نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۷۴۶-۷۳۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 731-745

مقاله علمی-پژوهشی

قنات پهنه‌های هوشمند «قنات‌پهنه»؛ الگویی نوین از دانشی کهن برای حکمرانی آب‌های زیرزمینی

بیژن نظری[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

چکیده

فناوری قنات یکی از شاهکارهای مهندسی باستانی و میراث بی‌بدیل تمدن ایران است که نقش حیاتی در شکل‌گیری و تداوم حیات در مناطق خشک و نیمه‌خشک فلات ایران ایفا کرده است. در سال‌های اخیر، وضعیت آب‌های زیرزمینی در ایران و اغلب کشورهای خشک و نیمه خشک جهان به دلیل حفر چاه و فناوری پمپاژ دستخوش تغییرات جدی و تنزل کمی و کیفی شدید شده است. حکمرانی آب‌های زیرزمینی به دلیل ناپیدا بودن این آب‌ها و پیچیدگی‌های عوامل اجتماعی و اقتصادی اثرگذار بر این آب‌ها، با چالش‌های فراوان مواجه شده است. در این نوشتار، بر اساس الگوی قنات، چارچوبی برای مدیریت چاه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. طبق طرح ارائه شده، چاه‌های آب پراکنده در یک ناحیه هیدرولوژیکی یا منطقه جغرافیایی به عنوان یک قنات‌پهنه هوشمند در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از فناوری‌های نوین پایش سطح و کیفیت آب و مدیریت مشارکتی تعریف شده، میزان برداشت پایدار و ایمن آب‌های زیرزمینی در آن پهنه مشخص و طبق آن برداشت از چاه‌های آب تعیین و نظارت می‌شود. ابعاد فنی، اجتماعی و محیط زیستی الگوی ارائه شده، مورد بحث قرار گرفته است. با بسترسازی حقوقی و فرهنگی، استفاده از قنات پهنه‌ها می‌تواند در تسکین تراژدی منابع مشترک و تنظیم‌گری آب‌های زیرزمینی گام مهمی باشد. اجرای طرح‌های الگویی قنات‌پهنه می‌تواند در بازآرایی بهره‌برداری و حفاظت از آبهای زیرزمینی از حالت مدیریت فردی به مدیریت جمعی موثر باشد.

واژه‌های کلیدی: الگووارە، پایداری، پایش هوشمند، مشارکت

مقدمه

قنات شاهکاری مهندسی مردمان ایران زمین برای مدیریت آب بوده است. منشأ دقیق قنات مورد بحث است، ولی شواهد قوی نشان می‌دهد که این فناوری نخستین بار در کوهپایه‌های زاگرس در اوایل هزاره اول پیش از میلاد ابداع و سپس به سرعت در سراسر ایران و سایر نقاط جهان گسترش یافت. باستان‌شناسان قدیمی‌ترین شواهد قنات را در ایران و مربوط به حدود ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ سال پیش یافته اند، که گواهی بر نبوغ ایرانیان باستان در مقابله با خشکسالی و بهرهبرداری پایدار از منابع آب زیرزمینی است (English, 2022). این سیستم نه تنها امکان اسکان و کشاورزی در مناطقی که دسترسی به آبهای سطحی دشوار یا غیرممکن بود را فراهم کرد، بلکه پایه‌های تمدن‌های بزرگی چون هخامنشیان را در ایران مرکزی بنیان نهاد (Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017). مزیت اصلی و بنیادین قنات، استخراج آب زیرزمینی در اعماق زمین و انتقال آن به سطح زمین به‌صورت کاملاً ثقلی (بدون نیاز به نیروی خارجی) است.این امر امکان بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی عمیق را که دسترسی به آنها با روشهای سنتی دیگر ممکن نبود، فراهم می‌کرد (Goblot, 1979). طراحی هوشمندانه قنات شامل حفر سری چاه‌های عمودی و یک کانال زیرزمینی با شیب ملایم (میله) است که آب را از آبخوان مادر به سطح زمین در محلی پایین‌تر (مظهر قنات) هدایت می‌کند. این سیستم طبیعی تبخیر را به حداقل می‌رساند (به دلیل جریان زیرزمینی آب) و از آلودگی آب در مقایسه با منابع سطحی جلوگیری می‌کند (Lightfoot, 1996). کارآیی مصرف آب در کشاورزی مبتنی بر قنات به دلیل نظارت جمعی بر مصرف آب و توزیع آب بر اساس زمان‌بندی‌های مشخص (نوبت‌بندی یا "طومار")، بسیار بالا بود و امکان کشت محصولات متنوع حتی در دل کویر را ممکن می‌ساخت (Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017).

۱- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و همکار پژوهشکده آینده‌پژوهی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) (binazari@ut.ac.ir)
(DOI: 10.22034/idj.2025.540325.2621)

فناوری قنات تنها یک دستاورد مهندسی نبود، بلکه یک سیستم مدیریت اجتماعی-محیطزیستی پیچیده و پایدار را به همراه داشت. ساخت، نگهداری و توزیع آب قنات نیازمند همکاری و سازماندهی اجتماعی بسیار بالایی در قالب نظام‌های تعاونی سنتی (موسوم به "بنه" یا "سهامداران") بود. این همکاری جمعی، انسجام اجتماعی عمیقی در جوامع محلی ایجاد می‌کرد. از منظر محیطزیستی، قنات‌ها نمونه بارز استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی بودند. آنها به‌طور طبیعی میزان برداشت را با تغذیه سالانه آبخوان تنظیم می‌کردند، زیرا دبی قنات مستقیماً به سطح آب زیرزمینی (و در نتیجه میزان بارش و تغذیه) وابسته بود و از افت بیش از حد سفره‌ها جلوگیری می‌کرد (Jomehpour, 2009). این ویژگی قنات‌ها را به سیستمی پایدار و سازگار با محیط زیست تبدیل کرده بود که برای قرن‌ها دوام آورد. همچنین، مظهر قنات‌ها اغلب کانون ایجاد فضای سبز، باغات و اکوسیستم‌های حیاتبخش (مثل "کاریزکشت") در مناطق خشک بود که خود نقش مهمی در تعدیل خرداقلیم و حفظ تنوع زیستی داشت (Foltz, 2002).

در دوران اسلامی، دانش قنات به اوج خود رسید و گسترش بیشتری یافت. دانشمندان ایرانی مانند ابوبکر کرجی در کتاب "استخراج آبهای پنهانی" (قرن ۱۱ میلادی) به تفصیل به اصول حفر قنات، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و مهندسی مرتبط پرداختند. این اثر نشان‌دهنده پیشرفت علمی عمیق ایرانیان در مدیریت آب است (Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017). قنات‌ها نه تنها زیرساخت حیاتی کشاورزی و آب شرب بودند، بلکه در توسعه شهری، ایجاد کاروانسراها در مسیرهای قنات و حتی در اعتقادات و فرهنگ عامه مردم (مثل تقدس آب) ریشه دوانده بودند. آنها ستون فقرات اقتصاد و جامعه بسیاری از مناطق ایران تا اواسط قرن بیستم بودند (Papoli Yazdi, 1991).

امروزه با وجود چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق (که منجر به افت شدید سطح آبهای زیرزمینی و خشک شدن بسیاری از قناتها شده است)، ارزش‌های تاریخی، فرهنگی، اجتماعی و محیطزیستی قنات‌ها بیش از پیش آشکار شده است. تلاش‌های بین‌المللی مانند ثبت ۱۱ قنات ایرانی در فهرست میراث جهانی یونسکو (۲۰۱۶) گامی مهم در حفاظت از این گنجینه‌های بشری است(UNESCO, 2016) . احیای دانش سنتی مدیریت قنات و تلفیق آن با فناوری‌های نوین می‌تواند نقش مهمی در مواجهه با بحران آب در ایران و مناطق مشابه جهان ایفا کند (Jomehpour, 2009).

در این پژوهش، بر اساس الگوی قنات، چارچوبی برای مدیریت چاه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. طبق طرح ارائه شده، هر چند چاه کشاورزی در یک ناحیه هیدرولوژیکی و یا یک منطقه جغرافیایی، بر اساس تقسیم‌بندی اداری و یا عرفی، به عنوان یک قنات‌پهنه هوشمند در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از فناوری‌های نوین پایش سطح و کیفیت آب و مدیریت مشارکتی تعریف شده، میزان برداشت پایدار و ایمن آب‌های زیرزمینی در آن پهنه مشخص و طبق آن برداشت از چاه‌های آب تعیین و نظارت می‌شود. ابعاد فنی، اجتماعی و محیط زیستی الگوی ارائه شده، مورد بحث قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

شناخت ابعاد بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و تراژدی منابع مشترک

افزایش حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دهه‌های اخیر، منجر به بحران‌های جدی محیطزیستی، اجتماعی و اقتصادی در بسیاری از کشورهای جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است. این وضعیت مصداق بارز "تراژدی منابع مشترک"[1] است، مفهومی که گارِت هاردین[2] در سال ۱۹۶۸ مطرح کرد. بر اساس این نظریه، زمانی که یک منبع مشترک (مثل سفره آب زیرزمینی) بدون قوانین و نظارت کافی در اختیار افراد باشد، هر فرد انگیزه دارد حداکثر استفاده را از منبع ببرد تا سود فردی خود را به حداکثر برساند، زیرا هزینه‌های تخریب ناشی از بهره‌برداری‌اش بین همه ذینفعان تقسیم می‌شود. نتیجه نهایی این رفتار جمعی، تخریب و نابودی آن منبع مشترک است (Hardin, 1968). بحران آب‌های زیرزمینی امروز دقیقاً بازتاب این تراژدی است. جدول (۱) برخی از اصلی‌ترین چالش‌ها و مشکلات ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.

سفره آب زیرزمینی یک منبع مشترک است که به صورت سنتی دسترسی به آن برای بسیاری از بهره‌برداران (کشاورزان، صنایع، شرب) امکان‌پذیر بوده است. منافع حاصل از برداشت بیشتر، کاملاً خصوصی است (محصول بیشتر، درآمد بالاتر) اما هزینه‌های ناشی از تخریب منبع (افت سطح آب، کاهش کیفیت، فرونشست) بین تمام استفاده‌کنندگان منبع مشترک (و حتی ذی نفعانی که بهره بردار آب نیستند) تقسیم می‌شود. نتیجه آنکه وقتی تعداد زیادی از بهره‌برداران این منطق را دنبال کنند، برداشت کل از حد ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان فراتر رفته و منجر به تخریب فاجعه‌بار و غیرقابل برگشت منبع مشترک می‌شود. خشکیدن چاه‌ها، شور شدن آب و فرونشست زمین نتیجه همان "تراژدی" است که هاردین پیش‌بینی کرد (Ostrom, 1990; Shah, 2009).

