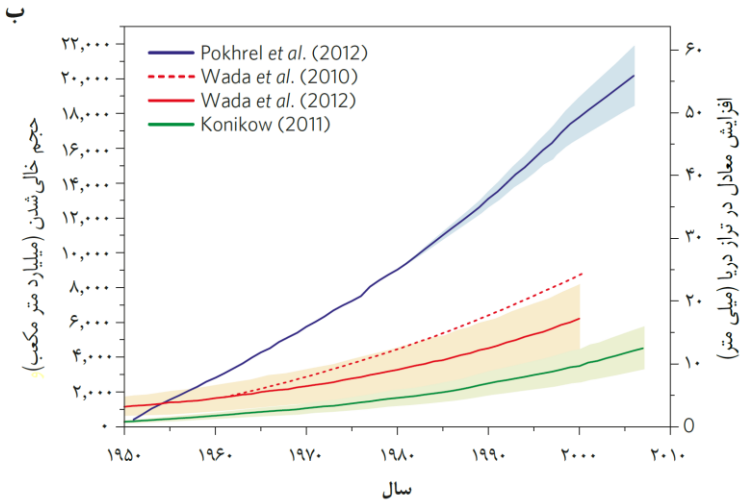
بنابراین تأثیر بر بهره‌برداران؛ کاهش ورود جریان آب زیرزمینی به رودخانه‌ها، چشمه‌ها و تالاب‌ها و تأثیر بر اکوسیستم‌ها؛ و نشست برگشت‌ناپذیر زمین و کاهش ذخیره و خسارت بالقوه به زیرساخت‌ها منجر می‌شود. اُفت سطح آب، سبب جریان‌یافتن آب زیرزمینی می‌شود که می‌تواند به شورشدن در اثر نفوذ آب شور در مناطق ساحلی، یا رخنه آب شور از لایه‌های مجاور منجر شود. به همین صورت، خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی می‌تواند گسترش انواع دیگر آلودگی را سبب شود.

کیفیت و آلودگی آب زیرزمینی، به خودی خود دغدغه‌های مهمی هستند، و باید در نوشتاری مستقل بدانها پرداخت. برای نمونه، آب زیرزمینی در اثر تحرک‌یافتن نمک در مناطق آبیاری‌شده، یا با آب‌های شور و فعالیت صنعتی شور می‌شود. آلودگی ناشی از مواد مغذی و آفت‌کش‌ها می‌تواند گسترده، تدریجی و شناسایی آن در مناطق کشاورزی دشوار باشد. در مناطق شهری یا صنعتی، آب زیرزمینی می‌تواند با مجموعه گسترده‌ای از مواد شیمیایی محلول و غیر آبی آلوده شود. همچنین مشکلات مهم کیفیت آب زیرزمینی از منشای طبیعی وجود دارد که مشخص‌ترین آنها میزان بالای آرسنیک و فلوراید در بعضی مناطق است.

۲- گستره جهانی و منطقه‌ای خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی

خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی یک مسئله جهانی است که ابعاد آن تا این اواخر به خوبی شناخته نشده بود. در این اواخر، وجود مشکل کمیت آب زیرزمینی در مقیاس جهانی زیر سئوال برده شده است، بر این اساس که برداشت جهانی آب زیرزمینی (تقریباً ۱,۵۰۰ میلیارد متر مکعب در سال) در مقایسه با تغذیه آن (تقریباً ۱۲,۶۰۰ میلیارد متر مکعب در سال؛ شکل ۱الف) کوچک است. با این همه، خالی‌شدن آبخوان‌ها در بسیاری از مناطق جهان، یک واقعیت است که عمدتاً خود را با اُفت سریع ترازهای آب زیرزمینی نشان داده است. اُفت تراز در مقیاس محلی در چاه‌ها و در مقیاس حوضه با سنجش گرانش با استفاده از ماهواره‌های GRACE اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های GRACE برای پایش تغییرات بزرگ‌مقیاس در ذخیره آب زیرزمینی مناسب هستند، ولی تهیه داده‌های پایه پایش با تفکیک بالا درباره تراز آب زیرزمینی بسیار ضروری است، چون خالی‌شدن آبخوان می‌تواند در مقیاس بسیار موضعی پدید آید.





شکل۱- ویژگی‌های چرخه جهانی آب و نرخ‌های خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش معادل آن در تراز دریا، از ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰.

توضیح شکل ۱:

الف، متوسط جهانی جریان ورودی سالانه، ذخیره کل و زمان ماندگاری آب زیرزمینی، آب سطحی، آب موجود در خاک و آب در اتمسفر. مساحت دایره‌ها متناسب با ارزیابی‌های انجام‌شده درباره منابع جهانی آب و تغذیه آب زیرزمینی است. رنگ دایره‌ها بر اساس دسته‌بندی آب سبز (آب موجود در خاک که در دسترس گیاهان قرار دارد)، آب آبی (آب سطحی و آب زیرزمینی) و آب آبیِ تیره (منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر) است.

ب، برآوردهای حجم تجمعی خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مقیاس جهانی، و حاشیه عدم قطعیت برآوردها. خط نقطه‌چین قرمز، با یکپارچه‌سازی نرخ‌های سالانه خالی‌شدن سفره‌ها، از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ به دست آمده است. برآورد حجم تجمعی خالی‌شدن برای سال‌های قبل از ۱۹۶۰، بر اساس مطالعه‌ای جدید است که اثرات کاهش تخلیه را اعمال کرده است (خط قرمز).

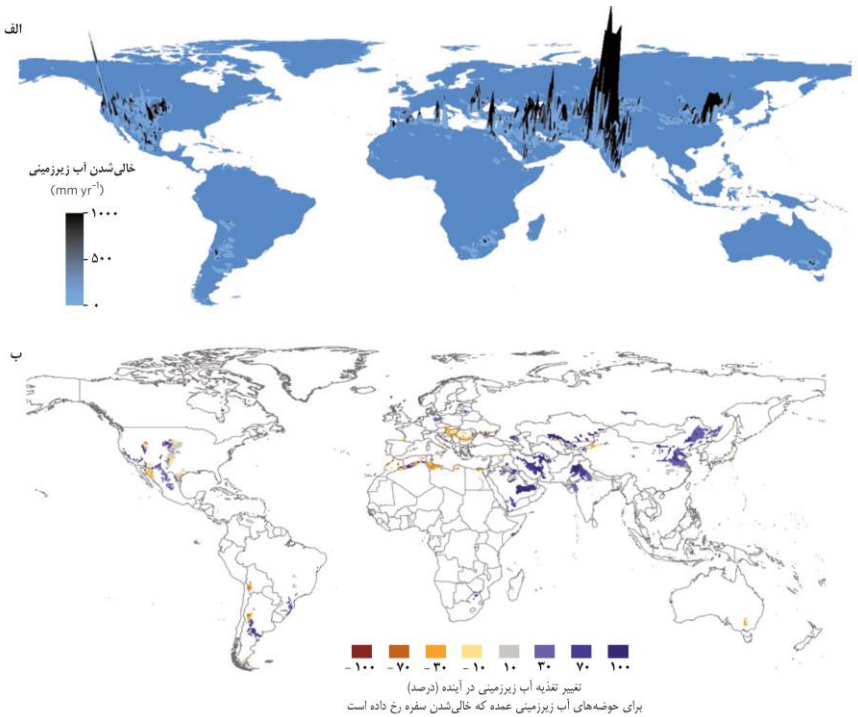
در شماری از مطالعات جدید، ابعاد خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مقیاس جهانی، به منظور بررسی سهم کاهش ذخیره قاره‌ای آب در بالاآمدن سطح آب دریا برآورد شده است. نتایج این مطالعات به سبب روش‌های متفاوت برآورد، تفاوت اساسی با یکدیگر دارند. پائین‌ترین برآوردها درباره میزان تجمعی خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مقیاس جهانی، با مستقیم‌ترین روش و استفاده از داده‌های تراز آب و ماهواره GRACE، در ترکیب با مدل‌های جریان آب زیرزمینی به دست آمده است. از آنجا که داده‌های جامع برای معدودی از آبخوان‌ها موجود است، برآورد خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مقیاس جهانی با این رویکرد، نیازمند برون‌یابی[1] است و نتایج ممکن است خیلی پائین باشد. برآوردهای بالاتر درباره میزان خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی (شکل ۱ب) به عنوان تفاوت میان تغذیه طبیعی آب زیرزمینی (بر پایه یک مدل جهانی هیدرولوژیکی)، و برداشت آب (بر پایه آمارهای ملی) محاسبه شده است. این روش ممکن است خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی را دست بالا برآورد نماید، چون تغذیه ناشی از آبیاری و پیکره‌های آب سطحی و نیز پاسخ دینامیک سیستم‌های آب زیرزمینی به برداشت را به حساب نمی‌آورد (به توضیح کادر ۱ نگاه کنید). تصحیح این سوگیری، به برآوردهای پائین‌تر میزان خالی‌شدن منجر می‌شود. بالاترین برآورد از میزان خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی (شکل ۱ب) با استفاده از یک مدل جهانی هیدرولوژیکی به دست آمده است که فرض می‌کند آب زیرزمینی می‌تواند از یک مخزن نامحدود بر اساس تقاضا برداشت شود.

