کنکاشی در تبیین جایگاه و کاربرد فناوری در مدیریت منابع و مصارف آب در ایران

تابستان ۱۴۰۵

به سفارش

نشریه آب و توسعه پایدار و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

با همکاری

پژوهشکده آب و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد



گردآورندگان: محمد فشایی دانش‌آموخته دکترای علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مرجان قوچانیان دانش‌آموخته دکترای علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

سارا عطاران دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

شامل:

مقدمه

بخش اول: رهیافت های ملی و بین المللی در کاربرد فناوری ها در مدیریت عرضه و تقاضا و کاربرد آب و پساب

بخش دوم: نگاهی به جایگاه ایران در کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت آب

بخش سوم: دیدگاه خبرگان پیرامون کاربرد فناوری‌ها در مدیریت آب در ایران

بخش چهارم: نتیجه گیری

کنکاشی در تبیین جایگاه و کاربرد فناوری در مدیریت منابع و مصارف آب در ایران

محمد فشایی[1*]، مرجان قوچانیان[1]، سارا عطاران[2]

۱- دانش آموخته دکترای علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۲- دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
*رایانامه نویسنده مسئول: am.fashaee@gmail.com

مقدمه

در ادبیات معاصر مدیریت منابع آب، فناوری را نمی‌توان صرفاً مجموعه‌ای از تجهیزات، سامانه‌های اندازه‌گیری یا ابزارهای محاسباتی تلقی کرد. فناوری، در معنای مدیریتی و حکمرانی، ظرفیت یک نظام برای تبدیل دانش و داده به تصمیم‌های به موقع، قابل‌اتکا و قابل اجرا و سپس تبدیل نتایج تصمیم به یادگیری و اصلاح مستمر است. از این منظر، فناوری زمانی در مدیریت آب معنا پیدا می‌کند که بتواند کیفیت تصمیم‌گیری درباره منابع و مصارف آب را ارتقا دهد، عدم‌قطعیت را کاهش دهد، هزینه خطا را کنترل کند و امکان مقایسه و ارزیابی گزینه‌های مختلف را برای تصمیم‌گیران فراهم سازد. بنابراین مسئله اصلی در کاربرد فناوری‌های آب، صرفاً «چه فناوری‌ای در دسترس است؟» نیست؛ بلکه پرسش بنیادی‌تر این است که «کدام مسئله مدیریتی را، در چه مقیاس و با چه سازوکار تصمیم‌گیری، می‌توان به کمک فناوری بهتر حل کرد؟»

اهمیت این تمایز در مدیریت آب از آنجا ناشی می‌شود که آب یک منبع صرفاً فنی نیست، بلکه یک منبع محدود، متحرک، مشترک و چندکارکردی است که میان مصارف شرب، کشاورزی، صنعت، محیط‌زیست و سایر کارکردهای اجتماعی رقابت ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، هر تصمیم درباره برداشت، تخصیص، انتقال، ذخیره‌سازی یا مصرف آب، پیامدهایی فراتر از محل اجرای آن دارد و می‌تواند بر سایر کاربران، اکوسیستم‌ها، اقتصاد منطقه‌ای و پایداری بلندمدت منابع اثر بگذارد. ازاین‌رو، فناوری در مدیریت آب باید در خدمت حل مسئله تخصیص و مصرف باشد، نه اینکه خود به هدف سیاست‌گذاری تبدیل شود. یک سامانه پایش پیشرفته، یک مدل پیچیده یا یک شبکه هوشمند زمانی ارزش مدیریتی دارد که بتواند در یک زنجیره روشن از «داده ـ تحلیل ـ تصمیم ـ اقدام ـ ارزیابی» قرار گیرد و خروجی آن در تصمیم‌های واقعی منعکس شود.

در این چارچوب، **نخستین کارکرد فناوری، ارتقای کیفیت شناخت و کاهش عدم‌قطعیت در مورد منابع و مصارف آب است.** مدیریت آب بدون شناخت معتبر از بارش، رواناب، ذخایر سطحی و زیرزمینی، کیفیت منابع، برداشت‌ها، الگوی مصرف و تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها، ناگزیر بر برآوردهای ناقص و قضاوت‌های موردی متکی خواهد بود. فناوری‌های نوین می‌توانند با یکپارچه‌سازی داده‌های هیدرولوژیک، هواشناختی، کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی، تصویر منسجم‌تری از وضعیت حوضه ارائه کنند؛ اما ارزش واقعی این تحول در خودِ انباشت داده نیست. داده هنگامی به دارایی مدیریتی تبدیل می‌شود که از نظر صحت، سازگاری، مقیاس زمانی و مکانی، تداوم و قابلیت دسترسی استاندارد شده باشد و مسئولیت تولید، اعتبارسنجی، نگهداری و استفاده از آن نیز مشخص باشد. تجربه‌های بررسی شده از پایش آبخوان‌ها و محاسبه تراز منابع آب تا مدیریت شبکه‌های شهری نشان می‌دهد که گذار از داده‌های پراکنده به نظام اطلاعاتی یکپارچه، یکی از پایه‌های اصلی مدیریت تطبیقی آب است.

کارکرد دوم فناوری، بهبود کیفیت تصمیم‌سازی و امکان ارزیابی هم‌زمان گزینه‌های مدیریتی است. در یک نظام پیچیده آبی، تصمیم‌گیرنده با یک پاسخ قطعی و واحد مواجه نیست؛ بلکه میان سناریوهای مختلف تخصیص، محدودیت برداشت، تغییر الگوی مصرف، بازچرخانی، مدیریت تقاضا، کنترل سیلاب و سازگاری با خشکسالی انتخاب می‌کند. مدل‌سازی، شبیه‌سازی، روش‌های بهینه‌سازی و تحلیل‌های پیش‌بینانه در این سطح نه برای جایگزینی مدیر، بلکه برای افزایش ظرفیت استدلال مدیریتی به کار می‌روند. مزیت اصلی این رویکرد آن است که پیامدهای تصمیم‌های مختلف را پیش از اجرای واقعی مقایسه می‌کند و هزینه فرصت انتخاب‌ها را آشکار می‌سازد. در این معنا، هوش مصنوعی نیز زمانی برای مدیریت آب ارزشمند است که به یک مسئله مشخص تصمیم‌گیری متصل باشد؛ به‌عنوان‌مثال، پیش‌بینی رفتار آبخوان، تشخیص تغییرات غیرعادی در مصرف یا پشتیبانی از تصمیم‌های تخصیصی. مدل پیچیده‌ای که داده معتبر، مسئله تصمیم روشن و سازوکار استفاده از خروجی نداشته باشد، لزوماً فناوری مدیریتی مؤثری محسوب نمی‌شود.

سومین کارکرد فناوری، ایجاد امکان مدیریت تطبیقی و واکنش به‌موقع به تغییرات است. مدیریت سنتی آب بیشتر بر برنامه‌های ثابت، دوره‌های ارزیابی طولانی و تصمیم‌های مبتنی بر میانگین‌های تاریخی استوار بوده است؛ حال آنکه افزایش نوسان اقلیمی، تکرار خشکسالی‌ها، رخدادهای حدی و تغییر سریع الگوهای مصرف، نیازمند نظامی است که بتواند بر اساس اطلاعات جدید، تصمیم‌های خود را بازبینی کند. پایش برخط، هشدار زودهنگام، تحلیل روند و سناریونویسی به مدیر امکان می‌دهد که فاصله میان وقوع تغییر و واکنش مدیریتی را کاهش دهد. در مدیریت سیلاب، نمونه‌های مورد

بررسی نشان می‌دهد که فناوری می‌تواند زمان هشدار و کیفیت تصمیم را بهبود دهد؛ در مدیریت آب زیرزمینی نیز پایش مستمر می‌تواند از فاصله طولانی میان وقوع افت و شناسایی آن بکاهد. بااین حال، مدیریت تطبیقی زمانی شکل می‌گیرد که اختیار اصلاح تصمیم، قواعد واکنش و مسئولیت نهادی از پیش تعریف شده باشد؛ در غیر این صورت، پایش مستمر صرفاً به تولید اطلاعات بیشتر منجر خواهد شد.

چهارمین کارکرد فناوری، افزایش بهره‌وری و عقلانیت در سمت تقاضای آب است. در کشاورزی، فناوری‌های نوین آبیاری، سنجش وضعیت خاک و گیاه، مدیریت مزرعه و روش‌های تولید کنترل شده می‌توانند تصمیم‌گیری درباره زمان، مقدار و محل مصرف آب را دقیق‌تر کنند؛ اما کاهش مصرف در سطح مزرعه الزاماً به معنای کاهش برداشت در مقیاس حوضه نیست. اگر آب صرفه‌جویی شده در نتیجه افزایش بهره‌وری مجدداً به توسعه سطح زیرکشت یا افزایش برداشت اختصاص یابد، ممکن است اثر مورد انتظار بر تراز منابع آب تحقق پیدا نکند. بنابراین فناوری‌های افزایش بهره‌وری باید در چارچوب حسابداری آب، سقف برداشت، الگوی کشت و قواعد تخصیص در مقیاس حوضه‌ای قرار گیرد. همین منطق در بازچرخانی پساب، نمک‌زدایی و کاهش هدررفت شبکه‌های شهری نیز صادق است: افزایش عرضه یا کاهش تلفات، زمانی به پایداری منابع کمک می‌کند که جایگاه آن در تراز آب و نظام تخصیص مشخص باشد. به بیان دیگر، فناوری باید با «مدیریت مصرف» و «تنظیم برداشت» پیوند بخورد، نه اینکه صرفاً به افزایش کارایی فنی یک فرایند محدود شود.

پنجمین کارکرد فناوری، تقویت حکمرانی آب از طریق افزایش شفافیت، پاسخگویی و قابلیت ارزیابی است. حکمرانی آب زمانی کارآمد است که مشخص باشد چه کسی تصمیم می‌گیرد، بر مبنای چه داده‌ای تصمیم می‌گیرد، مسئولیت اجرای تصمیم با چه نهادی است و عملکرد چگونه سنجیده می‌شود. نظام‌های فناورانه می‌توانند امکان ردیابی برداشت‌ها، ثبت تصمیم‌ها، پایش عملکرد، انتشار اطلاعات و مقایسه شاخص‌های عملکرد را فراهم کنند و از این طریق زمینه را برای کاهش تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای و افزایش پاسخگویی فراهم آورند. از سوی دیگر، تمرکز شدید داده و تصمیم در یک سطح مرکزی می‌تواند حتی با وجود فناوری‌های پیشرفته، انعطاف‌پذیری مدیریت محلی را کاهش دهد. بنابراین فناوری باید هم‌زمان با بازطراحی فرایندهای سازمانی، تفویض اختیار، تعریف مسئولیت‌ها و سازوکارهای نظارت عمومی و تخصصی توسعه یابد. تجربه‌های بین‌المللی نیز نشان می‌دهد موفقیت فناوری در بسیاری از موارد نتیجه یک بسته نهادی شامل قانون، تنظیم‌گری، مشوق اقتصادی، داده معتبر و ظرفیت اجرایی بوده است؛ نه نتیجه ورود یک ابزار منفرد.

این ملاحظات برای ایران اهمیت مضاعف دارد. ساختار منابع آب کشور، وابستگی قابل‌توجه به آبخوان‌ها، نابرابری مکانی و زمانی بارش، توسعه نامتوازن مصارف، فرسودگی بخشی از زیرساخت‌ها و تشدید فشارهای اقلیمی، مدیریت آب را به مسئله‌ای چندمقیاسی و میان‌بخشی تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، تداوم رویکرد عرضه‌محور و اتکای بیش از حد به پروژه‌های تأمین آب، بدون تقویت سازوکارهای مدیریت تقاضا، تخصیص و حفاظت، ظرفیت فناوری را نیز محدود می‌کند. ایران از نظر دانش تخصصی، نیروی انسانی و تجربه به‌کارگیری بسیاری از فناوری‌های نوین در وضعیت فاقد ظرفیت نیست؛ بلکه مسئله مهم‌تر، نحوه قرار گرفتن این ظرفیت‌ها در ساختار تصمیم‌گیری و حکمرانی آب است. پراکندگی داده‌ها، ضعف هماهنگی میان نهادهای متولی، فاصله میان دانشگاه و عرصه اجرا، مقررات و فرایندهای اداری نامتناسب با نوآوری، محدودیت‌های ارتباطی و اقتصادی و نیز ضعف سازوکارهای انگیزشی، همگی می‌توانند ارزش مدیریتی فناوری را کاهش دهند.

از این منظر، فناوری در حکمرانی آب ایران باید به‌عنوان یک «ظرفیت نهادی برای خردورزی» بازتعریف شود. خردورزی فناورانه به معنای انتخاب سنجیده ابزارها بر اساس مسئله، مقیاس، هزینه فرصت، پیامدهای اجتماعی و محیط‌زیستی و قابلیت اجرایی است؛ نه مسابقه برای دستیابی به جدیدترین تجهیزات یا سامانه‌ها. در حوزه منابع آب زیرزمینی، اولویت باید ایجاد زنجیره‌ای معتبر از پایش، برآورد برداشت از آبخوان، محاسبه تراز سطح آب، تعیین سقف بهره‌برداری، اعمال قواعد و ارزیابی پیامد باشد. در کشاورزی، فناوری باید به الگوی کشت، اقتصاد تولید، حقوق آب و اهداف حوضه پیوند بخورد. در شهرها، مدیریت هوشمند شبکه باید در خدمت کاهش هدررفت، تنظیم فشار، مدیریت تقاضا و افزایش تاب‌آوری باشد. در مدیریت سیلاب نیز فناوری باید در کنار رویکردهای سازگار با طبیعت، برنامه‌ریزی فضایی و نظام هشدار و آمادگی قرار گیرد. بنابراین معیار موفقیت فناوری، تعداد سامانه‌های نصب شده یا حجم سرمایه‌گذاری فناورانه نیست؛ بلکه میزان بهبود قابل‌اندازه‌گیری در کیفیت تصمیم، بهره‌وری واقعی آب، کاهش ریسک، حفاظت از منابع و پاسخگویی نهادی است.

بر این اساس، فناوری صرفا یک کالا یا خدمت قابل خرید نیست بلکه سازوکارهایی است که نتایج حاصل از برونداد سخت افزاری را به تصمیم مدیریتی مؤثر تبدیل می‌کند. نمونه‌هایی مانند پایش هوشمند آبخوان‌ها، مدیریت داده‌محور آبیاری، بازارهای آب، مدیریت سیلاب با رویکرد سازگار با طبیعت، بازچرخانی پیشرفته آب و شبکه‌های هوشمند شهری، هر یک زمانی موفق بوده‌اند که فناوری با قواعد تخصیص، تنظیم‌گری، انگیزه‌های اقتصادی، مسئولیت‌پذیری نهادی و مشارکت ذی‌نفعان همراه شده است. از این منظر، مهمترین درس برای ایران آن است که تحول فناورانه آب، پیش از آنکه یک پروژه تجهیزاتی باشد، یک پروژه حکمرانی است؛ پروژه‌ای که باید از سطح تعریف مسئله و تولید داده تا سیاست‌گذاری، اجرا، ارزیابی و اصلاح مستمر تصمیم امتداد یابد.

در همین چارچوب، «راهنمای جامع توانمندسازی مدیران آبیاری در مدیریت آب با فناوری‌های نوین» که توسط Zemadim و همکاران (۲۰۲۶) در مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI) و با همکاری FAO تهیه شده است، یک نکته مهم را از منظر مدیریتی برجسته می‌کند: عملکرد فناوری‌های نوین آبیاری را نمی‌توان صرفاً از روی مشخصات فنی تجهیزات یا میزان سرمایه‌گذاری سنجید. این راهنما، ضعف عملکرد بسیاری از سامانه‌های آبیاری را در کنار محدودیت‌های فنی، به ضعف بهره‌برداری و نگهداری، کمبود ظرفیت انسانی و کاستی‌های حکمرانی نهادی مرتبط می‌داند. از این منظر، گذار از «تحویل زیرساخت» به «مدیریت عملکردمحور و ظرفیت‌محور» یکی از شروط اصلی بهره‌گیری پایدار از فناوری است (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

اهمیت این دیدگاه برای بحث فناوری در مدیریت آب آن است که مرز میان «فناوری به‌عنوان ابزار» و «فناوری به‌عنوان ظرفیت مدیریتی» را روشن می‌کند. در راهنمای IWMI، فناوری زمانی می‌تواند در خدمت مدیریت قرار گیرد که همزمان با ارتقای دانش و مهارت مدیران، رویه‌های عملیاتی، ساختارهای نهادی، تأمین مالی، سازوکارهای مشارکت و نظام‌های یادگیری نیز تقویت شوند. حتی در مورد فناوری‌های دیجیتال و داده‌محور، مسئله فقط دسترسی به حسگر، سامانه ارتباطی یا نرم‌افزار نیست؛ توانایی تفسیر داده، تبدیل آن به تصمیم، پایش نتیجه و اصلاح رویه نیز بخشی از ظرفیت فناورانه محسوب می‌شود (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

راهنمای مذکور همچنین بر یک اصل قابل تعمیم در مدیریت آب تأکید دارد: هیچ فناوری واحدی را نمی‌توان مستقل از زمینه بوم‌شناختی، هیدرولوژیک، اقتصادی و نهادی، به‌عنوان گزینه برتر برای همه شرایط در نظر گرفت. انتخاب فناوری باید بر اساس مسئله، مقیاس، منبع آب، شرایط اقلیمی و خاک، نوع محصول، دسترسی به انرژی، ظرفیت مدیریتی و امکان تأمین مالی انجام شود. بنابراین، «نوین‌تر بودن» یک فناوری به‌خودی‌خود معیار مناسبی برای انتخاب آن نیست؛ تناسب فناوری با مسئله و ظرفیت بهره‌برداری از آن اهمیت بنیادی دارد (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

این منطق با رویکرد اصلی این گزارش هم‌راستا است. در مدیریت منابع آب، مسئله صرفاً یافتن فناوری کارآمد نیست، بلکه طراحی زنجیره‌ای است که در آن مسئله مدیریتی به داده معتبر، تحلیل مناسب، تصمیم قابل اجرا، اقدام و سپس ارزیابی و یادگیری متصل شود. به همین دلیل، بررسی فناوری‌های نوین باید همزمان سه سطح را دربرگیرد: سطح فنی و داده‌ای، سطح سازمانی و انسانی، و سطح سیاستی و حکمرانی. تجربه‌های بررسی شده در این گزارش و شواهد ارائه‌شده در راهنمای IWMI نشان می‌دهند که گسست میان این سطوح می‌تواند حتی فناوری‌های پیشرفته را به پروژه‌هایی کم‌اثر یا ناپایدار تبدیل کند.