1- Tragedy of the Commons
2- Garrett Hardin

.جدول ۱- چالش‌ها و مشکلات اصلی ناشی از حفر چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه از آبهای زیرزمینی

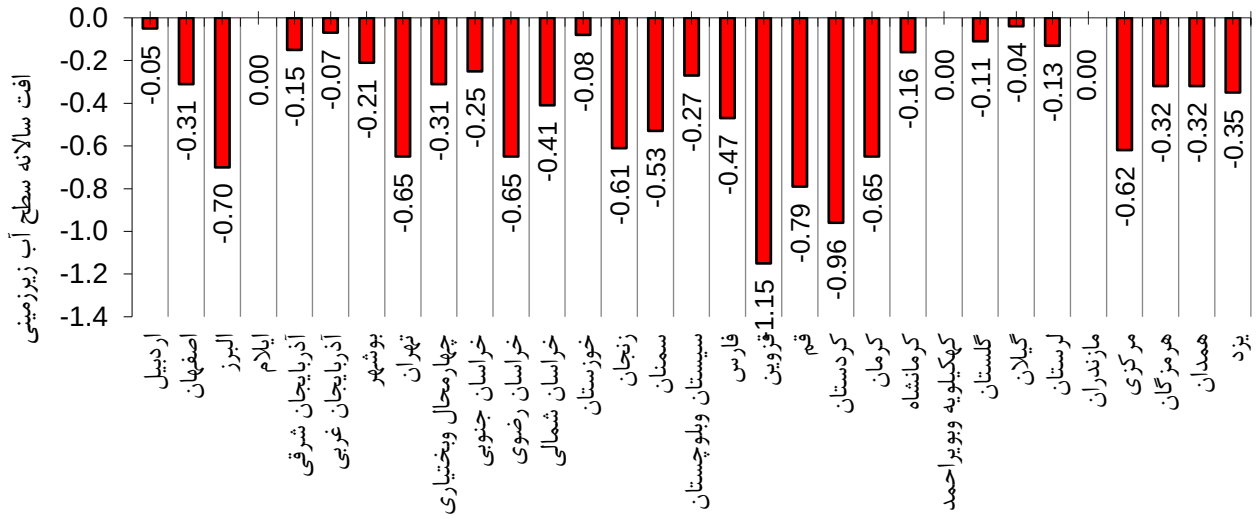
ردیف	محور چالش	مشکلات
۱	افت شدید سطح آب زیرزمینی و خشکیدن چاه‌ها و قنات‌ها	پمپاژ مداوم و بیش از حد تغذیه طبیعی آبخوان‌ها، باعث کاهش سریع و مداوم سطح ایستابی می‌شود. این افت منجر به خشکیدن چاه‌های کم‌عمق‌تر، چشمه‌ها و قنات‌های تاریخی (که به سطح آب بالا وابسته‌اند) می‌شود. در ایران، هزاران رشته قنات به دلیل افت سطح آب خشکیده‌اند (Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017). برای دسترسی به آب، چاه‌ها باید عمیق‌تر و پرهزینه‌تر حفر شوند که خود چرخه معیوب برداشت بیشتر را تشدید می‌کند (Shah, 2009).
۲	کاهش کیفیت آب زیرزمینی (شور شدن و آلودگی)	افت سطح آب می‌تواند باعث نفوذ آب‌های شور از لایه‌های مجاور یا از پایین (تهاجم آب شور در نواحی ساحلی) به داخل آبخوان شیرین شود (Wada et al., 2010). تمرکز آلاینده‌ها (نیترات ناشی از کاربرد کودها، فلزات سنگین، آلاینده‌های صنعتی) در حجم کمتر آب باقی‌مانده افزایش می‌یابد (Foster & Chilton, 2003). نهایتا علاوه بر تبعات محیط زیستی و بهداشتی، هزینه‌های تصفیه آب برای بخش های شرب، صنعت و کشاورزی نیز به شدت افزایش می‌یابد.
۳	فرونشست زمین	خروج آب از منافذ خاک و سنگ، باعث فشرده‌شدن لایه‌های آبخوان و کاهش حجم دائمی آن‌ها می‌شود. این پدیده منجر به فرونشست گسترده و غیرقابل برگشت زمین می‌گردد. دشت‌های ایران (مثل دشت مشهد، قزوین، رفسنجان، ورامین)، دره مرکزی کالیفرنیا، مکزیکوسیتی و جاوا در اندونزی نمونه‌های بارز این آسیب هستند (Galloway et al., 1999; Motagh et al., 2008). فرونشست باعث آسیب به زیرساخت‌ها (خطوط انتقال آب و گاز، جاده‌ها، ریل‌ها، ساختمان‌ها)، تغییر شیب زمین و افزایش خطر سیلاب می‌شود.
۴	خشک شدن تالاب‌ها و رودخانه‌ها (کاهش جریان پایه)	آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی در تغذیه رودخانه‌ها در فصل‌های خشک (جریان پایه) و حفظ تالاب‌ها دارند. برداشت بی رویه باعث کاهش یا قطع این جریان‌های وابسته به آب زیرزمینی می‌شود. نتیجه آن خشکیدن تالاب‌ها (مثل تالاب گاوخونی در ایران)، کاهش دبی رودخانه‌ها و آسیب شدید به اکوسیستم‌های آبی و زیست‌گاه‌های گونه‌ها است (de Graaf et al., 2019). این موضوع خود تبعات محیط زیستی منفی و گسترده نظیر افزایش کانون ریزگردها را در پی دارد.
۵	تخریب اکوسیستم‌های وابسته (پوشش گیاهی، حیات وحش)	افت سطح آب رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاهان را کاهش داده و منجر به خشکیدگی پوشش گیاهی طبیعی، و مرگ درختان کهن (مانند جنگل‌های دست‌کاشت اطراف یزد که از قنات‌ها تغذیه می‌شدند) می‌شود (Jomehpour, 2009). این امر زیست‌گاه حیات وحش و تنوع زیستی را نابود کرده و بیابان‌زایی را تشدید می‌کند.
۶	تشدید نابرابری‌های اجتماعی و اقتصادی	کشاورزان ثروتمندتر می‌توانند چاه‌های عمیق‌تر و پمپ‌های پرقدرت‌تر بزنند و به آب دسترسی داشته باشند، در حالی که کشاورزان خرده‌پا و بهره‌برداران سنتی (مثل قنات‌داران) اولین قربانیان خشکیدن منابع هستند. این امر منجر به ورشکستگی کشاورزان کوچک، مهاجرت اجباری از روستاها به حاشیه شهرها و تشدید شکاف طبقاتی می‌شود (Shah, 2009). درگیری‌های محلی و منطقه‌ای بر سر آب نیز افزایش می‌یابد.
۷	تخلیه سفره‌های آب فسیلی (غیرتجدیدپذیر)	در بسیاری از مناطق (مثل بخش‌هایی از عربستان سعودی، لیبی، دشت‌های عمیق ایران)، آب‌های زیرزمینی استخراج‌شده، ذخایر "فسیلی" هستند که طی هزاران یا میلیون‌ها سال تشکیل شده‌اند و نرخ تجدیدپذیری بسیار ناچیزی دارند. برداشت از این منابع اساساً ناپایدار محسوب می‌شود. این منابع آب پایان‌پذیرند و تخلیه آن‌ها ترمیم‌ناپذیر است (Konikow, 2011; Gleeson et al., 2012).

این تراژدی اغلب نتیجه شکست نهادهای حکمرانی است. عدم وجود یا ضعف در قوانین کارآمد، ناتوانی در نظارت و کنترل برداشت‌ها، فساد در صدور مجوزهای چاه، نبود تعرفه‌گذاری مناسب و نبود سازوکارهای مشارکتی و عادلانه برای مدیریت منبع مشترک، همگی به تشدید این تراژدی دامن زده‌اند (FAO, 2016). در هند به بزرگترین مصرف‌کننده آب زیرزمینی جهان، میلیون‌ها چاه برقی و دیزلی منجر به افت شدید سطح آب (بیش از ۴ متر در سال در برخی مناطق)، شور شدن آب و بحران رو به رشد برای کشاورزان فقیر شده است. مدیریت ضعیف و یارانه برق کشاورزی به این بحران دامن زده است (Shah, 2009; World Bank, 2010). دره مرکزی کالیفرنیا (ایالات متحده): برداشت بی‌رویه برای کشاورزی فشرده منجر به یکی از بدترین موارد فرونشست زمین در جهان (بیش از ۸ متر در برخی نقاط طی دهه‌ها) شده است که به زیرساخت‌ها آسیب جدی وارد کرده است (Faunt et al., 2016). در خاورمیانه و شمال آفریقا که دارای کمترین منابع آب تجدیدپذیر سرانه در جهان است، کشورهایی مانند عربستان سعودی، لیبی و ایران با افت شدید سطح آب، شور شدن و تخلیه سفره‌های فسیلی مواجه‌اند. این امر امنیت آبی و غذایی منطقه را به شدت تهدید می‌کند (Richey et al., 2015; FAO, 2016). در ایران، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها منجر به افت سالانه سطح آب در بسیاری از دشت‌ها، خشکیدن ده‌ها هزار قنات و چشمه؛ فرونشست

زمین با نرخ‌های هشداردهنده و شور شدن آب‌خوان‌ها و مهاجرت‌های گسترده روستایی شده است (AghaKouchak et al., 2015). حل این بحران نیازمند خروج از دام تراژدی از طریق تقویت حکمرانی آب است. تدوین و اجرای قوانین سختگیرانه، کنترل واقعی برداشت‌ها (کنتور هوشمند)، ترویج کشاورزی پایدار و کم‌مصرف، تعرفه‌گذاری مناسب، احیای نظام‌های مدیریت مشارکتی محلی (مشابه قنات) و در اولویت قرار دادن پایداری اکولوژیکی بر منافع کوتاه‌مدت فردی از اقدامات مهم قابل توصیه است (Ostrom, 1990; FAO, 2016) .