1- Extrapolation

این روش احتمالاً به شکل قابل ملاحظه‌ای میزان خالی‌شدن را دست بالا برآورد می‌کند، چون آبخوان‌ها مخزن‌های نامحدود نیستند. شکل۱ب نشان می‌دهد که عدم قطعیت میزان خالی‌شدن جهانی سفره‌های آب زیرزمینی قابل ملاحظه است. با این همه، مطالعات مختلف توافق دارند که نرخ‌های خالی‌شدن به طور محسوسی از میانه قرن بیستم شتاب گرفته است و نمی‌توان سهم آن را در نرخ بالاآمدن سطح آب دریا بی‌اهمیت دانست. پیش‌بینی می‌شود نرخ خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در آینده شتاب بیشتری بگیرد.

با اینکه مجموع جهانی خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی بااهمیت است، خالی‌شدن آبخوان‌ها در مناطق معینی روی داده است. در این مناطق، سیستم‌های موضعی و منطقه‌ای آبخوان، بیش از حد بهره‌برداری می‌شوند. شکل۲ الف بزرگی و توزیع جغرافیایی خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. مهم‌ترین مناطق عبارتند از بخش‌هایی از هند، شمال شرق چین، غرب ایالات متحده، مکزیک، ایران، عربستان سعودی و بخش‌هایی از شمال آفریقا. در ادامه به اختصار وضعیت کنونی خالی‌شدن و محیط‌های هیدرولوژیکی آبخوان‌ها در شمال هند، شمال شرقی چین و غرب ایالات متحده توضیح داده می‌شود. پس از آن، نمونه‌هایی از تدابیر گوناگون مدیریت و سیاست‌گذاری آب زیرزمینی درباره آنها را مرور خواهیم کرد.

در حال حاضر، بالاترین نرخ خالی‌شدن آبخوان در جلگه سند و گنگ، دربرگیرنده شمال هند و بنگلادش و نیز بخش‌هایی از پاکستان و نپال پدید می‌آید (شکل۲الف). داده‌های جدید GRACE، گستره خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی را در شمال غربی هند و نیز کل حوضه سند و گنگ برجسته کرده است. جلگه‌های رسوبی و حاصلخیز سیستم‌های رودخانه‌ای ایندوس و گنگ، حدود هفتصد هزار کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد و حدود یک میلیارد نفر را در خود جای داده است. کشاورزی در این منطقه، تراکم بالایی دارد و آبیاری با آب سطحی یک قرن سابقه دارد. با این همه، از سال ۱۹۷۰، فراهمی تجهیزات حفر چاه و پمپ‌های الکتریکی، کشاورزی آبی را متحول کرد. در نتیجه، آبیاری در این منطقه از توزیع آب سطحی با مدیریت متمرکز، به نظام بهره‌برداری با ده‌ها میلیون چاه که تا اندازه زیادی فارغ از مقررات هستند تغییر کرده است. اکنون کشور هند، بیش از دو برابر ایالات متحده یا چین آب زیرزمینی را پمپاژ می‌کند.



شکل۲- خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مقیاس جهانی و پتانسیل تغییرات در تغذیه آب زیرزمینی در نواحی که خالی‌شدن آب زیرزمینی وجود دارد. الف، یکی از برآوردهای جدید درباره توزیع جهانی خالی‌شدن آب زیرزمینی، به شکل سه‌بعدی برای نشان‌دادن میزان خالی‌شدن آب زیرزمینی، به ویژه در ایالات متحده، مکزیک، عربستان سعودی، پاکستان، هند و چین بازترسیم شده است. رنگ‌ها بر اساس مفهوم آب آبی (آب سطحی و آب زیرزمینی تجدیدپذیر) و آب آبیِ تیره (آب زیرزمینی تجدیدناپذیر؛ به کادر۲ مراجعه کنید) است. **ب**، تغییر بالقوه در تغذیه آب زیرزمینی برای دوره ۲۰۷۰–۲۰۴۱ در مقایسه با ۱۹۹۰–۱۹۶۱ برای چهار سناریوی تغییر اقلیم شبیه‌سازی شده است. در اینجا، تغییر احتمالی در تغذیه بر پایه سناریوی **A2** انتشار گاز گلخانه‌ای (**IPCC**) نشان داده شده است.

آبخوان‌های بزرگ جلگه شمال چین، نقش محوری در تولید غذای این کشور ایفا می‌کند، چرا که بیش از نیمی از گندم و یک‌سوم ذرت این کشور در این منطقه تولید می‌شود. مساحت این جلگه، ۳۲۰,۰۰۰ کیلومتر مربع است و بیش از ۲۰۰ میلیون نفر در آن زندگی می‌کنند. تولید کشاورزی در این منطقه، در دهه‌های گذشته به طور محسوسی رشد کرده و وابستگی زیادی به بهره‌برداری روزافزون آب زیرزمینی داشته است. با این همه، به نظر می‌رسد پایداری تولید با تهدید جدی اُفت تراز آب زیرزمینی در سطح

گسترده روبرو است. نرخ اُفت سطح آب زیرزمینی در مقیاس موضعی، بیش از یک متر در سال بوده است. افزایش شدید تبخیرتعرق ناشی از نظام زراعی پرتراکم، توازن بیلان آب زیرزمینی را بر هم زده است؛ برآوردهای تغذیه بر پایه سن آب زیرزمینی، آن را تأئید کرده است (کادر۱).

دو نمونه مشهور آبخوان‌هایی که بیش از اندازه بهره‌برداری شده‌اند عبارتند از آبخوان هایپلینز (High Plains) و آبخوان دره مرکزی کالیفرنیا در ایالات متحده. این دو سیستم آبخوان نسبتاً خوب مطالعه شده‌اند و برآوردهای خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی، با استفاده از داده‌های تراز آب در هزاران چاه و نیز داده‌های ماهواره GRACE انجام شده است. در هر دو سیستم، خالی‌شدن آبخوان در مقیاس موضعی رخ داده است. برای نمونه، حدود یک سوم میزان خالی‌شدن آبخوان هایپلینز، در ۴ درصد مساحت آن پدید آمده است. در بخش شمالی این آبخوان، تغذیه طبیعی نسبتاً زیاد است و میزان اُفت ذخیره، کم است. در مقابل، در بخش‌های مرکزی و جنوبی، نرخ‌های تغذیه پائین است و آبیاری، ذخیره آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد. بخشی از این ذخیره، بر اساس سن‌یابی به روش کربن۱۴، حدود ۱۳۰۰۰ سال پیش تغذیه شده است (کادر۱). در دره مرکزی، بارش بسیار کم است و آب به وسیله رودخانه‌ها و انتقال بزرگ‌مقیاس آب سطحی به این منطقه آورده می‌شود. پروژه‌های انتقال آب به بازیابی بخشی از ذخیره آبخوان منجر شده است، ولی خالی‌شدن آبخوان، به ویژه در طول خشکسالی‌های نامنظم هنوز ادامه دارد.

