مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۲ صفحه‌های ۱۴۷ تا ۱۶۲ (۱۴۰۳)

واکاوی و ارائه راهکارهای اصلاحی مدیریت آب زیرزمینی در ایران[1]

هاشم درخشان، کامران داوری[2] و ابوالفضل مساعدی[3]

چکیده

توسعه برداشت از آب‌های زیرزمینی پس از دستیابی به فناوری پمپاژ، موجب کاهش تراز آبخوان‌ها در بسیاری از منطقه‌های دنیا گردید. پس از آن برای درک دقیق مفهوم تجدیدپذیری آب زیرزمینی و بنابراین تعیین مقدار مناسب برداشت از این منابع، در حوزه‌های هیدرولوژی، مدیریت و حکمرانی آب‌های زیرزمینی پژوهش‌ها و بررسی‌های بسیاری انجام یافته است. شوربختانه نتایج این پژوهش‌ها و بررسی‌ها در ایران مورد توجه جدی قرار نگرفته است. در این مقاله ابتدا تجارب و یافته‌های بین‌المللی مروری اجمالی شده و سپس مدیریت آب زیرزمینی در ایران در چند دهه گذشته واکاوی شده است. در انتها نیز برخی راهکارهای اصلاحی پیشنهاد شده‌اند.

کلید واژه‌ها: تجدیدپذیری آب زیرزمینی، گیرش، قانون توزیع عادلانه آب، مدیریت آب زیرزمینی.

مقدمه

آب زیرزمینی به عنوان بزرگترین ذخیره آب شیرین توزیع شده در جهان، در حفظ بوم‌نظام‌ها و سازگاری انسان با تغییرهای اقلیمی نقشی برجسته دارد. اهمیت راهبردی آب زیرزمینی برای امنیت آب و غذا، زیر شرایط تغییر اقلیم و بر اساس پیش‌نگری مبتنی بر تشدید سه برابری نوسانات و شدت ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها، افزایش جدی خواهد یافت. شوربختانه، آب زیرزمینی در ایران، پس از چند دهه مدیریت ناکارآمد - به شهادت روند افزایشی «کسری مخزن تجمعی» آبخانه‌های کشور-حال و روز خوبی ندارد. بنابراین، این مطالعه با بررسی دلیل‌ها و تمرکز بر راهکارها، در صدد واکاوی مدیریت آب زیرزمینی ایران در سده گذشته برآمده است.

کاریز (قنات) از فناوری شناخته شده در دنیا برای برداشت متناسب آب از آبخانه‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. فناوری کاریز را می‌توان یکی از شگفتی‌های دنیا دانست؛ که در منطقه‌ای خشک و بیابانی آب گوارا را برای کشاورزی و زندگی فراهم آورد. طول کوره‌ها (راهروهای انتقال آب) و عمق میل‌چاه‌های کاریزهای بزرگی چون زارچ یزد و قصبه گناباد، شگفتی بازدیدکنندگان را موجب می‌شود؛ که چگونه سازه‌هایی با این بزرگی، بدون استفاده از ماشین‌های امروزی و تنها با ابزار دستی حفاری شده‌اند. در واقع ایرانیان باستان با نهادسازی و کنش جمعی داوطلبانه به حفر چنین کاریزهایی اقدام کردند (Noori *et al.*, 2021). برای نمونه، درازای کاریز قصبه گناباد ۳۳ کیلومتر و ژرفای مادر چاه آن ۳۰۰ متر

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۰

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: k.davary@ferdowsi.um.ac.ir

۳- به ترتیب، دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد و استادان دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

است و دارای ۲ رشته اصلی با نام‌های قصبه و دولاب می‌باشد و در مجموع دارای ۴۷۲ میله چاه است. قابل توجه است که در فرآیند ثبت این کاریز توسط یونسکو، ابتدا «نهادسازی برای حفر» و سپس «فناوری سازه» آن به ثبت رسیده است (فخرمحمدی، ۱۴۰۱). با توجه به بعدهای کاریزها، گزافه نیست اگر ادعا شود «ایرانیان باستان مصرف‌کننده گران‌ترین آب در جهان» بوده‌اند؛ بنابراین ارزش آب را به خوبی می‌دانسته‌اند.

در سده ۲۰ میلادی ماشین‌های زیادی در اثر توسعه علوم به بهره‌برداری رسیدند، اما به دلیل استفاده نابخردانه از این ماشین‌ها، برخی از اقدام‌های بشر در این سده چندان مایه خوشوقتی و افتخار نبوده و نیستند. از سال‌های پایانی این سده، طبیعت در پی ستمی که از این استفاده نابخردانه دیده بود، زبان به واکنش گشوده و پاسخ خویش را در قالب تغییر اقلیم، آتش‌سوزی جنگل‌ها و مرتع‌ها، سیلاب‌ها و توفان‌های بی‌سابقه، تشدید خشکسالی‌ها و گسترش بیابان، به‌هم‌ریختگی نظام بارش و مانند این‌ها نشان داده و می‌دهد (Richard *et al*., 2013).

در چند دهه اخیر، روند تغییر الگوی بارش از برف به باران‌های رگباری و نیز روند افزایشی دما (به ویژه دمای زمستانی)، به نوبه خود سبب کاهش فراهمی آب (منابع آب در دسترس) گشته است. در همین حال، توسعه لگام‌گسیخته و نیاز فزاینده به آب بیشتر در ایران، روند استفاده از منابع تجدیدناپذیر آب زیرزمینی را سرعت بخشیده است (درخشان و همکاران، ۱۴۰۲). با اُفت مستمر آبخوان‌ها، چندان دور نیست که «تمدن کاریزی» هزاران ساله، به دست نسل حاضر به کلی مخدوش و معدوم گردد (فرهادی، ۱۳۹۲). از این رو، بررسی سبب‌های این روند قهقرایی در زوال منابع آب زیرزمینی، ضرورتی آشکار یافته است.

آب‌زیرزمینی و پایایی

بخش بزرگی از سرزمین ایران خشک و نیمه‌خشک است. نیاکان ما در این سرزمین و در نبود ماشین‌های نوین برای بهره‌برداری از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی ، با ابزارهای دستی به ساخت انواع سازه‌ها (مانند: کاریز، گاوچاه، دولاب، سیل‌بند، بندسار، گوراب و آب‌انبار) پرداخته بودند. اما در دهه‌های اخیر با به‌کارگیری ماشین‌های‌نوین، سازه‌های جدید، جای انواع قدیمی را گرفته‌اند؛ مانند حفر چاه که به جای سازه سنتی کاریز قرار گرفته است؛ تا جایی که امروزه گویی کاریز نفس‌های آخر خود را می‌کشد (Madani, 2014).

سابقه این موضوع به نخستین دهه‌های سده ۱۴ خورشیدی و ورود ماشین‌های جدید به ایران برای حفر چاه باز می‌گردد؛ که با امضای موافقتنامه «برنامه حمایت آمریکا از کشورهای توسعه‌نیافته» (یا همان اصل ۴ ترومن، ۱۹۵۱میلادی -۱۳۳۰ شمسی) رواج روزافزون یافت. پس از «اصلاحات ارضی»، با فروپاشی نهاد ارباب-رعیتی، مدیریت بومی آب با چالش‌های اساسی در نهادسازی و تامین مالی (برای نگهداری کاریز) روبه‌رو شد. در پی دو رخداد، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها توسعه یافت (رفیعی راد و محمدی، ۱۳۹۶). ناگفته نماند که متخصصین آب و توسعه در آن سال‌ها هنوز به درستی متوجه پیامدهایی اضافه برداشت از آبخانه‌ها نبودند.

در این جا لازم است تمایز میان ۲ الگوی توسعه، بر پایه فناوری‌های «کاریز» و «پمپاژ از چاه»، واضح شود؛ تا آشکار گردد که چگونه اولی سازگار و دومی ناسازگار با اقلیم ایران شده است؟ برای ورود به این بحث، ابتدا باید تأکید شود که مبنای تعیین مقدار برداشت صحیح و پایا از آبخانه‌ها، شناخت مقدار تجدیدپذیری آب زیرزمینی است؛ که به نوبه خود بر مبنای جریان آب در چرخه هیدرولوژی مشخص می‌شود. همچنین در ابتدای بحث چند نکته در تعیین روند توسعه برداشت از آب‌زیرزمینی، یادآوری می‌گردد.

