آثار متقابل دو حوزه علم و سیاستگذاری
در پایداری منابع آب‌های زیرزمینی

کد موضوعی: ۲۵۰
شماره مسلسل: ۱۷۹۱۵
آذرماه ۱۴۰۰

دفتر مطالعات زیربنایی

به نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۲
سؤالات ۴
ضرورت و اهداف ۴
روش مطالعه ۵
بخش اول ـ تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی از دیدگاه سیاستگذاری ۶
۱. دیدگاه‌های متنوع در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی ۶
۲. تنوع ارزش‌ها در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی ۷
۳. نوع عوامل پایداری آب‌های زیرزمینی ۹
۴. تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی ۱۱
بخش دوم ـ رابطه سیاستگذاری و علم پایداری آب‌های زیرزمینی ۱۴
۱. از جنبه سیاستگذاری ۱۴
۲. از جنبه علمی ۱۹
بخش سوم ـ ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی ۲۱
۱. مدل‌سازی چندفرایندی ۲۱
۱-۱. مدل‌سازی هیدرولوژیکی ۲۱
۱-۲. مدل‌سازی خدمات اکوسیستم ۲۲
۱-۳. مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی ۲۳
۲. تحلیل عدم‌قطعیت ۲۴
۲-۱. تحلیل چندروایتی ۲۶
۲-۲. مدیریت تطبیقی ۲۷
۲-۳. مشارکت ۲۸
بخش چهارم ـ چالش‌ها، مسائل و مشکلات روش‌های رایج مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی ۳۱
۱. چالش‌های اجرای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی ۳۱
۲. پیشنهادهایی برای مواجهه با چالش‌های اجرای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی ۳۴
۲-۱. ضرورت شناخت واقعیت‌های وضع موجود از منظر قانونی، اقتصادی، اجتماعی، عرضه و تقاضای آب و... با توجه به سیر تکاملی و جهانی مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی ۳۶
۲-۲. تدوین برنامه‌های مدیریت منابع آب با مشارکت همه گرودارن، براساس شرایط اقلیمی و تغییرات پیشرو در فرایند گفتگوی اجتماعی و روشن شدن ابعاد مسئله آب ۳۸
۲-۳. لزوم مدل‌سازی چندفرایندی (هیدرولوژیکی، خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی) با توجه به همه بخش‌های سیستم درهم‌تنیده و جفت شده آبی ـ انسانی ـ محیطی ۳۹
۲-۴. بهبود مدیریت مناقشات آبی با توجه به مدیریت تطبیقی، تحلیل‌های چندروایتی و سازگاری با کم‌آبی ۴۰
۲-۵. لزوم تحلیل عدم‌قطعیت ۴۱
۲-۶. تقویت رویکرد و نگاه اجتماعی در مدیریت منابع آب با استفاده از ظرفیت‌های اجتماعی سازمان‌های مردم نهاد و مشارکت تشکل‌های بهره‌برداران ۴۲
۲-۷. ایجاد بازار آب برای حرکت به سمت واقعی شدن بهای آب و بهینه‌سازی مصرف ۴۴
نتیجه‌گیری ۴۵
منابع و مآخذ ۴۸

آثار متقابل دو حوزه علم و سیاستگذاری در پایداری منابع آب‌های زیرزمینی

چکیده

براساس آمار و اطلاعات وزارت نیرو، منابع آب زیرزمینی حدود ۵۷ درصد از نیاز آب شرب شهری، حدود ۸۳ درصد از نیاز آب شرب روستایی و حدود ۵۲ درصد آب کشاورزی کشور را تأمین می‌کند. در سال‌های خشک نسبت تأمین آب از این منبع برای مصارف مختلف افزایش می‌یابد. این آمار و اطلاعات نشان می‌دهد که تأمین نیازهای مختلف آبی در کشور وابسته به برداشت آب‌های زیرزمینی است. عواملی نظیر کمبود بارش و رخداد خشکسالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر، عدم اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب جهت مهار سیلاب‌ها و احیای آبخوان‌ها، حفر چاه‌های غیرمجاز با پیشرفت فناوری و تسهیل حفاری چاه و بهره‌برداری‌های بیش از حد از چاه‌ها منجر به کسری ذخیره آب‌های زیرزمینی و کاهش توان مدیریتی در آبخوان‌ها شده است. درحال حاضر میزان کسری تجمعی ذخیره آب‌های زیرزمینی ایران به بیش از ۱۳۲ میلیارد مترمکعب رسیده که تنها حدود ۱۰۵ میلیارد مترمکعب از این رقم مربوط به ۱۷ سال اخیر و ۱۸ میلیارد مترمکعب آن مربوط به پنج سال اخیر است. درحال حاضر از بین ۶۰۹ دشت کشور، ۱۸۸ دشت وضعیت آزاد، ۲۷۳ دشت وضعیت ممنوعه، ۱۳۵ دشت وضعیت ممنوعه بحرانی و ۱۳ دشت در لیست پیشنهاد ممنوعیت قرار دارند. لذا می‌توان گفت که ۴۲۰ دشت دارای وضعیت ممنوعه و ممنوعه بحرانی هستند که با افت دائمی، تغییر کیفیت آب و فرونشست زمین مواجه هستند و به‌عنوان دشت ممنوعه شناخته می‌شوند.

نگرانی در مورد کاهش آب‌های زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌ها منجر به توسعه مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی به‌عنوان ابزاری برای سیاستگذاری آب‌های زیرزمینی در برنامه‌های مدیریت منابع آب در سراسر جهان شده است. از آنجا که مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در درون سیستم‌های تلفیقی هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی و اجتماعی ـ اقتصادی تعبیه شده است، اجرای این سیاست‌ها چالشی برای مدیران آب و جامعه علمی محسوب می‌شود. این مسئله در صورت عدم وجود فرایندهای مشارکتی منجر به ایجاد شکاف ارتباطی بین متولیان آب کشور، دانشمندان و جامعه می‌شود. ازاین‌رو می‌توان مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی را به‌منظور ارائه رویکردهای مشارکتی و یکپارچه‌تر و به جهت کاربرد در حوزه سیاستگذاری و وضع قوانین برای برقراری امنیت آبی ارائه داد. برای این منظور نیاز به بررسی مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی از چشم‌اندازهای سیاستی و علمی و ارائه سیر تکاملی این مفهوم از آب‌دهی

مطمئن تا مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی وجود دارد. همچنین این مهم، نیازمند تمرکز بر تنوع ارزش‌های اجتماعی مرتبط با پایداری آب‌های زیرزمینی، کارایی و عوامل حکمرانی آبخوان است.

مؤلفه‌های اصلی ارزیابی علمی و مؤثر سیاست پایداری آب‌های زیرزمینی، مدل‌سازی چندفرایندی، تحلیل عدم قطعیت و مشارکت می‌باشند. طبق بررسی اولیه به‌نظر می‌رسد سیاستگذاری پایدار و کارامد آب‌های زیرزمینی مستلزم یک ارزیابی علمی، شامل: ۱. مشارکت ذی‌نفعان در یک فرایند مشارکتی از طریق مدل‌سازی مشارکتی و یادگیری اجتماعی، ۲. درک درست از سناریوهای درحال توسعه بین آب‌های سطحی ـ زیرزمینی، اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های انسانی، ۳. بررسی و در نظر گرفتن عدم قطعیت و تنوع اولویت‌های جامعه با استفاده از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت چندمدله و مدیریت تطبیقی می‌باشد. گفتنی است که توسعه چنین رویکرد بین‌رشته‌ای که سیاست، علم و عمل را برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی به هم تلفیق می‌کند، در سراسر جهان هنوز در مراحل ابتدایی است، ولی به‌طور کلی مطالعات مربوط به پایداری آب‌های زیرزمینی رشد بسیار بیشتری نسبت به مطالعات مربوط به آب‌های زیرزمینی دارند. لازم است در قوانین، بودجه‌ریزی و سیاستگذاری‌هایی که در کشور انجام می‌شود به این رویکرد توجه شود.

مقدمه

منابع آب در زیرساخت‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی کشور نقش بسزایی دارند. بنابراین یکی از ضروری‌ترین نیازها تأمین امنیت آبی در برابر افزایش جمعیت انسانی، گسترش کشاورزی و تغییرات اقلیم است. حفاظت از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان بزرگ‌ترین ذخایر آب شیرین در دسترس بشر، به‌منظور حفاظت از اکوسیستم‌ها و سازگاری انسان‌ها با تنوع و تغییر اقلیم امری اساسی است. با این‌حال، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان منبعی حیاتی برای بقای انسان و اکوسیستم، اغلب در معرض بهره‌برداری و تخلیه ناپایدار قرار می‌گیرند که با افزایش تقاضا و بهره‌برداری‌های بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی، نفوذ آب شور، فرونشست، تهدیدات محیط‌زیستی و مخاطرات جغرافیایی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. برای مقابله با این تهدیدها، مفهوم پایداری اغلب با مفاهیم آب‌دهی مطمئن،[۱] آب‌دهی پایدار،[۲] توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی وارد برنامه‌ریزی‌ها و اقدامات مربوط به آب‌های زیرزمینی شده است. مفهوم پایداری بسته به شرایط زمان، مکان و جوامع مختلف، متفاوت است. بر این اساس در مناطق خشک تا مرطوب معیارهای پایداری و اولویت‌های اجتماعی از کمی به کیفی تغییر می‌کنند. علاوه‌بر

---

۱. Safe Yield

۲. Sustainable Yield

این، همه آبخوان‌ها در مقیاس زمانی ـ انسانی قابل تجدید نیستند که در بخش دوم مطالعه بیشتر بحث شده است. به‌طور کلی، پایداری آب‌های زیرزمینی می‌تواند «حفظ و نگهداری بلندمدت و پویای جریان آب‌های زیرزمینی با کیفیت بالا با استفاده از حکمرانی و مدیریت عادلانه و جامع» تعریف شود.

پایداری آب‌های زیرزمینی در سیاست‌ها، قوانین و مقررات مربوط به آب‌های زیرزمینی در تعدادی از نقاط مختلف جهان مانند استرالیا، کلمبیا، کالیفرنیا، فرانسه، آلمان، هاوایی، ماساچوست، هلند و آفریقای جنوبی گنجانده شده است. اهداف مورد انتظار از پایداری آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان یک ابزار سیاستگذاری، ممکن است متغیر باشد؛ اغلب به‌منظور جلوگیری از اضافه‌برداشت آب‌های زیرزمینی پیاده‌سازی می‌شود و ممکن است شامل اقداماتی برای اطمینان از تأمین آب در آینده یا محافظت از سیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی باشد. با این‌حال، فقدان ارتباطات بین‌رشته‌ای به‌شدت بر تعاملات بین سیاستگذاری و کنترل پایداری آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار است. علی‌رغم اینکه ابزارهای سیاستگذاری در چندین دستورالعمل و بخشنامه آبی گنجانده می‌شوند، اما اجرای سیاست پایداری آب‌های زیرزمینی به روشی پویا و یکپارچه هم برای مدیران آب‌های زیرزمینی، هم برای قانونگذاران و هم برای جامعه علمی همچنان چالش‌برانگیز است. به‌عنوان مثال، درحالی که قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا به ارتباط متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی تأکید می‌کند، با این‌حال کالیفرنیا برای برقراری ارتباط مؤثر بین سیستم‌های حقوقی و مدیریتی که طی دهه‌های قبل به‌طور مستقل و جداگانه فعالیت نموده‌اند، به سال‌ها زمان نیاز دارد. به‌طور مشابه، قانون آب آفریقای جنوبی اگرچه به‌عنوان یکی از پیشروترین بخش‌های قانونگذاری محیط‌زیستی در جهان شناخته می‌شود، اما در مورد اهداف محیط‌زیستی آن هنوز اختلاف نظر وجود دارد. همچنین، چارچوب آب اتحادیه اروپا بدون مدیریت عملی و واقعی آب‌های زیرزمینی در سطح عملیاتی، به بهبود پایداری آب‌های زیرزمینی کمک چندانی نمی‌کند. در حوضه موری‌دارلینگ استرالیا که آبخوان‌های بیش از حد بهره‌برداری شده با دستورکار اصلاحات آب استرالیا با موفقیت به سطح پایدار محیط‌زیستی برگردانده شده‌اند، اقلیت‌هایی هنوز به این برنامه‌های آبی یا فرایندهای آن اعتماد کامل ندارند.

عملیاتی‌سازی مؤثر سیاستگذاری آب‌های زیرزمینی مستلزم ایجاد بنیادی برای انتقال علم به تصمیم‌گیری‌های اجتماعی است. لذا مستلزم بررسی دقیق سه چالش اصلی است: چالش اول، علم پایداری آب‌های زیرزمینی، که شامل علوم طبیعی و اجتماعی است، پیچیده می‌باشد. به‌عبارتی، درک و مدل‌سازی تلفیقی جوامع با سیستم‌های منابع آب مختلف، اکوسیستم‌ها و تعاملات آنها با اقلیم، یک مسئله پیچیده بین‌رشته‌ای است که جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی ـ اقتصادی، فنی و نهادی را دربرمی‌گیرد. این نوع چالش به‌تازگی در آب‌های زیرزمینی پدیدار شده است (Sivapalan and Blöschlm, 2015)؛ چالش دوم، مدل‌های یکپارچه که شامل جنبه‌های طبیعی و انسانی هستند و سیستم‌های درهم‌تنیده و پویای انسانی ـ طبیعی را به هم مرتبط می‌کنند، دارای عدم قطعیت هستند و چالش سوم، غالباً یک شکاف ارتباطی بین

جامعه دانشگاهی، تصمیم‌گیرندگان و دست‌اندرکاران وجود دارد که باعث می‌شود تولیدات علمی تقاضای کمتری داشته باشند. طبق بررسی اولیه به‌نظر می‌رسد سیاستگذاری پایدار و کارامد آب‌های زیرزمینی مستلزم یک ارزیابی علمی است که شکاف ارتباطی ذکر شده را کمتر کند و شامل: ۱. مشارکت ذی‌نفعان در یک فرایند مشارکتی از طریق مدل‌سازی مشارکتی و یادگیری اجتماعی، ۲. درک درست از سناریوهای درحال توسعه بین آب‌های سطحی ـ زیرزمینی، اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های انسانی، ۳. بررسی و در نظر گرفتن عدم قطعیت و تنوع اولویت‌های جامعه با استفاده از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت چندمدله و مدیریت تطبیقی[۱] است (Elshall et al., 2020).

سؤالات

سؤالات مورد نظر که در راستای این مطالعه ارائه شده است را می‌توان به‌شرح زیر خلاصه کرد:

- پایداری آب‌های زیرزمینی از دیدگاه سیاستگذاری چگونه تعریف می‌شود؟
- رابطه بین دو حوزه علم و سیاستگذاری برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی چیست؟
- ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی شامل چه عواملی است؟
- براساس آموزه‌های این مطالعه، چه تغییرات یا بهبودهایی در سیاستگذاری و وضع قوانین این حوزه می‌توان داشت؟

ضرورت و اهداف

حفاظت از منابع آب‌های زیرزمینی در جهت مقابله با تهدیدها و کاستن از مصرف یا هدررفت و با هدف پایداری منابع آب ضروری است. در این راستا، پرداختن به مقوله پایداری منابع آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در آبخوان‌هایی که با بهره‌برداری بیش از حد مواجهند، با هدف ارزیابی وضعیت فعلی این منابع و برنامه‌ریزی آتی به جهت توسعه پایدار این منابع از اهمیت بسیاری برخوردار است. ازاین‌رو این مطالعه می‌تواند نشانگر رئوس گام‌های مهمی به جهت سیاستگذاری و مدیریت پایدار این منابع ارزشمند باشد. انجام این مطالعات، ارکان لازم برای مدیریت صحیح این منابع را در مواجهه با تجربیات بین‌المللی و ملی فراهم می‌آورد که در عرصه قانونگذاری در این حوزه می‌تواند به‌کار رود. در این راستا اهداف زیر مد نظر است:

- تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی از دیدگاه سیاستگذاری،
- تعیین رابطه علم و سیاستگذاری پایداری آب‌های زیرزمینی در راستای کمک به عرصه قانونگذاری در این زمینه،

---

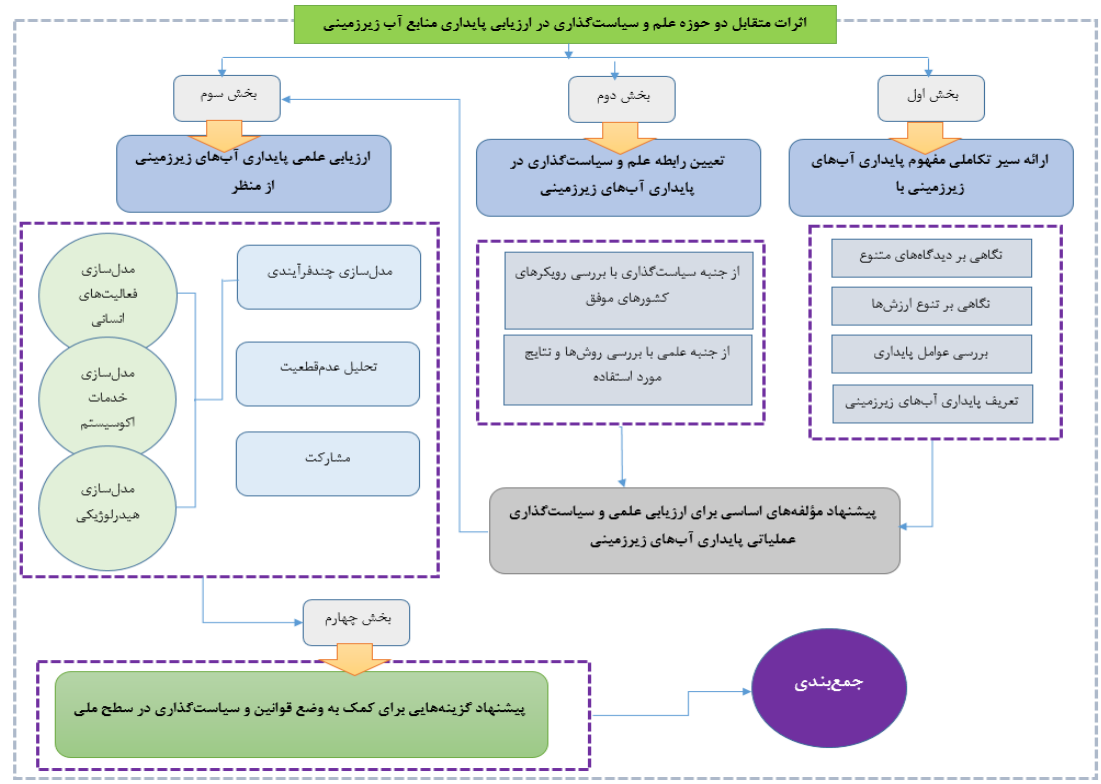
۱. Adaptive Management

- ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی برای کاستن از شکاف ارتباطی میان جامعه علمی و جامعه سیاستگذار و عملیاتی در حوزه آب زیرزمینی.

روش مطالعه

تحقق اهداف این مطالعه، برمبنای مطالعات کتابخانه‌ای و تجزیه و تحلیل اطلاعات در دسترس، طبق فرایند ارائه شده در شکل ۱ است. لذا در این مطالعه، ضمن مرور مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی، سیر تکاملی این مهم از منظر علمی و سیاستگذاری، بررسی و شکاف‌های سیاستگذاری علمی در عملیاتی‌سازی پایداری آب‌های زیرزمینی مورد تأکید قرار می‌گیرد. در پاسخ به سه چالش پیش‌گفته، برای عملیاتی‌سازی مؤثر سیاستگذاری پایداری آب‌های زیرزمینی جزئیات و راهکارهایی برای مدیریت فرارشته‌ای آب‌های زیرزمینی که نیازمند برقراری ارتباط و مشارکت بین علم و سیاستگذاری است، ارائه می‌شود.

شکل ۱. فرایند انجام مطالعه



در بخش اول تلاش شده است با نشان دادن روند تکامل این مفهوم، پایداری آب‌های زیرزمینی تعریف شود و سپس در مورد رابطه علم و سیاستگذاری در بخش دوم بحث می‌شود. بخش سوم ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی را با تمرکز بر سه مؤلفه اساسی این فرایند بررسی می‌کند. سه مؤلفه ارزیابی علمی و مؤثر سیاست پایداری آب‌های زیرزمینی که عبارتند از: مدل‌سازی چندفرایندی، تحلیل

عدم قطعیت و مشارکت. مطالعه حاضر با بررسی روند قوانین و سیاست‌های ایران در رابطه با پایداری آب‌های زیرزمینی با هدف ارائه راهکارهایی براساس چالش‌ها و شکاف‌های شناسایی شده، به پایان می‌رسد. لزوم توجه به مراحل توسعه، ارزیابی و اجرای قوانین سیاست‌های پایداری آب‌های زیرزمینی از مرحله جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز تا نظارت و کنترل کیفیت اجرای این سیاست‌ها در چارچوب و ساختار نظام‌مند با توجه به فرایندهای مشارکتی و مدیریت تطبیقی، به‌عنوان خروجی مطالعه حاضر و مؤلفه‌های کمک‌کننده برای سیاستگذاری قابل اجرا و مؤثر در جهت پایداری آب‌های زیرزمینی پیشنهاد می‌شود. بنابراین حوزه‌های سیاستگذار کشور ازجمله مجلس شورای اسلامی می‌تواند براساس اولویت‌ها با تخصیص و تصویب بودجه‌های لازم برای سازمان‌های متولی، مسیر برنامه‌ریزی، توسعه و پیاده‌سازی راهکارهای پیشنهاد شده به‌منظور پایداری آب‌های زیرزمینی را هموار سازد.