توضیح پدیده خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی، پیچیده است و به آبخوان مورد نظر و نیز به دیدگاه، آموزش و پیشینه ارزیابی‌کننده بستگی دارد. برای نمونه، یک هیدرولوژیست خالی‌شدن سفره را نتیجه عدم توازن میان ورودی‌ها و خروجی‌های این سیستم می‌داند، در حالی که یک متخصص اجتماعی، علت ریشه‌ای آن را سیاست‌ها، نظارت و مقررات، مدیریت آب، اراضی یا کشاورزی می‌داند. ما نخست دیدگاه هیدرولوژیکی را درباره خالی‌شدن سفره و مدیریت آب زیرزمینی به اختصار بیان می‌کنیم و سپس از دیدگاه گسترده‌تر اجتماعی اقتصادی و سیاستی به آن می‌پردازیم.

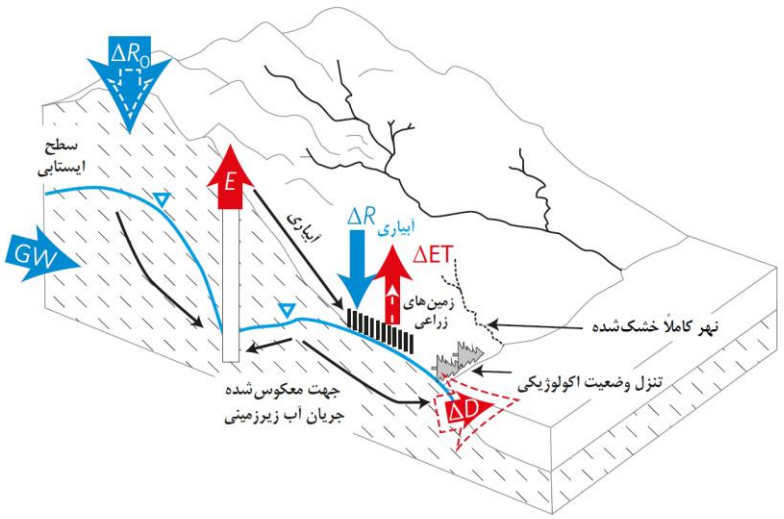
کادر ۱- بیلان و سن آب زیرزمینی

بیلان آب زیرزمینی از چندین مؤلفه تشکیل می‌شود (شکل۳). تغییر ذخیره در سیستم آب زیرزمینی برابر است با مجموع جریان‌های ورودی (تغذیه، R، جریان ورودی جانبی، GW)، منهای مجموع جریان‌های خروجی (تخلیه، D، تبخیرتعرق، ET، و برداشت، E). پیش از بهره‌برداری از آبخوان، می‌توان شرایط پایا (یعنی ذخیره ثابت) را فرض کرد، چون نوسانات هیدرولوژیکی، با زمان ماندگاری طولانی آب در آبخوان‌ها تعدیل می‌شود (شکل ۱ الف). برداشت آب زیرزمینی از چاه، در ابتدا ذخیره را کاهش می‌دهد و سبب اُفت بار هیدرولیکی- ترکیب فشار و ارتفاع که جریان‌یافتن آب زیرزمینی را سبب می‌شود- می‌شود که فراتر از چاه گسترش می‌یابد. تغییر سطح آب زیرزمینی می‌تواند به افزایش تغذیه و نیز کاهش تخلیه و تبخیرتعرق منجر شود. تأثیر کلی این تغییر را capture می‌نامند. همچنین می‌تواند به افزایش جریان جانبی از آبخوان‌های مجاور یا آبخیزها منجر شود. اگر آب برداشت‌شده برای آبیاری استفاده شود، تبخیرتعرق افزایش می‌یابد و جریان احتمالی برگشتی مازاد آبیاری به مجموع تغذیه اضافه می‌شود. باید توجه داشت که هیچیک از برآوردهای خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی، تمام مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی، به ویژه جریان آب زیرزمینی جانبی را به حساب نیاورده‌اند.

در نهایت، حالت تعادلی جدیدی شکل می‌گیرد که در آن، برداشت با کاهش تخلیه (capture) متوازن می‌شود و بنابراین ذخیره دیگر خالی نمی‌شود. تغییرات در سیستم هیدرولوژیکی در این حالت جدید، با اینکه از نظر فیزیکی پایدار است، ممکن است اثرات قابل توجه و نامطلوب زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی داشته باشد. زمان مورد نیاز برای شکل‌بندی هیدرولیکی این سیستم برای رسیدن به تعادل پس از آشفتگی ناشی از برداشت، با زمان پاسخ هیدرولیکی مشخص می‌شود. این زمان، از چند ساعت تا صدها و هزاران سال، بسته به اندازه سیستم آبخوان و خصوصیات هیدرولیکی آن متغیر است. اگر تنش واردشده به سیستم آبخوان، بسیار بزرگ باشد، یعنی اگر در نهایت، کاهش تخلیه نتواند برداشت را جبران کند، تعادل جدید ناممکن است و این سیستم عمر محدودی خواهد داشت.

با اینکه زمان پاسخ هیدرولیکی، به کمّی‌سازی پاسخ آبخوان‌ها به برداشت کمک می‌کند، زمان ماندگاری یا سن آب زیرزمینی برای کمی‌کردن نرخ‌های تغذیه و انتقال آلاینده‌ها به چاه‌ها مفیدتر است. زمان ماندگاری یک آبخوان، متوسط زمان جریان‌یافتن آب زیرزمینی از ناحیه تغذیه تا ناحیه تخلیه تعریف می‌شود. سن آب زیرزمینی، مدت زمانی است که از زمان نفوذ آب تا رسیدن به زیر سطح زمین طول می‌کشد.

ادامه مطلب در صفحه بعد



شکل۳- جریان‌های ورودی و خروجی در سیستم‌های آب زیرزمینی. جریان‌های ورودی به رنگ آبی، و جریان‌های خروجی به رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. اندازه پیکان‌ها متناسب با مقادیر معمول است. سطح ایستابی در این آبخوان نامحصور به رنگ آبی است و آب زیرزمینی مستقیماً با پیکره‌های آب سطحی و اکوسیستم‌ها ارتباط دارد. در شرایط طبیعی و حالت پایا، پیش از بهره‌برداری آب زیرزمینی، تغذیه طبیعی (R_O) در اثر تبخیرتعرق (ET_O) در گیاهان وابسته به آب زیرزمینی، و تخلیه آب زیرزمینی (D_O) (پیکان‌های نقطه‌چین‌دار) متوازن می‌شود. برداشت آب (E) می‌تواند تغذیه را افزایش دهد (ΔR_O) و سبب جریان‌یافتن آب زیرزمینی (GW)، و نیز کاهش تخلیه آب زیرزمینی شود (ΔD_O). استفاده از آب پمپاژشده برای آبیاری، تبخیرتعرق (ΔET) و تغذیه ناشی از آب برگشتی آبیاری ($\Delta R_{آبیاری}$) را افزایش می‌دهد. تغییرات در ذخیره آب زیرزمین با اُفت سطح ایستابی نشان داده شده است.