از تفاوت‌های چاه و کاریز، جانمایی آن‌ها است. بر اساس شاهدهای تاریخی کاریزها در کوهپایه‌ها و یا در امتداد مسیل‌ها (جایی که بیشتر آب زیرزمینی تجدیدپذیر جریان دارد) حفر می‌شده‌اند. اما، حفر چاه می‌تواند هر جایی باشد و برداشت از آن بدون توجه به تجدیدپذیر و یا تجدیدناپذیر بودن آب‌خانه زیرزمینی صورت پذیرد. در عمل، بیشتر چاه‌ها روی آبخانه‌های آبرفتی حفر شده‌اند؛ جایی که حفر کاریز به دلیل محدودیت‌های توپوگرافی و ابزاری مقدور نبوده است، اما ایرانیان در گذشته برای برداشت آب زیرزمینی، کاریز را ابداع کرده بودند. ایجاد یا توسعه کاریز، در نبود ماشین‌آلات حفاری و پمپاژ، کاری زمان‌بر و توان‌سوز بود. به همین جهت ایشان نمی‌توانستند برداشت از آب‌زیرزمینی را به آسانی توسعه دهند. بنابراین پس از هر مرحله توسعه در کاریز و در دوره طولانی ثبات، جریان آب در کاریز متناسب با نوسان آب‌وهوا و نوسان تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی، تغییر می‌کرد؛ بنابراین می‌توان گفت «کاریز دارای ویژگی خودتنظیمی و سازگار با طبیعت» بوده است.

در واقع ماشین‌آلات حفاری چاه و پمپاژ آب‌زیرزمینی، ابزاری شدند برای برداشت آسان از ذخیره‌های آبخانه‌ها. این تحول در زمانی شکل گرفت که هنوز مفهوم تجدیدپذیری آبخانه‌ها به درستی شناخته نشده بود. بنابراین، این آسانی، موجب توسعه فزاینده برداشت آب از آبخانه‌ها و اُفت آبخوان‌ها گردید. به عبارت دیگر، درک نکردن محدودیت تجدیدپذیری آبخانه، موجب گردید ذخیره آب زیرزمینی بدون حفاظت، موجب برداشت بیش از حد قرار گیرد (Ferguson *et al.*, 2020).

منابعی که «در صورت استفاده انسان دوباره پرشده و جایگزین می‌شوند»، تجدیدپذیر[1] تلقی می‌شوند (Hilborn *et al.*, 1995). نرخ جایگزینی[2]، در برآورد مقدار تجدیدپذیری و ظرفیت برداشت، عامل مهمی محسوب می‌شود. دوره جایگزینی، از تناسب موجود میان نرخ جایگزینی و حجم منبع به دست می‌آید. تعریف دوره جایگزینی عبارت است از: «میانگین مدت زمان لازم برای آن که در چرخه هیدرولوژی، تمامی حجم آب در یک مکان و/ یا شرایط معین، به مکان و/ یا شرایط جدید منتقل گردد» (Winter, 1998). بدیهی است زمان جایگزینی منابع آب یکسان نیست (جدول ۱).

کمترین زمان جایگزینی مربوط به «رطوبت جو» است که حدود ۹ روز برآورد شده است. این بخش از چرخه هیدرولوژی، با تبخیر یا تبخیرتعرق آغاز می‌شود. پس از آن بخشی از رطوبت وارد شده به جو، به ابر تبدیل می‌شود. سپس با جابه‌جایی ابرها و بارش بر خشکی‌ها، به پایان می‌رسد، اما بخش بزرگی از آب شیرین قابل استفاده در آبخانه‌ها جای دارد (Kazemi *et al.*, 2006)؛ که البته شامل سهم بزرگی از آب‌های تجدیدناپذیر هم می‌شود. در واقع، آب زیرزمینی بسیار متفاوت از دیگر اجزای چرخه هیدرولوژی است؛ به ویژه دوره جایگزینی آن دامنه بسیار وسیعی دارد. تغییر مدت دوره جایگزینی، از کوتاه تا طولانی و بسیار طولانی، به معنای تنوع آبخانه‌ها از تجدیدپذیر تا تجدیدناپذیر است، که تعریف‌های دامنه‌دار و قراردادی است (Margat *et al.*, 2006).

در پژوهش‌های اخیر، مرز تجدیدپذیر و تجدیدناپذیری آبخانه‌ها معادل «یک نسل بشر» فرض می‌شود که حدود ۱ سده فرض شده است (Gleeson *et al.*, 2012 و Bierkens & Wada, 2019). از دلیل‌های انتخاب این مقیاس زمانی، قابل فهم نمودن آن برای بشر و به ویژه استفاده‌کنندگان (آب‌بران) آب زیرزمینی است. به عبارت دیگر، اگر از آبخانه‌ای با دروه جایگزینی بیش از ۱۰۰ سال، پمپاژ صورت پذیرد، به احتمال زیاد دیگر امکان جایگزینی آن برای نسل کنونی فراهم

1. Renewable
2. Turnover rate

نخواهد بود. با توجه به تعریف دوره جایگزینی (تناسب میان نرخ جایگزینی و حجم منبع)، در ۲ حالت آبخانه تجدیدناپذیر تلقی خواهد شد: **۱**- وقتی نرخ جایگزینی بسیار ناچیز باشد و یا **۲**- وقتی حجم آبخانه بسیار بزرگ باشد. بنابراین، آب زیرزمینی تجدیدناپذیر آن‌جا دیده می‌شود که باوجود زیاد بودن ظرفیت ذخیره‌سازی آبخانه، میانگین سالانه تغذیه (نرخ جایگزینی) آن ناچیز باشد و بنابراین میانگین دوره جایگزینی آن بیش از ۱۰۰ سال برآورد گردد. بدیهی است در صورت پمپاژ از این گونه آبخانه، دیگر امکان جایگزینی آن در نسل حاضر فراهم نخواهد شد (Huggins *et al*., 2022).

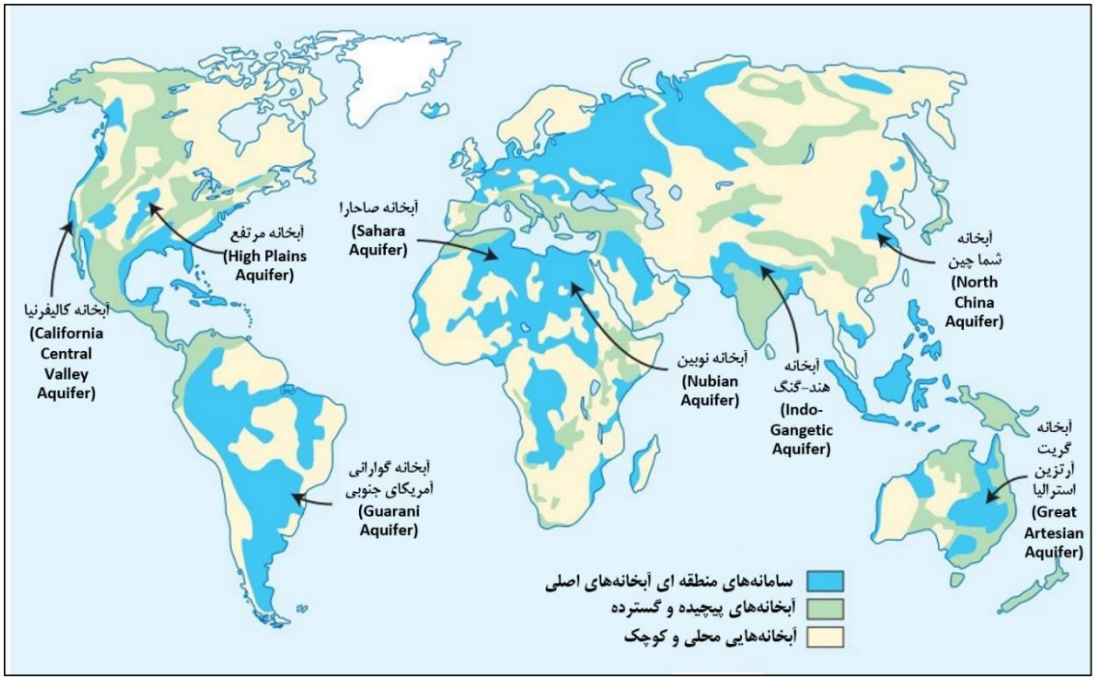
جدول ۱- اندازه و دوره جایگزینی آب‌های کره زمین (داوری و همکاران، ۱۴۰۳).