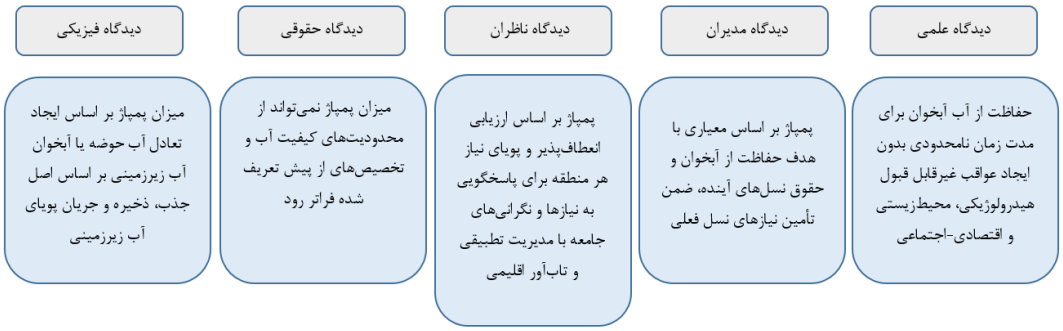
بخش اول ـ تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی از دیدگاه سیاستگذاری

۱. دیدگاه‌های متنوع در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی

ازجمله اولین تلاش‌ها برای درک پایداری آب‌های زیرزمینی، معرفی اصطلاح «آب‌دهی مطمئن» است. اصطلاح «آب‌دهی مطمئن» از قانون پایستگی جرم پیروی نمی‌کند و یک مفهوم ذهنی است و به برداشت هر کاربر بستگی دارد که به‌دلیل حضور بازیگران متنوع با اهداف مختلف، واضح و شفاف نیست. این اصطلاح و تعریف آن تغییرات زیادی را با توجه به پیامدهای نامطلوب بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و افت کمّی‌وکیفی آب‌ها تجربه کرده و به‌اصطلاح «آب‌دهی پایدار» تبدیل شده است. با انتقال از مفهوم «آب‌دهی مطمئن» به «آب‌دهی پایدار»، با تأکید بر اینکه سیستم آب‌های زیرزمینی در سیستم هیدرولوژیکی گسترده‌تری قرار گرفته و با توسعه روابط آب‌های زیرزمینی و سایر اجزای مدیریتی، مفهوم مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی با توجه ویژه به افت سطح آب‌های زیرزمینی، تغییرات کیفیت آب و حتی تغییر حقابه‌ها تکامل یافته و تغییراتی در روند تعریف مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی ایجاد شده است. ازاین‌رو با مدنظر قرار دادن عدم قطعیت، پیچیدگی ذاتی و با انتقال از «آب‌دهی مطمئن» به «مدیریت پایدار»، تلاش شده است تفسیرهای مختلف موضوع از دیدگاه بازیگران مختلف ازجمله دانشمندان، کارشناسان ناظر، مدیران و از رویکردهای حقوقی و فیزیکی ارائه شود، که در شکل ۲ خلاصه شده است. این دیدگاه‌های متنوع دارای موضوعات اساسی مشترکی هستند که می‌توان آنها را در سه گروه اصلی مرتبط با مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی یعنی ارزش‌های اجتماعی، عوامل عملکرد آبخوان و عوامل حکمرانی دسته‌بندی و معیارهای پایداری آب‌های زیرزمینی را تجمیع و تلفیق کرد.

شکل ۲. دیدگاه‌های مختلف در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی

(Rudestam and Langridge, 2014)



به‌طور کلی به مرور زمان با ایجاد مشارکت، مدیریت تطبیقی و نمایش دقیق‌تر معیارهای پایداری آب‌های زیرزمینی، مفهوم آب‌دهی پایدار به توسعه و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی همان‌طور که در قسمت چهارم این بخش نشان داده شده، تبدیل می‌شود. با این‌حال، دسترسی به این اطلاعات که چگونه اجرای توسعه و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی منجر به «تخمین واقعی» و دسترسی پایدار به منابع آب می‌شود؛ در عمل دشوار است. این امر عمدتاً به‌دلیل وجود دیدگاه‌های مختلف در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی توسط گروداران مختلف، تنوع تفاسیر کاربرد و کیفیت منابع آب از طریق گروه‌های اجتماعی مختلف با ارزش‌های اجتماعی متفاوت می‌باشد. علاوه‌بر این، تفاوت‌های پیچیده‌ای میان عوامل چندگانه مرتبط با آب‌دهی آبخوان ازجمله آب‌دهی مطمئن، آب‌دهی پایدار، آب‌دهی چندساله، آب‌دهی تجدیدپذیر، آب‌دهی عملیاتی، آب‌دهی مدیریتی، آب‌دهی مطلوب با توجه به هزینه‌های شخصی و اجتماعی وجود دارد که می‌توانند سوءبرداشت‌های بیشتری ایجاد کنند. پیش از بحث در مورد چالش‌های علمی ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی ابتدا در مورد ارزش‌های اجتماعی مرتبط با پایداری آب‌های زیرزمینی بحث شده است.

۲. تنوع ارزش‌ها در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی

در طول فرایند ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی تعریف ارزش‌های اصلی برای تصمیم‌گیری در میان گروداران مختلف مورد بحث و مناقشه قرار می‌گیرد. شکل ۳ طبقه‌بندی ارزش‌های اجتماعی مربوط به پایداری آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. اگرچه بحث برای ارزش‌های ابزاری (یعنی محیط‌زیست برای فعالیت‌های انسانی مهم و صرفاً ابزاری در جهت تأمین منافع انسانی است) یا برای ارزش‌های ذاتی (یعنی محیط‌زیست دارای ارزشی مستقل از فعالیت‌های انسانی است و فارغ از منافع انسانی شایسته احترام و حفاظت است) می‌تواند منطقی باشد، اما امروزه ضروری است با تأکید بر ارتباط بین این دو ارزش متضاد به بازنگری در ارزش‌های محیط‌زیستی پرداخته شود (Chan et al., 2016). ارزش‌های ارتباطی با رویکردی فراتر از دیدگاه‌های مادی‌گرایانه و انسان‌محورانه؛ به هویت فردی و جمعی، روابط، وابستگی‌ها،

پیوندها، مسئولیت‌های یک حوضه اشاره دارد و از طریق هنجارها، فضایل، ارزش‌های اصلی، ارزش‌های معنوی، روایت‌های محلی، دانش سنتی و اصول مرتبط با آن هدایت می‌شود. ارزش‌های ارتباطی به حفاظت از میراث‌های فرهنگی و محیط‌زیستی (چشمه‌های آب گرم) و به حقوق مردم بومی که مبتنی‌بر ارزش‌های سنتی است، تأکید دارد (Piscopo et al., 2019). به‌عنوان مثال، توجه به ارزش وابستگی مکانی مردم در مدیریت منابع آب دره‌های شمال نیومکزیکو، موجب حفظ روش‌های آبیاری سنتی، توسعه فرهنگ کشاورزی محلی و تغذیه و حفاظت از آب‌های زیرزمینی شده است. (Elshall et al., 2020)

شکل ۳. طبقه‌بندی ارزش‌های اجتماعی مربوط به پایداری آب‌های زیرزمینی

توجه به ارزش‌های زیبایی‌شناختی در طراحی و مدیریت سیستم‌های طبیعی و مهندسی‌شده رویکردی فراتر از بهره‌وری صرف منابع آب به‌همراه دارد. برای مثال، قانون آب ایالت هاوایی حفظ زیبایی مناظر را یکی از مؤلفه‌های حیاتی برای مدیریت پایدار می‌داند و بیان می‌کند که برای «حفظ بیلان اکولوژیکی و زیبایی مناظر» باید اقدامات کافی انجام شود. دسته پنجم طبقه‌بندی ارزش‌های اجتماعی مربوط به عدالت است. تغییرات و تهدیدات نوظهور با توجه به تغییراتی که در دسترسی، کیفیت‌وکمّیت آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌کنند، بر زندگی مردم به‌ویژه افراد کمتربرخوردار تأثیر می‌گذارند. از طرفی دسترسی به آب‌های زیرزمینی مزایای مختلفی برای افراد کمتربرخوردار و همچنین تغییرات بلندمدتی را در خط سیر فقر به‌همراه داشته باشد. به همین منظور دو نوع از عدالت در سیاستگذاری آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته شده است که عدالت درون‌نسلی و بین نسلی نام دارد. عدالت درون‌نسلی در افق‌های زمانی کوتاه‌تری ارزیابی می‌شود، سیاستگذاری‌ها می‌توانند با استفاده از برنامه‌ریزی مجدد و

مدیریت تطبیقی تدوین و اجرا شوند. مدیریت تطبیقی شامل اهداف بازنگری شده مدیریت، مدل یا مدل‌های مدیریت سامانه، دامنه‌ای از گزینه‌ها و انتخاب‌های مدیریت، پایش و برآورد منافع هر گزینه، یادگیری‌ها و تجارب حاصله در تصمیم‌گیری‌های آتی است. درحالی که عدالت بین نسلی به‌طور کلی ارزش‌های پیچیده‌تری را در نظر می‌گیرد. مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی برای حفاظت و بهبود سلامت عمومی یک ارزش اصلی دیگر است که مورد بحث قرار می‌گیرد. تاب‌آوری نوع دیگری از ارزش‌های اجتماعی است که ماهیت عمل‌گرایانه‌تری دارد و مستلزم مقابله با آثار جانبی بحران و بازگشت به وضعیت پیش از بحران یا اتخاذ اقدامات پیشگیرانه در جهت کاهش بحران است. بحران‌های مربوط به آب‌های زیرزمینی شامل افزایش تراز دریا، خشکسالی شدید و فرونشست زمین و فروچاله‌هاست. ارزش اجتماعی دیگر توافق گروهی است که شامل دستیابی به توافق میان گروداران مختلف با هدف بهبود مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی است که افراد و گروه‌ها را قادر می‌سازد، آزادانه و به‌طور مساوی در مدیریت مشارکت داشته باشند.

۳. نوع عوامل پایداری آب های زیرزمینی

ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی با درک اصول هیدرولوژیکی، رابطه علم و سیاست با هدف تعریف عوامل پایداری آب‌های زیرزمینی انجام می‌شود. ۶ عامل اصلی برای تحقق پایداری آب‌های زیرزمینی: ۱. نرخ تغذیه و شرایط ذخیره‌سازی، ۲. کیفیت آب، ۳. نرخ تخلیه و جریان‌های محیطی، ۴. محدودیت‌های حقوقی، ۵. امکان‌سنجی اقتصادی، ۶. عدالت هستند (Pierce et al., 2013). از طرفی می‌توان عوامل فوق‌الذکر را در چهار سیستم اصلی: ۱. سیستم آب‌های زیرزمینی طبیعی، ۲. سیستم زیرساختی شامل امکانات و فناوری پمپاژ و تغذیه آب‌های زیرزمینی، ۳. سیستم اجتماعی ـ اقتصادی شامل ارزش‌های اجتماعی و اولویت‌های مربوط به مصرف آب، ۴. سیستم نهادی که شامل قوانینی است که تعیین می‌کند چه کسی مجاز است چه مقدار آب را برای چه هدفی پمپ کند، طبقه‌بندی کرد (Srinivasan et al., 2017). در شکل ۴ هشت عامل پایداری آب‌های زیرزمینی با به‌روزرسانی عوامل شناسایی شده توسط Pierce و همکاران (۲۰۱۳) و دسته‌بندی در چهار سیستم معرفی شده توسط Srinivasan و همکاران (۲۰۱۷) نشان داده شده است.

حکمرانی منابع آب ساختار تنظیم‌کننده فرایندهای مدیریتی و تصمیم‌گیری برای دستیابی به اهداف منابع آب همچون حفاظت از منابع آب است که در شکل ۴ نشان داده شده است. درواقع حکمرانی مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی موجود است که توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در سطوح مختلف جامعه را تنظیم می‌نماید. اخیراً در چندین مطالعه (Foster et al., 2010; UN FAO. 2016; Villholth and Conti. 2018; Owen et al., 2019; Gleeson et al., 2020; Ayyub, 2020) مروری بر ساختار و نقش مؤثر چارچوب‌های قانونی و نهادی حکمرانی

آب‌های زیرزمینی برای ارتقای پایداری آب‌های زیرزمینی ارائه شده است. دکترین‌های مالکیت آب برپایه زمین یا همجواری، تقدم، منابع مشترک، حقوق بومیان یا سایر دکترین‌ها شامل برخی محدودیت‌های حقوقی و نهادی هستند، که نیاز به توجه و بهبود این مسائل وجود دارد. به‌عنوان مثال، بهبود دکترین تقدم و توسعه با تعریف «استفاده کارامد» تحت قانون تخصیص منابع آب کانزاس از سال ۱۹۴۵، گامی ضروری در جهت پایداری آب‌های زیرزمینی این ایالت به‌شمار می‌روند. به‌طور مشابه با اجرای چارچوب آب اتحادیه اروپا در اسپانیا، برنامه‌ریزی و مدیریت آب‌های زیرزمینی به‌جای آنکه در مالکیت عمومی باشد هنوز در بخش خصوصی باقی مانده و متکی به امتیازات است. دو عامل اصلی سیستم اجتماعی ـ اقتصادی شامل: ۱. ارزش‌ها و اولویت‌های اجتماعی که به‌عبارتی حالت موازنه بین ارزش‌های اصلی و ۲. امکان‌سنجی اقتصادی که شامل هزینه پمپاژ، هزینه جایگزینی آب‌های زیرزمینی (نمک‌زدایی یا آب‌های سطحی تصفیه‌شده)، هزینه تغذیه و سایر هزینه‌های مرتبط با توسعه آب‌های زیرزمینی است.

شکل ۴. عوامل عملکرد پایدار و حکمرانی آبخوان برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی

از جنبه سیاستی زیرمجموعه‌ای از این هشت عامل در سیاستگذاری‌های پایداری آب‌های زیرزمینی گنجانده شده است. به‌عنوان مثال، در قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا، پایداری آب‌های زیرزمینی تحت عنوان «آب‌دهی پایدار» حداکثر مقدار آب زیرزمینی قابل برداشت سالیانه در یک دوره مدیریتی بلندمدت که برداشت به این میزان پیامدهای نامطلوب نداشته باشد، تعریف شده است. پیامدهای نامطلوب شامل افت مزمن سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش ذخیره آب‌های زیرزمینی، نفوذ آب شور، تخریب قابل توجه و نامعقول کیفیت آب، فرونشست زمین، کاهش آب‌های سطحی مرتبط با آب‌های زیرزمینی است. از جنبه علمی، ترکیبی از این عوامل به‌عنوان اهداف پایداری آب‌های زیرزمینی برای مطالعه و مدیریت آب‌های

زیرزمینی حوضه‌های خاص یا برای مدیریت کلی آب‌های زیرزمینی در موارد مختلف ارائه شده است.

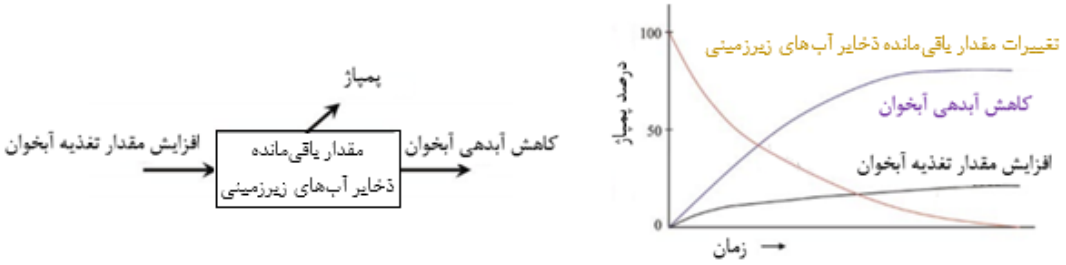
۴. تعریف پایداری آب های زیرزمینی

با توجه به هشت عامل مذکور، پایداری آب‌های زیرزمینی را می‌توان تابعی از عملکرد و مؤلفه‌های حکمرانی آبخوان تعریف کرد. تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی با معرفی مفاهیم آب‌دهی مطمئن، آب‌دهی پایدار، توسعه پایدار آب زیرزمینی و مدیریت پایدار آب زیرزمینی همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، مورد توجه و بحث قرار گرفته است.

شکل ۵. انتقال سیاستگذاری و مدیریت آب‌های زیرزمینی از آب‌دهی مطمئن به آب‌دهی، توسعه و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی

براساس مفهوم آب‌دهی پایدار، مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی به‌جای مؤلفه تغذیه برای استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی پیشنهاد شده است. مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، مجموع مقادیر افزایش تغذیه و کاهش آب‌دهی آب‌های زیرزمینی ناشی از پمپاژ تعریف می‌شود. در این‌حالت، استفاده پایدار از آب هیچ ارتباطی با تغذیه طبیعی (قبل از پمپاژ) ندارد، بلکه به مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی ناشی از پمپاژ بستگی دارد. با این‌حال، اندازه‌گیری مقدار تغذیه ضروری است، زیرا تغذیه آب‌های زیرزمینی آثار بلندمدتی بر کیفیت آب، عوامل اکولوژیکی و اجتماعی ـ اقتصادی خواهد داشت. بنابراین تعیین مقدار تغذیه طبیعی آبخوان و مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی به‌صورت پویا، در ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی ضروری است.

شکل ۶. مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی



مفهوم آب‌دهی پایدار آبخوان همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، موجودی آب‌های زیرزمینی، عوامل عملکرد و حکمرانی آبخوان را با هم ترکیب می‌کند. در این شکل مفاهیم مطرح در ادبیات پایداری آب‌های زیرزمینی در مقایسه با هم ارائه شده است. آب‌دهی پایدار به‌عنوان دامنه مقادیر محدود شده بین مقدار مجاز پایدار و حداکثر ذخیره مجاز آب‌های زیرزمینی تعریف شده است. منظور از حداکثر آب‌دهی پایدار، حداکثر مقدار آب زیرزمینی قابل برداشت مداوم است که برپایه بیشترین بهره‌وری از چرخه تولید آب تعیین می‌شود، البته مقدار ذخیره‌سازی ممکن است در افق برنامه‌ریزی متفاوت باشد. به همین ترتیب، پایداری فیزیکی «آب‌های زیرزمینی تجدیدپذیری که می‌توانند به‌صورت پویا پمپاژ شوند و منجر به تعادل سطح آب‌های زیرزمینی در بازه‌های زمانی (۱۰۰ سال) شوند» تعریف شده است. به‌منظور تعریف پایداری فیزیکی علاوه‌بر مفاهیم آب‌دهی مطمئن و تجدیدپذیر، توجه به مفاهیم تخلیه و تنش ضروری است (Webb and Ayyub, 2017; Alley et al., 2018; Wada, 2019; Gleeson et al., 2020; Elshall et al., 2020). علاوه‌بر این دو اصطلاح دیگر برای آب‌دهی تعریف شده است؛ آب‌دهی عملیاتی یا اجرایی که راه‌حل‌های منتخب برای اجرای عملیاتی یا فنی یک سیاست را توصیف می‌کند و آب‌دهی توافق گروهی مبتنی‌بر توافق گرودارن که از طریق فرایندهای حکمرانی مشارکتی یا تطبیقی قابل اجراست.

شکل ۷. مؤلفه‌های عملکرد و حکمرانی ذخایر آب‌های زیرزمینی و توسعه مفهوم آب‌دهی پایدار آبخوان

هنگام بحث در مورد مقیاس زمانی پایداری آب‌های زیرزمینی، باید به دو نکته اساسی توجه کرد. اول اینکه، برخی از آبخوان‌ها در مقیاس زمانی بشری تجدیدپذیر نیستند. به‌عنوان مثال، سیستم آبخوان نوبیا در شمال آفریقا، بزرگ‌ترین آبخوان فرامرزی تجدیدناپذیر جهان، حاوی حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی با کیفیت بالاست که میلیون‌ها سال قدمت دارد، اما تغذیه آن بسیار ناچیز است. برای جلوگیری از بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان‌هایی با دوره‌های تجدیدپذیری طولانی مانند آبخوان نوبیا پیشنهاد می‌شود که اهداف پایداری کمی‌وکیفی آبخوان بلندمدت و در افق زمانی ۵۰ تا ۱۰۰ سال با مشارکت جامعه تعیین شود. دومین نکته کلیدی هنگام بحث در مورد مقیاس زمانی پایداری آب‌های زیرزمینی، افق برنامه‌ریزی ارزیابی است. مقیاس زمانی ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی باید به‌وضوح مشخص شود که تابعی از عملکرد و حکمرانی آبخوان است. بنابراین برای تعیین مقیاس زمانی ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی توجه به عواملی نظیر زمان تجدیدپذیری آب‌های زیرزمینی، عدالت درون‌نسلی و بین نسلی با توجه به نظرات گروداران مختلف با اهداف متفاوت توصیه شده است.

بخش دوم ـ رابطه سیاستگذاری و علم پایداری آب‌های زیرزمینی

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع آب شیرین در سطح جهانی نیز به‌دلیل برداشت‌های بیش از حد در معرض مسائلی نظیر کاهش کیفیت آب، فرونشست زمین و غیره قرار دارند. برای کاهش و حتی معکوس کردن روند این آثار، سیاستگذاری و استفاده از روش‌هایی که مدیریت آب‌های زیرزمینی را به سمت نتایج پایدارتر هدایت کند، حیاتی است. علم، سیاستگذاری و راهکارهای عملی، فرایندهای اجتماعی هستند که توسط افراد، هنجارها و سازمان‌های مرتبط در درک و انتقال اطلاعات و همچنین در تصمیم‌گیری در رابطه با پایداری آب‌های زیرزمینی نقش مؤثری دارند. ازاین‌رو در ادامه تاریخچه مدیریتی منابع آب‌های زیرزمینی برخی کشورها بیان شده و سپس مواردی که منجر به موفقیت طرح‌های پایداری در این کشورها شده، استخراج و در بخش آسیب‌شناسی مدیریت منابع آب ایران استفاده شده است.

