یادداشت تحلیلی

آشنایی با وجوه مختلف پایایی آب زیرزمینی

هادی کریمی میاندوآب[1]، سیده محدثه طاهری[2*]، هاشم درخشان[3]

۱- رئیس اداره نظارت و مهندسی منابع آبی اداره کل بهبود محیط زیست شهرداری مشهد و دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. ۲- دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب و پژوهشگر پژوهشکده آب و محیطزیست دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. ۳- دانش‌آموخته دکترای علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. *(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: taheri.sm@mail.um.ac.ir)

باتوجه‌به ارتباط تنگاتنگ میان سیستم‌های هیدرولوژی، اکولوژی و اجتماعی -اقتصادی با پایای آب زیرزمینی، به‌منظور اجرای سیاست‌ها، قوانین و دستورالعمل‌های مدیریتی مفاهیم پایایی در راستای کاهش وخامت اوضاع منابع آبی و اکوسیستم، تبین مدیریت یکپارچه در مدیریت منابع آب ضرورت می‌یابد. موفقیت راهبردی، در گروی فعالیت مشترک و هماهنگ دستگاه‌های اجرایی در حرکت به سوی چشم‌انداز است؛ به‌گونه‌ای که هیچ امری وانهاده و بدون متولی نمانده باشد. چالش تحقق اهداف چشم‌اندازهای بلند مدت در راستای حفظ و حراست پایدار منابع ناشی از فعالیت‌های تفکیک یافته و صرفاً منطبق با منافع سازمانی دستگاه‌ها و از دیگر جهت نبود زنجیره‌ای پیوسته بین عملیات اجرایی با اصول تبین شده بالادستی و فقدان تفکر سیستمی می‌باشد. در نتیجه شکاف گسترده‌تری بین کنشگران آب، پژوهشگران و جامعه برای تعریف و دستیابی به پایایی آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. در این پژوهش وجوه مختلف مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی بررسی شده و این مفهوم را مبتنی بر اصول هیدرولوژیکی برای رویکردهای مشارکتی و یکپارچه‌تر در راستای دستیابی به امنیت آب تشریح شد و با هدف شناسایی ارزش‌های اجتماعی متنوع و مرتبط با پایایی آب زیرزمینی، روش‌شناسی عوامل کارایی آبخوان و عوامل حکمرانی انجام شد. اجرای موثر سیاست‌های آب زیرزمینی نیازمند تبین مدیریت یکپارچه و فرآیند مشارکتی بین سیستم‌های آب سطحی، آب زیرزمینی، اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های بشری، با احتساب تحلیل عدم قطعیت و مدیریت تطبیقی و دانش بومی و ترجیحات اجتماعی و شرایط منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پایای آب زیرزمینی، خدمات اکوسیستم، عدم قطعیت، مشارکت، آبخوان.

مقدمه

یکی از ضروری‌ترین نیازهای جهانی، تضمین امنیت آب در مواجه با رشد جمعیت انسانی، گسترش کشاورزی و تغییر اقلیم است (Wheater و Gober ، ۲۰۱۵). آب زیرزمینی گسترده‌ترین و مهمترین منبع آب شرب در سراسر دنیا بوده، حفظ پایایی اکوسیستم‌ها و افزایش سازگاری جوامع بشری با تغییر اقلیم در گروی آن است (Taylor و همکاران، ۲۰۱۳). بیش از ۵۰ درصد از آب شرب مردم جهان و بیش از ۴۳ درصد نیاز کشاورزی فاریاب از سفره‌های آب زیرزمینی تأمین می‌شود بنابراین مدیریت پایای آب زیرزمینی بسیار اهمیت دارد (Siebert و همکاران، ۲۰۱۰). با وجود اینکه، آب زیرزمینی منبع مشترک جهت پایایی انسان‌ها و اکوسیستم‌ها می‌باشد، اما اغلب در بسیار از مناطق جهان با بهره‌برداری بیش از حد، در معرض اضمحلال و نابودی قرار گرفته است (Bierkens و Wada، ۲۰۱۹). این امر می‌تواند با افزایش تقاضا برای غذا نیز افزایش یابد (McLaughlin و Kinzelbach، ۲۰۱۵). بهره‌برداری بیش از حد از آب زیرزمینی علاوه بر تهدیدات محیط‌زیستی و خطرات جغرافیایی (Bierkens و Wada، ۲۰۱۹)، تهدیدهایی مانند نفوذ آب شور و فرونشست زمین را در برخی مناطق به نگرانی‌های جدی تبدیل کرده است (Michael و همکاران، ۲۰۱۷).

علاوه‌براین، ظهور این تهدیدات برای آب زیرزمینی اغلب بر قشر آسیب‌پذیر تأثیرگذار خواهد بود (Baguma و همکاران، ۲۰۱۷). برای سازش با این تهدیدات، و افزایش استفاده مفید از این منبع حیاتی، ادبیات پایایی، شامل مفاهیم آبدهی مطمئن، آبدهی پایا، توسعه پایای آب زیرزمینی و مدیریت پایای آب زیرزمینی مطرح شده است. پایایی آب زیرزمینی به محیط‌زیست بستگی دارد و این مفهوم در سطح جهانی از مناطق خشک تا مناطق مرطوب بسیار متفاوت است و بر این اساس ترجیحات اجتماعی از کمّیت به کیفیت تغییر می‌کند (Cuthbert و همکاران، ۲۰۱۹).

پایای آب زیرزمینی به‌طور فزاینده‌ای در سیاست‌ها، قوانین و مقررات آب زیرزمینی در تعدادی از نقاط جهان مانند: استرالیا (Quevauviller و همکاران، ۲۰۱۶)، بریتیش کلمبیا (Ohdedar، ۲۰۱۸) کالیفرنیا (Owen و همکاران، ۲۰۱۹)، فرانسه (Rinaudo و همکاران، ۲۰۱۶)، آلمان (Knüppe و همکاران، ۲۰۱۶)، هلند (Lijzen و همکاران، ۲۰۱۴) و آفریقای جنوبی (Seward، ۲۰۱۰) و در سایر نقاط دیگر (Kalf و Woolley، ۲۰۰۵) مورد توجه جدی قرار گرفته است. فقدان شفافیت تأثیر عمیقی در برهم‌کنش و اجرای سیاست‌های پایایی آب زیرزمینی دارد (Unver و همکاران، ۲۰۱۷). باوجوداینکه ابزارهای سیاستی بسیاری در چندین قانون و دستورالعمل آب مورد توجه قرار گرفته است، عملیاتی کردن سیاست پایایی آب زیرزمینی به‌صورت پویا و به هم پیوسته چالش جدی برای مدیران آب زیرزمینی و همچنین جامعه علمی است. دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا کمک چندانی به بهبود پایداری آب زیرزمینی، بدون مدیریت کاربردی آب زیرزمینی در سطح اجرایی محلی نخواهد نمود (Rejman، ۲۰۰۷). حتی با وجودی که دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا، این امکان را فراهم نموده بود که در حوضه موری-دارلینگ، جایی که

دستورالعمل اصلاحات آب استرالیا با موفقیت توانسته است سیستم آبخوان‌هایی که مورد بهره‌برداری بیش از حد قرار گرفته بودند را به سطوح برداشت پایا از نظر محیط‌زیستی باز گرداند، اما باز هم تعدادی از جوامع محلی به طرح‌های آب یا فرآیندهای آن اعتماد کامل ندارند (Jackson و همکاران، ۲۰۱۲). عملیاتی‌سازی سیاست‌های آب زیرزمینی مرتبط با پایایی مستلزم ایجاد یک پایه مفهومی محکم برای انتقال دانش علمی به تصمیم‌سازن در اجتماع است (Pierceو همکاران، ۲۰۱۳). لذا ضروری است بررسی دقیق پیرامون سه چالش اصلی زیر صورت پذیرد: ۱- علم پایایی آب زیرزمینی، شامل علوم طبیعی و علوم اجتماعی می‌باشد، لذا علمی پیچیده محسوب می‌شود. مدیریت آب زیرزمینی، در برگیرنده ترکیبی از سیستم‌های بیوفیزیکی، اجتماعی-اقتصادی است، که به طور کامل در نظر گرفتن همه این ابعاد در چارچوب مدل‌سازی آب زیرزمینی امری دشوار است. درک و مدل‌های تکمیلی اجتماعی با سیستم‌های منابع آب، اکوسیستم‌ها و چگونگی تعامل میان آن‌ها با محدودیت‌های مشخص، چالشی پیچیده و فرارشته‌ای است که جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی، فناوری و نهادی را در بر می‌گیرد. اگرچه اخیراً در موارد بسیار زیادی به این برهم‌کنش‌ها در برنامه‌های پایایی آب توجه شده است (Brown و همکاران، ۲۰۱۵). ۲- مدل‌های یکپارچه که هر دو جنبه طبیعی و انسانی سیستم‌های آب را در نظر می‌گیرد، به عنوان سیستم‌های پیچیده و پویا محسوب شده و دارای عدم قطعیت بسیار زیاد هستند (Wheater و Gober، ۲۰۱۵). ۳- اغلب یک شکاف ارتباطی بین جامعه دانشگاهی، تصمیم‌گیرندگان و مجریان حوزه‌های مرتبط با آب وجود دارد که باعث می‌شود خروجی‌های علمی مورد تقاضا قرار نداشته باشند (Castilla-Rho، ۲۰۱۷).

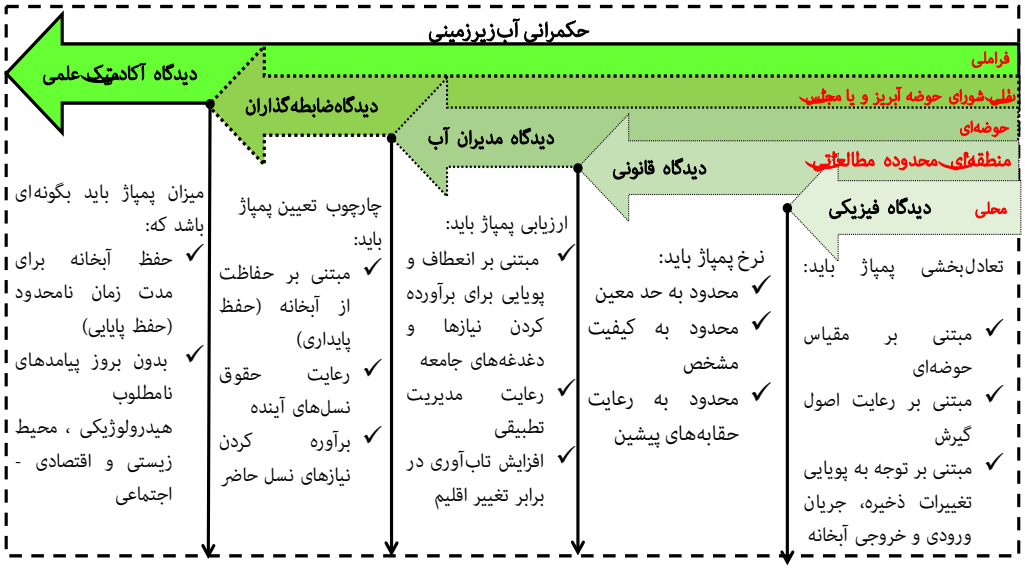
در پاسخ به سه چالش مزبور، برای عملیاتی کردن مؤثر سیاست پایایی آب زیرزمینی، ایجاد رابطه علم-سیاست که مبتنی بر مشارکت مردمی با در نظر گرفتن مصارف بشری و اکوسیستم‌ها و احتساب عدم قطعیت‌ها، پیشنهاد می‌شود. این مقاله با تکیه بر مطالعات موردی، جزئیاتی را در مورد فرارشته‌ای بودن فرآیندهای مدیریت آب زیرزمینی، برای بهره‌برداری پایا از آب زیرزمینی ارائه می‌کند و همچنین دانش شناسایی شکاف‌ها/گپ‌ها را در اختیار خواننده می‌گذارد. ادامه این مقاله تلاش برای تعریف پایایی آب زیرزمینی با نشان دادن ابعاد هم‌تکاملی این مفهوم با علم و سیاست مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس ارزیابی علمی پایایی آب زیرزمینی را با تمرکز مدل‌سازی سه فرآیندی (۱- مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ۲- مدل‌سازی خدمات اکوسیستم و ۳-مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی) بررسی می‌کند. همچنین، تحلیل عدم قطعیت و مشارکت مورد بحث قرار می‌گیرد و در نهایت بر اساس چالش‌ها و گپ‌هایی که در مرور ادبیات بررسی شده، جهت‌گیری‌ها مورد بحث قرار داده می‌شود.

ابعاد مختلف پایایی آب زیرزمینی

Lee (۱۹۱۴) در درک مفهوم پایایی آب زیرزمینی، از اصلاح «آبدهی مطمئن» استفاده نمود که به‌عنوان «محدودیت در مقدار کمیّت آبی که می‌توان به طور منظم و دائمی بدون کاهش خطرناک ذخیره رزرو (استاتیک) آبخوان برداشت شود» تعریف شده است. در این تعریف اولیه، مفهوم آبدهی مطمئن به‌عنوان هر میزان پمپاژ آب که کمتر یا برابر با نرخ تغذیه در شرایط پایدار و بدون توجه به نقش تخلیه از آب از آبخوان، تعریف شد و به پارامترهای قابل سنجش در هیدرولوژی آب زیرزمینی پایبند بود. اما این مفهوم با قانون بقای جرم مخالف است و به‌عنوان «افسانه بیلان آب» اشاره می‌شود (Devlin و Sophocleous، ۲۰۰۵). Theis (۱۹۴۰) بیان می‌دارد که پمپاژ آب زیرزمینی، منجر به کاهش میزان آب در منطقه‌ای دیگر می‌شود زیرا این برداشت ناشی از بهره‌برداری از ذخایر قبلی و یا حجم تغذیه یافته آبخوان و یا هر دوی آنها بوده است . ، در پی آن تغییری در استفاده از مفهوم «پایا» به جای آبدهی «مطمئن» صورت گرفته است (Alley و Leake، ۲۰۰۴)، و تغییر ایجاد شده بر این اصل که سیستم آب زیرزمینی، سیستم هیدرولوژیکی گسترده‌تری را در برگرفته است، تاکید دارد (Alley و همکاران،۱۹۹۹). حکمرانی آب رفتار کنترل‌کننده‌ای است که از طریق اقدامات مدیریتی و یا با وضع مقرارت آب (در طیف وسیعی از سیستم‌های سیاسی، اجتماعی، محیط‌زیستی، اقتصادی و اداری) به کار گرفته می‌شود و در نهایت منجر به تنظیم «تخصیص و بهره‌برداری» از آب می‌شود. حکمرانی آب مشخص می‌کند که «چه کسی و در چه شرایطی به آب دسترسی دارد»؛ «حفاظت کمّی و کیفی از آب چگونه است»؛ «قاعده مدیریت آب چیست و نقش مشارکت گرودواران در تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری تا کجاست»؛ «سیاست‌های بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصارف آب کدامند»؛ «داوری اختلافات و تعارض‌ها به دست کیست»؛ .... و نقطه تمرکز آن بر سه رکن قرار دارد: «تصمیمات چگونه اخذ می‌شوند»، «چه کسی می‌تواند آب را مصرف کند» و «چگونه از پایداری منابع آب حفاظت می‌شود».

امروزه باید بپذیریم که در حکمرانی آب دولت تنها کنشگر نیست. «حکمرانی مؤثر آب» و «مدیریت به‌هم‌پیوسته آب» لازم و ملزوم یکدیگر هستند. حکمرانی مؤثر آب را می‌توان حداقل به چهار مشخصه مقید نمود: ۱) رهبری اخلاق‌مدار با تمرکز بر اقشار تهی دست و آسیب‌پذیر؛ ۲) دسترسی به اطلاعات به‌هنگام، موثق و کافی به عنوان مقدمه هر تصمیم‌گیری و لازمه پاسخگویی؛۳) ایجاد سازوکارهایی برای بحث، گفت‌وگو و حل‌وفصل مناقشات با حضور جامعه مدنی؛ و ۴) تمرکززدایی و در عین حال حفظ به‌هم‌پیوستگی مدیریت آب (مشارکت گرودواران و به‌ویژه آب‌بران در فرآیند تصمیم‌سازی). در عین حال پایداری تصمیمات تابع مقبولیت آنها نزد عموم گرودواران و آبخیزنشینان خواهد بود. این مقبولیت به

نوبه خود، نیازمند رعایت عدالت و انصاف در حکمرانی می‌باشد (سند تدبیر آب مشهد). شکل (۱) حکمرانی آب زیرزمینی را از دیدگاه‌های مختلف فراملّی، ملّی، حوضه‌ای، منطقه‌ای و محلی مورد بررسی قرار می‌دهد.