منابع آب	حجم (کیلومترمکعب)		درصد از شیرین	درصد از کل	دوره جایگزینی (زمان تبادل)
آب‌های آزاد (اقیانوس‌ها و دریاها)	۱۳۳۸۰۰۰۰۰۰		-	۹۶.۵	۳۲۰۰ سال
یخچال‌های طبیعی و توده یخ‌های قطبی	۲۴۰۶۴۰۰۰		۶۸.۷	۱.۷۴	۱۰-۱۰۰۰۰ سال
آب زیرزمینی	۲۳۴۰۰۰۰۰		-	۱.۷	۱۰-۱۰۰۰۰ سال
شیرین		۱۰۵۳۰۰۰۰	۳۰.۱	-	-
شور		۱۲۸۷۰۰۰۰	-	-	-
رطوبت خاک	۱۶۵۰۰		۰.۰۵	۰.۰۰۱	۱-۲ ماه
رطوبت یخ‌زده زمین	۳۰۰۰۰۰		۰.۸۶	۰.۰۲۲	-
دریاچه‌ها	۱۷۶۴۰۰		-	۰.۰۱۳	۵۰-۱۰۰ سال
شیرین		۹۱۰۰۰	۰.۲۶	-	-
شور		۸۵۴۰۰	-	-	-
اتمسفر در رطوبت جوی	۱۲۹۰۰		۰.۰۴	۰.۰۰۱	۹ روز
باتلاق/مرداب‌ها	۱۱۴۷۰		۰.۰۳	۰.۰۰۰۸	-
رودخانه‌ها	۲۱۲۰		۰.۰۰۶	۰.۰۰۰۲	۲-۶ ماه
آب زیستی (درون موجودات زنده)	۱۱۲۰		۰.۰۰۳	۰.۰۰۰۱	-
مجموع	۱۳۸۶۰۰۰۰۰۰		۱۰۰	۱۰۰	

دو مفهوم که بر رعایت تجدیدپذیری تأکید دارند، «پایایی[1]» و «عدالت بین نسلی[2]» هستند؛ که اولی به اختصار شامل حفظ منابع و دوام توسعه است، و دومی اشاره دارد به رعایت حقوق نسل‌های آینده (از کره زمین) توسط نسل کنونی. تا پیش از فناوری پمپاژ، این دو برقرار بودند. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، با کاریز امکان اضافه برداشت از آبخانه وجود نداشت؛ زیرا آبدهی کاریز تابع فراز و فرود آبخوان و بنابراین تابع تغذیه سفره بوده است. بنابراین، با کاریز پایایی و حقوق نسل‌های آینده رعایت می‌شده است، اما پمپاژ، رفتاری تهاجمی نسبت به آبخانه دارد؛ مگر این‌که یک نظام تخصیص صحیح، برداشت‌ها را به تبعیت از نوسان آبخوان وادارد. بدیهی است پس از اولین روبه‌رو شدن با فرو افتادن آبخوان‌ها به دلیل پمپاژ، این مشکل شناسایی شده و اولین بار در سال ۱۹۱۵ مبانی مشخصی برای کنترل این مشکل در کتاب «مخزن‌های زیرزمینی[3]» شرح داده شده است (Lee, 1915). از آن زمان تا کنون نیز پاسخ به این پرسش که «مقدار صحیح برداشت از آبخانه‌ها چه مقدار است؟»، همواره محل پژوهش و بررسی جدی بوده است (در ادامه مقاله به آن‌ها اشاره خواهد گردید).

1. Sustainability
2- Inter-generational justice
3. Underground reservoirs

شوربختانه در ایران به این مبانی توجه کافی نشده است؛ اگرچه برای آبخوان‌هایی که با کاهش تراز روبه‌رو هستند، ابتدا در ماده ۲۴ «قانون آب و نحوه ملی شدن آن» (مصوب تیر ۱۳۴۷)، و سپس در ماده ۴ «قانون توزیع عادلانه آب» (مصوب اسفند ۱۳۶۱) به وزارت نیرو برای تعیین و تمدید «ممنوعیت برداشت» مجوز داده شده است، اما شوربختانه میانگین کاهش تراز آبخوان‌های کشور در ۵۰ سال گذشته، با میانگین ۰/۵ متر در سال (یعنی میانگین اُفت تجمعی برابر با ۲۵ متر) ادامه داشته است (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰). به تازگی کسری مخزن تجمعی کشور توسط زندپارسا و همکاران (۱۴۰۲)، بر پایه داده‌های ماهواره GRACE، بیش از ۱۵/۹ میلیارد متر مکعب برآورد شده است؛ که بسیار بیشتر از ۲۵ متر می‌باشد. این در حالی است که از سوی بخش‌های بزرگی از کشور به شدت به ذخیره‌های آب زیرزمینی وابسته‌اند و از سوی دیگر آبخانه‌های ایران کوچک و موضعی و بنابراین بسیار شکننده هستند (شکل ۱).



شکل ۱- سیستم‌های آبخانه‌های زیرزمینی در دنیا (Richard *et al.*, 2013).

با این حال، انتظار می‌رود منابع کمیاب آب زیرزمینی کشور که حیات تمدنی به آن وابسته است، ارزشی والا داشته باشند، اما شوربختانه ادامه زوال آبخانه‌ها، نشانگر چیز دیگری است. اکنون مردم به خاطر مدیریت ناکارآمد آب در نیم قرن اخیر، به ناچار درگیر تراژدی منابع مشترک (Hardin, 1968) شده‌اند. در واقع Hardin (1968)، پس از مشاهده اوج سلطه دولت‌های مرکزی اقتدارگرا و مداخله نهادی آن‌ها (در کنترل و نفی نقش نهادهای عرفی و جامعه‌های محلی)، به این نتیجه رسید. در حالی‌که، Ostrom (1990) نشان داد که جامعه‌های انسانی خود به خود قادر به نهادسازی (سازماندهی اقدام جمعی) برای تسهیم منافع مشترک (خیر جمعی) بوده و هستند (Ostrom, 1990) و صیانت از منابع مشاع (مانند آب‌های زیرزمینی)، در زمره سودهای جمعی قرار داشته و دارد. بنابراین، اگر دخالت دولت‌ها در کنترل و نفی نقش نهادهای عرفی و جامعه‌های محلی نمی‌بود، به احتمال بسیار زیاد امروز منابع کمیاب و بی‌همتای آب زیرزمینی کشور در برابر زوال قرار نمی‌داشتند. حتی اگر بازخوانی و آسیب شناسی گذشته ملاک بود، چنین سرانجامی فراهم نمی‌شد (درخشان، ۱۴۰۲).

بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که سده اخیر سده‌ای بوده که به دلیل توسعه فناوری‌های حاصل از انقلاب صنعتی و در پی آن تخریب محیط‌زیست، کره زمین وارد دوره آنتروپوسن[1] شده است. منظور از آنتروپوسن دوره‌ای در تاریخ عمر کره زمین است که انسان‌ها تأثیر محسوسی بر زیست‌بوم زمین می‌گذارند؛ به گونه‌ای که نمی‌توان بدون در نظر گرفتن این تأثیر درباره کره زمین صحبت کرد (Gleeson *et al.*, 2020). در این شرایط، مقدمه تحول مدیریت آب زیرزمینی از وضع موجود به وضع مطلوب، در نظر گرفتن مبانی «تجدیدپذیری منابع آب» و «پایایی توسعه» در تصمیم‌گیری‌ها و سیاستگذاری‌ها و نیز «پایش و ارزیابی» برای پندآموزی مستمر است. افزون بر این، ضروری است مدیران آب با «مفهوم‌های اجتماعی-اقتصادی مدیریت آب» آشنایی کافی داشته باشند.

تعیین مقدار مناسب برداشت از آبخانه

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، پاسخ به این پرسش که «مقدار صحیح برداشت از آبخانه‌ها چه مقدار است؟»، همواره محل پژوهش و بررسی بوده است. در این بخش سعی شده است به این پرسش پاسخ داده شود. برای ورود به این بحث، باید مفهوم گیرش[2] شرح داده شود. گیرش از منابع طبیعی، یا استخراج آن‌ها برای استفاده انسان؛ به برداشت‌هایی مانند سوخت‌های فسیلی، سنگ‌ها و مواد معدنی، زیست‌توده (جنگل‌زدایی، ماهیگیری، چرای مراتع و مانند این‌ها)، آب و باد و آفتاب اشاره دارد. برای نمونه تولید برق توسط توربین‌های آبی که با گیرش انرژی آب در جریان صورت می‌پذیرد و یا تولید چوب با بریدن درختان جنگلی که با گیرش از حجم زیست‌توده (درختان رشد یافته تا آن زمان) صورت می‌پذیرد. نوع اول گیرش از شارش است و در زمان توقف توربین موجب از دست رفتن انرژی می‌شود (که دیگر قابل دستیابی نیست)، اما نوع دوم گیرش از انبارش است، و اگر بریدن درختان چند روز هم با تأخیر انجام شود، چیزی از دست نمی‌رود (رشد درختان در این چند روز، بر حجم زیست‌توده افزوده شده و قابل دستیابی است)، اما آب زیرزمینی در هیچ یک از ۲ دسته‌بندی (شارش یا انبارش) قرار نمی‌گیرد (Alley *et al.*, 2018).