زمان ماندگاری را می‌توان برای برآورد نرخ تجدیدشوندگی ذخیره آبخوان و تعیین افق زمانی هدف‌گذاری‌های بلندمدت پایداری برای آبخوان‌ها استفاده کرد. سن آب زیرزمینی شاخصی است که غالباً در هیدروژئولوژی استفاده می‌شود، چون می‌تواند مستقیماً با روش‌های متنوع ردیابی (استفاده از عناصر ردیاب) اندازه‌گیری شود. با استفاده این روش‌ها، سن آب زیرزمینی از چند روز تا چند میلیون سال به دست آمده است. آب زیرزمینی قدیمی که غالباً در بخش‌های ژرف‌تر آبخوان‌های بزرگ یافت می‌شود، نشان می‌دهد که این ذخایر باید در شرایط امروزی، تجدیدناپذیر در نظر گرفته شوند (آبی تیره، کادر۲). سن‌های جوان‌تر، غالباً در طیف چندسال تا چنددهه در آبخوان‌های کم‌عمق یافت می‌شوند و در بررسی آسیب‌پذیری چاه‌ها در برابر آلودگی اهمیت دارند. از یک سو، جریان آهسته آب زیرزمینی، چاه‌ها را از منابع آلودگی واقع در سطح زمین محافظت می‌کند و از سوی دیگر، تأثیر اقدامات انجام‌شده برای بهبود کیفیت آب زیرزمینی را به تأخیر می‌اندازد.

۳- برقراری توازن در بیلان آب زیرزمینی

خالی‌شدن آبخوان زمانی پدید می‌آید که خروجی آب از آبخوان، از ورودی آب به آن بیشتر می‌شود. این گزاره ساده، درست است، ولی بررسی بیلان آب زیرزمینی با جزئیات بیشتر و توجه به اینکه برداشت آب زیرزمینی به شکل دینامیک، ورودی‌ها و خروجی‌های آبخوان را تغییر می‌دهد اهمیت دارد (کادر ۱). ضوابط بهره‌برداری از آب زیرزمینی در سال‌های اولیه، به اشتباه بر این پایه بود که آبدهی مطمئن حوضه آب زیرزمینی، معادل نرخ تغذیه طبیعی آب زیرزمینی است. این اعتقاد درباره بیلان آب، این واقعیت را نادیده می‌گیرد که برداشت آب زیرزمینی می‌تواند به افزایش تغذیه و/ یا کاهش تخلیه منجر شود (کادر ۱). برای نمونه، برداشت از سیستم‌های آبخوان‌های پرآبده در ایالات متحده به تغییرات در تمام مؤلفه‌های بیلان آب منجر شده است: تغذیه، تخلیه و ذخیره. به بیانی دیگر، به کارگیری مفهوم آبدهی مطمئن در مناطقی مانند آبخوان هایپلینز، به خشک‌شدن نهرها و تنزل کیفیت اکولوژیکی منجر شده است.

از این رو، سیستم‌های آب زیرزمینی را باید سیستم‌های پیچیده‌ای فهم کرد که واکنش آنها به آشفتگی ناشی از برداشت، دینامیک است. چون زمان پاسخ هیدرولیک آبخوان‌ها طولانی است (به کادر ۱ مراجعه کنید)، ممکن است حالت تعادلی جدید با ذخیره ثابت، به آسانی در مقیاس زمانی بشر حاصل نشود. پیچیدگی‌های بیشتر، در اثر نوسانات شرایط مرزی به سبب تغییرات در اقلیم و کاربری اراضی به وجود می‌آید. بنابراین، در بررسی بیلان آب آبخوان‌ها باید تحول دینامیک این سیستم را به حساب آورد و نمی‌توان تنها نرخ‌های تغذیه طبیعی و برنامه‌ریزی‌شده برداشت را منظور کرد. با وجود این، بحث درباره خالی‌شدن آبخوان و گزینه‌های مدیریت بر حسب تغذیه و برداشت، منطقی است. این دو پارامتر، مهم‌ترین مؤلفه‌های قابل مدیریت بیلان آب زیرزمینی به شمار می‌آیند. استراتژی‌های مدیریت آب را می‌توان به دو دسته استراتژی‌های طرف تقاضا که هدفشان کاهش برداشت آب زیرزمینی است، و استراتژی‌های طرف عرضه که می‌کوشند به طور کلی تأمین آب، و به طور خاص تغذیه آب زیرزمینی را افزایش دهند تقسیم‌بندی کرد. نخست برداشت و استراتژی‌های طرف تقاضا را بررسی می‌کنیم و سپس به بحث درباره عواملی می‌پردازیم که بر تغذیه و استراتژی‌های احتمالی طرف عرضه تأثیر می‌گذارند.

برداشت آب زیرزمینی مستقیماً بر بیلان آب آبخوان‌ها تأثیر می‌گذارد، و شکل۴ الف نشان می‌دهد که ممکن است عامل اصلی در خالی‌شدن آبخوان باشد. در بسیاری از حوضه‌های مهم آب زیرزمینی، میزان خالی‌شدن سفره، درصد قابل ملاحظه‌ای از برداشت کل آب زیرزمینی است (۷ تا ۸۷ درصد از میانگین ملی). برداشت آب زیرزمینی وابستگی شدیدی به الگوها، روش‌ها و کارایی آبیاری دارد، چون بیشتر استفاده مصرفی آب در سطح جهانی به منظور آبیاری است. بنابراین، تقاضای رو به افزایش برای آب زیرزمینی در نهایت متأثر از تقاضای رو به افزایش غذا است که به نوبه خود ناشی از رشد جمعیت و تغییر رژیم غذایی است. برای نمونه، به نظر می‌رسد فشار افزایش جمعیت، محرک مهم افزایش تعداد چاه‌ها در جنوب آسیا باشد.

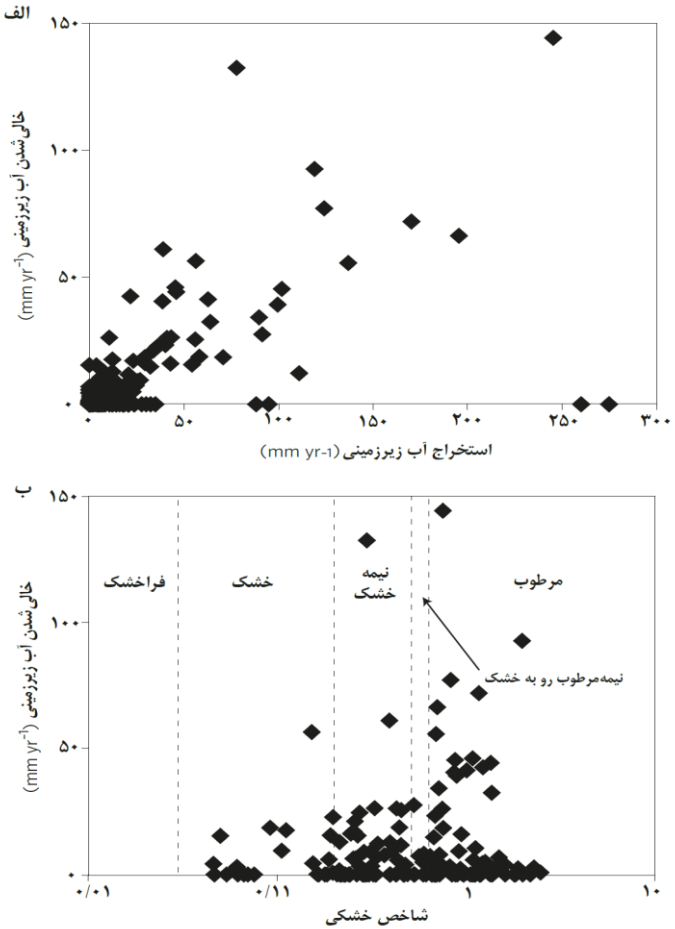
با توجه به اینکه خالی‌شدن آبخوان‌ها با کشاورزی آبی پیوند دارد، بررسی راه و رسم‌های آبیاری اهمیت می‌یابد. ارتقای کارایی آبیاری غالباً به عنوان راهی برای کاهش تقاضای آب و بنابراین برداشت توصیه می‌شود. ولی در نواحی کشاورزی که آبخوان‌های کم‌عمق قرار دارد، خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی تا اندازه زیادی تحت کنترل نرخ تبخیر و تعرق است تا فقط نرخ برداشت، چون اضافه‌برداشت آب زیرزمینی به آبخوان باز می‌گردد. به این دلیل، کاهش برداشت آبیاری که در جلگه شمال چین بعد از میانه دهه ۷۰ اتفاق افتاد، نرخ اُفت سطح آب زیرزمینی را کاهش نداد. در هایپلینز، آبیاری کارآمد به زارعان اجازه داده است اراضی بیشتری را آبیاری کنند. این کار به تبخیر تعرق بالاتر، به هزینه کاهش جریان برگشتی آبیاری منجر می‌شود و بدین ترتیب و برخلاف انتظار، آبخوان را بیشتر خالی می‌کند. افزایش کارایی آبیاری می‌تواند به شورشدن خاک نیز منجر شود. در نهایت، اگر آبیاری با آب زیرزمینی، تبخیرتعرق گیاه را تا بیشتر از میزان ورودی‌های آب به منطقه (از طریق بارش و جریان ورودی) افزایش دهد، خالی‌شدن آب زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. در عوض، نرخ خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی می‌تواند با رشددادن گیاهان کمتر یا آبیاری اراضی کمتر، کاهش یابد. البته این کار معمولاً از نظر سیاسی به اندازه استفاده از تکنولوژی افزایش کارایی آبیاری جذابیت ندارد. از دید مدیریت آب، جبران کمبود آب با واردکردن غذا در قالب آب مجازی (کادر۲) می‌تواند گزینه جذابی برای برخی کشورها باشد. یک گزینه برای کاهش خالی‌شدن آبخوان، و در عین حال