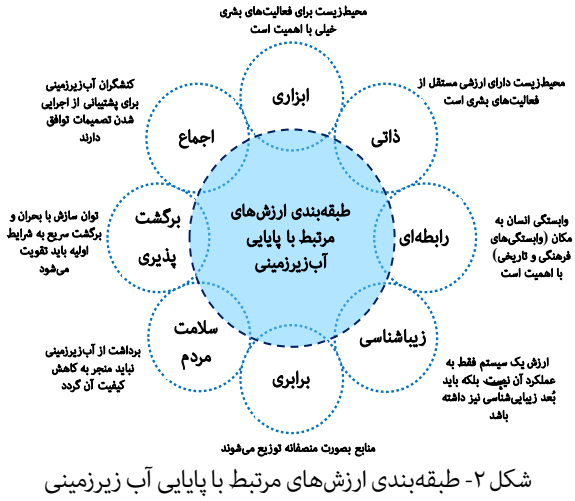
شکل ۱- طبقه‌بندی دیدگاه‌های مختلف پایایی آب زیرزمینی

مفهوم گیرش[1] یک مفهوم کلیدی در شناخت آبدهی پایا است (Derakhshan و همکاران، ۲۰۲۳). مفهوم آبدهی پایا، پیوند میان آب زیرزمینی و سایر مؤلفه‌های مدیریتی تکامل یافت تا امکان‌سنجی اقتصادی، تخریب کیفیت آب، حقابه‌ها و سایر عوامل را شامل شود (Alley و Leake، ۲۰۰۴). به‌عنوان‌مثال، در مورد کالیفرنیا، تغییر استفاده از عبارت «آبدهی مطمئن» به افزایش استفاده از «آبدهی پایا» و «مدیریت پایای آب زیرزمینی» در این ایالت نشان‌دهنده تغییر رویکرد به سمت دیدگاه یکپارچه و نگاه کلان به سیستم آب زیرزمینی می‌باشد (Kretsinger Grabert و Narasimhan، ۲۰۰۶). سیستم آب زیرزمینی پایا سیستمی است که در آن پمپاژ می‌تواند به‌طور مطمئن و در مدت نامحدودی ادامه یابد، درصورتی‌که مدیران آب راهکارهای استفاده پایا از آب زیرزمینی را شناسایی کنند که امکان پمپاژ طولانی مدت را با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های لجستیکی، محیط‌زیستی، قانونی، اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی برآورده سازد و همچنین ضرورت درک کاملی از سیستم هیدرولوژیکی آینده، اثرات برداشت طولانی مدت از منابع سطحی، تغییرات تغذیه آبخوان و روند کیفی آب، در نظر گرفته شود (Gorelick و Zheng، ۲۰۱۵). این انتقال از سطح آکادمیک و سطوح مختلف قوانین و سیاست‌ها، مانند دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا (WFD، ۲۰۰۰؛ GWD، ۲۰۰۶)، قانون مدیریت پایایی آب زیرزمینی در کالیفرنیا و قانون پایایی آب در بریتیش کلمبیا (Gleeson و همکاران، ۲۰۲۰) رخ داده است. Bredehoeft و Alley (۲۰۱۴) بیان کردند که چگونه واقعیت‌های عملی در مرحله اجرای نمودن مدیریت آب زیرزمینی، برآورد واقعی از دسترسی به پایایی منابع را در عمل دشوار می‌شود. این واقعیت عمدتاً به دلیل وجود دیدگاه‌های مختلف در مورد پایایی آب زیرزمینی توسط کنشگران مختلف، و تفسیرهای مختلف از مطلوبیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی از طریق ارزش‌های اجتماعی، مختلف است. به هم پیوستگی هیدرولوژیکی و موقعیت‌های کمیاب منابع آب، تخصیص آب را به یک بازی که همواره حاصل جمع صفر آن باشد (در کل برآیند منافع و مضررات خنثی را در پی دارد)، تبدیل می‌کند. سود یک استفاده کننده در اینجا احتمالاً هزینه استفاده کننده دیگری را در جای دیگر در پی خواهد داشت. ترجیح استفاده کوتاه مدت در اینجا با استفاده نسل‌های آتی از همین منابع آب زیرزمینی مشترک تضاد دارد. آنچه برای یک استفاده کننده قابل اطمینان محسوب می‌شود برای استفاده کننده دیگر ناامن محسوب می‌شود. برخی از خسارات ممکن است از دیدگاه یک بخش بسیار ناچیز به نظر برسد، اما همان خسارات ممکن است که از دیدگاه بخش دیگر این‌گونه نباشد. به عبارت دیگر، به دلیل ماهیت سیال آب، استفاده کنندگان، حقابه، چشم‌انداز یا ارزش‌های یک بخش مستقل از سایر مردمی نیست که به همان اندازه به رژیم هیدرولوژیکی مرتبط هستند. به نظر می‌رسد استفاده از آب زیرزمینی به طور پیچیده‌ای با این چرخه گسترده مرتبط است و ناگزیر است تا به مسائل حقوقی، برابری، کارایی اقتصادی و ارزش‌های محیط‌زیستی توجه کند. بررسی‌ها نشان داده است که توافق برای دستیابی به مدیریت پایای آب‌زیرزمینی در حال ظهور است که نیازمند یک رویکرد ذی‌نفع محور بوده که به هر دو جنبه سیاست و علم توجه نماید (Gleeson و همکاران، ۲۰۲۰).

دیدگاه سیاسی در پایایی آب زیرزمینی

در فرآیند سیاست‌گذاری، درباره ارزش‌های اصلی انسانی و معانی آنها صحبت می‌شود (Gober و همکاران، ۲۰۱۵). این بحث توسط یک دیدگاه جامعه اینگونه فرموله شده است: «چگونه هم‌افزایی و مبادله بین اهداف اجتماعی مرتبط با مدیریت آب می‌توان ایجاد نمود؟» (Blöschl و همکاران، ۲۰۱۹). طبقه‌بندی ارزش‌های مربوط به پایایی آب زیرزمینی در شکل (۲) نشان داده شده است و جدول (۱) شرح و اهداف این پایایی را در برمی‌گیرد. ارزش ابزاری بر اهمیت تأثیر محیط‌زیست بر فعالیت‌های بشری می‌پردازد و ارزش‌های ذاتی، ارزش‌های مستقل محیط‌زیستی را شامل می‌شود. ارزش رابطه‌ای به هویت فردی و جمعی، دلبستگی‌ها و مسئولیت‌ها نسبت به یک مکان مربوط می‌شود و متأثر از هنجارها، فضائل، رفاه اجتماعی، دانش‌بومی، اصول و مکاتب محلی و ارزش‌های اصلی منطقه‌ای می‌باشد (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰).

ارزش‌های رابطه‌ای همچنین حقوق مردم و جوامع بومی را که در تعریف امنیت آب اغلب مبتنی بر ارزش‌های سنتی یا معنوی است، در بر می‌گیرد (Wheater و Gober، ۲۰۱۵). Rudestam و همکاران (۲۰۱۸) تأکید داشتند که در نظر گرفتن خصوصیات و شرایط مکانی برای مدیریت پایای آب زیرزمینی ضروری است و به‌منظور توضیح نظریه‌های انسان‌گرایانه یک مکان، بیان می‌کنند که ارزش‌های رابطه‌ای فراتر از نظریه‌های مادی‌گرایانه آن مکان هستند، که به درک بهتر حفاظت از آب‌های زیرزمینی می‌انجامد. همچنین تأکید می‌کنند که معیارهای مورد استفاده توسط مدیران آب و سازمان‌های دولتی معمولاً بر جنبه‌های اقتصادی و کیفیت‌های زیبایی شناختی مکان تمرکز می‌کنند تا شرایط اجتماعی و روان‌شناختی که ساکنان با مکان‌ها درگیر می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، Fernald و همکاران (۲۰۱۵)، نشان می‌دهد انسجام جامعه در دره‌های شمال نیومکزیکو با ارزش دلبستگی به مکان و فرهنگ کشاورزی بومی و آبیاری سنتی حفظ می‌شود و این به نوبه خود تغذیه آب زیرزمینی را حفظ می‌کند که برای اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی مهم است. Rudestam و Langridge (۲۰۱۴) پیشنهاد می‌کنند که بحث در مورد ارزش‌های رابطه‌ای، درک عمیق‌تری از اینکه چرا شیوه‌های مدیریت آب زیرزمینی خاص رخ می‌دهد، فراهم می‌کند. چنین درک می‌تواند، به‌عنوان‌مثال، به شکل دادن به تلاش‌های پایایی آینده و در اجرای شیوه‌های حفاظت از آب زیرزمینی مرتبط با سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک کند (Sanderson و Curtis، ۲۰۱۶).



شکل ۲- طبقه‌بندی ارزش‌های مرتبط با پایایی آب زیرزمینی

جدول ۱- ارتباط ارزش‌ها با پایایی آب‌زیرزمینی (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰).

نوع ارزش معیار	ارزش‌های ابزاری	ارزش‌های ذاتی	ارزش رابطه‌ای	ارزش‌های زیبایی شناسانه	برابری	سلامتی مردم	برگشت‌پذیری	اجماع
هدف ارزش در ارتباط با پایایی آب زیرزمینی	بهبود بقاء اقتصاد محلی و کیفیت زندگی ساکنان	حفظ و بهبود کیفیت محیط‌زیست	حفظ فرهنگ و تعاملات اجتماعی محلی	حفظ و بهبود زیبایی‌شناسی و زیبایی منظره محیط پیرامون	توجه توأم به حقوق نسل‌های حاضر و آینده	کنترل ریسک و کاهش آسیب به سلامت مردم	افزودن برگشت‌پذیری به برنامه مدیریت بحران	پشتیبانی از تصمیمات مبتنی بر منفعت جوامع محلی
شرح ارزش در ارتباط با پایایی آب زیرزمینی	پمپاژ از آب زیرزمینی برای فعالیت‌های بشری (کشاورزی، صنعت، ...)	پمپاژ از آب زیرزمینی به حدی باشد که تخلیه برای اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی حفظ شود	پمپاژ آب زیرزمینی نباید برای فرهنگ و تعاملات اجتماعی خسارت‌آمیز باشد	برداشت آب زیرزمینی به‌طور مستقیم با مباحث زیبایی‌شناسی و زیبایی منظره مرتبط است	برداشت از آب‌زیرزمینی باید به پیامدهای اجتماعی و نسل‌های آینده توجه کند	برداشت از آب‌زیرزمینی نباید موجب جابه‌جایی فلزات سنگین و آلودگی شود	برداشت از آب‌زیرزمینی نباید موجب فرونشست، شوری، نفوذ آب شور، خشکسالی و شود	برداشت از آب زیرزمینی نباید موجب ایجاد تعارض میان کنشگران و یا تعرض به حقوق پیشنیان شود

در ارزش‌های زیبایی شناسانه، حفظ و بهبود زیبایی‌شناسی و زیبایی منظره محیط پیرامون لحاظ می‌شود (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰). دسته پنجم ارزش‌های برابری است که حول محور تخصیص عادلانه منابع آب زیرزمینی باتوجه‌به منافع هر بخش می‌باشد (Farhadi و همکاران، ۲۰۱۶).

Rinaudo و همکاران (۲۰۱۶) به عدالت اجتماعی در رابطه با این موضوع می‌پردازند. تغییرات و تهدایدات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی به طور نامناسب بر قشر ضعیف تأثیرگذار خواهد بود و بهبود دسترسی به آب زیرزمینی می‌تواند مزایای مختلفی را برای فقرا به همراه داشته باشد (Baguma و همکاران، ۲۰۱۷). به‌طورکلی دو نوع برابری در طراحی سیاست آب در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از حقوق نسل حاضر و نسل آینده. اقدامات سیاستی خاص مانند یارانه‌های آب زیرزمینی که برای نسل فعلی مفید است می‌تواند برای نسل‌های آینده مضر باشد (Zagonari، ۲۰۱۰). بنابراین، نسل‌های آینده باید به روشنی و اعمال جدیت جهت دفاع از منافع نسل آینده در فرآیند حاکمیت آب نماینده داشته باشند (Wiek و Larson، ۲۰۱۲).

ارزش میان نسلی ارزش‌های پیچیده‌تری برای بحث دارد. این عمدتاً به این دلیل است که ادغام دیدگاه بین نسلی مستلزم یک چارچوب زمانی بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال است که اغلب طولانی‌تر از بازه زمانی سیاست (کمتر از ۵۰ سال)، اما کوتاه‌تر از زمان تجدیدپذیری در آب زیرزمینی است (Gleeson و همکاران، ۲۰۱۲). باید در نظر داشت که زمان تجدیدپذیری در آب زیرزمینی به زمان مورد نیاز برای رسیدن سیستم آبخوان به حالت پایای دیگر اشاره دارد و از ده‌ها تا میلیون‌ها سال متغیر است. Lapworth و همکاران (۲۰۱۹) به تشریح مدیریت منابع آب زیرزمینی برای حفاظت و بهبود سلامت عمومی پرداخته‌اند و Lele (۲۰۱۷) سلامت جامعه بشری را تحلیل کرده است.

برگشت‌پذیری، دسته‌ی دیگری از ارزش‌ها با ماهیت عمل‌گرایانه است (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰)، که به منظور دستیابی به پایایی آب زیرزمینی، شرایط مقابله با عوامل خارجی و بحران‌ها و همچنین بازگشت به وضعیت قبل از وقوع بحران را با اتخاذ اقدامات پیشگیرانه برای کاهش بحران در نظر می‌گیرد بحران‌های مربوط به آب زیرزمینی شامل افزایش سطح دریا (Ha، ۲۰۱۸)، خشکسالی شدید (Ranjan، ۲۰۱۳) و فرونشست و فروچاله (Wang و همکاران، ۲۰۱۸) می‌شود. درحالی‌که تاب‌آوری به‌طور کلی یک نگرانی عمده برای ذی‌نفعان است، تبادل میان عملکرد اقتصادی و تاب‌آوری می‌تواند منجر به تضاد شود (Tortajada و همکاران، ۲۰۱۷).

ارزش اصلی دیگر اجماع/توافق است که بسیاری از سیاست‌های آب (مانند دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا، قانون آب فدرال ایالات متحده، قانون مدیریت پایای آب زیرزمینی در کالیفرنیا، برنامه اصلاحات آب استرالیا، قانون پایایی آب در بریتیش کلمبیا و غیره) بر آن تاکید دارند. در مورد حوضه‌های فرا مرزی، ایجاد اجماع می‌تواند چندین کشور همسایه و ذی‌نفعان را نیز شامل شود، که این امر مستلزم بحث درباره موضوعات حساس ملی و تعامل با کسانی است که ممکن است ایده‌های متفاوتی داشته باشند (Gleeson و همکاران، ۲۰۲۰). یکی دیگر از اجزای مهم ایجاد اجماع، حقوق بومی است. اعلامیه سال ۲۰۰۷ سازمان ملل متحد در مورد حقوق مردمان بومی، حق تعیین سرنوشت منطقه‌ایی را تعیین می‌کند، که شامل حق مردم بومی در سراسر جهان برای تعیین آزادانه وضعیت سیاسی خود و پیگیری آزادانه توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خود می‌شود. احترام به حقوق مردم بومی برای اعمال اختیارات مستلزم اصلاح سیاست و تلاش‌های اجتماعی فراتر از فرآیند مشارکتی سنتی است (Wheater و Gober، ۲۰۱۵). باتوجه‌به این تعدد ارزش‌ها، تدوین و اجرای سیاست پایایی آب زیرزمینی فرصتی برای متحد کردن کنشگران با ارزش‌های محیطی و اجتماعی متفاوت است. پایایی آبخوان یک موضوع صرفاً علمی و فنی نیست، بلکه نتیجه ترجیحات و تصمیمات اجتماعی است (Custodio و همکاران، ۲۰۱۹) و به صراحت در سیاست‌های پایایی آب زیرزمینی بیان شده است. برای مثال، کمیته ملی آب زیرزمینی استرالیا (NGC) کارایی پایایی آب زیرزمینی را تحت عنوان «رژیم استحصال آب‌زیرزمینی در چارچوب زمانی مشخص و برنامه‌ریزی شده تحت سطوح بحران قابل قبول که محافظ ارزش‌های اقتصادی، اجتماعی و محیطی وابسته باشد» تعریف می‌کند. جهت پایای آب زیرزمینی در مدیریت منابع آب زیرسطحی، بررسی ارزش‌های اجتماعی ضروری است (Bremer و همکاران، ۲۰۱۸).

تفکیک عوامل پایایی آب زیرزمینی

ارزیابی علمی پایایی آب زیرزمینی مشخص کرده است که فاکتورهای کارایی و حکمرانی آبخوان بسیار متعدد است. بحث در مورد پایایی آب زیرزمینی حول درک اصول هیدرولوژیکی متمرکز است، درحالی‌که باید به رابطه علم- سیاست توجه شود (Tan و همکاران، ۲۰۱۲). عوامل پایای آب زیرزمینی، قابل تعریف، اندازه‌گیری و ارزیابی هستند. Pierce و همکاران (۲۰۱۳) در یک تفکیک مفهومی شش عامل کلیدی برای شناسایی آبدهی آبخوان معرفی نمودند (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰):۱) بررسی وضعیت ذخایر آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان، ۲) بررسی وضعیت کیفی آبخوان، ۳) بررسی نرخ جریان‌های وروری و خروجی و مرتبط با جریان‌های محیط‌زیستی، ۴) محدودیت‌های قانونی، ۵) بررسی‌های اقتصادی و ۶) برابری.