در واقع، آبخانه‌ها از سویی مخزن‌های آب زیرزمینی هستند که پدیده‌ای انبارشی است و از سوی دیگر، جریان آب زیرزمینی را در بر دارند، که پدیده‌ای شارشی است. بنابراین، گیرش از آب زیرزمینی، به نسبت سایر منابع طبیعی، آثار پیچیده‌تری در بر دارد (درخشان و همکاران، ۱۴۰۲). به همین دلیل، مقدار مناسب برداشت از آبخانه را نمی‌توان به تنهایی برپایه نرخ تغذیه طبیعی (مقدار شارش) برآورد نمود، زیرا در هر دوره زمانی مشخص، جریان آب زیرزمینی نیز در تغییر حجم آب ذخیره شده نقش دارد. همچنین تغذیه از مخزن‌های متفاوت، با تأخیرهای مختلفی به آبخانه می‌رسد که بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. روال مرسوم در برآورد تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی، بر اساس بررسی تفاضل تغذیه از مجموع تخلیه و پمپاژ (معادله ۱) بوده است.

۱- بیلان منابع آب زیرزمینی $ds/dt = R - D - Q$

در وضعیت تعادل آبخانه، Q همان آب تجدیدپذیر فرض می‌شده $ds/dt = 0 \rightarrow Q = R - D$

در این معادله، s حجم ذخیره آبخانه، t دوره زمانی بررسی بیلان، R نرخ تغذیه آبخانه، D نرخ تخلیه آبخانه و Q نرخ پمپاژ از آبخانه می‌باشند. این روال به دلیل اعمال نکردن اثرات توسعه بر تغذیه و تخلیه، همواره بیش‌برآورد داشته؛ که مدیریت بر اساس آن منجر به افت آبخوان می‌شده است (درخشان و همکاران، ۱۴۰۲). برای برآورد صحیح تجدیدپذیری،

1. Anthropocene
2. Capture

اثرهای توسعه بر R و D باید در نظر گرفته شود (Cuthber *et al*., 2022). برای نمونه پس از افت تراز آبخوان به دلیل پمپاژ و با فرض شرایط ثابت محیطی، تغییر اختلاف پتانسیل موجب افزایش تغذیه طبیعی و کاهش تخلیه طبیعی خواهد شد. در معادله‌های ۲ تا ۴ «برآورهای درست تغذیه و تخلیه» و «بیشینه گیرش» ارایه شده است. بیشینه گیرش (**C_{max}**)، حدی است که اگر پمپاژ کمتر از آن باشد، پایایی آبخانه در مخاطره قرار نمی‌گیرد (Cuthber *et al*., 2022). لازم است گفته شود که در حالت طبیعی (بدون دخالت انسان) آبخانه متعادل است؛ بنابراین رابطه $R_0 = D_0$ برقرار است.

۲- برآور درست شده تغذیه $$R = R_0 + \Delta R_Q + \Delta R_N$$

۳- برآور درست شده تخلیه $$D = D_0 + \Delta D_Q + \Delta D_N$$

و اگر فرض شود اثر توسعه ناچیز باشد. $$\Delta RN \approx 0 \; ; \; \Delta DN \approx 0$$

با قرار دادن این موردها در معادله ۱، معادله ۴ به دست می‌آید:

۴- برآور ساده «بیشینه گیرش» $$C_{max} = \Delta R_Q - \Delta D_Q$$

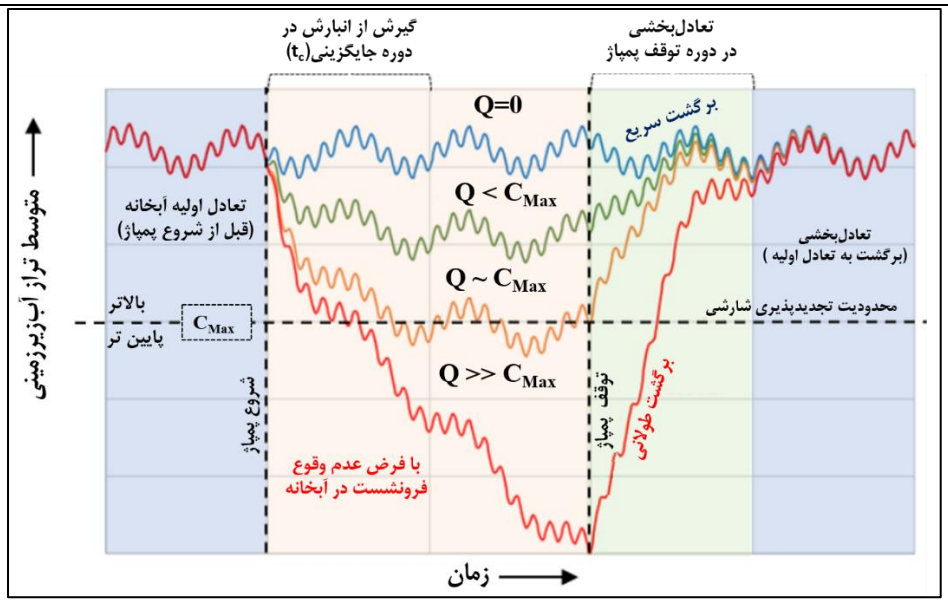
در این معادله‌ها، R_0 و D_0 نرخ‌های تغذیه و تخلیه پیش از توسعه، ΔR_Q و ΔD_Q تغییر در نرخ‌های تغذیه و تخلیه ناشی از پمپاژ، و ΔR_N و ΔD_N تغییر در نرخ‌های تغذیه و تخلیه ناشی از اثر توسعه بر سایر عامل‌های طبیعی (مانند تغییر کاربری زمین‌ها) می‌باشد.

بدیهی است با وقوع دوره‌های تر و خشک آب‌وهوا، تراز آبخوان نوسان خواهد نمود. در نبود روند تغییر اقلیم، برابری $R_0 = D_0$ فرضی معقول و قابل قبول بوده است (در یک دوره به قدر کافی طولانی، برای نمونه: ۳۰ ساله). با این فرض‌ها، پمپاژ تنها عامل کاهش تراز آبخوان است. این کاهش به افزایش تغذیه (ΔR_Q) و کاهش زهکشی طبیعی آبخوان به پایین‌دست (ΔD_Q) می‌انجامد. فاصله پدید آمده میان این دو، به طور دقیق معادل همان مقدار گیرش ($\Delta R_Q - \Delta D_Q$) است. در این‌جا به طور مستقیم به شرط «پایایی بوم‌نظام‌های آبی وابسته به آب زیرزمینی» اشاره نشده و فقط فرض شده است که اگر برابری $R_0 = D_0$ برقرار باشد، این بوم‌نظام‌ها با مشکل روبه‌رو نخواهند گردید. در شکل ۲ حالت‌های مختلف پمپاژ در مقایسه با بیشینه گیرش نمایش داده شده است. کاهش تراز آبخوان به زیر خط‌چین افقی (یعنی گذر از محدودیت تجدیدپذیری شارشی آبخوان به دلیل استمرار پمپاژ بیش از حد)، نه تنها بازیابی انبارش آبخانه را دچار مشکل می‌نماید، بلکه موجب نابودی زیست‌بوم‌های وابسته به آب زیرزمینی (مانند بوم‌نظام‌های وابسته به دبی پایه رودخانه) می‌گردند.

بدیهی است هرگاه گیرش (پمپاژ) کاهش یابد یا قطع شود، تراز آبخوان افزایش می‌یابد. در این حالت، مدت مورد نیاز برای بازیابی تراز اولیه آبخوان (تعادل بخشی در دوره توقف پمپاژ، شکل ۲)، زیر هر وضعیت به شرح زیر متناسب با برخی از عامل‌ها است.

«آبگذری آبخانه» / «وسعت آبخوان» * «آبدهی ویژه آبخانه» ➔ بیشینه گیرش ≤ نرخ پمپاژ

«نرخ تغذیه» / «حجم تجمعی برداشت از آبخوان» ➔ بیشینه گیرش < نرخ پمپاژ



شکل ۲- عامل‌های موثر بر پویایی «پمپاژ و بازیابی یک سیستم آب زیرزمینی». (Cuthbert *et al.*, 2023).