حفظ تولید کشاورزی می‌تواند بهینه‌سازی استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی برای آبیاری باشد، با اینکه آبیاری با آب زیرزمینی معمولاً بهره‌وری بیشتری دارد، و استفاده تلفیقی در مناطقی که آب سطحی اندکی دارند، ارزش محدودی دارد.

خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی، به در دسترس‌بودن آب برای پرکردن دوباره ذخایر آب زیرزمینی بستگی دارد. این گفته بدین معنا است که مناطق خشک در برابر اثرات برداشت، آسیب‌پذیرتر هستند. با این همه، شکل۴ ب نشان می‌دهد که خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی، بیشتر از همه‌جا در مناطق نیمه‌خشک و مرطوب جهان مشاهده می‌شود و حاکی از آن است که در حال حاضر، عامل برداشت در مقایسه با عوامل اقلیمی حاکم بر تغذیه، غلبه دارد. تاکنون تغییرات مرتبط با اقلیم در آبخوان‌ها در مقایسه با عوامل غیر اقلیمی، کوچک بوده است. با این همه، سیستم‌های آب زیرزمینی نشان داده‌اند که در گذشته نسبت به تغییر اقلیم، پاسخ داده‌اند. بر اساس دانش کنونی ما، هیچ موردی از خالی‌شدن عمده آبخوان در سطح منطقه‌ای با تغییر اقلیم تاریخی توضیح داده نشده است. با این همه در آینده، تغییرات مرتبط با اقلیم در نرخ‌های تغذیه می‌تواند بر نرخ‌های خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی تأثیر بگذارد.

پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی، چالش‌برانگیز است، و در تمام گام‌های این فرایند، از سناریوهای انتشار گاز گلخانه‌ای تا مدل‌های جهانی اقلیم و روش‌های کاهش مقیاس (downscaling) برای تطبیق پیش‌بینی‌ها با مقیاس آبخوان‌ها و در نهایت، مدل‌های هیدرولوژیکی و اثرات تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی و دینامیک تغذیه، عدم قطعیت وجود دارد. شاید بتوان بزرگترین منبع عدم قطعیت را انتخاب مدل چرخش جهانی دانست، چون این مدل‌ها در پیش‌بینی‌های خود از متغیرهای اقلیمی مانند بارش، تفاوت اساسی دارند. ارزیابی جهانی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نسبت به اثرات تغییر اقلیم، بیشترین آسیب‌پذیری را در شمال و جنوب غرب آفریقا، شمال شرق برزیل و آند مرکزی نشان می‌دهد. برخی از این مناطق هم‌اکنون شاهد خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی هستند (شکل۲ الف)، و کاهش نرخ‌های تغذیه ممکن است عامل فشار افزون‌تری باشد (شکل۲ب). پیش‌بینی می‌شود تغذیه در سایر مناطقی که شاهد خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی هستند افزایش یابد. تأکید می‌شود که شکل۲ ب، مقایسه مقدماتی مناطقی است

که خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در آنها رخ داده، و پیش‌بینی‌های تغذیه بر اساس تک‌سناریوهای انتشار از تک‌مدل جهانی اقلیم و تک‌مدل هیدرولوژیکی صورت گرفته است.



شکل٤- خالی‌شدن آب زیرزمینی در آبخوان‌های عمده و ارتباط آن با برداشت و خشکی.

توضیح شکل ٤:

الف، میانگین خالی‌شدن آب زیرزمینی (تقسیم بر مساحت) در مقابل میانگین برداشت آب زیرزمینی (تقسیم بر مساحت) در آبخوان‌های عمده. نرخ‌های برداشت بالا، با نرخ‌های خالی‌شدن بالا در آبخوان‌هایی که خالی‌شدن سفره رخ می‌دهد همبستگی دارد.

ب، متوسط خالی‌شدن آب زیرزمینی (تقسیم بر مساحت) در مقابل متوسط شاخص خشکی (تقسیم بر مساحت) ترسیم شده است. شاخص خشکی بر اساس دسته‌بندی UNEP است. شاخص خشکی، متوسط بارش سالانه تقسیم بر متوسط تبخیرتعرق بالقوه سالانه است. آبخوان‌های عمده که با مشکلات خالی‌شدن آب زیرزمینی روبرو هستند، بیشتر در مناطق نیمه‌خشک و مرطوب مشاهده می‌شوند و کمتر در مناطق خشک متداول هستند.

کادر۲- نگاه‌های نوین به آب شیرین

خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در نقاط مختلف جهان، حکایت از آن دارد که دیدگاه‌های نوین درباره چگونگی ارزشگذاری، مدیریت و شناخت آب زیرزمینی، از جمله ایده‌های جدید مانند پایداری قوی (strong sustainability)، آب مجازی و آب سبز، می‌تواند در آینده مفید واقع شوند. بحث مهمی که وجود دارد این است که آیا پایداری «ضعیف» یا «قوی» درباره آب زیرزمینی به کار گرفته شود یا خیر. بحث‌های گذشته درباره پایداری آب زیرزمینی معمولاًبه پایداری ضعیف (weak sustainability) نظر داشته است. مطابق این نگاه، تمام شکل‌های سرمایه (طبیعی، انسانی، اقتصادی و مانند آن) قابل جایگزینی در نظر گرفته می‌شود. کاربرد اصول پایداری ضعیف در بهره‌برداری آب زیرزمینی بدین معنا است که خالی‌شدن سرمایه طبیعی آب زیرزمینی می‌تواند با رشد نوع دیگری از سرمایه متوازن شود. برای نمونه در مناطق خشک مانند خاورمیانه، از خالی‌شدن مستمر آب زیرزمینی (groundwater mining) و ممکن‌شدن رشد اقتصادی- اجتماعی سخن به میان آمده یا از آن جانبداری شده است. در مقابل، بر پایه اصول پایداری قوی صحبت از آن است که آب زیرزمینی می‌تواند ارزش یک سرمایه جایگزین‌ناپذیر داشته باشد.