وضعیت بهره برداری از آبهای زیرزمینی در ایران

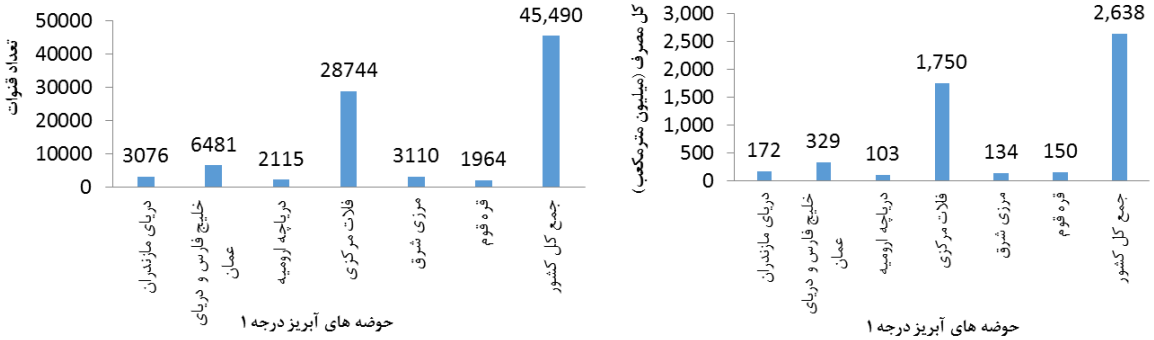
در محاسبات مربوط به متوسط تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان‌ها، با توجه به طول دوره آماری ایجاد شبکه چاه‌های مشاهداتی، سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ به‌عنوان مبنا لحاظ می‌شود. بر اساس آخرین محاسبات در دسترس، متوسط افت سطح آب زیرزمینی منتهی به سال ۹۹-۱۳۹۸ و نسبت به سال آبی مبنا، در شکل (۱) نشان داده‌شده است. ملاحظه می‌شود بیشترین افت سالیانه مربوط به استان قزوین با ۱۱۵ سانتیمتر در سال بوده و استان‌های ایلام و کهگیلویه و بویراحمد متعادل است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۹). دلیل افت بیشتر آبخوان در برخی از استان‌ها، سهم بزرگتر آب زیرزمینی در تأمین آب بخش‌های مصرف کننده کشاورزی، شرب، تراکم جمعیتی بالا و ساختار اقتصادی-اجتماعی این استان‌ها است که فشار بر منابع آب را افزایش داده است. گزارش های متعدد نشان داده است که علی رغم تلاش‌ها با انجام طرح تعادل بخشی، همچنان روند نزولی تراز آبخوان‌ها در اغلب دشت های کشور ادامه دارد. به طور مشخص تنظیم گری فعلی ظرفیت بهبود شرایط را ندارد و به موازات حفر چاه های غیرمجاز نیز، چاه های دیگری در حال حفر شدن هستند. در بسیاری از مناطق نیز کنتورهای هوشمند مورد دستکاری قرار می‌گیرند و در چاه های مجاز نیز سقف برداشت رعایت نمی‌شود. در دهه‌های اخیر تنزل کیفیت آب آبهای زیرزمینی شدت زیادی یافته است. متوسط شوری آب‌های زیرزمینی کشور از حدود ۲۲۵۰ میکرو موس بر سانتیمتر در سال ۱۳۶۰ به حدود ۴۴۰۰ میکرو موس بر سانتیمتر در سال ۱۳۹۹ افزایش‌یافته است. افزایش شوری آب به دنبال خود افزایش شوری خاک، کاهش عملکرد محصول و افزایش هزینه‌های تولید در بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات را در پی خواهد داشت. در قنات‌ها به دلیل موقعیت مکان‌یابی مناسب و موقعیت هیدرولوژیکی، کیفیت آب همچنان در وضعیت خوبی قرار دارد. متوسط شوری آب بهره برداری شده از قنات ها حدود ۱۰۵۴ میکروموس بر سانتی متر است که در مقایسه با متوسط متوسط شوری آبهای زیرزمینی بهره برداری شده، وضعیت بسیار بهتری دارد. با افت آبخوان‌ها، علاوه بر کمیت آبدهی، کیفیت آب در قنات‌ها نیز مورد تهدید قرار خواهد گرفت.



شکل ۱- میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی بلندمدت به تفکیک استان‌ها

بر اساس برآوردهای وزارت نیرو، کل ذخایر راهبردی آب‌های زیرزمینی کشور حدود ۵۰۰ میلیارد مترمکعب است که تنها حدود ۳۰۰ میلیارد مترمکعب آن قابل‌استفاده در بخش‌های مختلف بوده و مابقی آن شور و لب‌شور است. از اوایل دهه ۵۰ شمسی مازاد برداشت از آبخوان‌های کشور شروع‌شده ولی از اوایل دهه هفتاد این روند شدت یافته و تقریباً هرساله بیشتر شده است تا سال ۱۴۰۲، میزان کسری تجمعی آبخوان‌های کشور حدود ۱۴۶ میلیارد مترمکعب بوده است. این میزان بیشتر از کل آب تجدیدپذیر سالانه کشور و حدود ۴۹

درصد منابع آب استراتژیک و ذخایر راهبردی کشور است. در ۱۵ سال گذشته حدود ۵۴ میلیارد مترمکعب و تنها در ۷ سال گذشته حدود ۱۵/۸ میلیارد مترمکعب از ذخایر آب‌های زیرزمینی کشور برداشت‌شده است. حداکثر کسری مخزن سالیانه آبخوان‌های کشور معادل ۱۰/۱ میلیارد مترمکعب مربوط به سال ۱۳۸۶ و متوسط کسری مخزن سالیانه در ده سال اخیر حدود ۳/۲ میلیارد مترمکعب است. تعداد قنوات و مصارف مربوطه به قنوات نقل از آماربرداری دور سوم در شکل (۲) ارائه شده است. کل مصارف قنات‌ها ۲/۶ میلیارد مترمکعب است. حال آنکه در همین آماربرداری، از ۱/۰۲ میلیون تعداد چاه، افزون بر ۴۱/۷ میلیارد مترمکعب آب برداشت شده است. تعداد قنات‌ها در طی ۵۰ سال اخیر از حدود ۷۰ هزار رشته به ۴۵۷۹۰ رشته رسیده است که کاهش ۳۵ درصدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تعداد قنوات و مصارف مربوطه به نقل از آماربرداری دور سوم

تحلیل تاریخچه فناوری

برای ارزیابی یک فناوری جدید که مبتنی بر فناوری‌های قدیمی تر است، از روش تحلیل تاریخچه فناوری[1] به عنوان یک روش نظام‌مند استفاده می‌شود. این روش کمک می‌کند تا تکامل فناوری، نقاط عطف تغییر و تأثیر اقتباس‌ها درک شود. روش تحلیل تاریخچه فناوری، با بازسازی مسیر تکامل فناوری، نقاط قوت/ضعف فناوری جدید را در چارچوبی تاریخی و زمینه‌محور بررسی می‌کند. در ادامه، ابزارهای به کارگرفته شده در مطالعه حاضر شرح داده شده است.

- شناسایی فناوری‌های مادر[2]: تهیه فهرستی از فناوری‌های قدیمی که پایه‌ای برای فناوری جدید بوده‌اند
- ترسیم خط زمانی تکاملی[3] : ترسیم یک خط زمانی از اولین نسخه‌های فناوری قدیمی تا آخرین نوآوری. تمرکز بر نقاط تغییر کلیدی و پاسخ به سوالاتی مانند چه مشکلاتی در فناوری قدیمی وجود داشت؟ یا کدام عناصر حفظ/حذف/بهینه‌شدند؟ مورد توجه است.
- تحلیل زمینه[4] : ارزیابی فناوری جدید در چهارچوب نیازهای فعلی، محدودیت‌های قانونی و انتظارات اجتماعی. پرسش اصلی این است که "آیا این اقتباس، پاسخگوی تحولات اخیر در محیط فناوری است؟"
- شناسایی ریسک‌های انتقال[5]: شناسایی ریسک‌های کیفی مانند: مقاومت کاربران قدیمی در برابر تغییر، وابستگی بیش‌ازحد به زیرساخت‌های منسوخ و عدم تطابق با استانداردهای نوین کمک زیادی به انتقال فناوری می‌نماید.

نتایج مورد انتظار از روش تحلیل تاریخچه فناوری شامل درکی عمیق از تداوم یا گسست بین فناوری قدیم و جدید، شناسایی نقاط قوت یا ضعف پنهان، پیش‌بینی چالش‌های اجرایی بر اساس تجربیات تاریخی و استخراج بینش‌هایی برای بهبود پذیرش اجتماعی و سازمانی است. مزایای روش تحلیل تاریخچه نیز انعطاف‌پذیری برای فناوری‌های پیچیده با ابعاد اجتماعی-فنی و تأکید بر روایت‌های انسانی نظیر نقش کاربران، توسعه‌دهندگان و ذینفعان در موفقیت یا شکست فناوری است. این روش همچنین می‌تواند به کشف بینش‌های غیرمنتظره مانند شناسایی "وابستگی مسیر[6] که مانع نوآوری شده است، بیانجامد. روش‌های کیفی تکمیلی نظیر طوفان فکری مبتنی بر سناریو[7]، نقشه‌برداری ذینفعان[8] و تحلیل گفتمان[9] نیز می‌تواند به تحلیل بهتر فناوری جدید کمک کند.

1 Technology History Analysis
2 Parent Technologies
3 Evolutionary Timeline
4 Contextual Analysis

5 Adoption Risks
6 Path Dependency
7 Scenario-Based Brainstorming
8 Stakeholder Mapping
9 Discourse Analysis

نتایج و بحث

شناسایی فناوری مادر: نظام قنات

در زمینه تحلیل تاریخچه فناوری قنات برای طراحی سیستم مدیریت مشارکتی منابع آب زیرزمینی سوابق مطالعاتی خوبی وجود دارد. فناوری قنات (کاریز) به‌عنوان یک سیستم مدیریت آب زیرزمینی، به‌طور ذاتی ویژگی‌هایی دارد که آن را به نمونه‌ای بارز از بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی تبدیل می‌کند. این پایداری ناشی از هماهنگی بین ابعاد فنی، اجتماعی، مدیریتی و محیط‌زیستی این سیستم است. ویژگی‌های کلیدی قنات شامل نظام شفاف حقابه، مدیریت مشارکتی، پایش غیرمتمرکز و سازگاری با محیط زیست می‌باشد.