۱. از جنبه سیاستگذاری

بسیاری از سیاست‌ها و مقررات مربوط به آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان که هدف آنها ایجاد تعادل بهتر در استفاده‌های رقابتی است، شروع به ترکیب سیستم‌های یکپارچه‌تر برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی کرده‌اند، به‌عنوان مثال می‌توان به قانون آب ایالتی هاوایی، برنامه‌های مدیریت منابع آب حوضه موری ـ دارلینگ استرالیا، قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا و چارچوب آب اتحادیه اروپا اشاره کرد. در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری در تقاضای آب هاوایی مشاهده شده که این امر موجب تشدید و تسریع رقابت برای منابع آب شده است. مسئله اصلی در هاوایی بازتخصیص بهینه آب مازاد در میان تقاضاهای متفاوت و اغلب متضاد گرودارن است. ازاین‌رو کمیسیون آبی با هدف بازتخصیص منابع آب مازاد در میان کاربران و بهره‌برداران تشکیل شده است. دو کاربر عمده رقابت‌کننده منابع آب، مصارف توسعه شهری و مصارف کشاورزان و محیط‌زیست است. مصارف توسعه شهری که عمدتاً مربوط به شرکت‌های سودآور است، منجر به رشد اقتصادی منطقه می‌شود. به همین منظور ایالت هاوایی به‌منظور مدیریت انعطاف‌پذیر و پایدار منابع آب، تخصیص منابع آب برای مصارف سودآور یا غیره را به قانونگذاران محلی با توجه به اولویت‌های اجتماعی واگذار کرده است. درواقع قانون آب ایالت هاوایی مبتنی‌بر مدیریت منابع مشترک می‌باشد که طبیعتاً مشارکت و توافق گروهی را به‌همراه دارد و براساس شناخت و ارتباط عمیق با محیط است. شکل ۸ نشان می‌دهد که قانون آب ایالتی هاوایی، آب‌های سطحی و زیرزمینی را به‌عنوان یک واحد یکپارچه در نظر می‌گیرد که مفاهیمی مانند خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی را هنگام تعیین پایداری آب‌های زیرزمینی بررسی می‌کند و همچنین از فرایند برنامه‌ریزی آب براساس مشارکت و توافق حمایت بیشتری می‌کند. درواقع دو مؤلفه کلیدی مشارکت تدریجی و در نظر گرفتن

چندفرایند (به‌عنوان مثال فرایندهای هیدرولوژیکی، خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی) در هاوایی، به‌عنوان امری ضروری برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی شناخته می‌شوند.

شکل ۸. نمونه‌ای از سیاستگذاری دولت هاوایی در مورد پایداری آب‌های زیرزمینی

حوضه موری ـ دارلینگ در منطقه‌ای کم‌بارش و نسبتاً خشک واقع شده و در دهه گذشته دوره‌های خشکسالی شدیدی را تجربه کرده است. اصلاحات آب در استرالیا در اوایل ۱۹۹۰ با نگرانی از کارایی و عدالت تخصیص آب و همچنین پایداری محیط زیست آغاز شد. طبق قانون اساسی استرالیا، ایالت‌ها مسئولیت اصلی مدیریت منابع آب را برعهده داشتند، اما اصلاحات اولیه براساس توافقنامه‌ها و اقدامات بین دولتی از طریق شورای دولت‌های استرالیا انجام می‌شد. در سال ۱۹۹۴ با ایجاد چارچوب ملی آب استرالیا اصلاحاتی با تفکیک مالکیت آب و زمین که از مهم‌ترین تغییرات سیستم حقوقی بازار استرالیاست و منجر به ایجاد حقوق آب و قوانینی برای تجارت و بازار آب شده است، ایجاد شد. این اصلاحات همچنین با پشتیبانی از یک سیستم اجرای نظارتی منجر به حمایت و حفاظت از منابع آب شده است. شاید اصلی‌ترین عامل کنترل برداشت بیش از حد از منابع را اصلاحات مبتنی‌بر بازار تعیین می‌کند.

اصلاحات بازار آب را می‌توان در سه فاز دسته‌بندی کرد. در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۴ بازارهای مناطق مختلف با یکدیگر همسو شدند و سپس تا سال ۲۰۰۷ این بازارها گسترش یافتند. از ۲۰۰۷ تا

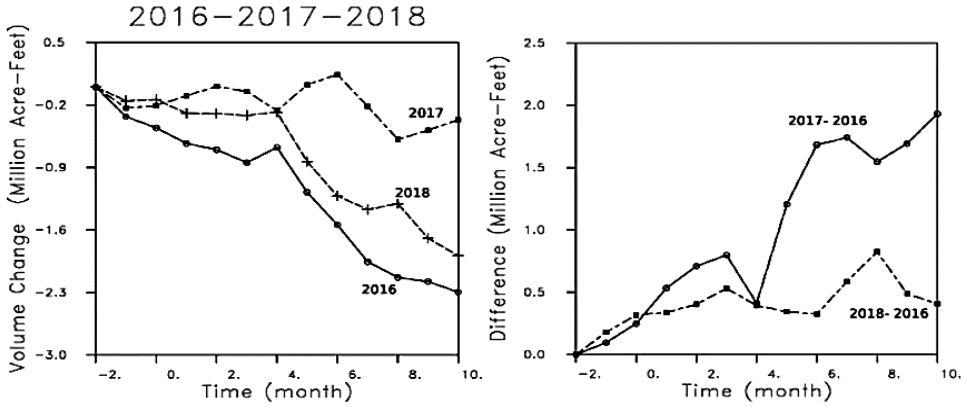
امروز نیز روند توسعه پایدار شکل گرفته و مسائل محیط زیستی مورد توجه واقع شده‌اند. ازجمله این اصلاحات می‌توان به تغییر حقابه‌های موجود، همکاری بخش‌های مرکزی و محلی و رفع موانع خرید و فروش حقابه‌ها اشاره کرد. همچنین دسته‌بندی هر سهم آب به سه جزء اصلی شامل حق دسترسی به آب، میزان تخصیص آب و مجوز استفاده از آب که هر جزء آن مقررات خاصی دارد، است. درواقع با وجود یک سیستم مناسب برای ذخیره آب بر روی رودهای اصلی منطقه، نوسانات در تأمین آب کنترل و مدیریت شده است. از طرفی با ابتکار عمل در زمینه سیاستگذاری منابع آب چارچوبی جامع با استفاده از یک رویکرد مبتنی‌بر کاهش عدم قطعیت به‌منظور انتخاب آستانه‌های مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی ایجاد شده است. این امر با در نظر گرفتن شاخص‌های مناسب برای ارزیابی اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی در برنامه‌های نظارت بر آب گنجانده شده تا اطلاعات جمع‌آوری شده در طول زمان منجر به بهبود تصمیمات مدیران شود. درواقع فرایند مدیریت تطبیقی استرالیا در مواردی که اطلاعات کافی در مورد اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی وجود ندارد، مبتنی‌بر «اصل احتیاط» است. علاوه‌بر این، تحت قانون ملی مدیریت پایدار آب استرالیا، ارزیابی ریسک‌محور راهبردهای مدیریتی به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست ضروری است.

آب‌های زیرزمینی در ایالت کالیفرنیا نقش حیاتی در تأمین منابع آب دارد و ۸۵ درصد جمعیت برای تأمین منابع آب وابسته به آب‌های زیرزمینی هستند. براساس قانون آبی که از سال ۱۹۱۴ به‌منظور تعیین حقابه سیستم منابع آب سطحی تصویب شده بود، بهره‌برداران محدودیت‌های ایجاد شده برای منابع آب سطحی را با برداشت از آب‌های زیرزمینی جبران کردند که این امر موجب اضافه‌برداشت از آب‌های زیرزمینی شده بود. از طرفی با توجه به خشکسالی که از سال ۲۰۱۲ آغاز شده بود، در سال ۲۰۱۴ قانون مدیریت پایدار منابع آب تصویب شد. براساس این قانون مدیریت و برنامه‌ریزی هر آبخوان و حوضه به‌صورت محلی با توجه به خصوصیات فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی هر حوضه تعیین خواهد شد. مطابق با این قانون پایداری تمامی آبخوان‌ها تا سال ۲۰۴۰ به ثبات رسیده و در صورت امکان احیا می‌شوند (افزایش تراز آب) و این برنامه در افقی ۵۰ساله برنامه‌ریزی شده است. با توجه به این قانون آبخوان‌های بحرانی با بیشترین نرخ برداشت در اولویت برنامه‌های مدیریت پایدار قرار گرفتند، به‌نحوی که در تمامی این محدوده‌ها طی سه سال و تا سال ۲۰۱۷ دستگاه‌های اجرایی و تصمیم‌گیرنده در زمینه مدیریت آب زیرزمینی شناسایی و ایجاد شد و برنامه پایدارسازی این آبخوان‌های بحرانی با میزان برداشت و افت بالا تا سال ۲۰۲۰ تدوین و اجرا شده است. برنامه پایدارسازی دیگر آبخوان‌ها نیز باید تا سال ۲۰۲۲ تدوین و اجرا شود. متولیان این برنامه سازمان‌های پایداری محلی و دو سازمان ایالتی (اداره منابع آب و اداره کنترل منابع آب) هستند. سازمان‌های محلی وظیفه تدوین برنامه‌های پایدارسازی آبخوان، اداره منابع آب وظیفه همکاری فنی و مالی با این سازمان‌های محلی را دارند و اداره کنترل منابع آب

مانند سازمان‌های محیط‌زیست نقش پلیسی و مداخله را برعهده دارند. در صورتی که آژانس‌ها و دستگاه‌های اجرایی و تصمیم‌گیرنده در مناطق و محدوده‌های مختلف نسبت به برنامه‌ریزی و اجرای صحیح اقدامات با مشکل مواجه شوند، اداره کنترل منابع آب ایالتی به‌عنوان مرجعی بالاتر باید به موضوع ورود پیدا کرده، برداشت از آبخوان را محدود، برنامه موقتی تهیه و روند اجرای برنامه‌ها را تسهیل نماید.

به‌عنوان مثال تغییرات ذخیره آبخوان در دره مرکزی کالیفرنیا در فواصل ماهیانه در شکل ۹ بررسی شده است. در سمت چپ شکل، تغییر حجم تجمعی در بازه یک‌ساله از اکتبر سال قبل تا اکتبر سال ذکر شده، رسم شده است. در سال ۲۰۱۶ یک افت چشمگیر در تغییرات حجم وجود دارد که ادامه اثر خشکسالی شدید سال ۲۰۱۵ است. به دنبال آن طی دوره مرطوب از اکتبر ۲۰۱۶ تا اکتبر ۲۰۱۷، کاهش حجم آبخوان به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. کاهش تجمعی حجم آبخوان در سمت راست شکل نشان داده شده است. تفاوت بین سال‌ها کاملاً قابل توجه و نشان‌دهنده پاسخ سریع سیستم آبخوان به تغییرات میزان پمپاژ است. با وجود این باید توجه داشت، حتی در سال مرطوب از اکتبر ۲۰۱۶ تا اکتبر ۲۰۱۷ نیز کاهش کلی در حجم وجود دارد. با مقایسه ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ تغییرات کمتر چشمگیر است که به‌دلیل خشکسالی سال ۲۰۱۸ می‌باشد.

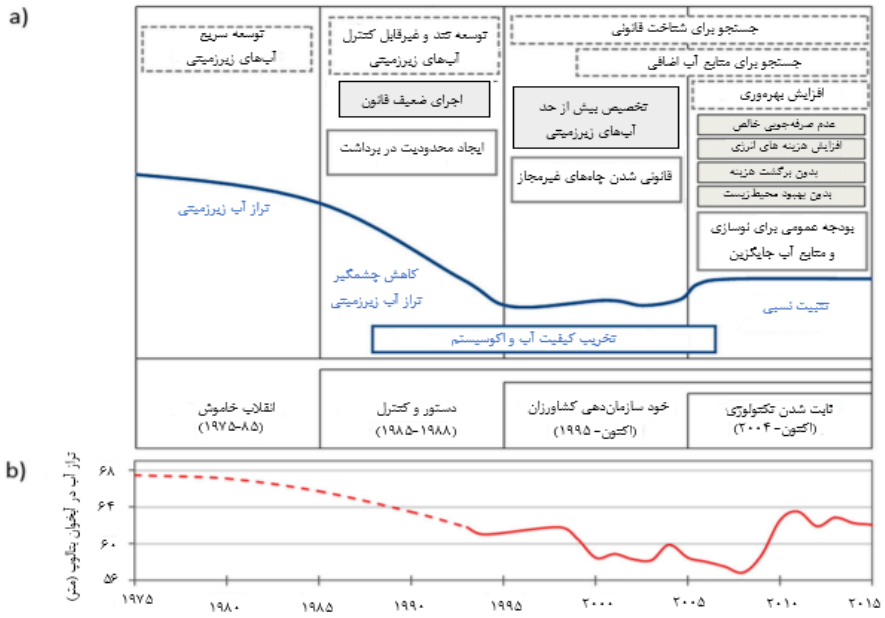
شکل ۹. تغییرات کل حجم آبخوان در بازه یکساله (چپ) و تفاوت بین تغییرات حجمی آبخوان (راست) در دره مرکزی کالیفرنیا از ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ (Vasco et al., 2020)



چارچوب آب اتحادیه اروپا یک چارچوب قانونی برای کشورهای عضو اتحادیه اروپا با هدف محافظت از آب‌های سطحی (داخلی، انتقالی، ساحلی) و آب‌های زیرزمینی است. اهداف محیط‌زیستی در چارچوب آب اتحادیه اروپا براساس سیاست‌های جامعه‌ای است که در پیمان اتحادیه اروپا برای حفظ، محافظت و بهبود کیفیت محیط با استفاده از «اصل احتیاط» و اصلاح آسیب‌های محیط‌زیستی از طریق پرداخت هزینه، تعیین شده است. ملل داخل اتحادیه اروپا موظفند مقدار و کیفیت آب‌های زیرزمینی را براساس

مقادیر آستانه تعیین شده برای جلوگیری از «هرگونه آسیب قابل توجه به اکوسیستم‌های سطحی که به آب‌های زیرزمینی وصل هستند» حفظ کنند. به‌طور مشابه، ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی نباید منجر به کاهش قابل توجه کیفیت اکولوژیکی یا شیمیایی چنین آب‌های سطحی شود و نیز آسیب جدی به اکوسیستم‌های سطحی که مستقیماً به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند، وارد نکند. به این ترتیب، چارچوب آب اتحادیه اروپا نیز خواستار مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی با ارزیابی صحیح تأثیر آب‌های سطحی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌شود. به‌عنوان مثال وزارت محیط زیست اسپانیا تحت چارچوب آب اتحادیه اروپا به‌منظور تدوین طرح اصلاحی برای مدیریت آب‌های زیرزمینی با برگزاری هم‌اندیشی عمومی با حضور اساتید دانشگاه، نمایندگان بهره‌برداران، سازمان‌های آب و مؤسسات تحقیقاتی، تغییر رویکرد دولت اسپانیا از مدیریت متمرکز به مدیریت مشارکتی را الزامی نمود. از دلایل موفقیت این مدیریت مشارکتی که منجر به جلب رضایت مردم محلی شده و موجبات مشارکت و همکاری هرچه بیشتر جهت بهبود و تسریع در اجرای پروژه‌ها را فراهم آورده، ساده‌سازی فرایندهای اداری با هدف مشارکت سازمان‌های خودمختار در فرایندها، ایجاد درک عمومی میان کاربران در مورد آثار منفی الگوهای برداشت کنترل نشده و استفاده از نظرات بهره‌برداران و عموم مردم و تشریح دلایل انجام هر پروژه توسط انجمن‌های کاربری است. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است اجرای طرح مدیریت مشارکتی در اسپانیا از سال ۲۰۰۰ منجر به بهبود وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی در این کشور شده است.

شکل ۱۰. روند بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی اسپانیا (Vélez-Nicolás et al., 2020)



بررسی سیاستگذاری‌های معاصر که درس‌هایی از توسعه یا تجزیه و تحلیل چنین سیاست‌هایی را ارائه می‌دهند، نشان می‌دهد که این سیاست‌ها عمدتاً از نگرانی برای تخریب اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی، خدمات مرتبط با اکوسیستم‌ها و عوامل اقتصادی ـ اجتماعی و فرهنگی ناشی می‌شوند و بر مشارکت و توافق گروهی گرودارن تأکید دارند. عامل اصلی دیگر، استفاده عمومی ناپایدار از منابع آب است که به‌ویژه در دوره‌های تنش آبی منجر به نگرانی در مورد کمیت و کیفیت منابع آب می‌شود. برای مثال، نتایج یک مطالعه مقایسه‌ای بین آلمان و آفریقای جنوبی، نشان داده است که تخریب اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی باعث ایجاد تغییر در سیاست‌های محلی می‌شود. ازاین‌رو سیاستگذاری صریح و اعلام شده خدمات اکوسیستم برای تضمین حکمرانی مؤثر آب‌های زیرزمینی ضروری است. همچنین تعامل گروداران نیز به‌عنوان یکی از عوامل مهم سیاستگذاری پایداری آب‌های زیرزمینی شناخته می‌شود. مطالعه‌ای که با همکاری کاربران کشاورزی آب‌های زیرزمینی در فرانسه انجام شده، نشان می‌دهد که نیاز به آگاهی‌بخشی بیشتر از طریق ارائه بهتر نتایج به کاربران آب‌های زیرزمینی به‌منظور ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی وجود دارد. ارائه تحلیلی نتایج برای گروداران مستلزم تحلیل ساختارهای نهادی و تعامل گروداران اصلی است.

۲. از جنبه علمی

ارزیابی علمی پایداری آب‌های زیرزمینی برای اجرای سیاست‌های آب‌های زیرزمینی در مکان‌های مختلف جغرافیایی **مانند** استرالیا **(**Tan et al., 2012**)**، کالیفرنیا (Babbitt et al., 2018; Owen et al., 2019)، **چین** (Wang et al., 2018)، دانمارک (Refsgaard et al., 2010; Flindt Jørgensen et al., 2017)، فلوریدا (Asefa et al., 2014)، هند (Saha and Ray., 2019) کانزاس (Sophocleous, 2012)، هلند (Griffioen et al., 2014)، آفریقای جنوبی (Seward, 2010)، جنوب شرق آسیا (Sikdar, 2019)، اسپانیا (Lamas et al., 2015)، تگزاس (Sheng, 2013) و آبخوان فرامرزی High Plains ایالات متحده (Sophocleous, 2010) انجام شده است. چشم‌اندازهایی از توسعه سیاستگذاری‌ها، فعالیت‌های انسانی و پایداری آب‌های زیرزمینی در چین (Han et al., 2017)، منطقه مدیترانه (Leduc et al., 2017)، پاکستان (Archer et al., 2010)، اسپانیا (Custodio et al., 2019) و زیمبابوه (Muchingami et al., 2019) نیز ارائه شده‌اند. نتایج کلی که از این مطالعات منعکس می‌شوند، در سه چالش اصلی پیچیدگی علم پایداری آب‌های زیرزمینی، عدم قطعیت عمیق و شکاف موجود بین جامعه علمی دانشگاهی، سیاستگذاران و مدیران آب خلاصه شده است. این امر باعث می‌شود مطالعات تقاضامحور نباشند. بنابراین، توجه به این امر می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های کارامدتر و خروجی‌های علمی تقاضامحور برای مدیریت منابع آب شود. یک فرایند علمی برای اجرای

بهتر سیاستگذاری پایداری آب‌های زیرزمینی باید شامل موارد زیر باشد:

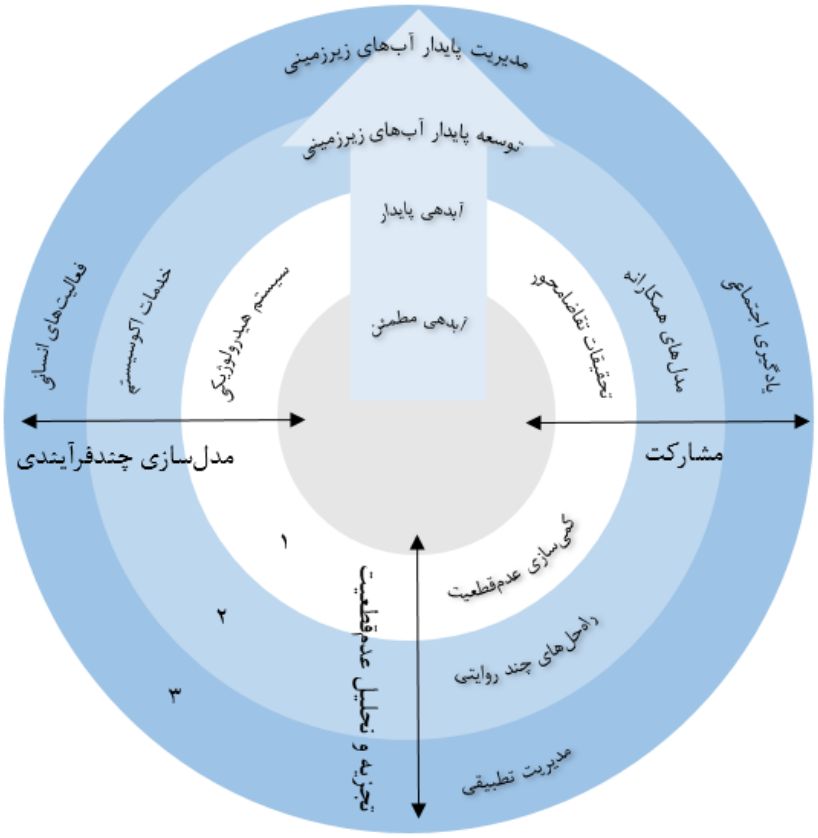
۱. بررسی چندفرایندی مسائل از طریق تجزیه و تحلیل بازخوردها، فرایندهای هم‌زمان و سناریوهای مختلف بین سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی، اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های انسانی،

۲. تحلیل روایتی مسائل از طریق ارزیابی منابع مختلف عدم قطعیت با ترکیب چندگانه مدل‌های آب زیرزمینی به‌همراه مدیریت تطبیقی برای بیان «آنچه شناخته شده است، چه چیزی ممکن است، چه چیزی ناشناخته است»،

۳. مشارکت به‌گونه‌ای که «نتایج علمی از تبادل مکرر، همکارانه و دوطرفه جوامع مدیریتی و سیاستگذار پدیدار شوند».

