هیدروژئولوژی، سال هشتم، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۲
Hydrogeology, Volume 8, No. 2, Winter 2024

راه‌کارهای پیشنهادی مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سطح ملی

علاهن شیخ زاده[۱]، محمد نخعی*[۲] و علی احمدی[۳]

۱- دانشجوی دوره دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.
۲- استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین ، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.
۳- دانشجوی دوره دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.
* نویسنده مسئول: nakhaei@khu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵

چکیده

آب زیرزمینی یک منبع حیاتی برای تأمین نیازهای آبی می‌باشد. در سال‌های اخیر هم‌گام با افزایش رشد جمعیت و تقاضا برای آب، تغییر اقلیم و خشک‌سالی‌های ناشی از آن، منجر به برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و کاهش کمی و کیفی این منبع ارزشمند در سطح جهانی شده است. با درک رو به رشد وابستگی متقابل آب و توسعه، مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سطح ملی برای مقابله با تهدیدهایی هم‌چون کمبود آب، غذا، انرژی، از بین رفتن اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی و از همه مهم‌تر کاهش امنیت انسانی امری ضروری می‌باشد. لذا با توجه به بحران آبی کشور، در این تحقیق با الگوبرداری و استفاده از تجارب موفق کشورهای پیش‌گام در زمینه مدیریت پایدار آب زیرزمینی هم‌چون هند و آمریکا (ایالات آریزونا و کالیفرنیا) به دلیل داشتن وضعیت بحرانی آب زیرزمینی و شرایط اقلیمی مشابه با ایران، راه‌کارهای پیشنهادی جهت بهبود وضعیت مدیریت فعلی کشور ارائه شده است. بنابراین به منظور مدیریت پایدار آب زیرزمینی، نیازمند شناخت مسائل و مشکلات ایجاد شده در این زمینه بوده و این امر با رسم چرخ درهم‌تنیدگی سیستم پویا و پیچیده آب زیرزمینی به صورت یک رویکرد مشارکتی میان بهره‌برداران، مدیران، متخصصان و کارشناسان فنی، قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران و مردم محلی، حاصل می‌شود. چنین شناختی مستلزم تفکر شبکه‌ای و در نظر گرفتن کلیه روابط بین اجزای زیرسیستم‌های آبی (طبیعی، فنی، فرهنگی-اجتماعی، اقتصادی و حقوقی) می‌باشد و سپس اشتراک‌گذاری داده‌های شفاف و قابل اعتماد، ظرفیت‌سازی و ایجاد بستری برای همکاری بیش‌تر نهادهای مربوطه، وضع قوانین و اقدام و عملی‌سازی توسط سازمان‌های درگیر می‌باشد.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، اکوسیستم، تفکر شبکه‌ای، مدیریت پایدار.

مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین برای استفاده‌های گوناگون می‌باشد که از نیم‌قرن گذشته تاکنون به یک منبع مهم و حیاتی برای تأمین نیازهای مختلف آبی مبدل شده است. امروزه بیش‌تر از نیمی از جمعیت دنیا به آب زیرزمینی برای رفع نیازهای ابتدایی خود وابسته هستند (UN, 2003). حجم کل آب زیرزمینی شیرین ذخیره شده در کره زمین، بین ۸ و ۱۰ میلیون کیلومترمربع، یا ۹۶ درصد آب شیرین منجمد نشده است. آب زیرزمینی نزدیک به ۵۰ درصد کل نیاز آب شرب جهان

و ۴۳ درصد کل استفاده مصرفی آب را برای آبیاری در کشاورزی تأمین می‌کند. برآورد می‌شود ۲/۵ میلیارد نفر در جهان برای تأمین آب شرب، تنها به آب زیرزمینی متکی هستند (Smith et al., 2016). در کشور ایران سهم منابع سطحی و زیرزمینی در تأمین آب موردنیاز کشور به ترتیب ۴۵ درصد و ۵۵ درصد است. ۹۸ میلیارد مترمکعب، متوسط سالانه توزیع آب بین مصرف‌کنندگان آن در بخش‌های صنعت (۲/۵ درصد)، شرب و بهداشت (۸/۵ درصد) و کشاورزی (۸۹ درصد) می‌باشد. ۱۷ استان برای تأمین آب موردنیاز خود بیش از ۶۰ درصد به آب زیرزمینی وابسته می‌باشند این درحالی است که، این وابستگی در ۸ استان خراسان رضوی، خراسان جنوبی، کرمان، فارس، یزد، هرمزگان، البرز و همدان بیش از ۸۰ درصد بوده است. در شرایط فعلی سفره‌های آب زیرزمینی در کشور، ۰/۴ متر در سال افت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهند و کسری سالانه آب زیرزمینی، ۵ میلیارد مترمکعب است. از میان ۶۰۹ محدوده مطالعاتی آب زیرزمینی کشور تا سال ۱۴۰۰، ۴۶۸ محدوده، ممنوعه اعلام شده است (فاضلی فارسانی، ۱۳۹۹).

افزایش جمعیت که در پی آن باعث افزایش در میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی شده وضعیت این منابع را روز به روز نامناسب‌تر نموده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹). ازدیاد جمعیت، محدودیت منابع آب، خاک و سایر عوامل طبیعی نیز، تأمین منابع غذایی انسان‌ها را به جدی‌ترین و مهم‌ترین چالش بشری مبدل کرده است (میرزایی ارجنگی و همکاران، ۱۴۰۰). تغییرات در موجودی و کیفیت آب زیرزمینی بر سلامت انسان، امرار معاش، امنیت غذایی و توسعه اقتصادی کشورها تأثیر می‌گذارد. بسیاری از اکوسیستم‌های آبی و تنوع زیستی آن‌ها به آب زیرزمینی وابسته هستند. برداشت جهانی آب زیرزمینی در ۵۰ سال اخیر، دست کم سه برابر شده است. ترازهای آب زیرزمینی به شکل قابل ملاحظه‌ای در آبخوان‌های اصلی اُفت کرده است. بیش‌بهره‌برداری و آلوده‌شدن آب زیرزمینی، منابع آب شرب هزاران میلیون انسان را تهدید می‌کند. ناکامی در مدیریت پایدار آب زیرزمینی، منافع عظیمی را که برای رفاه انسان دارد، توسعه پایدار و حفظ تنوع زیستی را به خطر می‌اندازد. (Smith et al., 2016).

مدیریت آب به‌طور گسترده به‌عنوان فرایند کنترل تأمین، تخصیص، مصرف و کیفیت آب تعریف می‌شود. مدیریت آب شامل حکمرانی و سیاست آب است. حکمرانی آب شیوه‌ای است که در آن آب اداره شده و شامل چارچوب قانونی، سیاسی، اجتماعی و اداری و نهادهایی است که در محل، آب را مدیریت می‌کنند. اصطلاح "سیاست" به مفهوم آموزه یا اصل تصویب یا پیشنهاد شده توسط دولت، حزب، کسب‌وکار و یا فرد تعریف می‌گردد (Mckean, 2005). مسائل مدیریت، حکمرانی و سیاست آب درهم تنیده‌اند و حکمرانی آب درنهایت تصمیم‌گیری در سیاست است (مهدوی و حسینی، ۱۳۹۷).

در کشور ایران الگوی مدیریتی بر اساس تفکر تقلیل‌گرایی[1] انجام می‌گیرد. تفکر تقلیل‌گرایی جزئی‌نگر بوده و به روابط بین اجزاء توجه نمی‌شود و درواقع این روابط را نمی‌بینند. در مورد مسائل آبی روابطی بین تمام بازیگران در حیطه آب وجود دارد که هر کدام به نوبه‌ی خود نقش ایفا می‌کنند. بازیگران در حیطه آب شامل دادگستری، امام جمعه، فرماندار، مدیر کل معادن، مدیر کل آب منطقه‌ای، مدیر کل جهاد کشاورزی، کشاورزان و افراد محلی و همه ذی‌مدخلان (ذی‌نفعان و ذی‌ضرران) است. برای دیدن روابط بین تمامی اجزاء باید تفکر کل‌گرایی[2] حاکم شود که لازمه آن تهیه نقشه پیچیدگی راه است. برای رسیدن به وضعیت مطلوب و توسعه پایدار بایستی مدیریت یکپارچه منابع آب حاصل شود که با مدیریت مشارکتی و تفکر شبکه‌ای[3] و دیدن تمامی روابط بین اجزاء و شناخت کامل آن‌ها این امر محقق می‌گردد. با توجه به این مسائل، شناخت و مدیریت منابع آب زیرزمینی در سطح ملی به منظور استفاده عادلانه و پایدار (تأمین آب شرب،

[1] Reductionism
[2] Holism
[3] Network thinking

توسعه انرژی، امنیت غذایی و انسانی، حفظ تنوع زیستی و بقای اکوسیستم‌ها) امری ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق با توجه به اهمیت مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سطوح مختلف محلی و ملی به مطالعه الگوهای موفق و پیش‌گام جهانی (هند، آریزونا و کالیفرنیا) در زمینه مدیریت این منبع ارزشمند در سطح ملی پرداخته شده است. مطالعه طرح‌های مدیریتی هند، ایالت‌های آریزونا و کالیفرنیا به دلیل وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی، وجود شرایط آب و هوایی و هیدروژئولوژیکی مشابه با شرایط و وضعیت ایران و هم‌چنین استفاده از طرح‌های مدیریت موفق آن‌ها می‌باشد. بنابراین ابتدا به اهمیت مدیریت آب زیرزمینی و هم‌چنین اهمیت مدیریت پایدار آب زیرزمینی در حفظ اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی اشاره می‌شود. در ادامه به وضعیت کلی منابع آب و طرح‌های مدیریتی موفق در هند، ایالات آریزونا و کالیفرنیا و هم‌چنین روش‌های مدیریتی برای حفظ اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مانند آریزونا و کالیفرنیا) اشاره شده است. سپس با به کار گرفتن تجارب ارزشمند این کشورها و هم‌چنین استفاده از روش‌های الگوبرداری از طرح‌های مدیریت پایدار آن‌ها، وضعیت آب زیرزمینی ایران بررسی و پیشنهاداتی برای مدیریت بهتر و کارآمدتر آن ارائه شده است. در این مقاله روش‌های تحلیلی- توصیفی و تطبیقی به کار گرفته شده است. اطلاعات موجود در این تحقیق، برگرفته از مطالعات اسنادی اعم از کتب، مجلات، نشریات داخلی و خارجی، ارقام خام آماری، جستجوهای اینترنتی و اسناد منتشر شده در زمینه مطالعه حاضر می‌باشد.