جدول ۲- مزایای قنات در بهره‌برداری پایدار از آب‌های زیرزمینی به تفکیک ابعاد

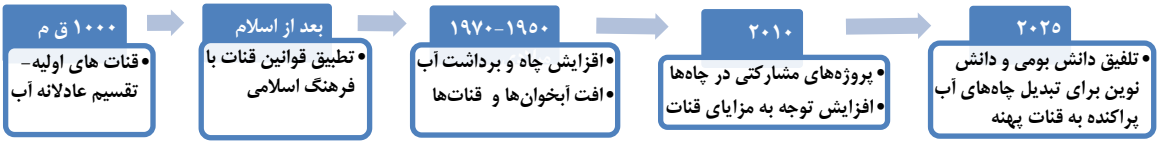
بعد	مزیت کلیدی	سازوکار/توضیح	مراجع مرتبط
فنی	برداشت صرفاً ثقلی (بدون نیاز به انرژی)	عدم نیاز به پمپاژ و مصرف انرژی (فسیلی یا برقی) برای استخراج آب، کاهش هزینه‌ها و ردپای کربنی	Goblot, 1979; Lightfoot, 1996
	تطبیق پذیری برداشت با تغذیه آبخوان	دبی قنات مستقیماً به سطح ایستابی آبخوان بستگی دارد. با کاهش آب زیرزمینی، دبی قنات کاهش و از تخلیه بیش از حد آبخوان جلوگیری می‌کند.	Jomhpour, 2009
	کاهش تبخیر و اتلاف آب	انتقال آب در کانال زیرزمینی، قرارگیری در معرض تابش خورشید، باد و گرما را به حداقل رسانده و تبخیر را بسیار کاهش می‌دهد.	Lightfoot, 1996
اجتماعی	وابستگی حیات جامعه به حفظ قنات	جوامع متکی به قنات، بقای خود را در گرو نگهداری و پایداری این سیستم می‌بینند، انگیزه ذاتی برای حفاظت از آن دارند.	Papoli Yazdi, 1991
	سازمان‌دهی اجتماعی و تعاونی (سهامداران/بنه)	ساختار مالکیت مشترک نیاز به همکاری و مسئولیت‌پذیری جمعی برای نگهداری و توزیع عادلانه آب را ایجاد می‌کند.	Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017
	حل اختلافات سنتی و انسجام اجتماعی	نظام سنتی حل اختلافات آبی (مثل حضور ریش‌سفیدان یا "میراب") درون جامعه محلی، منازعات را کاهش داده و انسجام را تقویت می‌کند.	Abadi et al., 2023
مدیریتی	نظام توزیع عادلانه و مبتنی بر زمان (طومار/نوبت‌بندی)	تقسیم آب بر اساس سهم (زمانی) مشخص و ثابت (طومار) در چارچوب‌های زمانی دقیق، توزیع عادلانه و شفاف را تضمین و از برداشت بی‌رویه جلوگیری می‌کند.	Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017
	نظام نگهداری و لایروبی جمعی و برنامه‌ریزی شده	برنامه‌ریزی منظم (معمولاً فصلی یا سالانه) برای لایروبی قنات با مشارکت مالی و فنی حقابه‌داران، پایداری فیزیکی و کارایی سیستم را حفظ می‌کند.	Jomehpour, 2009
	دانش بومی و تخصص موروثی (میراب‌ها)	انتقال دانش فنی عمیق در مورد زمین‌شناسی محلی، جریان آب و تعمیرات از طریق نسل‌ها (میراب‌ها)، مدیریت آگاهانه و سازگار را ممکن می‌سازد.	Semsar Yazdi & Labbaf Khaneiki, 2017
محیط‌زیستی	جلوگیری از افت شدید سطح آب زیرزمینی	سازوکار تطبیقی برداشت (وابستگی دبی به سطح آبخوان) به طور طبیعی از افت بیش از حد و خشکیدن آبخوان جلوگیری می‌کند.	Jomehpour, 2009
	حفاظت از کیفیت آب	جریان زیرزمینی آب در قنات، آن را از آلودگی‌های سطحی (پساب، زباله، کودهای شیمیایی) محافظت می‌کند.	Lightfoot, 1996
	توسعه اکوسیستم‌های حیات‌بخش	مظهر قنات‌ها اغلب کانون ایجاد باغات، کشت‌زارها و نیزارها می‌شود که زیستگاه‌های ارزشمندی ایجاد کرده و خرداقلیم را تعدیل می‌کند.	Foltz, 2002; UNESCO, 2016 ۳
	جلوگیری از فرونشست زمین	با جلوگیری از برداشت بی‌رویه و افت شدید سطح آب زیرزمینی، نهایتاً خطر فشردگی لایه‌های خاک و فرونشست زمین کاهش می‌یابد.	Abadi et al., 2023

جدول ۲ مزایای کلیدی قنات در دستیابی به پایداری را به تفکیک این ابعاد نشان می‌دهد. همچنان که ملاحظه می‌شود، قنات یک سیستم مدیریت آب زیرزمینی است که پایداری را نه تنها از طریق طراحی هوشمندانه فنی (برداشت ثقلی و تطبیق‌پذیری با تغذیه آبخوان)، بلکه به‌واسطه ساختارهای اجتماعی-مدیریتی قدرتمند و درون‌زا (مالکیت مشترک، توزیع عادلانه، دانش بومی میراب‌ها و نگهداری جمعی) تضمین می‌کند. این هماهنگی ذاتی بین فناوری و جامعه، همراه با مزایای محیط زیستی آشکار (کاهش تبخیر، حفاظت از کیفیت آب، جلوگیری از افت آبخوان و فرونشست، ایجاد اکوسیستم‌های سبز)، قنات را به یک الگوی بی‌نظیر و اثبات‌شده برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است. احیای اصول مدیریتی و فنی این سیستم می‌تواند درس‌های ارزشمندی برای مواجهه با بحران از بین رفتن منابع آب زیرزمینی ارائه دهد.

شکل ۳، ترسیم خط زمانی تکاملی فناوری قنات را نشان می‌دهد. خط زمانی ترسیم شده، مسیر تکامل فناوری قنات به پهنه های هوشمند است. قنات به شکل سنتی و مرسوم آن همچنان به عنوان یک فناوری کارآمد، قابل استفاده است.

تحلیل زمینه و ریسک‌ها

کاهش شدید منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک، لزوم اتخاذ رویکردهای جدید را مطرح کرده است (FAO, 2021). توجه به مفاهیم جدید تلفات و صرفه جویی آب و جریان بازگشتی به آبخوان‌ها در ارزیابی فناوری های مدیریت آب بسیار مهم است (Grafton et al., 2020). به ویژه ایران در شرایط بسیار بحرانی از نظر آب زیرزمینی است. ریسک‌های انتقال فناوری به شرح جدول (۳) است.



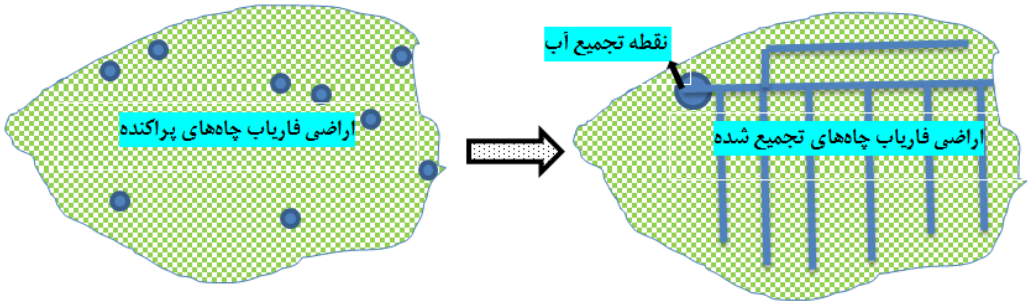
شکل ۳- ترسیم خط زمانی تلفیق دانش بومی و فناوری برای تبدیل چاه‌های آب پراکنده به قنات پهنه

جدول ۳- ریسک‌های تکامل فناوری قنات پهنه (تبدیل چاه های پراکنده به قنات پهنه های هوشمند و مشارکتی)

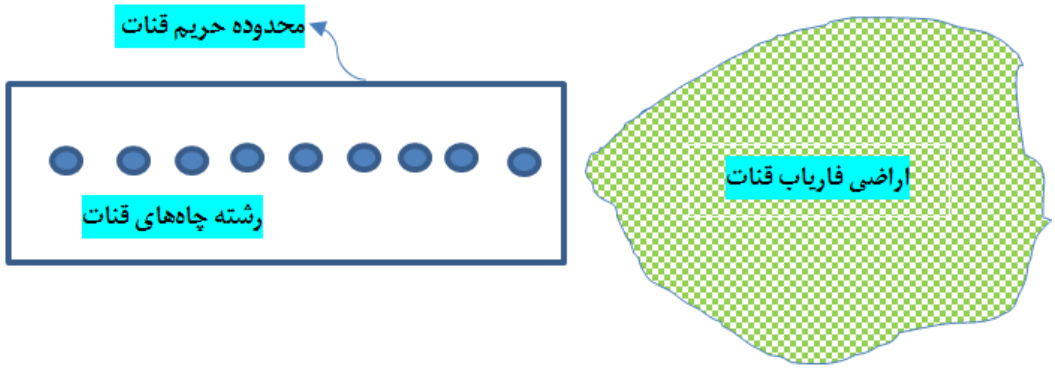
ریسک	راهکار مواجهه با ریسک
مقاومت کشاورزان در برابر نظارت دیجیتال	آموزش چهره‌به‌چهره و بیان قابلیت‌ها و مزایا
ناسازگاری با قوانین مالکیت آب	تصویب قوانین و آیین‌نامه جدید و اصلاح پروانه‌های بهره‌برداری
نیاز به آموزش فناوری	حمایت نهادی و ارایه مشوق‌های مالی
مقاومت بهره برداران به دلیل کاهش استقلال عمل	آگاهی‌بخشی عمومی در زمینه خسارت‌های برداشت مازاد و افت آبخوان
دشواری تحولات فرهنگی و اجتماعی	بهبود تدریجی با گفتمان‌سازی و استفاده از ظرفیت نخبگان و بهره‌برداران پیشرو