با توجه به سه مؤلفه فوق (مدل‌سازی چندفرایندی، تحلیل عدم قطعیت و مشارکت)، شکل ۱۱ نشان می‌دهد که چگونه این سه مؤلفه اصلی دارای سطوح درگیر و یکپارچه هستند.

شکل ۱۱. اجزای اساسی ارزیابی علمی و مؤثر پایداری آب‌های زیرزمینی مدل‌سازی چندفرایندی، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و مشارکت (تعداد دایره‌ها نشان‌دهنده افزایش درجه ادغام است)



داشتن اطلاعات دقیق در هر فرایند تصمیم‌گیری ضروری است. این اطلاعات باید توسط جامعه معتبر و دانشمندان و محققان قابل دفاع باشد. ازاین‌رو برای دستیابی به نتایج پایدار در مدیریت منابع آب، نیاز به درک مشترکی از سیستم منابع آب و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن وجود دارد که توسط علم مبتنی‌بر تحقیق و دانش تجربی محلی پشتیبانی شود. علاوه‌بر این، شناخت تفاوت‌های منطقه‌ای، نیازهای بومی و تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی مورد نیاز است. درواقع ارزیابی علمی دقیق و استفاده از رویکردهای مشارکتی می‌تواند با درک و پذیرش نیاز جامعه به مدیریت بهتر منابع آب کمک کند.

۱. مدل‌سازی چندفرایندی

مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. دو مؤلفه اساسی آن مدل مفهومی و مدل ریاضی است. درواقع مدل به مفهوم نمایش یک پدیده حقیقی یا نمایش مادی یک پدیده است که هدف آن واضح ساختن رفتار پدیده حقیقی تحت شرایط خاص است. یک سامانه واقعی مانند یک آبخوان، متشکل از مجموعه‌ای از فرایندها و پدیده‌های طبیعی فیزیکی و شیمیایی و فعالیت‌های انسانی است. بیان کمی‌وکیفی این پدیده‌ها و شناخت رفتار سامانه از طریق معادلات حاکم و مدل‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین مدل باید مبتنی‌بر وضعیت هندسی دقیق سامانه مورد مطالعه (به‌عنوان مثال آبخوان) و اطلاعاتی درباره پارامترهای فیزیکی (مرزهای ورودی و خروجی)، پارامترهای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی آن سامانه باشد.

۱-۱. مدل‌سازی هیدرولوژیکی

اولین مرحله از مدل‌سازی چندفرایندی برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که هر دو فرایند آب‌های سطحی و زیرزمینی را به‌صورت تلفیقی شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به خصوصیات و هندسه آبخوان، مدل‌های هیدرولوژیکی پایداری آب‌های زیرزمینی را براساس مفهوم باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی ارزیابی می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که پمپاژ از آب‌های زیرزمینی از تغذیه بلندمدت طبیعی آبخوان فراتر نمی‌رود. با توجه به ماهیت پویای مقدار باقی مانده ذخایر آب‌های زیرزمینی، یک توافق کلی وجود دارد که آب‌های سطحی و زیرزمینی باید به‌طور مشترک مدیریت شوند. با وجود این، می‌توان آبخوان را از تأثیر جریان سطحی جدا کرد و میزان آب آبخوان را فقط با در نظر گرفتن تغذیه جانبی آب از سازندهای زمین‌شناسی مجاور محاسبه نمود.

برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی از مجموعه گسترده‌ای از مدل‌های مکانیکی (به‌عنوان مثال مدل‌های عددی و راه‌حل‌های تحلیلی) و مدل‌های پدیدارشناختی (به‌عنوان مثال مدل‌های تحلیلی) استفاده می‌شود. دسته اول مدل‌ها توصیف مکانیکی سیستم‌های جریان، انتقال و رابطه گیاهان و زمین

با پوشش گیاهی را به‌گونه‌ای اتخاذ می‌کنند که معادلات حاکم فیزیکی با اصول اولیه سازگار باشد. مدل‌های پدیدارشناختی روابط، فعل و انفعالات بین متغیرها را فراتر از داده‌های اندازه‌گیری شده توصیف می‌کنند، به روشی که با تئوری و مشاهدات مطابقت داشته باشد، اما لزوماً مبتنی‌بر فیزیک نیستند. مدل‌های مکانیکی آب‌های زیرزمینی توزیعی می‌باشند و مدل‌های پدیدارشناختی می‌توانند از مدل‌های توده‌ای تا توزیعی و از مدل‌های جعبه سیاه کاملاً تجربی تا مدل‌های جعبه خاکستری که دارای عناصر مکانیکی هستند، متغیر باشند.

۲-۱. مدل‌سازی خدمات اکوسیستم[1]

اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی اکوسیستم‌هایی هستند که با دسترسی مستقیم یا غیرمستقیم به آب‌های زیرزمینی حفظ می‌شوند و شامل چشمه‌ها، تالاب‌ها، زمین‌های توربی، جنگل‌های مرطوب، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، نهرها، منطقه هیپورئیک، خور، تالاب‌های ساحلی، آبخوان و محیط زیست نزدیک سواحل است. خدمات اکوسیستم شامل تأمین خدمات (به‌عنوان مثال تأمین آب، غذا و چوب)، تنظیم خدمات (مانند تصفیه آب، تصفیه پسماند، تنظیم فرسایش، کنترل سیل، خشکسالی و زیستگاه گیاهان و جانوران)، خدمات فرهنگی (به‌عنوان مثال تهیه امکانات تفریحی، آموزشی، پژوهشی، زیبایی‌شناختی و معنوی) و حمایت از تولید سایر خدمات اکوسیستم مانند چرخه آب و غذا ضروری است. برای در نظر گرفتن خدمات اکوسیستم در ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی، دو سؤال مرتبط وجود دارد؛ با توجه به یک برنامه پمپاژ، چه مقدار آب اکولوژیکی در دسترس خواهد بود؟ نیازهای زیست‌محیطی اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی چیست؟ پاسخ سؤال اول با مدل‌سازی هیدرولوژیکی قابل انجام است و پاسخ سؤال دوم را می‌توان با استفاده از شاخص‌های هیدرولیکی، بیلان آب و مدل‌سازی هیدرولوژیکی تعیین کرد. چالش اصلی نحوه تعریف آستانه این شاخص‌هاست که برای پرداختن به این سؤال از رویکردهای مختلف نظیر تجزیه و تحلیل سناریوها، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدل‌سازی هیدرواقتصادی، روش‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی و برآورد نیاز آبی مبتنی‌بر داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود.

برای ارزیابی شاخص‌های خدمات اکوسیستم علاوه‌بر ابزار مدل‌سازی از سایر رویکردهای عملی مثل مدیریت تطبیقی هم استفاد می‌شود. در رویکرد مدیریت تطبیقی، راهبردها و راهکارها در طول زمان براساس درک بهتر و عمیق‌تر با تغییرات مشاهده‌ای تنظیم و اصلاح می‌گردد. با توجه به اینکه فعالیت‌های انسانی و نگرش‌های اجتماعی نسبت به اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی متنوع و متغیر هستند، مدیریت تطبیقی با رویکردی عملگرا، انعطاف‌پذیر و تجربی به‌عبارتی با «یادگیری در عمل» این

1. Ecosystem Services

نگرانی‌ها را کم‌رنگ می‌کند. به‌عنوان مثال، مدیریت تطبیقی هسته اصلی رویکرد استرالیا برای مدیریت اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی است. به همین ترتیب، دولت استرالیا برنامه‌های آبی را تحت عنوان «اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی» برای کمک به سازمان‌های دولتی استرالیا در بازنگری مدل‌های مفهومی، شناسایی مقادیر آستانه‌ای و مدیریت اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی توسعه داده است. مدیریت تطبیقی هنگامی که عدم قطعیت‌های زیادی در سال‌های اولیه مدیریت وجود دارد و منابع مالی محدودی برای نظارت در دسترس است، مورد نیاز است. مشارکت بخشی جدایی‌ناپذیر از مدیریت تطبیقی است، زیرا آستانه‌های شاخص‌ها و موازنه آنها نمی‌توانند به تنهایی توسط علم تصمیم‌گیری شوند و ارزش‌های جامعه نیز باید در نظر گرفته شوند.

۳-۱. مدل سازی فعالیت های انسانی

مدیریت پایدار منابع آب به‌دلیل عوامل نامعلوم و ویژگی‌های محدودکننده در تعامل سیستم‌های انسانی ـ آب‌های زیرزمینی و متغیر بودن این عوامل در مقیاس‌های زمانی و مکانی نیازمند ارزیابی تغییرات، فعل و انفعالات و بازخوردهای این عوامل در سیستم‌های مشترک منابع آبی ـ انسانی است. علم مدیریت یکپارچه منابع آب، هیدرولوژی اجتماعی و مدل‌سازی هیدرواقتصادی به مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی به‌منظور توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی پرداخته است. مدیریت یکپارچه منابع آب توسط شبکه مشارکت جهانی آب[۱] (GWP) «فرایندی که بدون به مخاطره انداختن پایداری اکوسیستم‌های حیاتی، توسعه هماهنگ و مدیریت آب، زمین و منابع وابسته را با هدف حداکثر کردن برآیند اقتصادی و رفاه اجتماعی و با شیوه‌ای منصفانه ترویج و ارتقا می‌دهد» تعریف شده است (GWP, 2000). درحالی که هیدرولوژی اجتماعی، مطالعه سیستم‌های پیوسته انسان ـ آب مبتنی‌بر هم‌تکاملی سیستم‌های اجتماعی و هیدرولوژیکی است که چگونگی وقوع بازخوردها و برهم‌کنش‌های متقابل را تجزیه و تحلیل می‌کند. در مقایسه‌ی هیدرولوژی اجتماعی و مدیریت یکپارچه منابع آب، می‌توان گفت مدیریت یکپارچه منابع آب چارچوبی است که در آن برهم‌کنش میان توسعه انسانی و منابع آب مورد جستجو قرار می‌گیرد، اما توانایی آن برای درک و دریافت هم‌تکاملی و برهم‌کنش سیستم پیوسته در بلندمدت نیست. درواقع مدیریت یکپارچه منابع آب بر سیاست‌محور بودن راهکارهای مدیریتی آب که بر چرخه هیدرولوژی تحمیل شده‌اند، تمرکز داشته و اغلب با استفاده از رویکردهای «سناریومحور» در جستجوی برهم‌کنش‌های میان مردم و آب است. اما تمرکز مطالعات هیدرولوژی اجتماعی بر مشاهدات، درک سیستم و پیش‌بینی مسیرهای آینده هم‌تکاملی سیستم‌های انسان- آب است. درواقع می‌توان گفت که هیدرولوژی اجتماعی علم بنیادین و زیربنای عملیاتی شدن مدیریت یکپارچه منابع آب می‌باشد. هدف مدل‌سازی هیدرواقتصادی نیز بهینه‌سازی اهداف اقتصادی سیستم‌های آبی تحت محدودیت‌های طبیعی

---

۱. Global Water Partnership

و اجتماعی و یا ارزیابی گزینه‌های بهینه برای ذخیره منابع آب و پروژه‌های توسعه منابع آب است.

درواقع مدل‌سازی هیدرواقتصادی به‌منظور پیاده‌سازی و ترکیب مفاهیم اقتصادی برای به حداکثر رساندن تابع سود و یافتن راه‌حل‌های عملی و بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند، اهداف اصلی مطالعات هیدرولوژی اجتماعی توسط Sivapalan و همکاران (۲۰۱۴) تحلیل الگوهای مختلف در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون بهمنظور درک ویژگی‌های سیستم‌های انسانی ـ بیوفیزیکی و برهم‌کنش‌ها و تعاملات آنها؛ توضیح و تفسیر واکنش‌های سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی، به‌منظور پیش‌بینی واکنش‌های آینده آن؛ شناخت بیشتر آب از جنبه‌های فرهنگی، اقتصادی و سیاسی همراه با شناخت ویژگی‌های بیوفیزیکی بیان شده است. مطالعات هیدرولوژی اجتماعی در سه مسیر تاریخی، مقایسه‌ای و فرایندی دنبال می‌شوند. هدف از مطالعات تاریخی یافتن الگوهای تاریخی برای پشتیبانی از تئوری‌ها و مدل‌های سیستم‌های پیوسته انسان- آب است. مطالعات مقایسه‌ای محرک‌های سیستم‌های پیوسته با یکدیگر به‌منظور درک تاب‌آوری و پایداری مصرف آب مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این دسته از مطالعات چالش‌هایی در شناسایی داده‌های مؤثر بر محرک‌های هیدرواقلیمی و اقتصادی- اجتماعی وجود دارد. دسته سوم مطالعات فرایندی است که براساس نتایج حاصل از مطالعات تاریخی و مقایسه‌ای به تبیین دامنه‌ای از نظریه‌های میان‌رشته‌ای و طرح‌ریزی مدل‌هایی از بازخوردهای مثبت و منفی میان جوامع انسانی و آب می‌پردازد. Kelly و همکاران (۲۰۱۳) سه حوزه‌ی کاربرد مطالعات هیدرولوژی اجتماعی را درک سیستم، پیش‌بینی و سیاستگذاری و تصمیم‌سازی معرفی می‌کنند و هر سه نوع مطالعات هیدرولوژی اجتماعی شامل تاریخی، مقایسه‌ای و فرایندی در این سه حوزه قابل استفاده هستند.

۲. تحلیل عدم‌قطعیت

سیاستگذاری‌های آب‌های زیرزمینی مستلزم تحلیل عدم‌قطعیت برای مدیریت ریسک می‌باشند؛ زیرا مدیران آب با پیچیدگی فزاینده سیستم‌های آبی ـ اجتماعی مواجه هستند، از طرفی برای حفاظت از منافع جمعی و پایداری منابع آب‌های زیرزمینی نیاز به تدوین راهبردهای بلندمدت دارند. در این بخش روی دو سؤالی که کمتر مورد توجه قرار گرفته، تمرکز شده است. اولین سؤال این است که چرا باید تحلیل عدم‌قطعیت انجام شود؟ برای پاسخ به این سؤال پنج دلیل ارائه شده است. سؤال دوم این است که چرایی تحلیل عدم‌قطعیت چیست که در مطالعات سعی در پاسخگویی به آنها وجود دارد. برای این منظور ۸ هدف برای تحلیل عدم‌قطعیت در پایداری آب‌های زیرزمینی استنباط شده است (Custodio, 2002; Maimone, 2004; Seward et al., 2006; Molina et al., 2012; Walton and Mclane, 2013). در این مطالعه با یک طبقه‌بندی ساده عدم‌قطعیت، در سه بخش عدم‌قطعیت پارامتری، عدم‌قطعیت مدل مفهومی و عدم‌قطعیت سناریو طبقه‌بندی شده است. عدم‌قطعیت پارامتری

مربوط به متغیر پیوسته یا گسسته پارامترهای مدل است. عدم‌قطعیت مدل مفهومی به روش‌های جایگزین، ساختارهای ریاضی، مفروضات و غیره اشاره دارد. عدم‌قطعیت سناریو به یک رویداد آینده اشاره دارد؛ به این ترتیب که سناریوها تصاویری از آینده یا آینده‌های جایگزین هستند (IPCC, 2000). برای مثال پارامتر تغذیه می‌تواند به‌عنوان پارامتر مدل با توزیع احتمال پیوسته (Mustafa et al., 2018)، توسعه و واسنجی چندین مدل مفهومی (Feng et al., 2018) و با ایجاد چندین سناریو (Pholkern et al., 2019) به‌منظور ارزیابی تغذیه‌های احتمالی در آینده بیان شود. همچنین از اصطلاح تحلیل عدم‌قطعیت به‌طورکلی برای اشاره به بحث، شناسایی، توصیف، تعیین، حل، اولویت‌بندی، کمّی‌سازی، کاهش یا برقراری ارتباط با عدم‌قطعیت استفاده می‌شود.

تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت در ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی حداقل به ۵ دلیل انجام می‌شود. اولین دلیل این است که تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت یک ابزار مفید برای یادگیری است. دوم، تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت، یکی از مؤلفه‌های ضروری برای دفاع علمی مدل می‌باشد. این امر به‌ویژه در مواردی که مدل‌ها یا نتایج مدل‌سازی‌ها توسط گروداران مورد منازعه قرار می‌گیرد، مورد نیاز و مفید واقع می‌شود. سوم، درک و پرداختن به عدم‌قطعیت یک سیاست مورد نیاز برای چارچوب‌های سیاستگذاری است که مفهوم مدیریت تطبیقی را به‌کار می‌گیرند. برای مثال، چارچوب مدیریت تطبیقی استرالیا با قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا همسو است، زیرا هر دو از سازمان‌های محلی می‌خواهند با دستیابی به اطلاعات جدید از طریق برنامه‌های نظارتی و اصلاح اقدامات برنامه‌ریزی و مدیریت، شکاف و عدم‌قطعیت علمی را با یکدیگر سازگار کنند. چهارم، برقراری ارتباط، بحث، حل و فصل و تصمیم‌گیری راهبردی درباره عدم‌قطعیت با گروداران می‌تواند یک ابزار مشارکت بسیار مؤثری باشد و منجر به افزایش مشروعیت مدل‌ها، نتایج مدل‌سازی‌ها و تصمیماتی برخواسته از این مدل‌ها شود. درنهایت تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت یک مؤلفه ضروری در ارزیابی مؤثر پایداری آب‌های زیرزمینی است.

تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت در ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی حداقل با ۸ هدف انجام می‌شود. اولین هدف بررسی محدودیت‌های مدل است. مدل‌سازی فرایندی است که به‌وسیله آن با سیستم مورد مطالعه ارتباط برقرار می‌شود و تحلیل عدم‌قطعیت فرایندی است که دانش ناقص در مورد سیستم مورد مطالعه، مورد سنجش قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، مدل‌سازان از تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت اغلب به‌عنوان ابزاری برای درک و انتقال عدم‌قطعیت و محدودیت‌های مدل استفاده می‌کنند. دوم، ایجاد سناریوهای پیش‌بینی‌کننده شامل سناریوهای پمپاژ، تغذیه، افزایش تراز دریا، انتقال آب و کاربری اراضی به‌منظور نشان‌دادن احتمالات آینده است. سوم، برای کمّی‌سازی تأثیر عدم‌قطعیت پارامتری، مدل مفهومی و سناریو در پیش‌بینی مدل‌ها می‌باشد. چهارم، تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت ابزاری برای شناخت مدل به‌منظور درک، ارزیابی و مقایسه نقش هر یک از پارامترهای عدم‌قطعیت‌دار در پیش‌بینی، اولویت‌بندی، واریانس و عدم‌قطعیت کلی مدل می‌باشد. روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت ابزار یادگیری برای پیشرفت

دانش در مورد مدل‌سازی تحت شرایط عدم‌قطعیت است که عمدتاً ترکیبی از مؤلفه‌های عدم‌قطعیت‌دار هستند. پنجم، به‌منظور ارزیابی ارزش فراهم‌آوری داده جدید می‌باشد. هدف از این کار طراحی برنامه‌های جمع‌آوری داده است به‌گونه‌ای که سود مورد انتظار داده‌های جدید بیش از هزینه آنها باشد. ششم، به‌منظور شناسایی یا طراحی برنامه‌های استوار می‌باشد. به‌عبارتی اگر عدم‌قطعیت به مسئله معرفی شود، قابلیت اطمینان و اعتبار یک طرح یا برنامه می‌تواند تغییر کند. هفتم، شناسایی مدل‌ها یا سناریوهای بحرانی است؛ پارامترهای بحرانی یا سناریوهای بحرانی به مواردی اطلاق می‌شود که بسته به سطح قابلیت اطمینان مطلوب، بیشترین تأثیر را بر راه‌حل دارند. درنهایت از تحلیل عدم‌قطعیت به‌عنوان ابزاری برای یادگیری بیشتر مدل، راه‌حل‌های مدل و درک عمیق‌تر مسئله استفاده می‌شود. درواقع هدف توسعه روش‌های تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت، ارائه بینش عمیق‌تر از مسئله‌ای است که مدل به آن می‌پردازد.

۱-۲. تحلیل چندروایتی

تخمین آب‌دهی پایدار از این جهت که علم آب‌های زیرزمینی پیچیده و دارای عدم‌قطعیت است، دشوار است. بنابراین، سؤال اساسی به‌منظور حمایت از تصمیم‌گیری‌های منابع آب، چگونگی ارائه علم است. علوم شناختی تأکید می‌کنند که مدل‌ها، با دانش نسبی پدیده‌های طبیعی را توصیف می‌کنند؛ ازاین‌رو با ترکیب دانش می‌توان فرضیه‌های جایگزین معتبری را فراهم نمود. بنابراین، رویکرد مدل‌سازی شناختی یک چارچوب مدل‌سازی چند فرضیه احتمالاتی مبتنی‌بر داده است که از احتمال به‌عنوان وسیله‌ای در برابر عدم‌قطعیت به‌منظور برآورد یک پارامتر استفاده می‌کند. در عمل، یک رویکرد چندمدله شناختی دارای مزایایی به‌شرح زیر است:

۱. از دیدگاه انتخاب مدل، با ارائه راه‌حل مسئله با استفاده از یک مدل، ریسک ابتلا به خطای نوع I که احتمال رد فرض صفر درست؛ یا خطای نوع II که احتمال عدم رد فرض صفر غلط است، را افزایش می‌دهیم.