اهمیت مدیریت آب زیرزمینی

آب زیرسطحی و آب زیرزمینی، آب شیرینی است که در فضای منافذ خاک، سنگ‌ها و هم‌چنین در زیر سطح ایستابی جریان دارد. تخمین زده شده است که، از حدود ۷۹۰ میلیارد مترمکعب آبی که به خاک نفوذ می‌کند، حدود ۴۳۰ میلیارد مترمکعب در لایه‌های بالایی خاک باقی می‌ماند و رطوبت خاک را تولید کرده که برای رشد پوشش گیاهی ضروری است. ۳۶۰ میلیارد مترمکعب باقی‌مانده به داخل لایه‌های متخلخل نفوذ می‌کند و نشان‌دهنده تغذیه واقعی آب‌های زیرزمینی است. آب قابل استحصال اقتصادی تنها حدود ۲۵۵ میلیارد مترمکعب است (Menon, 2007). بدین‌ترتیب مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، نقش مهمی در توسعه کلی کشورها را ایفا می‌کند. آب زیرزمینی منبع اصلی آب برای شرب و آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. این منبع منحصر به فرد و در دسترس، تأمین‌کننده امنیت در برابر خشک‌سالی و در عین حال ارتباط نزدیکی با منابع آب سطحی و چرخه هیدرولوژیکی دارد. ذخیره قابل اطمینان، کیفیت و دمای یکنواخت، بدون کدورت نسبی و آلودگی بودن، حداقل تلفات تبخیر و هزینه کم توسعه، از ویژگی‌هایی است که آب‌های زیرزمینی را در مقابل سایر منابع، منحصر به فرد می‌کند. با این حال، رشد جمعیت و اقتصاد منجر به تقاضای روزافزون برای منابع آب زیرزمینی در بسیاری از کشورها شده است. در حال حاضر اثرات قابل توجهی به دلیل پمپاژ آب زیرزمینی که به اندازه کافی تنظیم نشده است و یا آلودگی ناشی از مدیریت ناکافی، وجود دارد. به ویژه در کشورهای در حال توسعه، این روندها می‌تواند منجر به هزینه‌های اجتماعی-اقتصادی بزرگ، اغلب برای فقرا شود. با رشد سریع جمعیت، شهرنشینی، صنعتی‌شدن و رقابت برای توسعه اقتصادی، منابع آب زیرزمینی در برابر کاهش، آسیب‌پذیر شده است. مدیریت این منبع ارزشمند بر اساس قابلیت دسترسی و قابلیت استفاده از نظر کمی و کیفی به دلیل عدم تعادل بین تقاضا و در دسترس بودن، رویکردهای مدیریتی با معضلات مختلفی روبرو هستند. به دلیل ماهیت پنهان و غیرقابل رؤیت آب‌های زیرزمینی اغلب درک صحیحی از آن وجود نداشته است. در سال‌های اخیر بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی باعث کاهش آن در سراسر جهان شده است. این کاهش به حدی است که بازگرداندن سطح آب عملاً غیر ممکن است؛ اگر چه امکان تغذیه مجدد آب از مناطق دیگر وجود دارد، ولی این روند بسیار کند می‌باشد. علاوه بر آن،

مشکلات زیست‌محیطی مانند نفوذ آب شور و کاهش جریان پایه نیز از دیگر پیامدهای کاهش سطح آب زیرزمینی می‌باشد. از این‌رو مدیریت پایدار آب زیرزمینی به یکی از مسائل مهم در سال‌های اخیر تبدیل شده است (Menon, 2007).

اهمیت مدیریت پایدار آب زیرزمینی در حفظ اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی

آب‌های زیرزمینی نه تنها برای جوامع انسانی بلکه برای بسیاری از مناطق خشکی و ساحلی، اکوسیستم‌ها و گونه‌های آبی منبع حیاتی هستند (Saito et al., 2021). آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک با منابع آب سطحی محدود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آب زیرزمینی تقریباً در همه جا زیر سطح زمین وجود دارد (Aley et al., 1999)، اما برخلاف آب‌های سطحی، جریان آب‌های زیرزمینی و ارتباط آن اغلب به راحتی اندازه‌گیری و شناسایی نمی‌شوند. قوانین، مقررات و سیاست‌های آب زیرزمینی در بسیاری از حوزه‌های قضایی در سراسر ایالات متحده و در سطح جهان وجود دارد (Nelson and Ouevauville, 2016)، اما حتی در جایی که وجود دارند، به ندرت در نظر گرفته می‌شوند و به کاربران فعلی و آینده برای اجتناب از تأثیرات بر سیستم‌های طبیعی نیاز دارند (Megdal et al., 2015; Rohde et al., 2017). دسترسی به آب‌های زیرزمینی برای زنده ماندن بسیاری از اکوسیستم‌های خشکی، ساحلی و آبی و گونه‌های گیاهی و حیات وحش، ضروری است (Naumbur et al., 2005; Kath et al., 2018). نهرها، تالاب‌ها، چشم‌ها، تراوشات طبیعی، بوته‌زارها و جنگل‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی، به طور فزاینده‌ای توسط تأثیرات تجمعی برداشت‌های گذشته و فعلی آب‌های زیرزمینی تهدید می‌شوند (Rohde et al., 2019). تأخیر پاسخ آبخوان به برداشت گذشته از آب‌های زیرزمینی، استفاده‌های مداوم و کاربران جدید آب، تنوع در نرخ تغذیه از جمله به دلیل تغییر اقلیم، همگی می‌تواند منجر به کمبود ذخیره آب اکوسیستم‌ها شود (Aley et al., 1999; Reilly et al., 2008; Gleeson et al., 2012). سیستم‌های طبیعی تخریب شده می‌تواند به طرق مختلف از جمله از دست دادن خدمات مهم اکوسیستم، بر جوامع انسانی تأثیر منفی بگذارد (McCarl et al., 1999; Gungle et al., 2016). نیازهای آبی محیطی در برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت منابع آب زیرزمینی و پروژه‌ها، سابقه بی‌توجهی داشته است که این امر تا حدی به دلیل شکاف دانش علمی در مورد وجود اکوسیستم های وابسته به آب زیرزمینی و چگونگی تأثیر دینامیک آب‌های زیرزمینی که بر زنده بودن اکوسیستم‌ها دارد. از لحاظ تاریخی، «بازده ایمن» الگوی مورد استفاده مدیریت منابع آب زیرزمینی بوده است که، بر اساس تعادل برداشت انسان با نرخ تغذیه طبیعی می‌باشد (Bredehoeft et al., 1982; Bredehoeft, 2002; Alley and Leake, 2004; Gungle et al., 2016). در مقابل، مفهوم "بازده پایدار" به دنبال ایجاد تعادل نیازهای آبی جوامع طبیعی و انسانی است. Alley et al., (1999) پایداری آب‌های زیرزمینی را به عنوان "توسعه و استفاده از آب‌های زیرزمینی به نحوی که می‌توان برای مدت نامحدود بدون ایجاد پیامدهای زیست-محیطی، اقتصادی یا اجتماعی غیرقابل قبول حفظ کرد"، تعریف می‌کنند. دستیابی به پایداری آب‌های زیرزمینی نیاز به پرداختن به پویایی زمانی و مکانی سیستم آب‌های زیرزمینی، برداشت آب-های زیرزمینی و پیامدهای مرتبط از جمله تأثیرات آن بر سیستم‌های طبیعی دارد (Alley et al., 1999; Rudestam and Langridge, 2014). مدیریت پایدار آب زیرزمینی، کلید حفظ اکوسیستم‌های وابسته در محدوده‌ی تخلیه آب زیرزمینی است. نمونه‌های آن عبارتند از رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، جنگل‌های مرطوب و جنگل‌های ریشه‌دار عمیق ساوانا می‌باشند. تالاب‌ها، باتلاق‌ها و زمین‌های باتلاقی در تورب‌زارها به آب زیرزمینی وابسته هستند و اکوسیستم‌های ساحلی مانند تالاب‌های شور و جنگل‌های حرا ممکن است به جریان ورودی آب شیرین از آب زیرزمینی متکی باشند. تغییرات در آب زیرزمینی، کمیت یا کیفیت تخلیه آب زیرزمینی، پیشران تنزل و نابودی تنوع زیستی در این اکوسیستم‌ها به شمار می‌آید. مدیریت پایدار آب زیرزمینی، بخش مهمی از استراتژی‌های اثربخش را برای حفظ تنوع زیستی در جاهایی که اکوسیستم‌ها به آب زیرزمینی وابسته هستند، تشکیل می‌دهد. اکوسیستم‌ها در محدوده‌ی تغذیه آب

زیرزمینی نیز اهمیت دارند. تغییرات در پوشش گیاهی در مراتع و جنگل‌ها یا کم شدن تالاب‌ها می‌تواند مقدار آب ورودی به آبخوان را کاهش دهد. در محدوده‌های تغذیه آب زیرزمینی، مدیریت خوب اکوسیستم‌ها برای مدیریت پایدار آب زیرزمینی ضروری است. بنابراین ارتباط میان آب زیرزمینی و اکوسیستم‌ها دوسویه است و مدیریت آب زیرزمینی و مدیریت اکوسیستم هم-پوشانی دارند. عملکرد هماهنگ این دو، تداوم خدمات اکوسیستمی آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی را تقویت می‌کند (Smith et al., 2016).

بررسی وضعیت منابع آب، قوانین و طرح‌های موفق مدیریت پایدار آب زیرزمینی در کشورهای هند و آمریکا (ایالات آریزونا و کالیفرنیا)

وضعیت منابع آب زیرزمینی در هند

کشور هند حدود ۱۶ درصد از جمعیت دنیا را به خود اختصاص داده و مساحت این کشور حدود ۲/۴۵ درصد از مساحت کل دنیا است. همچنین ۴ درصد از آب شیرین دنیا در این کشور قرار دارد. آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی را در امنیت غذایی، دسترسی به آب و رشد اقتصادی بیش از ۱/۳ میلیارد نفر در هند ایفا می‌کند. علی‌رغم توسعه طرح‌های آبیاری مبتنی بر آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی آبیاری در بخش‌های وسیعی از این کشور هستند. انقلاب سبز در دهه ۱۹۷۰ کمک قابل توجهی به افزایش تولید مواد غذایی در هند از طریق توسعه آبیاری مبتنی بر آب‌های زیرزمینی نمود ولی با افزایش پمپاژ آب زیرزمینی باعث افت و کاهش این منابع گردیده است (Dangar et al., 2021). همان‌طور که قبلاً ذکر شد، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب کشاورزی در هند هستند و در حال حاضر حدود ۸۰ درصد از آب کشاورزی در این کشور از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب شرب (۶۰ درصد) نیز دارای اهمیت هستند، به طوری که تقریباً ۹۰ درصد از آب شرب مناطق روستایی از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود (Kulkarni and Shankar, 2010; Jha and Sinha, 2009; Ghose et al., 2018; Sarkar et al., 2020; Kumari and Rai, 2020).

مدیریت آب زیرزمینی در هند

آب زیرزمینی و استفاده از آن برای کشاورزی در کشور هند از اهمیت زیادی برخوردار است. متاسفانه بررسی دقیقی از منابع آب زیرزمینی وجود ندارد. با معرفی استراتژی جدید کشاورزی در اوایل دهه ۱۹۶۰، استفاده از آب چاه‌ها افزایش یافت. اگرچه در سال ۱۹۶۰، تنها یک درصد از زمین آبیاری بوسیله آب چاه می‌شد، تا سال ۱۹۸۸ حدود ۲۷ درصد از سطح خالص آبیاری شده از این مزیت برخوردار گردید. در سال ۲۰۰۱، تقاضا برای آب در صنعت نیز حدود ۱۵۱ میلیارد لیتر در روز افزایش یافت و برداشت از چاه‌های عمیق برای دریافت آب بیش‌تر، منجر به پایین رفتن سطح آب شده است. در هند، داده‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی به طور گسترده منتشر یا در خارج از سازمان‌های دولتی در دسترس قرار نمی‌گیرند و برآوردهای میزان بهره‌برداری و تغذیه مجدد نیز قابل اعتماد نیستند. در نتیجه، بحث در مورد کاهش آب‌های زیرزمینی همیشه بر اساس داده-های غیر واقعی است. افت سطح آب زیرزمینی منجر به ایجاد پیامدهای جدی اجتماعی-اقتصادی در یک کشور کشاورز، مانند هند می‌شود. رقابت بین کاربران روستایی و شهری در حال افزایش و منجر به درگیری شده است. کشاورزان فقیر مجبورند آبیاری را کنار بگذارند زیرا کاهش سطح آب باعث برداشت از چاه‌های عمیق می‌شود. برداشت از چاه‌های عمیق به برق بیشتری نیاز دارد و در نتیجه منجر به افزایش هزینه‌های اقتصادی (خارج از توان پرداخت کشاورز فقیر) مرتبط با انرژی شده که کاهش توان تولید مواد غذایی را به دنبال دارد. بنابراین نیاز فوری به حفاظت از این منبع حیاتی برای حفظ امنیت زیست‌محیطی و توسعه پایدار کشاورزی وجود دارد. Menon (2007) بیان کرد که برای مدیریت موفق آب زیرزمینی در کشور هند، این کشور نیاز به رویکردی بین‌رشته‌ای و کل‌نگر دارد. مشارکت ذی‌نفعان و تکنوکرات‌ها[4] (از بالا به پایین)، آگاهی از شرایط هیدروژئولوژیکی[5]