امروزه اما، تحول‌های گسترده ناشی از توسعه و تغییر اقلیم، شرایط را از حالت ایستایی و ثبات خارج نموده و اجزای چرخه هیدرولوژی (از جمله آب زیرزمینی) را دستخوش تغییرهای مستمر نموده است. بنابراین، برآورد ساده «بیشینه گیرش» دیگر کارایی ندارد؛ و برآورد دقیق این کمیت بحرانی با حذف فرض‌ها ساده‌ساز و با حسابداری آب ممکن است. در هر حال باید توجه نمود که مقدار بیشینه گیرش، ثابت نیست و با توجه به پویایی اقلیم و توسعه، لازم است به طور دوره‌ای روزآمد گردد.

در رابطه با نیاز توسعه اقتصادی به منابع آب بیشتر، یک پرسش مطرح می‌شود: «آیا برداشت مقداری از حجم تجدیدناپذیر آبخانه (با افزایش نرخ پمپاژ: $Q > C_{max}$)، سیستم را ناپایا خواهد نمود؟» برای پاسخ به این پرسش، Gleeson *et al.* (2020) با توجه به ارتباط سیستم اقتصادی-اجتماعی با سیستم آب زیرزمینی، تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی را تغییر دادند: «اگر اُفت آبخوان ناشی از برداشت بیشتر ($Q > C_{max}$)، به تعادل جدیدی در تراز بیانجامد، در این شرایط دوباره برداشت تجدیدپذیر محسوب می‌شود». زیرا همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد «اُفت آبخوان می‌تواند موجب افزایش تغذیه و کاهش تخلیه طبیعی گردد». البته این نوع برداشت ممکن است اثرهایی برای سیستم‌های آب مجاور و بوم‌نظام‌های وابسته به آن‌ها داشته باشد، اما اگر پمپاژ از مقدار گیرش بیشینه بیشتر شده و آبخوان با اُفت مزمن رو به رو باشد، تعادل‌بخشی آن با نرخ تغذیه موجود دشوار خواهد بود.

به هر حال نکته بارز در رویکردهای نو، تعیین دوره مدیریت آب زیرزمینی برابر با دوره نسل بشر (معادل ۵۰ تا ۱۰۰ سال) است؛ که به طور غیرمستقیم رعایت حقوق بین نسلی توسط نسل حاضر، را تضمین می‌کند (درخشان و همکاران، ۱۴۰۲)، اما در ایران، با وجود تکامل مبانی گیرش برای مدیریت پایای آب زیرزمینی، شوربختانه به این مبانی توجه نشده و یا حتی تلاشی برای توسعه مبانی متناسب با شرایط کشور صورت نگرفته است. تنها در سال ۱۳۹۳ پانزدهمین جلسه شورایعالی آب، ۷۵٪ تجدیدپذیری منابع آب را به عنوان سقف برداشت آب مصوب نموده است. پس از آن، شرکت مدیریت منابع آب ایران در فرآیندی غیر شفاف، حجم‌هایی را به عنوان «آب قابل برنامه‌ریزی» به عنوان هدف سال‌های افق (۱۴۰۵ و ۱۴۲۰) در طرح «سازگاری با کم آبی» به استان‌ها ابلاغ نموده است. جالب توجه این‌که در این ابلاغیه‌ها برای

هر دو افق، سهم برداشت آب برای بخش‌های شهری (خانگی، فضای سبز، خدمات)، صنعتی و کشاورزی نیز اعلام شده است. این در حالی است که برای افق‌هایی با فاصله ۱۰ و ۲۵ سال، **۱**- پیش‌بینی وضعیت منابع آب با دقت قابل قبول ناممکن است و **۲**- وضعیت توسعه (رشد جمعیت و روندهای اقتصاد) و فناوری‌ها نامشخص است. بنابراین تعیین مقدارهای آب قابل برنامه‌ریزی و سهم‌بندی آن میان بخش‌های مختلف، برای آینده‌هایی به فاصله ۱۰ و ۲۵ سال، هیچ گونه روایی ندارد.

در پایان این بخش یادآوری می‌گردد که دیدگاه علم اقتصاد، بهای واقعی هر متر مکعب آب تجدیدناپذیر را معادل هزینه جایگزینی آن فرض می‌نماید که البته بر آن باید هزینه جبران خسارت‌های ناشی از کاهش تراز آبخوان (نابودی بوم‌نظام‌های وابسته به آب زیرزمینی، نشست زمین، و مانند این‌ها) را افزود. اگر این بهای گزاف از توسعه دهندگان و آب‌بران جدید مطالبه می‌شد، هرگز توسعه موجود شکل نمی‌گرفت.

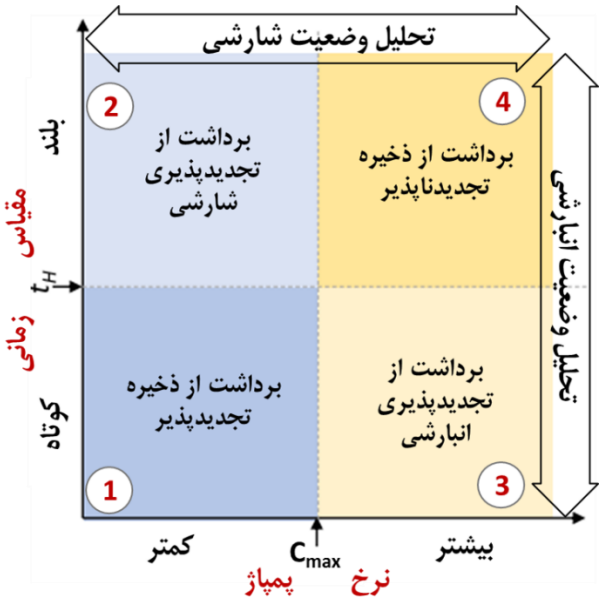
چارچوب واکاوی تجدیدپذیری آب زیرزمینی

تکامل تعریف استفاده پایا از آب زیرزمینی، بر پایه تجدیدپذیری «شارشی و انبارشی» (Konikow & Leake. 2014)، موجب توسعه چارچوبی (شکل ۳) برای مدیریت برداشت از آب زیرزمینی شده است (Cuthbert *et al*., 2023 و Gleeson *et al*., 2020). این چارچوب استفاده از آب‌های زیرزمینی را به ۴ حالت تفکیک نموده است. مبنای این تفکیک در محور افقی، نرخ پمپاژ در مقایسه با «بیشینه گیرش C_{max}»، و در محور عمودی دوره جایگزینی در مقایسه با «زمان نسل بشر t_H» (حدود ۵۰ تا ۱۰۰ سال) است. شرح این ۴ نوع استفاده از آب‌های زیرزمینی در زیر آمده است:

- پمپاژ کمتر از بیشینه گیرش ($Q < C_{max}$) و دوره جایگزینی کوتاه ($t < t_H$): این حالت استفاده تجدیدپذیر است. در این وضعیت با توجه به کم بودن نرخ پمپاژ هرگز کاهش مزمن تراز آبخوان به وجود نمی‌آید.
- پمپاژ کمتر از بیشینه گیرش ($Q < C_{max}$)، اما دوره جایگزینی بلند ($t > t_H$): این حالت استفاده تجدیدپذیر شارشی است، زیرا فرض شده است مادام که پمپاژ کمتر از بیشینه گیرش باشد، محدودیت تجدیدپذیری شارشی آبخوان رعایت شده، و بنابراین پایایی بوم‌نظام‌های آبی وابسته به آب زیرزمینی به مخاطره نخواهد افتاد، اما از دیدگاه مبتنی بر انبارش، این حالت تجدیدناپذیر تلقی می‌گردد، یعنی استمرار آن در بلند مدت سرانجامی نامطلوب برای سیستم‌های آب مجاور و بوم‌نظام‌های وابسته به آن‌ها، به بار خواهد آورد.
- پمپاژ بیشتر از بیشینه گیرش ($Q > C_{max}$)، اما دوره جایگزینی کوتاه ($t < t_H$): این حالت استفاده تجدیدناپذیر شارشی است. با این حال از دیدگاه مبتنی بر انبارش تجدیدپذیر تلقی می‌شود، زیرا به دلیل کوچک بودن دوره جایگزینی، فرصت مشاهده سرانجام برای نسل حاضر فراهم است و بنابراین با مشاهده آثار این نوع پمپاژ بر کمّیت و کیفیت آب زیرزمینی، اقدام اصلاحی برای تعادل‌بخشی آبخوان صورت خواهد گرفت.
- پمپاژ بیشتر از بیشینه گیرش ($Q > C_{max}$) و دوره جایگزینی بلند ($t > t_H$): این حالت استفاده از هر دو دیدگاه شارشی و انبارشی تجدیدناپذیر است.