باتوجه‌به آنچه بیان شد، مسئله اصلی این گزارش، چگونگی بهره‌گیری اثربخش از فناوری در مدیریت منابع و مصارف آب و الزامات فنی، مدیریتی و نهادی تحقق آن در ایران است. با وجود توسعه فناوری‌های نوین در حوزه آب و گسترش تجربه‌های کاربردی در کشورهای مختلف، همچنان فاصله‌ای میان ظرفیت‌های فنی این فناوری‌ها و به‌کارگیری مؤثر آن‌ها در فرایندهای تصمیم‌گیری و مدیریت آب وجود دارد. در ایران نیز، با وجود برخورداری از دانش تخصصی و تجربه‌های اجرایی در برخی حوزه‌های فناورانه، چالش‌هایی مانند پراکندگی داده‌ها، ضعف هماهنگی نهادی و محدودیت ارتباط میان پژوهش و عرصه اجرا، بهره‌گیری از این ظرفیت‌ها را با دشواری مواجه کرده است. ازاین‌رو، هدف گزارش حاضر، تبیین جایگاه و کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت منابع و مصارف آب، بررسی نمونه‌های کاربردی در ایران و سایر کشورها و شناسایی فرصت‌ها و موانع بهره‌گیری از این فناوری‌ها است. برای دستیابی به این هدف، گزارش با رویکردی توصیفی ـ تحلیلی، ضمن مرور منابع و تجربه‌های منتخب داخلی و بین‌المللی، کاربرد فناوری‌ها را در حوزه‌های مختلف مدیریت آب بررسی می‌کند و از دیدگاه‌های خبرگان مرتبط با بخش آب، کشاورزی و فناوری اطلاعات، از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته، بهره می‌گیرد. در نهایت، تلاش می‌شود با تلفیق شواهد و دیدگاه‌های تخصصی، تصویری از ظرفیت‌ها، محدودیت‌ها و الزامات توسعه و به‌کارگیری فناوری در مدیریت آب ایران ارائه شود.

توجه: با وجود آنکه هدف نهایی این مجموعه، بررسی نقش فناوری در ارتقای حکمرانی آب و تبیین الزامات مدیریتی، نهادی و سیاست‌گذاری بهره‌گیری اثربخش از فناوری در مدیریت منابع و مصارف آب است، در شماره حاضر تمرکز اصلی بر شناخت و مرور جنبه‌های کاربردی فناوری، نمونه‌های سخت‌افزاری و راهکارهای فناورانه در مقیاس‌های مختلف، به‌ویژه در سطح مزرعه، شبکه و بهره‌برداری، قرار گرفته است. این رویکرد از یک‌سو امکان ارائه تصویری عینی‌تر از وضعیت موجود فناوری‌های آبی در ایران و سایر کشورها و از سوی دیگر بهره‌گیری از دیدگاه‌های خبرگان درباره تجربه‌های عملی و موانع کاربرد فناوری را فراهم می‌کند. محدود ماندن بحث حکمرانی و مدیریت در این شماره، صرفاً یک انتخاب ساختاری نیست؛ بلکه تا حد زیادی ناشی از آن است که در ایران، تجربه‌های مستند، مطالعات نظام‌مند و الگوهای اجرایی تثبیت شده درباره پیوند فناوری با سطوح مدیریتی، نهادی و سیاست‌گذاری آب هنوز محدود است و بخش قابل توجهی از تجربه‌های موجود نیز در قالب پروژه‌های موردی و پراکنده باقی مانده‌اند. ازاین‌رو، ورود گسترده به این سطح، بدون برخورداری از پشتوانه تجربی و داده‌های کافی، می‌تواند بحث را از تحلیل مبتنی بر شواهد به سوی گزاره‌های کلی و انتزاعی سوق دهد. با این حال، اثربخشی فناوری‌ها در نهایت نه صرفاً به قابلیت فنی تجهیزات، بلکه به کیفیت تصمیم‌گیری، ساختارهای نهادی، سازوکارهای تخصیص و

تنظیم‌گری، نظام داده و اطلاعات، ظرفیت‌های انسانی و نحوه پیوند فناوری با نظام حکمرانی آب وابسته است. ازاین‌رو، بررسی عمیق‌تر این ابعاد و واکاوی فناوری از زوایای مدیریتی، سیاست‌گذاری، نهادی و حکمرانی، با اتکا به تجارب و شواهد قابل استناد، به‌عنوان محورهای مکمل در شماره‌های آتی این مجموعه دنبال خواهد شد.

بخش اول: رهیافت‌های ملی و بین‌المللی در کاربرد فناوری‌ها در مدیریت عرضه و تقاضا و کاربرد آب و پساب

فناوری‌های نوین در کشاورزی و آبیاری

۱. آبیاری هوشیار مبتنی بر حسگر Smart Irrigation Sensors

با رشد جمعیت، افزایش تقاضای غذایی و تشدید ناپایداری‌های اقلیمی، مدیریت کارآمد آب در کشاورزی به یک ضرورت جهانی تبدیل شده است. مروری بر پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد گذار از آبیاری سنتی به سامانه‌های هوشیار مبتنی بر حسگر، نقش مهمی در ارتقای بهره‌وری آب، کاهش تلفات و بهبود عملکرد محصول دارد. این فناوری‌ها با اتکا به داده‌های لحظه‌ای خاک، گیاه و هوا، امکان تصمیم‌گیری دقیق و پایدار را فراهم می‌کنند. "نمونه‌های بین‌المللی این بخش بر اساس ارتباط فناوری با مسائل مدیریت آب، وجود تجربه‌های اجرایی مستند و قابلیت استخراج درس‌های مدیریتی برای شرایط ایران انتخاب شده‌اند".

۱٫۱. اسپانیا: اسپانیا به عنوان یکی از پیشگامان مدیریت آب در بخش کشاورزی در اروپا، گذار به سمت کشاورزی هوشیار (Smart Farming) را به عنوان راهبردی کلیدی برای مقابله با تنش‌های هیدرولیکی برگزیده است. دولت اسپانیا از طریق طرح‌هایی مانند PERTE Agroalimentario (برنامه بازیابی و تحول اقتصادی)، بودجه‌های دولتی قابل‌توجهی را برای دیجیتالی کردن بخش کشاورزی اختصاص داده است که نشان‌دهنده نقش حاکمیت در تسهیل نفوذ فناوری‌های نوین است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، به‌کارگیری حسگرهای رطوبت خاک و ایستگاه‌های هواشناسی متصل به اینترنت اشیاء (IoT) در این کشور، امکان پایش لحظه‌ای تبخیر، تعرق و نیاز آبی گیاه را فراهم آورده است (Agroinvest Spain، ۲۰۲۴).

خلاصه‌ای از دستاوردهای عملیاتی این فناوری در تجربه اسپانیا عبارت است از:

در یک مطالعه میدانی در شرق اسپانیا، استفاده از راهبرد زمان‌بندی آبیاری مبتنی بر داده‌های حسگرهای رطوبت خاک در باغ مرکبات، موجب کاهش ۲۶ درصدی حجم آب آبیاری نسبت به روش مرجع FAO-56 شد؛ این کاهش بدون تفاوت معنادار در عملکرد محصول حاصل شد و بهره‌وری آب را نیز ۳۳ درصد افزایش داد (Martínez-Gimeno، ۲۰۲۰).

مدیریت داده‌محور: (Data-Driven) استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های دریافتی از حسگرها، اجازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی آبیاری نه بر اساس تقویم ثابت، بلکه بر اساس تقاضای واقعی اتمسفر و خاک انجام شود.

۲٫۱. آمریکا: در ایالات متحده آمریکا، فشارهای ناشی از خشکسالی‌های مکرر، بهای بالای آب و نیاز به کاهش اتلاف در بخش کشاورزی و فضای سبز، زمینه‌ساز گسترش سامانه‌های آبیاری هوشیار شده است. مروری بر پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد آمریکا یکی از پیشگامان توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های مبتنی بر حسگر، اینترنت اشیا و کنترل خودکار در آبیاری است؛ به‌گونه‌ای که این فناوری‌ها در چارچوب «کشاورزی دقیق» و با هدف افزایش بهره‌وری آب و کاهش اثرات محیط‌زیستی ترویج می‌شوند (Ali و همکاران، ۲۰۲۵). در بخش فضای سبز شهری و تجاری نیز نمونه‌های مستند نشان می‌دهد استفاده از سامانه‌های هوشیار می‌تواند کاهش چشمگیری در مصرف آب ایجاد کند؛ به‌عنوان‌مثال، یک مجتمع مسکونی چندخانواری در آمریکای شمالی با اجرای برنامه بازتوانی سیستم آبیاری و نصب حسگرهای هوشیار، توانست ۴۳ درصد کاهش در مصرف آب فضای سبز ثبت کند (Husqvarna، ۲۰۲۴). در یکی از مطالعات موردی، یک بانک بزرگ آمریکایی با استفاده از سامانه هوشمند آبیاری ETwater و بدون نیاز به تغییر یا تعویض زیرساخت‌های موجود، توانست مصرف آب محوطه‌سازی خود را تا ۵۰ درصد کاهش دهد (Husqvarna، ۲۰۲۴). این نمونه‌ها نشان می‌دهد در آمریکا، انتخاب فناوری آبیاری هوشمند نه‌تنها پاسخی به بحران کم‌آبی و هزینه‌های اقتصادی است، بلکه در چارچوب سیاست‌های کلان کشاورزی دیجیتال و مدیریت پایدار منابع آب نیز قرار می‌گیرد.

۳٫۱. استرالیا: استرالیا به‌عنوان یکی از خشک‌ترین قاره‌های جهان، سال‌ها با خشکسالی‌های شدید و نوسانات اقلیمی روبه‌رو است؛ به همین دلیل، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری هوشمند در سیاست‌های ملی این کشور جایگاه ویژه‌ای یافته است. برنامه‌های دولتی مانند Climate-Smart Agriculture Program با هدف افزایش تاب‌آوری کشاورزی و کاهش مصرف آب، کشاورزان را به استفاده از حسگرهای رطوبت خاک، سامانه‌های IoT و ابزارهای پایش لحظه‌ای تشویق می‌کنند (DAFF، ۲۰۲۴). همچنین پروژه‌های تحقیقاتی CSIRO نشان می‌دهد ابزارهایی مانند Chameleon Sensor و داشبوردهای هوشمند مدیریت آب، امکان تصمیم‌گیری دقیق و کاهش مصرف آب را برای کشاورزان فراهم کرده‌اند (CSIRO، ۲۰۲۱). این سیاست‌ها و فناوری‌ها در مجموع پاسخی مستقیم به بحران کم‌آبی و نیاز به افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی استرالیا است.

۲. گلخانه‌های کم‌مصرف

گلخانه‌های کم‌مصرف به‌عنوان یکی از مهمترین نوآوری‌ها برای تولید پایدار در مناطق خشک مطرح شده‌اند. این فناوری‌ها با کاهش چشمگیر مصرف آب، کنترل دقیق اقلیم و افزایش بهره‌وری، به کشورهایی که با کمبود منابع آب روبه‌رو هستند کمک می‌کنند تا امنیت غذایی خود را تقویت کرده و وابستگی به کشاورزی سنتی را کاهش دهند.

۲٫۱. عمان: عمان یکی از کشورهای خشک خاورمیانه است و با محدودیت شدید منابع آب شیرین روبه‌رو است؛ به همین دلیل، توسعه فناوری‌های گلخانه‌ای کم‌مصرف و به‌ویژه «گلخانه آب‌شور» به‌عنوان یک راهبرد ملی برای افزایش امنیت غذایی و کاهش وابستگی به آب شیرین مطرح شده است. پژوهش‌های دانشگاه سلطان قابوس نشان می‌دهد گلخانه آب‌شور با استفاده از تبخیر و تقطیر خورشیدی، امکان تولید آب شیرین و ایجاد یک ریزاقلیم خنک را فراهم می‌کند و مصرف آب کشاورزی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Al-Ismaili و Jayasuriya، ۲۰۱۶). این فناوری به‌ویژه در مناطق ساحلی عمان که دسترسی به آب دریا آسان است، نتایج موفقی در تولید سبزیجات و گیاهان مقاوم به شوری داشته است. علاوه‌براین، پروژه‌های جدید مانند Jinan Tech Project با حمایت وزارت انرژی و معادن و شرکت‌های نفتی، گلخانه‌های کنترل شده (CEA) را برای افزایش بهره‌وری آب و انرژی توسعه داده‌اند (Hortidaily، ۲۰۲۴). این اقدامات در چارچوب سیاست‌های ملی عمان برای افزایش خودکفایی غذایی و مدیریت پایدار منابع آب انجام می‌شود.

۲٫۲. امارات متحده عربی: امارات به دلیل اقلیم بسیار گرم و کمبود شدید منابع آب، یکی از پیشگامان خاورمیانه و دنیا در توسعه گلخانه‌های کم‌مصرف و سامانه‌های کشاورزی کنترل شده است. سیاست‌های کلان این کشور، مانند UAE Water Security Strategy 2036، بر کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری و توسعه فناوری‌های نوین کشاورزی تأکید دارند (UAE Government، ۲۰۲۴). در سال‌های اخیر، پروژه‌هایی مانند AgTech Park در KEZAD با سرمایه‌گذاری ADQ[Error! Reference source not found.]، گلخانه‌های پیشرفته‌ای ایجاد کرده‌اند که از سیستم‌های سرمایش کارآمد، کنترل اقلیم، و آبیاری هوشمند برای کاهش مصرف آب و افزایش تولید سالانه استفاده می‌کنند (AgriNext، ۲۰۲۵). این گلخانه‌ها قادر هستند در شرایط دمایی بسیار بالا، محصولات حساس مانند گوجه‌فرنگی و خیار را با مصرف آب بسیار کمتر نسبت به کشاورزی سنتی تولید کنند

همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال و سامانه‌های هوشمند در گلخانه‌های امارات، از جمله اینترنت اشیا(IoT)، حسگرهای محیطی و سامانه‌های کنترل خودکار، امکان پایش مستمر شرایط کشت و مدیریت دقیق‌تر آب و انرژی را فراهم کرده است. برای نمونه، مرکز نوآوری و تحقیق و توسعه کشاورزی Silal در ابوظبی، با بهره‌گیری از حسگرهای اینترنت اشیا، حسگرهای رطوبت خاک، ایستگاه‌های هواشناسی و سامانه‌های آبیاری خودکار، زیرساخت لازم برای پایش و تحلیل شرایط محیطی و مدیریت هوشمند کشت را فراهم کرده است (Silal، ۲۰۲۳). همچنین، مجموعه گلخانه‌ای Armela Farms در ابوظبی با بهره‌گیری از گلخانه نیمه‌بسته، سامانه‌های هیدروپونیک و فناوری‌های کنترل خودکار اقلیم، نمونه‌ای از به‌کارگیری فناوری‌های یکپارچه در تولید محصولات کشاورزی در شرایط اقلیمی خشک به شمار می‌رود (Ludvig Svensson، ۲۰۲۴).

همچنین، توسعه فناوری‌های کشاورزی پیشرفته در امارات متحده عربی در چارچوب راهبرد ملی امنیت غذایی این کشور دنبال می‌شود. راهبرد امنیت غذایی ۲۰۵۱ بر تقویت تولید داخلی از طریق فناوری‌های نوین، توسعه روش‌های کشاورزی پایدار و متنوع‌سازی منابع تأمین مواد غذایی تأکید دارد. در همین راستا، پروژه‌هایی مانند مزرعه عمودی Bustanica و گلخانه پیشرفته AgTech Park در منطقه اقتصادی KEZAD، نمونه‌هایی از به‌کارگیری فناوری‌های کشاورزی در محیط کنترل شده هستند. بر اساس گزارش وزارت تغییرات اقلیمی و محیط‌زیست امارات، مزرعه عمودی Bustanica با استفاده از شرایط بهینه کشت، تا ۹۵ درصد آب کمتری نسبت به روش‌های متعارف مورد مقایسه مصرف می‌کند. همچنین، گلخانه AgTech Park با بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل اقلیم و سرمایش کارآمد، با هدف کاهش ردپای آب و کربن و توسعه تولید محصولات کشاورزی در تمام طول سال طراحی شده است (UAE Ministry of Climate Change and Environment، ۲۰۲۳؛ Abu Dhabi Media Office، ۲۰۲۳؛ UAE Government، ۲۰۲۴)

۳. آبیاری زیرسطحی با کنترل فشار (Subsurface Drip Irrigation)

آبیاری زیرسطحی با کنترل فشار یکی از کارآمدترین فناوری‌های نوین آبیاری است که با انتقال مستقیم آب به ناحیه ریشه، تلفات تبخیر را به حداقل می‌رساند و یکنواختی توزیع آب را افزایش می‌دهد. این روش به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که مدیریت دقیق منابع آب ضروری است، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب، بهبود عملکرد محصول و کاهش فشار بر منابع زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است.

۱٫۳. ایالات متحده آمریکا: آمریکا یکی از پیشگامان توسعه و کاربرد آبیاری زیرسطحی با کنترل فشار (SDI) است. این امکان به‌ویژه در ایالت‌هایی مانند کانزاس، تگزاس و کالیفرنیا که با کمبود شدید آب و فشار بر منابع زیرزمینی مواجه‌اند وجود دارد. دلیل اصلی گرایش آمریکا به این فناوری، نیاز به افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی و کاهش تلفات تبخیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. پژوهش‌های دانشگاه کانزاس نشان می‌دهد استفاده از SDI می‌تواند مصرف آب را ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده و عملکرد محصولاتی مانند ذرت و یونجه را افزایش دهد (Lamm و Trooien، ۲۰۰۳). همچنین، کنترل فشار در این سامانه‌ها باعث توزیع یکنواخت آب و جلوگیری از گرفتگی لوله‌ها می‌شود. در سطح

سیاست‌گذاری، برنامه‌هایی مانند USDA EQIP[۲] کشاورزان را برای استفاده از سامانه‌های آبیاری کارآمد، از جمله SDI، حمایت مالی می‌کند (USDA، ۲۰۲۲).