[4] Technocracy

[5] Hydrogeoligy

و مسائل زیست‌محیطی خاص محلی، استفاده از روش‌های بومی حفاظت و استفاده از آب، وجود چارچوب سیاستی مؤثر با در نظر گرفتن تمام جنبه‌های چند بعدی مسائل کم‌آبی و بهره‌برداری بیش از حد، وضع قوانین مناسب برای برداشت از آب زیرزمینی، آگاهی از اهمیت تغذیه آب زیرزمینی، استفاده از الگوهای مصرف مناسب، استفاده از فاضلاب تصفیه شده و مشارکت جامعه و آموزش آن‌ها و دولت‌های محلی مواردی هستند که برای توسعه پایدار آب زیرزمینی در هند باید در نظر گرفته شود (Menon, 2007). کشور هند اخیراً تلاش‌های زیادی در زمینه مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی با بهره‌گیری از مدیریت چندوجهی که شامل مدیریت پوشش گیاهی، مدیریت ذخایر آب زیرزمینی، مدیریت مناطق شهری و مدیریت آموزش و بهداشت است، انجام داده است. تغییرات سطح آب زیرزمینی در کشور هند بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ نشان داده است که با اجرای طرح‌های مدیریت پایداری در این کشور ۷۷ درصد از محدوده‌های مطالعاتی هند با افزایش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است، به طوری که ۴۳ درصد از مناطق افزایش کمتر از ۵ متر، ۲۱ درصد افزایش بین ۲ تا ۴ متر و ۱۳ درصد افزایش بیش‌تر از ۴ متر را نشان می‌دهند. در جدول ۱ روش‌های موفق در مدیریت پایدارتر آب زیرزمینی در هند ارائه شده است (سامانی، ۱۳۹۹).

جدول ۱- قوانین و طرح‌های موفق مدیریت پایدار آب زیرزمینی کشور هند.

Table1- successful laws and designs in sustainable groundwater management in India.

India	Lack of a uniform strategy for the sustainable management of water resources due to variable weather conditions, areas with different hydrogeological characteristics and diverse local customs and traditions in this country has caused the management conditions of underground water resources in each region to be defined based on the hydrogeological, hydrological and geographical situations, weather conditions, access to underground water, water exploitation pattern and social and economic structure of that region. Energy tariffs for agricultural and industrial uses and pricing have been increased and applying payment laws and fines have been applied to control harvesting, especially in stressed areas Revival of traditional water harvesting and consumption systems Paying attention to the development and management of the basin and promoting the protection of forests to assist an increase in the groundwater supply Training plans for farmers to create a general understanding of groundwater resources and to participate them in crop planning (the main achievements of this project are the modification of the cropping pattern, the rise of the water level in aquifer, the impressive success in using novel irrigation methods and the return of financial investments and increased economic prosperity because of better financial investments and increased economic prosperity because of better groundwater resources management) (Hamilton, 2012) Changing the management approach from top to bottom, to local management (creating local institutions) Close cooperation of government agencies with local non-governmental organizations, farmers' cooperatives and the development of other local institutions (Hamilton, 2012)

بررسی وضعیت آب زیرزمینی ایالت آریزونا

ایالت آریزونا در جنوب غرب ایالات متحده آمریکا و در ناحیه‌ای با آب‌وهوای گرم و خشک تا نیمه‌خشک واقع شده است (Tillman et al., 2011). میانگین بارندگی سالانه از حدود ۱۰۱۶ میلی‌متر در مناطق کوهستانی در بخش شرقی-مرکزی ایالت، تا تقریباً ۷۲/۶ میلی‌متر در منطقه جنوب غربی، که از یک چشم‌انداز گرم بیابانی تشکیل شده است (با درجه حرارت در تابستان بین ۱۰۵ تا ۱۱۵ درجه) متغیر است (Schwabe et al., 2020). آب‌های زیرزمینی یک منبع آبی مهم در ایالت آریزونا است و حدود ۴۱ درصد از مصرف آب در این ایالت را تشکیل می‌دهد. سابقه پمپاژ آب‌های زیرزمینی در بخش‌هایی از این ایالت منجر به کاهش قابل‌توجه سطح آب‌های زیرزمینی شده است. خشک‌سالی طولانی‌مدت در منطقه نیز منجر به کاهش میزان آب و تغذیه رودخانه کلرادو به آریزونا شده که این امر باعث افزایش پمپاژ آب زیرزمینی در این ایالت گردیده است (Schwabe et al., 2020;

Tillman and Flynn, 2023). بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، به ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی آریزونا، قبل از اجرای طرح‌های مدیریت پایداری، مشکلاتی هم‌چون افزایش هزینه‌های حفاری و پمپاژ، کاهش کیفیت آب را ایجاد کرده بود. در برخی از مناطق کاهش شدید ذخیره آب‌های زیرزمینی (عموماً در مناطق دارای بیش از ۳۰ متر افت سطح ایستابی) موجب فرونشست سطح زمین و ایجاد درز و شکاف در جاده‌ها، پی ساختمان‌ها و دیگر سازه‌های مهندسی نیز شده بود (Jacobs and Holway, 2004; O'Neill et al., 2016; Tillman and Flynn, 2023).

مدیریت پایدار در ایالت آریزونا

مدیریت منابع آب در ایالت آریزونا بیش از ۱۰۰ سال سابقه دارد. قانون مدیریت آب زیرزمینی[6] (GMA) یکی از مهم‌ترین قوانین تاریخ این ایالت است که، در سال ۱۹۸۱ در جلسه ویژه‌ی مجلس قانون‌گذاری توسط آقای بروس بابیت فرماندار وقت آریزونا به تصویب رسید. در آمریکا هیچ ایالت دیگری یک استراتژی بلندمدت مدیریت منابع آب زیرزمینی مانند GMA ندارد که نه تنها از اقتصاد ایالت محافظت می‌کند، بلکه ثبات اقتصادی آینده را نیز تضمین می‌کند. در آریزونا قانون GMA تاکنون مرجع مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است که در سه سطح مدیریت آب (سطح مدیریت عمومی، سطح مدیریتی برای مناطق ممنوعه کشاورزی و مناطق تحت مدیریت شدید) برای پاسخ به شرایط مختلف آب زیرزمینی تنظیم شده است (سامانی، ۱۳۹۹) (جدول ۲). همچنین این قانون برداشت آب‌های زیرزمینی را در چهار منطقه فینیکس[7]، توسان[8]، پرسکات[9]، و پینال کانتی[10] محدود می‌کند (Coeurdray et al., 2017). از جمله اقدامات دیگر صورت گرفته در قالب قانون GMA می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (Jacobs and Holway (2004: حل‌وفصل اختلافات حقوقی در مصرف آب‌های زیرزمینی؛ حمایت از احداث کانالی به طول ۵۳۱ کیلومتر به‌منظور انتقال آب رودخانه کلرادو به مرکز و جنوب آریزونا، تحت عنوان پروژه آریزونای مرکزی[11](CAP)؛ تدوین برنامه‌هایی برای کاهش اضافه برداشت آب‌های زیرزمینی که، منجر به افت شدید سطح ایستابی شده بود؛ تأسیس اداره منابع آب آریزونا و یک دانشکده مرتبط در دانشگاه ایالتی آریزونا بوده است (Tadayon, 2005; Jacobs and Holway, 2004; Coeurdray et al., 2017; Berger et al., 2020; سامانی، ۱۳۹۹).

جدول ۲- قوانین و طرح‌های موفق مدیریت پایدار آب زیرزمینی ایالت آریزونا.

Table 2- successful laws and designs in sustainable groundwater management in Arizona State.

Arizona State	Regulating GMA law (GMA law has regulated Arizona's groundwater management framework) for answering to different groundwater conditions including three water management levels: • General management level: (Includes relatively limited state regulations focused on licensing wells, registering wells, notifying the adequacy of water supply for the development of new residential areas, and prohibiting the transfer of groundwater between most sub-basins at the state level.) • Management level for agricultural prohibited areas: (No new land will be allocated for agricultural production, but there is no restriction on the use of water usage for non-agricultural purposes.) • Intensive management (reduction and elimination of groundwater pumping in certain areas of the state) for areas with a higher crisis (Jacobs and Holway, 2004; Miller, 2000). Other measures taken in the form of GMA law: • Establishing a related faculty at Arizona State University to provide scientific support for the formulation and implementation of Arizona water management policies and laws in various uses and protecting the interests of the Colorado River for the state of Arizona. • Establishment of the Arizona Water Bank Authority (AWBA) in 1996 (water bank: is a private enterprise that leases water from the water rights that have been saved in the bank,

[6] Groundwater Management Act
[7] Phoenix
[8] Tucson
[9] Prescott
[10] Prescott
[11] Central Arizona Project

for the benefit of the depositor. The water bank actually protects groundwater resources through the mechanism of the water market.)

- Assessing and revising the GMA law every 5 years and updating it due to changes in climate and demographic conditions (Samani, 2020)

وضعیت کلی منابع آب در ایالت کالیفرنیا

ایالت کالیفرنیا در جنوب غربی ایالات متحده آمریکا واقع شده است. مساحت این ایالت ۴۲۳۹۷۰ کیلومترمربع (تقریباً یک‌چهارم ایران) است. میزان بارش سالانه در این ایالت از ۳۵۰۰ میلی‌متر در شمال غرب تا کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر در جنوب شرق تغییر می‌کند و به طور میانگین ۶۰۰ میلی‌متر در سال است (سامانی، ۱۳۹۹). این بارش‌ها در نیمه شمالی می‌بارد و در نیمه جنوبی به مصرف می‌رسد. بیلان آبی در ایالت کالیفرنیا در سال‌های پرآبی و کم‌آبی به ترتیب ۴۱۵ و ۱۸۰ میلیارد مترمکعب است (نامور، ۱۳۹۹). آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین منابع آب کالیفرنیا دارند، به طوری که این منابع تقریباً ۴۰ درصد آب مورد استفاده در مزارع و شهرهای کالیفرنیا را تأمین کرده که این مقدار، در دوران خشک‌سالی تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. حدود ۳۰ میلیون نفر از جمعیت کالیفرنیا (۸۵ درصد) برای تأمین آب شرب به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند. محاسبه میزان اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی توسط مرکز هیدرولوژی دانشگاه کالیفرنیا بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بـــه میزان سه میلیارد مترمکعب و سه برابر ایـــن مقدار یعنی ۹ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۲ (یک سال خشک) و سال ۲۰۱۳ (یک سال بحرانی خشک) بوده است (Chappelle et al., 2017; Konikow, 2015). از ۵۱۵ آبخوان این ایالت، ۲۱ آبخوان دارای شرایط بحرانی است. تعیین آبخوان با شرایط بحرانی بر اساس اثرات سوء همچون نشست زمین، نفوذ آب دریا به آبخوان‌های ساحلی، حرکت آب با کیفیت پایین و غیرقابل استفاده کردن بقیه آبخوان، افت سطح آب در شرایط میانگین و بهتر، اثر سوء بر جمعیت ساکن و اثر سوء بر رودخانه‌ها می‌باشد (نامور، ۱۳۹۹). با توجه به اینکه کالیفرنیا بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ با بدترین خشک‌سالی تاریخ روبه‌رو است، در نظر گرفتن راهی برای حفاظت از این منابع با ارزش برای مراقبت از شهرها، محیط‌زیست و کشاورزی ایالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از منابع آب زیرزمینی در کالیفرنیا در حال افزایش است و پیش‌بینی می‌شود که این تقاضا در آینده به دلایلی همچون کاهش منابع آب سطحی تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی و افزایش جمعیت، فزونی یابد (U.S. Census Bureau, 2019). یکی از مناطق پیش‌رو در پیاده‌سازی رویکرد مدیریت پایدار آب زیرزمینی، می‌توان به ایالت کالیفرنیا اشاره نمود. از قوانین مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در کالیفرنیا می‌توان تصویب قانون سیستم حق‌آبه آب‌های سطحی در سال ۱۹۱۴ و تصویب قانون مدیریت پایدار آب زیرزمینی[12] (SGMA) در سال ۲۰۱۴ را نام برد. از خصوصیات قانون SGMA می‌توان مواردی همچون الزام به مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، ترویج کنترل و مدیریت محلی آب‌های زیرزمینی، تأسیس سازمان‌های مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، قدرت قانونی برای اجرای مدیریت پایدار، تهیه برنامه‌های پایداری و زمان‌بندی مشخص برای رسیدن به پایداری را برشمرد. هدف قانون SGMA از بین بردن اثرات نامطلوب استفاده از آب‌های زیرزمینی در طول ۲۰ سال است که این اثرات نامطلوب شامل افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش ذخیره آب‌های زیرزمینی، ورود آب دریا به آبخوان‌های ساحلی، کاهش کیفیت آب، نشست زمین و کاهش کاربرد مفید آب‌های سطحی است (نامور، ۱۳۹۹).