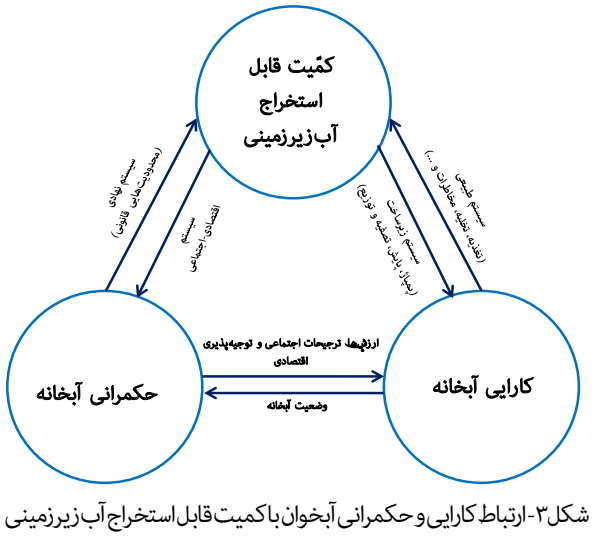
شکل (۳) هشت عامل پایایی آب زیرزمینی را ارائه می‌نماید که از شش عامل آبدهی پایا توسط Pierce و همکاران (۲۰۱۳) شناسایی شده است که رابطه کارایی و حکمرانی آبخوان را نشان می‌دهند. اولین عامل نرخ تغذیه و شرایط هیدرودینامیکی آبخوان بوده، که شامل تأثیرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر تغذیه آبخوان،

افت آبخوان و کاهش (گاهاً غیرقابل برگشت) ذخایر استراتژیک آبخوان می‌باشد؛ همچنین تغییرات نرخ شار تغذیه با تغییر فناوری‌ها و شیوه‌های کشاورزی را نیز در بردارد (Qin و همکاران، ۲۰۱۳). کیفیت آب، دومین عامل است که شامل آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای منبع، نفوذ غیرمنطقی آب شور و ورود فلزات سنگین مانند آرسنیک به آبخوان است. سومین عامل به نرخ تخلیه و جریان‌های محیط‌زیستی مربوط می‌شود که شامل برداشت آب زیرزمینی از پیکره‌ی آب سطحی، تخلیه به چشمه‌ها، و تخلیه آب زیرزمینی به دریا برای جلوگیری از نفوذ آب شور و دیگر کاربردهای مفید مرتبط با آنها است. کارایی آبخوان در ارتباط با مخاطرات طبیعی مانند فرونشست زمین، فروچاله‌ها، زمین لرزه‌ها، افزایش سطح آب دریا و خشکسالی شدید عامل مضاعفی بر شش عامل ذکر شده است (Pierce و همکاران، ۲۰۱۳). خشکسالی شدید بر خلاف مدیریت سفره زیرزمینی در شرایط ایستا، اثرات خارجی غیر ساکن را به دنبال دارد (Milly و همکاران، ۲۰۰۸).

زیرساخت‌های مرتبط با آب زیرزمینی که پمپاژ، تغذیه مصنوعی، پایش، تصفیه و توزیع را امکان‌پذیر می‌کنند، مستقیماً با کارایی آبخوان مرتبط هستند. این عامل همچنین شامل امکانات و فناوری‌هایی است که می‌تواند کارایی آبخوان‌ها را بهبود بخشد، مانند پروژه‌های انتقال آب (Shu و همکاران، ۲۰۱۲)، برای افزایش رزرو در شرایط خشکسالی (Langridge و Daniels، ۲۰۱۷)، حفاظت از جریان‌های احیاکننده محیط‌زیستی (Shi و همکاران، ۲۰۱۲)، شیرین‌سازی و بازچرخانی آب (Langridge و Daniels، ۲۰۱۷)، مدیریت تغذیه آبخوان (Badiuzzaman و همکاران، ۲۰۱۷). حکمرانی آبخوان شامل سه عامل اصلی است که در شکل (۳) نشان داده شده است. حکمرانی آب فرآیندهای تصمیم‌گیری در مورد اهداف منابع و قوانین و اقدامات عملی تعریف شده برای دستیابی به این اهداف است (Gleeson و همکاران، ۲۰۲۰)، نظام حقوقی و نهادی جزء اصلی در حکمرانی آب زیرزمینی است. مروری بر ساختار و نقش چارچوب‌های مؤثر قانونی و نهادی حکمرانی آب‌زیرزمینی برای ارتقای پایایی آب زیرزمینی در چندین مطالعه و گزارش ارائه شده است (سازمان خواربار و کشاورزی سازمان ملل FAO)، ۲۰۱۷؛ Foster و همکاران، ۲۰۱۰).

در اینجا چند محدودیت قانونی و نهادی مورد بحث قرار می‌گیرد که می‌تواند مستقیماً با ارزیابی آب زیرزمینی برای عملیاتی کردن سیاست مرتبط باشد. محدودیت‌های قانونی و نهادی شامل حقابه‌ها مانند حقابه‌های محیط‌زیستی، تخصیص قبلی، منابع مشترک، حقوق بومی و ... است. به‌عنوان‌نمونه، Sophocleous (۲۰۱۲) بیان می‌دارد که بهبود چارچوب سهم تخصیص یافته‌های پیشین و گسترش «استفاده بهینه» در قانون تخصیص منابع آب کانزاس در سال ۱۹۴۵ یک گام ضروری به سمت پایایی آب زیرزمینی است. همچنین Llamas و همکاران (۲۰۱۵)، نشان می‌دهند که باتوجه‌به اجرای دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا ۲۰۰۰ در اسپانیا، مدیریت کلی آب زیرزمینی هنوز آشفته است چرا که آب زیرزمینی به جای اینکه در مالکیت عمومی باشند در حیطه بخش خصوصی باقی مانده است و برنامه‌ریزی آب بر آن متکی است. محدودیت‌های قانونی و نهادی همچنین شامل محدودیت در مکان و عمق چاه‌های استحصالی (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶) یا نوع کاربری مانند استفاده از آب زیرزمینی جهت آبیاری است (Piscopo و همکاران، ۲۰۱۹). این عامل همچنین شامل مقررات مربوط به بهره‌وری و صرفه‌جویی آب مانند تعرفه‌ها (Piscopo و همکاران، ۲۰۱۹) و ارتباط بین آب‌های سطحی و زیرزمینی (Owen و همکاران، ۲۰۱۹) است. محدودیت‌های قانونی و نهادی نیز شامل پایایی آب‌زیرزمینی، عدم اضافه برداشت و سیاست‌های مرتبط با مدیریت آبخوان است. لازم به ذکر است اضافه برداشت از آب زیرزمینی نوعی بهره‌برداری بیش‌ازحد است که باعث اضمحلال آب زیرزمینی می‌شود و زمانی اتفاق می‌افتد که برداشت از تغذیه طبیعی سفره زیرزمینی در طول دوره طولانی مدت فراتر رود (Harou و Lund، ۲۰۰۸). کاهش ذخایر آب زیرزمینی زمانی اتفاق می‌افتد که استخراج طولانی مدت (چند سالانه) باعث کاهش آب تجدیدپذیر آبخوان و یا استخراج از بخش‌های فسیلی آبخوان شود که منجر به کاهش حجم کل آبخوان شده و ذخیره آب شیرین آبخوان به شدت کاهش می‌یابد (Konikow و Kendy، ۲۰۰۵).

سیستم اجتماعی-اقتصادی شامل دو عامل اصلی مربوط به حکمرانی آبخوان است که در شکل (۳) نشان داده شده است. ارزش‌ها و ترجیحات اجتماعی شامل مبادله بین ارزش‌های اصلی است. در نهایت، امکان‌سنجی اقتصادی شامل هزینه پمپاژ، هزینه جایگزینی آب زیرزمینی (به‌عنوان‌مثال با نمک‌زدایی یا آب‌های سطحی تصفیه شده)، هزینه تغذیه مصنوعی و سایر هزینه‌های مربوط به توسعه برداشت از آب زیرزمینی است. این عامل از آنجا که امکان مقایسه مزایای محیط‌زیستی و اجتماعی-اقتصادی استراتژی‌های مدیریتی را جهت انتخاب گزینه برتر در دستیابی به پایای آب زیرزمینی فراهم می‌کند، اهمیت ویژه خواهد داشت (Shi و همکاران، ۲۰۱۲).



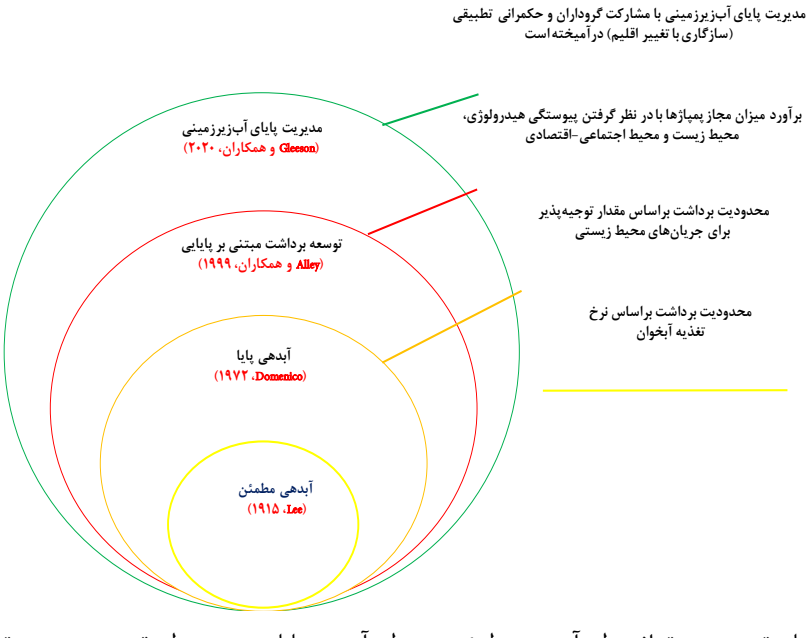
شکل۳- ارتباط کارایی و حکمرانی آبخوان با کمیت قابل استخراج آب زیرزمینی

تعریف پایایی آب‌زیرزمینی

آبدهی مطمئن، یک روش معمول مبتنی بر استفاده از نرخ تغذیه آبخوان به عنوان معیاری برای مشخص نمودن سیاست‌های پایایی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت، در این صورت توسعه برداشت از منابع آب زیرزمینی هنگامی مطمئن تلقی می‌شد که نرخ پمپاژ از نرخ تغذیه طبیعی آبخوان تجاوز نکند. در یک دوره طولانی مدت، نرخ پمپاژ می‌تواند برابر با نرخ تغذیه آبخوان بدون ایجاد پیامدهای منفی، به عنوان «افسانه بیلان آب» تعریف شود (Devlin و Sophocleous، ۲۰۰۵). مبتنی بر مفهوم آبدهی پایا، سایر پژوهشگران به برداشت بخشی از تغذیه آبخوان به عنوان مبنای مفهومی برای استفاده پایا از آب زیرزمینی اشاره کردند. این میزان برداشت آب از آبخوان به عنوان مجموع افزایش نرخ تغذیه و کاهش تخلیه از منابع آب زیرزمینی تعریف می‌شود (Barlow و همکاران، ۲۰۱۸).

آبدهی مطمئن به مقدار برداشت سالانه آب از آب زیرزمینی بدون وقوع پیامدهای نامطلوب برای آب زیرزمینی (Todd و Mays، ۲۰۰۴) و اجتناب از افت سطح آب آبخوان در یک دوره طولانی‌مدت لحاظ می‌شود و آبدهی پایا به وضعیت اجتماع و اکوسیستم وابسته بوده و دو مفهوم پیامدهای نامطلوب و اهداف مدیریت آب زیرزمینی را به‌هم آمیخته است. هدف اصلی برنامه پایایی آب زیرزمینی مبتنی بر آبدهی پایا و مدیریت میزان برداشت و تلاش برای حفاظت آبدهی مطمئن برای نسل حاضر و آینده می‌باشد (شکل ۴).

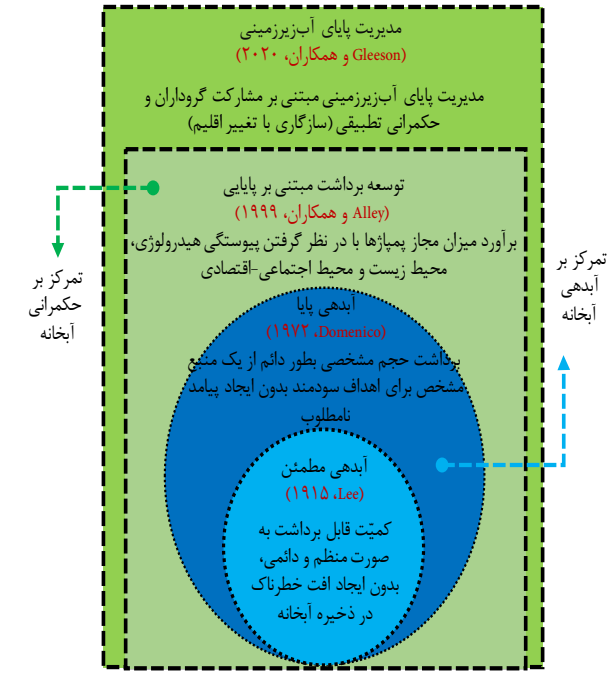
میزان کل برداشت یک عامل مهم در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی است زیرا بر بیلان آب، کاهش ذخیره استراتژیک آبخانه، خدمات اکوسیستم تأثیر می‌گذارد (Konikow و Leake، ۲۰۱۴). اندازه‌گیری‌های تغذیه ضروری هستند، زیرا پایایی بسیار گسترده‌تر از پمپاژ پایا می‌باشد، به‌طوری‌که نرخ تغذیه اثرات بلند مدتی بر کیفیت آب، عوامل اکولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی خواهد داشت (Henriksen و Barlebo، ۲۰۰۸). بنابراین می‌توان فرض کرد تغذیه طبیعی آبخوان و توجه به پویایی سیستم دربرداشت آب، می‌تواند پایایی آب زیرزمینی یک حوضه را تعیین کند (Zhou، ۲۰۰۹). یک رویکرد دقیق می‌تواند مربوط به مکان و مشکل خاص باشد و باید همه ورودی‌های سطحی و زیرسطحی در سیستم را شامل شود. پایایی آب زیرزمینی تابع عوامل کارایی و حکمرانی آبخوان می‌باشد.



شکل ۴- انتقال سیاست و مدیریت از سطح آبدهی مطمئن به سطح آبدهی پایا و سپس سطح توسعه و مدیریت پایایی آب زیرزمینی (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰)

Seward (۲۰۱۰) خاطرنشان می‌کنند که آبدهی پایا به میزان مشارکت و پیامدهای قابل قبول وابسته است برای روشن شدن این نکته، Pierce و همکاران (۲۰۱۳) مفهوم آبدهی آبخوان را ارائه کردند، تداوم آبدهی آبخوان برای ارزیابی علمی پایای آب زیرزمینی در بحث اجماع و توافق مورد تعریف واقع می‌شود شکل (۵) نمای سیستماتیک و یکپارچه از در دسترس بودن آب زیرزمینی، کارایی آبخوان و حکمرانی آبخوان را نشان داده است. Pierce و همکاران (۲۰۱۳) آبدهی پایا را به عنوان محدوده از مقادیر تعریف می‌کنند، که از پایین توسط ذخایر پایای آب زیرزمینی و از بالا به حداکثر آبدهی پایا محدود می‌کنند که مقدار آبی است که می‌توان به‌طور مداوم بدون ایجاد افت مزمن در آب زیرزمینی برداشت نمود. این محدوده بین مجاز و حداکثر پایایی نشان می‌دهد که

آب زیرزمینی را می‌توان به‌عنوان یک سیستم دینامیکی پویا در نظر گرفت (Pierce و همکاران، ۲۰۱۳). به این ترتیب، Gleeson و همکاران (۲۰۲۰)، پایایی فیزیکی را به این صورت تعریف می‌کنند: «آب زیرزمینی تجدیدپذیر ممکن است هر آب زیرزمینی باشد که بتواند به صورت دینامیکی در طی پمپاژ جذب شود که منجر به تعادل پویا جدید در سطوح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی انسانی (تقریباً ۱۰۰ سال) شود» علاوه بر مفاهیم آبدهی پایا و تجدیدپذیری، میزان تخلیه و استرس، مفاهیم اضافی برای تعریف پایایی فیزیکی هستند. اصطلاح فراگیرتر از پایایی فیزیکی، توسعه پایای آب زیرزمینی است که فعالیت‌های انسانی را به عنوان یک جنبه تأثیرگذار در مدیریت آب زیرزمینی می‌شناسد (Sikdar، ۲۰۱۹). این یک انتقال از «آبدهی پایا» به یک اصطلاح کلی‌تر به نام «پایایی آب زیرزمینی» است به این ترتیب، پایایی آب‌زیرزمینی را به عنوان «توسعه و استفاده از آب زیرزمینی به شیوه‌ای که می‌توان برای مدت نامحدودی بدون ایجاد پیامدهای نامطلوب محیط‌زیستی، اقتصادی- اجتماعی» تعریف نمود.