۲٫۳. استرالیا: استرالیا به‌دلیل اقلیم بسیار خشک و فشار شدید بر منابع آب، یکی از کشورهایی است که به‌طور گسترده از آبیاری زیرسطحی با کنترل فشار استفاده می‌کند. در مناطق کشاورزی ایالت ویکتوریا و نیو ساوت ولز، این فناوری به‌عنوان راهکاری برای کاهش تبخیر، افزایش کارایی آبیاری و بهبود کیفیت خاک معرفی شده است. مطالعات سازمان CSIRO[۳] Error! Reference source not found. نشان می‌دهد SDI در مزارع پنبه و سبزیجات می‌تواند مصرف آب را تا ۴۰ درصد کاهش داده و هم‌زمان عملکرد محصول را افزایش دهد (Montagu و همکاران، ۲۰۰۶). دلیل انتخاب این فناوری در استرالیا، نیاز به سازگاری با خشکسالی‌های مکرر و کاهش برداشت از سفره‌های زیرزمینی است. از نظر سیاستی، برنامه‌های ملی مانند Water for the Future و National Water Initiative کشاورزان را به استفاده از فناوری‌های آبیاری کارآمد، از جمله SDI، تشویق می‌کنند و برای اجرای آن کمک‌هزینه ارائه می‌دهند (Australian Government، ۲۰۱۰). این سیاست‌ها نشان می‌دهد SDI در استرالیا بخشی از یک راهبرد کلان برای افزایش بهره‌وری آب و تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییر اقلیم است.

۴. کشاورزی عمودی Vertical Farming

۱٫۴. ژاپن: ژاپن یکی از نخستین کشورهایی است که کشاورزی عمودی را به‌عنوان پاسخی به چالش‌های ساختاری بخش کشاورزی خود (از جمله کمبود زمین، جمعیت رو به کاهش کشاورزان و نیاز به تولید پایدار) به‌کار گرفته است. شرکت‌هایی مانند Spread با توسعه کارخانه‌های گیاهی تمام‌اتوماتیک، توانسته‌اند هزینه تولید را کاهش داده و پایداری سیستم را افزایش دهند (Indoor Farmer، ۲۰۲۴). نتایج این سیستم‌ها شامل تولید یکنواخت، کاهش مصرف آب تا ۹۸٪ و کاهش وابستگی به شرایط اقلیمی است. از نظر سیاستی، دولت ژاپن از طریق Japan Plant Factory Association (JPFA) و برنامه‌های نوآوری کشاورزی، حمایت مالی و تحقیقاتی گسترده‌ای برای توسعه این فناوری فراهم کرده است (Hortidaily، ۲۰۲۳). این سیاست‌ها نشان می‌دهد که کشاورزی عمودی در ژاپن نه‌تنها یک فناوری، بلکه بخشی از راهبرد ملی برای امنیت غذایی و توسعه کشاورزی هوشمند است.

۲٫۴. هلند: هلند با وجود مساحت محدود، یکی از بزرگترین صادرکنندگان محصولات کشاورزی جهان است و کشاورزی عمودی را به‌عنوان بخشی از راهبرد ملی خود برای تولید پایدار و افزایش بهره‌وری پذیرفته است. شرکت‌های هلندی مانند Growy و مراکز تحقیقاتی دانشگاهی، سیستم‌های پیشرفته‌ای برای تولید در محیط‌های کنترل شده توسعه داده‌اند که مصرف آب را به‌شدت کاهش داده و امکان تولید سالانه صدها تُن سبزیجات را فراهم می‌کند (EDB Singapore، ۲۰۲۳). از نظر سیاستی، هلند از طریق CAP Strategic Plan و برنامه‌های نوآوری کشاورزی اتحادیه اروپا، حمایت مالی و تحقیقاتی گسترده‌ای برای توسعه کشاورزی عمودی ارائه می‌دهد (European Commission، ۲۰۲۴). این سیاست‌ها باعث شده هلند به یکی از مراکز جهانی فناوری‌های AgTech تبدیل شود.

۳٫۴. سنگاپور: سنگاپور به‌دلیل کمبود شدید زمین و وابستگی این کشور به بیش از ۹۰٪ به واردات غذا، کشاورزی عمودی را به‌عنوان ستون اصلی راهبرد امنیت غذایی خود انتخاب کرده است. پروژه‌هایی مانند Greenphyto Vertical Farm که بلندترین مزرعه عمودی جهان محسوب می‌شود، با استفاده از هوش مصنوعی، رباتیک و سیستم‌های هیدروپونیک، تولید سالانه هزاران تُن سبزیجات را ممکن کرده‌اند (Bloomberg، ۲۰۲۶). این فناوری به سنگاپور کمک کرده تا بهره‌وری تولید را تا ۴۵ برابر روش‌های سنتی افزایش دهد. سیاست کلیدی پشت این توسعه، برنامه ملی ۳۰ سنگاپور[۴] است که هدف آن تولید ۳۰٪ نیاز غذایی کشور تا سال ۲۰۳۰ است (Singapore Food Agency، ۲۰۱۹). این سیاست با ارائه یارانه، حمایت مالی و تسهیل سرمایه‌گذاری، زمینه رشد سریع کشاورزی عمودی را فراهم کرده است.

فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب

۱. مدیریت سیلاب‌ها:

۱٫۱. برنامه فضایی برای رودخانه (Room for the River) یکی از موفق‌ترین نمونه‌های جهانی در مدیریت نوین سیلاب است که در هلند با هدف افزایش ایمنی، کاهش خطرات سیلاب و بازگرداندن فضای طبیعی به رودخانه‌ها اجرا شد. این رویکرد برخلاف روش‌های سنتی مبتنی بر ساخت سد و دیوار حفاظتی؛ بر ایجاد پهنه‌های سیلابی، جابه‌جایی خاکریزها، تعریض بستر رودخانه و احیای اکوسیستم‌های طبیعی تمرکز دارد. دلیل اصلی انتخاب این راهبرد، آسیب‌پذیری شدید هلند در برابر سیلاب و وابستگی گسترده کشور به رودخانه‌های راین، موز و اسخلده بوده است. ارزیابی‌های رسمی نشان می‌دهد اجرای این برنامه علاوه بر افزایش ظرفیت عبور سیلاب، موجب بهبود کیفیت مناظر طبیعی، ارتقای تنوع زیستی و افزایش پذیرش اجتماعی مدیریت سیلاب شده است (Rijkswaterstaat، ۲۰۱۶). همچنین اتحادیه اروپا از طریق «چارچوب دستورالعمل سیلاب» (EU Floods Directive) پشتوانه قانونی و سیاستی مهمی برای توسعه این رویکرد فراهم کرده است (European Commission، ۲۰۲۰). این تجربه نشان می‌دهد که مدیریت سیلاب با بازگرداندن فضا به رودخانه، یک راهبرد نوین، پایدار و سازگار با طبیعت است.

۲٫۱. آلمان– پیش‌بینی سیلاب با هوش مصنوعی

پس از وقوع سیلاب‌های ویرانگر سال ۲۰۲۱ در ایالت‌های راینلند-فالتس و نوردراین-وستفالن، آلمان به‌طور گسترده به سمت استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سیلاب حرکت کرد، مؤسسه German Research Centre for Geosciences (GFZ) با توسعه مدل‌های یادگیری عمیق توانست دقت پیش‌بینی سیلاب‌های ناگهانی را افزایش دهد و هشدارها را چند ساعت زودتر صادر کند (GFZ، ۲۰۲۲). این اقدامات در چارچوب سیاست ملی[۵] German Flood Protection Programme که هدف آن تقویت سامانه‌های هشدار سریع و کاهش خسارات انسانی و اقتصادی است، انجام شد (Federal Ministry for the Environment، ۲۰۲۲).

۳٫۱. هند– مدل‌سازی هوش مصنوعی برای سیلاب‌های شهری

هند به‌دلیل وقوع مکرر سیلاب‌های شهری در کلان‌شهرهایی مانند بمبئی و چنای، از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سیلاب‌های سریع استفاده می‌کند. سازمان Indian Institute of Technology (IIT)[۶] با همکاری Google، سامانه‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین توسعه داده که سطح آب رودخانه‌ها را پیش‌بینی کرده و هشدارهای دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Google Research، ۲۰۲۱). این سامانه در سال‌های اخیر موجب کاهش تلفات و بهبود مدیریت بحران شده است. این پروژه بخشی از سیاست ملی National Disaster Management Plan[۷] است که بر استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای کاهش ریسک بلایا تاکید دارد (NDMA، ۲۰۱۹).

۴٫۱. ایالات متحده آمریکا– پیش‌بینی سیلاب با مدل‌های یادگیری عمیق

در ایالات متحده، سازمان NOAA[۸] و دانشگاه‌های پیشرو از مدل‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های حساس مانند میسیسیپی و کارولینا استفاده می‌کنند، مدل‌های جدید مبتنی بر شبکه‌های عصبی توانسته‌اند دقت پیش‌بینی دبی رودخانه و وقوع سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (NOAA، ۲۰۲۳). دلیل اصلی انتخاب این فناوری، نیاز به مدیریت بهتر سیلاب‌های شدید ناشی از تغییر اقلیم است. این فعالیت‌ها در چارچوب برنامه ملی National Water Model Modernization Initiative انجام می‌شود که هدف آن ارتقای سامانه‌های هشدار سریع است (USGS، ۲۰۲۲).

۲. سامانه‌های پایش لحظه‌ای آب زیرزمینی

۱٫۲. آمریکا: کالیفرنیا– پایش لحظه‌ای آب زیرزمینی با سنسورهای فشار و کیفیت

کالیفرنیا به‌دلیل برداشت بیش‌ازحد از آبخوان‌ها و بحران‌های مکرر خشکسالی، یکی از پیشروترین مناطق جهان در استفاده از سامانه‌های پایش لحظه‌ای آب زیرزمینی است. در این ایالت، سنسورهای فشار، کیفیت آب و لاگرهای لحظه‌ای در چاه‌ها نصب شده‌اند تا تغییرات سطح آب، هدایت الکتریکی و فشار آبخوان‌ها را به‌صورت پیوسته ثبت کنند. این داده‌ها برای مدیریت تطبیقی و تصمیم‌گیری سریع در شرایط کم‌آبی استفاده می‌شود. اجرای این سامانه‌ها بخشی از سیاست Sustainable Groundwater Management Act (SGMA)[۹] است که مدیریت پایدار آب زیرزمینی را الزام‌آور کرده است (DWR، ۲۰۲۱؛ USGS، ۲۰۲۲).

۲٫۲. استرالیا– پایش هوشیار آب زیرزمینی در مناطق خشک

استرالیا با اقلیم خشک و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی، از سامانه‌های پایش لحظه‌ای مبتنی بر سنسورهای فشار، کیفیت و دما برای مدیریت آبخوان‌ها استفاده می‌کند. سازمان Bureau of Meteorology (۲۰۱۰) و CSIRO[۱۰] شبکه‌ای گسترده از چاه‌های مجهز به حسگرهای دیجیتال ایجاد کرده‌اند که داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای به سامانه‌های مرکزی منتقل می‌کند. این اطلاعات برای پیش‌بینی افت سطح آب، مدیریت برداشت و حفاظت از اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی به‌کار می‌رود. این اقدامات در چارچوب سیاست ملی National Groundwater Monitoring Program انجام می‌شود (BOM، ۲۰۲۰؛ CSIRO، ۲۰۲۱).

۳. مدیریت آب زیرزمینی در بستر بازارهای محلی

۱٫۳. استرالیا– بازارهای محلی آب زیرزمینی در موری–دارلینگ

استرالیا یکی از پیشگامان توسعه بازارهای محلی آب زیرزمینی است، به‌ویژه در حوضه Murray-Darling Basin که با فشار شدید بر منابع آب و خشکسالی‌های مکرر روبه‌رو است. در این مناطق، کشاورزان می‌توانند حق برداشت آب زیرزمینی را خریدوفروش کنند و این سازوکار باعث شده تخصیص آب به سمت فعالیت‌های با بهره‌وری بالاتر حرکت کند. مطالعات نشان می‌دهد این بازارها موجب کاهش برداشت بیش‌ازحد و افزایش انعطاف‌پذیری اقتصادی کشاورزان شده‌اند (Grafton و همکاران، ۲۰۱۸). این رویکرد در چارچوب سیاست ملی Water Act 2007[۱۱] و برنامه‌های ایالتی مدیریت پایدار آب زیرزمینی اجرا می‌شود (Australian Government، ۲۰۲۰).

۲٫۳. شیلی– بازارهای حقوق آب و مدیریت آبخوان‌ها

شیلی یکی از قدیمی‌ترین نمونه‌های بازارهای رسمی آب را دارد و از دهه ۱۹۸۰ امکان خریدوفروش حقوق آب، از جمله آب زیرزمینی، در چارچوب Water Code[۱۲] فراهم شده است. این بازارها به‌ویژه در مناطق خشک شمال شیلی، مانند آتاکاما، برای تخصیص کارآمد آب بین معدن، کشاورزی و شهرها استفاده می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد این سازوکار توانسته رقابت‌پذیری اقتصادی را افزایش دهد، اما نیازمند نظارت قوی برای جلوگیری از برداشت بیش‌ازحد است. اصلاحات اخیر دولت نیز بر تقویت حفاظت از آبخوان‌ها و مدیریت پایدار تأکید دارد.

۳٫۳. هند– بازارهای محلی آب زیرزمینی در گجرات:

در ایالت گجرات هند، بازارهای محلی آب زیرزمینی به‌صورت غیررسمی میان کشاورزان شکل گرفته است؛ جایی که مالکان چاه‌های عمیق، آب را از طریق لوله یا پمپ به کشاورزان فاقد چاه می‌فروشند. این بازارها به دلیل کمبود شدید آب و هزینه بالای حفر چاه ایجاد شده‌اند و نقش مهمی در تأمین آب آبیاری برای مزارع کوچک دارند. مطالعات نشان می‌دهد که این سازوکار موجب افزایش بهره‌وری و دسترسی عادلانه‌تر به آب شده است، هرچند نبود نظارت رسمی می‌تواند به افت سطح آبخوان‌ها منجر شود. دولت هند در سال‌های اخیر به دنبال تنظیم‌گری بهتر این بازارها است.

فناوری‌های نوین در تصفیه و تأمین آب

۱. نسل جدید فناوری‌های نمک‌زدایی

۱٫۱. عربستان سعودی– نمک‌زدایی کم‌انرژی با فناوری‌های غشایی پیشرفته:

عربستان به‌دلیل وابستگی شدید به آب‌شیرین‌کن‌ها و مصرف بالای انرژی، به سمت فناوری‌های غشایی کم‌مصرف مانند RO[13] پیشرفته و Forward Osmosis حرکت کرده است. شرکت SWCC پروژه‌هایی را اجرا کرده که مصرف انرژی را تا ۳۰٪ کاهش داده و انتشار کربن را کم کرده‌اند (SWCC، ۲۰۲۳). همچنین برنامه Saudi Vision 2030[14] بر توسعه نمک‌زدایی پایدار و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید دارد. این سیاست‌ها موجب شده عربستان به یکی از مراکز جهانی توسعه فناوری‌های کم‌انرژی در نمک‌زدایی تبدیل شود (World Bank، ۲۰۲۱).

۲٫۱. اسرائیل– نمک‌زدایی غشایی پیشرفته و بازیافت انرژی:

اسرائیل کشوری با کمبود شدید منابع آب طبیعی، از پیشرفته‌ترین فناوری‌های غشایی مانند RO با بازیافت انرژی (ERD) استفاده می‌کند. تأسیسات Sorek و Ashkelon توانسته‌اند مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و بیش از ۷۰٪ آب شرب کشور را تأمین کنند (Tal، ۲۰۱۶). دلیل انتخاب این فناوری، نیاز به امنیت آبی و کاهش وابستگی به منابع سطحی است. سیاست ملی Water Authority Reform[15] نیز با حمایت مالی و تنظیم‌گری دقیق، توسعه نمک‌زدایی کم‌انرژی را تسریع کرده است (Israel Water Authority، ۲۰۲۰).

۳٫۱. استرالیا– نمک‌زدایی خورشیدی و فناوری‌های کم‌مصرف:

استرالیا به‌دلیل خشکسالی‌های شدید و فشار بر منابع آب سطحی، به سمت نمک‌زدایی کم‌انرژی با استفاده از فناوری‌های خورشیدی و غشاهای نوین حرکت کرده است. پروژه‌هایی مانند Perth Solar Desalination Trial نشان داده‌اند که ترکیب انرژی خورشیدی با RO می‌تواند مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد (CSIRO، ۲۰۲۱). دولت استرالیا نیز از طریق National Water Security Plan از توسعه فناوری‌های پایدار نمک‌زدایی حمایت می‌کند.

این رویکرد به افزایش تاب‌آوری آبی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کرده است (Australian Government، ۲۰۲۰).

۲. تصفیه آب با نانوفناوری

۱٫۲. نانوفیلترها: حذف فلزات سنگین با NF:

فناوری نانوفیلتراسیون (NF) به‌طور گسترده برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی به‌کار می‌رود. غشاهای NF با منافذ نانومتری، می‌توانند یون‌های چندظرفیتی مانند سرب، کادمیم و نیکل را با راندمان بالا حذف کنند، درحالی‌که مصرف انرژی آن‌ها کمتر از اسمز معکوس است. مرورهای اخیر نشان داده‌اند که غشاهای پلیمری و کامپوزیتی NF توانسته‌اند در تصفیه پساب صنعتی، کاهش بار آلاینده و بازیافت آب نقش مؤثری ایفا کنند (Covaliu-Mierlă و همکاران، ۲۰۲۳).