به دلیل داشتن شرایط نسبتاً مشابه (از نظر اقلیمی) ایران با ایالت کالیفرنیا، مبانی عملکرد این ایالت در مدیریت آب زیرزمینی باید

[12] Sustainable Groundwater Management Act

مورد توجه قرار گیرد. در جدول ۳ اقدامات صورت گرفته در زمینه مدیریتی در این ایالت ارائه شده است (سامانی، ۱۳۹۹).

جدول ۳- قوانین و طرح‌های موفق مدیریت پایدار آب زیرزمینی ایالت کالیفرنیا.

Table 3- successful laws and designs in sustainable groundwater management in California State.

California State	• To base the six criteria for the sustainable management of groundwater (severe drop of groundwater, subsidence, decrease in quality of groundwater, decrease in surface waters, advancement of salt water in coastal areas and reduction of strategic reserves) • Applying climate changes, population growth, groundwater level fluctuations and environmental protection goals in management plans and implementation of corrective measures by local trustees • Adaptive, local and collaborative management • Creating a council of stakeholders and using their advisory recommendations in the sustainable management of groundwater • Increasing the age of the infrastructure to manage the supply of water resources because of their role in collection, storage, treatment and delivery • Introducing alternative water sources such as recycled water, desalination of sea water and fog extraction and atmospheric water production as parts of the puzzle of sustainability in the water supply system • Creating drought management plans and having a set of management principles to prevent the severity of water shortage • The implementation of the voluntary reduction water usage program in 2015 with high success (a significant number of water users showed a desire to slightly reduce their rights in exchange for guaranteeing the allocation of existing water resources in the future, which saved about 185 million cubic meters of water) • Passing the open and clear data law in 2016 in order to provide transparency for water markets by requiring the details of water transactions in an accessible database • Requiring the cooperation of different agencies and institutions for projects that need to get permission (the cooperation of these organizations leads to reducing the time and costs of obtaining permission and prevents delays in the implementation of management processes) • Providing information regarding the social norms caused by water shortage especially for local communities (presenting films and animations to depict the problems caused by the instability of water resources in cooperation with radio and television and the Ministry of Education) • Emphasis on the use of traditional environmental knowledge (knowledge gained by indigenous people who have been in close contact with nature for several generations (Samani, 2020)

مدیریت پایدار آب زیرزمینی برای حفاظت از اکوسیستم‌ها در ایالات متحده (کالیفرنیا و آریزونا)

بکارگیری اصول عملکرد پایدار برای حفاظت اکوسیستم به ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک (مانند آریزونا و کالیفرنیا) به چند دلیل چالش برانگیز است:

الف- سیستم‌های آب زیرزمینی از نظر مکانی و زمانی پیچیده هستند و منجر به عدم قطعیت قابل توجه دینامیک جریان آب-های زیرزمینی می‌شود (Reilly et al., 2008). ماهیت آب‌های زیرزمینی حرکت، پویایی و تعامل با سیستم‌های طبیعی می‌توانند اثراتی را به همراه داشته باشند که سال‌ها، دهه‌ها یا قرن‌ها طول بکشد تا دیده شوند (Eamus et al., 2006; Barlow and Leake, 2012). برخی از اثرات، مانند فرونشست زمین یا انقراض گونه‌ها ممکن است برگشت‌پذیر نباشد (Konikow, 2015; Wolaver et al., 2020).

ب- اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی مرتبط با گونه-های بومی و حساس، اغلب با تاب‌آوری[13] کم در برابر تأثیرات هستند (Sada et al., 2005; Kodric-Brown and Brown, 2007; Freed et al., 2019; Wolaver et al., 2020). در مناطق خشک به ویژه چنین گونه‌هایی ممکن است تنها در چند مکان یافت می‌شود (Wolaver et al., 2020). پمپاژ حتی مقادیر کم، ممکن است باعث خشک شدن چشمه‌ها شود که می‌تواند گونه-های دارای نیاز آبی دائمی را از بین ببرد (Sada et al., 2005; Stevens et al., 2022; Wolaver et al., 2020).

ج- تعداد کمی از مکان‌ها دارای تجربیات کافی در دسترس با مجموعه داده‌هایی به اندازه کافی که با آن‌ها بتوان، سیستم آب زیرزمینی و سیستم‌های طبیعی مرتبط را مشخص کرد، وجود دارند. پالایش و کالیبراسیون مدل‌های عددی آب زیرزمینی به داده‌هایی در مورد توزیع مکانی و زمانی تغذیه، گرادیان بار هیدرولیکی، تعامل بین آبخوان و آب‌های سطحی، هیدروژئولوژی و نرخ تبخیر و تعرق نیاز دارند (Pool and Dickinson, 2007). کمبود داده به عدم قطعیت پارامتر مدل مرتبط با دینامیک جریان آب زیرزمینی کمک می‌کند (Reilly et al., 2008). پویایی اکولوژیکی حتی می‌تواند عدم قطعیت پارامتر بیش‌تری به دلیل دانش محدود فرآیندهای اکولوژیکی داشته باشد که، توسعه مدل‌های دقیق را بیش‌تر به چالش می‌کشد (Kath et al., 2018).

د- در نهایت، حمایت ذی‌نفعان و نهادی برای اجرای موفقیت‌آمیز اصول پایداری آب‌های زیرزمینی نیاز به زمان، بودجه و تلاش قابل توجهی دارد. مدت زمان طولانی و عدم قطعیت بالا مرتبط با مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، یعنی ظرفیت نهادی و تعهد برای اطمینان از موفقیت حفاظت از سیستم‌های طبیعی، باید پایدار باشد (Richteret al., 2014; Thomann et al., 2020). هزینه‌های نصب و حفظ زیرساخت و ظرفیت فنی مورد نیاز برای جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی گسترده است، ممکن است مقرون به صرفه در نظر گرفته شوند و احتمالاً تضمین در طولانی مدت، دشوار خواهند بود؛ به‌خصوص اگر بسیاری از ذی‌نفعان با دیدگاه‌های مختلف درگیر هستند (Gregory et al., 2006).

نیاز به راهنمایی برای محافظت اکوسیستم‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک

در غرب خشک ایالات متحده، استفاده از آب‌های زیرزمینی گسترده و رو به افزایش است (Perrone and Jasechko, 2017). به عنوان مثال، برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری در کالیفرنیا از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵، ۶۰ درصد افزایش یافته و یک دوره خشک‌سالی طولانی، برداشت آب‌های سطحی برای میزان آبیاری در مدت مشابه را ۶۴ درصد کاهش داده است (Dieter et al., 2018). تا حدی در پاسخ به این خشک‌سالی، ایالت کالیفرنیا قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در سال ۲۰۱۴ را تصویب کرد، که مستلزم آن تأثیرات به اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته شود و در طرح‌های پایداری آب‌های زیرزمینی گزارش شده است (Rohde et al., 2017). با این حال، چارچوب‌های قانونی برای برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده از آب های زیرزمینی ایالت‌های ایالات متحده و حتی بین مناطق درون یک ایالت واحد، بسیار متفاوت است (Nelson and Ouevauviller, 2016).

قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا فقط در برخی از حوضه‌های آب زیرزمینی ایالت اعمال می‌شود (Parker et al., 2021). پروژه‌های بزرگ توسعه آب‌های زیرزمینی نیز پیشنهاد شده است: به عنوان مثال، پروژه توسعه آب‌های زیرزمینی سازمان آب نوادای جنوبی (Deacon et al., 2007) و پروژه حفاظت، بازیابی و ذخیره‌سازی کادیز[14] (Sizek, 2018; Zdon et al., 2018). با وجود این حجم زیاد پروژه‌ها، حتی عدم دقت‌های کوچک در برآورد دینامیک آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به خطا در پیش‌بینی‌های مدل آب زیرزمینی شود که می‌توانند منجر به تأثیر بزرگ و حتی فاجعه‌بار بر سیستم‌های طبیعی

[13] Resilient

[14] Cadiz

شوند. با توجه به حساسیت سیستم‌های طبیعی به در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی به ویژه در مناطق خشک (Davis et al., 2017)، Pattenet al., (2008) و تنوع در میان چارچوب‌های نظارتی (Nelson and Ouevauviller, 2016)، برای برنامه‌ریزی، مدیریت و نظارت، به راهنمایی نیاز است و چارچوب مبتنی بر اصول عملکرد پایدار با توجه به اکوسیستم‌ها و گونه‌های وابسته و حساس به دینامیک آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک نیاز به مطالعه بیش‌تری دارد.

حداقل مقررات برای حفاظت از سیستم‌های طبیعی و نگه‌داری پایدار آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک (ایالات کالیفرنیا و آریزونا)

هفت شرط برای مدیریت حوضه یا برنامه‌ریزی پروژه برای کاهش خطر اثرات نامطلوب در مناطق و خشک و نیمه‌خشک لازم است که عبارتند از: (۱) تعریف ویژه اهداف مدیریت آب زیرزمینی و آستانه‌ها برای جوامع انسانی و طبیعی موجود در یک حوضه یا آبخوان معین؛ (۲) تعریف واضح محرک‌ها (مثلا تغییر اقلیم) برای اقدامات مدیریتی که مبتنی بر علم هستند و از سیستم‌های طبیعی محافظت می‌کند؛ (۳) استفاده از مدل‌های پیش‌بینی برای ارزیابی عملکرد نسبی گزینه‌های مدیریتی مختلف و جایگزین‌های کاهش‌دهنده، شناسایی شبکه‌های نظارت و مکان‌های آن‌ها و تعیین آستانه‌هایی برای اثرات نامطلوب و محرک‌ها برای جلوگیری از تأثیرات قبل از وقوع؛ (۴) اجرای یک طرح پایش قوی در مقیاس زمانی و مکانی مناسب؛ (۵) ارائه در دسترس و به موقع گزارش داده‌ها و نتایج مدل؛ (۶) اجرای اقدامات مدیریتی برای جلوگیری، به حداقل رساندن و کاهش اثرات در یک شیوه به موقع و (۷) تأمین بودجه و ظرفیت کافی برای برنامه‌ریزی، مدل‌سازی، مدیریت و نظارت بر انجام استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی از نظر جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی (Saito et al., 2021). این قوانین بر روی اصل احتیاط، که در آن تصمیم‌گیرنده باید خطر آسیب جبران‌ناپذیر را به عنوان یک واقعیت در نظر بگیرد (Slattery, 2016) و در برابر این ضرر محافظت کند، حتی اگر علم موجود قطعی نباشد، تطبیق می‌یابد (Crawford-Brown and Crawford-Brown, 2011). اگرچه این قوانین برای حفاظت از سیستم‌های طبیعی و نگهداری پایدار آب زیرزمینی و کاهش اثرات نامطلوب (مانند بیش‌بهره‌برداری) در مناطق خشک و نیمه‌خشک همانند ایالات آریزونا و کالیفرنیا (آمریکا) بررسی و عنوان شده‌اند، اما برای هر اقلیم مشابه دیگری در سراسر جهان هم‌چون ایران نیز قابل تعمیم می‌باشد. لذا به کارگیری و توجه به این قوانین و شروط در مدیریت منابع آبی کشور، می‌تواند برای کاهش آسیب به سیستم‌های طبیعی (اکوسیستم‌های جانوری و گیاهی وابسته به آب زیرزمینی) و افزایش خدمات اکوسیستم‌ها، سودمند باشند.