تلفیق دانش بومی و دیجیتال و الگوی پیشنهادی قنات پهنه

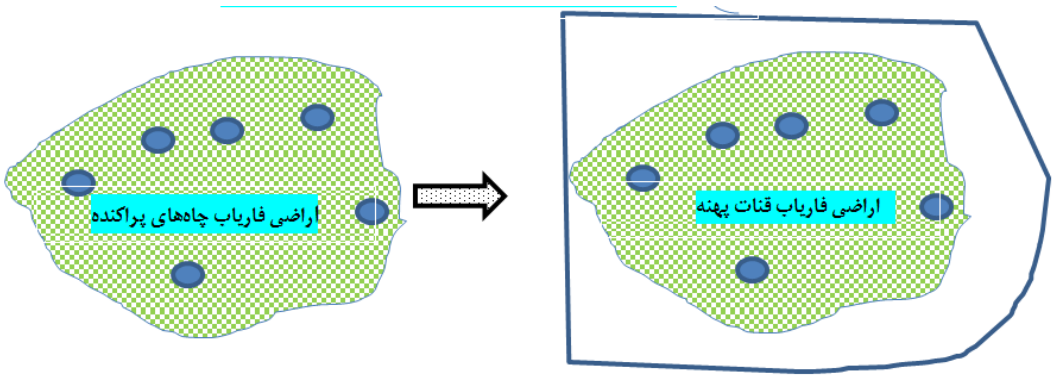
بررسی‌ها نشان می‌دهد مهندسی اجتماعی قنات‌ها می‌تواند پایه‌ای برای حل بحران آب زیرزمینی امروز باشد. البته برای تطبیق منطقه‌ای، نیاز به تحلیل داده‌های هیدروژئولوژی محلی است. شکل ۴ الگوی اراضی فاریاب چاه های پراکنده در یک محدوده یا پهنه را نشان می‌دهد که برداشت و مدیریت آب در آن به صورت تجمیع شده و توسط یک یا چند چاه مرکزی صورت می‌گیرد. این شیوه که در ایران به طرح های تجمیع معروف است، در برخی از مناطق کشور به کار گرفته شده است. به ویژه در مواردی که کشاورزان نیاز به استفاده از تسهیلات آبیاری نوین داشته اند، این شیوه نتایج خوبی داشته است. شکل ۵ و ۶ نیز به ترتیب اراضی فاریاب و حریم قنات و قنات پهنه را نشان می‌دهد. پرسش کلیدی در زمینه اقتباس از فناوری قنات آن است که نقش نظام میرابی چگونه می‌تواند در مدیریت چاه‌ها بازتعریف شود؟ آیا با توجه به افت زیاد آبخوان‌ها امکان بهره‌مندی از دانش و فناوری قنات همچنان وجود دارد؟ در صورتی که این امکان وجود دارد، چه سازکارهای اجرایی قابل تعریف خواهد بود. جدول (۴) ابعاد این موضوع را تشریح کرده است.



شکل ٤- الگوی طرح های تجمیع چاه‌ها در طرح های آب و خاک



شکل ٥- الگوی اراضی فاریاب و حریم قنات



شکل ٦- الگوی اراضی فاریاب و حریم قنات پهنه‌های هوشمند (قنات پهنه)

استقرار قنات‌پهنه از منظر ارزیابی رویکردهای حکمرانی آبهای زیرزمینی

حکمرانی توسط UNDP به صورت "سیستم ارزش‌ها، سیاست‌ها و ساختار نهادی، که جامعه با آن، امور اقتصادی، سیاسی و اجتماعی‌اش را، از طریق تعامل بین دولت، جامعه‌ی مدنی و بخش خصوصی، مدیریت می‌نماید" تعریف شده است (UNDP, 2009). این تعریف، حکمرانی را به سیستم اجتماعی گسترده‌ی مدیریتی مربوط می‌سازد. شناخت حکمرانی، به ما این اجازه را می‌دهد تا مکانیسم‌هایی را برای رسیدن به اهداف جامعه شناسایی کنیم. حکمرانی آب، توسط GWP، به صورت "سیستم‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی که مستقیماً و یا به طور غیرمستقیم، بر استفاده، توسعه و مدیریت منابع آب و تفویض خدمات آبی در سطوح مختلف اجتماع، تأثیر می‌گذارند" تعریف شده است (GWP, 2008).

حکمرانی آب زیرزمینی، به عنوان زیرمجموعه‌ای از موارد فوق، شامل مهیا کردن شرایط (شامل سیاست‌ها، برنامه‌ریزی، قوانین، مقررات تنظیم‌گری و مکانیسم‌های تشویقی، و سازمان‌های به کارگیری آن‌ها) برای مدیریت منابع زیرزمینی به صورت "با مسئولیت‌پذیری اجتماعی"، "سازگار با محیط زیست" و "مقرون به صرفه" می‌باشد. در منابع مشترک مانند آب‌های زیرزمینی، برای تحقق اهداف حفاظتی، بهره‌وری و عدالت، نیاز به تمهیدات مدیریتی

خاص است. منابع آبی مشترک، در معرض استفاده‌ی بیش از حد و نابودی نهایی است. زیرا افراد، انگیزه‌ای برای محدود نمودن بهره‌برداری‌شان از منابع ندارند. هر کس که بخواهد آب را برای استفاده‌های بعدی ذخیره نماید، چنین تلقی می‌شود که به نوعی امکان بهره‌برداری آن را به دیگران سپرده است. به علاوه، برداشت بیش از حد، اغلب هزینه‌هایی مانند فرونشست زمین‌ها، تغییر در کیفیت آب و از بین‌رفتن اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی را برای طرف ثالث به همراه دارد. لذا، تنها راه حل برای این وضعیت آن است که بهره‌برداران انگیزه‌ای برای حفاظت از آب داشته باشند.

جدول ٤- تلفیق دانش بومی و دیجیتال و تبدیل چاه‌های پراکنده به قنات پهنه‌های هوشمند و مشارکتی

موضوع	شیوه برداشت آب زیرزمینی			سازوکار اجرایی برای پیاده سازی الگوی پیشنهادی
	قنات	چاه‌های آب	الگوی پیشنهادی(تبدیل چاه‌های پراکنده به قنات پهنه‌ها)	
سهم‌بندی آب	سهم‌بندی زمانی بر اساس مالکیت	برداشت طبق پروانه مجزا برای هر چاه	سهمیه بندی حجمی و زمانی	– اختصاص سهمیه آب بر اساس پروانه بهره برداری – صدور پروانه بهره برداری جمعی در هر پهنه – هشدار مصرف بیش‌ازحد با پیام‌رسانی به بهره بردار و میراب
نظام بهره‌برداری	نظام میرابی	فاقد نظام در اغلب مناطق	ناظران محلی + پلتفرمIoT	-آموزش میراب پهنه‌ها و استفاده از فناوری دیجیتال – تقویت تشکل‌های موجود و تشکیل تشکل در هر پهنه
تعمیر و نگهداری	نگهداری و بهسازی مشارکتی	اقدامات مجزا برای هر چاه	صندوق مالی خودگردان	– پرداخت هزینه یا واگذاری موقت حقابه به صندوق تعمیرات – اولویت‌بندی اقدامات با رأی‌گیری و مشارکت
پایداری منابع آب	بهره برداری پایدار از منابع آب	بهره برداری رقابتی و ناپایدار	بهره برداری پایدار از منابع آب	– تعیین حد ایمن برداشت در هر پهنه و تعیین حد برداشت سالانه طبق تغذیه و تخلیه سالانه و خشکسالی و ترسال
پایش و نظارت	پایش و نظارت جمعی	پایش مجزا در هر چاه	پایش جمعی و هوشمند	– پایش کمیت و کیفیت آب با سنسورهای پیشرفته

استروم ، متذکر شد که مدیریت جمعی منابع آبی مشترک، روشی جایگزین می‌باشد، که تجارب موفقیت‌آمیزی نیز داشته است. این مسئله می‌تواند از بعضی از کاستی‌های کنترل دولتی، از قبیل هزینه‌های بالا و کمبود ظرفیت مدیریتی، و برخی از مشکلات خصوصی‌سازی، از جمله دسترسی نابرابر به منابع جلوگیری کند (Ostrom et al., 1990). گاهی شرایط منطقه‌ای موجب می‌شود که بهره‌برداران آب‌های زیرزمینی به راه‌حل‌های مشارکتی تمایل بیشتری نشان دهند. اشلاگر بیان داشته است که "به عنوان مثال، صاحبان چاه‌های نزدیک بهم، ممکن است به راحتی متوجه شوند که پمپاژ سنگین از هر چاه منجر به کاهش تراز آب در چاه‌های همجوار می‌شود و یا با کاهش پمپاژ، تراز آب در چاه‌های همجوار احیا می‌شود (Schlager, 2007). در این مورد، "توانایی بهره‌برداران آب زیرزمینی در نظارت بر منابع" و "پویایی پذیرفته‌شده‌ی منابع"، قابل مشاهده است و می‌توانند مبنایی را، برای دو مشخصه‌ی کلیدی جهت مشارکت موفقیت‌آمیز فراهم آورند. ممکن است بهره‌برداران، بخواهند به محدودیت‌های مکانی و زمانی در مورد استفاده از منابع آب اقدام کنند. متأسفانه، اطلاعات در مورد بیلان آب‌های زیرزمینی، معمولاًناقص است، زیرا جمع‌آوری و آنالیز داده‌های مرتبط با آنها مشکل می‌باشد(World Bank, 2009). تعریف مرزها، ساختار یا ظرفیت منابع آبی، به مشارکت مهندسان و هیدرولوژیست‌ها نیاز دارد. همچنین، خود بهره‌برداران آب‌های زیرزمینی، نمی‌توانند به آسانی تعداد پمپ‌های یکدیگر، اینکه چه مقدار آب برداشت می‌کنند، را تعیین نمایند. بنابراین مسائل مربوط به حفاظت از آب‌های زیرزمینی، آسان نیستند. از این رو، استفاده از فناوری های هوشمند و قابل اتکا برای پایش تراز و کیفیت آبخوان و برداشت هر بهره‌بردار نیازمند و همچنین تعریف مسئولیت‌های مشخص نظیر «میراب قنات پهنه» ضروری است. جنبه‌های دیگری که معمولاً با دشواری همراه هستند شامل "توافق در مورد پایداری منابع"، "مشارکت بهره‌برداران در تنظیم قوانین مدیریت منابع" و "ظرفیت بهره‌برداران برای ایجاد قواعد مدیریت منابع آب خودشان (ازجمله پایش و اجرای موثر مقررات)" می‌باشد. به نظر می‌رسد کلید موفقیت در این زمینه، پایه‌گذاری و ایجاد مشوق‌هایی برای همکاری است به نحوی که منفعت بهره ردار را به مشارکتش در نظام مدیریت آب متصل نماید. متناسب با شرایط منطقه‌ای، فناوری‌های در دسترس، وضعیت اقتصادی-اجتماعی و هیدرولوژیکی و اقتصاد سیاسی حاکم بر جامعه، رویکرد مناسب برای حکمرانی آب‌های زیرزمینی قابل‌تعیین خواهد بود. تجارب بین‌المللی نشان داده است برای تمام شرایط از یک نسخه واحد نمی‌توان استفاده کرد و رویکردها باید بر اساس شرایط محلی و

تجارت موجود انتخاب شوند. سه رویکرد مرسوم در حکمرانی آبهای زیرزمینی، «واگذاری مدیریت به سطوح خرد»، «اصلاح ساختار مشوق‌ها» و «تنظیم‌گری دولتی» است. برای اغلب کشورها معمولاً ترکیبی از رویکردهای مذکور، بهترین شیوه است. الگوی قنات‌پهنه نیز، تلفیقی از سه رویکرد مذکور را مدنظر دارد. استقرار الگوی حکمرانی، زمان‌بر است و نباید انتظار تغییر و اصلاح یکباره شرایط را داشت. برنامه‌های پایلوت یکی از شیوه‌های خوب آزمون گزینه‌های حکمرانی است. پروژه‌های پایلوت نظیر تلفیق مدیریت جمعی و قابلیت‌های سازمان‌های دولتی، فرصت مناسبی را برای ارزیابی مکانیسم‌های برتر فراهم می‌سازد. در انتخاب دشت‌ها و یا مناطق اجرای پروژه‌های پایلوت قنات پهنه، بررسی زمینه‌های استقرار این الگو ضروری است. جدول ۵ و جدول ۶ در این زمینه راهنماهایی را ارائه می‌نماید. کمیته‌های مشترک بین وزارت جهاد کشاورزی و وزارت نیرو و سازمان‌های تابعه این وزارت‌خانه‌ها با مشارکت سایر ذی‌نفعان می‌توانند مناطق مناسب را انتخاب نمایند.