۲٫۲. نانوجاذب‌ها: جاذب‌های آهن‌پایه برای حذف آرسنیک:

در تصفیه آب‌های آلوده به آرسنیک، نانوجاذب‌های آهن‌پایه (مانند نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های اکسید آهن) به‌عنوان یکی از کارآمدترین گزینه‌ها مطرح شده‌اند. این نانومواد به‌دلیل سطح ویژه بالا و گروه‌های فعال سطحی، توان جذب بسیار زیادی برای آرسنیک دارند و می‌توانند غلظت آن را تا زیر حدود استاندارد شرب کاهش دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد جاذب‌های آهن‌پایه در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت، عملکرد بسیار خوبی در حذف آرسنیک از آب زیرزمینی داشته‌اند (Hao و همکاران، ۲۰۱۸).

۳. بازیافت فاضلاب برای مصارف شرب

۱٫۳. سنگاپور– NEWater و بازیافت پیشرفته برای مصارف شرب:

سنگاپور یکی از موفق‌ترین نمونه‌های بازیافت فاضلاب برای مصارف شرب است و سیستم NEWater را به‌عنوان بخشی از راهبرد امنیت آبی خود توسعه داده است. NEWater با سه مرحله تصفیه پیشرفته–میکروفیلتراسیون، اسمز معکوس و گندزدایی UV–آب فوق‌العاده خالص تولید می‌کند که بخشی از آن به مخازن آب شرب تزریق می‌شود. این فناوری به سنگاپور کمک کرده وابستگی خود به منابع خارجی را کاهش دهد و تاب‌آوری آبی را افزایش دهد.

۲٫۳. کالیفرنیا– Direct Potable Reuse و چارچوب قانونی جدید:

کالیفرنیا یکی از پیشروترین مناطق جهان در توسعه Direct Potable Reuse (DPR) است. این ایالت پس از سال‌ها پژوهش و ارزیابی سلامت عمومی، در سال ۲۰۲۴ مقررات رسمی DPR را تصویب کرد. این مقررات امکان تزریق مستقیم آب بازیافتی فوق‌تصفیه شده به سامانه آب شرب را فراهم می‌کند. هدف اصلی، افزایش پایداری منابع آبی در برابر خشکسالی‌های شدید و کاهش وابستگی به واردات آب

است. مقررات جدید توسط هیئت کنترل منابع آب ایالت کالیفرنیا (California State Water Resources Control Board، ۲۰۲۴) منتشر شده است.

فناوری‌های نوین در زیرساخت‌های شهری

۱. شبکه‌های هوشیار آب شهری (Smart Water Grids)

۱٫۱. سئول– تشخیص نشت با هوش مصنوعی:

سئول یکی از پیشروترین شهرها در استفاده از شبکه‌های هوشیار آب است و از سامانه‌های مبتنی بر IoT و هوش مصنوعی برای تشخیص نشت و مدیریت فشار استفاده می‌کند. پروژه‌های پایلوت در شهرهایی مانند Seosan نشان داده‌اند که تحلیل داده‌های فشار و دبی می‌تواند نشت‌های کوچک را قبل از تبدیل‌شدن به شکستگی‌های بزرگ شناسایی کند. این سیستم‌ها با کاهش Minimum Night Flow و افزایش راندمان شبکه، مصرف آب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده‌اند (Koo و همکاران، ۲۰۲۱).

۲٫۱. لندن– شبکه هوشیار آب با تحلیل داده و مدیریت فشار:

لندن با شبکه‌ای بسیار قدیمی، از فناوری‌های هوشیار برای کاهش نشت و مدیریت فشار استفاده می‌کند. شرکت Thames Water سامانه‌های تحلیل داده، حسگرهای فشار و مدل‌های پیش‌بینی را برای شناسایی نشت‌های پنهان به‌کار گرفته است. این سیستم‌ها با تنظیم خودکار فشار در ساعات کم‌مصرف، از شکستگی لوله‌ها جلوگیری می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های دیجیتال و داده‌محور می‌تواند تا ۱۵٪ از نشت‌های شبکه را کاهش دهد (Ramos و همکاران، ۲۰۲۳).

۲. زیرساخت‌های سبز

۱٫۲. بام‌های سبز در نیویورک:

نیویورک از بام‌های سبز به‌عنوان بخشی از برنامه رسمی Green Infrastructure Program برای کاهش رواناب، بهبود کیفیت آب و کاهش فشار بر شبکه فاضلاب استفاده می‌کند. شهرداری نیویورک گزارش می‌دهد بام‌های سبز و سایر زیرساخت‌های سبز، حجم قابل‌توجهی از رواناب را در محل نگه می‌دارند و از ورود آن به سیستم فاضلاب جلوگیری می‌کنند. این اقدامات در چارچوب سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت پایدار آب شهری در نیویورک اجرا می‌شوند (NYC، ۲۰۲۶).

۲٫۲. باغ‌های بارانی (Rain Gardens) در سیاتل:

سیاتل از Rain Gardens به‌عنوان بخشی از برنامه رسمی RainWise[۱۶] برای مدیریت رواناب و کاهش بار شبکه فاضلاب استفاده می‌کند. در این برنامه، شهر و شرکت آب، به ساکنان کمک می‌کنند تا باغ‌های بارانی و سایر زیرساخت‌های سبز را در حیاط و فضاهای شهری ایجاد کنند تا آب باران در محل نفوذ کرده و وارد فاضلاب نشود (Seattle Public Utilities، ۲۰۲۶). همچنین، راهنماها و پروژه‌های نمونه نشان می‌دهند که این سازه‌ها نقش مهمی در کاهش سیلاب‌های محلی و بهبود کیفیت آب دارند (King County، ۲۰۲۶).

بخش دوم: نگاهی به جایگاه ایران در کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت آب

۱. وضعیت کنونی:

در حوزه فناوری‌های نوین در کشاورزی و آبیاری، ایران طی دو دهه اخیر به‌صورت گسترده به سمت سامانه‌های آبیاری تحت فشار (قطره‌ای، بارانی، تیپ) حرکت کرده است و در بسیاری از دشت‌های بحرانی، توسعه این سامانه‌ها با یارانه دولتی اجرا شده است. در کنار آن، استفاده از کنتورهای حجمی برای چاه‌های کشاورزی، سامانه‌های سنجش از دور و نقشه‌برداری ماهواره‌ای برای برآورد سطح زیرکشت و نیاز آبی، و طرح‌های پایلوت آبیاری هوشیار مبتنی بر حسگر رطوبت خاک در برخی مزارع تحقیقاتی و گلخانه‌ها در حال اجرا است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۰). با این‌حال شکاف قابل‌توجهی بین مزارع پیشرو و بخش عمده کشاورزی سنتی وجود دارد و بسیاری از این فناوری‌ها هنوز در مقیاس ملی نهادینه نشده‌اند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۸).

در زمینه فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب، بخش آب ایران به‌طور گسترده از سامانه‌های تله‌متری و SCADA برای پایش لحظه‌ای مخازن سدها، ایستگاه‌های هیدرومتری و شبکه‌های انتقال استفاده می‌کند. شرکت مدیریت منابع آب ایران شبکه‌ای از ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی، بارش و کیفیت آب را به‌صورت برخط توسعه داده و داده‌ها در سامانه‌های متمرکز جمع‌آوری و تحلیل می‌شوند (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۱). در کنار آن، مدل‌های عددی بارش–رواناب، شبیه‌سازی مخازن و سامانه‌های هشدار سیل در حوضه‌هایی مانند کارون، کرخه و تجن به‌کار گرفته شده‌اند. در سطح شهری نیز، شرکت‌های آب و فاضلاب در برخی کلان‌شهرها از سامانه‌های GIS، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه و قرائت خودکار کنتورها برای مدیریت فشار، کاهش هدررفت و برنامه‌ریزی توسعه شبکه استفاده می‌کنند. با این وجود، پوشش این سامانه‌ها در شهرهای کوچک و روستاها هنوز محدود است و داده‌ها در بسیاری از حوضه‌ها پراکنده و ناهمگون باقی مانده‌اند.

در حوزه فناوری‌های نوین در تصفیه و تأمین آب، ایران دارای شبکه گسترده‌ای از تصفیه‌خانه‌های آب شهری با فرآیندهای متعارف (انعقاد، ته‌نشینی، فیلتراسیون و گندزدایی) است و در سال‌های اخیر، در برخی شهرها از فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند غشاها و MBR برای تصفیه فاضلاب و بازچرخانی آن برای مصارف صنعتی و آبیاری فضای سبز استفاده شده است (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۴۰۱). در سواحل جنوبی، آب‌شیرین‌کن‌های مبتنی بر اسمز معکوس (RO) برای تأمین آب شرب شهرهایی در هرمزگان، بوشهر و سیستان و بلوچستان توسعه یافته‌اند و برنامه‌هایی برای افزایش سهم آب‌شیرین‌کن‌ها در تأمین آب شرب در حال اجرا است. در کنار این‌ها، پروژه‌های بازچرخانی پساب تصفیه شده برای صنایع بزرگ (فولاد، پتروشیمی) و آبیاری کمربند سبز شهری در چند کلان‌شهر در حال بهره‌برداری است، هرچند استانداردسازی و پایش کیفی بلندمدت هنوز چالش‌برانگیز است.

در زمینه فناوری‌های نوین در زیرساخت‌های شهری، تمرکز اصلی بر توسعه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، تصفیه‌خانه‌های شهری و به‌تدریج استفاده از رویکردهای نزدیک به زیرساخت سبز است. در برخی شهرها، طرح‌هایی مانند پارک‌های آبخیز، حوضچه‌های تاخیری، کانال‌های نفوذپذیر و توسعه فضاهای سبز شهری با نقش هیدرولوژیک اجرا شده یا در دست مطالعه است (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۹). همچنین، پروژه‌های پایلوت برای استفاده از کف‌پوش‌های نفوذپذیر، جمع‌آوری آب باران از بام‌ها و ذخیره‌سازی محلی در برخی شهرها و شهرک‌ها مطرح شده است. در حوزه شبکه آب شهری، استفاده از کنتورهای هوشیار، سامانه‌های نشت‌یابی و مدیریت فشار در چند شرکت آب و فاضلاب استانی آغاز شده، اما هنوز با مفهوم کامل «شبکه هوشمند آب شهری» فاصله وجود دارد (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۴۰۱). به‌طورکلی می‌توان گفت ایران در بسیاری از این فناوری‌ها وارد مرحله اجرا و بهره‌برداری شده، اما سطح پوشش، یکپارچگی داده‌ها و پیوند با سیاست‌گذاری کلان هنوز نیازمند تقویت جدی است.

۲. فرصت‌ها و چالش‌های ایران در توسعه فناوری‌های نوین مدیریت آب

چالش‌های مدیریت آب در ایران ریشه در ترکیبی از عوامل اقتصادی، اجتماعی، جغرافیایی و سیاسی دارد و همین عوامل تعیین می‌کنند که فناوری‌های نوین تا چه اندازه می‌توانند در کشور به‌کار گرفته شوند. از یک‌سو، ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، کاهش بارندگی و افت شدید آب‌های زیرزمینی مواجه است؛ شرایطی که ضرورت استفاده از فناوری‌های نوین را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، محدودیت‌های مالی، تحریم‌ها، ضعف حکمرانی آب و ناهماهنگی نهادی، سرعت پذیرش و گسترش این فناوری‌ها را کاهش داده‌اند. گزارش‌های ملی و بین‌المللی نشان می‌دهند که ایران در آستانه «بحران ساختاری آب» قرار دارد و بدون تحول فناورانه و اصلاحات نهادی، پایداری منابع آب در معرض تهدید جدی است (Ghomeshi، ۲۰۲۳؛ Fanack Water، ۲۰۲۵)

ایران در حوزه فناوری‌های نوین مدیریت منابع آب فرصت‌های قابل‌توجهی دارد. وجود شبکه گسترده سدها، ایستگاه‌های هیدرومتری و زیرساخت‌های انتقال آب، امکان پیاده‌سازی سامانه‌های هوشیار مانند SCADA، پایش برخط کیفیت آب و مدل‌های پیش‌بینی سیلاب را فراهم می‌کند. بااین‌حال چالش‌های اقتصادی از جمله کمبود سرمایه‌گذاری، هزینه بالای تجهیزات و محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها مانع نوسازی گسترده این زیرساخت‌ها شده است. در مقایسه، ترکیه که اقلیم مشابهی با ایران دارد، توانسته با سرمایه‌گذاری خارجی و مشارکت بخش خصوصی، سامانه‌های هوشیار مدیریت سدها و شبکه‌های انتقال را توسعه دهد. ایران نیز از نظر فنی توانایی اجرای این فناوری‌ها را دارد، اما موانع مالی و سیاسی سرعت این تحول را کاهش داده‌اند.

ایران یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان آب کشاورزی در منطقه است و همین موضوع فرصت بزرگی برای به‌کارگیری فناوری‌های نوین ایجاد می‌کند. سامانه‌های آبیاری تحت فشار، سنجش از دور، آبیاری هوشیار و مدیریت داده‌محور مزرعه می‌توانند مصرف آب را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهند. اما چالش‌های اجتماعی از جمله مقاومت کشاورزان، مالکیت خرد زمین‌ها و نبود انگیزه اقتصادی مانع گسترش این فناوری‌ها شده است. در مقابل، سایر کشورها با اقلیم مشابه و منابع محدود، توانسته‌اند با سیاست‌های حمایتی، آموزش گسترده و قیمت‌گذاری واقعی آب، فناوری‌های آبیاری هوشیار را در سطح ملی پیاده کنند. ایران نیز از نظر علمی و فنی ظرفیت مشابهی دارد، اما نبود سازوکارهای تشویقی و قیمت‌گذاری ناکارآمد آب، مانع اصلی است (Shokri، ۲۰۲۵).

در حوزه تصفیه و تأمین آب، ایران فرصت‌های مهمی در توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها، بازچرخانی پساب و فناوری‌های غشایی دارد. سواحل جنوبی کشور ظرفیت بالایی برای توسعه آب‌شیرین‌کن‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی و اسمز معکوس دارند. اما چالش‌های اقتصادی از جمله هزینه بالای انرژی، محدودیت سرمایه‌گذاری خارجی و تحریم‌ها روند توسعه را کند کرده است. در مقایسه، عربستان سعودی با اقلیم مشابه، توانسته است با اتکا به سرمایه‌گذاری عظیم و مشارکت شرکت‌های بین‌المللی، بزرگترین شبکه آب‌شیرین‌کن جهان را ایجاد کند (Fanack Water، ۲۰۲۵). بااین‌حال توسعه بازچرخانی پساب در صنایع فولاد و پتروشیمی ایران نشان می‌دهد که ظرفیت داخلی برای گسترش فناوری‌های پیشرفته وجود دارد.

در زمینه فناوری‌های نوین در زیرساخت‌های شهری، ایران با چالش‌های ساختاری مواجه است. بسیاری از شهرها دارای شبکه‌های فرسوده آب و فاضلاب هستند و نشت آب، هدررفت انرژی و نبود سامانه‌های هوشیار مدیریت فشار، مشکلات جدی ایجاد کرده‌اند. بااین‌حال فرصت‌های مهمی برای توسعه زیرساخت‌های سبز، مدیریت رواناب شهری و استفاده از فناوری‌های هوشیار وجود دارد. تجربه استرالیا که مانند ایران با خشکسالی‌های شدید مواجه است نشان می‌دهد توسعه زیرساخت‌های سبز، جمع‌آوری آب باران و بازچرخانی آب شهری می‌تواند نقش مهمی در تاب‌آوری شهری داشته باشد. در شهرهایی مانند مشهد، اصفهان و تهران پروژه‌های پایلوتی در این زمینه اجرا شده است، اما نبود سیاست‌های یکپارچه و کمبود بودجه مانع گسترش آن‌ها شده است (Hamidifar، ۲۰۲۴).

از منظر فرصت‌های محیط‌زیستی و جغرافیایی، ایران تنوع اقلیمی گسترده، تابش بالای خورشید، سواحل طولانی و ظرفیت بالای انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. این ویژگی‌ها امکان توسعه فناوری‌هایی مانند آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، سامانه‌های برداشت آب از مه، و مدیریت هوشمند منابع آب را فراهم می‌کند. همچنین، وجود دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی فعال در حوزه آب، فرصت مهمی برای توسعه فناوری‌های بومی ایجاد کرده است. اما چالش‌های حکمرانی از جمله ناهماهنگی نهادی، ضعف داده‌های شفاف، و نبود سیاست‌های بلندمدت مانع بهره‌برداری کامل از این فرصت‌ها شده‌اند (Ghomeshi، ۲۰۲۳).

در نهایت، مسیر آینده ایران در توسعه فناوری‌های نوین مدیریت آب، نیازمند ترکیبی از اصلاحات ساختاری، سرمایه‌گذاری هدفمند، همکاری‌های بین‌المللی و مشارکت فعال بخش خصوصی است. تجربه کشورهایی با شرایط مشابه نشان می‌دهد فناوری به‌تنهایی کافی نیست؛ بلکه حکمرانی کارآمد، سیاست‌گذاری پایدار و مشارکت اجتماعی نقش تعیین‌کننده دارند. ایران با وجود چالش‌های جدی، فرصت‌های قابل‌توجهی برای تحول در مدیریت آب دارد و اگر این فرصت‌ها با سیاست‌های درست همراه شوند، می‌توانند مسیر پایداری منابع آب کشور را تضمین کنند.