وضعیت کلی منابع آب زیرزمینی در ایران

کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین واقع شده است. وقوع خشک‌سالی‌های اخیر باعث شده متوسط بارندگی درازمدت (میانگین ۵۰ ساله) از ۲۵۰ میلی‌متر به حدود ۲۴۰ میلی‌متر در سال کاهش یافته که معادل یک‌سوم متوسط بارندگی جهان، کمتر از نصف بارندگی قاره آسیا می‌باشد و جزء مناطق کم‌باران محسوب شود (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۸). محیط‌زیست سرعت استفاده از منابع آب زیرزمینی در ایران را در مقایسه با استاندارد جهانی سه برابر بیش‌تر تخمین زده است. لذا منابع آب زیرزمینی کشور در حال نابودی است. وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی در حال حاضر باعث تشدید افت سطح آب زیرزمینی و کسری حجم مخزن دشت‌ها شده، به‌گونه‌ای که حدود ۴۲۰ محدوده از ۶۰۹ محدوده مطالعاتی کشور در وضعیت ممنوعیت توسعه بهره‌برداری قرار گرفته و نکته قابل توجه قرارگیری بیش از ۹۰ درصد پتانسیل آب زیرزمینی کشور در این مناطق دارای ممنوعیت است (وزارت نیرو، ۱۳۹۸). علاوه بر کاهش در میزان آب زیرزمینی از نظر کمیت، در سال‌های اخیر کیفیت آب زیرزمینی نیز تغییر نموده و شورتر شده است به طوری که از سال ۱۳۶۰ تا سال ۱۳۹۹ میزان شوری از ۲۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر به ۴۴۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر افزایش یافته است (فاضلی فارسانی، ۱۳۹۹). نکته قابل توجه کوتاه شدن عمر آبخوان‌های مهم کشور است که در صورت تداوم

بهره‌برداری‌های بی‌رویه موجود، نابودی این مناطق بسیار نزدیک خواهد بود (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۵؛ شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۸).

استفاده از تجارب موفق و الگوبرداری از طرح‌های مدیریتی هند، ایالات آریزونا و کالیفرنیا می‌تواند نواقص و مشکلات موجود در مدیریت فعلی آب زیرزمینی ایران را شناسایی و وضعیت مدیریت این منبع ارزشمند در ایران را بهبود بخشد. بعد از اجرای طرح‌های پایداری همچون اجرای طرح احیا و تعادل بخشی در کشور، بر اساس مطالعات تطبیقی صورت گرفته با الگوهای موفق در زمینه پایداری آب زیرزمینی در کشورهای پیش‌رو در این زمینه (هند، ایالات آریزونا و کالیفرنیا)، موارد زیر از عوامل عدم موفقیت این طرح در کشور عنوان شده و می‌بایست بازبینی گردیده و در دستور کار قرار بگیرند (سامانی، ۱۳۹۹). این عوامل عبارت‌اند از:

- عدم تمرکز مجری طرح بر بخش اصلی و نتیجه‌ساز فعالیت‌ها به دلیل تعریف حجم بالایی از پروژه‌ها جهت اجرا در یک بازه زمانی کوتاه‌مدت؛
- تعریف یک طرح یکپارچه و عمومی برای کل کشور بدون توجه به شرایط متفاوت اقلیمی و فرهنگی و هیدروژئولوژیکی در کشور؛
- عدم تعریف افق زمانی معقول در تعیین اهداف کوتاه‌مدت، میان‌مدت، و بلندمدت؛
- عدم توجه به مدیریت مشارکتی و لحاظ نشدن ملاحظات و نظرات بخش خصوصی و ذی‌نفعان عرصه آب در تدوین پروژه‌ها و دستورالعمل‌ها[۱۵]؛
- عدم اعمال مدیریت یکپارچه منابع آب: برای تعریف پایداری در یک حوضه آبریز، پرداختن به منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی به صورت مستقل موجب بروز خطا در مقادیر منابع آب قابل بهره‌برداری می‌شود. بنابراین لازم است در تعریف پایداری یک حوضه آبریز مجموعه عوامل سطحی، زیرزمینی، نیازهای زیست‌محیطی و مسائل مربوط به کیفیت بدنه‌های آبی با یکدیگر دیده شود؛
- فقدان بستر اجتماعی لازم برای اجرای طرح، این در حالی است که پایداری اجتماعی جزء جدانشدنی از پایداری منابع آب است؛
- عدم اعمال مدیریت انطباقی (تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت، نوسانات تراز آب زیرزمینی و اهداف زیست‌محیطی باید به‌صورت مداوم اعمال گردد)؛
- لحاظ نشدن الزامات ساختاری، اداری، قضایی و موانع قانونی، اجتماعی (بیکاری و معرفی نشدن فرصت‌های شغلی جایگزین برای بهره‌برداران غیرمجاز، فقدان پذیرش بهره‌برداران برای مشارکت در حفظ منابع آب، فقدان سرمایه اجتماعی و غیره)، محدودیت‌های نهادی و ساختاری (تداخل وظایف و اختیارات و اثر غیرقابل انکار مراجع تصمیم‌گیری خارج از سازمان آب و غیره)، محدودیت‌های فنی (در زمینه تکنولوژی‌های استفاده بهینه از آب و غیره)، سیاسی و بین‌المللی (تحریم) در اجرای طرح؛
- عدم اولویت‌بندی صحیح در اجرای پروژه‌ها؛
- تغییر در قوانین مرتبط با متولی نصب کنتور در دوره‌های مختلف بهره‌برداران را بی‌اعتماد کرده است؛

[۱۵] رویکرد مدیریت منابع آب زیرزمینی در کشور به‌صورت متمرکز و از بالا به پایین بوده است. در این رویکرد تصمیمات به‌صورت مرکزی اتخاذ گردیده و سپس به سطوح پایین‌تر انتقال می‌یابد و ارتباطات بین سطوح کاملاً به‌صورت رسمی و بالا به پایین تعریف شده است. در این ساختار، بهره‌برداران نقشی در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌ها ندارند و ملزم به اجرای برنامه‌های تدوین شده در سطوح بالا هستند).

- وجود تناقض در دستورالعمل‌ها: در دستورالعمل‌های انسداد و تعیین تکلیف، رابطه سازمان آب با بهره‌برداران یک رابطه مدیریتی از بالا به پایین و با اعمال قانون، تعریف شده است، اما در دستورالعمل مدیریت مشارکتی و مصرف بهینه و غیره بر لزوم تقویت سرمایه اجتماعی و مشارکت بهره‌برداران تأکید شده است؛

- مراحل اجرای طرح برای عموم شفاف‌سازی نشده است (شفاف‌سازی می‌تواند مقدمه خوبی برای جلب مشارکت مردمی باشد)؛

- توسعه شبکه آبیاری نوین بدون توجه به کاهش ظرفیت برداشت و تعیین الگوی کشت؛

- سیاست متناقض خودکفایی غذایی با تعادل‌بخشی آبخوان‌ها: بر پایه منابع آب اشتغال‌زایی صورت گرفته و مشکلات معیشتی که نیاز به تغییر معیار بهره‌وری در کشاورزی دارد (باید تولید به ازای هکتار جایگزین تولید به ازای آب مصرفی گردد)؛

- ظرفیت‌های نهادی و انسانی، کارشناسان و مدیران دست‌اندرکار برنامه‌ریزی و اجرا در مراکز و استان‌ها محدود می‌باشند؛

- عدم همکاری و حمایت وزارت جهاد کشاورزی با وزارت نیرو (سامانی، ۱۳۹۹)

بحث و نتایج

بنابراین با توجه به مطالب عنوان شده ذکر چند نکته ضروری است:

آب زیرزمینی یک سیستم طبیعی، پویا، درهم‌تنیده، پیچیده و ترکیبی از شبکه‌های طبیعی، فنی، فرهنگی-اجتماعی، اقتصادی، حقوقی و دارای خصوصیات محلی و جهانی است. سیستم‌های پیچیده تکرارپذیر نیستند بدان معنی که یک روش و راه‌حل یکسان در مکان‌های متفاوت قابل استفاده نمی‌باشد و لذا باید تفاوت‌های اقلیمی، هیدروژئولوژیکی، فرهنگی- اجتماعی و اقتصادی هر آبخوان برای مباحث مدیریتی در نظر گرفته شود. همچنین این سیستم‌ها غیرقابل پیش‌بینی و دارای عدم قطعیت می‌باشند. به دلیل خاصیت پیچیده بودن سیستم‌های آبی، نمی‌توان راه‌حلی برای این‌گونه سیستم‌ها ارائه داد و بنابراین مدیریت کردن چنین سیستم‌هایی و مسائل مربوط به آن‌ها بسیار دشوار می‌باشد. در مدیریت منابع آب کشور به دلیل حاکم بودن تفکر تقلیل‌گرایی (جزئی‌نگری) و ندیدن روابط بین اجزای سسیتم‌های آبی، همواره مشکلات عدیده‌ای برای منبع آبی و مسائل مدیریتی مربوط به آن‌ها وجود دارد. برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی و ارائه یک پارادایم[16] (الگو) مدیریتی ابتدا باید شناخت (از تمام زیرسیستم‌های آبی همچون زیرسیستم‌های طبیعی، فنی، فرهنگی-اجتماعی، اقتصادی و حقوقی) حاصل شود تا بتوان رویکردی برای مواجه با مسائل و مشکلات ایجاد شده در زمینه‌ی مدیریت آب زیرزمینی ارائه داد. شناخت مسائل نیز با رسم چرخ درهم‌تنیدگی سیستم آب زیرزمینی به صورت مشارکت تمام بهره‌برداران، مدیران، متخصصان و کارشناسان فنی، قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران و مردم محلی حاصل می‌شود. همان‌طور که ذکر شده است، سیستم‌های آبی دارای زیرسیستم‌های طبیعی، فنی، اقتصادی، فرهنگی-اجتماعی و حقوقی می‌باشد که باید مورد مطالعه دقیق قرار گرفته و شناخت در مورد آن‌ها حاصل شود. چنین شناختی مستلزم تفکر شبکه‌ای می‌باشد. در واقع تفکر شبکه‌ای، یک رویکرد اکتشافی برای حل مسئله است که هدف آن در نظر گرفتن تعاملات پیچیده بین اجزاء و روابط آن‌ها در یک فضای مسئله معین است. نگاه سیستمی داشتن به مسائل و درک شبکه‌ای بودن تمام زیرسیستم‌ها، می‌تواند کمک کند تا به تحلیل و شناخت درستی از موضوعات و مشکلات ایجاد شده در زمینه مدیریت پایدار آب زیرزمینی رسید. بعد از مرحله شناخت زیرسیستم‌ها، باید اعتمادسازی بین تمامی آن‌ها صورت گرفته و سیاست‌گذاری‌های مشارکتی ایجاد شود. لازمه این اعتمادسازی، ارائه و اشتراک‌گذاری تمام اطلاعات و داده‌های دقیق و مطمئن زیرسیستم‌ها میان ذی‌نفعان، مدیران، متخصصان و کارشناسان