۲. از دیدگاه میانگین مدل، ممکن است یک مدل واحد نتواند خصوصیات مهم مسئله را به‌دست آورد.

۳. از دیدگاه ترکیب مدل، یک گروه چندمدله احتمالی می‌تواند پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به یک گروه چندمدله قطعی داشته باشد.

۴. از دیدگاه شفافیت، اتخاذ یک چارچوب مدل‌سازی چندفرضیه‌ای احتمالی، راه‌حل‌های متعددی را برای مسئله موجود فراهم می‌کند.

۵. از دیدگاه شناختی، مدل‌های چندگانه مبتنی‌بر داده‌های مشاهداتی، با حذف سناریوهای نامطلوب و طبقه‌بندی سناریوهای مطلوب براساس قابلیت اطمینان، صحت و دقت در مقایسه با محاسبه عدم قطعیت پارامتری یک تک‌مدل با استفاده از خطای مدل تعبیه شده در تابع درست‌نمایی یا از طریق روش‌های دیگر مانند مدل‌سازی خطا، به‌دنبال بهبود ساختار مدل هستند و از طرف دیگر می‌توان از یک

تک‌مدل با توجه به خطای کلی، به‌منظور بهبود داده‌های مدل استفاده کرد.

۶. از دیدگاه تجربی، رویکرد شناختی تأکید دارد که برآورد پارامتر یا مدل منوط به داده‌های موجود است و بنابراین با دسترسی به داده‌های جدید، می‌تواند به‌روز شود. این موضوع تأکید می‌کند که در دیدگاه شناختی هدف از ابتدا شناخت یک مسیر توسعه نهایی نیست.

۷. از دیدگاه تعامل با گرودارن، با چنین فرایند تکراری که در آن علم با توجه به گزینه‌های احتمالی و جایگزین به‌روزرسانی می‌شود، علاوه‌بر ارائه مسیرهای توسعه از طریق تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، هدف مدل‌سازی از ارائه «پاسخ» به ایجاد «مشارکت دانشی» بین محققان و گروداران تغییر خواهد کرد.

به‌طور خلاصه، تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت در هنگام استفاده از مدل واحد، مجموعه چندمدله و یا هر دو (مجموعه چندمدله احتمالی) به‌ویژه هنگام مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی بسیار ضروری است. درواقع، بدون تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت، تحقیقات در معرض ریسک بیشتری برای رسیدن به نتایج نادرست هستند که می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های نامطلوب شود. تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت یک ابزار یادگیری مفید برای حل و فصل، درک و بهبود پیش‌بینی‌های مدل است. بین پیشرفت‌های اخیر در تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت و شیوه‌های فعلی شکافی وجود دارد. این شکاف لزوماً به‌دلیل کمبود دسترسی به داده‌ها و همچنین هزینه زیاد محاسبات روش‌های عدم‌قطعیت نیست. این شکاف به عوامل دیگری مانند کمبود منابع آموزشی نیز مربوط می‌شود. برای مثال، به‌استثنای چند مورد، منابع آموزشی گام به گام و عملی با مجموعه‌ای از روش‌ها و مثال‌ها در مورد تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت در هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی وجود ندارد. با وجود این پرداختن به عدم‌قطعیت یکی دیگر از زمینه‌هایی است که کمتر مطالعه شده و نیاز به توجه بیشتری دارد.

۲-۲. مدیریت تطبیقی

مدیریت تطبیقی به‌منظور مدیریت منابع طبیعی و ابزاری برای کمک به مدیران در شرایط عدمقطعیت، مطرح می‌شود. مدیریت منابع آب تطبیقی، نگرش یکپارچه و نظام‌مند برای بهبود مدیریت و ایجاد تغییرات با یادگیری از تجارب و نتایج حاصل از اعمال سیاست‌های مدیریت است. مدیریت تطبیقی زمانی که شکافی در دانش و عدم قطعیت‌هایی در خدمات اکوسیستم وجود دارد، ابزار مؤثری برای مدیریت به‌شمار می‌آید. این رویکرد مبتنی‌بر یادگیری به‌دلیل ویژگی‌های نامشخص منابع آب‌های زیرزمینی، خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی برای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی مورد نیاز است. مدیریت تطبیقی همچنین ابزاری برای محاسبه پارامترهای نامعلوم شناخته شده و ناشناخته است. درواقع مدیریت تطبیقی مناسب‌ترین رویکرد برای مقابله با عدم‌قطعیت دانش و تغییر رفتار جامعه نسبت به منابع آب‌های زیرزمینی است.

آگاهی از محدودیت‌ها و عدم‌قطعیت‌های دانش، می‌تواند به ایجاد رویکرد سیستمی یکپارچه در

مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی کمک کند. برای مثال، با توجه به مفاهیم مدیریت تطبیقی، رویکرد سیستمی یکپارچه‌ای در کانزاس توسعه داده شده است ابزارهای مدیریت تطبیقی این مطالعه ارتقای مشارکت مؤثر گرودارن، توجه به عدم‌قطعیت و یکپارچه‌سازی رویکردهای مختلف می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که چگونه این امر منجر به شکل‌گیری مدیریت محلی آب‌های زیرزمینی، تصویب حداقل استانداردهای جریان آب، اصلاح سیاست‌های آب‌دهی مطمئن در برخی مناطق و اجرای برنامه‌ریزی یکپارچه می‌شود. اجرای این رویکرد در کانزاس نشان می دهد که تصمیم‌گیری محلی بهترین راه برای محاسبه تغییرات محلی، آموزش عمومی و مدیریت جمعی در مدیریت منابع آب است. با این‌حال، ضروری است که آموزش و مشارکت عمومی تشویق شود، به‌طوری که پیچیدگی‌ها و محدودیت‌های سیستم منابع آب بهتر درک شوند و از اجرای راه‌حل‌های بیش از حد ساده اجتناب شود. به همین ترتیب، مطالعه‌ای در ماساچوست نشان می‌دهد که حرکت از مدیریت ثابت به سازگار (ظرفیت‌سازی و توانمندسازی حوضه، شناخت و قبول عدم‌قطعیت، مطالعه همه‌جانبه قبل از تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی تطبیقی) منجر به انتقال سیاست آب‌دهی مطمئن به سیاست آب‌دهی پایدار برای تأمین آب و پایداری محیط‌زیست در منطقه مورد مطالعه شده است. مدیریت تطبیقی یک ابزار سیاستگذاری برای رفع عدم‌قطعیت است، ازاین‌رو می‌تواند به‌منظور کاهش عدم‌قطعیت در زمان برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد. به‌عنوان مثال، به‌منظور ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی ایتالیا با استفاده از رویکرد مدیریت تطبیقی و دانش هیدروژئولوژیکی موجود به شناسایی پارامترهای نامعلوم پرداخته شده است. فرایند ارزیابی این تحقیق شامل مشارکت گرودارن (بهره‌برداران محلی)، تدوین برنامه یکپارچه با ارزیابی سالیانه همراه با به‌روزرسانی مداوم مدل عددی و سیستم نظارت بر کمّیت‌وکیفیت آب‌های زیرزمینی برای به‌روزرسانی مدل، اعتبارسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت می‌باشد.

۳. مشارکت

اصطلاح مشارکت در این بخش به هر سطحی از مشارکت گرودارن در برنامه‌ریزی، مدل‌سازی و مدیریت منابع آب اشاره دارد. گرودارن افراد یا نهادهای علاقمند یا دغدغه‌مند (برای مثال، مقامات آبی، سازمان‌های غیردولتی و یا اعضای جامعه) نسبت به مسائل هستند. مشارکت شامل بهره‌گیری از دانش نهادی و سنتی، تبادل تجربیات، درک عمیق‌تر، ایجاد توافق و افزایش تعهد نسبت به مدیریت منابع آب می‌باشد. اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت (IUCN) پیشنهاد می‌کند که «مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی مستلزم این است که کاربران در برنامه‌ریزی‌های مربوط به حکمرانی، طرح‌های تشویقی و مداخلات مدیریتی مشارکت کنند، در غیر این‌صورت مدیریت آب‌های زیرزمینی یک فعالیت تکنوکراتیک از بالا به پایین با نتایج نامطلوب باقی خواهد ماند».

اگرچه شناسایی و تعریف راه‌های مشارکت گرودارن عمدتاً بستگی به مطالعات موردی دارد، اما می‌توان در سه سطح طبقه‌بندی نمود. سطح اول مربوط به انجام ارزیابی‌های علمی تقاضامحور براساس نیازهای گرودارن برای کمک به حل مسائل دنیای واقعی در یک جامعه یا منطقه است. در این‌گونه تحقیقات این تضمین وجود دارد که نتایج علمی، پیشنهادهای مدیریتی و سناریوهای آینده با توجه به نیازها و اولویت‌های گرودارن طراحی می‌شوند. سطح دوم مشارکت و تعامل گرودارن از طریق توسعه مدل‌های مشارکتی و توصیف پیامدهای گزینه‌های جایگزین است. به‌عنوان مثال توسعه سیستم‌های اطلاعاتی یکپارچه شامل ارائه اطلاعات با کیفیت و بدون عدم‌قطعیت برای تسهیل مشارکت و یادگیری گرودارن اصلی، یکی از چهار چالش مهم علمی است که مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در دانمارک با آن مواجه هستند. همچنین مطالعاتی در دانمارک نیز بر اهمیت مدل‌سازی مشارکتی تأکید دارند و بیان می‌کنند که اگر گرودارن درگیر فرایند برنامه‌ریزی شوند و تصمیم‌های جمعی بگیرند، احتمال پذیرش نتایج تحقیق به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. درحالی که دو سطح قبل گرودارن اصلی منابع آب عمدتاً مدیران آب و نهادهای نظارتی آب متمرکز می‌باشند، با این‌حال می‌توان در سطح سوم به‌منظور مشارکت عمومی و تحقق یادگیری اجتماعی گرودارن را گسترش داد. از آنجا که مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی با فرایندهای سیستمی چندگانه و عدم‌قطعیت ناشی از درهم‌تنیدگی این سیستم‌ها تعامل دارند، ازاین‌رو یادگیری اجتماعی با مشارکت عمومی، ارزیابی‌های علمی و تصمیم‌گیری ارتباط متقابل دارد. ازاین‌رو برنامه‌های آموزش عمومی و ارتباطی قوی برای بهبود درک از ماهیت، پیچیدگی و تنوع منابع آب‌های زیرزمینی و اینکه چگونه این درک باید زمینه را برای شرایط اجرایی و محدودیت‌ها ایجاد کند، مورد نیاز است.

برای ارزیابی مؤثر و علمی پایداری آب‌های زیرزمینی نیاز به تدوین رویکردهای ساختار یافته‌تر در جهت مشارکت عمومی وجود دارد. به‌دلیل تنوع علایق و ادراک افراد، شناسایی اولویت‌های اجتماعی دشوارتر از اولویت‌های فردی است. این امر زمانی که مناطق آبی گسترده و منافع فردی بیش از حد متفاوت هستند، زمانی که افراد و شرکت‌هایی از منابع آب برای سود کوتاه‌مدت بهره‌برداری می‌کنند و سود فردی بر نیاز به حفظ منابع مشترک ترجیح داده می‌شود، می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. شناسایی اولویت‌ها و ترجیحات جامعه می‌تواند از طریق نظرسنجی، رأی‌گیری، مصاحبه و ابزارهای مشابه انجام شود و سپس برای ارزیابی‌های جامع می‌توان از مدل‌سازی عامل‌بنیان که هریک از عوامل از عناصر متنوعی برای درک محیط، تحلیل آن و درنهایت اقدام تشکیل شده است، استفاده نمود. لزوماً از مدل‌های آب زیرزمینی به‌عنوان ابزاری برای مشارکت گرودارن در تصمیم‌گیری استفاده نمی‌شود؛ گاهی روش تعامل با گرودارن شامل تحلیل کیفی از طریق مصاحبه و بررسی اسناد موجود به‌عنوان یک ابزار و فرایند میانجیگری برای حل و فصل مسائل و سیاستگذاری منابع آب است. برای مثال، به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری و مشارکت گرودارن در سناریوهای مدیریت آبخوان در دره سانتو دومینگو مکزیک، با استفاده از مفهوم

تاب‌آوری هیدرولوژی اجتماعی از طریق گفتگو، جلسات عمومی و نظرسنجی‌ها به مشارکت گروداران پرداخته شده است.

به‌طور کلی علم، توانایی تأثیرگذاری بر سیاست را در تمام مراحل فرایند سیاستگذاری، از تنظیم دستورکار، تدوین سیاست، تا اجرا و ارزیابی دارد. با وجود این تولید و استفاده از علم منطقی و هدفمند نیست. جهان‌بینی، دیدگاه‌ها و در بعضی مواقع، علایق افراد و سازمان‌های تولیدکننده علم در قالب‌بندی، طراحی و اجرای تحقیقات و همچنین تفسیر و ارائه نتایج علم تأثیرگذار هستند. ازطرفی تصمیم‌گیرندگان تولید، بازتولید، ارائه و استفاده از علم را مدیریت می‌کنند و می‌توانند به‌صورت انتخابی از علم برای حمایت یا پیشبرد سیاست‌ها یا برعکس، برای به تأخیر انداختن یا جلوگیری از اقدام استفاده کنند. به‌علاوه، علم و سیاست همیشه مستقیماً به عمل تبدیل نمی‌شود. گاهی چیزی که در عمل اتفاق می‌افتد ممکن است از سیاست دور باشد و گاهی حتی در صورت عدم وجود سیاست نیز اتفاق می‌افتد. درنتیجه، علم، سیاست و عمل ممکن است با هم هماهنگ عمل کنند یا نکنند. به‌طور خلاصه برای هماهنگی علم، سیاستگذاری و اقدامات مربوطه باید توجه داشت که ۱.فناوری‌های جدید ارزیابی آبخوان‌ها یا نظارت بر آب‌های زیرزمینی در سیاستگذاری‌ها یا تغییر شیوه‌های سیاستگذاری چگونه گنجانده شده است؟ ۲. آیا سیاستگذاری‌های جدید منجر به ارتقای دانش یا تولید دانش جدید در رابطه با مدیریت آب‌های زیرزمینی می‌شود؟ ۳. سیاستگذاری‌ها چگونه عدم قطعیت‌های موجود در سیستم منابع آب‌های زیرزمینی در بلندمدت را تعدیل یا به آنها پاسخ می‌دهند؟ ۴. نحوه تکامل اقدامات مربوط به آب‌های زیرزمینی با علم در غیاب سیاست یا قوانین چگونه است؟ ۵. کدام فرایندها و عوامل بر چگونگی اجرای سیاست‌های آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند؟ ۶. آیا سیاستگذاری‌ها و اقدامات مربوطه با در نظر داشتن سرعت تدریجی منجر به افزایش درک از سیستم‌های آب زیرزمینی می‌شود؟

ازاین‌رو برای جلوگیری از تأثیرات جبران‌ناپذیر کاهش آب‌های زیرزمینی، سیاست‌ها و اقدامات باید به‌منظور پشتیبانی از توسعه پایدار، تغییر یابد. سیاست‌ها و اقدامات متناظر با آنها که در غیاب درک صحیح از سیستم آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شوند، آثار ناخواسته یا غیرقابل‌پیش‌بینی به‌دنبال دارد. بنابراین استفاده از فناوری‌های جدید و پیشرفته به‌همراه افزایش رویکردهای نظارتی می‌تواند به توسعه درک بهتر از سیستم آب‌های زیرزمینی کمک نماید، با این‌حال برای اینکه علم در سیاستگذاری آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد، باید پویایی تعامل سیاست و علم در نظر گرفته شود. باید توجه داشت درک پویایی و تعامل سیاست و علم به شناخت عواملی که منجر به پذیرش، قابل استفاده و مفید بودن علم آب‌های زیرزمینی برای هدایت سیاستگذاری و اقدامات مربوطه می‌شود، بستگی دارد. از طرفی برای درک این پویایی باید به ارزیابی آثار متقابل سیاست بر اقدامات مربوطه و نقش علم توجه داشت. علاوه‌بر این، باید چگونگی تکامل اقدام‌ها و تأثیر آن بر توسعه علم و همچنین فرایندهای سیاستگذاری ارزیابی شود.

بخش چهارم ـ چالش‌ها، مسائل و مشکلات روش‌های رایج مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی

توسعه پایدار منابع آب در ایران در طی یک دهه اخیر همچون سایر نقاط جهان، پیش کشیده شده است و در این زمینه با چالش‌های بنیادینی روبه‌رو بوده و است. برای مثال می‌توان مدیریت و بهره‌برداری منابع آب مجن در شهرستان شاهرود را به‌عنوان نمونه‌ای موفق در نیم قرن مدیریت شبکه آبیاری نام برد. ازجمله مهم‌ترین آثار اجتماعی این مدیریت، برقراری عدالت در توزیع آب، قانونمند شدن نحوه توزیع آب، به حداقل رسیدن تخلفات و سرقت آب، کاهش میزان درگیری و نزاع بر سرآب، افزایش اعتماد به شرکت بهره‌بردار و کاهش میزان مهاجرت اهالی بوده است. آثار اقتصادی عمده نیز عبارتند از: بهره‌وری دراستفاده از آب، بهبود معیشت مردم، توسعه باغ‌ها، افزایش فعالیت‌های جانبی علاوه‌بر زراعت و باغداری در منطقه و اشتغال‌زایی در شهر. درخصوص آثار محیط‌زیستی نیز برای مهار سیلاب‌ها به کاشتن درخت و درختچه در حاشیه رودخانه مبادرت شده و همچنین با ساخت کانال‌ها، سیل تا حدود زیادی مهار شده است. علل موفقیت و پایداری نظام توزیع آب در شهر مجن، منطبق بودن نظام توزیع آب به خواست مردم، عدالت‌محور بودن این نظام، بازدهی بالای آبیاری، قابل کنترل بودن عملیات توزیع آب توسط کلیه آب‌بران و خصوصیت اجتماعی مردم منطقه در مشارکت‌پذیری و ترجیح فواید جمعی به منافع شخصی است.

با وجود تلاش‌های زیاد برای پیروی از جریان توسعه پایدار منابع آب در دشت‌های دیگر کشور، عمدتاً پروژه‌ها در پیاده‌سازی اصول پایداری با شکست مواجه می‌شوند، زیرا روند سابق مدیریت منابع آب با تخریب بیشتر محیط‌زیست و تعمیق نابرابری‌های اجتماعی تحت عنوان توسعه پایدار دنبال می‌شود. این وضعیت منجر به طرح مسئله به این‌صورت می‌شود که پایداری منابع آب در ایران با چه چالش‌هایی مواجه است؟ در این بخش با توجه به سیر تکاملی مفهوم پایداری ارائه شده در این مطالعه و با تکیه بر مفاهیم جهانی پایداری و با تحلیل اسنادی – تاریخی زمینه‌های هیدرولوژیکی، جمعیتی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی به بررسی چالش‌های پایداری در مدیریت منابع آب پرداخته شده است تا به قانونگذار در این زمینه کمک شود.

۱. چالش‌های اجرای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی

مسئله آب در کشور که ناشی از قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک، تغییرات اقلیمی، الگوی مصرف نادرست، اسراف‌کارانه و کم‌بهره، رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، شرب و صنعت، کم‌توجهی به دانش بومی، ارزشگذاری نامناسب آب، همراه با عدم سیاستگذاری و برنامه‌ریزی برای مدیریت سیستم‌های منابع آب است؛ نزدیک به دو دهه است که تبدیل به مسئله‌ای مهم برای مردم و سیاستگذاران شده است. با توجه به وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی کشور در سال ۱۳۸۴ طرح

«تعادل‌بخشی، تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب» با هدف افزایش بهره‌وری از منابع آب‌های زیرزمینی و به تعادل رساندن آبخوان‌های دشت‌های ممنوعه و بحرانی تعریف و دارای ردیف اعتباری شد. طبق این طرح قرار بود طی برنامه‌ای ۲۰ ساله (چهار بازه ۵ ساله) محدوده‌های مطالعاتی کشور به تعادل برسد. این طرح به‌دلایل مختلف همچون عدم تأمین اعتبار مناسب و عدم همکاری سایر دستگاه‌ها از پیشرفت چندان مطلوبی برخوردار نبود و درنهایت متوقف شد. سپس در سال ۱۳۹۲ با فعال شدن مجدد شورای عالی آب، نهایتاً مبدل به طرحی تحت عنوان «طرح احیا و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی کشور» مشتمل بر ۱۵ پروژه گردید.