بررسی‌های اخیر از تجربه‌های جهانی مدیریت آب زیرزمینی (میرنظامی، ۱۴۰۲ و Jasechko *et al*., 2024)، نشان دهنده این است که نمونه‌های متعددی از ۴ حالت مورد اشاره در دنیا وجود دارد، اما در ایران به استناد گزارش شرکت مدیریت منابع آب کشور، اکنون از ۶۰۹ محدوده بررسی، ۴۲۲ مورد (شامل اصلی‌ترین آبخوان‌های کشور) دارای کاهش

تراز مستمر و مزمن هستند (بی‌نام، ۱۴۰۳) و این رقم در دهه‌های اخیر روندی افزایشی داشته است. این آبخوان‌ها که با عناوین ممنوعه و ممنوعه-بحرانی شناخته می‌شوند، در حالت ۴ (شکل ۳) قرار دارند و معنای آن، زوال تدریجی آبخوان‌های کشور است. باید یادآوری نمود که همزمان با کاهش تراز آبخوان، کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز به شدت زوال می‌یابد (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲). در هرحال، باید پذیرفت که این وضعیت افزون بر بی‌تدبیری نسبت به تغییرهای محیطی، نتیجه بی‌توجهی به مفهوم تجدیدپذیری و نبود تعهد به پایایی توسعه است.

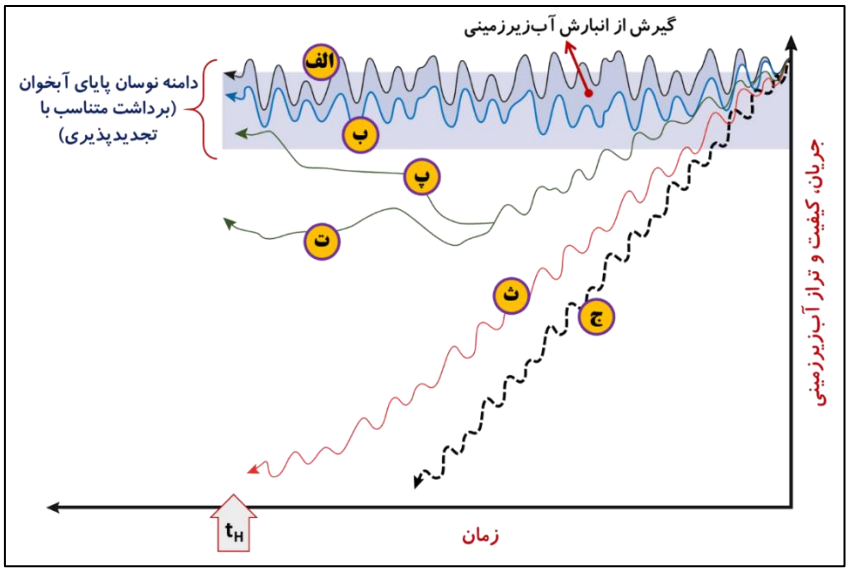


شکل۳- چارچوب تجدیدپذیری سیستم‌های آب زیرزمینی؛ بازسازی شده از (Cuthbert *et al.*, 2023).

برای درک بیشتر موضوع، رفتار آبخوان زیر حالت‌های مختلف مدیریت برداشت از آب زیرزمینی (مشروح در شکل ۳) در شکل ۴ نمایش داده شده است. حروف درج شده در این شکل در اینجا شرح داده می‌شود: **الف**- وضعیت طبیعی آبخوان (پیش از دخالت بشر)؛ **ب**- برداشت از ذخیره تجدیدپذیر (حالت‌های ۱ و ۲)؛ **پ**- برداشت از ذخیره آبخانه که در مقیاس زمانی نسل بشر (tH) قابل جبران باشد (حالت ۳)؛ **ت**- برداشت از ذخیره تجدیدناپذیر و سپس دستیابی به یک تعادل جدید در تراز آبخوان (حد فاصل حالت‌های ۳ و ۴)؛ **ث**- برداشت مدیریت شده از ذخیره تجدیدناپذیر و زوال تدریجی آب زیرزمینی (حالت ۴)؛ و **ج**- برداشت بی‌حد از ذخیره تجدیدناپذیر و زوال آب زیرزمینی (حالت ۴ تشدید یافته). بدیهی است که حدفاصل میان دو وضعیت **الف** و **ب**، همان میزان گیرش و ناشی از پمپاژ است. همچنین دو منحنی **ث** و **ج**، نمایش وضعیت دشت‌های ممنوعه و بحرانی کشور هستند.

مدیریت نادرست در برداشت از آب زیرزمینی در چند دهه اخیر، به انتقال تدریجی وضعیت آب‌های زیرزمینی کشور از وضعیت **الف** به **ج** انجامیده است. برای اصلاح آن راهی به جز کاهش برداشت و پمپاژ نیست. گزارش‌های چندی از نمونه‌های چنین روند اصلاحی برای تعادل‌بخشی و احیاء آب زیرزمینی منتشر شده است؛ برای نمونه: در سانتاکلارای کالیفرنیا (Hanson, 2015 و داوری و درخشان، ۱۳۹۷) و در اسپانیا (Custodio *et al.*, 2017 و Vélez-Nicolás *et al.*, 2020). همچنین سامانی (۱۳۹۹) مقاله ارزنده‌ای با عنوان «ارائه الگوهای جهانی مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی جهت

بهبود طرح احیا و تعادل‌بخشی در کشور» منتشر نموده است که در آن تجربه‌های آمریکا (نوادا و کالیفرنیا)، اسپانیا و هند را گزارش نموده است. در برابر آن، الگوی جاری مدیریت ناکارآمد آب زیرزمینی در بیشتر کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا، را Molle *et al.*, (2017) گزارش نموده که بیشتر بر پایه رفتار دستوری از بالا به پایین بوده است.



شکل ۴- رفتار آبخوان زیر حالت‌های مختلف برداشت از آب زیرزمینی؛ بازسازی شده از Cuthbert *et al.* (2023).

بحث و پیشنهادها

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، سازوکارهای نهادی (شامل حق بر دارایی و بازار) نقشی اساسی در مدیریت منابع کمیاب دارد (Ostrom, 1990) و در نبود آن تراژدی منابع مشترک رخ خواهد داد (Hardin, 1968). آب زیرزمینی نیز منبعی مشترک (مشاع) است. شوربختانه، حذف نهادهای عرفی-محلی با اصلاحات ارضی، و سپس مداخله یکجانبه و ناعادلانه دولت در بهره‌برداری از این منبع مشاع، به غارت این منبع بی‌همتا انجامیده است؛ منبعی که بی‌اغراق می‌توان آن را مادر تمدن کاریزی نام نهاد. رخداد این تراژدی تا حدودی ناشی از ساده‌اندیشی مدیران دولتی و نبود درک از پیچیدگی سیستم‌های منابع آب زیرزمینی نیز بوده است. در واقع، در مقایسه با آب‌های سطحی، تغییرهای آب زیرزمینی بسیار آهسته‌تر شکل می‌گیرد، زوال کمیت و کیفیت آن چندان دیده نمی‌شود، و با رفتار سازه‌ای به آسانی نمی‌توان آن را مدیریت نمود. بنابراین حکمرانی و مدیریت آن نیز پیچیده‌تر و دشوارتر از آب‌های سطحی است. افزون بر این، در ایران موردهای زیر بر ناکارآمدی مدیریت آب‌های زیرزمینی افزوده است:

۱- تعارض منافع سازمانی، ناشی از ماهیت «شرکتی» آب‌های منطقه‌ای و استفاده از فروش منابع آب در جهت تأمین منابع مالی شرکت!

۲- نبود داده‌های مطمئن و کافی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی (به استناد تجربه شخصی نویسنده در موردهای متعدد).

۳- نبود پایش هدفمند و ارزیابی هوشمندانه از وضعیت منابع-مصارف آب و روندهای تغییر آن‌ها.

۴- نبود سازوکاری برای به‌کارگیری نتایج پایش و ارزیابی منابع-مصارف آب، در تصمیم‌سازی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها.