ملاحظات مهمی که در بحث پایداری قوی در مقابل ضعیف وجود دارد عبارت است از اینکه آیا آب زیرزمینی می‌تواند با منابع از نوعی دیگر جایگزین شود و نیز آیا اساساً از نظر اجتماعی، اقتصادی یا زیست‌محیطی قابل انجام است؟ در برخی موارد، آب زیرزمینی ممکن است با آب سطحی، آب شیرین‌شده دریا یا پساب تصفیه‌شده جایگزین شود. در برخی مناطق، دوره کوتاه بهره‌برداری ناپایدار آب زیرزمینی ممکن است فرصت سازگاری ساختارهای اجتماعی- اقتصادی را با بهره‌برداری پایدار آینده فراهم آورد. ولی معدنکاری آب زیرزمینی، ناپایدار بوده و کوته‌بینی است، چون اثرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی خالی‌شدن قابل توجه سفره آب زیرزمینی ممکن است غیر خطی، غیر قابل پیش‌بینی و مدیریت آن دشوار باشد.

ادامه مطلب در صفحه بعد

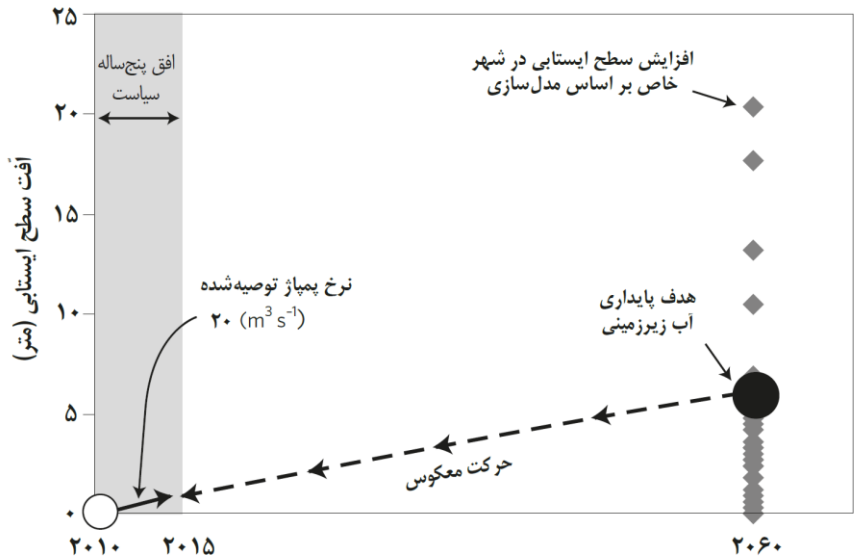
برای نمونه، خالی‌شدن آب زیرزمینی در هند، تمام طبقات اقتصادی را به یک اندازه متأثر نساخته است. به بیانی دیگر، اقشار فقیر را که آسیب‌پذیرتر هستند، بیش از اندازه تحت تأثیر قرار داده است. افزون بر این، اضافه‌برداشت مستمر آب زیرزمینی توانایی آبخوان را برای تأمین تاب‌آوری اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی کاهش می‌دهد، چون ذخیره در بلندمدت خالی می‌شود. پیاده‌سازی پایداری قوی بدین معنا است که برداشت آب زیرزمینی باید در جاهایی که خالی‌شدن آب زیرزمینی در کل سیستم وجود دارد کاهش یابد. استراتژی‌های مصرف و حفاظت آب زیرزمینی می‌تواند با تعیین هدف‌های بلندمدت در چارچوب مدیریت تطبیقی به انجام برسد (شکل۵)، و می‌تواند به نفع هر دو نسل کنونی و آینده باشد.

مفاهیم «آب مجازی» و «آب سبز» نیز نگاه نوینی برای بحث درباره خالی‌شدن آب زیرزمینی به دست می‌دهند. آب مجازی، به حجم آب شیرین استفاده‌شده برای تولید یک کالا یا خدمت، در مراحل گوناگون تولید گفته می‌شود. مؤلفه‌های آب مجازی عبارتند از آب سبز (آب موجود در خاک که در دسترس گیاهان قرار دارد)، آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی) و آب خاکستری (آب آلوده‌شده). در این زمینه، آب زیرزمینی تجدیدناپذیر می‌تواند «آب آبیِ تیره» (به جای «آب سیاه» که می‌تواند با پساب اشتباه گرفته شود) باشد. این اصطلاح برای متمایزساختن آب زیرزمینی با زمان‌های ماندگاری مختلف (کادر۱) مفید است (شکل‌های۱ و ۲). واردات آب مجازیِ نهفته در غذا به عنوان یک راه‌حل ممکن برای مشکلات کمیابی آب در خاورمیانه پیشنهاد شده است.

مجموع آب مجازی استفاده‌شده به دست یک گروه یا یک کشور، رد پای آب نامیده می‌شود. تجارت جهانی آب مجازی و رد پای آب کشورها و بشر، کمّی شده است. کشورهای فقیر و در عین حال غنی از آب معمولاً جزو واردکنندگان آب مجازی هستند. در سال‌های اخیر، یک روش‌شناسی برای محاسبه رد پای آب زیرزمینی تدوین شده و درباره آبخوان‌ها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای به کار گرفته شده است. چون خالی‌شدن آب زیرزمینی غالباً متأثر از آبیاری برای کشاورزی است، رویکردهای نوین به مصرف آب در کشاورزی نیز ممکن است مفید باشد. با تقسیم مؤلفه‌های آب مجازی به آب سبز، آبی، خاکستری و آبیِ تیره، بهره‌وری (محصول به ازای قطره) می‌تواند بررسی شود. مدیریت آب سبز در کشاورزی با اقداماتی مانند گردآوری باران، آبیاری مکمل، و مدیریت خاک و ماده مغذی می‌تواند به کاهش خالی‌شدن آب زیرزمینی منجر شود.

گزینه‌های مدیریت عرضه به دنبال افزایش تغذیه با به کارگیری راهکارهای فنی هستند. برای نمونه، تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در برخی مناطق مانند دره مرکزی کالیفرنیا انجام می‌شود. در برخی موارد از پساب تصفیه‌شده نیز استفاده می‌شود. طرح‌های تغذیه مصنوعی نیز برای جلگه شمال چین و هند پیشنهاد شده است. در مقایسه با ذخیره آب در مخزن‌های سطحی، ذخیره زیرسطحی معمولاً تلفات تبخیری ندارد. برای کشور هند، یک

استراتژی امیدوارکننده ممکن است تبدیل شبکه موجود کانال‌ها به سامانه‌های تغذیه مصنوعی بزرگ‌مقیاس باشد. یک راهکار سخت‌افزاری برای افزایش تأمین آب، انحراف بزرگ‌مقیاس آب است، آن گونه که در گذشته در دره مرکزی کالیفرنیا اتفاق افتاده است. پروژه بزرگ انتقال آب از جنوب به شمال چین، آب را از جنوب پرآب چین برای تأمین نیاز شمال کم‌آب انتقال خواهد داد. ولی حتی چنین ابرپروژه‌ای ممکن است برای پرکردن شکاف میان بارش و تبخیرتعرق در جلگه شمال چین کفایت نکند و هزینه‌های اجتماعی اقتصادی و اکولوژیکی چنین پروژه‌هایی زیاد هستند.



شکل۵- هدف‌گذاری‌های بلندمدت و بازگشت معکوس در طراحی استراتژی‌های مدیریت آب زیرزمینی در شورای توسعه منابع آب تگزاس. مدل‌های آب زیرزمینی برای پیش‌بینی اُفت در هر یک از شهرستان‌ها برای سال ۲۰۶۰ استفاده می‌شود. سپس ذینفعان درباره هدف پایداری آب زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای تصمیم می‌گیرند (۵/۲ متر اُفت سطح ایستابی) که به توصیه نرخ برداشت در افق سیاستی ۵ ساله منتهی می‌شود.