با توجه به عدم تحقق کامل اهداف طرح تعادل‌بخشی موجود، با رویکرد حاکم بر آن به‌عنوان تنها برنامه کشور برای بهبود و علاج‌بخشی وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور، در آسیب‌شناسی این طرح عوامل اثرگذار را می‌توان به عوامل مختلف سیاسی، جمعیتی، اقتصادی، اجتماعی، آمایشی و حکمرانی با توجه به نبود همکاری، هماهنگی و برنامه‌ریزی‌های لازم بین سازمان‌های مسئول در سطح ملی و استانی، خلأهای قانونی و عدم اجرای قوانین موجود، بی‌توجهی به برخورد با متخلفان، سیاست‌های توسعه‌محور در بخش کشاورزی و به‌تبع آن تأمین آب به هر نحوی برای این بخش؛ مالکیت خرد اراضی، عدم معرفی فرصت‌های شغلی جایگزین برای کاهش وابستگی اشتغال به منابع آب، عدم توجه به تنش‌های مسائل آبی و پیامدهای فردی و اجتماعی آن و عدم تخصیص اعتبارات لازم تقسیم نمود. از منظر سیاسی به‌دلیل در اولویت نبودن مسئله آب در کشور، نبود برنامه مدون و کارکرد بخشی و سلیقه‌ای سازمان‌های مسئول بدون توجه کافی به کمبود منابع آب کشور این امر مورد غفلت واقع شده است. از منظر نهادی، نهادهای سیاستگذار و نهادهای مختلف اجرایی در مدیریت منابع آب ایران نقش دارند که به‌صورت کلی نهادهای سیاستگذار به‌دلیل نداشتن سیاست‌های منسجم و مشخص در زمینه درک مسئله آب و نهادهای اجرایی نیز با تأمین آب بیشتر در راستای اهداف سازمان‌های ذی‌ربط بدون توجه به تبعات اجرای اقدامات بخشی بر منابع آب، باعث بدترشدن وضعیت منابع آبی کشور شده‌اند.

براساس اسناد و گزارش‌های موجود، عمده مصرف آب کشور که منجر به کسری ذخیره ۵ میلیاردی سالیانه در کشور شده است، مربوط به حوضه‌هایی است که مرکز سیاسی – اقتصادی – جمعیتی کشور می‌باشند. به‌عبارتی سه عامل تمرکز اداری – سیاسی – تصمیم‌گیری، تمرکز سرمایه – صنعت و تمرکز امکانات خدماتی – فرهنگی – آموزشی – بهداشتی – رفاهی در یک چرخه هم‌افزا با افزایش طبیعی جمعیت و مهاجرت به تمرکزگرایی شدت بخشیده و منجر به مشکلات زیادی ازجمله مصرف بیش از حد آب، انتقال آب از سایر حوضه‌ها و جذب تولیدات دامی و کشاورزی از سایر مناطق شده است. متعاقباً با اعمال فشار به طبیعت، ایجاد کمبود آب در سایر مناطق و به‌هم زدن اکوسیستم با ایجاد آلودگی، تعادل منطقه را به‌هم می‌زند. درنتیجه شدت یافتن و پیچیده شدن روند تمرکزگرایی در چند دهه اخیر

در ایران، مدیریت پایدار منابع آب را به چالش کشیده است. درواقع زندگی در طبیعت بیابانی ایران نیازمند دقت بسیار زیاد در استفاده و مدیریت آب است، درحال حاضر ضمن ابلاغ آمایش سرزمین در سیاست‌های کلی نظام یک نسخه تصویب شده به‌عنوان سند ملی آمایش و اسناد استانی آمایش توسط شورای‌عالی آمایش سرزمین تصویب شده است. پس از تصویب سند آمایش برخی استان‌ها، اجرای آن در دستور کار قرار گرفته است. تلاش برای اجرای آمایش در استان تجربه ارزشمندی است که برخی از ملاحظات اجرای آمایش ملی را آشکار می‌سازد. از طرفی اجرای چنین سند آمایش سرزمین به‌همراه الزاماتی که مانع ادامه روند مهاجرت‌ها و شکل‌گیری طرح‌های توسعه مختلف در بخش‌های شهری، صنعتی و خارج از این برنامه باشد، بسیاری از طرح‌های توسعه‌ای کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد که در ساختار سیاسی کشور آمادگی برای چنین نظامی در فرایند توسعه‌ای وجود ندارد.

علاوه‌بر وضعیت اجتماعی و جمعیتی، عدم انطباق تقسیمات هیدرولوژیکی با تقسیمات سیاسی کشور مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مشکل ساختاری در بحث مدیریت پایدار منابع است. درواقع عدم انطباق مرزبندی‌های سیاسی ملی و فروملی با مرزبندی‌های هیدرولوژیک، چالش‌های فراوانی را از منظر پایداری محیط‌زیستی و همچنین از منظر بیلان منابع آب و تعیین منابع ورودی و خروجی حوضه‌ها ایجاد کرده است. طرح این مسائل در بحث مدیریت پایدار منابع آب در سطح کلان فراملی و فروملی با اصل محلی‌سازی مدیریت پایدار منابع آب منافات دارد و ازسوی دیگر چالش‌های محیط‌زیستی به‌همراه دارد. این چالش مختص ایران نیست و در بسیاری از حوضه‌ها ازجمله بین کلان‌شهرهای آمریکا رقابت شدیدی بر سر تخصیص منابع آب وجود دارد. با این‌حال توجه به این مسئله که هریک از این چالش‌ها در مکان‌های مختلف و از زمینه‌های مختلف برخاسته، چشم‌اندازهای متفاوتی را طلب می‌کند.

عدم تطابق تقسیمات سیاسی کشور با وضعیت اقلیمی یا به‌طور دقیق‌تر با حوضه‌های آبریز رودخانه‌ها عطش مستقل شدن هر منطقه‌ای را به‌همراه داشت. مهم‌ترین تأثیر استان‌سازی‌ها به‌منظور جذب امکانات در شیوه مدیریت مناطق فارغ از توجه به اقلیم مدیریت بخشی‌نگری در کشور است. توسعه با رویکرد بخشی‌نگری منجر به عدم تعادل منطقه‌ای، از دست دادن منابع، توان‌های اکولوژیکی و نابرابری‌ها و غیره می‌شود. بررسی وضعیت کنونی کشور بیانگر آن است که تمرکزگرایی و بخشی‌نگری در برنامه‌ریزی‌ها روند توسعه کشور را دچار اختلال کرده است، برخلاف رویکرد بخشی، آمایش سرزمین با رویکردی جامع و همه‌سونگر و در قالب توسعه فضایی سعی دارد با پدیده عدم تعادل منطقه‌ای برخورد کرده و راهکاری مناسب را برای تحقق توسعه‌های متوازن و پایدار در سطح سرزمین ارائه کند.

به‌طور کلی دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب که از لحاظ اقتصادی کارامد، از لحاظ سیاسی و اجتماعی عادلانه و از لحاظ محیط‌زیستی پایدار باشد؛ نیازمند یک نظام حکمرانی منسجم و قدرتمند به‌همراه الزامات اجرایی در ساماندهی توسعه بخش‌های مختلف و همین‌طور مراکز جمعیت شهری و روستایی در بخش‌های مختلف کشور است. از بین ابعاد چهارگانه حکمرانی آب بعد سیاسی پیش‌شرط

تحقق سایر ابعاد حکمرانی آب است. از طرفی تحقق بعد سیاسی خود معطوف به مشارکت گروداران است و لازمه ایجاد مشارکت مؤثر وجود زمینه نهادی و قانونی برای حضور نمایندگان گرودارن در فرایند تصمیم‌گیری است که مقدمات آن باید در اسناد قانونی مرتبط ایجاد نمود. سه کنشگر اصلی حکمرانی آب دولت، بخش خصوصی و جامعه مدنی هستند که درحال حاضر به‌دلیل تمرکز قدرت در دست نهادهای دولتی، عدم حضور رسمی بخش خصوصی و غیبت نهادهای وابسته به جامعه مدنی در نظام سیاستگذاری کشور منجر به از میان رفتن مؤلفه‌های حکمرانی و درواقع فقدان حکمرانی شده است. درحالی که سیستم قنات به‌عنوان سازگارترین و پایدارترین روش استحصال و بهره‌برداری از منابع آب و مبتنی‌بر مشارکت حداکثری بهره‌برداران و گروداران در مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب کشور نشان‌دهنده نمونه عینی پایداری محوری و مشارکت محوری در مدیریت سنتی منابع آب ایران است. اما درحال حاضر با در پیش گرفتن مدیریت نوین منابع آب مسئله کم‌آبی همیشگی ایران به بحران آب تبدیل شده است.

در سیستم‌های پیچیده منابع آب، وقوع یک رخداد یا ایجاد تغییر در بخشی از سیستم، نتیجه گردآمدن مجموعه‌ای از علل است که در حوزه‌ها و سطوح گوناگون و در بستری تاریخی، منشأ درون سیستمی و برون سیستمی دارند. ازاین‌رو برای مواجهه مناسب با چنین رخدادهایی نیاز به سیاستگذاری مبتنی‌بر پیچیدگی وجود دارد که با فهمی میان‌رشته‌ای نخست در ارتباط با مسائل پیش آمده، وضعیت سیستم هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی، جغرافیایی و سیاسی مورد نظر ارزیابی شود و دوم آنکه مشخص شود این وضعیت در نتیجه گردآمدن چه متغیرها و عواملی است. در شرایط کنونی، با توجه به اجماع نسبی به‌وجودآمده در مورد بحرانی بودن شرایط و البته اندک بودن زمان برای مواجهه بهینه با چالش‌های منابع آب، تمرکز متن حاضر بر ارائه راهکارهای بلندمدت و بحرانی است.

۲. پیشنهادهایی برای مواجهه با چالش‌های اجرای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی

با توجه به چالش‌های مطرح شده، بی‌توجهی به مقیاس مکانی و زمانی و عدم توجه به خصوصیات طبیعی، هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی حوضه‌ها در تدوین برنامه‌های مدیریت منابع آب از مواردی است که نیاز به تجدیدنظر دارد. برای مواجه با این مسئله نیز، برنامه مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا مد نظر قرار داده شده است. طبق این قانون، مدیریت آب‌های زیرزمینی باید در سطح حوضه و توسط سازمان محلی پایداری آب‌های زیرزمینی انجام شده و سازمان‌های دولتی نقش نظارتی و حمایتی داشته باشند. درواقع در این قانون متولیان مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی، سازمان‌های پایداری محلی و دو سازمان ایالتی شامل اداره منابع آب و اداره کنترل منابع آب هستند. اداره کنترل منابع آب کالیفرنیا مهم‌ترین سازمان دولتی در زمینه مدیریت منابع آب در سطح ایالت، در همه مراحل

برنامه‌ریزی، اجرا و ارزیابی بر سازمان‌های پایداری محلی نظارت دارد. سازمان کنترل منابع آب کالیفرنیا چارچوب کلی یک برنامه پایداری آب‌های زیرزمینی که باید توسط سازمان‌های محلی پایداری آب‌های زیرزمینی تدوین گردد را مشخص کرده است.

نکته مهم در مدیریت منابع آب کالیفرنیا این است که سازمان کنترل منابع آب کالیفرنیا برای کمک به سازمان‌های محلی پایداری آب‌های زیرزمینی برای تدوین برنامه پایداری، گزارشی با نام بهترین روش‌های مدیریت را منتشر کرده است. در این گزارش بیان شده است که یک حوضه می‌تواند به سه شکل مدیریت شود. حالت اول آن است که در کل حوضه یک سازمان پایداری آب‌های زیرزمینی تشکیل شود و تمامی بهره‌برداران و شرکت‌های محلی حوضه در آن مشارکت داشته باشند. حالت دوم آن است که در یک حوضه چند سازمان پایداری آب‌های زیرزمینی تشکیل شود و برای کل حوضه یک برنامه پایداری آب‌های زیرزمینی مشترک تهیه گردد. درحالت سوم در یک حوضه چند سازمان پایداری آب‌های زیرزمینی تشکیل شده و هرکدام یک برنامه پایداری برای محدوده خود آماده می‌کنند، در این‌حالت باید یک تفاهمنامه همکاری بین سازمان‌های پایداری آب‌های زیرزمینی حوضه تدوین شود و در آن حدود اختیارات و مسئولیت‌های هرکدام مشخص شود. اهم پیشنهادهای بلندمدت در این زمینه عبارتند از:

۱. لزوم ایجاد و تصویب قوانین و مقررات مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی با تأکید بر اصل مدیریت محلی آب‌های زیرزمینی،

- تأمین اختیار و کمک‌های فنی و مالی لازم سازمان‌های محلی به‌منظور توسعه و تدوین اقدامات در سطح محلی یا منطقه‌ای،

- لزوم حفاظت از منابع آب توسط دولت در صورت عدم مدیریت پایدار سازمان‌های محلی،

- ضرورت ارزیابی آب‌های زیرزمینی و تعیین خصوصیات حوضه در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت به‌منظور تهیه گزارش‌های لازم برای پشتیبانی از اقدامات مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی،

- ضرورت مدیریت تلفیقی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با توجه به تغییرات اقلیم و ... ،

- شناخت و حفظ اقتدار شهرها و شهرستان‌ها براساس اختیارات پلیس برای مدیریت آب‌های زیرزمینی.

۲. لزوم ایجاد یک نهاد فرابخشی و تأکید بر نقش نظارتی و حمایتی این نهاد و سازمان‌های دولتی مربوطه در زمینه:

- مدیریت منابع آب در سطح حوضه در همه مراحل برنامه‌ریزی، اجرا و ارزیابی سازمان محلی،

- همسوسازی فعالیت‌های وزارت نیرو و جهاد کشاورزی به‌منظور ارتقای بهره‌وری و توجه بـه ارزش اقتصـادی، امنیتـی و سیاسـی آب در اسـتحصال، عرضـه و نگهـداری مصـرف آب،

- ابلاغ و تصویب دستورالعمل آمایش سرزمین،

- افزایش میزان استحصال آب (افزایش بهره‌وری) از طریق به حداقل رساندن هدررفت آب نه افزایش تأمین از طریق روش‌های سازه‌ای،

- کمک به پیشبرد اهداف با ارزیابی چارچوب‌ها، انتشار راهنماها، ارائه بهترین تجربه‌ها و ... ،
- بررسی و ارزیابی مطابقت برنامه‌های مدیریتی ارائه شده توسط سازمان‌های محلی با اهداف کلی مدیریت پایدار کشور،
- بررسی آثار متقابل برنامه‌های پایداری ارائه شده توسط سازمان‌های محلی هم‌جوار.

۳. لزوم ایجاد سازمان پایداری آب زیرزمینی محلی با مشارکت شرکت‌های محلی، سایر بهره‌برداران و گرودارن آب‌های زیرزمینی در یک حوضه با هدف:
- رهبری حوضه آبریز در زمینه توسعه و ارتباط با سایر حوضه‌ها،
- تهیه، پیاده‌سازی و مدیریت برنامه پایداری آب‌های زیرزمینی،
- پایش، ارزیابی و گزارش‌دهی روند دستیابی به اهداف پایداری.

۱-۲. ضرورت شناخت واقعیت‌های وضع موجود از منظر قانونی، اقتصادی، اجتماعی، عرضه و تقاضای آب و ... با توجه به سیر تکاملی و جهانی مفهوم پایداری آب‌های زیرزمینی

بهره‌برداری فعلی از آب‌های زیرزمینی در ایران براساس حجم ثابت انجام می‌شود که مبتنی‌بر معیاری معقول با توجه به معیارهایی نظیر افت کمّیت‌وکیفیت آب‌های زیرزمینی، فرونشست، کاهش آب‌های سطحی، پیشروی آب شور در مناطق ساحلی و کاهش ذخایر استراتژیک برای برداشت آب از این منابع نیست. از طرفی این مجوزها توانایی سازگاری با تغییرات اقلیم را ندارند و نمی‌توان توسط آنها پیامدهای نامطلوب بهره‌برداری از آب زیرزمینی را مدیریت کرد. ازاین‌رو با توجه به برنامه مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا، اولویت‌بندی و توجه به حوضه‌های بحرانی براساس معیارهای ارزیابی عملکرد آبخوان برای تعیین وضعیت پایداری منابع آب‌های زیرزمینی ضروری است. از طرفی با توجه به این اولویت‌بندی و مقیاس‌های مکانی و زمانی حوضه‌ها باید حداقل تراز، تراز بهره‌برداری پایدار و برنامه‌های مدیریتی برای هر آبخوان با توجه به واقعیت هر حوضه تدوین شود. سپس سازمان‌های محلی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب شناسایی و یا ایجاد شود.

براساس قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا که در سال ۲۰۱۴ تصویب شده است، باید تمامی مناطق و محدوده‌ها جهت پایدارسازی و تثبیت منابع آب زیرزمینی تا سال ۲۰۴۰، اولویت‌بندی شوند. در همین راستا، در سال ۲۰۱۴ سازمان منابع آب کالیفرنیا حوضه‌ها و زیرحوضه را برای تقدم مدیریت به اولویت بالا، متوسط و پایین تقسیم‌بندی نمود. سپس آبخوان‌هایی با شرایط بحرانی و بیشترین نرخ برداشت در اولویت اجرای برنامه‌ها قرار گرفتند. ابتدا سازمان‌ها و دستگاه‌های اجرایی و تصمیم‌گیرنده در زمینه مدیریت آب‌های زیرزمینی در این آبخوان‌های بحرانی شناسایی و تا سال ۲۰۱۷ ایجاد گردید. سپس تدوین و اجرای برنامه‌های پایدارسازی و ثبات شرایط آبخوان‌هایی که دارای میزان

برداشت و افت بالا و بحرانی هستند تا سال ۲۰۲۰ ضروری شد. برنامه پایدارسازی دیگر آبخوان‌های دارای اولویت متوسط، بالا و پایین تا سال ۲۰۲۲ تدوین و اجرا خواهد شد. همچنین تمامی آبخوان‌ها باید تا سال ۲۰۴۰ به ثبات رسیده و در صورت امکان احیا شوند (افزایش تراز آب) و این برنامه در یک افق ۵۰ ساله طراحی و تدوین شده است. بنابراین لازم است در تدوین برنامه‌های مدیریت منابع آب از اقدامات سریع، بدون مطالعه، پراکنده و منقطع جلوگیری شود. اهم پیشنهادهای بلندمدت عبارتند از:

- اولویت‌بندی و تعیین حوضه‌های بحرانی با توجه به محدودیت‌های طبیعی و هیدروژئولوژیکی (میزان منابع آب تجدیدشونده براساس جمعیت و میزان مصارف، ساختار زمین‌شناسی، افت کمّی‌وکیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی و ...)؛ فرهنگی و اجتماعی (ازهم‌گسیختگی سنت‌های فرهنگی حاکم بر بهره‌برداری منابع، ضعف سرمایه اجتماعی، بی‌تأثیر بودن نقش بهره‌برداران در مدیریت و برنامه‌ریزی، معیشت‌های جایگزین و ...)، اقتصادی (اندازه‌گیری دقیق پارامترها، بهبود بهره‌برداری، امنیت غذایی، امنیت آبی، بهبود بهره‌وری و بازده اقتصادی منابع آب و ...) و سیاسی در حوضه‌های آبی مشترک و مستقل در مقیاس‌های فروملی، ملی و فراملی،

- تعریف پایداری آب‌های زیرزمینی با توجه به:

- تجمیع و تلفیق دیدگاه‌های علمی، فیزیکی، حقوقی، مدیران و ناظران آبی در هر حوضه آبریز توسط سازمان محلی و با مشارکت گروداران محلی،

- تعریف ارزش‌های اصلی (ابزاری، ذاتی، ارتباطی، زیبایی‌شناختی، عدالت، سلامت‌عمومی، تاب‌آوری و توافق گروهی) برای تصمیم‌گیری متناسب با شرایط هر حوضه آبریز توسط سازمان محلی و با مشارکت گروداران محلی،

- تعیین عوامل پایداری با توجه به موجودی آب‌های زیرزمینی در حوضه‌های آبریز، عوامل عملکرد و حکمرانی آبخوان (نرخ تغذیه و شرایط ذخیره‌سازی، کیفیت آب، نرخ تخلیه و جریان‌های محیط‌زیستی، مخاطرات و تهدیدهای طبیعی، امکانات و فناوری‌های پمپاژ، تزریق، نظارت، ذخیره‌سازی، تصفیه و توزیع آب‌های زیرزمینی، محدودیت‌های قانونی و نهادی، ارزش‌ها و اولویت‌های اجتماعی و امکان‌سنجی اقتصادی) با توجه به عواقب غیرقابل قبول نظیر افت شدید آب‌های زیرزمینی، فرونشست، افت کیفیت آب‌های زیرزمینی، کاهش آب‌های سطحی، پیشروی آب شور در مناطق ساحلی و کاهش ذخایر استراتژیک برای برداشت آب در هر حوضه آبریز با توجه به شرایط هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی،

- تعریف مقیاس زمانی برای برنامه‌ریزی برنامه‌های پایداری و توجه به تحقق پایداری با توجه به امکان و زمان تجدیدپذیری هر آبخوان و تعریف افق برنامه‌ریزی یا مقیاس زمانی ارزیابی با توجه به عوامل عملکرد و حکمرانی آبخوان مخصوص هر حوضه آبریز.