شکل ۵- مفاهیم مرتبط با کارایی و حکمرانی آبخوان

تعاریف پایایی فیزیکی، یا توسعه پایای آب زیرزمینی همانطور که توضیح داده شد، تنها شامل عوامل حکمرانی آبخوان نمی‌شود. پایایی آب زیرزمینی نه تنها تابعی از کارایی آبخوان است، بلکه تابعی از فرآیندهای بزرگتر حکمرانی مشارکتی و تطبیقی است. این امر در سیاست‌های مدرنی مانند قانون مدیریت پایای آب زیرزمینی در کالیفرنیا که بین آبدهی پایا و مدیریت پایای آب زیرزمینی تفاوت قائل می‌شود، منعکس شده است. دو عبارت مرتبط با آبدهی را تعریف می‌کند: آبدهی عملیاتی که راه‌حل‌های انتخابی برای اجرای عملیاتی و فنی سیاست‌ها توصیف می‌کند. بازده اجماع که اجتماع را از طریق مشارکت و یا فرآیندهای حمکرانی تطبیقی را مورد توجه قرار می‌دهد. این مفهوم از زنجیره عملکرد آبخوان هر دو جنبه ارزیابی فنی و اجزای مشارکت در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی را به هم مرتبط می‌کند. علاوه‌براین، برای ارزیابی ظرفیت تولید آبخانه می‌توان یک حاشیه مطمئن به این شرایط عملکرد اضافه کرد. که این مفهوم را «عملکرد مدیریت شده[۲]» تعریف شده است. همچنین حفظ خدمات اکوسیستم و فاکتورهای آن مورد توسعه قرار گرفت. بر اساس اصل پیشگیری، باتوجه‌به عدم قطعیت در تنوع آب‌وهوایی و تغییرات مکرر در استراتژی‌های آبیاری، آبدهی مطمئن با یک حاشیه اطمینانی برآورد می‌شود که از وارد شدن خسارات برگشت‌ناپذیر به اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی جلوگیری شود (Gallardo و همکاران، ۲۰۰۹).

برخی از سفره‌های آب در مقیاس زمانی جامعه انسانی تجدیدناپذیر هستند (Bierkens و Wada، ۲۰۱۹) و به احتمال بسیار زیاد آبخوان‌های محصور و بسیار عمیق و همچنین آبخوان‌هایی که در مناطق خشک و نیمه خشک واقع شده‌اند تجدیدناپذیر هستند (Kløve و همکاران، ۲۰۱۴). به‌عنوان‌مثال، سیستم آبخوان نوبی در شمال آفریقا، بزرگترین آبخوان بین مرزی و غیر قابل تجدید جهان، حاوی حجم زیادی از آب زیرزمینی با کیفیت بالا است که میلیون‌ها سال قدمت دارد، اما تغذیه ناچیز دریافت می‌کند (Voss و Soliman، ۲۰۱۴). جهت استفاده پایای آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، باید مفهوم «برداشت هوشمندانه[۳] آب‌تجدیدناپذیر» با هدف استفاده از منابع آب زیرزمینی به کارآمدترین روش توسعه یابد. این برداشت آب از ذخایر استراتژیک تجدیدناپذیر صورت می‌پذیرد، برخی از حوضه‌ها ممکن است در حال حاضر تجدیدپذیر به نظر برسند، اما به دلیل تغییرات هیدرولوژیکی در مقیاس بزرگ نمی‌توان آنها را در دوره‌های زمانی طولانی تجدیدپذیر به حساب آورد. برای جلوگیری از بهره‌برداری بیش از حد با دوره‌های طولانی‌مدت از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان مانند آبخوان نوبی و دشت‌ها[۴] و بسیاری دیگر از آبخوان‌ها، باید اهداف پایایی بلندمدت برای کیفیت و کمیت آب در یک افق زمانی چند نسلی ۵۰ تا ۱۰۰ ساله تعیین شود و با تصدیق تأثیرات بلندمدت، از طریق مشارکت جامعه پیاده‌سازی شود. بهره‌برداری بیش از حد از آب زیرزمینی یک عبارت کلی است که به هرگونه توسعه آب زیرزمینی که پیامد نامطلوب ایجاد کند اشاره دارد (Derakhshan و همکاران، ۲۰۲۳). در بحث پایایی آب زیرمینی، مقیاس زمانی و افق برنامه‌ریزی جهت دستیابی به پایایی باید لحاظ شود که این مهم تابعی از کارایی و نحوه حکمرانی آبخوان می‌باشد. در رابطه با ارزیابی پایایی آب زیرزمینی، ارتباط پایایی آب زیرزمینی با رعایت حقوق نسل‌های آینده، پایایی آب زیرزمینی از دید

کنشگران مختلف و اهداف متنوع ارزیابی پایایی آب زیرزمینی در یک دوره طولانی‌مدت و با مدل‌سازی پویا در دوره‌های کوتاه تعیین می‌شود و نشان می‌دهد که چگونه پایایی آب زیرزمینی بر این اساس تغییر می‌کند.

مشارکت ذی‌نفعان به‌طور فزاینده‌ای به عنوان یک جزء مهم سیاست پایایی آب زیرزمینی محسوب می‌شود. پژوهش در مورد حقابه‌داران کشاورزی آب زیرزمینی در فرانسه، نشان‌دهنده نیاز به ارائه مشروعیت شناختی در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی از طریق ارتباط بهتر نتایج علمی با استفاده‌کنندگان از آب زیرزمینی است (Rinaudo و همکاران، ۲۰۱۶). فرآیند طرح‌ریزی برای پایایی آب زیرزمینی مستلزم درک صحیح ساختارهای سازمانی، مشارکت گرواران و همچنین پشتیبانی به وسیله مدل‌سازی از شرایط واقعی است (Quevauviller و همکاران، ۲۰۱۶). انگیزه‌های عمومی برای روند رو به رشد توسعه و پشتیبانی تصمیم‌گیری برگرفته از علم موجود و تحقیقات علمی مبتنی بر جلب مشارکت ذی‌نفعان برای اطمینان از اجرای موثر سیاست‌های پایایی آب زیرزمینی در حال توسعه می‌باشد. در شکل (۶) مشخص می‌شود که در هنگام تعیین پایایی آب زیرزمینی، مفاهیمی مانند خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی باید در نظر گرفته شود و آب‌های سطحی و زیرزمینی به عنوان یک واحد یکپارچه محسوب شده و پایای آب زیرزمینی فراتر از یک فرآیند برنامه‌ریزی آب مبتنی بر مشارکت و اجماع می‌باشد.

در چندین مقاله مروری در مورد ارزیابی علمی پایایی آب زیرزمینی برای پیاده‌سازی سیاست آب زیرزمینی در محدوده‌های جغرافیایی مختلف مانند: استرالیا (Tan و همکاران، ۲۰۱۲)، کالیفرنیا (Owen و همکاران، ۲۰۱۹)، چین (Wang و همکاران، ۲۰۱۸)، فلوراید (Bierkens و Wada، ۲۰۱۹)، فلوریدا (Asefa و همکاران، ۲۰۱۴)، هند (Saha و Ray، ۲۰۱۹)، کانزاس (Gleeson و همکاران، ۲۰۱۲)، هلند (Griffioen و همکاران، ۲۰۱۴)، آفریقای جنوبی (Seward و همکاران، ۲۰۰۶)، جنوب شرقی آسیا (Sikdar، ۲۰۱۹)، تگزاس (Sheng، ۲۰۱۳)، اسپانیا (Llamas و همکاران، ۲۰۱۵)، آمریکا (Sophocleous، ۲۰۱۰) و مقالات دیگر دیدگاه‌هایی را در مورد هم‌تکاملی هم‌زمان سیاست، فعالیت‌های انسانی و پایایی آب زیرزمینی در چین (Han و همکاران، ۲۰۱۷)، منطقه مدیترانه (Leduc و همکاران، ۲۰۱۷)، پاکستان (Archer و همکاران، ۲۰۱۰)، اسپانیا (Custodio و همکاران، ۲۰۱۹)، زیمباوه (Muchingami و همکاران، ۲۰۱۹) ارائه می‌دهند.

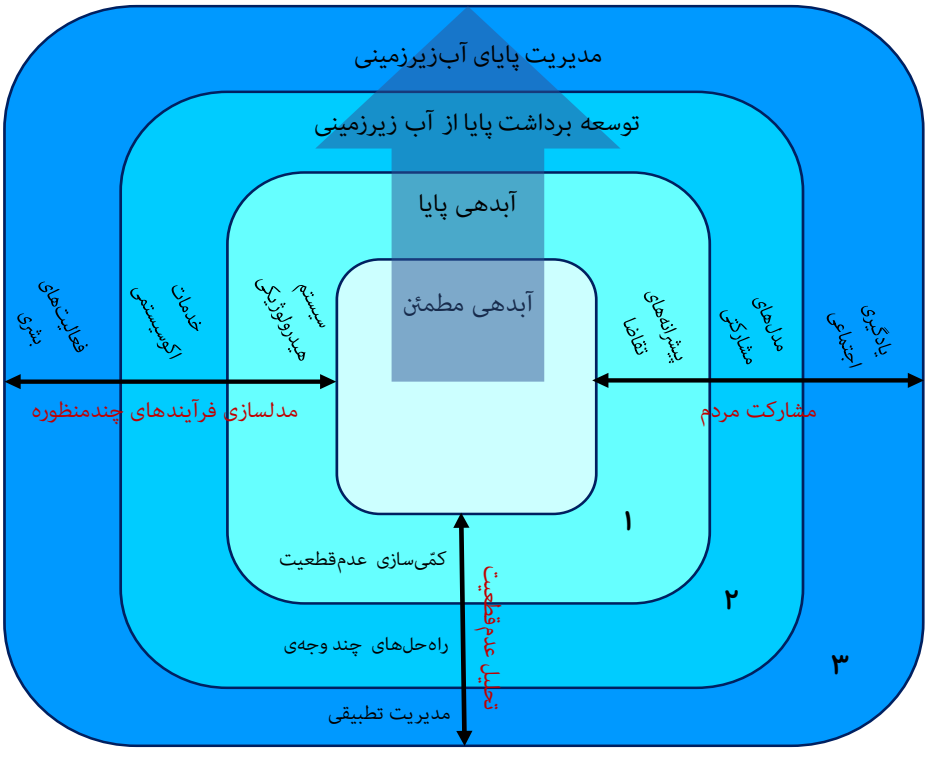
نکته نظرات کلی منعکس شده از این مطالعات در سه چالش کلی خلاصه شده است: اول، درک و مدل‌سازی هم‌تکاملی جوامع با سیستم‌های منابع آب، اکوسیستم‌ها و تعامل آنها با اقلیم یک مشکل فرارشته‌ای است که جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی، فناوری و نهادی را در برمی‌گیرد. دوم، مدل‌های یکپارچه‌ای که هم جنبه‌های طبیعی و هم جنبه‌های انسانی سیستم‌های پیچیده و پویای منابع آب را در برمی‌گیرند، دارای عدم قطعیت‌های عمیق هستند. سوم، اغلب یک شکاف ارتباطی بین جامعه علمی دانشگاهی، سیاست‌گذاران و مدیران آب وجود دارد که می‌تواند تقاضا برای خروجی‌های علمی را کاهش دهد. بنابراین، درخواست‌های فزاینده‌ای برای نقش مهم مشارکت برای افزودن مقبولیت، اعتبار و برجستگی به ارزیابی‌های علمی وجود دارد. این می‌تواند منجر به این امر شود که تقاضا و تاثیر خروجی‌های علمی بیشتر شود این خروجی‌ها برای تصمیم‌گیران مدیریت آب به راحتی قابل پذیرش شود. نمایش تلفیق علوم طبیعی و اجتماعی برای توسعه و عملیاتی کردن سیاست پایایی آب زیرزمینی به منظور جهت‌گیری‌های گسترده امنیت و پایای آینده آب در این پژوهش ترسیم شده است با این هدف استدلال شد که یک فرآیند علمی برای اجرای بهتر سیاست پایای آب زیرزمینی باید به شرح زیر صورت پذیرد (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰):

۱) تجزیه و تحلیل روابط و تأثیرات متقابل سناریوهای سیستم‌های آب سطحی، اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های انسانی

۲) تفسیر تحلیل عدم قطعیت‌های چندمدلی با مدیریت تطبیقی به منظور بررسی بیان "آنچه شناخته شده است، آنچه ممکن است، آنچه ناشناخته است" (Ferré، ۲۰۱۷)

۳) اجرای مشارکت دوسویه بین جوامع مدیریتی و سیاست‌گذاری

پیشنهاد می‌شود دستور اولیه برای ارزیابی پایایی آب زیرزمینی موثر، ارائه و گسترش دانش علمی با عدم قطعیت آن براساس ترجیحات اجتماعی در یک فرآیند مشارکتی بیان شود. شکل (۶) نشان می‌دهد چگونه این سه مؤلفه اصلی (یعنی مدل‌سازی چند فرآیندی، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و مشارکت) سطوح در حال تحول مشارکت و ادغام دارند. این شکل به بررسی پیشرفت‌های صورت گرفته در جهت ادغام این سه مولفه در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی می‌پردازد.



شکل ۶- مدل‌سازی چند فرآیندی، آنالیز عدم قطعیت و مشارکت اساسی‌ترین مفاهیم برای ارزیابی پایایی آب زیرزمینی (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰)

آنالیز عدم قطعیت در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی

ماهیت دانش علمی، نامشخص بودن آن است و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت ضروری است تا کمک کند تا سیاست‌های آب زیرزمینی‌ای انتخاب شود که منعکس‌کننده دانسته‌ها جهت مدیریت ریسک باشد. در عمل این امر «با ایده‌های ریشه‌دار[۵]، آموزش ناکافی و منابع ناکافی با مشکل مواجه شده است» و در نتیجه، این موضوع به‌طورکلی مورد توجه کافی قرار نمی‌گیرد. در واقع مواجه با برخی آژانس‌های محلی که اعلام می‌دارند، پژوهشگران از بیان عدم قطعیت به آنها یا در جلسات عمومی خودداری کنند، غیر معمول نیست. هرگونه عدم قطعیت پیرامون دانش علمی عواقبی هم برای مقامات و هم برای ذی‌نفعان دارد. در بدترین حالت، ممکن است به عنوان فقدان دانش تعبیر شود و از آن برای به تأخیر انداختن کارهای اصلاحی که ممکن است از نظر مالی یا انتخاباتی پرهزینه باشد، استفاده شود. به‌طورکلی، مدیران آب با پیچیدگی و شکنندگی فزاینده سیستم‌های هیدروسیستم اجتماعی مواجه هستند، درحالی‌که اطلاعات قابل اعتماد اغلب به سختی به دست می‌آید، مدیران آب نیاز به طراحی استراتژی‌های بلند مدت برای حفاظت از منافع جمعی و پایداری منابع آب زیرزمینی دارند و تحلیل عدم قطعیت در مدیریت آب زیرزمینی رایج است (Leduc و همکاران، ۲۰۱۷).

هدف این بخش بررسی ادبیاتی است که تجزیه و تحلیل عدم قطعیت را در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی گنجانده است تا نشان دهد این یک جزء ضروری در ترفیع پایدار آب زیرزمینی برای تسهیل اطلاعات قابل اعتماد است.

دو مؤلفه در یک تحلیل عدم قطعیت موفق مورد بحث قرار می‌گیرد که عبارتند از تحلیل عدم قطعیت چند مدلی و مدیریت تطبیقی. تحلیل عدم قطعیت چندمدلی موضوع سخنرانی دارسی ۲۰۱۶ است (Ferré، ۲۰۱۷) و مدیریت تطبیقی یک جزء سیاست جدایی‌ناپذیر در چندین قانون آب است. عدم قطعیت پارامتری به یک متغیر پیوسته یا گسسته اشاره دارد که پارامترهای مدل هستند. عدم قطعیت مفهومی یا مدل‌سازی به روش‌های جایگزین، ساختارهای ریاضی، مفهوم‌سازی‌ها، مفروضات، و غیره اشاره دارد. مثلا تغذیه مجدد را می‌توان به عنوان یک پارامتر مدل با توزیع احتمال پیوسته با استفاده از ضریب تغذیه مجدد نشان داد. به طور متناوب، مدل‌های مفهومی متعددی را می‌توان توسعه داد و کالیبره کرد تا مفاهیم مختلف در مورد تغذیه مجدد را نشان دهد و سناریوهای متعددی را می‌توان برای نشان دادن تغذیه مجدد احتمالی در آینده ایجاد کرد. همچنین از اصطلاح تحلیل عدم قطعیت به‌طورکلی برای اشاره به بحث، شناسایی، توصیف، حل و فصل، اولویت‌بندی، کمی‌سازی، کاهش یا برقراری ارتباط عدم قطعیت استفاده شد.