۴- پایداری و حکمرانی آب زیرزمینی

با آشکارشدن ایرادهای مفهوم آبدهی مطمئن و نیز محدودیت‌های استراتژی‌های مدیریت صرفاً فنی، راه و رسم فراگیرتر و میان‌رشته‌ای مدیریت آب زیرزمینی در حال تکامل است. مفهوم پایداری آب زیرزمینی معمولاً این موارد را توصیه می‌کند: (۱) یکپارچه‌سازی

مـدیریت آب زیرزمینـی و سـطحی، شـامل اثـرات روی اکوسیسـتم‌هـای وابسـته بـه آب زیرزمینی؛ (۲) اذعان بـه اینکـه تصـمیمات دربـاره مصـرف آب زیرزمینـی همیشـه متـأثر از ارزش است؛ (۳) گنجاندن دیدگاه بلندمدت یا چندنسلی؛ (۴) مدیریت تطبیقی و شمول‌گرا به دست ذینفعان؛ (۵) برقراری توازن میان محیط‌زیست، جامعـه و اقتصـاد و (۶) اسـتفاده از آب زیرزمینی همیشه بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد، چون آب زیرزمینی از ذخیره و/ یا بـا کاهش تخلیـه برداشـت مـی‌شـود. ایـن فهـم از پایـداری آب زیرزمینـی بـا مفهـوم عمـومی پایداری، و نیز مدیریت یکپارچه منابع آب، امنیت آبی و رویکـرد نـرم‌افـزاری در مـدیریت آب سازگاری دارد.

در مدیریت آب زیرزمینی در تگزاس، بسیاری از اصول پایداری را می‌توان مشـاهده کـرد. در شورای توسعه منابع آب تگزاس[1]، بـا اسـتفاده از مـدل‌هـای آب زیرزمینـی، هـدف‌هـای بلندمدت تعیین می‌شود و سپس به شکل معکوس، یعنـی بـر اسـاس هـدف‌هـای بلندمـدت، سیاست‌ها و برنامه‌هایی که هدف‌های آینده را به اکنون مرتبط می‌سازند شناسایی مـی‌شـود (شکل۵). محدوده‌های مـدیریت آب زیرزمینـی در هـایپلینز و دیگـر منـاطق تگـزاس بایـد هدف‌ها را در افق‌های ۵۰ ساله، بر پایه اولویت‌های مشخص‌شده در رایزنی با ذینفعان تعیین کنند. هدف‌های تعیین‌شده، از حفاظت جریان‌های اکولوژیکی برای چشمه‌ها تا نگاه‌داشـتن آب در ترازهای مشخص‌شده را شامل می‌شود. مـدل‌هـای آب زیرزمینـی بـرای پـیش‌بینـی حداکثر نرخ برداشت پایدار، بر پایه هدف‌های بلندمدت تهیـه مـی‌شـوند. سـپس نـرخ‌هـای برداشت در افق‌های زمانی پنج‌ساله به گونه‌ای تعیین می‌شود که هـر یـک از محـدوده‌هـای مدیریت آب زیرزمینی بتواند سیاست‌ها و برنامه‌های خود را در هر ۵ سال به عنـوان بخشـی از یک استراتژی مدیریت تطبیقی بازبینی کنند (شکل۵).

دیدگاه جامع‌تر درباره مدیریت آب زیرزمینی و پایداری، تمرکز را از هیدرولوژی و تدابیر فنی، به سمت سیاست و حکمرانـی معطـوف مـی‌کنـد. ایـن دیـدگاه، پیچیـدگی نظـام‌هـای مختلف سیاسی و اجتماعی اقتصادی را بر شرایط متنوع هیدرولوژیکی آبخوان‌ها می‌افزاید، بنابراین باید گفت که هیچ تک‌روش حکمرانـی را نمـی‌تـوان در همـه‌جـا بـه کـار گرفـت. شکل‌های متنـوع حکمرانـی آب زیرزمینـی را مـی‌تـوان در دو دسـته مقـررات اقتصـادی و

1- Texas Water Development Board

ترتیبات داوطلبانه جای داد. در ادامه، به اختصار این دو مقوله مورد بحث قرار می‌گیرد. کادر۲ برخی از پیشرفت‌های احتمالی آینده را در مدیریت، سیاست و پایداری آب زیرزمینی توصیف می‌کند.

ارتقای چارچوب‌های حقوقی و سیاستی برای کنترل مصرف آب زیرزمینی یک ضرورت است. در یکی از مطالعات بین‌المللی مشخص شد که آب زیرزمینی معمولاً در مالکیت دولت‌ها قرار دارد و دولت‌ها برای استفاده از آن، پروانه یا مجوز صادر می‌کنند و به دست دولت‌های ملی و/ یا منطقه‌ای با سیاست‌های کاهش مصرف، مدیریت پایدار یا دسترسی برابر به آب برای همگان مدیریت می‌شود. وضع قوانین درباره استفاده و حفاظت از آب زیرزمینی معمولاً در کشورهای توسعه‌یافته، پیشرفته‌تر است، ولی دکترین‌های حقوقی پایه درباره حقوق آب زیرزمینی می‌تواند در کشورهای مختلف و حتی در ایالت‌های مختلف مانند ایالت‌هایی که در آبخوان هایپلینز سهیم هستند متفاوت باشد. پیاده‌سازی به اندازه وضع مقررات اهمیت دارد، ولی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه دشوار است. در این کشورها اعمال مقررات به دلیل شماره فراوان صاحبان چاه‌ها پیچیده است.

از دید اقتصادی، آب زیرزمینی را می‌توان یک «منبع مشترک»[1] و دستخوش «تراژدی منابع مشاع»[2] دسته‌بندی کرد که مطابق آن، بهره‌برداران هیچ انگیزه‌ای برای محدودکردن برداشت تا حد مطلوب اجتماعی ندارند و در نتیجه به خالی‌شدن آبخوان منجر می‌شود. ولی در واقعیت، منابع غالباً در اثر «تراژدی دسترسی آزاد» خالی می‌شوند و حکمرانی محلی شمول‌گرا و اثربخش منابع مشترک، بدون خصوصی‌سازی یا کالایی‌سازی این منبع امکان‌پذیر است. دیگر استراتژی اقتصادی معمول برای مدیریت برداشت آب زیرزمینی، نرخ‌گذاری آب است، ولی تاکنون این رویکرد بیشتر در بخش‌های شهری و صنعتی به کار گرفته شده است تا در کشاورزی، احتمالاً به دلیل دشواری پیاده‌سازی آن در محیط‌هایی که بهره‌برداران مستقل و فراوان وجود دارد.

دیگر تدبیر مهم حکمرانی اقتصادی، نرخ‌گذاری انرژی است، چون در برخی مناطق، سیاست و مدیریت انرژی، عامل کنترل‌کننده مهمی برای بهره‌برداری آب زیرزمینی به

1- Common-pool resource
2- Tragedy of the commons

شمار می‌آید. این ارتباط با اصطلاح «water-energy nexus» شناخته می‌شود. جذابیت آب زیرزمینی برای بهره‌برداران می‌تواند وابستگی مستقیم‌تری به وجود تکنولوژی و انرژی ارزان، در مقایسه با وجود آبخوان‌های پرآبده و دارای تغذیه بالا داشته باشد. الگوی مکانی گسترش آبیاری با آب زیرزمینی در جنوب آسیا، با توزیع مناسب‌ترین شرایط هیدرولوژیکی انطباق ندارد. کمیابی آب و برق فراوان در غرب حوضه هند- گنگ با فراوانی آب مغایرت دارد، ولی با برق کمیاب در شرق این حوضه منطبق است. ممکن است انتظار رود در اثر اُفت سریع ترازهای آب که تقاضای انرژی را برای پمپاژ افزایش می‌دهد، ترتیبات کنترل بهره‌برداری به دست خود بهره‌برداران شکل گیرد. ولی با اینکه انرژی استفاده‌شده در پمپ‌های آبیاری در هند، حداکثر ۱۵ درصد مصرف انرژی را تشکیل می‌دهد، ولی با یارانه زیادی در اختیار زارعان قرار می‌گیرد یا حتی رایگان است. برخی ایالت‌های هند، کنتورگذاری برق یا حتی سهمیه‌بندی برق را برای کشاورزی در پیش گرفته‌اند و به موفقیت‌هایی در کاهش برداشت آبیاری دست یافته‌اند. افزایش تعرفه برق کشاورزی که در حال حاضر یارانه زیادی دارد، به عنوان یک سیاست آب زیرزمینی برای مکزیک پیشنهاد شده است. در این کشور، پمپاژ آب زیرزمینی حدود ۵ درصد کل مصرف برق را تشکیل می‌دهد.

