Lorestan University

Applied Researches in Water Engineering
Vol. 2, No. 2, Autumn & Winter 2024, p. 263-290

ARWE

Original Research

Integrated and Comprehensive Approaches to Water Resources Management: Blending Novel Irrigation Technologies and Unconventional Water Sources in Sustainable Agriculture

Mani Jabbari[1], Paria Pourmohammad[2], Iman Hajirad[*3], Mitra Jabbari[4]

1. Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Iran.
2. Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4. Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 31 October 2024/ **Revised:** 11 December 2024/ **Accepted:** 26 January 2025

https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2076443.1047

Abstract

The scarcity of freshwater resources represents one of the most critical challenges to achieving sustainable agriculture in arid and semi-arid regions. Enhancing water use efficiency and minimizing resource losses play a pivotal role in promoting sustainable development. This study explores a comprehensive and integrated framework for agricultural water resource management that encompasses the utilization of non-conventional water sources alongside the adoption of advanced irrigation technologies. The findings reveal that the integration of these strategies not only reduces water consumption and losses but also maintains or enhances crop yield and quality, thereby strengthening the resilience of agricultural systems under water-scarce conditions. Furthermore, the combination of smart irrigation technologies, soil moisture sensors, and rainwater harvesting systems enables precise irrigation scheduling and optimization of water application in both time and quantity. This approach alleviates pressure on conventional water resources while minimizing adverse environmental impacts. Overall, the results suggest that implementing such a holistic and integrated management approach can serve as an effective strategy to ensure food security, conserve water resources, and foster sustainable agricultural development at both regional and national scales. Moreover, it provides policymakers and decision-makers with a robust foundation for improving water resource planning and management, taking into account the constraints and climatic conditions characteristic of arid and semi-arid regions.

Keywords: Integrated Water Resources Management, Smart Irrigation, Water Use Efficiency, Water Resources Resilience.

***Corresponding Author Email:** i.hajirad@ut.ac.ir

Lorestan University

دوفصلنامهٔ پژوهش‌های کاربردی مهندسی آب
دورهٔ دوم، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳ (صفحات ۲۶۳-۲۹۰)

ARWE

مقالهٔ پژوهشی

رویکردهای جامع و یکپارچه در مدیریت منابع آب با تلفیق فناوری‌های نوین آبیاری و آب‌های نامتعارف در کشاورزی پایدار

مانی جباری[۱]، پریا پورمحمد[۲]، ایمان حاجی‌راد*[۳]، میترا جباری[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران.
۲. گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده مناطق طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

دریافت: ۱۰ آبان ماه ۱۴۰۳/ **اصلاحات:** ۲۱ آذر ماه ۱۴۰۳/ **پذیرش:** ۰۷ بهمن ماه ۱۴۰۳

https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2076443.1047

چکیده

کمبود منابع آب شیرین یکی از چالش‌های اصلی کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش هدررفت منابع، نقش کلیدی در توسعه پایدار دارد. این پژوهش به بررسی یک رویکرد جامع و یکپارچه در مدیریت منابع آب کشاورزی می‌پردازد که شامل بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف و به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب این راهبردها، ضمن کاهش مصرف آب و هدررفت آن، توانسته عملکرد و کیفیت محصولات را حفظ یا ارتقا دهد و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را در شرایط کم‌آبی افزایش دهد. علاوه بر این، تلفیق فناوری‌های هوشمند آبیاری، سنسورهای رطوبت خاک و جمع‌آوری آب باران، امکان برنامه‌ریزی دقیق و بهینه‌سازی زمان و مقدار آبیاری را فراهم می‌آورد، در حالی که فشار بر منابع آب متعارف کاهش یافته و اثرات زیست‌محیطی منفی به حداقل می‌رسد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی چنین رویکرد جامع و یکپارچه‌ای می‌تواند راهکاری مؤثر برای تضمین امنیت غذایی، حفظ منابع آب و توسعه پایدار کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای و ملی باشد، و به تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران امکان دهد تا برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب را با توجه به محدودیت‌ها و شرایط اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک بهبود دهند.

کلمات کلیدی: آبیاری هوشمند، بهره‌وری آب، تاب‌آوری منابع آب، مدیریت یکپارچه منابع آب.