[16] Paradigm

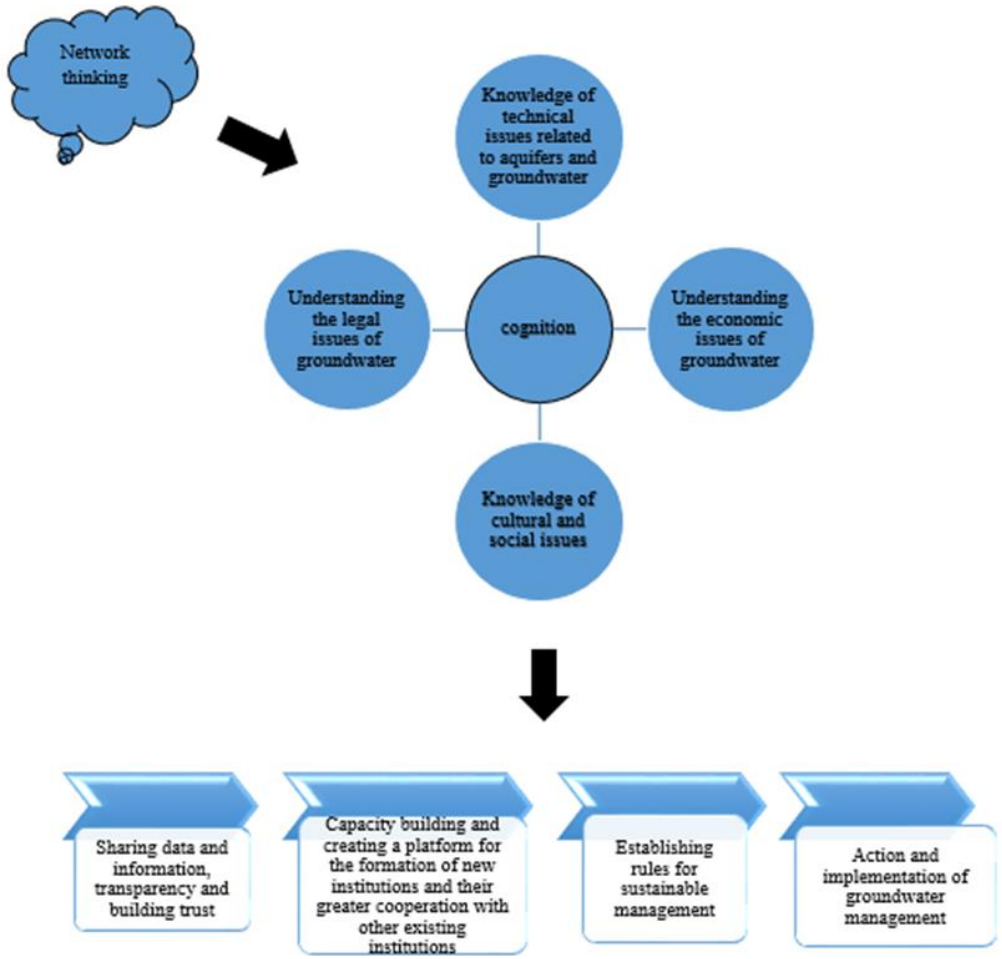
فنی، قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران در سطوح مختلف می‌باشد. مشارکت و نظارت تمام ذی‌مدخلان و ذی‌نفعان در مرحله بعدی برای جلوگیری از مناقشات آبی بین آن‌ها ضروری است. با اعتمادسازی و شناخت ظرفیت‌های موجود و ایجاد بستری برای ظرفیت‌سازی‌های جدید، می‌توان مناقشات را مدیریت کرد و چالش‌ها و مسائل جدید را در دستور کار قرار داد. لازمه جلوگیری از هرگونه مناقشه و ایجاد تعارض، وضع قوانینی توسط قانون-گذاران و سیاست‌گذاران و ایجاد پشتوانه قانونی برای رعایت قوانین وضع شده با اعمال سیاست‌های مجازات و تشویق می‌باشد. با انجام این اقدامات در نهایت سیستم پیچیده و درهم‌تنیده آب زیرزمینی در برابر هر گونه تغییر ایجاد شده در آن (مثلا تغییر شرایط اقلیمی) خودسامان‌ده یا اصطلاحا تاب‌آور می‌شود. بنابراین رویکرد متفاوت ولی یک‌پارچه به منابع آبی (آب سطحی و زیرزمینی)، مشارکت تمام کنش‌گران در مدیریت آب زیرزمینی و در نظر گرفتن سیستم‌های طبیعی در تصمیمات و قانون-گذاری‌ها، می‌تواند به حل بسیاری از مشکلات ایجاد شده در اثر بحران کم‌آبی موجود در کشور کمک کند. از این‌رو مطابق شکل ۱، راه‌کارهای پیشنهادی برای بهبود وضعیت فعلی و مدیریت پایدار و عادلانه‌تر آب زیرزمینی ارائه شده است.

شناخت عوامل تأثیرگذار بر مدیریت آب زیرزمینی

شناخت مسائل فنی مربوط به آبخوان‌ها و آب زیرزمینی:

- بررسی خصوصیات آبخوان (لیتولوژی، قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و میزان تخلخل)
- بررسی و جمع‌آوری داده‌های مربوط به تراز آب زیرزمینی و نوسانات بلندمدت آن
- شناسایی و پهنه‌بندی مناطق با افت شدید تراز آب زیرزمینی و هم‌چنین نقاطی که با خطر فرونشست زمین مواجه هستند.
- برآورد بیلان در آبخوان‌ها
- بررسی برهم‌کنش‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی
- بررسی ظرفیت‌های فنی موجود برای تحلیل آسیب‌ها و پایش سیستم‌های آب زیرزمینی
- پایش تغییرات مداوم کیفیت آب و مقایسه آن نسبت به استانداردهای بین‌المللی کیفی آب
- تهیه نقشه‌های ملی هیدروژئولوژیکی برای نشان دادن موقعیت آبخوان‌ها
- شناسایی تدابیر لازم برای محدودسازی پمپاژ آب زیرزمینی تا سطوح پایدار و اقدامات تکمیل‌کننده لازم برای کنترل تقاضای آب
- بررسی میزان آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل آلاینده‌ها و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری برای استفاده در برنامه‌ریزی کاربری اراضی
- تشخیص مناطق ممنوعه جغرافیایی از نظر پمپاژ آب زیرزمینی، پهنه‌بندی این مناطق به مناطق بحرانی کم، متوسط و زیاد و تعیین مناطق اولویت‌دار و نیازمند توجهات بیش‌تر
- طراحی مدل‌های عددی دینامیک آبخوان‌ها با داده‌های دقیق و مهارت لازم در این زمینه (به کارگیری مدل برای بررسی پیامدهای راه‌کارهای مدیریتی و سناریوهای بهره‌برداری تعریف شده در آینده)
- شناسایی روش‌های مناسب پاک‌سازی یا کاهش تأثیرات نامطلوب آلاینده‌ها بر کیفیت آب زیرزمینی
- شناسایی روش‌های مختلف تغذیه مصنوعی و هم‌چنین مکان‌هایی که افزایش نرخ تغذیه از طریق تغذیه مصنوعی لازم است.
- شناخت اکوسیستم‌های حساس و وابسته به آب زیرزمینی
- شناسایی الگوها و روش‌های نوین آبیاری و راه‌های تغییر الگوی کشت از گیاهان آب‌بر به گیاهانی که با شرایط

اقلیمی، وضعیت هیدروژئولوژیکی و کمبود شدید آب در هر منطقه سازگاری بیش‌تری داشته باشند.



شکل ۱- راه‌کار پیشنهادی برای مدیریت پایدار آب زیرزمینی.

Fig. 1- Proposed solution for sustainable groundwater management.

شناخت مسائل اقتصادی آب زیرزمینی:

- درک و انجام مطالعات ارزش اقتصادی آب زیرزمینی (ارزش منافع حاصل از استفاده‌های معین آب زیرزمینی منهای هزینه‌های برداشت و مدیریت)
- شناسایی چگونگی استفاده از آب زیرزمینی و ارزش-گذاری آن (تأمین آب شرب، صنعت، کشاورزی و اکوسیستم‌ها)
- بررسی سیاست‌های اقتصادی و کشاورزی برای شناسایی زمینه‌هایی که می‌تواند برای تسهیل مدیریت آب زیرزمینی بهبود یابد.
- شناسایی راهکارهای انگیزه‌بخش اقتصادی برای مدیریت و حفاظت آب زیرزمینی (راه‌های تشویق بهره‌برداران آب برای کاهش برداشت آب، تغییر الگوی کشت با بهره‌وری بیش‌تر و کاهش مصرف آب و انرژی و..)

- شناخت پیدا کردن در مورد مقوله‌های همانند آب مجازی و بازار آب زیرزمینی (برای مبادله حقوق استفاده و تخصیص‌ها)

شناخت مسائل فرهنگی– اجتماعی:

- تحلیل ذی‌نفعان (چه کسانی هستند؟ چه نقش و مسئولیتی دارند؟ راه‌های به میان آوردن آن‌ها و استفاده از تجارب‌شان چیست؟)

- آگاهی داشتن از شیوه نگرش جوامع محلی، کشاورزان، مدیران و سیاست‌مداران به مسائل مربوط به آب زیرزمینی (مانند بستن چاه غیرمجاز، کنتورگذاری هوشمند و ...) و هم‌چنین بازخورد بهره‌برداران در مقابل انجام تغییرات این چنینی

- شناسایی میزان دانش و آگاهی جوامع محلی به الگوی سرانه مصرف آب، روش‌های سنتی و بومی به کار رفته در کشاورزی و ...

- شناخت از وضعیت معیشتی افرادی که با تشدید وضعیت بحرانی کم‌آبی مجبور به بستن چاه‌های خود می‌شوند و راه‌کارهای جایگزین برای این قبیل بهره‌برداران برای کم‌تر متضرر شدن

شناخت مسائل حقوقی آب زیرزمینی:

- شناخت کلیه‌ی حقوق مربوط به میزان استفاده و برداشت آب زیرزمینی توسط جوامع انسانی، گیاهی و جانوری برای حفظ انرژی، امنیت غذایی، امنیت ملی و امنیت انسانی و هم‌چنین حفظ تنوع زیستی و بقای اکوسیستم‌ها به گونه‌ای که در درازمدت آسیبی به منابع آبی وارد نیاید و این منابع پایدار بمانند.

اشتراک گذاری داده‌ها و اطلاعات، شفاف‌سازی و ایجاد اعتماد

- گردآوری، کنترل و سازماندهی داده‌ها و اطلاعات به دست آمده از مرحله شناخت در یک پایگاه مشترک که مورد توافق همگان باشد.