انگیزه‌های انجام تحلیل عدم‌قطعیت در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی

انجام تحلیل عدم قطعیت در ارزیابی پایایی آب زیرزمینی حداقل به پنج دلیل مورد نیاز است. دلیل اول این است که تحلیل عدم قطعیت یک ابزار یادگیری مفید است. دوم، تحلیل عدم قطعیت جزء ضروری یک مدل علمی قابل دفاع است. این امر به ویژه زمانی ضروری و مفید است که مدل‌ها یا نتایج مدل‌سازی توسط گروداران یا در پرونده‌های دادگاه مورد اعتراض قرار می‌گیرد. به‌عنوان‌نمونه، نقش تجزیه و تحلیل عدم قطعیت را به منظور تأیید شبیه‌سازی مونت کارلو و ارائه طیفی از نتایج به جای یک مقدار عددی واحد بدون تفسیر به نظری بودن داده‌ها، در دادگاه‌های ایالات متحده بررسی شد (Womble، ۲۰۱۷). در هر صورت، مونت کارلو اطمینان بیشتری نسبت به گزینه‌های اصلی ارائه می‌دهد. سوم، درک و پرداختن به عدم قطعیت یک الزام خط‌مشی برای چارچوب‌های سیاستی است که مفهوم مدیریت تطبیقی را اتخاذ می‌کند. به‌عنوان‌مثال، چارچوب مدیریت تطبیقی استرالیا با قانون مدیریت پایدار آب زیرزمینی کالیفرنیا مطابقت دارد زیرا هر دو سازمان‌های محلی را ملزم می‌کنند که شکاف‌های دانش و عدم قطعیت‌ها را از طریق کسب اطلاعات جدید با نظارت بر برنامه‌ها و اصلاح اقدامات برنامه‌ریزی و مدیریت هماهنگ کنند (Rohde و همکاران، ۲۰۱۷). چهارم، برقراری ارتباط، بحث، حل و فصل و تصمیم‌گیری استراتژیک در مورد عدم اطمینان با کنشگران می‌تواند یک ابزار مشارکت بسیار موثر باشد. این امر مشروعیت مدل‌ها، نتایج مدل‌سازی و تصمیمات اتخاذ شده با استفاده از مدل‌ها را افزایش می‌دهد. در نهایت، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یک جزء ضروری در ارزیابی پایداری آب زیرزمینی موثر است.

اهداف انجام تحلیل عدم قطعیت در مرور ادبیات پایایی آب زیرزمینی

• بررسی محدودیت‌های مدل‌ها

مدل‌سازی فرآیندی است که از طریق آن دانش خود در مورد سیستم انتقال قرار داده می‌شود و تحلیل عدم قطعیت فرآیندی است که به وسیله آن دانش ناقص خود را در مورد سیستم به اشتراک گذاشته می‌شود. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یک ابزار عالی برای مدل‌سازان برای درک و ارتباط عدم قطعیت و محدودیت‌های مدل است. به‌عنوان‌مثال، پیسکوپو منابع عدم قطعیت را شناسایی می‌کند تا هشدار دهد که یک طرح مدیریت آب زیرزمینی پیشنهادی مقدماتی است (Piscopo و همکاران، ۲۰۱۹) زیرا عدم قطعیت‌های سیستم هنوز به سختی قابل اندازه‌گیری است. همچنین، برقراری ارتباط با کاربران نهایی و توانایی‌های مدل، ریسک کاربرد نادرست از مدل را کاهش می‌دهد. حتی اگر عدم قطعیت اندازه‌گیری نشود، تحلیل کیفی عدم قطعیت می‌تواند آموزنده و برای کاهش عدم قطعیت مفید باشد. به‌عنوان‌مثال، دو مدل مفهومی که نشان‌دهنده مفهوم‌سازی‌های تغذیه محلی یا جریان درون حوضه است پیشنهاد شد و محدودیت‌های این دو مدل با مفاهیمی بر پایداری آبخوان مورد بحث قرار داده شد (Gillespie و همکاران، ۲۰۱۲). به‌عنوان‌مثال، گالاردو همچنین محدودیت‌های مدل توسط گالاردو مورد بحث قرار گرفت و ضریب ایمنی ۲۰٪ برای توضیح عدم قطعیت پیشنهاد شد.

• سناریوپردازی برای ارتقا مباحث

ایجاد سناریوهای مختلف پیش‌بینی، اکتشافی و هنجاری ساده‌ترین و رایج‌ترین رویکردها برای تحلیل عدم قطعیت هستند (Börjeson و همکاران، ۲۰۰۶). در زمینه پایداری آب زیرزمینی، شامل سناریوهای پمپاژ، سناریوهای تغذیه مجدد، سناریوهای افزایش سطح دریا[۶]، سناریوهای صادرات[۷]، سناریوهای استفاده از زمین، سناریوهای انگیزه و اولویت‌های گروداران و سناریوهای سیاست‌گذاری و غیره است. درحالی‌که سناریوها را می‌توان برای اهداف چندگانه تولید کرد، همانطور که در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد، ابتدا ساده‌ترین حالت تولید سناریو مورد بحث قرار گرفته است که نشان دادن احتمالات آینده و ایجاد آن مورد توجه بوده است. به‌عنوان‌مثال، (El Kadi و همکاران، ۲۰۱۴) پژوهشی را در جزیره ججو، کره جنوبی انجام دادند تا نشان دهند اگر خشکسالی تاریخی در آینده رخ دهد، آبدهی مطمئن را تا ۱۶ درصد کاهش می‌دهد، دبی چشمه را تا ۲۸ درصد کاهش می‌دهد و ۲۷ درصد چشمه‌ها در مقایسه با حالت پایه خشک می‌شود. چندین مطالعه سناریوهایی را برای حمایت از نیاز به اقدامات سازگارانه/ تطبیقی و سیاست‌های جدید ایجاد می‌کنند همچنین سناریوهای تغذیه ناشی از تغییرات آب‌وهوایی و سناریوهای پمپاژ به دلیل افزایش جمعیت و سایر فعالیت‌ها در صحرای آتاکاما در شمال شیلی ارائه شد تا نیاز به استفاده از منابع آب جایگزین مانند نمک‌زدایی را برای به حداقل رساندن اثرات ترکیبی رشد اقتصادی و تغییرات آب و هوایی بر روی آبخوان نشان دهند (Urrutia و همکاران، ۲۰۱۸). به طور مشابه، تأثیر ترکیبی تغییرات آب و هوا و افزایش تقاضای آب، بر تخلیه آبخوان و خطر تخریب اکولوژیکی در آلگاروه، پرتغال بررسی شد و برای تعیین نیاز کنشگران به آماده‌سازی ابزارهای اجتماعی و فنی برای کاهش این اثرات و گسترش تعاریف فعلی پایایی در منطقه مورد مطالعه است (Stigter و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهش‌های دیگر علاوه‌براین از نیاز به رویکردهای جدید برای پشتیبانی تصمیم در شرایط عدم اطمینان حمایت می‌کنند. به‌عنوان‌مثال Passarello و همکاران (۲۰۱۴) سناریوهای تغییر کاربری زمین را برای یک منطقه شهری در تگزاس توسعه دادند

تا به ذی‌نفعان تأثیر شهرنشینی و پیامدهای این عدم قطعیت‌های علمی را بر تصمیمات سیاست و مدیریت آب شهری نشان دهند به طور مشابه، (Gober و همکاران، ۲۰۱۰) عدم قطعیت تغییرات آب و هوا را در تجزیه و تحلیل تصمیم رسمی برای برنامه‌ریزی آب ادغام کردند تا بینش‌هایی را در مورد برنامه‌ریزی آب در فینیکس، آریزونا ارائه دهند و نیاز به رویکردهای جدید برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت را نشان دهند.

• برآوردهای کمی در مورد عدم قطعیت

برای کمی‌سازی تأثیر عدم قطعیت پارامتری، مدل و سناریو پیش‌بینی مدل رایج‌ترین کار در تحلیل عدم قطعیت است. به‌عنوان‌نمونه، کل منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری دانمارک ۱ × ۱۰۹ متر مکعب در سال تخمین زده شد و تخمین عدم قطعیت برای برآورد منطقه‌ای ارائه شد که از ۱۰±٪ تا ۴۰±٪ متغیربود (Henriksen و همکاران، ۲۰۰۸). عدم قطعیت در مدل‌های مدیریتی برای ارزیابی پایایی آب زیرزمینی همه‌جا وجود دارد. مدل‌سازان آب زیرزمینی معمولاً با ۱) ناهم‌گونی پیچیده زیرسطحی، ۲) متغیرهای حالت و پارامترهایی که وابسته به مقیاس، مکانی و زمانی هستند، ۳) کمبود داده در مورد زمین‌شناسی زیرسطحی، ۴) عدم اطمینان در مورد تغذیه و ۵) مدل‌های عددی فشرده محاسباتی که عموماً مانع از کمی‌سازی عدم قطعیت می‌شوند، مواجه هستند. باوجود این چالش‌ها، بررسی سیستماتیک در مورد کمی‌سازی عدم قطعیت و تأثیر آن بر پشتیبانی تصمیم‌گیری در هیدرولوژی آب زیرزمینی محدود شده است. این امر به ویژه در ادبیات پایایی آب زیرزمینی صادق است. پیشرفت‌ها در کمی‌سازی عدم قطعیت در هیدرولوژی زیرسطحی برای یکپارچه‌سازی داده‌های مدل، عدم قطعیت خصوصیات زیرسطحی و عدم قطعیت مفهومی بررسی و بحث شدند. بااین‌حال، تکنیک‌ها و ابزارهای برجسته شده در این پژوهش‌ها به طور گسترده در مطالعات مدل‌سازی عددی پایایی آب زیرزمینی استفاده نمی‌شوند. مدل‌های قطعی آب زیرزمینی اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند و کمّی‌سازی عدم قطعیت در خروجی‌های مدل به طور کلی با استفاده از تحلیل حساسیت، و مدل‌های مفهومی قطعی متعدد زیرسطحی ارزیابی می‌شود. همچنین، از یک مدل جایگزین در چارچوب بهینه‌سازی برای پرداختن به عدم قطعیت پارامتری هدایت هیدرولیکی و تخلخل استفاده می‌شود. منابع عدم قطعیت مورد بحث در این پژوهش‌ها در مورد عدم قطعیت پارامتری و مفهومی شامل زمین‌شناسی زیرسطحی، هدایت هیدرولیکی، نسبت ناهمسانگردی، تغذیه مجدد، شرایط مرزی، نرخ‌ها و مکان‌های پمپاژ، هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه، تخلخل خاک می‌باشد. مدل‌های آب زیرزمینی تنها یک لایه عدم قطعیت در مدل‌های آب-اکولوژی-انسانی هستند. تحلیل عدم قطعیت در سیستم‌های آب-اکولوژی-انسان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. درحالی‌که چندین مقاله در مورد عدم قطعیت سیستم‌های انسانی-آب، اکوسیستم‌ها، اکوسیستم‌های آبی، سناریوهای آینده و پشتیبانی تصمیم‌گیری بحث کرده‌اند، در ادبیات پایایی آب زیرزمینی کار زیادی انجام نشده است. چالش‌ها و راه‌حل‌های کمی‌سازی عدم قطعیت در خدمات اکوسیستم مورد بحث قرار گرفته است و می‌تواند برای مدل‌های اکوسیستم آب در هیدرولوژی مفید باشد. منابع مورد بررسی در تعیین عدم قطعیت شامل، شامل عوامل آب و هوا، عوامل اقتصادی، پارامترهای بهره‌وری عامل و رفتارهای انسانی است. با استفاده از یک مدل پدیدارشناسی، یک تحلیل عدم قطعیت از یک مدل اقتصادی-آب زیرزمینی برای ارزیابی پایایی آب زیرزمینی انجام می‌شود. منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل سیاست‌های تخصیص در برنامه‌ریزی‌های آینده، تنوع بارندگی، توزیع مکانی پمپاژ، قابلیت انتقال و ذخیره آبخوان، شیوه‌های آبیاری، پارامترهای عملکرد محصول است. عدم قطعیت خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد که چگونه انواع عدم قطعیت‌ها در چنین مدلی را می‌توان با تعدادی از روش‌ها از جمله تبیین سناریوها و محدودیت‌های پارامترها، مدل‌های متعدد، نمونه‌برداری از سری زمانی و رگرسیون خطی قوی برای کالیبراسیون مدل در نظر گرفت.

• شناسایی و اولویت‌بندی منابع عدم قطعیت

تحلیل عدم قطعیت یک ابزار تشخیصی مدل است. برای نمونه، یک روش میانگین‌گیری مدل بیزی[۸] سلسله مراتبی که اجزای مدل نامشخص را جدا می‌کند توسعه یافته است (Elshall و Tsai، ۲۰۱۴). این برای ارزیابی نسبی گزاره‌های هر جزء مدل نامشخص و درک سهم هر جزء مدل نامشخص در پیش‌بینی و واریانس مدل و اولویت‌بندی سهم هر جزء مدل نامطمئن در عدم قطعیت کلی مدل است. به طور مشابه (Dai و همکاران، ۲۰۱۵) تجزیه و تحلیل حساسیت سلسله مراتبی را برای شناسایی فرآیندهای مهم سیستم تحت عدم قطعیت مفهومی و پارامتری توسعه دادند این روش‌ها و روش‌های مشابه به عنوان ابزار یادگیری برای پیشبرد دانش در مورد مدل عمل می‌کنند. این روش‌ها عمدتا شامل طراحی ترکیبی برای نمایش اجزای مدل نامشخص هستند. به‌عنوان‌مثال، در ادبیات پایایی آب زیرزمینی، (Calderhead و همکاران، ۲۰۱۲)، از سناریوهای متعدد با طراحی ترکیبی برای نشان دادن چندین مؤلفه مدل نامشخص استفاده می‌کنند و نشان می‌دهند که تأثیر تغییرات آب و هوایی بر تغذیه تنها نقش جزئی در وقوع فرونشست در شهر مکزیک در مقایسه با سناریوهای پمپاژ و صادرات آب زیرزمینی[۹] دارد همچنین در شمال شرقی تایلند نشان داده شد که عمق و ضخامت متغیر آبخوان نسبت به شرایط مرزی مدل تأثیر بیشتری بر تخمین عملکرد آبدهی پایا دارد (Pholkern و همکاران، ۲۰۱۹). تجزیه وتحلیل مقایسه‌ای بین نتایج مؤلفه‌های حاصله از مدل،

بدون در نظر گرفتن احتمالات، عدم قطعیت‌ها و تعاملات بین مؤلفه‌ها از محدودیت‌های این پژوهش‌ها به حساب می‌آید.
Feng و همکاران (۲۰۱۸) از یک رویکرد انتساب برای مطالعه تعامل بین تأثیرات آب و هوایی و انسانی بر پایایی آب زیرزمینی برای یک آبخوان ساحلی در شمال چین استفاده می‌کنند که منجر به چندین بینش مرتبط با عملکرد آبخوان می‌شود که نیازمند مقررات سخت‌گیرانه در پمپاژ آب زیرزمینی است.

• تحلیل ارزش داده[10]

منابع مهم عدم قطعیت شناسایی شده ممکن است برای تسهیل تجزیه و تحلیل ارزش داده استفاده شود، که هدف آن طراحی برنامه‌های جمع‌آوری داده‌ها به‌گونه‌ای است که سود مورد انتظار اطلاعات جدید از هزینه آن بیشتر شود. در هیدرولوژی، این معمولاً با استفاده از چارچوب بیزی[11] برای شناسایی مکان‌ها یا انواع داده‌های جدید انجام می‌شود. Timani و Peralta (۲۰۱۵) از یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی چند مدلی برای تطبیق دو مدل مفهومی متفاوت که در بین ذی‌نفعان مورد بحث هستند، استفاده می‌کنند و حدود ۲۵ درصد تفاوت حداکثر عملکرد چند ساله را نشان می‌دهند و با روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی برای دو مدل متفاوت، داده‌های میدانی را شناسایی می‌کنند که برای حل این تضاد بیشتر مورد نیاز است علاوه‌براین، Lee و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از یک مدل عددی آب زیرزمینی با بازنمایی‌های مختلف اطلاعات در مورد آبخوان و خطر آلودگی آن، ارزش داده را به تجزیه و تحلیل ارزش اطلاعات گسترش دادند و اثربخشی اطلاعات پایش آبخوان را در دستیابی به استفاده پایدارتر ارزیابی می‌کنند و نشان می‌دهند که نرخ پمپاژ زمانی متفاوت است که اطلاعات ریسک که داده‌های مربوط به شرایط آبخوان را ترکیب می‌کند در اختیار کاربران قرار می‌گیرد و سطح اطلاعات در مورد وضعیت آبخوان‌ها بر چگونگی رفتار استخراجی نیز تأثیر می گذارد. این مطالعه اهمیت داده‌های آلودگی را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که پمپاژ در آزمایش‌هایی که آلودگی امکان‌پذیر است در مقایسه با آزمایش‌هایی که هزینه پمپاژ تنها عامل منع استفاده از آب زیرزمینی است، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