جدول ۵- ارزیابی زمینه های استقرار الگوی پهنه های مشارکتی «قنات پهنه»

زمینه‌ها و سوالات مطرح	ملاحظات
آیا چارچوب قانونی و تنظیم‌گری متناسب با شرایط و قابل اجرا، وجود دارد؟	قوانین مرتبط با قنات از جمله فصل اول قانون توزیع عادلانه آب و مفاد مربوط به قنوات در قانون مدنی با اصلاحات و بازنگری برای الگوی ارائه شده قابل استفاده است.
آیا الگویی از توافق بین بهره‌برداران آب زیرزمینی با سازمان‌های متولی وجود دارد؟	آیین نامه مشارکت ذی نفعان طرح تعادل بخشی و تشکل‌های بهره برداری از آب قابل استفاده است. در آبخوان های کوچکتر و مناطقی که سابقه همکاری وجود دارد امکان موفقیت بیشتر است.
آیا رویکرد از نظر مدیریتی و اجرایی ساده و کم هزینه است؟	رویکرد از نظر مدیریتی و اجرایی کم هزینه است اما اجرایی شدن آن چندان ساده نیست. به ویژه از نظر اجتماعی و مدیریتی لازم است تلاش زیادی برای ایجاد تحول صورت پذیرد.
آیا سرمایه اجتماعی قوی، توافق بر حقابه‌ها و مدیریت جمعی در سطح محلی، وجود دارد؟	سابقه تاریخی از مدیریت جمعی در سطوح محلی در اکثر مناطق کشور وجود دارد. سرمایه اجتماعی در حال حاضر در وضعیت خوبی نیست اما امکان احیا و تقویت آن وجود دارد.
آیا تبادل آب بین‌بخشی یک هدف است؟ آیا برداشت مازاد به عنوان یک مسئله جدی در منطقه مطرح است؟	به دلیل کاهش منابع آب در دسترس و اولویت آب شرب (و گاهی صنعت)، تبادل بین بخشی در برخی از مناطق ناگزیر است. در اغلب آبخوان‌ها مسئله برداشت مازاد وجود دارد و این موضوع ضرورت رویکردی جدید برای مواجهه با شرایط بحرانی را مطرح ساخته است.
آیا مشکل جدی در زمینه آلودگی و یا تغذیه آبخوان وجود دارد؟	در برخی از آبخوان‌ها مشکل آلودگی وجود دارد. اغلب آبخوان‌ها در زمینه تغذیه با مشکلات جدی نظیر برداشت بالادست، کاهش تغذیه از رودخانه‌ها، اقدامات پراکنده استحصال آب و تخریب مناطق تغذیه مواجه هستند. مسایل کیفیت آب و حفاظت از تغذیه آبخوان باید در قنات پهنه‌ها مورد توجه جدی باشد.

اصول سه گانه پیشنهادی سازمان همکاری های اقتصادی و توسعه در زمینه حکمرانی آب مشتمل بر «کارآیی»، «اثربخشی» و «اعتماد و همیاری» شامل ۱۲ زیرمحور است (OECD, 2018). ارزیابی حکمرانی آب بر اساس این ۱۲ زیرمحور می‌تواند وضعیت فعلی و شرایط آتی محتمل را روشن سازد (ابراهیمی،۱۴۰۴). در بخش کارآیی: داده و اطلاعات، تامین مالی، چارچوب‌های تنظیم‌گری و نوآوری، در بخش اعتماد و همیاری: صداقت و شفافیت، همیاری ذی نفعان، مبادلات بین‌بخشی و بین‌نسلی و پایش و ارزیابی، و در بخش اثربخشی: ظرفیت، انسجام خط‌مشی، مقیاس مناسب بین سیستم‌های حوضه‌ای، نقش‌ها و مسئولیت‌های شفاف، زیرمحورهای تعریف شده است. از منظر همیاری ذی‌نفعان و مبادلات بین‌بخشی و بین‌نسلی که عدالت و پایداری منابع آب را مطرح می‌سازد، الگوی قنات‌پهنه برتری قابل ملاحظه دارد. البته، اجرایی شدن این الگو نیاز به برنامه‌ریزی مستمر و تلاش بسیار دارد. لازم است میزان آمادگی شرایط برای استقرار کارآمد مدیریت جمعی آب‌های زیرزمینی بررسی شود. همان‌طور که اشاره شدُ«اتخاذ رویکردهای مدیریت جمعی محلی»، بهترین گزینه برای مواجهه با منابع عمومی و مشترک، نظیر آب‌های زیرزمینی، است. منطق بنیادین این نظریه چنین است که بهره‌برداران آب زیرزمینی می‌توانند مسایل مربوط به تخلیه و اتمام منبع، تخریب منابع و تنزل کیفیت آن را تشخیص دهند. لذا در صورتی که بتوانند با همکاری کردن به مزایای چشمگیری در زمینه‌های دسترسی، پایداری، و یا کارآیی دست یابند، انگیزه باهم کارکردن را نیز خواهند داشت(نظری، ۱۴۰۰). به طور کلی، سوال این نیست که آیا قواعد و قوانین بالا به پایین و خدمات دولتی برای مدیریت موثر آب زیرزمینی کارآمدترند و یا قواعد از پایین به بالا و مدیریت جمعی محلی؟. چالش کلیدی برای تصمیم‌گیران این است که بدانند چگونه می‌توانند به بهترین شکل «فرآیندهای مهم یادگیری از پایین به بالا» را با «راهبردهای کلان و چشم اندازهای سیاستی از بالا به پایین»، تلفیق نمایند. تعدادی از کشورها (نظیر هلند، جمهوری چک، مجارستان، آفریقای جنوبی، استرالیا و تایلند) در حال آزمون و بررسی مداخلات و

نوآوری‌های نهادی در مدیریت منابع آب برای یافتن تعادلی بین فرآیندهای مشارکت پایین به بالا، تمرکز زدایی، و هماهنگی مرکزی هستند. وقتی که این فرآیندها به تعادل بیشتری برسند، نظام‌های حکمرانی آب می‌تواند به ظرفیت سازگاری و تطبیق بهتری دست یابند (Huntjens et al., 2011). سوال اول تقریباً سخت‌ترین سوال به نظر می‌رسد ولی در اغلب موارد جوامع محلی اطلاعات کافی برای تعریف مفهوم اجرایی از مرزهای منبع و ارتباط بین اقدامات و نتایج دارند. حتی هیدروژئولویست‌ها نیز در سوال تعیین مرز، با چالش روبرو هستند. بر اساس پژوهش‌های پیشین و تحلیل‌های انجام شده، ده معیار برای ارزیابی میزان تناسب مدیریت جمعی محلی با شرایط هر منطقه و تعیین امکان موفقیت، شناسایی شده است (جدول ۶).

جدول ٦- ده معیار و ده سوال در ارزیابی میزان آمادگی برای مدیریت جمعی و استقرار قنات پهنه‌های هوشمند

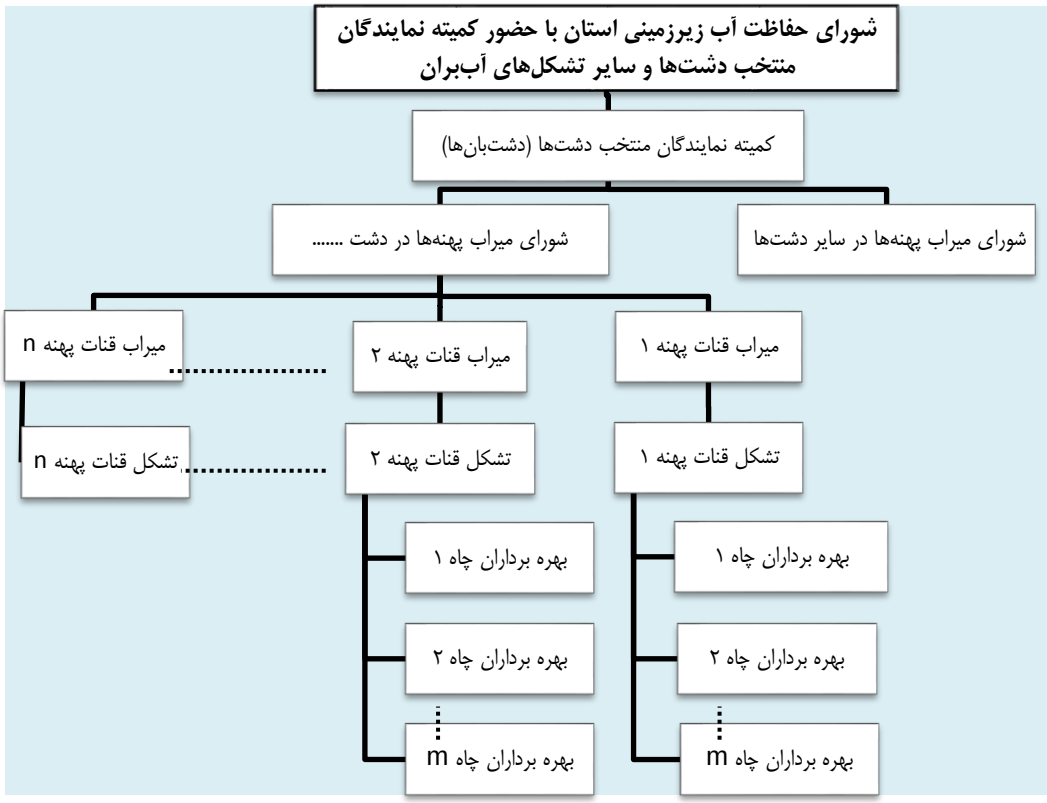
معیار	سوال کلیدی
توافق بر تعریف مرزهای منبع	آیا ذی‌نفعان دانش کافی برای تعیین مرز سیستم و مرتبط ساختن اقدامات به نتایج دارند؟
توافق بر دسترسی به آب	آیا ذی‌نفعان بر روی این که چه کسی و چگونه می‌تواند به منبع دسترسی یابد، توافق دارند؟
توزیع عادلانه مخاطرات، مزایا و هزینه‌ها	آیا مالکین بزرگ چاه‌ها برای همکاری با تصمیمات آماده‌اند؟
انتخاب جمعی	آیا تمام ذی‌نفعان کلیدی قدرت مشارکت در تصمیم‌گیری دارند؟
پایش و گزارش دهی	آیا ذی‌نفعان اعتماد کافی به اندازه‌گیری‌ها، گزارش‌دهی و تصمیماتی که با نتایج گرفته می‌شود، دارند؟
ضمانت اجرایی مصوبات	آیا ذی‌نفعان می‌توانند از ضمانت‌های مناسبی برای وادار کردن به پذیرش مصوبات، استفاده کنند؟
حل مناقشات	آیا تمام ذی‌نفعان بر روی مکانیسم قضاوت و رفع مشاجرات توافق دارند؟
به رسمیت شناخته شدن گروه	آیا چالش خارجی در مقابل حق ذی‌نفعان برای سازمان‌دهی شدن و اقدام کردن وجود دارد؟
فرآیندهای انعطاف‌پذیری و ظرفیت تطبیق	آیا ذی‌نفعان می‌توانند بر مبنای تجارب به دست آمده و یا با تغییر شرایط، خود را تطبیق دهند؟
ارتباط دادن به سایر نظام‌های حکمرانی	آیا ذی‌نفعان [در مناطقی که آبخوان بزرگ‌ترو پویاتر است] می‌توانند در سایر نظام‌های حکمرانی آب خود را جای دهند (انجمن‌های دیگر، ساختار استانی، حوضه آبریز و ..)