فناوری آبیاری به‌مثابه یک نظام مدیریتی، نه مجموعه‌ای از تجهیزات

یکی از نکات مهم راهنمای IWMI تعریف ضمنی فناوری آبیاری در قالب یک نظام متشکل از سه عنصر به‌هم‌پیوسته است: سخت‌افزار، نرم‌افزار و اپراتور. سخت‌افزار شامل زیرساخت، تجهیزات، ابزارهای اندازه‌گیری و اجزای انتقال و کنترل آب است؛ نرم‌افزار شامل رویه‌ها، پروتکل‌ها، داده‌ها و ابزارهای پشتیبان تصمیم است؛ و اپراتورها افرادی هستند که مسئولیت مدیریت، بهره‌برداری، نگهداری و پایش سامانه را بر عهده دارند. بر اساس این چارچوب، عملکرد پایدار نه از سخت‌افزار به‌تنهایی، بلکه از هماهنگی میان این سه مؤلفه حاصل می‌شود (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

این تفکیک، برای تحلیل فناوری در مدیریت آب ایران اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در بسیاری از پروژه‌های فناورانه، توجه اصلی متوجه خرید یا نصب تجهیز است، درحالی‌که سازوکارهای استفاده از داده، تعریف مسئولیت، آموزش بهره‌بردار، نگهداری پیشگیرانه و تأمین قطعات و خدمات پس از فروش کمتر در مرکز طراحی پروژه قرار می‌گیرد. راهنمای IWMI نشان می‌دهد که حتی برای سامانه‌های پیشرفته، تدوین رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP)، ثبت منظم داده‌های

بهره‌برداری و نگهداری، گزارش‌دهی، بازبینی دوره‌ای و بهبود مستمر بخشی از خودِ نظام فناوری محسوب می‌شود، نه فعالیت‌های جانبی پس از اجرای پروژه (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

از این منظر می‌توان یک تغییر مهم در منطق ارزیابی فناوری پیشنهاد کرد: به جای پرسش «آیا تجهیز یا سامانه نصب شده است؟»، باید پرسید «آیا این فناوری در یک فرایند مدیریتی پایدار قرار گرفته است؟». اگر داده تولید شده وارد فرایند تصمیم نشود، اگر مسئولیت نگهداری روشن نباشد، اگر اپراتور مهارت کافی نداشته باشد یا اگر سازمان نتواند بر اساس اطلاعات جدید تصمیم خود را اصلاح کند، وجود فناوری لزوماً به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود. این برداشت با تأکید راهنما بر ظرفیت انسانی، نهادی و حکمرانی به‌عنوان زیربنای عملکرد فناوری سازگار است (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

انتخاب فناوری؛ مسئله‌ای چندمعیاره

راهنمای IWMI در فصل انتخاب و برنامه‌ریزی فناوری‌های آبیاری، مجموعه‌ای از عوامل را برای انتخاب فناوری مناسب مطرح می‌کند: شرایط اقلیمی و بوم‌شناختی، کمیت و کیفیت منبع آب، اندازه و شکل مزرعه، نوع و الگوی کشت، دسترسی و هزینه انرژی، ظرفیت نهادی و مدیریتی، و شرایط اقتصادی و تأمین مالی. این چارچوب نشان می‌دهد که انتخاب فناوری یک تصمیم چندمعیاره است و نمی‌توان آن را صرفاً بر مبنای راندمان فنی یا قیمت اولیه تجهیز انجام داد (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

برای مدیریت آب، این نکته فراتر از سطح مزرعه نیز قابل تعمیم است. هر فناوری که در سطح مصرف‌کننده یا شبکه مستقر می‌شود، باید با شرایط و اهداف سطح بالاتر هماهنگ باشد. برای مثال، افزایش بهره‌وری آبیاری در مزرعه، اگر با قواعد برداشت و تخصیص آبخوان یا حوضه هماهنگ نباشد، لزوماً به کاهش فشار بر منبع منجر نمی‌شود. از همین رو، فناوری آبیاری باید در کنار حسابداری آب، قواعد تخصیص، نظام پایش و سازوکارهای نظارتی دیده شود. در راهنمای IWMI نیز درباره سامانه‌های خورشیدی پمپاژ تأکید شده است که بدون تنظیم‌گری و پایش، کاهش هزینه انرژی می‌تواند حتی انگیزه افزایش برداشت از آب زیرزمینی را ایجاد کند؛ بنابراین فناوری و حکمرانی باید هم‌زمان طراحی شوند (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

راهنمای FAO-IWMI در بخش توانمندسازی نیز نکته‌ای دارد که برای سیاست فناوری آب در ایران قابل توجه است: آموزش یک‌باره برای پایدارسازی فناوری کافی نیست. الگوی پیشنهادی بر آموزش مبتنی بر شایستگی، یادگیری مستمر، پیگیری و مربی‌گری، پشتیبانی فنی در دسترس و مشارکت هم‌زمان بازیگران مختلف تأکید می‌کند. این بازیگران فقط بهره‌بردار نهایی نیستند؛ مدیران، کارشناسان ترویج، تکنسین‌ها، تأمین‌کنندگان و تشکل‌های بهره‌برداران نیز باید در نظام ظرفیت‌سازی دیده شوند. در نتیجه، ظرفیت‌سازی از یک فعالیت آموزشی محدود به یک جزء از «زیست‌بوم خدمات و حکمرانی فناوری» تبدیل می‌شود (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

در همین چارچوب، مدل «آموزش مربیان» و نیز یادگیری تجربی و مزرعه‌ای در گزارش IWMI به‌عنوان سازوکارهایی برای گسترش مهارت‌ها معرفی شده‌اند. ارزش این رویکرد برای ایران در آن است که مسئله انتشار فناوری را فقط مسئله اطلاع‌رسانی نمی‌بیند؛ بلکه انتقال مهارت، تجربه عملی، سازگارسازی با شرایط محلی و ایجاد شبکه پشتیبانی را نیز جز فرایند پذیرش فناوری محسوب می‌کند. این نکته با تجربه شکاف میان بهره‌برداران پیشرو و بدنه گسترده کشاورزی در ایران که در بخش‌های دیگر کنکاش نیز به آن اشاره شده، هم‌جهت است. چکیده این الگو در جدول (۱) به صورت نمادین ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای انتخاب فناوری برای کاربری‌های مختلف آب

معیار	پرسش مدیریتی	پیامد برای انتخاب فناوری
اقلیم و شرایط بوم‌شناختی	آیا فناوری با دما، بارش، تبخیر و شرایط خاک سازگار است؟	انتخاب روش متناسب با شرایط محلی، نه صرفاً فناوری پیشرفته‌تر
منبع آب	کمیت، کیفیت و قابلیت اتکای منبع چقدر است؟	تطبیق فناوری با محدودیت واقعی آب و کیفیت آن
مقیاس و ساختار مزرعه	اندازه و شکل اراضی چیست؟	تناسب فناوری با مقیاس و امکان بهره‌برداری
محصول و الگوی کشت	نیاز آبی و ارزش اقتصادی محصول چیست؟	تعیین نوع و دقت کاربرد آب
انرژی	منبع و هزینه انرژی چقدر است؟	توجه هم‌زمان به هزینه چرخه عمر و قابلیت اطمینان
ظرفیت نهادی و انسانی	چه مهارت، پشتیبانی و ساختار مدیریتی وجود دارد؟	پرهیز از فناوری‌هایی که ظرفیت بهره‌برداری از آنها وجود ندارد
اقتصاد و تأمین مالی	هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری چگونه تأمین می‌شود؟	ارزیابی هزینه - فایده و مدل‌های تأمین مالی

بخش سوم: دیدگاه خبرگان پیرامون کاربرد فناوری‌ها در مدیریت آب در ایران

همان‌طور که در بخش مقدمه توضیح داده شد، در این شماره از کنکاش، مصاحبه‌های انفرادی با جمعی از خبرگان مرتبط با موضوع فناوری‌های آبی صورت گرفته است. مصاحبه‌های انفرادی نیمه‌ساختاریافته‌ای یا جمعی از خبرگان مرتبط با فناوری‌های حوزه آب انجام شده است، چهار سوال کلیدی زیر از مصاحبه‌شوندگان پرسش شده است:

۱- توجه به موضوع فناوری در مدیریت آب چه اهمیت و جایگاهی دارد؟

۲- شما کاربرد فناوری‌ها در مدیریت آب را چگونه تجربه کرده‌اید و از دستاوردهای ملی و بین‌المللی در این حوزه چه شناختی دارید؟ چه ظرفیت‌هایی در ایران در حوزه فناوری‌ها وجود دارد و این ظرفیت‌ها چقدر کارآمد هستند؟

۳- در مسیر شناخت، توسعه و کاربرد فناوری‌ها در ایران چه موانع و چالش‌هایی وجود دارد؟

۴- برای بهبود وضعیت کاربرد فناوری در مدیریت آب در ایران چه اقداماتی می‌توان انجام داد و چه توصیه‌هایی دارید؟

مصاحبه‌شوندگان که به نمایندگی از حوزه دانشگاه، کشاورزی و مدیریت آب و همچنین آب و فاضلاب شهری انتخاب شده‌اند به شرح زیر هستند:

۱- **جناب آقای دکتر کامران داوری**؛ استاد گروه علوم و مهندسی آب و رئیس پژوهشکده آب و محیط‌زیست دانشگاه فردوسی مشهد

تجربه مدیریتی و پژوهشی در حوزه فناوری‌های آب و همچنین فعالیت در شرکت‌های مشاوره‌ای، زمینه‌ای برای مواجهه عملی با ابزارهای محاسباتی و سامانه‌های تصمیم‌گیری فراهم کرده است. در کنار فعالیت دانشگاهی، تجربه برگزاری سه دوره جشنواره فناوری‌های آب در ایران نیز در شکل‌گیری دیدگاه ایشان درباره توسعه و کاربرد فناوری‌های آب موثر بوده است.

۲- **جناب آقای دکتر محمود ارجمند شریف**؛ دکترای آب‌های زیرزمینی، مدیر پیشین مطالعات پایه منابع آب و رئیس کنونی گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

ایشان در حدود پانزده سال گذشته به‌صورت مستمر در حوزه مطالعات و مدیریت منابع آب زیرزمینی فعالیت داشته‌اند. سابقه کاری ایشان شامل بیش از یازده سال فعالیت کارشناسی در مدیریت مطالعات آب‌های زیرزمینی، حدود پنج سال و نیم مدیریت همان دفتر، و در سال‌های اخیر ریاست گروه تحقیقات کاربردی در معاونت برنامه‌ریزی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی می‌باشد. تجربه حرفه‌ای ایشان نشان می‌دهد که هم در سطح اجرایی و هم در سطح سیاست‌گذاری و توسعه فناوری در بخش آب نقش فعال داشته‌اند.

۳- **جناب آقای مهندس غلامرضا کلایی**؛ متخصص فناوری اطلاعات و معاون منابع انسانی و تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد

از مدیران باسابقه حوزه آب و فاضلاب مشهد که حدود هشت سال به عنوان معاون منابع انسانی و تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد فعالیت داشته و پیش از آن نیز نزدیک به یک دهه مدیریت حوزه فناوری اطلاعات و شبکه این شرکت را بر عهده داشته‌اند. تخصص اصلی ایشان در حوزه فناوری اطلاعات، سیستم‌های اطلاعاتی و کاربرد فناوری در مدیریت سازمانی است و بخش مهمی از فعالیت‌هایشان بر توسعه زیرساخت‌های هوشیار، سامانه‌های بهره‌برداری، مدیریت منابع انسانی و فناوری‌های مرتبط با مدیریت شبکه آب متمرکز بوده است. به گفته ایشان یکی از عوامل اصلی موفقیت شرکت آب و فاضلاب مشهد، توجه مستمر به فناوری و سرمایه‌گذاری در حوزه تحقیق و توسعه بوده است.

۴- **جناب آقای دکتر ابوالقاسم حقایقی مقدم**؛ متخصص علوم آبیاری و کشاورزی و رئیس دهکده فناوری و نوآوری کشاورزی، منابع طبیعی و صنایع غذایی استان خراسان رضوی

دهکده فناوری در چارچوب مشترک میان پارک علم و فناوری خراسان رضوی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی خراسان رضوی فعالیت می‌کند. این مجموعه از نخستین مراکز رشد تخصصی کشاورزی در کشور به شمار می‌رود و تاکنون میزبان صدها ایده و شرکت فناور در حوزه‌های مختلف کشاورزی، منابع طبیعی و صنایع غذایی بوده است.

۵- **جناب آقای مهندس وحید اردکانیان**؛ کشاورز و باغدار پیشرو تربت جامی و عضو خانه کشاورز خراسان رضوی

از فعالان باسابقه و متخصصان حوزه کشاورزی و باغداری پسته در ایران است که تحصیلات کارشناسی ارشد خود را در رشته زراعت در دانشگاه فردوسی مشهد به پایان رسانده و از اواسط دهه ۱۳۷۰ به‌صورت حرفه‌ای وارد مدیریت مزرعه شده‌اند. وی فعالیت خود را ابتدا در مزرعه خانوادگی آغاز کرد و طی حدود سه دهه، مجموعه‌ای از باغ‌های پسته را از سیستم‌های سنتی زراعی به باغداری مکانیزه و فناورانه تبدیل کرده است. در حال حاضر مدیریت بیش از ۵۰ هکتار باغ پسته را بر عهده دارد و تجربه گسترده‌ای در زمینه توسعه سامانه‌های نوین آبیاری، اتوماسیون مزرعه، مدیریت داده، و به‌کارگیری فناوری‌های هوشیار در کشاورزی دارد. تجربیات وی از معدود نمونه‌های عملی و پیشرو در حوزه کشاورزی فناورانه در باغات پسته ایران محسوب می‌شود.

در ادامه در پاسخ به هر یک از سوالات فوق، چکیده پاسخ و دیدگاه خبرگان نامبرده ارائه می شود:

الف) اهمیت و جایگاه فناوری در مدیریت آب:

+ کامران داوری: فناوری را مفهومی چندلایه و ترکیبی از ابزارهای سخت و نرم می‌دانم. در این نگاه، فناوری صرفا به تجهیزات فیزیکی محدود نمی‌شود، بلکه از نرم‌افزارهای تحلیلی و سامانه‌های تصمیم‌یار تا ساختارهای اجتماعی و سازوکارهای حکمرانی را نیز در بر می‌گیرد. مسیر فناوری تنها به حمایت از تولیدات موجود محدود نیست، بلکه نیازمند ایجاد بستر برای شکل‌گیری ایده‌های اولیه است. در این چارچوب، مفهوم بلوغ فناوری از مرحله ایده تا تجاری‌سازی و ورود به بازار به‌عنوان یک فرآیند تدریجی مورد توجه قرار دارد، هرچند استمرار این رویکرد با چالش‌های نهادی و سیاستی مواجه است.

در تحلیل نقش فناوری در مدیریت آب، تاکید اصلی بر چندلایه بودن نظام حکمرانی است. مدیریت آب از سطح مزرعه تا سطح ملی در قالب یک زنجیره پیوسته قابل مشاهده است؛ از مدیریت عملیاتی در مزرعه گرفته تا سطوح شهرستان، استان و در نهایت سیاست‌گذاری کلان کشور. در هر یک از این سطوح، نوع فناوری و کارکرد آن متفاوت است. در سطوح پایین‌تر، فناوری بیشتر ماهیت سخت‌افزاری دارد و در خدمت تصمیم‌گیری عملیاتی قرار می‌گیرد؛ مانند تراکتورهای هوشیار، کمباین‌های مجهز به سنجش عملکرد، پهپادهای پایش مزرعه، و حسگرهای رطوبت خاک. این ابزارها امکان جمع‌آوری داده و تصمیم‌گیری سریع در سطح مزرعه را فراهم می‌کنند و مفهوم «مدیریت هوشیار» در همین سطح معنا پیدا می‌کند. در این سطح، تفاوت میان «اتوماسیون» و «هوش مصنوعی» اهمیت پیدا می‌کند. اتوماسیون به معنای اجرای خودکار فرآیندها بر اساس آستانه‌های از پیش تعیین‌شده است، مانند آغاز آبیاری در صورت کاهش رطوبت خاک. اما هوش مصنوعی فراتر از این عمل کرده و با تحلیل الگوها و داده‌های گذشته، توانایی تصمیم‌سازی و پیش‌بینی دارد. به‌عنوان‌مثال، تشخیص الگوی افت فشار در شبکه آب و پیش‌بینی محل احتمالی شکست لوله، نمونه‌ای از کاربرد هوش مبتنی بر الگو است، نه صرفا اجرای دستور از پیش تعیین شده. این تمایز نشان می‌دهد که گذار از اتوماسیون به هوشمندسازی واقعی، نیازمند داده، مدل‌سازی و یادگیری سیستم است.

در سطوح میانی مانند شهرستان و استان، فناوری ماهیت نرم‌تری پیدا می‌کند و بیشتر در قالب سامانه‌های اطلاعاتی، تحلیل اقتصادی و مدیریت تعارضات اجتماعی ظاهر می‌شود. در این سطح، مسائل مربوط به توزیع منابع، تعارض منافع، و هماهنگی بین بخش‌های مختلف اهمیت پیدا می‌کند. داده‌های مزرعه در این مرحله به اطلاعات تجمیعی تبدیل می‌شوند و مبنای تصمیم‌گیری‌های منطقه‌ای قرار می‌گیرند. در سطح استانی، تمرکز بر شاخص‌های اقتصادی مانند تولید ناخالص منطقه‌ای، بهره‌وری آب و ارزیابی عملکرد بخش کشاورزی است.

در سطوح بالاتر، فناوری وارد حوزه سیاست‌گذاری کلان و امنیت غذایی می‌شود. در این مرحله، تصمیم‌ها به موضوعاتی مانند اولویت‌بندی محصولات کشاورزی، تخصیص منابع آب در سطح ملی و طراحی سیاست‌های حمایتی مرتبط است. استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و سامانه‌های تصمیم‌یار می‌تواند نشان دهد که هر منطقه باتوجه‌به اقلیم، منابع آب و ویژگی‌های خاک چه نوع محصولی باید تولید کند تا بیشترین بازده ملی حاصل شود. در این چارچوب، فناوری به ابزار تحلیل کلان و سیاست‌سازی تبدیل می‌شود، نه صرفاً ابزار اجرایی.

+ محمود ارجمند: به کارگیری فناوری‌های نوین در مدیریت آب، به طور محسوسی باعث افزایش کارآیی و قابلیت‌های فنی، کاهش زمان انجام فرآیندها، افزایش دقت محاسبات و کاهش هزینه‌ها شده است. به طور مثال می‌توان در مطالعات منابع آب به استفاده گسترده از نرم‌افزارهای تخصصی مدل‌سازی منابع آب از گذشته تاکنون اشاره کرد. درحال‌حاضر تمرکز از کاربردهای فردی نرم‌افزارها به سمت طراحی سامانه‌های یکپارچه داده و مدیریت اطلاعات تغییر یافته است.