• شناسایی عدم قطعیت طرح‌ها

در صورت افزایش بروز عدم قطعیت، قابلیت اطمینان یک طرح تغییر خواهد نمود. به‌عنوان‌مثال، در یک مطالعه، برنامه‌ریزی مبتنی بر احتمال با میانگین‌گیری مدل بیزی ترکیب شد تا تأثیر عدم قطعیت ساختار زمین‌شناسی در طراحی کنترل کیفیت آب زیرزمینی در مقایسه با برنامه‌ریزی محدود و احتمال‌دهی سنتی ارزیابی شود، مطالعه نشان داد، در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری به تنهایی قابلیت اطمینان طراحی را بیش از حد برآورد می‌کند. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت می‌تواند به شناسایی برنامه‌های قوی باتوجه به عدم اطمینان کمک کند (chitsazan و همکاران، ۲۰۱۵). تحلیل عدم قطعیت پاسخی به این سؤال ارائه می‌دهد که اگر یک فرض مدل اشتباه باشد، چه می‌شود و ازاین‌رو به ذی‌نفعان اجازه می‌دهد تا سیاستی را با درک تأثیرات نامطلوب احتمالی انتخاب کنند، یا اینکه نتیجه مطلوب را ارائه دهددر ادبیات پایایی آب زیرزمینی، چنانچه شرایط فرض بهینه و ایده‌آل تغییر کند، چندین مطالعه تحلیل عدم قطعیت را برای شناسایی طرح‌های قوی باتوجه‌به عدم قطعیت در نظر می‌گیرند (Joseph و همکاران، ۲۰۱۲). به‌عنوان‌نمونه از یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی فازی برای شناسایی یک سیاست بهتر برای مقابله با عدم قطعیت در مورد تعیین شرایط مطلوب آینده به دلیل درک ناقص از دینامیک آبخوان در جنوب تگزاس استفاده می‌کنند. این رویکرد فازی تخمین‌های کمتری از در دسترس بودن آب زیرزمینی در مقایسه با طرح بهینه‌سازی واضح به همراه داشت، زیرا عدم قطعیت سهام‌داران را به حساب می‌آورد (Uddameri و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین Mulligan و همکاران (۲۰۱۴)دو سیاست استفاده از آب زیرزمینی در کالیفرنیا را تحت چارچوب عدم قطعیت بهره‌وری مقایسه کردند و از دو رویکرد مدل‌سازی برای کشف تأثیر مفروضات مدل‌سازی بر عملکرد پیش‌بینی شده این سیاست‌ها استفاده کردند

• شناسایی مدل‌های مهم و یا سناریوپردازی عدم قطعیت

تحقق(های)پارامتر مدل بحرانی،مدل(های)بحرانی یاسناریو(های) بحرانی به مواردی گفته می‌شود که بسته به سطح قابلیت اطمینان مورد نظر، بیشترین تاثیر را بر راه‌حل دارند. در ادبیات پایداری آب زیرزمینی، تحلیلی از انعطاف‌پذیری هیدرولوژیکی یک اکوسیستم خشک محدود در آب در شمال مکزیک، تحت سناریوهای پمپاژ آینده و شرایط آب و هوایی در حال تغییر ارائه شد (Wurl و همکاران، ۲۰۱۸) هدف این مطالعه شناسایی سناریوهای ناامن آب و تعریف اقدامات مناسب برای استفاده پایدارتر از آب زیرزمینی از طریق مشارکت ذی‌نفعان محلی است. سپس سناریو یا مدل بحرانی شناسایی شده را می‌توان برای تحلیل بیشتر استفاده کرد. به‌عنوان‌مثال Ostad-Ali-Askari و همکاران (۲۰۱۹) چندین استراتژی پمپاژ و عمل کشاورزی را برای بازیابی پایداری آبخوان در منطقه مورد مطالعه، باتوجه‌به سناریوی بحرانی شناسایی شده تغییر اقلیم ارزیابی کردند باید در نظر داشت شناسایی مدل مفهومی مورد بررسی باید با مشورت همه ذی‌نفعان انجام شود (Seward و همکاران، ۲۰۰۶).

• عمیق‌شدن در فهم مسئله

درحالی‌که اکثر مطالعات ذکر شده در بالا از تحلیل عدم قطعیت به عنوان یک ابزار یادگیری برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد مدل،

راه‌حل مدل و مشکل پرداخته شده توسط مدل استفاده می‌کنند، سایر روش‌های تجزیه و تحلیل عدم قطعیت به طور خاص برای ارائه بینش عمیق‌تر در مورد مشکلی که مدل به آن می‌پردازد، طراحی شده است. به‌عنوان‌مثال Sušnik و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌سازی دینامیک سیستم و مدل‌سازی شبکه‌های بیزی شیءگرا را برای حمایت از تصمیم مدیریت آب زیرزمینی در سیستم آبخوان کایروان، تونس مقایسه می‌کنند. مدل‌سازی دینامیک سیستم به طور ضمنی عدم قطعیت را محاسبه می‌کند (و عدم قطعیت احتمالی را می‌توان در آن گنجاند)، درحالی‌که شبکه‌های بیزی عمدتاً یک چارچوب احتمالی هستند. با مقایسه این دو پارادایم مدل‌سازی، نشان داده شد مدل‌سازی دینامیک سیستم یک رویکرد چرخه‌ای است که به کاربر اجازه می‌دهد تا پویایی‌های بالقوه پنهان در یک سیستم را با شبیه‌سازی فرآیندهای بازخورد غیرخطی کشف کند، درحالی‌که شبکه‌های بیزی یک رویکرد غیر چرخه‌ای است که تنوع و عدم قطعیت را در هر متغیر با خروجی‌های احتمالی برای متغیرهای کلیدی ترکیب می‌کند. در این مدل‌سازی پویایی پنهان به عنوان رفتاری تعریف می‌شود که به دلیل تعامل اجزای مدل، ظاهر می‌شود که لزوماً از مطالعه هر عنصر مدل به طور مستقل مشخص نیست. این مطالعه نشان می‌دهد تحلیل‌های هر دو مدل موافق هستند، که نشان‌دهنده بهره‌برداری بیش‌ازحد فعلی از آبخوان است و کاهش پمپاژ بهترین راه‌حل برای پایان دادن به بهره‌برداری بیشازحد آبخوان را ارائه می‌دهد. بااین‌حال، این مطالعه بیان می‌کند که مدل‌سازی دینامیک سیستم پتانسیل همکاری با ذی‌نفعان را دارد، درحالی‌که شبکه‌های بیزی می‌توانند بیش از حد پیچیده باشند زیرا درک توزیع‌های احتمالی ممکن است برای ذی‌نفعان ساده نباشد (Sušnik و همکاران، ۲۰۱۳).

• راه‌حل‌های چند روایتی

دیدگاه مدل‌سازی معرفتی تصدیق می‌کند که مدل‌ها دانش ناقصی درباره طبیعت را توصیف می‌کنند و بر ترکیب دانش تمرکز می‌کنند. Reichert و همکاران (۲۰۱۵) تفاسیر معرفتی را به‌عنوان استفاده از «احتمال‌ها برای تعیین کمیت دانش یا باور انسان» در مقابل تفاسیر عینی که «از احتمالات برای توصیف ویژگی‌های جهان مادی مستقل از انسان استفاده می‌کنند» تعریف می‌کنند علاوه‌براین، تصدیق دانش ناقص مستلزم وجود فرضیه‌های جایگزین معتبر دیگری است. بنابراین، یک دیدگاه معرفتی به طور طبیعی چارچوب مدل‌سازی چند فرضیه‌ای احتمالی را اتخاذ می‌کند که از احتمال به عنوان ابزاری برای استدلال استقرایی در حضور عدم قطعیت استفاده می‌کند.

• مدیریت تطبیقی

مدیریت تطبیقی تنها رویکرد قابل دوام برای مقابله با عدم قطعیت دانش و تنوع نگرش‌های جامعه نسبت به منابع آب زیرزمینی است. علاوه‌براین، آگاهی از محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های دانش می‌تواند رویکرد سیستم‌های به هم پیوسته را برای مدیریت آب زیرزمینی پیش ببرد. مدیریت تطبیقی یک ابزار خط‌مشی برای رسیدگی به عدم قطعیت است و می‌توان برای کاهش عدم اطمینان از قبل برنامه‌ریزی کرد. گردش کار شامل مشارکت ذی‌نفعان، توسعه یک طرح یکپارچه مشروط به بررسی سالانه همراه با به‌روزرسانی مداوم مدل عددی و سیستم نظارت بر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی برای به‌روزرسانی مدل، اعتبارسنجی، و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت است. ترکیب نظارت و مدل‌سازی به مدیران منابع آب و ذی‌نفعان این امکان را می‌دهد تا سیاست مدیریت را بر اساس آنچه در مورد سیستم شناخته شده و ناشناخته است، بررسی کنند و هر تصمیمی را به‌طور پویا با شرایط متغیر اجتماعی-اقتصادی و محیطی تطبیق دهند (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰). به طور مشابه، Seward و همکاران (۲۰۰۶) استدلال می‌کنند که توانایی برای پیش‌بینی اثرات پمپاژ آب زیرزمینی بر آب‌های سطحی و سیستم‌های اکولوژیکی بسیار ناقص است و پیشنهاد می‌کند که راه رو به جلو پذیرش ویژگی‌های پیچیده و دشوار پیش‌بینی سیستم‌های آبخوان است و ایجاد استراتژی‌های مدیریتی حول آن ویژگی‌هایی که به جای مدیریت فرمان و کنترل سفت و سخت، تطبیقی هستند این عمل در سطوح مختلف در بسیاری از نقاط جهان اجرا می‌شود.

ارزیابی علمی پایایی آب زیرزمینی: مشارکت[۱۲]

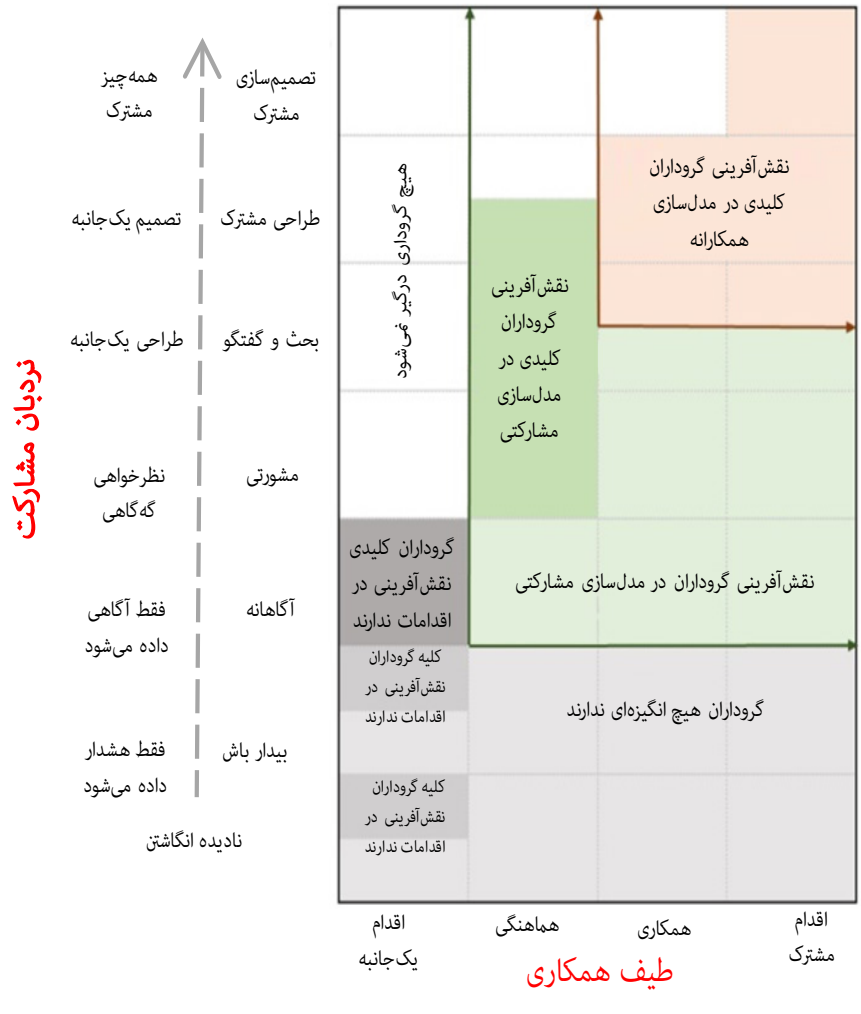
• مشارکت و پایایی آب زیرزمینی

مشارکت ذی‌نفعان می‌تواند برجستگی، اعتبار و مشروعیت را به ارزیابی‌های علمی بیافزاید، که ممکن است منجر به تصمیم‌های مدیریت آب مؤثرتر و آسان‌تر شود. برجستگی مستلزم علم مبتنی بر تقاضا است که آنچه را در آن زمان و مکان مورد نیاز است فراهم می‌کند. اعتبار از شایستگی‌های فنی و کیفیت علم ناشی می‌شود که عموماً توسط بررسی همتا و خارجی همراه با اجماع کارشناسان ارزیابی می‌شود. مشروعیت به فرآیندی فراگیر، جامع و منصفانه اشاره دارد. برای اینکه محصولات علم برای اجرای سیاست مشروعیت پیدا کنند، باید از تبادل تکراری، مشارکتی و دوسویه بین ذینفعان بیرون بیایند. علاوه‌براین، مشارکت برای بهبود اعتبار و برجسته بودن محصولات علمی نشان داده شده است که می‌تواند منجر به شناسایی و اتخاذ راه حل های موثرتر شود. این عمدتاً به این دلیل است که مشارکت در برگیرنده دانش بنیادی و بومی، منطقه‌ایی بوده و تبادل تجربیات را شامل می‌شود.

• سطوح مشارکت

اگرچه شناسایی ذی‌نفعان و تعریف راه‌های مشارکت آب‌بران در سه سطح تعامل در نظر گرفته شود. اولین سطح، تولید علوم

کاربردی مبتنی بر نیاز و تقاضا در رفع مشکلات واقعی در منطقه و جامعه است. این اطمینان حاصل می‌کند که محصولات علمی مانند موارد مدیریتی و سناریوهای آینده باتوجه‌به نیازها و اولویت‌های کاربران طراحی می شوند. در این سطح از مشارکت، ذی‌نفعان می‌توانند از تحقیق در حال انجام آگاه یا ناآگاه باشند و می‌توانند به تحقیق علاقه‌مند یا بی‌علاقه باشند. سطح دوم مشارکت ذی‌نفعان با توسعه مدل‌های مشارکتی است. ضمن شناسایی سطوحی از مشارکت بین محققان و سهام‌داران را برای توسعه مدل یا طرح مورد بحث قرار دادند، اغلب در ادبیات به عنوان مدل‌سازی ارزیابی مشارکتی یا مدل‌سازی یادگیری مشارکتی از آن یاد می‌شود. با استفاده از طبقه‌بندی Basco -Carrera و همکاران (۲۰۱۷)، شکل (۸) سطح مشارکت اجرا شده یا درخواست شده را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، شکل (۷) نشان می‌دهد که هیچ شکلی از مدل‌سازی یادگیری مشارکتی یا مدل‌سازی ارزیابی مشارکتی را به منظور تصویرسازی شامل نمی‌شود (Alcalá و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sheng، ۲۰۱۳). پژوهش‌های نشان داده شده در شکل (۷) یا مطالعات موردی خاص یا مطالعات موردی متقابل هستند. همکاری و مدل‌سازی مشارکتی در ارزیابی پایداری آب زیرزمینی مهم است. درحالی‌که مطالعات عمدتاً بر ذی‌نفعان کلیدی مانند مدیران و تنظیم‌کننده‌های آب تمرکز می‌کنند، سایر مطالعات سهام‌داران را گسترش می‌دهند تا مشارکت عمومی را در برگیرند و به سمت هدف دستیابی به یادگیری اجتماعی است. از آنجایی که مدیریت پایدار آب زیرزمینی با فرآیندهای سیستم‌های متعدد و عدم اطمینان متعاقب ناشی از چنین پیچیدگی در تعامل است، یادگیری اجتماعی در تقاطع مشارکت عمومی، ارزیابی های علمی و تصمیم‌گیری قرار دارد. ضروری است که جامعه به‌طورکلی در تدوین سیاست‌ها و در قضاوت در مورد آنچه که باید حفظ شود، شرکت کند. برای بهبود درک ماهیت، پیچیدگی و تنوع منابع آب زیرزمینی و تأکید بر اینکه چگونه این درک باید مبنایی برای شرایط و محدودیت‌های عملیاتی باشد، به برنامه‌های آموزشی قوی و اطلاع‌رسانی عمومی نیاز است. این تنها راه برای تأثیرگذاری مثبت در بلندمدت بر نگرش‌های ذی‌نفعان مختلف است و فشار جامعه برای مدیریت بهتر منابع طبیعی، نیروی محرکه اصلی اکثر تغییرات خواهد بود.



شکل ۷- ارتباط بین سطوح مشارکت با در پژوهش‌های انجام شده تا ۲۰۱۷ (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰)

مدیریت پایای آب زیرزمینی بدون شهروندان آگاه و مسئول امکان‌پذیر نیست، شهروندانی که از ارزش منابع آبی و قوت، ضعف، استفاده و تهدیدات بالقوه آنها آگاه هستند. یادگیری اجتماعی وسیله‌ای جهت ایجاد ظرفیت یادگیری و پاسخ به مشکلات مداوم و پیچیده سیستم‌های آب است. به طور معمول، مصرف‌کنندگان آب بر ذی‌نفعان کلیدی مانند تنظیم‌کننده‌ها و مدیران آب فشار می‌آورند و ذی‌نفعان کلیدی این نگرانی‌ها را به محققان اعلام می‌کنند. برای دستیابی بهتر به یادگیری اجتماعی، محققان می‌توانند در تبادل اطلاعات دوجانبه با سهام‌داران کلیدی، اعضای جامعه یا هر دو شرکت کنند، وقتی مدل‌سازی مشارکتی فراتر از ذی‌نفعان کلیدی است، انتخاب سهام‌داران یک کار بی‌اهمیت نیست.