برای اصلاح این شرایط اقدام‌های با شتاب نتیجه‌ای جز بدتر کردن وضعیت نداشته و نافع نبوده‌اند. در واقع داشتن انتظار برای نتایج چشمگیر در کوتاه‌مدت ساده‌انگاری است. حقیقت این است که انتقال از وضعیت موجود به وضعیت مطلوب، فرآیندی توانسوز و زمان‌بر است و به برنامه‌ریزی راهبردی در ۳ افق کوتاه‌مدت (۵ ساله)، میان‌مدت و بلندمدت (۲۵ ساله) و تلاش مستمر نیاز دارد. پیاده‌سازی کامل چنین برنامه‌هایی، وابسته به «عزم مسئولین سیاسی» و «پایبندی مجریان» به آن است.

در حوضه کشف رود از سال ۱۳۹۰ تا کنون فعالیت‌هایی با عنوان‌های تدبیر آب مشهد، همیاران آب، تدوین نقشه‌راه تعادل منابع-مصارف آب، و نیز شورای حوضه کشف‌رود شکل گرفته و نتایجی مفیدی حاصل شده است (Kolahi *et al*, 2024). این دشت آمادگی دارد تا به عنوان پایلوت پیشگام در پیاده‌سازی مدیریت راهبردی-مشارکتی حوضه‌ای باشد. در هر حال، می‌توان موردهای زیر را برای تسریع در بهبود مدیریت آب زیرزمینی کشور پیشنهاد نمود:

- مدیریت آب زیرزمینی، نیازمند نهادی کارآمد است که بر پایه مرزهای حوضه‌ای و با مشارکت آب‌بران و بهره‌وران جامعه محلی شکل گیرد. خوشبختانه شورای عالی آب در چهل و چهارمین جلسه (آبان ۱۴۰۱) مصوبه‌ای با عنوان «سند سازوکار هماهنگی مدیریت حوضه‌ای آب کشور» داشته که تشکیل شوراهای حوضه را توصیه نموده است (اگرچه در آن نقش جامعه محلی پر رنگ نیست). این سند در آذر ۱۴۰۲ به مدیران حوضه‌های کشور (در شرکت مدیریت منابع آب) ابلاغ شده است. شوربختانه پس از حدود ۲ سال، هنوز آثاری از اقدام در راستای این سند مشاهده نمی‌شود. فرصتی برای از دست دادن نمانده و بنابراین باید در پیاده‌سازی این مصوبه کوشش بیشتری گردد.
- بسیاری از کشورها، پس از آغاز پمپاژ یک دوره کاهش تراز آبخوان را تجربه کرده‌اند و سپس برای دست‌یابی به پایایی، به متناسب‌سازی برداشت‌ها (پمپاژ) با تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی اقدام نموده‌اند (Lopez-Gunn *et al*., 2011). این تحول بیش از آن‌که نیازمند اقدام‌های فنی یا هیدرولوژیکی باشد، نیازمند اقدام‌های اجتماعی-اقتصادی است. از این رو، مدیریت آب در ایران باید به توانمندسازی گروداران آب (در جامعه‌های محلی) برای نقش‌آفرینی درخور در مدیریت آب زیرزمینی، اقدام نماید. مشارکت جامعه محلی توانمند، سرنوشت منابع آب زیرزمینی را از زوال به بقا تغییر جهت خواهد داد.
- برای بازسازی اعتماد جامعه محلی و جلب مشارکت ایشان در مدیریت آب، در حال حاضر وزارت نیرو می‌تواند در حکمی از شرکت‌های آب منطقه‌ای کشور بخواهد تا نمایندگانی از آب‌بران (کشاورزی، صنعتی، خدمات و آبفا) و بهره‌وران محلی (شورای استان و برخی سمن‌ها) به طور ثابت در تمامی جلسه‌های هیأت مدیره این شرکت‌ها به صورت مدعو حضور یابند و ناظر تصمیم‌های ایشان باشند. به این ترتیب، با شفافیت بیشتری جامعه محلی در جریان محدودیت‌ها و دشواری‌های حل و فصل مسئله‌های آب، قرار خواهند گرفت.
- وجود یک نظام پایش هدفمند برای ارزیابی هوشمندانه نتایج و پندآموزی مستمر، مقدمه‌ای برای مدیریت دانش و توسعه دانش بومی است؛ بدون چنین ساختاری، هرگز از گذشته خویش نمی‌آموزیم. بنابراین ضروری است تا در اولین گام‌ها، نسبت به بهبود وضعیت داده‌برداری (چه در شبکه و چه در روش‌ها) و اتصال آن با تصمیم‌سازی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها، اقدام جدی و فوری صورت پذیرد.
- جلوگیری از دست‌اندازی به ذخیره‌های تجدیدناپذیر، به آسانی و در کوتاه مدت ممکن نیست. اقتصاد بسیاری از دشت‌ها به این دست‌اندازی خو کرده و به آن نیاز حیاتی دارد. بنابراین تحول از وضعیت ناپایای امروزین به پایایی

آب زیرزمینی، امری بلند مدت است. همچنین، این تحول نیازمند حجم بسیار زیاد و پی‌درپی از تدوین برنامه‌ها، قانون‌گذاری‌ها، ظرفیت‌سازی‌ها و آماده‌سازی‌ها است. گام برداشتن در این مسیر به سوی هدف، جز با برنامه‌ریزی راهبردی و تدوین «نقشه‌راه» بر اساس وفاق و اجماع جامعه محلی، میسر نیست.

نتیجه‌گیری

برای ایجاد فناوری کاریزی هزینه بسیار زیادی لازم بوده است، به گونه‌ای که دهه‌ها و شاید هم سده‌ها طول کشیده تا آن‌چه که امروز دیده می‌شود، پدید آید. بنابراین پس از ایجاد، یک فناوری خودتنظیم (تابع نوسان آب‌وهوا) بوده است که بدون آسیب به حقوق نسل‌های آینده از آن بهره‌برداری می‌شده است، اما فناوری پمپاژ، متفاوت از فناوری کاریز توسعه یافته است. به گونه‌ای که مدت و هزینه لازم برای ایجاد چاه و پمپاژ آب (در مقیاس زمانی نسل بشری) بسیار ناچیز است. در حالی‌که مقدار آبدهی آن می‌تواند بسیار زیاد باشد. در هرحال، توسعه سریع برداشت از آبخانه‌ها تجربه جدیدی برای بشر بوده است. این تجربه جدیدف نیاز به نهادسازی برای مدیریت منبع مشاع آب زیرزمینی را آشکار نموده است. جامعه‌های بسیار زیادی در دنیا با پشتیبانی دولت‌های ملی و محلی به این مهم پرداخته‌اند.

در همین راستا، مفهوم‌های مرتبط با تجدیدپذیری آب زیرزمینی رشد چشمگیری یافته است، که در این مقاله شرح داده شدند. شوربختانه امروزه در ایران یک عقب‌ماندگی جدی در این موردها به چشم می‌خورد که هرچه زودتر باید جبران گردد.

نهادسازی برای مدیریت منبع مشاع آب زیرزمینی، نیازمند فرآیند اجماع‌سازی آب‌بران پیرامون «پرهیز از پیامدهای نامطلوب» اضافه برداشت از ذخیره‌های آب زیرزمینی است. با این سازوکار، تمامی آب‌بران به جبران خسارت‌های ناشی از اضافه برداشت الزام خواهند یافت. این فرآیندی پیچیده و زمان‌بر است که پیش‌نیاز آن اعتمادسازی و افزایش سرمایه اجتماعی می‌باشد. جالب توجه این‌که در ماده‌های ۱۴ و ۴۴ قانون توزیع عادلانه آب به صراحت به جبران پیامدهای نامطلوب اضافه برداشت پرداخته شده‌است که اولی به اضافه برداشت توسط همسایگان (حریم هیدرولیکی) و دومی به توسعه اضافه برداشت‌ها با مجوز وزارت نیرو (حریم هیدرولوژیکی) توجه نموده است. شوربختانه ماده ۴۴ این قانون از سال ۱۳۶۱ تا کنون متروک است. ترک این ماده قانونی، به توسعه برداشت از آب زیرزمینی و وقوع پیامدهای نامطلوب انجامیده است که ناشی از تصمیم‌گیری بدون هزینه، و «سواری مجانی[1]» (در فرهنگ اقتصادی به عنوان نفع بردن بدون پرداخت هزینه یا جبران پیامد است) مدیران دولتی بوده است.