+ غلامرضا کلایی: فناوری در مدیریت آب دیگر یک ابزار جانبی نیست، بلکه به بخش جدایی‌ناپذیر فرآیند بهره‌برداری و ارائه خدمات تبدیل شده است. بدون استفاده از فناوری اطلاعات، هوش مصنوعی، سامانه‌های تله‌متری و سیستم‌های داده‌محور، مدیریت شبکه گسترده آب‌رسانی مشهد عملا امکان‌پذیر نیست. شهر مشهد به دلیل وسعت زیاد، اختلاف ارتفاع گسترده مناطق شهری، تنوع منابع تامین آب و حضور میلیون‌ها زائر در دوره‌های زمانی خاص، نیازمند مدیریتی کاملا هوشمند و مبتنی بر فناوری است.

+ ابوالقاسم حقایقی مقدم: فناوری حلقه واسط میان پژوهش و عرصه تولید است. ساختار سنتی پژوهش در بخش کشاورزی اگرچه ظرفیت علمی بالایی ایجاد کرده، اما سرعت پاسخ‌گویی آن به مسائل روز بخش تولید محدود است. کشاورز و تولیدکننده انتظار دارد مشکل او در کوتاه‌ترین زمان ممکن حل شود، درحالی‌که فرایندهای رسمی پژوهشی معمولا زمان‌بر هستند. در چنین شرایطی، شرکت‌های فناور و دانش‌بنیان می‌توانند یافته‌های علمی را سریع‌تر به محصول، خدمت یا راهکار اجرایی تبدیل کنند. توسعه فناوری در کشور از اوایل دهه ۱۳۸۰ به‌صورت جدی مورد توجه قرار گرفت و در بخش کشاورزی نیز از اوایل دهه ۱۳۹۰ این رویکرد وارد مرحله اجرایی شد. شکل‌گیری مراکز رشد تخصصی کشاورزی و سپس ایجاد «دهکده‌های فناوری و نوآوری» بخشی از تلاش برای نزدیک کردن تحقیقات دانشگاهی و نیازهای واقعی بخش کشاورزی بوده است. در این چارچوب، دانشگاه و مراکز تحقیقاتی تنها محل تولید دانش تلقی نمی‌شوند، بلکه نقش

آن‌ها در تجاری‌سازی علم و ایجاد ارزش اقتصادی نیز پررنگ شده است.

+ وحید اردکانیان: فناوری و اتوماسیون در مزارع بزرگ‌مقیاس نه‌تنها مفید بلکه ضروری است. در مجموعه‌های وسیع کشاورزی، نظارت انسانی مستقیم بر تمام عملیات عملا غیرممکن بوده و بدون استفاده از سامانه‌های پایش، سنسورها، و اتوماسیون، راندمان تولید به‌شدت کاهش می‌یابد. در مزارع بزرگ، به‌ویژه مجموعه‌های دولتی یا شبه‌دولتی، ضعف نظارت، نبود انگیزه عملکردی، و ناکارآمدی ساختار مدیریتی سبب می‌شود بهره‌وری پایین باقی بماند. در چنین شرایطی، اتوماسیون و سامانه‌های هوشمند می‌توانند بخشی از ضعف‌های مدیریتی را جبران کنند. بااین‌حال، در مزارع کوچک‌مقیاس، به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و محدودیت‌های اقتصادی کشاورزان، توجیه اقتصادی بسیاری از فناوری‌های پیشرفته هنوز محدود است.

ب) تجارب و ظرفیت های برجسته ملی و بین المللی در کاربرد فناوری:

+ کامران داوری: امروزه در دنیا ابزارهایی ابداع می شوند که تنها مربوط به دانشگاه‌ها نیستند. در دنیا دانشگاه‌ها در مسیر اقتصاد عمل می‌کنند اگر جز این باشند حذف می‌شوند. با این وصف در سطح بین‌المللی دانشگاه‌ها فعالیت‌هایی را انجام می‌دهند که در عمل کاربرد، سرمایه گذار و خریدار داشته باشند. در عصر امروز توسعه ابزارهای هوش مصنوعی ابزاری مختص دانشگاه‌ها نیست بلکه در واقع در خدمت سیاست‌گذاران است تا در فرآیند تصمیم‌گیری به اندوخته‌ای از دانش و تجربه بشریت دسترسی داشته باشند. امروز نرم‌افزار به کاربر بینشی می‌دهد که بتواند با هزینه‌ای کمتر سناریوهای مختلف مربوط به آینده را بررسی کند.

دره تنسی در می‌سی‌سی‌پی آمریکا یکی از مصادیق کاربرد فناوری در برنامه‌ریزی آب است. از سال‌ها قبل سامانه‌هایی را راه‌اندازی کرده‌اند که با برآورد مستمر منابع و مصارف، در مورد تخصیص آب تصمیم‌گیری می‌کنند. در استرالیا سازوکار بازار آب مبتنی بر ابزارهای متعدد فناورانه است. در اروپا و آسیا نیز چنین است.

در ایران اگرچه از ظرفیت‌های علمی بسیار خوبی برخوردار هستیم اما در مدیریت آب در ایران سازوکارهایی که در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار گرفته وجود ندارد. مداخلات دولتی موجب شده عملا امکان استفاده از فناوری‌های نرم وجود نداشته باشد. در شرایط وجود داده‌های غلط یا فقدان داده‌های پایه نمی‌توان انتظار داشت فناوری مشکلی را حل کند. ما در ایران در سطوح کلان معمولا از فناوری‌ها استفاده نادرست داریم و این باعث شده عملا کاربرد فناوری موجب تحولی اساسی نشود. فساد اداری، اقتصاد ناسالم و همچنین مرکزگرایی دولتی از جمله مهمترین عوامل در بروز این وضعیت هستند.

+ محمود ارجمند: از جمله ابزارهای مورد استفاده می‌توان به نرم‌افزارهای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی مانند GMS و MODFLOWاشاره کرد که برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان‌ها کاربرد دارند. همچنین در حوزه آزمون‌های پمپاژ، نرم‌افزارهای تخصصی تحلیل تست پمپاژ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه‌براین، بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور و داده‌های دورسنجی نیز بخش مهمی از ابزارهای فناورانه است که در این حوزه به کار گرفته می‌شود.

یکی از مهمترین دستاوردهای این دوره، توسعه سامانه «سیماب» است. این سامانه شامل یک اپلیکیشن میدانی و یک بانک اطلاعاتی مرکزی بوده و هدف اصلی آن ثبت، پایش و صحت‌سنجی داده‌های برداشت شده در بازدیدهای میدانی است. داده‌ها پس از ثبت توسط کارشناسان، به‌صورت برخط در سامانه نمایش داده شده و پس از کنترل کیفیت، به بانک اطلاعاتی ملی منتقل می‌شوند. این فرآیند موجب کاهش خطاهای انسانی و افزایش سرعت تبادل داده در سطح ملی شده است.

از دیگر تجربه‌های مهم، توسعه سامانه محاسبات هوشیار بیلان منابع آب است. این سامانه با هدف محاسبه سالانه تراز آب‌های زیرزمینی طراحی شده و جایگزینی برای روش‌های سنتی و پنج‌ساله گذشته محسوب می‌شود. در روش سنتی، جمع‌آوری داده‌ها، انتخاب مشاور، تامین اعتبار و پردازش اطلاعات زمان‌بر بود، درحالی‌که در سیستم جدید، داده‌های موجود به‌صورت یکپارچه پردازش شده و خروجی‌های سالانه در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تولید می‌شود. این تحول باعث افزایش دقت، کاهش وابستگی به فرآیندهای اداری و تسهیل تصمیم‌گیری سریع‌تر در شرایط تغییرات اقلیمی شده است.

در حوزه آب‌های سطحی نیز استفاده از سامانه‌های ارتباطی بین داده‌های روزانه و روابط دبی-اشل مورد اشاره قرار گرفته است. همچنین زیرساخت‌های بانک اطلاعاتی در سطح استان خراسان عمدتا بر پایه سیستم‌های Oracle و در برخی موارد Microsoft Access شکل گرفته‌اند که وظیفه ذخیره‌سازی و پردازش داده‌های نهایی را بر عهده دارند.

در بخش نوآوری‌های پژوهشی، به توسعه سامانه‌های مبتنی بر Google Earth Engine برای پایش پوشش برف باید اشاره کرد. این سامانه‌ها با هدف حذف فرآیندهای دستی و زمان‌بر طراحی شده‌اند و به‌صورت خودکار تصاویر ماهواره‌ای را فراخوانی، پردازش و تحلیل می‌کنند. این موضوع نمونه‌ای از حرکت به سمت اتوماسیون کامل در تحلیل‌های منابع آب محسوب می‌شود.

همچنین یکی از نوآوری‌های مهم عملیاتی، طراحی و ساخت دستگاه نمونه‌گیر باران با قابلیت جلوگیری از تبخیر است. این دستگاه با هدف حفظ ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های بارش طراحی شده و امکان تحلیل دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند. این فناوری با هزینه‌ای بسیار کمتر از

نمونه‌های خارجی ساخته شده و در حال حاضر در برخی پروژه‌های منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

+ غلامرضا کلایی: شبکه آب مشهد دارای حدود شش هزار کیلومتر خطوط توزیع است و کنترل چنین شبکه‌ای به روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، شرکت آب و فاضلاب مشهد طی سال‌های گذشته به سمت توسعه سامانه‌های هوشیار پایش و کنترل حرکت کرده است. این سامانه‌ها با دریافت لحظه‌ای داده‌ها از نقاط مختلف شبکه، امکان تصمیم‌گیری سریع درباره تنظیم فشار، انتقال آب، مدیریت مخازن و توزیع عادلانه آب را فراهم می‌کنند. استفاده از این فناوری‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از جیره‌بندی آب در سال‌های اخیر داشته است؛ به‌گونه‌ای که در شرایط تنش شدید آبی، برخلاف دهه هشتاد، شهر مشهد بدون قطعی گسترده آب مدیریت شده است.

شرکت آب و فاضلاب مشهد با استفاده از داده‌کاوی و تحلیل داده‌های تاریخی، الگوهای مصرف آب را در شرایط مختلف پیش‌بینی می‌کند. این موضوع به‌ویژه در شهری مانند مشهد که در ایام مذهبی و مناسبت‌های خاص با افزایش ناگهانی جمعیت مواجه می‌شود، اهمیت فراوانی دارد. ترکیب داده‌های مربوط به مصرف، شرایط اقلیمی، زمان اوج سفرهای زیارتی و ظرفیت منابع آبی، امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و مدیریت بهینه شبکه را فراهم کرده است.

همچنین در سال‌های اخیر، برنامه‌هایی در زمینه جانشین‌پروری، شناسایی استعدادها و توانمندسازی کارکنان اجرا شده تا افراد در جایگاه‌های متناسب با توانایی‌های خود قرار گیرند. موفقیت فناوری زمانی حاصل می‌شود که سازمان بتواند میان زیرساخت‌های فنی و منابع انسانی متخصص ارتباط مؤثر ایجاد کند.

+ ابوالقاسم حقایقی مقدم: مهمترین ظرفیت کشور در حوزه فناوری، نیروی انسانی تحصیل‌کرده است. توسعه آموزش عالی در دهه‌های اخیر باعث شده تعداد زیادی فارغ‌التحصیل در رشته‌های مختلف کشاورزی و علوم مرتبط وارد بازار کار شوند. و محدودیت فرصت‌های شغلی دولتی بسیاری از جوانان را به سمت فعالیت‌های فناورانه و کارآفرینی سوق داده است.

بر اساس تجربیات این مرکز، ظرفیت‌های فناورانه در طیف وسیعی از حوزه‌ها شکل گرفته‌اند؛ از تولید بذر، کود و نهاده‌های زیستی گرفته تا ماشین‌آلات کشاورزی، صنایع غذایی، خوراک دام و طیور، فناوری‌های مرتبط با آب کشاورزی و سامانه‌های هوشیار. بخش مهمی از نوآوری‌های جدید در حوزه کودهای زیستی، نانوکودها و روش‌های غیرشیمیایی کنترل آفات، توسط شرکت‌های دانش‌بنیان توسعه یافته‌اند. در حوزه دام و طیور نیز شرکت‌های فناور توانسته‌اند راهکارهایی برای کاهش مصرف خوراک، افزایش بهره‌وری و استفاده از ضایعات کشاورزی ارائه کنند. همچنین در زمینه مکانیزاسیون، ماشین‌آلات نوین کاشت، داشت و برداشت و فناوری‌های پس از برداشت، نمونه‌های موفقی از محصولات بومی در استان و کشور شکل گرفته است.

+ وحید اردکانیان: روند توسعه فناوری در مزرعه خود را از ارتقای تدریجی سامانه‌های آبیاری آغاز کرده‌ام. ابتدا آبیاری بارانی در مزرعه اجرا شد و سپس با وجود تردیدهای رایج درباره کارایی آبیاری قطره‌ای در باغ پسته، این سیستم در باغ‌ها پیاده‌سازی شد. در ادامه، با توسعه باغات جدید، سامانه‌های آبیاری به‌صورت کامل با طراحی نوین اجرا و طی سال‌های اخیر بخش عمده‌ای از باغ‌ها به آبیاری زیرسطحی تبدیل شده‌اند.

اتوماسیون آبیاری در دو سطح کاربرد دارد: نخست، تجهیز زیرساخت‌ها و سامانه‌ها برای افزایش راندمان توزیع و مصرف آب؛ و دوم، دستیابی به مدیریت هوشمند آبیاری بر مبنای داده‌های اقلیمی و سنجش رطوبت خاک، به‌گونه‌ای که تصمیم‌گیری در خصوص زمان و میزان آبیاری به‌صورت خودکار انجام شود. مزرعه فعلی در مرحله نخست قرار دارد؛ بدین معنا که زیرساخت‌های لازم برای هوشمندسازی فراهم شده اما تصمیم نهایی درباره برنامه آبیاری هنوز توسط مدیر مزرعه اتخاذ می‌شود.

یکی از مهمترین نوآوری‌های اجراشده در این مجموعه، طراحی و پیاده‌سازی سامانه پیشرفته تزریق کود و تغذیه هوشیار است. پس از تجربه‌های متعدد و ناموفق در استفاده از پمپ‌های تزریق متداول، نهایتا یک سامانه تغذیه قابل برنامه‌ریزی مبتنی بر PLC با همکاری یک شرکت داخلی بومی‌سازی و برای استفاده در مقیاس باغ اصلاح شد. این سامانه شامل چندین مخزن ذخیره کود و قابلیت برنامه‌ریزی دقیق برای نوع کود، زمان تزریق، دبی تزریق، مدت تزریق و ترتیب اختلاط کودها است. از طریق این سیستم، کودهای مختلف می‌توانند بدون ایجاد رسوب یا تداخل شیمیایی در زمان‌های از پیش تعیین شده وارد شبکه آبیاری شوند. همچنین این سامانه قابلیت کنترل از راه دور را دارد و مدیر مزرعه می‌تواند از طریق تلفن همراه یا اینترنت عملکرد سیستم را پایش و اصلاح کند.

اگرچه آبیاری زیرسطحی در ادبیات فنی به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته کاهش تبخیر و افزایش بهره‌وری آب معرفی می‌شود، تجربه عملی من نشان می‌دهد که موفقیت این فناوری به‌شدت وابسته به شرایط خاک و مدیریت بهره‌برداری است. در خاک‌های با بافت شنی، آبیاری زیرسطحی نتایج مورد انتظار را به‌طور کامل محقق نکرده و حتی در برخی شرایط با مشکلاتی مانند اتلاف عمقی آب، محدود شدن توسعه افقی رطوبت و کاهش انعطاف مدیریتی همراه بوده است. بسیاری از برآوردهای ارائه‌شده در منابع علمی درباره صرفه‌جویی آب ناشی از آبیاری زیرسطحی، در عمل برای همه شرایط قابل تعمیم نیست و اجرای این فناوری بدون تحلیل دقیق ویژگی‌های خاک می‌تواند منجر به نتایج نامطلوب شود. استفاده موفق از این سیستم نیازمند پایش

مداوم رطوبت خاک، حفاری‌های دوره‌ای برای ارزیابی توزیع رطوبت و تنظیم مستمر برنامه آبیاری است.
علاوه بر سامانه‌های آبیاری، به سمت دیجیتالی‌سازی سایر بخش‌های مدیریت مزرعه نیز حرکت کرده‌ام. از جمله این اقدامات می‌توان به نصب سامانه‌های GPS بر روی ماشین‌آلات، ثبت دیجیتال عملیات مزرعه، پایش عملکرد کارگران، و مستندسازی دقیق مصرف نهاده‌ها اشاره کرد.
امروز فناوری در کشورهای توسعه یافته پیشرفت قابل توجهی داشته است اما به عنوان یک تجربه بین‌المللی که توجهم را به خود جلب کرد، در سال‌های قبل هنگام بازدید از مجموعه کشاورزی یک باغدار ایرانی در ایالت کالیفرنیا با گروهی از کارشناسان مواجه شدم که به مزرعه مراجعه کرده و متغیرهای مختلفی را در بازه‌های زمانی مشخصی اندازه‌گیری می‌کردند تا بتوانند مبتنی بر این داده ها مشاوره‌های فنی به مدیر مزرعه ارائه کنند.