ساختار نظام بهره برداری و مدیریت آب در قنات پهنه

طبق ماده شش "ضوابط ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب" مصوب ۱۳۸۷، مقرر شده است که به‌منظور حفظ و حراست از منابع آب زیرزمینی در هر استان شورای «حفاظت از منابع آب زیرزمینی» به ریاست استاندار و با حضور مدیران و رؤسای دادگستری، جهاد کشاورزی، نفت، محیط زیست، آب و برق منطقه‌ای، فرماندهی نیروی انتظامی، رییس سازمان برنامه و بودجه و مدیرکل صنعت، معدن و تجارت استان تشکیل شود تا با مشارکت تشکل‌های آب‌بران، نسبت به اجرای ضوابط اجرایی حفظ و حراست از آب‌های زیرزمینی که توسط وزارت نیرو تهیه می‌شود، اقدام نماید. این ماده، هرچند مشارکت تشکل آب‌بران را مدنظر قرار داده است اما در شورای حفاظت از منابع آب زیرزمینی، جایگاهی برای این ذی‌نفعان در نظر گرفته نشده است. کما این‌که تجربه نشان داده است تا ذی‌نفعان اصلی آب در چرخه تصمیم‌گیری برای مدیریت آب فعال نباشند، سیاست‌ها و رویکردهای اتخاذ شده، پذیرش و اثربخشی لازم را نخواهند داشت. در ماده هفت ضوابط مذکور نیز وزارت نیرو موظف شده است، ترتیبی اتخاذ نماید تا با هماهنگی وزارت جهاد کشاورزی، بخشی از وظایف و مسئولیت‌های قابل واگذاری به بخش خصوصی مانند پایش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، اطلاع‌رسانی، نظرسنجی و آموزش ذی‌نفعان را مطابق قوانین و مقررات مربوطه و همراه با اختیارات لازم و اعتبارات مورد نیاز به تشکل‌های آب‌بران واگذار نماید. تاکنون، در انجام این وظایف قانونی، پیشرفتی صورت نگرفته است و کماکان، مدیریت دولتی بالا به پایین در حوزه‌ی آب‌های زیرزمینی حاکم است. تعداد چاه‌های آب در در ۶۰۴ محدوده مطالعاتی آب زیرزمینی در کشور، ۱۰۲۴۲۵۶ حلقه است. در محدوده‌های مطالعاتی ممنوعه بحرانی مانند کد ۴۱۳۳ (تهران و کرج) و کد ۴۱۰۶ (دشت قزوین)، به ترتیب ۴۷۲۸۸ و ۹۶۷۲ حلقه چاه وجود دارد. تنظیم‌گری و نظارت کارآمد بر این تعداد چاه در سطح ملی، در سطح استان و در سطح دشت‌های بزرگ با ساختار، توانمندی و ظرفیت‌های نهادهای دولتی به هیچ وجه همخوانی ندارد. تعداد محدود کارشناس آب در دستگاه‌های دولتی و به همراه چند شرکت پیمانکار هیچگاه نخواهد توانست بر این گستره وسیع نظارت و کنترل کافی داشته باشد و به همین دلیل واگذاری حکمرانی آبهای زیرزمینی به سطوح محلی مورد تأکید زیاد قرار می‌گیرد. با واگذاری اصولی مدیریت آب به سطوح خرد، و حمایت قانونی و فنی لازم، در یک دشت، ده‌ها هزار حقابه‌دار خود ناظر و حافظ منابع آب خواهند شد. البته نقش حمایتی بخش دولتی به ویژه برای تنظیم قوانین و مقررات و انسجام به رفتار سایر بازیگران همچنان حیاتی است. نظام مناسب برای مدیریت آب در قنات پهنه با تغییراتی در تشکل‌های آب‌بران موجود و حمایت و تقویت بیشتر از آنها قابل طرح‌ریزی است. شکل (۷)، ساختار

پیشنهادی برای نظام بهره‌برداری و حفاظت از آب زیرزمینی در الگوی قنات پهنه را نشان می‌دهد. توجه به موارد مطرح شده در جدول (۶) به همراه تحلیل شرایط آب‌شناسی، تقسیمات سیاسی و جغرافیایی، سوابق تاریخی حقابه‌ها در تعیین مرز و گستره بهینه قنات پهنه‌ها ضروری است. در وضعیت فعلی به دلیل پراکندگی چاه‌های آب کشاورزی، و تلقی هر چاه آب به عنوان یک دارایی کاملاً خصوصی، تنظیم‌گری مقررات و حفاظت از منابع آب زیرزمینی با دشواری و پیچیدگی بسیار مواجه شده است. اگر چه صدور پروانه بهره‌برداری مجزا برای هر چاه از منظر استقلال عمل بهره‌برداران آب مزایایی دارد، اما پایداری آب و سرزمین را با بن‌بست جدی مواجه ساخته است.

در الگوی قنات‌پهنه ضمن احترام به اسناد مالکیت و صیانت از حقوق حقابه‌داران، بستری نظام‌مند برای مشارکت و مدیریت جمعی از منبع مشترک آبخوان فراهم می‌شود. صدور پروانه‌های بهره‌برداری به صورت سهام پویا (درصد برداشت مجاز هر بهره‌بردار از کل برداشت مجاز قنات پهنه) نیز می‌تواند زمینه مدیریت جمعی و مشارکت همگانی در حفاظت از منابع آب زیرزمینی را بیشتر فراهم سازد. به این ترتیب با پایش اثرات خشکسالی و تغییر اقلیم، و تغذیه و برداشت آبهای زیرزمینی بر تراز و کیفیت آبخوان، کمیته منتخب شورای دشت‌ها و شورای حفاظت آب‌های زیرزمینی استان، میزان برداشت مجاز سالانه دشت و قنات‌پهنه‌ها را تعدیل و اصلاح خواهد نمود.



شکل ۷- ساختار پیشنهادی برای نظام بهره برداری و حفاظت از آب زیرزمینی در الگوی قنات پهنه

نتیجه‌گیری

قضاوت در مورد عملکرد یا اثربخشی سیستم حکمرانی آب، به دلایل مختلف، چالش‌برانگیز می‌باشد. نخست این که رصد تحقق اهداف مدنظر، معمولاً به دلیل فرایندهای اجتماعی و سیاسی که حکمرانی و مدیریت منابع آب را در بر گرفته‌اند، مبهم و نامشخص می‌شوند. دوم این که، برآمدهای ابزارهای مدیریتی به دلیل پیچیدگی سیستم تحت مدیریت و عدم قطعیت‌های توسعه محیطی و اجتماعی- اقتصادی (که بر عملکرد راهبردهای اجراشده، تأثیر می گذارد)، غیرقطعی است. بنابراین مهم است که پایش نظام‌های حکمرانی آب به مدت طولانی و به صورت متناوب، انجام شود. سوم این که، ممکن است معنا و مفهوم شاخص‌های موفقیت یا شکست، توسط گروه‌های مختلف، به صورت متفاوتی قضاوت و تفسیر شود. این موضوع منجر به ارزیابی‌های مختلف عملکرد نظام‌های حکمرانی آب می‌شود. یک روش قابل طرح، ارزیابی دستیابی به اهداف اعلام‌شده (به عنوان مثال اهداف توسعه‌ی هزاره‌ی مربوط به منابع آب و یا اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب)، از جمله تحقق

بهره‌وری اقتصادی، برابری اجتماعی و پایداری اکوسیستم است. معیارهای فرآیندی نیز در ارزیابی عملکرد مفید خواهد بود. معیارهایی نظیر دسترسی به منابعی مانند اطلاعات، تعریف شفاف وظایف، تصمیم‌گیری ساختارمند و اثربخش بودن هزینه‌ها را می‌توان در معیارهای فرآیندی نام برد. نظام‌های حکمرانی که تلاش می‌کنند گزینه‌های جدید را تعیین کنند، باید معیارهای دیگری را که مربوط به ترسیم چشم اندازها و بحث و تبادل نظر و مشورت است را نیز در نظر بگیرند (Dore, 2007).

بررسی تجارب مدیریت مشارکتی در کشور نیز نشان از اهمیت بسترهای قانونی و نهادی برای موفقیت این رویکرد داشته است. ارزیابی مدریتی مشارکتی دشت نیشابور بر اساس چارچوب حکمرانی ریسک نشان داده است که بسترهای قانونی و نهادی از اصلی ترین عوامل ناموفق بودن این تلاش ارزشمند بوده است (مرید و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین، باقری و همکاران (۱۴۰۰) نیز با رویکرد توصیفی، ناکارآمدی قوانین گذشته و لزوم بازتعریف روابط نهادی را مورد تأکید قرار داده اند. قربانیان کردآبادی و همکاران (۱۴۰۰) نیز علل شکست خط مشی‌های مدیریت مشارکتی را در غلبه‌ی شیوه حکمرانی «دستور و کنترل» بیان کرده اند.