- به میان آوردن تمام ذی‌نفعان و استفاده از تجارب و مشورت‌دهی آنان در خصوص مدیریت محلی آب زیرزمینی

- شفاف‌سازی اطلاعات اشتراکی بین ذی‌نفعان، مدیران، متخصصان فنی و سیاست‌گذاران (برای درک بهتر، شناخت نواقص موجود و ارائه راه‌کارها و اقدامات بعدی)

- اعتمادسازی میان ذی‌نفعان، مدیران، متخصصان فنی و سیاست‌گذاران و هم‌چنین اطمینان یافتن از صحت داده‌های به اشتراک گذاشته شده برای تصمیمات و ارائه راه‌کارهای مدیریتی بهتر و پایدارتر

ظرفیت‌سازی و ایجاد بستری برای تشکیل نهادهای جدید و همکاری بیش‌تر آن‌ها با دیگر نهادهای موجود

- ایجاد نهادهای محلی برای استفاده از تجارب و توصیه-های ذی‌نفعان و مشارکت آن‌ها

- ظرفیت‌سازی برای داشتن نمایندگانی از ذی‌نفعان برای ارائه نظرات، پیشنهادات و نظارت بر اجرای اقدامات مدیریتی

- ایجاد کمیته مشورتی و تسهیل‌گر برای مشاوره بین ذی‌نفعان، متخصصان مدیران و سیاست‌گذاران برای کاهش هر گونه اختلافات ایجاد شده و ارائه راه‌حل‌های جایگزین

- ایجاد بسترهایی برای دریافت بودجه و تأمین مالی توسط دولت برای برنامه‌ریزی، مدل‌سازی، مدیریت و نظارت بر انجام استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی از نظر جنبه‌های گوناگون زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی

- ایجاد بستری برای استفاده از ظرفیت‌های موجود و به کار بستن متخصصان در زمینه‌های مختلف مربوط به مسائل آبی و توانمند ساختن آن‌ها

- ایجاد بستری برای هماهنگی کلیه‌ی نهادهای آبی بر اساس اصل تمرکززدایی (بر اساس این اصل کلیه تصمیم‌ها و فعالیت‌ها در پایین‌ترین سطح اداری ممکن اتخاذ می‌گردد.)

وضع قوانین برای مدیریت پایدار

- طراحی قوانین آب زیرزمینی با مشخص کردن سازوکارهایی برای دولت برای مدیریت تخصیص منابع آب و حقوق برداشت بر اساس مجوزها و پروانه‌ها شامل تعهدات اطمینان از پایداری منبع
- تعیین و اعمال حدود سخت‌گیرانه برای مقدار رهاسازی آلاینده‌ها و هم‌چنین نرخ برداشت
- وضع عوارض برای برداشت آب زیرزمینی بر اساس حجم استفاده شده (برای کاهش مصرف)
- در نظر گرفتن و متوازن ساختن منافع تولیدکنندگان پسماندهای آلوده با حقوق بهره‌برداران در بهره‌مندی از کیفیت خوب آب زیرزمینی مانند تأمین آب شرب و حفظ اکوسیستم‌ها
- وضع قوانین برای کنترل و اعمال محدودیت کاربری اراضی و برداشت و استفاده از آب زیرزمینی به خصوص در مناطق پر استرس (مکان‌های در معرض خطر خالی شدن و آلوده شدن آب زیرزمینی)
- فراهم کردن مبنای قانونی ایجاد و تأسیس سازمان‌های مدیریت آبخوان و شکل‌گیری تشکل‌های محلی بهره‌برداران

اقدام و عملی‌سازی مدیریت آب زیرزمینی

- تغییر پارادایم موجود از رویکرد تکنوکراتیک (از بالا به پایین) به استفاده از تفکر شبکه‌ای، دانش جمعی و مشارکت و همکاری تمام بهره‌برداران، کارشناسان فنی، متخصصان و سیاست‌گذاران
- پشتیبانی و حمایت سیاسی از قوانین وضع شده و نظارت بر اجرای آن‌ها و به کار بستن قدرت سیاسی برای درک مسائل و اقدام عملی درباره مشکلات کنونی و آینده آب زیرزمینی
- هماهنگ ساختن دانش آب زیرزمینی، اصلاحات حکمرانی (متناسب با نظام حاکمیتی و قوانین کشور)، مشوق‌های اقتصادی، سرمایه‌گذاری و مشارکت محلی توسط کنش‌گران درگیر در مدیریت آب زیرزمینی
- شکل‌گیری نظام منسجم سیاست‌ها، قوانین و نهادها برای آب زیرزمینی و مدیریت یکپارچه آب‌های سطحی و زیرزمینی (با در نظر گرفتن تفاوت‌های میان آب‌های سطحی و زیرزمینی)
- مشارکت جامع دستگاه‌های دولتی، سازمان‌های غیردولتی و متخصصان در کمپین‌های عمومی و هم‌چنین ارائه بروشور، فیلم و انیمیشن برای ارتقای آگاهی در مورد تهدیدهایی که متوجه آب زیرزمینی می‌شود.
- تخصیص بودجه برای مدیریت آب زیرزمینی، از جمله برای مطالعات فنی، علمی، اجتماعی، اقتصادی و پایش توسط قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران
- در نظر گرفتن نتایج ارزش‌گذاری‌های اقتصادی در تصمیمات سرمایه‌گذاری درباره آب زیرزمینی، از جمله موارد تأثیرگذار بر اکوسیستم‌ها
- بازنگری سیاست‌های اقتصادی و کشاورزی در راستای تسهیل مدیریت پایدار آب زیرزمینی
- تهیه یک برنامه ملی مدیریت آب از طریق رایزنی و مشارکت ذی‌نفعان و طراحی یک چشم‌انداز که بتواند میان تغذیه و برداشت بدون آسیب به کمیت و کیفیت آب زیزمینی تعادل برقرار کند.
- ارائه استراتژی‌های بلندمدت برای مدیریت پایدار با در نظر گرفتن عوامل مختلفی هم‌چون شرایط متفاوت آبخوان‌ها از نظر پیچیدگی، شرایط اقلیمی، هیدروژئولوژیکی، شرایط اجتماعی و اقتصادی در مناطق مختلف و قابلیت به‌روزرسانی دوره‌ای آن (مثلاً هر ۵ سال یک‌بار).

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر رشد سریع جمعیت، شهرنشینی، صنعتی-شدن و رقابت برای توسعه اقتصادی و هم‌چنین تغییرات اقلیمی (کاهش میزان بارش و خشک‌سالی‌های ناشی از آن)، منابع آب زیرزمینی را در سراسر جهان از لحاظ کمی و کیفی به شرایط بحرانی مبدل کرده است. به دلیل ماهیت پنهان و غیرقابل رؤیت بودن و پیچیدگی سیستم‌های آب زیرزمینی، اغلب درک صحیحی از آن‌ها وجود ندارد و بنابراین مدیریت، حفاظت و توسعه پایدار این منبع ارزشمند از نظر کمی و کیفی با مشکلات فراوانی روبه‌رو می‌باشد. کشور ایران به لحاظ دارا بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک نیز از این قاعده (بحرانی بودن وضعیت آبی اکثر آبخوان‌های کشور به ویژه در بخش‌های شرق و شمال شرقی) مستثنی نبوده و لزوم تغییر رویکرد فعلی در مدیریت آب زیرزمینی روز به روز بیش‌تر احساس می‌شود. مدیریت منابع آب کشور به دلیل حاکم بودن تفکر تقلیل‌گرایی (جزئی‌نگری) و ندیدن روابط بین اجزای زیرسیستم‌ها آبی، همواره دچار مشکلات عدیده‌ای در مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی بوده است. بنابراین برای ارائه یک الگوی مدیریتی ابتدا باید شناخت (از تمام زیرسیستم‌های آبی همچون زیرسیستم‌های طبیعی، فنی، اجتماعی، اقتصادی و حقوقی) حاصل شود. شناخت مسائل و مشکلات نیز، با رسم چرخ درهم‌تنیدگی سیستم آب زیرزمینی به صورت یک رویکرد مشارکتی میان بهره‌برداران، مدیران، متخصصان و کارشناسان فنی، قانون‌گذاران و سیاست‌گذاران و مردم محلی، حاصل می‌شود. چنین شناختی مستلزم تفکر شبکه-ای و در نظر گرفتن کلیه روابط بین اجزای زیر سیستم‌ها بوده تا درک صحیحی از موضوعات و مشکلات حوزه مدیریتی پایدار بدست آید. پس از مرحله شناخت زیرسیستم‌ها، باید اعتمادسازی بین تمام کنش‌گران صورت پذیرفته و تمام داده‌ها و اطلاعات مطمئن زیرسیستم‌ها، به صورت مشارکتی و شفاف ارائه و در یک پایگاه داده به اشتراک گذاشته می‌شوند. بنابراین با این کار نواقص موجود شناسایی و برای رفع آن‌ها لازم است نهادهای مربوطه اقدامات بعدی را در دستور کار قرار داده و یا بسترهایی برای ایجاد نهادهای جدید ایجاد شود. هر گونه اقدامی توسط نهادها و سازمان‌های دولتی و غیردولتی باید بر اساس یک چارچوب مشخص قانونی صورت گیرد، لذا طراحی و وضع قوانین (مشخص کردن سازوکارهای دولت برای مدیریت تخصیص منابع آب و حقوق برداشت، تعیین و اعمال حدود سخت‌گیرانه برای مقدار رهاسازی آلاینده و نرخ برداشت، وضع عوارض برداشت برای کاهش مصرف، کنترل و اعمال محدودیت کاربری اراضی و برداشت به خصوص در مناطق پر استرس، در نظر گرفتن حقوق و منافع اکوسیستم‌ها و فراهم کردن مبنای قانونی ایجاد و تأسیس سازمان‌های مدیریت آبخوان و شکل‌گیری تشکل‌های محلی بهره‌برداران) امری ضروری است. و در آخر اقدام و عملی‌سازی مدیریت آب زیرزمینی با اقداماتی (پشتیبانی و حمایت سیاسی از قوانین وضع شده و نظارت بر اجرای آن‌ها و به کار بستن قدرت سیاسی برای درک مسائل و اقدام عملی، تخصیص بودجه (برای مطالعات فنی، علمی، اجتماعی، اقتصادی و پایش)، تغییر پارادایم موجود از رویکرد تکنوکراتیک (از بالا به پایین) به استفاده از تفکر شبکه‌ای، دانش جمعی و مشارکت و همکاری تمام بهره‌برداران، کارشناسان فنی، متخصصان و سیاست‌گذاران، شکل‌گیری نظام منسجم سیاست‌ها، قوانین و نهادها، ارتقای سطح آگاهی در مورد تهدیدهایی که متوجه آب زیرزمینی می‌شود (ارائه بروشور، فیلم و انیمیشن)، تهیه یک برنامه ملی مدیریت آب از طریق رایزنی و مشارکت ذی‌نفعان، طراحی چشم‌انداز چند ساله و اقدامات لازم برای تحقق تعادل مناسب میان تغذیه و برداشت بدون آسیب جدی رساندن به کمیت و کیفیت آب زیرزمینی و بازنگری سیاست‌های اقتصادی و کشاورزی) انجام‌پذیر است.

منابع

رضایی، س.، جوادی، س.، کاردان‌مقدم، ح.، ۱۳۹۹. ارزیابی راه‌کارهای مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد اجزای محدود در شبیه‌سازی عددی. هیدروژئولوژی، سال ۵، شماره ۲، ۳۲-۴۲.

سامانی، س.، ۱۳۹۹. ارائه الگوهای جهانی مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی جهت بهبود طرح احیا و تعادل‌بخشی در کشور. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۶، شماره ۲، ۲۷۱-۲۹۱.

شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۵. گزارش چالش‌ها و پیامدهای کمبود آب در کشور.

شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۸. گزارش هفتگی برنامه‌ها، عملکرد و اقدامات طرح پایداری.

فاضلی فارسانی، ع.، ۱۳۹۹. منابع آب زیرزمینی ایران، سیاست‌ها و چالش‌ها، وبینار تخصصی بررسی چالش‌ها و راه-کارهای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مهدوی، ت.، حسینی، س. ع.، ۱۳۹۷. سیاست‌ها و حکمرانی آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، (با مرور بر سیاست‌های رایج در کشورهای توسعه یافته). آب و توسعه پایدار، دوره ۵، شماره ۲، ۱۲۹-۱۴۰.

میرزایی ارجنگی، ی.، شیخی بگلری، پ.، چیت‌سازان، م.، ۱۴۰۰. مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت میان‌آب شوشتر با تأکید بر نیاز آبی محصولات کشاورزی با استفاده از مدل‌سازی آب زیرزمینی. هیدروژئولوژی، سال ۶، شماره ۱، ۸۴-۹۸.