ج) مسائل و چالش های کاربرد و توسعه فناوری در ایران:

+ کامران داوری: یکی از نکات مهم ضرورت پیوند بین فناوری و اقتصاد است. به‌عنوان‌مثال در بخش کشاورزی الگوی کشت، قیمت‌گذاری محصولات و سیاست‌های حمایتی باید به گونه‌ای طراحی شوند که انگیزه اقتصادی کشاورزان با اهداف کلان کشور همسو شود. در غیر این صورت، تصمیم‌گیری‌ها به سطح اجرایی منتقل نمی‌شوند و فاصله میان سیاست و عمل باقی می‌ماند. در سطح بین‌المللی نیز تجربه نشان می‌دهد که فناوری در کشاورزی و مدیریت آب به شدت در خدمت اقتصاد و بازار کار قرار دارد. در بسیاری از کشورها، مسیر آموزش و انتخاب رشته‌های دانشگاهی تحت تأثیر مستقیم بازار کار و شاخص‌های اقتصادی هدایت می‌شود. همچنین، ارتباط میان دانشگاه، صنعت و نهادهای سیاست‌گذار باعث می‌شود که تولید دانش در راستای نیازهای واقعی اقتصاد شکل بگیرد. در مقابل، ضعف این ارتباط می‌تواند منجر به عدم تطابق میان آموزش، فناوری و نیازهای اجرایی شود.
در مجموع، فناوری در مدیریت آب نه یک ابزار مستقل، بلکه بخشی از یک نظام چندسطحی حکمرانی است که از مزرعه تا سیاست‌گذاری ملی امتداد دارد. اثربخشی آن وابسته به هماهنگی میان داده، تصمیم، اقتصاد و ساختارهای نهادی است. بدون این هماهنگی، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها نیز قادر به ایجاد تحول پایدار در مدیریت منابع آب نخواهند بود.
+ محمود ارجمند: چالش‌های متعددی در مسیر توسعه فناوری در بخش آب مطرح است. مهمترین این چالش‌ها شامل مقاومت فرهنگی در برابر فناوری، کمبود اعتبارات پایدار، تمرکزگرایی در تصمیم‌گیری‌های ملی، محدودیت در واردات تجهیزات پیشرفته، و مشکلات مربوط به نگهداری و امنیت سامانه‌ها است. بخشی از بدنامی فناوری در کشور ناشی از استفاده نادرست از داده‌ها و نبود ساختار صحیح در مدیریت اطلاعات است.
+ غلامرضا کلایی: به دلیل حساسیت زیرساخت‌های آب و ملاحظات امنیتی، اتکا به نرم‌افزارها و تجهیزات خارجی همواره با محدودیت‌هایی همراه بوده است. به همین دلیل، شرکت آب و فاضلاب مشهد طی سال‌های اخیر تلاش کرده بخشی از تجهیزات و سامانه‌های مورد نیاز خود را در داخل کشور توسعه دهد. برخی تجهیزات حوزه تله‌متری و اسکادا که پیش‌تر وابسته به شرکت‌های خارجی بودند، اکنون با همکاری بخش‌های تحقیقاتی و فناورانه در داخل کشور تولید یا بومی‌سازی شده‌اند. حتی برخی قطعات و ابزارهای دقیق نیز هم اکنون در داخل کشور به صورت بومی تولید می‌شود.
+ ابوالقاسم حقایقی مقدم: در کنار کشاورزان پیشرو که عملکردی در سطح استانداردهای جهانی دارند، تعداد زیادی از بهره‌برداران همچنان با روش‌های بسیار سنتی فعالیت می‌کنند. این فاصله که در ادبیات علمی با عنوان «شکاف عملکرد» شناخته می‌شود، در برخی محصولات به دو تا سه برابر و حتی بیشتر می‌رسد. به‌عنوان‌مثال، درحالی‌که برخی کشاورزان استان خراسان رضوی تا ۱۴ تن گندم در هکتار برداشت می‌کنند، برخی دیگر تنها یک تا دو تن تولید دارند. مشکل اصلی صرفا نبود فناوری نیست، بلکه دشواری نفوذ و گسترش آن در بدنه کشاورزی کشور است. شرکت‌های فناور برای توسعه بازار، جذب سرمایه، دریافت مجوز و حتی تأمین نیروی انسانی متخصص با مشکلات متعددی مواجه هستند. بخش مهمی از مشکلات حوزه فناوری به ساختارهای اداری و مقرراتی بازمی‌گردد. تولید هر محصول فناورانه در کشاورزی نیازمند دریافت مجوزهای متعدد از نهادهای مختلف است؛ از مؤسسات ثبت و گواهی بذر گرفته تا سازمان حفظ نباتات، مؤسسات خاک و آب، سازمان دامپزشکی و سازمان غذا و دارو. مسئله اصلی این است که بسیاری از این ساختارها همچنان با منطق و استانداردهای سنتی عمل می‌کنند و شناخت کافی نسبت به فناوری‌های جدید ندارند. در نتیجه، محصولات نوآورانه با مقاومت‌های اداری و فرایندهای طولانی مواجه می‌شوند. چالش دیگر ضعف ارتباط میان دانشگاه، صنعت و زیست‌بوم فناوری است. ارتباط دانشگاه با بخش خصوصی بیشتر به رویدادهای مقطعی محدود شده و فرآیند مستمر کشف استعداد و هدایت نیروی انسانی شکل نگرفته است. در نتیجه، بخشی از فارغ‌التحصیلان مستعد به حوزه‌هایی کاملا نامرتبط می روند و ظرفیت انسانی بخش کشاورزی هدر می‌رود.
+ وحید اردکانیان: مهم‌ترین چالش در بهره‌برداری کامل از این فناوری ها و سامانه‌های نرم افزاری در کشاورزی را می توان دشواری ثبت مستمر و دقیق داده‌ها دانست. حتی پیشرفته‌ترین نرم‌افزارهای مدیریتی نیز بدون نیروی انسانی متخصص برای ورود و ثبت داده‌ها کارایی لازم را ندارند.
همچنین مواردی همچون دسترسی محدود به تجهیزات و فناوری‌های روز دنیا به دلیل موانع وارداتی و تحریم‌ها، ضعف

تولید داخلی در تامین تجهیزات تخصصی و باکیفیت، نبود خدمات پس از فروش و پشتیبانی فنی مناسب، هزینه پایین نسبی نیروی کار که انگیزه سرمایه‌گذاری در فناوری را کاهش می‌دهد، ضعف نظام ترویج و انتقال دانش و ساختارهای ناکارآمد نهادی و مدیریتی در بخش کشاورزی از جمله موانع و چالش‌ها در حوزه کاربرد فناوری‌ها در مدیریت آب کشاورزی است.

د) بایدها و راهکارها در بهبود زیست بوم فناورانه در مدیریت آب در ایران:

+ کامران داوری: علاوه بر آن‌چه در پاسخ به سوالات قبل مطرح شد، باید توجه قانون‌گذاران به موضوع حکمرانی و فناوری‌های آب جلب شود. برخی قوانین قدیمی و زاید هستند و برخی قوانین نیازمند تصویب هستند. در مجموعه وزارت نیرو انتخاب مدیران باید مبتنی بر شاخص‌های بهبود و ملزومات اکوسیستم باشد. این مهم باعث می‌شود مدیران در تلاش برای به‌کارگیری دانش روز و فناوری‌های کارآمد باشند.

+ محمود ارجمند: در حوزه آینده‌پژوهی و کاربرد هوش مصنوعی، طراحی سیستم‌های هوشیار در مدیریت منابع انسانی و حوزه حفاظت اهمیت دارد. این سیستم‌ها قادر خواهند بود فرآیندهایی مانند تحلیل پرونده‌های اداری، تشخیص نیازهای ارباب‌رجوع، ارائه راهنمایی حقوقی اولیه و حتی پیش‌بینی تعارضات و مشکلات احتمالی در حوزه حفاظت منابع آب را انجام دهند. هدف اصلی این سامانه‌ها کاهش بار کاری کارشناسان، افزایش سرعت پاسخگویی و بهبود رضایت مراجعان است.

فناوری حلقه مفقوده مدیریت منابع آب است و بدون توسعه سامانه‌های هوشمند، تصمیم‌گیری دقیق و پایدار در این حوزه امکان‌پذیر نیست. موفقیت فناوری وابسته به تغییر فرهنگ سازمانی، آموزش مستمر، تمرکززدایی از ساختارهای اجرایی و ایجاد بسترهای آزمایشی برای پذیرش تدریجی نوآوری‌ها است.

+ ابوالقاسم حقایقی مقدم: آینده فناوری کشاورزی وابسته به تغییر نگرش مدیریتی و تسهیل مشارکت بخش خصوصی است. اگر زیرساخت‌های لازم برای استقرار بلندمدت شرکت‌های فناور فراهم شود، می‌توان تحول بزرگی در فناوری کشاورزی کشور ایجاد کرد. این شرکت‌ها برای سرمایه‌گذاری و توسعه نیازمند امنیت و ثبات هستند و بدون دسترسی به فضاهای پایدار، امکان رشد بلندمدت ندارند. همچنین سهم شرکت‌های دانش‌بنیان کشاورزی با جایگاه واقعی این بخش در اقتصاد کشور تناسب ندارد. در حالی که کشاورزی سهم قابل‌توجهی در اشتغال و تولید ناخالص داخلی دارد، تنها حدود پنج تا شش درصد شرکت‌های دانش‌بنیان کشور در این حوزه فعال‌اند. از این رو، توسعه فناوری کشاورزی نیازمند حمایت جدی‌تر، تسهیل مقررات، تقویت ارتباط دانشگاه و صنعت، و اعتماد بیشتر به ظرفیت بخش خصوصی و جوانان فناور است.

بخش چهارم: نتیجه‌گیری

این گزارش نشان می‌دهد که فناوری در مدیریت منابع و مصارف آب را نمی‌توان به مجموعه‌ای از تجهیزات، نرم‌افزارها یا سامانه‌های فنی تقلیل داد. در چارچوب این مطالعه، فناوری زمانی واجد ارزش مدیریتی است که بتواند فاصله میان «شناخت مسئله» و «تصمیم مؤثر» را کاهش دهد و تصمیم را به اقدام، ارزیابی و یادگیری مستمر متصل کند. از این منظر، فناوری بخشی از ظرفیت حکمرانی آب است؛ ظرفیتی که از سطح تولید و اعتبارسنجی داده تا تحلیل، تصمیم‌سازی، تخصیص، نظارت و اصلاح سیاست امتداد می‌یابد. شواهد بررسی‌شده در تجربه‌های بین‌المللی و وضعیت ایران نشان می‌دهد که مسئله اصلی کشور بیش از آنکه فقدان دانش یا ابزار فناورانه باشد، ضعف در تبدیل ظرفیت فناورانه موجود به یک فرایند منسجم و پاسخگو برای تصمیم‌گیری آب است.

در سطح منابع، مهمترین ارزش فناوری در افزایش قابلیت مشاهده و فهم‌پذیری سیستم آب است. پایش پیوسته منابع سطحی و زیرزمینی، یکپارچه‌سازی داده‌های بارش، جریان، برداشت و کیفیت، محاسبه منظم تراز منابع و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، امکان عبور از مدیریت مبتنی بر برآوردهای مقطعی به مدیریت مبتنی بر شواهد را فراهم می‌کند. تجربه‌های مطرح شده در گزارش، از توسعه سامانه‌های ثبت و صحت‌سنجی داده و محاسبه هوشمند تراز آب زیرزمینی تا کاربرد داده‌های برخط در مدیریت شبکه شهری، مؤید همین تغییر است. بااین‌حال، این تحول تنها در صورتی پایدار خواهد بود که داده از یک محصول فنی به یک دارایی حکمرانی تبدیل شود؛ یعنی استاندارد تولید و اعتبارسنجی آن روشن باشد، مسئولیت مالکیت و به‌روزرسانی مشخص شود، دسترسی به داده‌های مورد نیاز نهادهای تصمیم‌گیر امکان‌پذیر باشد و خروجی آن در تصمیم‌های تخصیصی و نظارتی به‌طور واقعی مورد استفاده قرار گیرد.

در سمت مصارف نیز یافته‌های گزارش بر ضرورت عبور از برداشت «فناوری = افزایش راندمان فنی» تأکید دارد. آبیاری هوشمند، سنجش وضعیت مزرعه، مدیریت داده‌محور، بازچرخانی پساب، کاهش هدررفت شبکه و سایر راهکارهای فناورانه زمانی به پایداری منابع کمک می‌کنند که در چارچوب تراز آب و قواعد تخصیص قرار گیرند. افزایش بهره‌وری در واحد مصرف‌کننده، اگر بدون کنترل سقف برداشت و بدون اصلاح انگیزه‌های اقتصادی رخ دهد، لزوماً به کاهش فشار بر منابع منجر نمی‌شود. بنابراین فناوری باید با سیاست‌های الگوی کشت، حقوق و سهم آب، قیمت‌گذاری، مشوق‌ها، محدودیت برداشت و شاخص‌های عملکرد حوضه‌ای پیوند داشته باشد. این نکته یکی از مهمترین تفاوت‌های میان «کاربرد فناوری در سطح کاربر» و «کاربرد فناوری در حکمرانی آب» است.

یکی از یافته‌های اساسی گزارش، وجود فاصله میان ظرفیت علمی و فناورانه کشور و میزان نفوذ آن در فرایندهای واقعی مدیریت آب است. در ایران نمونه‌های موفقی از پایش برخط، تله‌متری، مدل‌سازی، سنجش از دور، بومی‌سازی سامانه‌ها، مدیریت هوشمند شبکه و فناوری‌های نوین کشاورزی وجود دارد؛ اما این تجربه‌ها هنوز در بسیاری موارد به یک نظام یکپارچه و مقیاس‌پذیر تبدیل نشده‌اند. شکاف میان نمونه‌های پیشرو و بدنه اصلی بخش آب و کشاورزی، ضعف نظام ترویج و انتقال دانش، فرایندهای اداری طولانی، فاصله میان دانشگاه و بخش اجرا و ضعف سازوکارهای تجاری‌سازی و سرمایه‌گذاری بلندمدت، از عواملی هستند که مانع انتشار فناوری می‌شوند. بنابراین سیاست فناوری آب باید از حمایت صرف از «محصول فناورانه» به سمت حمایت از «حل مسئله» تغییر جهت دهد؛ یعنی معیار حمایت، میزان اثرگذاری بر یک مسئله مشخص منابع یا مصارف آب و قابلیت استقرار و تکرارپذیری آن باشد.

در همین راستا، تجربه‌های بین‌المللی بررسی شده یک پیام مشترک دارند: فناوری موفق معمولاً در دل یک آرایش نهادی مناسب شکل گرفته است. در مدیریت آب زیرزمینی، پایش و مدل‌سازی زمانی اثرگذارند که با قواعد برداشت و سازوکارهای الزام‌آور مدیریت آبخوان همراه باشند؛ بازار آب زمانی می‌تواند به تخصیص انعطاف‌پذیر کمک کند که حقوق آب روشن، نظام پایش معتبر و تنظیم‌گری مؤثر وجود داشته باشد؛ مدیریت سیلاب با راهکارهای سازگار با طبیعت زمانی موفق است که برنامه‌ریزی فضایی و سیاست‌های کاربری زمین با آن هماهنگ باشند؛ و بازچرخانی آب زمانی می‌تواند بخشی از امنیت آبی باشد که استانداردهای کیفی، اعتماد عمومی و چارچوب حقوقی روشن وجود داشته باشد. بنابراین آنچه برای ایران قابل اقتباس است، پیش از هر چیز منطق نهادی و مدیریتی این تجربه‌هاست، نه نسخه فنی آن‌ها.

در شرایط ایران، اهمیت این موضوع به دلیل ساختار پیچیده و شکننده منابع آب دوچندان است. اتکای قابل‌توجه به آبخوان‌ها، نوسان زیاد زمانی و مکانی بارش، تداوم فشار بر منابع، رقابت میان مصارف و تشدید عدم‌قطعیت اقلیمی، نیازمند ساوزکاری است که بتواند به‌صورت مستمر وضعیت منابع و مصارف را بسنجد، پیامد تصمیم‌ها را پیش‌بینی کند و در صورت تغییر شرایط، سیاست‌ها را اصلاح نماید. چنین نظامی بدون فناوری‌های مناسب امکان‌پذیر نیست، اما فناوری نیز بدون اصلاح قواعد تصمیم‌گیری، شفافیت داده، پاسخگویی نهادی و سازوکارهای اقتصادی هم‌راستا با اهداف

حفاظت از منابع، اثر پایدار ایجاد نخواهد کرد. از این منظر، چالش اصلی ایران را باید نه «فناوری‌گریزی»، بلکه «گسست میان فناوری و حکمرانی» دانست.

براین‌اساس، نخستین اولویت برای توسعه فناوری در مدیریت آب کشور، بازنگری در معماری تصمیم‌گیری و قوانین و مقررات مرتبط با آب است. فناوری باید در نقاطی مستقر شود که بیشترین ارزش تصمیم‌سازی را ایجاد می‌کنند و از تحمیل راهکارهای فناورانه در سطوحی که مسئله اصلی آن‌ها نهادی یا اقتصادی است پرهیز شود. دومین اولویت، ایجاد یک نظام داده‌ای معتبر و یکپارچه برای منابع و مصارف آب است؛ نظامی که داده‌های پایه را استاندارد، قابل ردیابی و قابل استفاده برای سیاست‌گذاری و مدیریت محلی کند. سومین اولویت، پیوند دادن سیاست فناوری با اقتصاد آب است؛ به‌گونه‌ای که قیمت‌ها، یارانه‌ها، الگوی کشت و مشوق‌های سرمایه‌گذاری، رفتار مصرف‌کننده را با اهداف بهره‌وری و حفاظت از منابع هم‌راستا کنند. چهارمین اولویت، تقویت پیوند پایدار دانشگاه، شرکت‌های فناور، بخش خصوصی و دستگاه‌های اجرایی و اصلاح فرایندهای مجوزدهی و خرید دولتی برای پذیرش نوآوری است. پنجمین اولویت، توسعه ظرفیت انسانی و مدیریتی است؛ زیرا حتی پیشرفته‌ترین فناوری بدون مدیر و کارشناس قادر به تبدیل داده به تصمیم نیست.

همچنین لازم است تمرکز سیاست‌گذاری فناوری از «تجهیزمحوری» به «مسئله‌محوری» تغییر کند. در این رویکرد، پیش از انتخاب فناوری باید مسئله، مقیاس اثرگذاری، داده مورد نیاز، گزینه‌های جایگزین، هزینه چرخه عمر، پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی، الزامات نهادی و شاخص سنجش موفقیت مشخص شود. این رویکرد به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع مالی و دسترسی بین‌المللی اهمیت دارد؛ زیرا منابع محدود باید به فناوری‌هایی اختصاص یابد که یک گلوگاه واقعی در مدیریت آب را برطرف می‌کنند. بومی‌سازی نیز در همین چارچوب باید به معنای ایجاد ظرفیت حل مسئله و نگهداری و توسعه مستمر باشد، نه صرفاً جایگزینی یک تجهیز وارداتی با نمونه داخلی.