در این نوشتار، بر اساس الگوی قنات، چارچوبی برای مدیریت چاه‌های آب زیرزمینی ارائه شد. طبق طرح ارائه شده، هر چند چاه کشاورزی در یک ناحیه هیدرولوژیکی به عنوان یک قنات‌پهنه هوشمند در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از فناوری‌های نوین پایش سطح و کیفیت آب و مدیریت مشارکتی تعریف شده، میزان برداشت پایدار و ایمن آب‌های زیرزمینی در آن پهنه مشخص و طبق آن برداشت از چاه‌های آب تعیین و نظارت می‌شود. ابعاد فنی، اجتماعی و محیط زیستی الگوی ارائه شده، مورد بحث قرار گرفته است. با بسترسازی حقوقی و فرهنگی، استفاده از قنات پهنه‌ها می‌تواند در تسکین تراژدی منابع مشترک و تنظیم‌گری آب‌های زیرزمینی گام مهمی باشد. پیاده‌سازی الگوی قنات پهنه به همراه استفاده از تجارب بین‌المللی در کاربست ابزارهای نوین مدیریت تقاضای آب نظیر «اعتبار آب» می‌تواند به تحقق پایداری منابع آب و بازتخصیص بهینه آب در شرایط کمبود شدید آب، کمک نماید. الگوی ارائه شده برای بهبود حکمرانی آب زیرزمینی در دشت‌های با چاه‌های آب پراکنده است و به هیچ عنوان بدیلی برای شاهکار مهندسی و فرهنگی قنات نمی‌باشد. لازم است ساختار «قنات پهنه‌ها» در مجامع علمی مورد بحث قرار گرفته و بر اساس ابعاد حکمرانی آب، مزایا و معایب، و فرصت‌ها و تهدیدهای محتمل مورد ارزیابی جامع‌تری قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود الگوی مطرح شده در دشت های پایلوت که زمینه اجتماعی و فنی بهتری دارند، ارزیابی شده و براساس تجارب حاصل از اجرا، به تکامل و اصلاح الگو اقدام نمود. بررسی موانع مدیریت مشارکتی منابع آب در مناطق مختلف کشور، اهمیت بالایی در امکان‌سنجی پیاده‌سازی الگوی قنات پهنه خواهد داشت.

منابع

ابراهیمی، ع. ۱۴۰۴. ارزیابی وضعیت حکمرانی آب در استان سمنان: در جستجوی سیاستگذاری موثر در سطح ملی. فصلنامه مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی. ۱۵ (۵۴).

باقری، ر. شیاتی، ع. احدی، پ. و اسمعیل زاد. ع. ۱۴۰۰. حکمرانی وسیاستگذاری در قبال بحران منابع آب در جمهوری اسلامی ایران. پژوهش های روابط بین الملل. ۱۱ (۱). ۲۴۹-۲۷۰ .

شرکت مدیریت منابع آب ایرا. ۱۳۹۹. بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی و حجم مخزن آبخوان‌های کشور (منتهی به سال آبی ۹۹-۱۳۹۸). دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب ایران.

قربانیان کرد آبادی، م. لیاقت، ع. و مالمیر، م. ۱۴۰۰. بررسی و تحلیل علل شکست سیاستهای مدیریت مشارکتی آب در ایران، سیاستگذاری عمومی. ۲۳ (۶). ۱۶۹-۱۹۰.

مرید، س، هشمی، ف. عرب، د و. رجبی هشجین، م.و. ۱۴۰۱. بسترها و فرآیندهای لازم در سازمان رسمی آب وزارت نیرو به منظور سازگاری با تغییر اقلیم. تحقیقات منابع آب ایران. سال هجدهم. شماره ۲. ۸۲-۹۷.

نظری، ۱۴۰۰. مدیریت ناپیدا، حکمرانی آبهای زیرزمینی. انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

Abadi, B., Sadeghfam, S., Ehsanitabar, A. and Nadiri, A. A. 2023. Investigating socio-economic and hydrological sustainability of ancient Qanat water systems in arid regions of central Iran. Groundwater for Sustainable Development. 23. 100988.

AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A. and Hassanzadeh, E. 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: Call for action. Journal of Great Lakes Research. 41(1): 307-311.

de Graaf, I. E., Gleeson, T., van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H. and Bierkens, M. F. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. Nature. 574(7776): 90-94.

Dore, J. 2007. Multi-stakeholder platforms (MSPS): unfulfilled potential. Pages 197-226 in L. Lebel, J. Dore, R. Daniel, and Y. Koma, editors. Democratizing water governance in the Mekong region. Mekong Press, Chiang Mai.

English, P. W. 2022. The origin and spread of qanats in the Old World. In Production and the Exploitation of Resources (pp. 273-284). Routledge.

FAO. 2016. Water withdrawal by sector, around 2010.

in Iran: An Overview. Water History. 10(1): 13–30.
Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. and Zschau, J. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters. 35(16).
OECD. 2018. Implementing the OECD Principles on Water Governance: Indicator Framework and Evolving Practices. OECD Publishing, Paris, France. http:// dx.doi.org/10.1787/9789264292659-en.
Ostrom, E. 1990. Governing the commons: The evolution of institutions for collective action. Cambridge University Press.
Ostrom, E., J. Burger, C.B. Field, R.B. and Norgaard and D. Policansky 1999. Revisiting the commons: Local lessons, global challenges. Science 284 278-28.
Papoli Yazdi, M. H. 1991. Le nomadisme dans le nord du Khorassan [Nomadism in Northern Khorasan]. Institut Français de Recherche en Iran.
Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K. and Rodell, M. 2015. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. Water Resources Research. 51(7): 5217-5238.
Schlager, E. 2007. Community Management of Groundwater in the Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development. M. Giordano and K.G. Villholth Ed.
Semsar Yazdi, A.A. and Labbaf Khaneiki, M. 2017. Qanat Knowledge: Construction and Maintenance. Springer.
Shah, T. 2009. Taming the anarchy: Groundwater governance in South Asia. Routledge.
UNDP, DFID, EU, and World Bank. 2009. Analysing governance and political economy in sectors Joint donor workshop, 5th – 6th November 2009, Workshop Report. Available from http://www.odi.org.uk/resources/docs/5713.pdf.
UNESCO. 2016. The Persian Qanat. World Heritage List. [https://whc.unesco.org/en/list/1506]
Wada, Y., van Beek, L. P., van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S., & Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. Geophysical Research Letters. 37(20).
World Bank. 2009. Groundwater Resource Accounting: Critical for Effective Management in a 'Changing World'. GWMate Briefing note Number 16. Washington, DC: World Bank.
World Bank. 2010. Deep wells and prudence: Towards pragmatic action for addressing groundwater overexploitation in India. World Bank.
Aquastat. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
FAO. 2021. The state of the world's land and water resources. United Nations.
Faunt, C. C., Sneed, M., Traum, J. and Brandt, J. T. 2016. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. Hydrogeology Journal. 24(3): 675-684.
Foltz, R.C. 2002. Iran's water crisis: Cultural, political, and ethical dimensions. Journal of Agricultural and Environmental Ethics. 15(4): 357–380.
Foster, S. and Chilton, P. J. 2003. Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences. 358(1440): 1957-1972.
Galloway, D. L., Jones, D. R. and Ingebritsen, S. E. (Eds.). 1999. Land subsidence in the United States (Vol. 1182). US Geological Survey.
Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. and van Beek, L. P. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature. 488(7410), 197-200.
Goblot, H. 1979. Les Qanats: Une technique d'acquisition de l'eau (E. J. Brill, Ed.).
Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P. and Allen, R. G. 2018. The paradox of irrigation efficiency. Science. 361(6404): 748-750.
GWP 2008, Toolbox for Integrated water resources management website, Available at http://www.gwptoolbox.org/index.php.
Hardin, G. 1968. The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. Science. 162(3859): 1243-1248.
Huntjens, P., Pahl-Wostl, C., Flachner, Z., Neto, S., Koskova, R., Schlueter, M., NabideKiti, I. and Dickens, C. 2011. Adaptive Water Management and Policy Learning in a Changing Climate. A formal comparative analysis of eight water management regimes in Europe, Asia, and Africa. Environmental Policy and Governance. 21(3): 145-163.
Jomehpour, M. 2009. Qanat Irrigation Systems as Important and Ingenious Agricultural Heritage: Case Study of the Qanats of Kashan, Iran. International Journal of Environmental Studies. 66(3): 297–315.
Konikow, L. F. 2011. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea level rise. Geophysical Research Letters. 38(17).
Lightfoot, D. R. 1996. Syrian Qanat Romani: History, Ecology, Abandonment. Journal of Arid Environments. 33(3): 321–336.
Manuel, M., Lightfoot, D. and Fattahi, M. 2018. The Sustainability of Ancient Water Control Techniques

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 731-745

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۷۴۶-۷۳۱

Smart Qanat Zones “Qanat-e-Pahneh”; a New Platform from Ancient Knowledge for Groundwater Governance

Bijan Nazari[1]

Recived: Aug.10, 2025 Accepted: Sep.28, 2025

Abstract

Qanat technology is one of the masterpieces of ancient engineering and an unparalleled legacy of Iranian civilization that has played a vital role in the formation and continuation of human life in the arid and semi-arid regions of the Iranian Plateau. In recent years, the status of groundwater in Iran and most arid and semi-arid countries of the world has undergone serious changes and severe quantitative and qualitative degradation due to well drilling and pumping technology. Groundwater governance faces many challenges due to the invisibility of these waters and the complexities of the social and economic factors affecting them. In this paper, a framework for groundwater well management is presented based on the Qanat model. According to the presented plan, water wells scattered in a hydrological zone or geographical area are considered as a **S**mart **Q**anat **Z**one. Using modern technologies for monitoring water level and quality and defined participatory management, the sustainable and safe groundwater withdrawal rate in that zone is determined and accordingly, withdrawal from water wells is determined and monitored. The technical, social and environmental dimensions of the presented model are discussed. With legal and cultural foundations, the use of Qanat zones can be an important step in alleviating the tragedy of common resources and regulating groundwater. Implementing pilot projects can be effective in reorganizing the exploitation and protection of groundwater from individual management to collective management.

Keywords: Platform, Smart Monitoring, Sustainability, Participation.

1- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran. and Member of the Future Studies Research Institute, Imam Khomeini International University
(binazari@ut.ac.ir)