در هر حال، محدود نمودن پمپاژ به ذخیره‌های تجدیدپذیر آب زیرزمینی مسئله‌ای نیست که با یک فرمان و یا با تنظیم صورت جلسه‌ای در سطوح اداری بتوان آن را حل و فصل نمود. بلکه یک فرآیند تحولی زمانبر و پیچیده است که تمامی بخش‌ها را زیر تاثیر شدید قرار خواهد داد. در واقع، مدیریت آب زیرزمینی برای جلوگیری از نابودی بیشتر این منبع بی‌همتا، نیازمند تحول‌خواهی و ظرفیت‌سازی برای تغییر است. امید است مدیران امروز کشور بتوانند عزمی راسخ برای چنین تحولی پیشه نمایند.

1. Free riding

منابع

اسدی، مراد؛ مظاهری، مهدی و عبدالمنافیف نرجس. (۱۴۰۰). *بررسی تحلیلی شرایط موجود و تبیین وضعیت آینده بحران آب در کشور*. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (دفتر مطالعات زیربنایی – گروه آب)، شماره مسلسل: ۱۸۰۶۷، کد: ۲۵۰

بی‌نام. (۱۴۰۳). سخنگوی صنعت آب کشور: ناچار به کاهش مصرف هستیم. شبکه خبری آب ایران. از https://www.wnn.wrm.ir/cs/NewsCrawler/559/75141

داوری, کامران؛ درخشان، هاشم. (۱۳۹۷). *مدیریت پایای آب زیرزمینی: بازخوانی تجربه کالیفرنیا؛ به ضمیمه گزارش فرآیند تدبیر آب مشهد*. مشهد: انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. از https://www.jdmpress.com/books/ شابک: ۹۷۸۹۶۴۳۲۴۴۰۴۰.

داوری، کامران؛ اسلامی، امیر؛ عمرانیان خراسانی، حمید؛ درخشان، هاشم؛ سالاریان، محمد. (۱۴۰۳). مدیریت آب؛ منابع و کاربردها. مشهد: انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. از *https://www.jdmpress.com/books/* شابک : ۹۷۸۹۶۴۳۲۴۵۳۲۰.

درخشان، هاشم؛ داوری، کامران؛ مساعدی، ابوالفضل. (۱۴۰۲). مروری بر سیر بازاندیشی در تجدیدپذیری آب زیرزمینی. *تحقیقات منابع آب ایران*. از https://www.iwrr.ir/article_176453_en.html

درخشان، هاشم. (۱۴۰۲). یادداشت تحلیلی: تحلیل تحول سیستم مدیریت آب بر مبنای نظریه دانینگ-کروگر. آب و توسعه پایدار. از *https://jwsd.um.ac.ir/article_45055.html*

رحمتی، سعید؛ سعادت، سعید؛ پورسلطانیف، مهدی رضا. (۱۴۰۲). اثرات بهره‌برداری آبخوان‌ها بر کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نیشابور). *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*. از https://journals.basu.ac.ir/article_4812.html

رفیعی راد، احمد؛ محمدی، احمد. (۱۳۹۶). مکتب نوسازی متقدم و ریشه های تاریخی بحران منابع آب های زیرزمینی در ایران: بررسی تأثیر و عملکرد اصل چهار ترومن. *فصلنامه علوم اجتماعی. دانشگاه علامه طباطبائی*، ۲۴(۷۷)، ۱۹۵–۲۴۳.

زندپارسا، شاهرخ؛ دیداری، شهره؛ سپاسخواه، علیرضا. (۱۴۰۲). کاهش تدریجی مصرف آب کشاورزی گامی مؤثر در سازگاری با کمبود آب در ایران. *مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۹(۱)، ۱۹–۳۴.

سامانی، سعیده. (۱۳۹۹) ارائه الگوهای جهانی مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی جهت بهبود طرح احیا و تعادل بخشی در کشور. *تحقیقات منابع آب ایران*. از *https://www.iwrr.ir/article_113127.html*

فخرمحمدی، امین. (۱۴۰۱) *تقویت مدیریت محلی آب در استان های خراسان و سمنان*، پایان نامه ارشد، دانشگاه سمنان.

فرهادی، مهدی. (۱۳۹۲) فرهنگ یاری در آبیاری، *نشریه جهاد*، ۳(۶۳).

میرنظامی، سید جلال. (۱۴۰۲) تعادل بخشی آب زیرزمینی، از وعده تا واقعیت. *اندیشکده تدبیر آب ایران*. از *http://iwpri.ir/home/single/815*

Alley, W. M., Clark, B. R., Ely, D. M., & Faunt, C. C. (2018). Groundwater Development Stress: Global-Scale Indices Compared to Regional Modeling. *Groundwater*, *56*(2), 266–275. https://doi.org/10.1111/gwat.12578

Custodio, E., Albiac, J., Cermerón, M., Hernández, M., Llamas, M. R., & Sahuquillo, A. (2017). Groundwater mining: benefits, problems and consequences in Spain. *Sustainable Water Resources Management*, *3*(3), 213–226. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0099-2

Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Bierkens, M. F. P., Ferguson, G., & Taylor, R. G. (2023). Defining renewable groundwater use and its relevance to sustainable groundwater management. *Journal of Hydrology*, *59*(9), e2022WR032831. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124871

Ferguson, G., Cuthbert, M. O., Befus, K., Gleeson, T., & McIntosh, J. C. (2020). Rethinking groundwater age. *Nature Geoscience*, *13*(9), 592–594.

Gleeson, T., Alley, W.M., Allen, D.M., Sophocleous, M.A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Groundwater. Wiley Online Library*, 50(1), 19–26.

Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. & Perrone, D. (2020) Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251. Annual Reviews 48:431–463. Available at: https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-071719-055251

Hanson, R. T. (2015). Hydrologic framework of the Santa Clara Valley, California. *Geosphere*, *11*(3), 606–637. https://doi.org/10.1130/GES01104.1

Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. *Science*, *162*(3859), 1243–1248.

Hilborn, R., Walters, C. J., & Ludwig, D. (1995). Sustainable exploitation of renewable resources. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 45–67.

Huggins, X., Gleeson, T., Castilla-Rho, J., Holley, C., Re, V., & Famiglietti, J. S. (2022). *Groundwater in complex adaptive social-ecological systems*.

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, *625*(7996), 715–721.

Kolahi, M., Davary, K. & Omranian Khorasani, H. (2024). Integrated approach to water resource management in Mashhad Plain, Iran: actor analysis, cognitive mapping, and roadmap development. *Sci Rep* 14, 162. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50697-x

Konikow, L. F., & Leake, S. A. (2014). Depletion and capture: revisiting "the source of water derived from wells." *Groundwater*, *52*(S1), 100–111.

Lopez-Gunn, E., MR Llamas, A Garrido, & D Sanz. (2011). Groundwater Management. *Treatise on Water Science*, *1–4*, 1–732. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00010-5

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

Molle, F., Alvar, C., & Waleed, A.-Z. (2017). Governing groundwater in the Middle East and North Africa region. In *Advances in groundwater governance* (pp. 527–553). CRC Press.

Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(25), e2024221118.

Ostrom, E. (1990). Governing the commons: the evolution of institutions for collective action. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, *32*(2). https://doi.org/10.2307/3146384

Richard G, T., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., & Edmunds, M. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, *3*(4), 322–329.

Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Ruiz-Ortiz, V., & Sánchez-Bellón, Á. (2020). Towards a sustainable and adaptive groundwater management: Lessons from the Benalup Aquifer (Southern Spain). *Sustainability*, *12*(12), 5215.

Winter, T. C. (1998). *Ground water and surface water: a single resource* (Vol. 1139). Diane Publishing.

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(2):147-162 (2024)

Auditing and Recommending Remedial Solutions of Groundwater Management in Iran

Derakhshan, H., Davary, K. [1] and Mosaedi, A.[2]

The development of groundwater withdrawal, after receiving the pumping technology, triggered to depletion of watertables levels in many regions of the world. After that, many researches and studies in the fields of hydrology, management and governance of groundwater, have been conducted in order to accurately understand the concept of groundwater renewability and therefore determine the appropriate amount of withdrawal from these resources. Unfortunately, in Iran serious attention has not been given to the results of these studies. In this article, firstly, international experiences and findings are briefly reviewed. Then, the management of underground water in Iran, during the last decades, has been analyzed. At the end, some remedial solutions have been suggested.

Keywords: Capture, Groundwater management, Renewabity of groundwater, The law of just distribution of water.

1. Corresponding author, Email: k.davary@ferdowsi.um.ac.ir
2. Ph.D. Student and Professors of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, respectively.