نامور، ر.، ۱۳۹۹. مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در کالیفرنیا چالش‌ها و پیشرفت‌های طرح، وبینار تخصصی بررسی چالش‌ها و راه‌کارهای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

وزارت نیرو ایران، ۱۳۹۸. گزارش وضعیت منابع و مصرف آب سالانه.

Alley, W.M. and Leake, S.A., 2004. The journey from safe yield to sustainability. Groundwater, 42(1): 12–16.

Alley, W.M., Reilly, T.E. and Franke, O.L., 1999. Sustainability of ground-water resources. US Department of the Interior, US Geological Survey, 79 p.

Barlow, P.M. and Leake, S.A., 2012. Streamflow depletion by wells—Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. U.S. Geological Surve, 1376:84 p.

Berger, L., Henry, A.D. and Pivo, G., 2020. Integrated water management recommendations in practice: coexistence of old and new ways in Arizona. Water Policy, 22(4): 501-518.

Bredehoeft, J.D., Papadopulos, S.S. and Cooper, H.H., 1982. Groundwater: The water-budget myth. In National Research Council, In Scientific Basis of Water-Resource Management, 51:57.

Chappelle, C., Hanak, E. and Harter, T., 2017. Groundwater in California. Public Policy Institute of California, 1-2.

Coeurdray, M., Cortinas, J., O'Neill, B. and Poupeau, F., 2017. Sharing the Colorado River: the policy coalitions of the Central Arizona Project (Part 2). In: Water Bankruptcy in the Land of Plenty, 79–99.

Crawford-Brown, D. and Crawford-Brown, S., 2011. The precautionary principle in environmental regulations for drinking water. Environmental Science and Policy, 14(4): 379–387.

Dangar, S., Asoka, A. and Mishra, V., 2021. Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. Journal of Hydrology, 596: 126103.

Davis, J.A., Kerezsy, A. and Nicol, S., 2017. Springs: Conserving perennial water is critical in arid landscapes. Biological Conservation, 211: 30–35.

Deacon, J.E., Williams, A.E., Williams, C.D. and Williams, J.E., 2007. Fueling population growth in Las Vegas: How large-scale groundwater withdrawal could burn regional biodiversity. Bioscience, 57(8): 689–698.

Dieter, C.A., Maupin, M.A., Caldwell, R.R., Harris, M.A., Ivahnenko, T.I., Lovelace, J.K., Barber, N.L. and Linsey, K.S., 2018. Estimated Use of Water in the United States in 2015. U.S. Geological Survey, 1441, 65 p.

Eamus, D., Froend, R., Loomes, R., Hose, G. and Murray, B., 2006. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain

Kodric-Brown, A., Brown, J.H., 2007. Native fishes, exotic mammals, and the conservation of desert springs. Frontiers in Ecology and the Environment, 5(10): 549–553.

Konikow, L.F., 2015. Long-term groundwater depletion in the United States. Groundwater, 53(1):2-9.

Kulkarni, H. and Shankar, P.V., 2010. Sustainable groundwater management: challenges for the 21st Century. In International Conference on Dynamics of Rural Transformation in Emerging Economies, New Delhi.

Kulkarni, H., Vijay, S., Krishnan, S., 2009. Synopsis ofgroundwater resources in India: Status, challenges and a new framework for responses. Report submitted to the planning commission, government of India, ACWA Report ACWA/PC/Rep–1.

Kumari, M., Rai, S. C., 2020. Hydrogeochemical evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes using water quality index in semi arid region of India. Journal of the Geological Society of India, 95(2): 159-168.

McCarl, B.A., Dillon, C.R., Keplinger, K.O., Williams, R.L., 1999. Limiting pumping from the Edwards Aquifer: An economic investigation of proposals, water markets, and spring flow guarantees. Water Resources Research, 35(4): 1257–1268.

Mckean, E., 2005. The new Axford American Dictiolutionary theory of commons management. The drama of commons, 403: 442.

Menon, S., 2007. Ground Water Management: Need for Sustainable Approach. 1-10.

Miller, J.A., 2000. Groundwater Atlas of the United States, Segment 2: Arizona, Colorado, New Mexico, and Utah, Hydrogeologic Investigations Atlas 730-C. US Geological Survey, 34 p.

Naumburg, E., Mata-Gonzalez, R., Hunter, R.G., McLendon, T., Martin, D.W., 2005. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: A review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on Great Basin vegetation. Environmental Management, 35(6): 726–740.

Nelson, R. and Ouevauviller, P., 2016. Groundwater law. In Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges, 173–196.

the health of groundwater-dependent vegetation. Australian Journal of Botany, 54(2): 97–114.

FAO. U., 2016. Global Diagnostic on Groundwater Governance. Food and Agricultur e Organization, Rome, Italy, 210 p.

Freed, Z., Aldous, A. and Gannett, M.W., 2019. Landscape controls on the distribution and ecohydrology of central Oregon springs. Ecohydrology, 12(2): e2065.

Ghose, B., Dhawan, H., Kulkarni, H., Aslekar, U., Patil, S., Ramachandrudu, M. V., …and Prasad, E., 2018. Peoples' participation for sustainable groundwater management. Clean and sustainable groundwater in India, 215-234.

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

Gregory, R., Ohlson, D. and Arvai, J., 2006. Deconstructing adaptive management: Criteria for applications to environmental management. Ecological Applications, 16(6): 2411–2425.

Gungle, B., Callegary, G.B., Paretti, N.V., Kennedy, J.R., Eastoe, C.J., Turner, D.S., Dickinson, G.E., Levick, L.R., Sugg, Z.P., 2016. Hydrological conditions and evaluation of sustainable groundwater use in the Sierra Vista Subwatershed, Upper San Pedro Basin, southeastern Arizona. U.S. Geological Survey, 2016-5114.

Hamilton, S., 2012. Community-based groundwater management in Andhra Pradesh, India. Ph.D. thesis, Unive. Of Otago, 168 p.

Jacobs, K.L. and Holway, J.M., 2004. Managing for sustainability in an arid climate: lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA. Hydrogeology Journal, 12:52-65.

Jha, B.M. and Sinha, S.K., 2009. Towards better management of ground water resources in India. Quarterly Journal, 24(4):1-20.

Kath, J., Boulton A.G., Harrison, E.T. and Dyer, F.J., 2018. A conceptual framework for ecological responses to groundwater regime alteration, (FERGRA). Ecohydrology, 11(7): e2010

Rudestam, K., Langridge, R., 2014. Sustainable yield in theory and practice: Bridging scientific and mainstream vernacular. Groundwater, 52(S1): 90–99.

Sada, D.W., Fleischman, E., Murphy, D.D., 2005. Associations among spring-dependent aquatic assemblages and environmental and land use gradients in a Mojave Desert Mountain range. Diversity and Distributions, 11(1): 91–99.

Saito, L., Christian, B., Diffley, J., Richter, H., Rohde, M.M., Morrison, S.A., 2021. Managing Groundwater to Ensure Ecosystem Function. Groundwater, 59(3): 322–333.

Sarkar, T., Kannaujiya, S., Taloor, A. K., Ray, P. K. C., Chauhan, P., 2020. Integrated study of GRACE data derived interannual groundwater storage variability over water stressed Indian regions. Groundwater for sustainable development, 10: 100376.

Schwabe, K., Nemati, M., Landry, C., Zimmerman, G., 2020. Water markets in the Western United States: Trends and opportunities. Water, 12(1): 233.

Sizek, J., 2018. California's groundwater regime: The Cadiz case. Resources, 7(1): 7.

Slattery, C., 2016. Canary in the coal mine: Why the approval conditions for the Carmichael mine reveal the need to amend the EPBC Act to include adaptive management principles. Environmental and Planning Law Journal, 33(5): 421–442.

Smith, M., Cross, K., Paden, M., Laban, P., 2016. Spring – Managing groundwater sustainably. IUCN, Gland, Switzerland., 135 p.

Stevens, L.E., Holcomb, K., Crookshanks, C., Sada, D.W., Jenness, J., Szabo, K., 2022. A Strategy for Conservation of Springsnails in Nevada and Utah, USA. Sustainability, 14(15): 9546.

Tadayon, S., 2005. Water withdrawals for irrigation, municipal, mining, thermoelectric-power, and drainage uses in Arizona outside of active management areas, 1991-2000. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Thomann, J.A., Werner, A.D., Irvine, D.J., Currell, M.J., 2020. Adaptive management in groundwater planning and development: A review of theory and applications. Journal of Hydrology, 586: 124871.

O'Neill. B., Poupeau. F., Coeurdray. M. and Cortinas. J., 2016. Laws of the river: conflict and cooperation on the Colorado River. Water Bankruptcy in the Land of Plenty, 45–64.

Parker, S.S., Zdon, A., Christian, W.T., Cohen, B.S., Mejia, M.P., Frag, N.S., Curd, E.E., Edalati, K., Renshaw, M.A., 2021. Conservation of Mojave Desert springs and associated biota: Status, threats, and policy opportunities. Biodiversity and Conservation, 30(2): 311–327.

Patten, D.T., Rouse, L., Stromberg, J.C., 2008. Isolated spring wetlands in the Great Basin and Mojave Deserts, USA: Potential response of vegetation to groundwater withdrawal. Environmental Management, 41: 398–413.

Perrone, D., Jasechko, S., 2017. Dry groundwater wells in the western United States. Environmental Research Letters ,12(10): 104002.

Pétré, M.A., Rivera, A., Lefebvre, R., 2019. Numerical modeling of a regional groundwater flow system to assess groundwater storage loss, capture and sustainable exploitation of the transboundary Milk River Aquifer (Canada–USA). Journal of Hydrology, 575: 656–670.

Pool, D.R., Dickinson, J., 2007. Ground-water flow model of the Sierra Vista Subwatershed and Sonoran portions of the Upper San Pedro Basin, southeastern Arizona, United States, and northern Sonora, Mexico. U.S. Geological Survey, 2006-5228.

Reilly, T.E., Dennehy, K.F., Alley, W.M., Cunningham, W.L., 2008. Ground-Water Availability in the United States, Geological Survey, 1323.

Richter, H.E., Gungle, B., Lacher, L.J., Turner, D.S., Bushman, B.M., 2014. Developing a shared vision for groundwater management to protect and sustain baseflows of the Upper San Pedro River, Arizona, USA. Water, 6(8): 2519–2538.

Rohde, M.M., Sweet, S.B., Ulrich, C., Howard, J., 2019. A transdisciplinary approach to characterize hydrological controls on groundwater-dependent ecosystem health. Frontiers in Environmental Science, 7: 175.

Tillman, F.D., Flynn, M. E., 2023. Arizona Groundwater Explorer: interactive maps for evaluating the historical and current groundwater conditions in wells in Arizona, USA. Hydrogeology Journal, 32(2): 645-661.

Tillman, F.D., Cordova, J.T., Leake, S.A., Thomas, B.E., Callegary, J.B., 2011. Water availability and use pilot: Methods development for a regional assessment of groundwater availability, southwest alluvial basins, Arizona. US Geological Survey, 2011-5071.

US Census Bureau., 2019. Population estimates of United State.

Wolaver, B.D., Priestley, S.C., Crossey, L.G., Karlstrom, K.E., Love, A.J., 2020. Elucidating sources to aridland Dalhousie Springs in the Great Artesian Basin (Australia) to inform conservation. Hydrogeology Journal, 28(1): 279–296.

World Water Assessment Programme (United Nations)., 2003. Water for people, water for life: the United Nations world water development report. Unesco, 36 p.

Zdon, A., Davisson, M.L., Love, A.H., 2018. Understanding the source of water for selected springs within Mojave Trails National Monument, California. Environmental Forensics, 19(2): 99–111.