۲-۲. تدوین برنامه‌های مدیریت منابع آب با مشارکت همه گرودارن، براساس شرایط اقلیمی و تغییرات پیش‌رو در فرایند گفتگوی اجتماعی و روشن شدن ابعاد مسئله آب

در طرح احیا و تعادل‌بخشی در برخی موارد تناقض‌هایی بین سیاست‌ها و دستورالعمل‌های مختلف وجود دارد. برای مثال وجود اختلاف مابین دو وزارتخانه نیرو و جهاد کشاورزی در ارتباط با مسئله آب که ناشی از تناقض در اهداف این دو وزارتخانه در برخورد با مباحث امنیت آبی و امنیت غذایی است، گاهی منجر به تناقض‌هایی در محدوده‌های مطالعاتی شده و مانعی برای اجرا و پیاده‌سازی طرح احیا و تعادل‌بخشی محسوب می‌شوند. بحث مهم دیگر ارتقای بهره‌وری و توجه به ارزش اقتصادی، امنیتی و سیاسی آب در استحصال، عرضه و نگهداری مصرف آب است. برای مثال جهاد کشاورزی در بحث امنیت غذایی عمدتاً روی افزایش تولید کار می‌کند، با توجه به این مسئله که منابع آب کشور بیش از این ظرفیت ندارد. از طرف دیگر وزرات نیرو به‌دنبال افزایش میزان استحصال آب از طریق به حداقل رساندن ضایعات طبیعی آب و توسعه سدسازی است. همچنین در دستورالعمل انسداد چاه‌های غیرمجاز، دستورالعمل تعیین تکلیف چاه‌های بدون پروانه و دستورالعمل مدیریت مشارکتی تناقض‌هایی وجود دارد که در زمان اجرا مشاهده می‌شود. زیرا در این قانون مشارکت مردم و سازمان‌های محلی به‌صورت یک سویه و با تأکید بر جنبه‌های اقتصادی تا جنبه‌های اجتماعی و روان‌شناختی که ساکنان حوضه‌ها با آنها سر و کار دارند، تعریف شده است؛ از بهره‌برداران محلی انتظار می‌رود در امر تعدیل حقابه‌ها، نصب کنتورها، مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز همکاری و مشارکت نمایند، اما در مقابل هیچ جایگاهی برای این ذی‌نفعان در امر برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در نظر گرفته نشده است. ازاین‌رو با عدم آگاهی از شرایط حاکم بر محیط، مسائلی نظیر بیکاری مردم محلی نادیده گرفته شده و فرصت‌های شغلی جایگزین برای بهره‌بردارانی که دارای چاه غیرمجاز هستند، معرفی نمی‌شود و به‌تبع آن مسائل اجتماعی که سبب تضعیف سرمایه اجتماعی و عدم مشارکت گرودارن و بهره‌برداران می‌شود، پیش می‌آید. این در صورتی است که در دستورالعمل مدیریت مشارکتی و مصرف بهینه و ... بر لزوم تقویت سرمایه اجتماعی و مشارکت بهره‌برداران تأکید شده است. پیشنهاد اصلی و کوتاه‌مدت در این زمینه عبارت است از:

- اولویت‌بندی پروژه‌های موجود در طرح احیا و تعادل‌بخشی با توجه به محدودیت‌های هر پروژه اعم از اقتصادی (مالی و اعتباری)، اجتماعی (بیکاری، معرفی نشدن فرصت‌های شغلی جایگزین، فقدان سرمایه اجتماعی در محدوده‌ها و ...)، محیط‌زیستی (آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، حقابه‌های محیط‌زیستی، ملاحظات محیط‌زیستی فعالیت‌های عمرانی و ...)، محدودیت‌های نهادی و محدودیت‌های فنی هر پروژه و متعاقب آن برآورد بودجه‌های لازم برای بالا بردن امکانات سخت‌افزاری، نرم‌افزاری، تجهیزات و فناوری.

۳-۲. لزوم مدل‌سازی چندفرایندی (هیدرولوژیکی، خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی) با توجه به همه بخش‌های سیستم درهم تنیده و جفت شده آبی ـ انسانی- محیطی

تغییرات اقلیم، فعالیت‌های انسانی و آثار آن بر طبیعت، باعث ایجاد چالش‌های زیادی در سیستم زمین، چرخه هیدرولوژی آب و جوامع انسانی شده است که برای حل این چالش‌ها باید از رویکردهایی که سیستم انسانی و طبیعت را به‌صورت جفت شده در نظر بگیرد، استفاده شود. بنابراین برای بررسی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها، به‌عنوان سیستم‌های درهم تنیده جفت شده آبی ـ انسانی- محیطی، باید به مدل‌سازی چندفرایندی شامل مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی و مدل‌سازی خدمات اکوسیستم پرداخته شود. برای مدل‌سازی نباید تنها به یک جنبه از سیستم توجه داشت بلکه باید همه بخش‌های سیستم درهم تنیده و جفت شده آبی – انسانی ـ محیطی را در کنار هم مورد توجه قرار داد و به آثار متقابل بین بخش‌های مختلف و بازخوردهای آنها اهمیت داد. به این منظور باید درک درستی از رفتار هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، اقتصادی، اجتماعی و سیاستی سیستم‌های درهم تنیده داشت تا بتوان مدل مناسب هر حوضه را با توجه به شرایط خاص نظیر در دسترس بودن داده‌ها، نوع آبخوان و عوامل پایداری مورد انتظار ساخت، مدلی که ساختار مناسب‌تر، پارامترهای کمتر، زمان اجرای کوتاه‌تر و اجرای بهتر داشته باشد. از طرفی نبود آمار و اطلاعات به‌روز، شفاف و کارامد در حوزه آب از نقاط ضعف سیاستگذاری در کشور است. در این زمینه علم می‌تواند براساس روش‌های جدید نظیر سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی با اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای، همراه با مدل‌های انرژی، می‌توانند در تعیین توزیع مکانی پارامترهایی نظیر تبخیر و تعرق (Ogunjobi er al., 2018) به‌منظور تعیین بیلان منابع آب دشت‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مدل‌های پیش‌بینی عددی دارای خطاهایی هستند که بخشی از این خطاها از عدم قطعیت موجود در شرایط اولیه مدل نشئت می‌گیرد. برای داشتن یک پیش‌بینی با کیفیت بالا شرایط اولیه داده شده به مدل باید تا آنجا که ممکن است به حالت واقعی نزدیک باشد؛ به همین منظور می‌توان با استفاده از داده‌های ماهواره و برخی داده‌های دیده‌بانی سطح زمین و جو بالا در فرایند داده‌گواری برآورد بهتری از شرایط اولیه به‌دست آورد (Kurtz et al., 2017). از طرفی وجود داده‌های زمینی نظیر اطلاعات دستگاه‌های نفوذسنج و نیز داده‌های ثبت آنلاین در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (مثلاً روزانه) در چاه‌های مشاهده‌ای بسیار راهگشا است. لذا توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی دشت‌های کشور به این امکانات مجهز شوند. در این زمینه نیز می‌توان در ارائه و انجام برنامه‌ریزی‌های کارامد و اعمال مدیریت تطبیقی به برنامه مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی کالیفرنیا که به تغییرات اقلیم، رشد جمعیت، نوسانات تراز آب‌های زیرزمینی و اهداف حفاظت محیط‌زیستی توجه ویژه‌ای داشته است، الگوبرداری نمود. به‌عبارتی دیگر در قانون مدیریت پایدار کالیفرنیا، هیچ برنامه عملیاتی مطلق نیست و دارای پویایی، قابلیت ویرایش و اصلاح می‌باشد و متولیان محلی طی قوانین ایالتی ملزم به اجرای اقدامات

اصلاحی هستند. در این زمینه پیشنهادهای زیر مطرح است:

- ارائه استاندارد و دستورالعمل اجرایی و جامع در سطح کل کشور توسط سازمان‌ها و مراجع ذی‌ربط جهت پایش سیستم درهم تنیده جفت شده آبی ـ انسانی- محیطی و مدل‌سازی چندفرایندی شامل مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی و مدل‌سازی خدمات اکوسیستم،

- تکمیل اطلاعات آبخوان‌های مختلف (مستقل، مشترک، ساحلی و کارستی) کشور و مدل‌سازی هیدرلوژیکی با استفاده از مدل‌های عددی یا پدیدارشناختی با توجه به در دسترس بودن داده‌ها، نوع آبخوان و عوامل پایداری مورد انتظار جهت تعیین تراز بهره‌برداری پایدار آب‌های زیرزمینی برای هر آبخوان،

- شناسایی خدمات اکوسیستم منحصر به هر حوضه شامل تأمین خدمات (برای مثال تأمین آب، غذا و ...)، تنظیم خدمات (مانند تصفیه آب، تصفیه پسماند، تنظیم فرسایش، کنترل سیل، خشکسالی و زیستگاه گیاهان و جانوران)، خدمات فرهنگی (برای مثال تهیه امکانات تفریحی، آموزشی، پژوهشی، زیبایی‌شناختی و معنوی) و حمایت از تولید سایر خدمات اکوسیستم مانند چرخه آب و غذا در جهت کمک به مسائلی از قبیل تنظیم سند آمایش سرزمین و ... ،

- کمّی‌سازی و ارزشگذاری خدمات اکوسیستمی تأثیرگذار بر مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی از طریق تعیین شاخص‌های قابل اندازه‌گیری برای توصیف آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی در چندین مقیاس مکانی و زمانی با چندین فاکتور (فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی)،

- مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی برای بهبود، کارایی و پایداری سیستم‌های منابع آب زیرزمینی.

۴-۲. بهبود مدیریت مناقشات آبی با توجه به مدیریت تطبیقی، تحلیل های چندروایتی و سازگاری با کم آبی

درحال حاضر به‌دلیل کمبود و پراکندگی داده‌های مشاهداتی (اطلاعات ژئومورفولوژی، بوم‌شناسی و هیدرولوژی اکوسیستم‌ها)، شکاف دانش اکوهیدرولوژیکی، چگونگی وابستگی اکوسیستم‌ها به محرک‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و چگونگی پاسخ آنها به تغییرات پیش‌بینی‌شده هیدرولوژیکی در موضوعات و مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف به‌خوبی توصیف نشده است. ازاین‌رو انتخاب راه‌حل‌های مدیریتی متناسب با شرایط حوضه‌ها دشوار است. ازاین‌رو مدیریت تطبیقی منابع آب در استفاده بهینه از منابع کمیاب آب و جلوگیری از تنازعات و تطبیق شرایط فعلی دشت‌ها با شرایط اقلیمی در موفقیت مدیریت منابع آب اهمیت بسیار دارد. دولت کالیفرنیا برای مدیریت دوره‌های خشکسالی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار مدیریت آب، هرساله برنامه جامع خود را با هدف داشتن منابع آب قابل اعتمادتر طبق

شرایط جدید به‌روزرسانی می‌کند. درنتیجه کالیفرنیا توانسته با وجود مواجه بودن با خشکسالی‌های پی‌درپی، در سال‌های اخیر با به‌کارگیری مدیریت تطبیقی و استفاده از نوآوری‌ها، سرانه مصرف آب خود را کاهش دهد، رشد اقتصادی خود را حفظ کند و درنتیجه شاخص بهره‌وری آب را به‌شدت افزایش دهد. نوآوری‌ها و فناوری‌های کمک‌کننده به مدیریت آب در کالیفرنیا شامل مدیریت آبخیزداری، مدیریت برداشت، انتقال و ذخیره‌سازی و مدیریت تقاضای آب با ارزشگذاری صحیح آب است. مدیریت آبخیزداری مجموعه اقداماتی است که برای بهینه‌سازی عملکرد حوضه آبریز و رفع نیازهای محیط‌زیستی و انسانی انجام می‌شود. این اقدام‌ها شامل جمع‌آوری اطلاعات برای مدل کردن وضعیت آبخیز و استفاده از مدل‌های مناسب برای برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق‌تر آبخیز، ارائه تشویق‌های مالی به کشاورزان و مالکان زمین برای محافظت از اکوسیستم و مدیریت پایدار آبخیز به‌همراه کنترل و نظارت منظم، مدیریت آب‌های جاری و سیلاب‌ها برای ذخیره‌سازی و آبگیری آبخوان‌ها و پایش و گزارش وضعیت آبخوان‌ها می‌باشد. پیشنهادهای زیر در این زمینه مطرح می‌شود:

- تهیه دستورالعمل‌های لازم برای سازمان‌های مسئول به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات خام پایه مورد نیاز مدیریت منابع آب به‌عنوان سیستم‌های درهم تنیده جفت شده آبی ـ انسانی- محیطی برای پاسخگویی به محرک‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و تعامل و تغییرات محرک‌های فوق در موضوعات و مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و با توجه به خصوصیات متفاوت محدوده‌های مطالعاتی کشور،

- آموزش عمومی و مدیریت جمعی منابع آب به‌منظور مدیریت تطبیقی،

- ارزیابی وضع موجود و نکات ضعف عملکرد سیستم با توجه به محدودیت‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی و عدم‌قطعیت‌های موجود جهت تطبیق سیستم منابع آبی با شرایط پیش‌رو و پیشنهاد بهترین سناریو از نظر تطابق با شرایط منطقه مورد مطالعه به‌منظور رفع و یا کاهش چالش‌های مدیریت منابع آب در سیستم مورد مطالعه،

-ایجاد ساختاری در مقیاس محلی برای نظارت بر اجرای برنامه‌ها و دستورالعمل‌های مرتبط به‌منظور شناسایی سیاست‌های متناقض و ارزیابی آثار هر اقدام، یادگیری از آنها و توسعه راهکارهای جایگزین.

۵-۲. لزوم تحلیل عدم قطعیت

با توجه به بررسی مستندات موجود، روش‌های حاضر جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی، منابع عدم‌قطعیت زیادی به‌همراه دارند که در محاسبات هیدرولوژیکی در نظر گرفته نمی‌شوند. همچنین شدت اثر این عدم‌قطعیت‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به تعامل پویای سیستم‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی بستگی دارد. طولانی بودن زمان محاسبات مربوط به برآورد منابع آب زیرزمینی، با توجه به نبود اطلاعات لازم و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری برخی از مؤلفه‌های منابع آب، برآورد منابع آب زیرزمینی را با مشکلات فراوانی از لحاظ دقت و زمان کاربرد مواجه کرده است. ازاین‌رو در سیستم‌های

درهم تنیده آبی – انسانی ـ محیطی، نیاز به تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت به‌عنوان یکی از روش‌های مدیریت تطبیقی به‌عنوان ابزاری برای کمک به مدیران در شرایط عدم قطعیت به‌منظور ارتقای مشارکت مؤثر بهره‌بردران و تسهیل یکپارچه‌سازی تصمیمات مختلف ضروری است. در سیستم‌های درهم تنیده آبی ـ انسانی- محیطی، اقدام‌های مرتبط با عدم‌قطعیت تحت عنوان تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت به‌عنوان ابزاری جهت درک عمیق‌تر مسئله مورد بررسی، تجزیه و تحلیل ارزش داده‌ها، بررسی محدودیت‌های مدل، شناسایی و اولویت‌بندی منابع عدم‌قطعیت، برآورد کمی عدم‌قطعیت سیستم‌های مختلف، تدوین سناریوهای مدیریتی طبق اولویت‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی و شناسایی برنامه‌های استوار و انجام می‌شود. پیشنهادهای زیر در این زمینه مطرح می‌شود:

- تهیه دستورالعمل‌های لازم در سازمان‌های مسئول برای ارزیابی عدم قطعیت‌های موجود براساس ویژگی‌های محدوده‌های مطالعاتی با ارزیابی دقیق ابعاد علمی، هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی پروژه‌های طرح احیا وتعادل‌بخشی،

- مطالعه هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های مهم، تعیین حجم آب‌های زیرزمینی ذخیره شده و نیز چگونگی تغییرات کیفیت با افزایش عمق و شناخت کامل خصوصیات آبخوان،

- توجه به عدم قطعیت‌های داده‌های مشاهده‌ای نظیر عدم‌قطعیت داده‌های هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه،

- توجه به عدم قطعیت‌هایی پارامتری نظیر عدم شناخت کافی از مقادیر پارامترهای مدل مانند ضرایب هیدرودینامیکی سفره آب‌های زیرزمینی، عدم تعریف مناسب شرایط مرزی و شناخت حدودی جریانات زیرزمینی در محاسبه تبادلات مرزی جریان در مدیریت تلفیقی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی خاک و به‌تبع آن تغییرات مکانی نرخ نفوذ عمقی و هدایت هیدرولیکی در برآورد نرخ تغذیه به‌طور خاص و منابع آب‌های زیرزمینی با تأکید بر مقیاس‌های مکانی و زمانی،

- توجه به عدم‌قطعیت مدل مفهومی یا ساختار مدل‌ها نظیر عدم‌قطعیت‌های فراوان در برآورد تبخیر و تعرق و نرخ تخلیه جهت برآورد و تهیه بیلان منابع آب در مدل‌های مکانیکی و پدیدارشناختی،

- توجه به عدم‌قطعیت سناریوهای مورد ارزیابی که تصاویری از آینده یا آینده‌های جایگزین و مبتنی‌بر قضاوت شخصی.

۶-۲. تقویت رویکرد و نگاه اجتماعی در مدیریت منابع آب با استفاده از ظرفیت‌های اجتماعی سازمان‌های مردم‌نهاد و مشارکت تشکل‌های بهره‌برداران

مدیریت مناسب سیستم درهـم تنیده و پویای آبی ـ انسانی- محیطی، مستلزم این است که مدل‌سازان درک درستی از سیستم‌های فوق‌الذکر داشته و با اجزای مختلف آن آشنایی داشته باشند و با دید پویا و

گسترده مسائل آبی را تحلیل کنند. در گام دوم با برقراری ارتباط متقابل با گرودارن به بررسی نقش عوامل مختلف بر منابع آب و هیدرولوژی حوضه و آثار متقابل انسان ـ حوضه و بازخوردهای ایجاد شده به تدوین تحلیل‌های چندروایتی بپردازند. درنهایت با رویکرد مدیریت تطبیقی می‌توان سیستم‌های درهم‌تنیده منابع آبی را با پذیرش عدم‌قطعیت و تأکید بر یادگیری سازمانی و اجتماعی مدیریت نمود. به‌عبارتی با مدیریت تطبیقی، راهبردها و راهکارها در طول زمان براساس درک بهتر و عمیق‌تر با تغییرات مشاهده‌ای تنظیم و اصلاح می‌شود. بنابراین باید بستری برای مشارکت هریک از گرودارن یعنی دستگاه‌های اداری و مردم فراهم شود، تا گرودارن خود به مشکلات پی برده و وظیفه خویش را در قبال آن دانسته و نقش لازم برای حل مشکلات و تدوین مسائل مدیریتی را صادقانه ایفا نمایند. بنابراین باید ترتیبی اتخاذ گردد تا بین محققان، بهره‌برداران، مدیران و سیاستگذاران گفتگویی بر پایه اعتماد و عدالت شکل گرفته و فرایندی سازنده و توأم با درک متقابل برای حل موضوع بین دو طرف شکل گیرد. برای الگوبرداری در زمینه اعمال مدیریت مشارکتی نیز می‌توان به قانون مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی کالیفرنیا توجه داشت. در این قانون گروهی از گرودارن محلی جهت ارائه توصیه‌هایی برای دستیابی به مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی تشکیل شده است. ایجاد چنین سیستم مشورتی، مدیریتی منابع آب‌های زیرزمینی، ضمن تغییر رویکرد مدیریتی از بالا به پایین در کشور، به شناسایی بهتر مسائل آبی منجر می‌شود. زیرا هدف این فرایند مشارکتی توافق نهایی در مورد راه‌حل‌ها نیست، بلکه به‌دنبال شناسایی و درک عقاید، نگرانی‌ها و ایده‌های گرودارن است. بنابراین مدیریت سازگار و مشارکتی منابع آب، مهم‌ترین راهکار برای حفظ منابع محدود در شرایط بحرانی حاضر می‌باشد. برای اجرای این رویکرد، نیاز به قانون خاصی نیست؛ در قوانین و مصوبات موجود، این امر می‌تواند اجرا شود. اما در عمل برای پیاده‌سازی آن باید این نوع نگاه و رویکرد باید به سازمان‌های مسئول و مدیران مربوطه آموزش داده شود و از اصول مدیریت تطبیقی براساس عدم قطعیت‌های موجود مد نظر قرار گیرد. پیشنهادها در این زمینه عبارتند از:

- آگاه‌سازی، توانمندسازی و فرهنگ‌سازی گرودارن با توجه به جایگاه و ویژگی‌های اجتماعی‌شان برای مشارکت در مدیریت منابع آب،

- لزوم قبول، شناخت و تحلیل عدم‌قطعیت دقیق در ابعاد هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی پروژهای طرح احیا و تعادل‌بخشی،

- لزوم توجه به عملیات مشارکت گرودارن در جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات جهت پایش، برداشت داده‌های مورد نیاز مؤلفه‌های بیلان، داده‌های اجتماعی و اقتصادی مورد نیاز با توجه به ویژگی‌های هر محدوده مطالعاتی جهت برآورد منابع آب زیرزمینی و مدیریت منابع آب.

۷-۲. ایجاد بازار آب برای حرکت به سمت واقعی شدن بهای آب و بهینه سازی مصرف

با وجودی که در خط‌مشی‌های مدیریت منابع آب کشور عناوینی مانند «بهره‌وری»، «اقتصاد آب» و حفاظت از منابع آب وجود دارد، اما در عمل همچنان به شیوه‌های سنتی، بدون توجه به مدیریت نوین منابع آب به استحصال و مدیریت منابع آب با رویکرد مدیریت سازه‌ای پرداخته می‌شود. مهم‌ترین راهکار استرالیا و کالیفرنیا برای افزایش بهره‌وری مصرف آب و برقراری تعادل بین عرضه و تقاضا از طریق سازوکار قیمت و استفاده از بازار تجارت آب است. با این رویکرد، انگیزه بهره‌برداران برای استفاده بهینه از آب بیشتر خواهد بود، زیرا قیمتگذاری آب و شکل‌گیری بازار عامل مؤثری در تصمیم‌گیری کشاورزان برای کشت محصول است. ایجاد بازار از طرفی تبعات اجتماعی مهمی نیز به‌دنبال دارد، شفاف‌سازی و آگاهی دقیق مردم از وضعیت عملکردی و سازوکار بازار منجر به مشارکت عموم جامعه می‌شود. تفکیک مالکیت آب و زمین از مهم‌ترین تغییرات سیستم حقوقی بازار استرالیا محسوب می‌شود. همچنین دسته‌بندی هر سهم آب به چند بخش مجزا تأثیرات بسیار مثبتی داشته است. روش کار به این‌صورت است که هر حقابه به سه جزء اصلی شامل حق دسترسی به آب، میزان تخصیص آب و مجوز استفاده از آب تقسیم شده است و هر جزء آن مقررات خاصی دارد. در این نوع دسته‌بندی حقابه با انجام معاملات، هزینه‌های بهره‌برداری برای سایر کاربران آن سیستم آبی تغییر نکرده و تنها مبادلاتی انجام می‌شود که در میزان آب در دسترس کل منطقه تأثیر منفی نداشته باشد. در استرالیا معاملات در دو گروه دائمی و موقت یا فصلی صورت می‌گیرد. معمولاً فعالیت در بازار حقابه‌های موقت بسیار بیشتر از حقابه‌های دائمی است. پیشنهادهای زیر در این زمینه مطرح می‌شود:

- بررسی نحوه تخصیص و صدور مجوز بهره‌برداری از چاه‌های زیرزمینی به‌منظور شناسایی وجود بازار پس از انجام مطالعات لازم برای طرح بازار آب و تعیین وظایف مختلف دستگاه‌ها و بخش‌های مرتبط در حوضه‌های مطالعاتی کشور،
- بررسی نحوه انجام مبادلات در حوضه‌های مطالعاتی کشور،
- به رسمیت شناختن تجارت آب و رفع محدودیت‌های قانونی و سازمانی موجود در این زمینه (پس از آسیب‌شناسی لازم و تعیین وظایف حاکمیتی و مردمی در این راستا اقدام به ارائه نسخه بازار آب مناسب کشور ایران شود)،
- تحلیـل و ارزیابی بهره‌برداران به‌عنوان رکن اصلی بازار در حوضه‌های مطالعاتی کشور،
- تعریف قانونی حقابه‌ها،
- بررسی شیوه قیمتگذاری و نحوه اطلاع‌رسانی در حوضه‌های مطالعاتی کشور،
- سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های لازم برای ثبت معاملات،
- ایجاد زیرساخت‌های مناسب انتقال آب برای تسهیل مبادلات آبی در هر منطقـه با توجه به

جنبه‌های محیط‌زیستی،

- ایجاد تشکل‌های آب‌بران در هر منطقه و مشارکت گرودارن در مدیریت بازار.