• روش‌ها و ابزارهای مشارکت

برای ارزیابی علمی مؤثر پایداری آب زیرزمینی، تدوین رویکردهای ساختارمندتر برای مشارکت عمومی مورد نیاز است. به دلیل ناهمگونی افراد و علایق و ادراکات آنها، مقابله با ترجیحات اجتماعی دشوارتر از ترجیحات فردی است. این می‌تواند چالش برانگیزتر باشد، زمانی که مناطق آبی بسیار وسیع هستند، منافع فردی بیش‌ازحد واگرا هستند، وقتی افراد و شرکت‌هایی وجود دارند که از منابع برای سود کوتاه‌مدت بهره‌برداری می‌کنند و زمانی که سود فردی بر نیاز به حفظ یک منبع مشترک غالب است. برانگیختن ترجیحات اجتماعی را می‌توان از طریق نظرسنجی، نظر و رأی عمومی، مصاحبه و ابزارهای مشابه انجام داد. سپس خلاصه ارزیابی‌ها می‌توانند به مدل‌های مبتنی بر عامل، که مدل‌هایی از رفتار محلی هستند، وارد شوند.

بررسی سیستماتیک نشان می‌دهد تعداد فزاینده‌ای از پژوهش‌ها در مورد مشارکت ذی‌نفعان در زمینه پایداری آب زیرزمینی بحث می‌کنند. مطالعات موردی بیشتری در مورد مشارکت ذی‌نفعان که مستقیماً با توسعه و پیش‌بینی مدل مرتبط هستند، به‌ویژه مورد نیاز است. مطالعات موردی بیشتری که چارچوب‌های مفهومی اخیراً توسعه یافته را اجرا برای ادغام مشارکت با مدل‌سازی آب زیرزمینی برای اثبات مفهوم مورد نیاز است. از تجزیه و تحلیل انتقادی، نتیجه می‌شود که بسیاری از ادبیات شناسایی شده فاقد یک نظریه بنیادی غیراجتماعی کافی است یا بر اساس روش‌های تحقیق معتبر نبوده است. بنابراین باید در استفاده از روش‌های مشارکت دقت کرد و از طریق تعامل با دانشمندان علوم اجتماعی در نظریه اجتماعی پایه‌گذاری شود.

نتیجه‌گیری

به عنوان یک ابزار سیاستی پویا، مدیریت پایای آب زیرزمینی، مصرف و توسعه آب را با جامعه، محیط‌زیست و اقلیم در حال تغییر متعادل می‌کند. این مقاله یک رویکرد جامعی برای توسعه و اجرای سیاست پایای آب زیرزمینی را مورد بحث قرار داد و بررسی نمود که علم به تنهایی به ندرت منجر به نتایج مستقیم سیاست می‌شود به ویژه در جایی که یافته‌های علمی مورد اعتراض قرار می‌گیرد. حتی در مواجهه با بحث‌های قوی، علم می‌تواند به اطلاع‌رسانی خط‌مشی کمک کند، مشروط بر اینکه مطالعات برای چالش سیاست برجسته باشند و تصمیم‌گیرندگان در فرآیند علمی مشارکت داده شوند و نتایج به‌طور مؤثری مخابره شود و معتبر تلقی شوند. این مقاله نشان می‌دهد که حتی زمانی که یک خط‌مشی به‌خوبی طراحی شده است، علم مورد نیاز برای درک پویایی و پیچیدگی هیدروژئولوژی و سیستم‌های اکولوژیکی و انسانی وابسته به آن، تازه شروع به ایجاد می‌کند. بااین‌وجود، رویکردهای مدیریت یکپارچه فرارشته‌ای آب زیرزمینی که علم را به سیاست (یا بالعکس) نزدیک می‌کند، به سرعت در حال ظهور هستند. بااین‌حال، نیاز آشکاری به پژوهش‌های فرارشته‌ای و مطالعات موردی برای پرداختن به توسعه و اجرای مؤثر سیاست پایداری آب زیرزمینی بر اساس مدل‌سازی چند فرآیندی، راه‌حل چند روایتی و مشارکت وجود دارد.

پرداختن به مدل‌سازی چند فرآیندی مستلزم بهبود مستمر چارچوب‌های مدل‌سازی آب زیرزمینی موجود است تا خدمات اکوسیستم و فعالیت‌های انسانی را بهتر در برگیرد. علاوه‌براین، مستلزم ایجاد چارچوب‌های جدید آب زیرزمینی است که با فراخوان‌های نوظهور در جامعه هیدرولوژی همسو باشد تا امنیت و پایایی آب را فراتر از کانون‌های کیفیت و کمیت آب برای درک بهتر سناریوهای احتمالی در حال تکامل ایجاد کند. برای رسیدگی به پایداری آب زیرزمینی بین سیستم‌های آبی، اکوسیستم‌ها و جامعه، ابزار در سطوح مختلف مورد نیاز است و در مجموع هیچ راه‌حل واحد قابل تعمیم به کل وجود ندارد. صرف‌نظر از چارچوب مدل‌سازی، این مقاله نشان می‌دهد ادغام سیستم‌های طبیعی، مهندسی، اجتماعی و نهادی در چارچوب مدل‌سازی یکپارچه به تدریج در ادبیات پایداری آب زیرزمینی تکامل می‌یابد تا با سیاست‌های نوظهوری که این ادغام‌ها را می‌طلبند همگام شود. دو رویکرد مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای تخمین پایداری آب زیرزمینی بررسی شد، که به بحث در مورد قابلیت اطمینان نسبی مدل‌های پدیدارشناسی در مقایسه با مدل‌های عددی می‌پردازد. انتخاب رویکرد مدل‌سازی مناسب به صورت موردی خاص است و به داده‌های موجود، نوع آبخوان، عوامل پایداری مورد علاقه بستگی دارد و باید توسط قانون صرفه‌جویی هدایت شود. درحالی‌که مدل‌های عددی مفیدتر و دقیق‌تر هستند، مدل‌های پدیدارشناختی ساده زمانی می‌توانند مفید باشند که داده‌های کافی مربوط به مکان برای ایجاد یک مدل عددی با اطمینان بالا و واقع‌گرایی ریاضی و زمین‌شناختی وجود

نداشته باشد. مدل‌سازی هیدرولوژیکی، باتوجه‌به تعامل آب‌های سطحی و آب زیرزمینی، بالغتر از مدل‌سازی خدمات اکوسیستم و مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی است. درحالی‌که مدل‌سازی خدمات اکوسیستم و مدل‌سازی فعالیت‌های انسانی هر دو در حال ظهور هستند، ابزارهایی برای مدیریت اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی هنوز به خوبی تعریف نشده‌اند و نیازمند رویکردهای مدیریتی سازگارتر است. یکی از نقش‌های علم کاهش خطاها و هزینه آن است، اینکه در یک مورد خاص برای کاهش ابهام چقدر سرمایه‌گذاری در دانش و نظارت لازم است بستگی به هزینه‌های فعلی و آتی این خطاها برای انسان و محیط‌زیست دارد. پرداختن به عدم قطعیت ذاتی مرتبط با جنبه‌های طبیعی و اجتماعی سیستم‌های آب زیرزمینی پیچیده و پویا، مستلزم توسعه رویکردهای چند مدلی نوآورانه برای ارائه روایت‌های متعدد در مورد چاره‌سازی مشکل و انتقال موثر عدم قطعیت به کاربران نهایی و ذی‌نفعان به نحوی که به آنها در تصمیم‌گیری بهتر کمک کند، دارد. این امر مستلزم همکاری با ذی‌نفعان از طریق مدل‌سازی مشترک و مدیریت تطبیقی برای توصیف بهتر و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است. درحالی‌که پیشرفت‌های فنی در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت هنوز در حال توسعه است (به‌ویژه باتوجه‌به هزینه‌های بالای مدل‌های محاسباتی آب زیرزمینی، عوامل چندرشته‌ای زیرسطحی و تعیین کمیت عدم قطعیت، و مدیریت عدم قطعیت چندوجهی سیستم‌های آب-اکولوژی-انسانی)، روش‌ها و ابزارهای موجود هستند ولی در ادبیات پایایی آب زیرزمینی چندان کاربردی نشده‌اند. آگاه کردن کاربر نهایی از اهمیت تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و وجود این ابزارها اهمیت بالایی دارد. درجه مشارکت در فرآیند علم-سیاست ممکن است حیاتی‌ترین بخش باشد، اما به دلیل بیلان‌های فشرده، محدودیت‌های زمانی یا عدم وجود رویکردهای ساختارمند واضح، طراحی و پیاده‌سازی دشوارترین بخش است و برای حل تعارض و شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای مرتبط با پایایی آب زیرزمینی یک جزء ضروری است. در جامعه علمی، همکاری بیشتر بین دانشمندان علوم فیزیکی، دانشمندان علوم اجتماعی، مدیران آب زیرزمینی و سیاست‌گذاران برای توسعه این جنبه از فرآیند ارزیابی پایایی آب زیرزمینی ضرورت دارد. ایجاد چنین روابط مشترکی بین پژوهشگران و سهام‌داران کلیدی به‌طورکلی می‌تواند آسان‌تر از مشارکت عمومی باشد. آزمایش و ارزیابی روش‌های مختلف برای افزایش مشارکت عمومی در مدیریت آب زیرزمینی برای دستیابی به یادگیری اجتماعی یک حوزه تحقیقاتی فعال است. دریافت نظرات عمومی و مشارکت بیشتر شهروندان در مدیریت آب زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا مدیریت پایدار آب زیرزمینی بدون شهروندان آگاه و مسئول امکان‌پذیر نیست.

سپاسگزاری

از راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر داوری در تدوین ساختار مقاله، تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1-Capture
2-Managed yield
3-Smart mining
4-Nubian and High Plains aquifers
5-Ingrained ideas
6-Sea-level Rise Scenarios
7-Water Export Scenarios
8-Bayesian Model
9-Groundwater Export
10-Data-worth analysis
11-Bayesian framework
12-Scientific evaluation of groundwater sustainability: participation

منابع

سند تدبیر آب مشهد. شرکت آب و فاضلاب مشهد, دفتر تحقیقات و بهره‌وری. (۱۳۹۴). رونمایی از سند تدبیر آب مشهد. آب و توسعه پایدار، ۲(۱)، ۱۱۰. doi: 10.22067/jwsd.v2i1.51166.

Alcalá, F. J., Martínez-Valderrama, J., Robles-Marín, P., Guerrera, F., Martín-Martín, M., Raffaelli, G., León, J. T., Asebriy, L., & Asebriy, L. (2015). A hydrological–economic model for sustainable groundwater use in sparse-data drylands: Application to the Amtoudi Oasis in southern Morocco, northern Sahara. Science of the Total Environment, 537, 309-322. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.062

Alley, W. M., & Leake, S. A. (2004). The journey from safe yield to sustainability. Groundwater, 42(1), 12-16. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x

Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). Sustainability of ground-water resources (Vol. 1186). US Department of the Interior, US Geological Survey. US.

Archer, D. R., Forsythe, N., Fowler, H. J., & Shah, S. M. (2010). Sustainability of water resources management

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: towards a user's guide. Futures, 38(7), 723-739. https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002

Bredehoeft, J. D., & Alley, W. M. (2014). Mining groundwater for sustained yield. The Bridge, 44(1), 33-41.

Bremer, L., Mandle, L., Trauernicht, C., Pascua, P., McMillen, H., Burnett, K., Wada, C., Kurashima, N., Quazi, Sh., Giambelluca, T., Chock, P., & Ticktin, T. (2018). Bringing multiple values to the table: assessing future land-use and climate change in North Kona, Hawai'i. Ecology and Society, 23(1), 33. https://doi.org/10.5751/ES-09936-230133

Brown, C. M., Lund, J. R., Cai, X., Reed, P. M., Zagona, E. A., Ostfeld, A., & Brekke, L. (2015). The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. Water resources research, 51(8), 6110-6124. https://doi.org/10.1002/2015WR017114

Calderhead, A. I., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., & Therrien, R. (2012). Sustainable management for minimizing land subsidence of an over-pumped volcanic aquifer system: tools for policy design. Water Resources Management, 26, 1847-1864. https://doi.org/10.1007/s11269-012-9990-7

Castilla-Rho, J. C. (2017). Groundwater modeling with stakeholders: finding the complexity that matters. Groundwater, 55(5), 620-625. https://doi.org/10.1111/gwat.12569

Chitsazan, N., Pham, H. V., & Tsai, F. T. C. (2015). Bayesian chance-constrained hydraulic barrier design under geological structure uncertainty. Groundwater, 53(6), 908-919. https://doi.org/10.1111/gwat.12304

Custodio, E., Sahuquillo, A., & Albiac, J. (2019). Sustainability of intensive groundwater development: experience in Spain. Sustainable Water Resources Management, 5, 11-26. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0105-8

Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J., & Lehner, B. (2019). in the Indus Basin under changing climatic and socio economic conditions. Hydrology and Earth System Sciences, 14(8), 1669-1680. https://doi.org/10.5194/hess-14-1669-2010

Asefa, T., Adams, A., & 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, 2632-2641. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.047

Badiuzzaman, P., McLaughlin, E., & McCauley, D. (2017). Substituting freshwater: Can ocean desalination and water recycling capacities substitute for groundwater depletion in California?. Journal of environmental management, 203, 123-135. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.051

Baguma, A., Bizoza, A., Carter, R., Cavill, S., Foster, S., Foster, T., Jobbins, G., Hope, R., Katuva, J., Koehler, J., A. Shepherd, A. Simons., & Simons, A. (2017). Groundwater and poverty in sub-Saharan Africa. UPGro Working Paper. Skat Foundation, St, Gallen.

Barlow, P. M., Leake, S. A., & Fienen, M. N. (2018). Capture versus capture zones: Clarifying terminology related to sources of water to wells. Groundwater, 56(5), 694-704. https://doi.org/10.1111/gwat.12661

Basco-Carrera, L., Warren, A., van Beek, E., Jonoski, A., & Giardino, A. (2017). Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. Environmental Modelling & Software, 91, 95-110. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.014

Bierkens, M. F., & Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. Environmental Research Letters, 14(6), 063002. https://doi. 10.1088/1748-9326/ab1a5f

Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., & Renner, M. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)–a community perspective. Hydrological sciences journal, 64(10), 1141-1158. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507

approach for detection and attribution of climatic and human impacts on coastal water resources. Journal of Hydrology, 557, 305-320. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.041

Fernald, A., Guldan, S., Boykin, K., Cibils, A., Gonzales, M., Hurd, B., ... & Steele, C. (2015). Linked hydrologic and social systems that support resilience of traditional irrigation communities. Hydrology and earth system sciences, 19(1), 293-307. https://doi.org/10.5194/hess-19-293-2015

Ferré, T. P. (2017). Modelers: is objectivity overrated?. Groundwater, 55(5), 603-603. https://doi.org/10.1111/gwat.12575

Foster, S., Garduno, H., Tuinhof, A., & Tovey, C. (2010). Groundwater governance: conceptual framework for assessment of provisions and needs. Report number: GW-MATe Strategic Overview Series 1 - 2009Affiliation: World Bank. Washington DC.

Gallardo, A. H., Marui, A., Takeda, S., & Okuda, F. (2009). Groundwater supply under land subsidence constrains in the Nobi Plain. Geosciences Journal, 13, 151-159. https://doi.org/10.1007/s12303-009-0014-4

Gillespie, J., Nelson, S. T., Mayo, A. L., & Tingey, D. G. (2012). Why conceptual groundwater flow models matter: a trans-boundary example from the arid Great Basin, western USA. Hydrogeology Journal, 20(6), 1133.

Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. Groundwater, 50(1), 19-26. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00825.x

Gober, P., Kirkwood, C. W., Balling, R. C., Ellis, A. W., & Deitrick, S. (2010). Water planning under climatic uncertainty in Phoenix: Why we need a new paradigm. Annals of the Association of American Geographers, 100(2), 356-372. https://doi.org/10.1080/00045601003595420

Gober, P. A., Strickert, G. E., Clark, D. A., Chun, K. P., Payton, D., & Bruce, K. (2015). Divergent perspectives on water security: bridging the policy debate.

Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. Nature Climate Change, 9(2), 137-141. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7393304

Dai, H., Ye, M., & Niedoroda, A. W. (2015). A model for simulating Barrier Island geomorphologic responses to future storm and sea-level rise impacts. Journal of coastal research, 31(5), 1091-1102. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00094.1

Derakhshan, H. , Davary, K., & Mosaedi, A. (2023). A Review of the Rethinking Groundwater Renewability. Iran-Water Resources Research, 19(3), 212-230.

Devlin, J. F., & Sophocleous, M. (2005). The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. Hydrogeology Journal, 13, 549-554. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0354-0

Domenico, P. A. (1972). Concepts and models in groundwater hydrology, McGraw-Hill. First Edition. New York.