با در نظر گرفتن دشواری‌های اعمال تدابیر مقرراتی و پیاده‌سازی ابزارهای اقتصادی، آنچه نیاز است، پایبندی داوطلبانه به هدف‌های مدیریت بر پایه درک مشترک درباره منبع مشترک (در معرض خطر) است. سیاست‌های داوطلبانه غالباً با حکمرانی مستقل محلی همراهی دارند که به نظر می‌رسد با ماهیت منبع مشترک آب زیرزمینی به خوبی سازگار باشد. مشارکت ذینفعان، همان گونه که در نمونه تگزاس در بالا مورد بحث قرار گرفت بخش مهمی از استراتژی‌های حکمرانی داوطلبانه به شمار می‌آید. در آندراپرادش هند، زارعان به شکل مؤثری منابع آب زیرزمینی را مدیریت می‌کنند و فرآیند جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها را به عنوان بخشی از یک پروژه داوطلبانه و با همیاری پیش می‌برند. اعضای جامعه محلی از ابزارها و الگوها و تکنیک‌ها برای برآورد موجودی آب استفاده می‌کنند و نرخ‌های خالی‌شدن سفره آب زیرزمینی پیوسته کاهش یافته است.

۵- استراتژی‌های بلندمدت در مناطق مختلف

شواهد مبنی بر اینکه سفره‌های آب زیرزمینی در حال خالی‌شدن هستند، روشن و بدون ابهام است. خالی‌شدن آبخوان‌ها عمدتاً ناشی از برداشت آب زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف در سرتاسر جهان برای مصرف کشاورزی است. با وجود این، نیاز است تا توزیع مکانی و زمانی خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی بهتر کمّی شود. ارتقای اندازه‌گیری مصرف و ترازهای آب زیرزمینی برای بسیاری از بخش‌های جهان و نیز احتساب منسجم و جامع تمام ورودی‌ها و خروجی‌های آبخوان در رویکردهای مشاهداتی و مدل‌سازی ضروری است. خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از بخش‌های جهان رخ داده است و اثرات آن روی بالاآمدن آب دریا و نیز امنیت آب و غذا، پایداری و آسیب‌پذیری، همگی گویای آن است که باید یک مشکل جهانی در نظر گرفته شود. تجارت بین‌المللی آب مجازی در قالب محصولات کشاورزی (کادر۲) یک پاسخ جهانی به مسئله خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق مختلف به شمار می‌آید و می‌تواند آب را صرفه‌جویی کند. با این همه، استراتژی‌های مقابله با پدیده خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی تنها در مقیاس منطقه‌ای، هماهنگ با مقیاس آبخوان‌ها امکان‌پذیر است.

داشتن نگاه بلندمدت- فراتر از افق‌های زمانی ۵ تا ۲۰ سال که آب زیرزمینی مدیریت می‌شود- حیاتی است چون زمان ماندگاری (شکل۱ الف) و زمان پاسخ هیدرولیکی (کادر۱) آبخوان‌ها بسیار طولانی‌تر است. این واقعیت نیازمند ابزارهای جدید برای پیش‌بینی آینده (کادر۲)، اولویت‌های جدید سیاسی و پیش‌بینی‌های کمّی بهتر درباره منابع آب زیرزمینی است، در شرایطی که سیاست، هیدرولوژی و اقتصاد همگی در حال تغییر هستند. مدل‌سازی آب زیرزمینی که برای تدوین استراتژی‌های بلندمدت مدیریت لازم است، باید سناریوهای اقلیمی و بازنمود استوکستیک عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و نیز کاربری اراضی و سناریوهای مدیریت آب را منظور کند. اهمیت نسبی تغییرات در آب زیرزمینی و کاربری اراضی در مقایسه با اثرات آتی تغییر اقلیم برای آبخوان‌های مختلف جهان باید بررسی شود.

بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی یک چالش میان‌رشته‌ای مهم است و تنها مسئله هیدرولوژی نیست. هر میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی، سیستم آب زیرزمینی را تغییر

می‌دهد و عوامل اکولوژیکی، اقتصادی اجتماعی و سیاسی، نرخ قابل قبول و پایدار برداشت را تعیین می‌کند. راهکارهای مختلف برای کاهش مصرف عبارتند از اعمال مقررات، آبیاری کارآمد، جابجایی به سمت کشاورزی دیم، واردات آب مجازی در قالب واردات کالاهای تولیدشده در مکانی دیگر، تغذیه مصنوعی، گردآوری آب باران و رویکردهای غیر مستقیم مانند نرخ‌گذاری و کنترل انرژی. انتخاب استراتژی‌های منطبق با شرایط هر منطقه از میان طیف گزینه‌های مختلف، اهمیت زیادی دارد و معمولاً مقررات، سیاست و مدیریت آب، انرژی و کشاورزی را تقویت می‌کند. هیچ تک‌راه‌حلی برای مدیریت آب زیرزمینی وجود ندارد، چون شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، سیاسی، اجتماعی و اقتصادی در مناطق مختلف بسیار متفاوت است. لازم است در آینده برای شناسایی استراتژی‌های بلندمدت مناسب، تطبیق‌پذیر و پایدار برای هر منطقه و یافتن راه‌های انتقال دانش و تجربه‌ها، پژوهش‌های لازم انجام شود. تنها پس از آن است که تغییرات لازم برای حل مشکل فزاینده خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند شتاب گیرد.

آب زیرزمینی- بزرگترین منبع آب شیرین در جهان- برای کشاورزی آبی و بنابراین امنیت غذا اهمیت حیاتی دارد. با این همه، خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی در سطح گسترده، هم در مناطق نیمه‌خشک و هم مرطوب جهان رخ داده است. برداشت بیش از اندازه آب زیرزمینی برای آبیاری در مناطقی که آب زیرزمینی به کُندی تجدید می‌شود، علت اصلی خالی‌شدن آبخوان‌ها به شمار می‌آید و تغییر اقلیم می‌تواند این مشکل را در برخی مناطق تشدید نماید. خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی، در بالاآمدن تراز دریا تأثیر داشته و به طور محسوسی از میانه قرن بیستم شتاب گرفته است. ولی اثرات برداشت بی‌رویه در مناطق مهم کشاورزی آشکارتر است. تولید غذا در این مناطق تنها در صورتی در بلندمدت پایدار خواهد ماند که ترازهای آب زیرزمینی تثبیت شود. بدین منظور، تغییر اساسی در نحوه‌ای که سیستم‌های آب زیرزمینی را ارزش‌گذاری، مدیریت و مطالعه می‌کنیم ضروری است. رویکردهای فنی مانند انتقال آب، تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی و آبیاری کارآمد نتوانسته‌اند بیلان آب زیرزمینی را متوازن کنند. این راهکارها باید با استراتژی‌های جامع‌تری که با شرایط اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و زیست‌محیطی هر منطقه انطباق دارد تکمیل شوند.