نتیجه گیری

سیاستگذاری و برنامه‌ریزی برای مدیریت سیستم‌های منابع آب به‌دلیل پیچیدگی زیاد جزء مسائلی است که به‌شدت در برابر راه‌حل‌های متعارف مقاومت می‌کنند و مدیریت موفقیت‌آمیز این منابع مستلزم بازارزیابی راهکارهای قدیمی است. مسائل مربوط به منابع آب که امروزه ساختارهای حکمرانی، مبانی مهارتی و ظرفیت‌های سازمانی کنونی را به چالش کشیده است، به‌درکی عمیق ازسوی بهره‌برداران و حکومت‌ها نیاز دارد، مبنی‌بر اینکه راه‌حل‌های این مسائل ساده و ثابت نیست؛ بلکه به‌دلیل روابط متقابل بین دامنه وسیعی از عوامل تأثیرگذار به رهیافت‌های وسیع‌تر و دقیق‌تر نیاز دارد. بنابراین برای گام نهادن در فرایند مواجهه با این مسائل ضمن تغییر نگاه اکسیری به راهکارهای ارائه شده در این زمینه، لازم است فرایند گفتگوی ملی بر سر ماهیت، ابعاد و پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت این مسائل با هدف کاستن از ابعاد پیچیدگی و عدم‌قطعیت و تقلیل منازعات آغاز شود. به‌عبارتی زمانی که پیچیدگی این مسائل پذیرفته شود و گرودارن متعدد در فرایند حل مسئله از طریق فرایندها و اقدامات مشارکتی دخیل شوند می‌توان به مدیریت موفق این منابع نائل آمد.

مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک ابزار سیاستگذاری، با ایجاد تغییراتی در جامعه، محیط‌زیست و اقلیم، تعادلی بین استفاده و توسعه آب برقرار می‌کند. در این مطالعه یک رویکرد جمعی برای توسعه و اجرای سیاستگذاری پایداری آب‌های زیرزمینی مورد بحث قرار گرفت. طی سال‌های اخیر، بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی مبتنی‌بر معیارهای معقول جهانی (مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی)، با توجه به محدودیت‌های کمّی‌وکیفی و عدم‌قطعیت‌های مربوطه نبوده است. بنابراین ضروری است این معیارها، عوامل، محدودیت‌ها و عدم‌قطعیت‌ها بیشتر شناخته شوند تا برای هریک از این محدودیت‌ها معیاری توسعه یافته و با مشارکت بیشتر گرودارن مبنای تخصیص، بهره‌برداری و مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی قرار گیرند. از طرفی با توجه به اولویت‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاستی نیازمند تدوین برنامه‌ای جامع جهت تقسیم فعالیت‌ها و کارهای لازم به انجام و ملحوظ کردن اعتبارات مالی و فنی در برنامه‌های منابع آب ازجمله موارد حائز اهمیت است و ضرورت دارد هیئت دولت و مجلس شورای اسلامی نیز در مصوب کردن بودجه‌های مالی لازم با توجه به ضعف و فرسودگی زیرساخت‌ها و تأسیسات فیزیکی شبکه پایش و تصمیم‌گیری در زمینه حل این مسائل برای بالا بردن امکانات سخت‌افزاری، نرم‌افزاری، تجهیزات و فناوری جهت برداشت آمار و اطلاعات و داده‌های مورد نیاز و تشکیل بانک اطلاعاتی اهتمام ورزند.

باید توجه داشت علم مدیریت آب‌های زیرزمینی نیازمند در نظر گرفتن پویایی و پیچیدگی پارامترهای هیدروژئولوژیکی و سیستم‌های محیط‌زیستی و انسانی وابسته به آن است. از طرفی پرداختن به عدم‌قطعیت‌های ذاتی مرتبط با جنبه‌های طبیعی و اجتماعی سیستم‌های درهم‌تنیده و پویای سیستم منابع آب‌های زیرزمینی به‌منظور اتخاذ مسیر درست مدیریت، نیاز به توسعه رویکردهای نوآورانه، تدوین یکسری معیارهای منتخب با روش‌شناسی مناسب و قابل تعمیم در راستای سیاستگذاری و توسعه پایداری آب‌های زیرزمینی مبتنی‌بر مدل‌سازی چندفرایندی، تحلیل‌های چندروایتی و مشارکت وجود دارد. درحالی که با مطالعه راهکارهای طرح احیا و تعادل‌بخشی وزارت نیرو و همچنین راهکارهای وزارت جهادکشاورزی می‌توان ادعا نمود که اغلب این راهکارها رویکرد فنی داشته و اقتصادی هستند و ارتباطی با مدل‌سازی چندفرایندی، تعامل و رفتار گرودارن و کنترل مصرف آنها و عدم‌قطعیت‌های مطرح شده ندارد. ازاین‌رو نیاز به تهیه دستورالعمل‌های لازم در سازمان‌های مسئول برای فراهم‌آوری داده‌ها و اطلاعات خام پایه مورد نیاز برآورد روش‌های مدیریت منابع آب در دقت، تواتر زمانی و مقیاس مطلوب و با توجه به خصوصیات متفاوت محدوده‌های مطالعاتی کشور به‌منظور برآورد بهتر منابع در دسترس و تدقیق روش‌های مدیریتی وجود دارد. از طرفی تدوین نقشه‌راهی برای تغییر نگرش و رویکرد راهکارهای فنی و اقتصادی به راهکارهای جامع و کلی‌نگر با شناسایی و تعیین نقش و سهم هریک از عوامل، تعیین جایگاه عوامل در مدیریت منابع آب و تغییر ساختار سازمانی طبق توسعه پایدار منابع آب ضروری به‌نظر می‌رسد.

در فرایند سیاستگذاری منابع آب‌های زیرزمینی میزان مشارکت مهم‌ترین مؤلفه نه تنها برای حل تعارضات، بلکه برای شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای مربوط به پایداری آب‌های زیرزمینی است. در جامعه علمی، برای توسعه این جنبه از روند ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی، همکاری بیشتر بین دانشمندان علوم فیزیکی، دانشمندان علوم اجتماعی، مدیران آب‌های زیرزمینی و سیاستگذاران ضروری است. ایجاد چنین روابط همکارانه‌ای بین محققان و گرودارن اصلی می‌تواند از ایجاد مشارکت عمومی آسان‌تر باشد. ازطرفی افزایش مشارکت عمومی در مدیریت آب‌های زیرزمینی برای دستیابی به یادگیری اجتماعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی بدون آگاهی، ادراک و درگیری بومیان حاصل نمی‌شود. ازاین‌رو نیاز به نظارت و کنترل کیفیت روش‌های ایجاد مشارکت و کشف راه‌های دخالت مثبت در منازعات و اختلافات و حل و فصل موارد اختلافی بین گرودارن مختلف در چارچوب و ساختار نظام‌مند و توجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی هر محدوده مطالعه وجود دارد. یکی از راهکارهایی که به‌کارگیری آن می‌تواند به اجرایی نمودن راه‌حل‌های علمی و فنی کمک نموده و چالش‌های مطرح شده را تسریع و تسهیل کند، ایجاد فضای گفتمان و تعامل سازنده بین سیاستگذاران، مدیران و جامعه علمی و نیز در جامعه و در میان عموم مردم حول موضوع آب و همزمان با آن، تدقیق منابع و مصارف آب حوضه‌ها

می‌تواند منجر به حل مسائل منابع آب شود.

گزارش حاضر نشان می‌دهد که عبور کشور از وضعیت نامناسب کنونی در ارتباط با منابع آب، چندان آسان نیست و نیازمند انجام اصلاحاتی اساسی در نظام سیاستگذاری و حکمرانی با بهره‌گیری از اصول علمی و دانش‌محور است؛ زیرا علت اصلی پیدایش وضعیت کنونی وجود نواقصی جدی در این نظام است و این موضوع عموماً در پیشنهادهای سیاستی ارائه شده برای مواجهه با این بحران به‌طور جدی درنظر گرفته شده است. به‌طورکلی با توجه به اینکه مسائل آب‌های زیرزمینی با مسائل اقتصادی و اجتماعی گره خورده است، تعدیل قدرت نهادهای دولتی و واردکردن تشکل‌های گروداران و سازمان‌های مردم‌نهاد و دانشگاهیان حوزه علوم آب، اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیست در شبکه سیاستگذاری منابع آب به‌منظور احیای حکمرانی آب در کشور بسیار ضروری است. از طرفی برای پاسخگویی به تقاضای فزآینده آب بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب نیاز به بازنگری در سیاست‌های اقتصادی کشور در زمینه مدیریت منابع آب، روش تولید و غیره وجود دارد. همچنین توسعه و اجرای مؤثر سیاست‌های پایدار آب‌های زیرزمینی با کمترین سطح عدم‌قطعیت، منوط به انجام تحقیقات میان‌رشته‌ای بیشتر مبتنی‌بر مدل‌سازی چندفرایندی، تحلیل عدم‌قطعیت و مشارکت است که خود منوط به تهیه آمار و اطلاعات پایه است. از طرفی مدل‌سازی چندفرایندی به‌همراه ادغام عدم‌قطعیت‌های سیستم‌های طبیعی، مهندسی شده، اجتماعی و سازمانی در یک چارچوب نظام‌مند، از منظر اقتصادی هزینه‌بر است. لکن انجام چنین تحقیقاتی با هدف مشارکت جامعه علمی و سیاستگذاران، اتخاذ تصمیمات و سیاست‌های اثربخش و قابل اجرا، با مصوب کردن قوانین و تخصیص بودجه‌های لازم برای فعالیت‌های اولویت‌دار از طرف سیاستگذاران، مفید واقع خواهد شد. درواقع حوزه‌های سیاستگذار کشور می‌توانند در این مسیر ایفای نقش کرده و با اصلاح ساختارها، تخصیص و تصویب بودجه‌های لازم برای سازمان‌های متولی مانند وزارت نیرو و در صورت نیاز اصلاح ردیف‌های بودجه‌ای فعالیت‌های سازمان‌های ذی‌ربط مسیر را هموار سازند.

منابع و مآخذ

1. Alley, W.M., Clark, B.R., Ely, D.M. and Faunt, C.C., 2018. Groundwater development stress: Global-scale indices compared to regional modeling. Groundwater, 56(2).
2. Archer, D.R., Forsythe, N., Fowler, H.J. and Shah, S.M., 2010. Sustainability of water resources management in the Indus Basin under changing climatic and socio economic conditions. Hydrology and Earth System Sciences, 14(8).
3. Asefa, T., Adams, A. and Kajtezovic-Blankenship, I., 2014. A tale of integrated regional water supply planning: Meshing socio-economic, policy, governance, and sustainability desires together. Journal of Hydrology, 519.
4. Ayyub, B.M., 2020. Infrastructure resilience and sustainability: Definitions and relationships. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 6(3).
5. Babbitt, C.H., Gibson, K.E., Sellers, S., Brozovic, N., Saracino, A., Hayden, A., Hall, M. and Zellmer, S., 2018. The future of groundwater in California: Lessons in sustainable management from across the West.
6. Bierkens, M.F. and Wada, Y., 2019. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. Environmental Research Letters, 14(6).
7. Chan, K.M., Balvanera, P., Benessaiah, K., Chapman, M., Díaz, S., Gómez-Baggethun, E., Gould, R., Hannahs, N., Jax, K., Klain, S. and Luck, G.W., 2016. Opinion: Why protect nature? Rethinking values and the environment. Proceedings of the national academy of sciences, 113(6).
8. Custodio, E., 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean? Hydrogeology journal, 10(2).
9. Custodio, E., Sahuquillo, A. and Albiac, J., 2019. Sustainability of intensive groundwater development: experience in Spain. Sustainable Water Resources Management, 5(1).
10. CWC 2014 CWC SGMA California Water Code § 10720–10737.8. California Legislative Information Yutong.Song@stonybrook.
11. Elshall, A.S., Arik, A.D., El-Kadi, A.I., Pierce, S., Ye, M., Burnett, K.M., Wada, C.A., Bremer, L.L. and Chun, G., 2020. Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. Environmental Research Letters, 15(9).
12. Flindt Jørgensen, L., Villholth, K.G. and Refsgaard, J.C., 2017. Groundwater management and protection in Denmark: a review of pre-conditions, advances and challenges. International journal of water resources development, 33(6).
13. Feng, D., Zheng, Y., Mao, Y., Zhang, A., Wu, B., Li, J., Tian, Y. and Wu, X., 2018. An integrated hydrological modeling approach for detection and attribution of climatic and human impacts on coastal water resources. Journal of Hydrology, 557.
14. Foster, S., Garduno, H., Tuinhof, A. and Tovey, C., 2010. Groundwater governance: conceptual framework for assessment of provisions and needs (No. 57555, pp. 1-16). The World Bank.
15. Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. and Perrone, D., 2020. Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. Annual review of earth and planetary sciences, 48.
16. GWD 2006 Groundwater Directive 2006/118/EC (https://ec.europa.eu/environment/water/waterframework/ groundwater framework.htm)
17. Han, S., Tian, F., Liu, Y. and Duan, X., 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. Hydrology and Earth System Sciences, 21(7).
18. Kelly, R.A., Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.R., Rizzoli, A.E. and Van Delden, H., 2013. Selecting

among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental modelling & software, 47.
19. Kitanidis, P.K., 2015. Persistent questions of heterogeneity, uncertainty, and scale in subsurface flow and transport. Water Resources Research, 51(8).
20. Kurtz, W., Lapin, A., Schilling, O.S., Tang, Q., Schiller, E., Braun, T., Hunkeler, D., Vereecken, H., Sudicky, E., Kropf, P. and Franssen, H.J.H., 2017. Integrating hydrological modelling, data assimilation and cloud computing for real-time management of water resources. Environmental modelling & software, 93.
21. Leduc, C., Pulido-Bosch, A. and Remini, B., 2017. Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. Hydrogeology Journal, 25(6).
22. Lee, C.H., 1914. The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed-basin type.
23. Maimone M 2004 Defining and managing sustainable yield Ground Water 42 809–14.
24. Molina J L, Martos-Rosillo S, Martin-Montanes C and Pierce S 2012 The social sustainable aquifer yield: an indicator for the analysis and assessment of the integrated aquifers management Water Resour. Manag.
25. Muchingami, I., Chuma, C., Gumbo, M., Hlatywayo, D. and Mashingaidze, R., 2019. Approaches to groundwater exploration and resource evaluation in the crystalline basement aquifers of Zimbabwe. Hydrogeology Journal, 27(3).
26. Mustafa, S.M.T., Nossent, J., Ghysels, G. and Huysmans, M., 2018. Estimation and impact assessment of input and parameter uncertainty in predicting groundwater flow with a fully distributed model. Water Resources Research, 54(9).
27. NGC 2004 National groundwater committee, knowledge gaps for groundwater reform Proc. from Workshop (Canberra, Australia, 12–13 November 2003).
28. Ogunjobi, K.O., Daramola, M.T. and Akinsanola, A.A., 2018. Estimation of surface energy fluxes from remotely sensed data over Akure, Nigeria. Spatial Information Research, 26(1).
29. Owen, D., Cantor, A., Nylen, N.G., Harter, T. and Kiparsky, M., 2019. California groundwater management, science-policy interfaces, and the legacies of artificial legal distinctions. Environmental Research Letters, 14(4).
30. Pholkern, K., Saraphirom, P., Cloutier, V. and Srisuk, K., 2019. Use of alternative hydrogeological conceptual models to assess the potential impact of climate change on groundwater sustainable yield in central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. Water, 11(2).
31. Piscopo, V., Di Luca, S., Dimasi, M. and Lotti, F., 2019. Sustainable yield of a hydrothermal area: from theoretical concepts to the practical approach. Groundwater, 57(2).
32. Refsgaard, J.C., Højberg, A.L., Møller, I., Hansen, M. and Søndergaard, V., 2010. Groundwater modeling in integrated water resources management—visions for 2020. Groundwater, 48(5).
33. Rudestam, K. and Langridge, R., 2014. Sustainable yield in theory and practice: Bridging scientific and mainstream vernacular. Groundwater, 52(S1), pp.90-99.
34. Saarela, S.R., Söderman, T. and Lyytimäki, J., 2015. Knowledge brokerage context factors–What matters in knowledge exchange in impact assessment?. Environmental Science & Policy, 51.
35. Saha, D. and Ray, R.K., 2019. Groundwater resources of India: potential, challenges and management. In Groundwater Development and Management (pp. 19-42). Springer, Cham.
36. SBC 2014 SBC (State of British Columbia) Water Sustainability Act [SBC 2014] Chapter 15 (http://www.bclaws.ca/ civix/document/id/complete/statreg/14015).
37. Seward P, Xu Y and Brendonck L 2006 Sustainable groundwater use, the capture principle, and adaptive management Water SA. 32 473–82.
38. Sheng, Z., 2013. Impacts of groundwater pumping and climate variability on groundwater availability in the Rio Grande Basin. Ecosphere, 4(1).
39. Sikdar, P.K., 2019. Groundwater Development and Management (pp. 1-18). Berlin: Springer)

Problems and Challenges for Groundwater Management in South Asia.
40. Sivapalan, M., Konar, M., Srinivasan, V., Chhatre, A., Wutich, A., Scott, C.A., Wescoat, J.L. and Rodríguez-Iturbe, I., 2014. Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene. Earth's Future, 2(4).
41. Sivapalan, M. and Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. Water Resources Research, 51(9).
42. Sophocleous, M., 2012. The evolution of groundwater management paradigms in Kansas and possible new steps towards water sustainability. Journal of Hydrology, 414.
43. Srinivasan, V., Konar, M. and Sivapalan, M., 2017. A dynamic framework for water security. Water Security, 1.
44. Tan, P.L., Bowmer, K.H. and Mackenzie, J., 2012. Deliberative tools for meeting the challenges of water planning in Australia. Journal of Hydrology, 474.
45. UN FAO 2016 Shared global Vision for Groundwater Governance 2030 and a Call-for-Action 2030 (Rome: Groundwater Govenance).
46. Vasco, D.W., Farr, T.G., Jeanne, P., Doughty, C. and Nico, P., 2019. Satellite-based monitoring of groundwater depletion in California's Central Valley. Scientific reports, 9(1).
47. Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Ruiz-Ortiz, V. and Sánchez-Bellón, Á., 2020. Towards a Sustainable and Adaptive Groundwater Management: Lessons from the Benalup Aquifer (Southern Spain). Sustainability, 12(12).
48. Villholth, K.G. and Conti, K.I., 2018. Groundwater governance: rationale, definition, current state and heuristic framework.
49. Voss, C.I., 2011. Editor's message: Groundwater modeling fantasies—part 1, adrift in the details. Hydrogeology Journal, 19(7).
50. Walton W C and Mclane C F 2013 Aspects of groundwater supply sustainable yield Ground Water 51 158–60
51. Wang, Y., Zheng, C. and Ma, R., 2018. Safe and sustainable groundwater supply in China. Hydrogeology Journal, 26(5).
52. Watson, R.T., 2005. Turning science into policy: challenges and experiences from the science–policy interface. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360(1454).
53. Webb, D. and Ayyub, B.M., 2017. Sustainability quantification and valuation. I: Definitions, metrics, and valuations for decision making. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 3(3).
54. WFD 2000 Directive 2000/60/EC (https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html).

مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شناسنامه گزارش | **شماره مسلسل: ۱۷۹۱۵**

عنوان گزارش: آثار متقابل دو حوزه علم و سیاستگذاری در پایداری منابع آب‌های زیرزمینی

نام دفتر: مطالعات زیربنایی (گروه آب)

تهیه و تدوین‌کنندگان: المیرا ولی‌پور، حامد کتابچی

ناظر علمی: علیرضا رهایی

مدیر مطالعه: جمال محمدولی سامانی

اظهارنظرکنندگان: فاطمه سادات میراحمدی (دفتر مطالعات سیاسی)، محسن کرمانی نصرآبادی (دفتر مطالعات اجتماعی)

ویراستار تخصصی: ـــــــ

ویراستار ادبی: ـــــــ

واژه‌های کلیدی:

۱. ارزیابی علمی

۲. فرایند مشارکتی

۳. طرح احیا و تعادل‌بخشی

۴. مدیریت آب‌های زیرزمینی

۵. مدیریت تطبیقی

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۹/۲۵