El-Kadi, A. I., Tillery, S., Whittier, R. B., Hagedorn, B., Mair, A., Ha, K., & Koh, G. W. (2014). Assessing sustainability of groundwater resources on Jeju Island, South Korea, under climate change, drought, and increased usage. Hydrogeology Journal, 22(3), 625. doi: 10.1007/s10040-013-1084-y

Elshall, A. S., & Tsai, F. T. C. (2014). Constructive epistemic modeling of groundwater flow with geological structure and boundary condition uncertainty under the Bayesian paradigm. Journal of Hydrology, 517, 105-119. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.027

Elshall, A. S., Arik, A. D., El-Kadi, A. I., Pierce, S., Ye, M., Burnett, K. M.,... & Chun, G. (2020). Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. Environmental Research Letters, 15(9), 093004. doi: 10.1088/1748-9326/ab8e8c

Farhadi, S., Nikoo, M. R., Rakhshandehroo, G. R., Akhbari, M., & Alizadeh, M. R. (2016). An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. Agricultural Water Management, 177, 348-358. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.018

Feng, D., Zheng, Y., Mao, Y., Zhang, A., Wu, B., Li, J., & Wu, X. (2018). An integrated hydrological modeling

overdraft in hydrologic-economic systems. Hydrogeology Journal, 16, 1039-1055. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0300-7

Henriksen, H. J., Troldborg, L., Højberg, A. L., & Refsgaard, J. C. (2008). Assessment of exploitable groundwater resources of Denmark by use of ensemble resource indicators and a numerical groundwater–surface water model. Journal of Hydrology, 348(1-2), 224-240. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.056

Henriksen, H. J., & Barlebo, H. C. (2008). Reflections on the use of Bayesian belief networks for adaptive management. Journal of Environmental Management, 88(4), 1025-1036. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.05.009

Holding, S., Allen, D. M., Foster, S., Hsieh, A., Larocque, I., Klassen, J., & Van Pelt, S. C. (2016). Groundwater vulnerability on small islands. Nature Climate Change, 6(12), 1100-1103. https://doi.org/10.1038/nclimate3128

Jackson, S., Tan, P. L., & Nolan, S. (2012). Tools to enhance public participation and confidence in the development of the Howard East aquifer water plan, Northern Territory. Journal of Hydrology, 474, 22-28. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.007

Joseph, H., Guillaume, A., Qureshi, M. E., & Jakeman, A. J. (2012). A structured analysis of uncertainty surrounding modeled impacts of groundwater-extraction rules. Hydrogeology journal, 20(5), 915. doi: 10.1007/s10040-012-0864-0

Kalf, F. R., & Woolley, D. R. (2005). Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. Hydrogeology journal, 13, 295-312. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0401-x

Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. Hydrogeology Journal, 13, 317-320. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8

Konikow, L. F., & Leake, S. A. (2014). Depletion and capture: revisiting "the source of water derived from wells". Groundwater, 52(S1), 100-111. https://doi.org/10.1111/gwat.12204

Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., ... & Pulido-Velazquez, The Professional Geographer, 67(1), 62-71. https://doi.org/10.1080/00330124.2014.883960

Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. Water Resources Research, 51(5), 3031-3051. https://doi.org/10.1002/2014WR016825

FAO. (2017). Groundwater governance A global framework for action. GEF and FAO.

Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. Annual review of earth and planetary sciences, 48, 431-463. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251

Griffioen, J., van Wensem, J., Oomes, J. L., Barends, F., Breunese, J., Bruining, H., & van der Stoel, A. E. (2014). A technical investigation on tools and concepts for sustainable management of the subsurface in The Netherlands. Science of the total environment, 485, 810-819. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.114

Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. Environmental Science & Policy, 14(7), 770-781. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002

Guillaume, J. H., Hunt, R. J., Comunian, A., Blakers, R. S., & Fu, B. (2016). Methods for exploring uncertainty in groundwater management predictions. Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges, 711-737.

GWD.. (2006). https://ec.europa.eu/environment/water/waterframework/ groundwater/framework.htm. 2006/118/EC

Ha, T. P., Dieperink, C., Otter, H. S., & Hoekstra, P. (2018). Governance conditions for adaptive freshwater management in the Vietnamese Mekong Delta. Journal of Hydrology, 557, 116-127. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.024

Han, S., Tian, F., Liu, Y., & 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), 3619-3633. https://doi.org/10.5194/hess-21-3619-2017

Harou, J. J., & Lund, J. R. (2008). Ending groundwater

ciplinary Reviews: Water, 4(4), e1224. https://doi.org/10.1002/wat2.1224

Lijzen, J. P., Otte, P., & van Dreumel, M. (2014). Towards sustainable management of groundwater: policy developments in the Netherlands. Science of the total environment, 485, 804-809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.081

Llamas, M. R., Custodio, E., De la Hera, A., & Fornés, J. M. (2015). Groundwater in Spain: increasing role, evolution, present and future. Environmental Earth Sciences, 73, 2567-2578. https://doi.org/10.1007/s12665-014-4004-0

McLaughlin, D., & Kinzelbach, W. (2015). Food security and sustainable resource management. Water Resources Research, 51(7), 4966-4985. https://doi.org/10.1002/2015WR017053

Michael, H. A., Post, V. E., Wilson, A. M., & Werner, A. D. (2017). Science, society, and the coastal groundwater squeeze. Water Resources Research, 53(4), 2610-2617. https://doi.org/10.1002/2017WR020851

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management?. Science, 319(5863), 573-574. doi: 10.1126/science.1151915

Muchingami, I., Chuma, C., Gumbo, M., Hlatywayo, D., & Mashingaidze, R. (2019). Approaches to groundwater exploration and resource evaluation in the crystalline basement aquifers of Zimbabwe. Hydrogeology Journal, 27(3), 915-928. doi: 10.1007/s10040-019-01924-1

Mulligan, K. B., Brown, C., Yang, Y. C. E., & Ahlfeld, D. P. (2014). Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling. Water Resources Research, 50(3), 2257-2275. https://doi.org/10.1002/2013WR013666

Ohdedar, B. (2018). Groundwater law, abstraction, and responding to climate change: assessing recent law reforms in British Columbia and England. In Groundwater and Climate Change (51-68). Routledge. Oxfordshire, England.

Ostad-Ali-Askari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology, 518, 250-266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037

Knüppe, K., Pahl-Wostl, C., & Vinke-de Kruijf, J. (2016). Sustainable groundwater management: a comparative study of local policy changes and ecosystem services in South Africa and Germany. Environmental Policy and Governance, 26(1), 59-72. https://doi.org/10.1002/eet.1693

Kretsinger Grabert, V., & Narasimhan, T. N. (2006). California's evolution toward integrated regional water management: a long-term view. Hydrogeology Journal, 14, 407-423. https://doi.org/10.1007/s10040-005-0005-0

Langridge, R., & Daniels, B. (2017). Accounting for climate change and drought in implementing sustainable groundwater management. Water Resources Management, 31, 3287-3298. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1607-8

Lapworth, D. J., Lopez, B., Laabs, V., Kozel, R., Wolter, R., Ward, R., & Grath, J. (2019). Developing a groundwater watch list for substances of emerging concern: a European perspective. Environmental Research Letters, 14(3), 035004. doi: 10.1088/1748-9326/aaf4d7

Lee, C. H. (1915). The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed-basin type Trans. American Society Civil Engineering, 78(1), 148–218.

Lee, E., Ha, K., Ngoc, N. T. M., Surinkum, A., Jayakumar, R., Kim, Y., & Hassan, K. B. (2017). Groundwater status and associated issues in the Mekong-Lancang River Basin: international collaborations to achieve sustainable groundwater resources. Journal of Groundwater Science and Engineering, 5(1)1-13, doi: 10.26599/JGSE.2017.9280001

Leduc, C., Pulido-Bosch, A., & Remini, B. (2017). Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. Hydrogeology Journal, 25(6), 1529. doi: 10.1007/s10040-017-1572-6

Lele, S. (2017). Sustainable Development Goal 6: watering down justice concerns. Wiley Interdis-

Ranjan, R. (2013). Mathematical modeling of drought resilience in agriculture. Natural Resource Modeling, 26(2), 237-258. https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2012.00136.x

Reichert, P., Langhans, S. D., Lienert, J., & Schuwirth, N. (2015). The conceptual foundation of environmental decision support. Journal of environmental management, 154, 316-332. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.053

Rejman, W. (2007). EU water framework directive versus real needs of groundwater management. Water resources management, 21(8), 1363-1372. https://doi.org/10.1007/s11269-006-9088-1

Rinaudo, J. D., Moreau, C., & Garin, P. (2016). Social justice and groundwater allocation in agriculture: A French case study. Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges, 273-293.

Rohde, M. M., Froend, R., & Howard, J. (2017). A global synthesis of managing groundwater dependent ecosystems under sustainable groundwater policy. Groundwater, 55(3), 293-301. https://doi.org/10.1111/gwat.12511

Rudestam, K., & Langridge, R. (2014). Sustainable yield in theory and practice: Bridging scientific and mainstream vernacular. Groundwater, 52(S1), 90-99. https://doi.org/10.1111/gwat.12160

Rudestam, K., Brown, A., & Langridge, R. (2018). Exploring "deep roots": Politics of place and groundwater management practices in the Pajaro Valley, California. Society & natural resources, 31(3), 291-305. https://doi.org/10.1080/08941920.2017.141369

Saha, D., & Ray, R. K. (2019). Groundwater resources of India: potential, challenges and management. Groundwater development and management: issues and challenges in South Asia, 19-42. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3_2

Sanderson, M. R., & Curtis, A. L. (2016). Culture, climate change and farm-level groundwater management: An Australian case study. Journal of hydrology, 536, 284-292. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.032

Shayannejad, M., & Zareian, M. J. (2019). Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of the Isfahan–Borkhar aquifer using MODFLOW. River Research and Applications, 35(6), 611-631. https://doi.org/10.1002/rra.3463

Owen, D., Cantor, A., Nylen, N. G., Harter, T., & Kiparsky, M. (2019). California groundwater management, science-policy interfaces, and the legacies of artificial legal distinctions. Environmental Research Letters, 14(4), 045016. doi: 10.1088/1748-9326/ab0751

Passarello, M. C., Pierce, S. A., & Sharp Jr, J. M. (2014). Uncertainty and urban water recharge for managing groundwater availability using decision support. Water science and technology, 70(11), 1888-1896. https://doi.org/10.2166/wst.2014.437

Pierce, S. A., Sharp, J. M., Joseph, H., Guillaume, A., Mace, R. E., & Eaton, D. J. (2013). Aquifer-yield continuum as a guide and typology for science-based groundwater management. Hydrogeology Journal, 21(2), 331. doi: 10.1007/s10040-012-0910-y

Piscopo, V., Di Luca, S., Dimasi, M., & Lotti, F. (2019). Sustainable yield of a hydrothermal area: from theoretical concepts to the practical approach. Groundwater, 57(2), 337-348. https://doi.org/10.1111/gwat.12833

Pholkern, K., Saraphirom, P., Cloutier, V., & 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), 241. https://doi.org/10.3390/w11020241

Qin, H., Cao, G., Kristensen, M., Refsgaard, J. C., Rasmussen, M. O., He, X., & Zheng, C. (2013). Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management. Hydrology and Earth System Sciences, 17(10), 3759-3778. https://doi.org/10.5194/hess-17-3759-2013

Quevauviller, P., Batelaan, O., & Hunt, R. J. (2016). Groundwater regulation and integrated water planning. Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges, 197-227. doi: 10.1007/978-3-319-23576-9

drol.2011.11.002

Stigter, T. Y., Monteiro, J. P., Nunes, L. M., Vieira, J., Cunha, M. D. C., Ribeiro, L., & Lucas, H. (2009). Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system. Hydrology and Earth System Sciences, 13(7), 1185-1199. https://doi.org/10.5194/hess-13-1185-2009

Sušnik, J., Molina, J. L., Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Savić, D. A., & Kapelan, Z. (2013). Comparative analysis of system dynamics and object-oriented bayesian networks modelling for water systems management. Water resources management, 27, 819-841. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0217-8

Tan, P. L., Bowmer, K. H., & Mackenzie, J. (2012). Deliberative tools for meeting the challenges of water planning in Australia. Journal of Hydrology, 474, 2-10. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.032

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., ... & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. Nature climate change, 3(4), 322-329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744

Theis, C. V. (1940). The source of water derived from wells-essential factors controlling the response of an aquifer to development. Civil Engineering, American Society Civil Engineering, 10, 277–280.

Timani, B., & Peralta, R. (2015). Multi-model groundwater-management optimization: reconciling disparate conceptual models. Hydrogeology Journal, 23(6), 1067. doi: 10.1007/s10040-015-1259-9

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). Groundwater hydrology. John Wiley & Sons. Third Edition. 3rd Edition. published by Wiley. New York, United States.

Tortajada, C., Kastner, M. J., Buurman, J., & Biswas, A. K. (2017). The California drought: Coping responses and resilience building. Environmental Science & Policy, 78, 97-113. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.09.012

Tsai, F. T. C., & Elshall, A. S. (2013). Hierarchical Bayesian model averaging for hydrostratigraphic modeling: Uncertainty segregation and comparative evaluation. Water Resources Research, 49(9), 5520-5536. https://doi.org/10.1002/wrcr.20428

Seward, P., Xu, Y., & Brendonck, L. (2006). Sustainable groundwater use, the capture principle, and adaptive management. Water Sa, 32(4). doi: 10.4314/wsa.v32i4.5287

Seward, P. (2010). Challenges facing environmentally sustainable ground water use in South Africa. Groundwater, 48(2), 239-245. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00518.x

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation–a global inventory. Hydrology and earth system sciences, 14(10), 1863-1880. https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010

Sheng, Z. (2013). Impacts of groundwater pumping and climate variability on groundwater availability in the Rio Grande Basin. Ecosphere, 4(1), 1-25. https://doi.org/10.1890/ES12-00270.1

Shi, F., Chi, B., Zhao, C., Yang, T., de la Paix, M. J., Lu, Y., & Gao, S. (2012). Identifying the sustainable groundwater yield in a Chinese semi-humid basin. Journal of Hydrology, 452, 14-24. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.017

Shu, Y., Villholth, K. G., Jensen, K. H., Stisen, S., & Lei, Y. (2012). Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang. Journal of Hydrology, 464, 79-93. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.048

Sikdar, P. K. (2019). Problems and challenges for groundwater management in South Asia. Groundwater Development and Management: Issues and Challenges in South Asia, 1-18. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3_1

Sophocleous, M. (2010). groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA--lessons and recommended actions. Hydrogeology Journal, 18(3), 559. doi: 10.1007/s10040-009-0540-1

Sophocleous, M. (2012). The evolution of groundwater management paradigms in Kansas and possible new steps towards water sustainability. Journal of Hydrology, 414, 550-559. https://doi.org/10.1016/j.jhy-

changing climate and inadequate agricultural management: a case study from the Valley of Santo Domingo, Mexico. Journal of Hydrology, 559, 486-498. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.050

Zagonari, F. (2010). Sustainable, just, equal, and optimal groundwater management strategies to cope with climate change: insights from Brazil. Water Resources Management, 24, 3731-3756. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9630-z

Zhang, X., Ren, L., & Kong, X. (2016). Estimating spatiotemporal variability and sustainability of shallow groundwater in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using SWAT model. Journal of Hydrology, 541, 1221-1240. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.030

Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. Journal of Hydrology, 370(1-4), 207-213. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.009

Uddameri, V., Hernandez, E. A., & Estrada, F. (2014). A fuzzy simulation–optimization approach for optimal estimation of groundwater availability under decision maker uncertainty. Environmental earth sciences, 71, 2559-2572. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2905-y

Unver, O., Bhaduri, A., & Hoogeveen, J. (2017). Water-use efficiency and productivity improvements towards a sustainable pathway for meeting future water demand. Water Security, 1, 21-27. https://doi.org/10.1016/j.wasec.2017.05.001

Urrutia, J., Jódar, J., Medina, A., Herrera, C., Chong, G., Urqueta, H., & Luque, J. A. (2018). Hydrogeology and sustainable future groundwater abstraction from the Agua Verde aquifer in the Atacama Desert, northern Chile. Hydrogeology Journal, 26(6), 1989-2007. doi: 10.1007/s10040-018-1740-3

Voss, C. I., & Soliman, S. M. (2014). The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan: classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modeling. Hydrogeology journal, 22(2), 441. DOI: 10.1007/s10040-013-1039-3

Wang, Y., Zheng, C., & Ma, R. (2018). Safe and sustainable groundwater supply in China. Hydrogeology Journal, (5), 1301-1324. https://doi.org/10.1007/s10040-018-1795-1

Wheater, H. S., & Gober, P. (2015). Water security and the science agenda. Water Resources Research, 51(7), 5406-5424. https://doi.org/10.1002/2015WR016892

Wiek, A., & Larson, K. L. (2012). Water, people, and sustainability—a systems framework for analyzing and assessing water governance regimes. Water resources management, 26, 3153-3171. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0065-6

Womble, P. (2017). Multimodel groundwater analysis in US courts: potential applications and limitations. Groundwater, 55(5), 630-634. https://doi.org/10.1111/gwat.12563

Wurl, J., Gámez, A. E., Ivanova, A., Lamadrid, M. A. I., & Hernández-Morales, P. (2018). Socio-hydrological resilience of an arid aquifer system, subject to