در نهایت، مهمترین نتیجه این کنکاش آن است که آینده فناوری آب در ایران بیش از آنکه به میزان خرید یا تولید تجهیزات وابسته باشد، به کیفیت حکمرانی و خردورزی در انتخاب و به‌کارگیری فناوری وابسته است. ایران از ظرفیت علمی، انسانی و تجربی قابل‌توجهی برای حرکت به سمت مدیریت داده‌محور و تطبیقی آب برخوردار است؛ اما بهره‌گیری از این ظرفیت مستلزم آن است که فناوری از حاشیه پروژه‌های اجرایی به متن فرایند سیاست‌گذاری و مدیریت منتقل شود. فناوری باید به مدیر کمک کند مسئله را دقیق‌تر ببیند، گزینه‌ها را واقع‌بینانه‌تر مقایسه کند، پیامد تصمیم را پیش‌بینی کند، عملکرد را بسنجد و در زمان مناسب تصمیم خود را اصلاح کند. اگر این زنجیره شکل نگیرد، حتی فناوری‌های پیشرفته نیز ممکن است صرفاً به تولید داده، افزایش هزینه و اجرای پروژه‌های منفرد منجر شوند. اما اگر فناوری در بستر حکمرانی شفاف، داده معتبر، اقتصاد سازگار با حفاظت از منابع، مسئولیت‌پذیری نهادی و مشارکت ذی‌نفعان قرار گیرد، می‌تواند از یک ابزار فنی به یکی از پایه‌های تحول در مدیریت منابع و مصارف آب کشور تبدیل شود.

برای تکمیل جمع‌بندی، یافته‌های راهنمای FAO-IWMI یک نکته مهم دیگر را به بحث حاضر اضافه می‌کند: موفقیت فناوری را باید در «عملکرد سامانه» جست‌وجو کرد، نه در میزان ورود تجهیزات. این راهنما بر این اساس، عملکرد پایین برخی سامانه‌های آبیاری را به ترکیبی از ضعف بهره‌برداری و نگهداری، کمبود ظرفیت فنی و ضعف ترتیبات نهادی نسبت می‌دهد و پیشنهاد می‌کند سیاست‌ها از تمرکز محدود بر تحویل زیرساخت به سمت مدیریت عملکردمحور و ظرفیت‌محور حرکت کنند (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶). این نتیجه با یکی از محورهای اصلی کنکاش، یعنی ضرورت عبور از تجهیزمحوری به مسئله‌محوری، هم‌خوان است.

از منظر این گزارش، می‌توان یک معیار سه لایه برای سنجش ارزش مدیریتی فناوری پیشنهاد کرد: نخست، آیا فناوری شناخت و کیفیت داده را بهبود داده است؟ دوم، آیا این داده و تحلیل واقعاً کیفیت تصمیم و اجرای آن را ارتقا داده است؟ و سوم، آیا نتیجه در مقیاس منبع یا حوضه به بهبود قابل‌اندازه‌گیری در بهره‌وری، کاهش ریسک یا حفاظت از منابع منجر شده است؟ این تفکیک اهمیت دارد، زیرا ممکن است یک فناوری در سطح واحد مصرف‌کننده موفق باشد، اما اثر آن در مقیاس حوضه به دلیل نبود قواعد برداشت، تغییر الگوی مصرف یا افزایش تقاضا محدود شود. راهنمای IWMI نیز بر ضرورت پیوند فناوری با ظرفیت نهادی، سازوکارهای تأمین مالی، بازار و حکمرانی تأکید می‌کند (Zemadim و همکاران، ۲۰۲۶).

در نهایت، استفاده از تجربه بین‌المللی برای ایران باید از جنس «اقتباس از منطق مدیریتی» باشد، نه انتقال مستقیم تجهیزات یا نسخه‌های فنی. در راهنمای IWMI، حتی انتخاب میان فناوری‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای، بارانی، سنترپیوت، سامانه‌های خورشیدی و فناوری‌های هوشمند به شرایط آب، اقلیم، مقیاس، انرژی، ظرفیت انسانی و ترتیبات نهادی وابسته دانسته شده است. بنابراین، برای ایران نیز سیاست فناوری آب باید از نقطه تعریف مسئله آغاز شود و سپس به انتخاب فناوری، طراحی نهادی، تأمین مالی، ظرفیت‌سازی، بهره‌برداری، پایش و ارزیابی برسد. چنین رویکردی احتمال تبدیل پروژه‌های منفرد به ظرفیت‌های پایدار و قابل تکرار را افزایش می‌دهد.

برآیند این شواهد را می‌توان در یک گزاره خلاصه کرد: «فناوری در مدیریت آب زمانی ارزشمند است که بخشی از نظام تصمیم‌گیری باشد.» سخت‌افزار بدون نیروی انسانی و رویه مناسب، داده بدون سازوکار تصمیم، مدل بدون استفاده در سیاست‌گذاری، و بهره‌وری فنی بدون کنترل برداشت، هر

یک می‌توانند تنها بخشی از مسئله را حل کنند. اما هنگامی که داده معتبر، تحلیل، تصمیم، اقدام، نگهداری، پاسخگویی و یادگیری در یک زنجیره نهادی به هم متصل شوند، فناوری از یک ابزار فنی به ظرفیت حکمرانی تبدیل می‌شود. این برداشت، هم با یافته‌های کنکاش درباره ضرورت خردورزی و بازنگری سیاست‌ها سازگار است و هم با چارچوب FAO–IWMIدرباره پیوند میان فناوری، ظرفیت انسانی، عملیات و نگهداری و حکمرانی.

منابع

شرکت مدیریت منابع آب ایران. (۱۴۰۱). گزارش‌های سالانه پایش و بهره‌برداری از منابع آب کشور. تهران.

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. (۱۴۰۱). گزارش عملکرد طرح‌های آب و فاضلاب و بازچرخانی پساب. تهران.

سازمان حفاظت محیط‌زیست. (۱۳۹۹). گزارش ملی زیرساخت‌های سبز و مدیریت جامع سیلاب. تهران.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۳۹۸). چالش‌های بهره‌وری آب در بخش کشاورزی ایران. تهران.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۰). گزارش توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در کشور. تهران.

Abu Dhabi Media Office. (2023). ADQ and Safe Haven Solutions partner to develop advanced greenhouse facility at AgTech Park. https://www.mediaoffice.abudhabi/en/economy/adq-and-safe-haven-solutions-partner-to-develop-advanced-greenhouse-facility-at-agtech-park/

AgriNext. (2025). Greenhouse technology in the UAE: A sustainable leap forward. https://agrinextcon.com/greenhouse-technology-in-the-uae-a-sustainable-leap-forward/

AgroInvest Spain. (2024). Smart irrigation technologies 2025: The future of sustainable farming in Spain. https://www.agroinvestspain.com/smart-irrigation-technologies-2025-the-future-of-sustainable-farming-in-spain/

Al-Ismaili, A. M., & Jayasuriya, H. (2016). Seawater greenhouse in Oman: A sustainable technique for freshwater conservation and production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 653–664. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.016.

Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. AgriEngineering, 7(4), 106. https://doi.org/10.3390/agriengineering7040106

Australian Government. (2010). Water for the future: National Water Initiative. Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities. https://www.aph.gov.au

Bloomberg. (2026). World's tallest vertical farm opens in Singapore. https://www.bloomberg.com

Bureau of Meteorology (BOM). (2020). National groundwater monitoring program. Government of Australia. https://www.bom.gov.au

California Department of Water Resources. (DWR). (2021). SGMA monitoring and reporting requirements. https://water.ca.gov

California State Water Resources Control Board. (2024). Direct potable reuse regulations. https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/dpr-regs.html

Covaliu-Mierlă, C. I., Păunescu, O., & Iovu, H. (2023). Recent advances in membranes used for nanofiltration to remove heavy metals from wastewater: A review. Membranes, 13(7), 643. https://doi.org/10.3390/membranes13070643

CSIRO. (2021). Solar-powered desalination research in Australia. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Melbourne, Australia.

DAFF. (2024). Annual report for the Department of Agriculture, Fisheries and Forestry for the financial year 2024–25. https://www.agriculture.gov.au

EDB Singapore. (2023). Dutch firm's vertical mega farm to produce up to 500 tonnes of leafy greens in Singapore. https://www.edb.gov.sg

European Commission. (2020). The EU Floods Directive: Implementation and results. https://ec.europa.eu

European Commission. (2024). CAP strategic plan – Netherlands. https://agriculture.ec.europa.eu

Fanack Water. (2025). Iran water report. https://water.fanack.com/iran

King County. (۲۰۲۶). Rain gardens and green stormwater infrastructure. https://kingcounty.gov

Koo, K.-M., Han, K.-H., Jun, K.-S., Lee, G., & Yum, K.-T. (2021). Smart water grid living-lab in Korea. Sustainability, 13(9), 5325. https://doi.org/10.3390/su13095325

Lamm, F. R., & Trooien, T. P. (2003). Subsurface drip irrigation for corn production: A review of 10 years of research in Kansas. Applied Engineering in Agriculture, 19(2), 125–131. https://doi.org/10.1007/s00271-003-0085-3

Ludvig Svensson. (2024). Greenhouse technology helps Armela Farms provide fresh greens and reds in the Abu Dhabi desert. Ludvig Svensson.

Martínez-Gimeno, M.A., Jiménez-Bello, M.A., Lidón, A., Manzano-Juárez, J., Badal, E., Pérez-Pérez, J.G., Bonet, L., Intrigliolo, D.S., & Esteban, A. (2020). Mandarin irrigation scheduling by means of frequency domain reflectometry soil moisture monitoring. Agricultural Water Management 235:106151

Montagu, K. D., Thomas, B., Thomas, G., et al. (2006). Understanding Irrigation Decisions: From Enterprise Planning to the Paddock. Irrigation Insights No. 6. Land & Water Australia, Canberra, ACT, Australia.

NDMA. (2019). National disaster management plan. National Disaster Management Authority, Ministry of Home Affairs, Government of India, New Delhi, India.

NOAA. (2023). Deep learning models for flood prediction. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.noaa.gov

NYC Department of Environmental Protection. (2026). Green infrastructure. https://www.nyc.gov/site/dep/water/green-infrastructure.page

Ramos, H. M., Kuriqi, A., Besharat, M., Creaco, E., Tasca, E., & Iglesias-Rey, P. (2023). Smart water grids and digital twins for system efficiency. Water, 15(6), 1129. https://doi.org/10.3390/w15061129

Rijkswaterstaat. (2016). Room for the River Programme: Safety and spatial quality. Ministry of Infrastructure and the

Federal Ministry for the Environment. (2022). German flood protection programme. Government of Germany. Germany.

GFZ German Research Centre for Geosciences. (2022). AI-based flood forecasting research. https://www.gfz-potsdam.de

Ghomeshi, M. (2023). The main challenges of Iran's water and future prospects. Iranian Water Engineering Research. https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.503881.1058

Google Research. (2021). Flood forecasting initiative in India. https://research.google

Grafton, R. Q., Chu, H., & Wheeler, S. A. (2018). Economics of water recovery in the Murray–Darling Basin, Australia. Annual Review of Resource Economics, 10, 487-510.
https://doi.org/abs/10.1029/2018EF000879

Hao, L., Liu, M., Wang, N., & Li, G. (2018). A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. RSC Advances, 8(72), 39545–39560.
https://doi.org/10.1039/C8RA08512A

Hamidifar, H. (2024). Water crisis in Iran: Causes, consequences, and solutions. Springer Nature.

Hortidaily. (2023). JPFA symposium highlights: Vertical farming's future in Japan and beyond. https://www.hortidaily.com/

Hortidaily. (2024). Oman gets smart greenhouse to boost sustainable production. https://www.hortidaily.com/article/9763697/oman-gets-smart-greenhouse-to-boost-sustainable-production/

Husqvarna. (2024). National retailer case study: Water conservation through smart irrigation. Husqvarna Water Management. https://husqvarna-water.com/wp-content/uploads/2024/04/ETW-NationalRetail-CaseStudy2_Husqvarna.pdf

Indoor Farmer. (2024). Case study: Japan's vertical farming story. https://www.indoorverticalfarm.com

Israel Water Authority. (2020). Water sector reforms and desalination strategy. Government of Israel.

Irrigation Technologies. International Water Management Institute (IWMI). https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/96ac3089-cc60-4081-8704-1f26ba6a5ff2/download

پی‌نوشت‌ها

1-Abu Dhabi Developmental Holding Company

یکی از بزرگترین هولدینگ‌های دولتی امارات (ابوظبی)

۲- برنامه‌ای از وزارت کشاورزی آمریکا است که برای ارتقای بهره‌وری آب و حمایت مالی از کشاورزان در به‌کارگیری فناوری‌های آبیاری کارآمد طراحی شده است.

۳- سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی استرالیا است که در حوزه‌های آب، کشاورزی و فناوری‌های نوین، تحقیقات کاربردی و سیاست‌محور انجام می‌دهد.

۴- برنامه‌ای ملی ۳۰ (30 by 30) که هدف آن افزایش تولید داخلی غذا به ۳۰ درصد تا سال ۲۰۳۰ است و با حمایت مالی، فناوری و سیاست‌گذاری، توسعه کشاورزی نوین را تسریع می‌کند.

۵- German Research Centre for Geosciences (GFZ): یک مرکز دولتی پژوهشی در آلمان که در حوزه علوم زمین، مخاطرات طبیعی و مدل‌سازی پیشرفته مانند پیش‌بینی سیلاب فعالیت می‌کند.

۶- Indian Institute of Technology(IIT): مجموعه‌ای از دانشگاه‌های دولتی و پژوهش‌محور در هند که در حوزه مهندسی، فناوری و پروژه‌های ملی مانند مدل‌سازی سیلاب با هوش مصنوعی فعالیت دارند.

۷- National Disaster Management Plan (NDMP): برنامه ملی و دولتی هند برای مدیریت بحران و کاهش ریسک بلایا که بر استفاده از فناوری‌های نوین مانند مدل‌سازی سیلاب تأکید دارد.

۸- NOAA: سازمان دولتی ایالات متحده در حوزه اقیانوس‌شناسی، هواشناسی و پیش‌بینی مخاطرات طبیعی، از جمله توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سیلاب.

۹- Sustainable Groundwater Management Act (SGMA): قانونی دولتی در کالیفرنیا (۲۰۱۴) که مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی را الزامی می‌کند و بر پایش لحظه‌ای، کاهش برداشت و احیای آبخوان‌ها تأکید دارد.

۱۰- CSIRO:سازمان دولتی پژوهش‌های علمی و صنعتی استرالیا که در حوزه‌های آب، کشاورزی، اقلیم و فناوری‌های نوین مدیریت منابع طبیعی فعالیت می‌کند.

۱۱- Water Act: قانونی ملی و دولتی در استرالیاست که چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب، از جمله بازارهای آب، تخصیص پایدار، حفاظت از اکوسیستم‌های آبی و نظارت بر برداشت آب سطحی و زیرزمینی را تعیین می‌کند. این قانون پایه اصلی اصلاحات آب در حوضه موری–دارلینگ است.

Environment, Netherlands. https://www.rijkswaterstaat.nl

Silal. (2023). Silal launches a world-class R&D center to bolster agri-food innovation and industry eco-system. Silal Food & Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates.

Seattle Public Utilities. (۲۰۲۶.). RainWise program. https://www.seattle.gov/utilities/protecting-our-environment/rainwise

Shokri, N. (2025). Iran's water crisis is driven by bad policies, but tech can help. Thomson Reuters Foundation. https://www.context.news

Singapore Food Agency. (2019). 30 by 30: Singapore's food security strategy. https://www.sfa.gov.sg

SWCC. (2023). Low-energy desalination initiatives in Saudi Arabia. Saline Water Conversion Corporation.

Tal, A. (2016). Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Drylands. Water Research, 88, 87–94. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.016.

UAE Ministry of Climate Change and Environment. (2023). A Guide to Food Security in the UAE. UAE.

UAE Government. (2024). National Food Security Strategy 2051. UAE.

UAE Government. (2024a). UAE water security strategy 2036. https://u.ae/en/information-and-services/environment-and-energy/water-and-energy/water-

UAE Government. (2024b). National Food Security Strategy 2051. UAE.

USDA. (2022). Environmental Quality Incentives Program (EQIP). United States Department of Agriculture. https://www.usda.gov

USGS. (2022). Real-time groundwater monitoring systems in California. United States Geological Survey. https://www.usgs.gov

World Bank. (2021). Energy-efficient desalination technologies in the Middle East. World Bank Group, Washington, DC, USA.

Zemadim, B., Oke, A., Dirwai, T. L., Admasu, Z., Choruma, D. J., Dickson, J., Nzeyimana, V., & Hafeez, M. (2026). Comprehensive Guidelines for Capacity Building for Irrigation Managers in Water Management within Modern

۱۲- Water Code: قانون ملی و دولتی شیلی که از دهه ۱۹۸۰ نظام حقوق مالکیت آب را تعریف کرده و امکان خریدوفروش حقوق آب، از جمله آب زیرزمینی، را فراهم می‌کند. این قانون پایه شکل‌گیری بازارهای آب در شیلی بوده و در سال‌های اخیر برای حفاظت بیشتر از آبخوان‌ها اصلاح شده است.

۱۳- RO (Reverse Osmosis): مخفف اسمز معکوس است؛ یک فناوری غشایی پیشرفته که با اعمال فشار، نمک و ناخالصی‌ها را از آب جدا می‌کند و یکی از کم‌مصرف‌ترین روش‌های نمک‌زدایی محسوب می‌شود.

۱۴- Saudi Vision 2030: برنامه‌ای ملی و دولتی در عربستان سعودی که با هدف تنوع‌بخشی اقتصادی، توسعه پایدار و بهبود مدیریت منابع آب طراحی شده و بر گسترش فناوری‌های نوین نمک‌زدایی و انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید دارد.

۱۵- Water Authority Reform: مجموعه‌ای از اصلاحات دولتی در ساختار مدیریت آب اسرائیل که با هدف افزایش کارایی، تنظیم‌گری یکپارچه و توسعه فناوری‌های کم‌انرژی مانند نمک‌زدایی غشایی اجرا شده است.

۱۶- برنامه‌ای مشترک میان Seattle Public Utilities و King County است که با هدف کاهش رواناب و جلوگیری از ورود آب باران به سیستم فاضلاب ترکیبی اجرا می‌شود. این طرح با ارائه مشوق‌های مالی به ساکنان، ایجاد Rain Gardens و Cisterns را در املاک مسکونی و تجاری ترویج می‌کند.