***Corresponding Author Email:** i.hajirad@ut.ac.ir

مقدمه

تأمین غذا و منابع آب کافی برای کشاورزی، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در قرن بیست و یکم است. اکوسیستم‌های کشاورزی تأمین‌کنندگان اصلی غذا هستند، اما در عین حال بخش عمده‌ای از منابع آب جهان را مصرف می‌کنند (Damkjaer and Taylor, 2017). منابع آب شیرین تحت فشار عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی جهانی، تغییرات در استفاده از زمین، گسترش کشاورزی و شهرنشینی، بهره‌برداری بیش از حد و توسعه اقتصادی قرار دارند، که همگی منجر به تخریب و کاهش دسترسی به منابع آب می‌شوند (Liu et al., 2017). طبق گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل، بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین است و بیش از ۷۰٪ از مصرف جهانی را تشکیل می‌دهد (UN-Water, 2020).

بیش‌تر محصولات کشاورزی به آبیاری وابسته هستند و توسعه سریع کشاورزی آبی نقش بزرگی در افزایش عملکرد محصولات داشته است (Özerol et al., 2012). با این حال، همه کشورهای جهان با چالش‌های کمبود آب مواجه‌اند. از سوی دیگر، افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین، توزیع ناهموار منابع و محدودیت منابع آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تأمین تقاضای آب کشاورزی به منابع شیرین دشوار است و هزینه‌های آبیاری به طور پیوسته افزایش می‌یابد، باعث ایجاد عدم تعادل بین عرضه و تقاضا شده است. (Rzayev, 2017).

رشد سریع جمعیت جهانی و افزایش مداوم تقاضا برای غذا، فشار فزاینده‌ای بر منابع طبیعی وارد کرده است. پیش‌بینی می‌شود طی دهه‌های آینده، نزدیک به یک‌سوم سطح زمین برای تولید محصولات کشاورزی و گسترش مراتع مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در عین حال، روند فزاینده گرمایش جهانی و تغییر در الگوهای بارندگی، دسترسی به منابع آب شیرین را محدود کرده و به‌تبع آن، فشارهای اجتماعی و اقتصادی قابل‌توجهی بر جوامع انسانی تحمیل می‌کند (Nashwan and Shahid, 2022). مساحت جهانی محصولات آبی حدود ۲۷۵ میلیون هکتار است و روند رشد سالانه آن ۳/۱ درصد گزارش شده است. این تنها ۲۳٪ از زمین‌های کشاورزی را تشکیل می‌دهد، اما ۴۵٪ از کل تولید مواد غذایی از طریق این محصولات به دست می‌آید (Zhang et al., 2017). برای تأمین نیازهای غذایی جهان در سال ۲۰۵۰، تولید جهانی باید ۷۰٪ افزایش یابد و برای تحقق این هدف، استفاده از منابع آب باید ۵۳٪ افزایش یابد (Malinowski Patricia et al., 2015).

در مواجهه با چالش‌های فزاینده ناشی از کمبود و ناپایداری منابع آب، مدیریت جامع و یکپارچه این منابع اهمیت فزاینده‌ای یافته است. چنین رویکردی بر ادغام دو راهبرد کلیدی بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف و به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری، به‌منظور افزایش کارایی و پایداری مصرف آب در بخش‌های مختلف استوار است. تلفیق این راهبردها، علاوه بر کاهش فشار بر منابع آب شیرین، نقش مهمی در ارتقای بهره‌وری و پایداری سیستم‌های کشاورزی ایفا می‌کند. نمونه‌های موفق جهانی در این زمینه شامل استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده و آب شیرین‌سازی‌شده هستند که توانسته‌اند فشار بر منابع آب شیرین را کاهش داده و پایداری بخش کشاورزی را بهبود بخشند (Hu & Wu, 2018). برای مثال استفاده از ۳۰٪ فاضلاب تصفیه‌شده در سنگاپور، ۹۰ تا ۹۷٪ در قبرس، ۷۸٪ در عمان و کاربرد آب شیرین‌کن‌ها در عربستان سعودی برای تولید محصولات کشاورزی است (Haq & Khan, 2022). علاوه بر این، تکنیک‌های جمع‌آوری آب باران، ذخیره رواناب سطحی و استفاده از آب بازیافتی برای آبیاری محصولات، نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب، کاهش تبخیر و حفظ کیفیت خاک دارند (Yannopoulos et al., 2016). با این حال، استفاده از آب‌های نامتعارف بدون انجام تصفیه و پایش کیفی مناسب، خطر تجمع فلزات سنگین، آلاینده‌های شیمیایی، میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و سایر ترکیبات مضر را در خاک و زنجیره غذایی افزایش می‌دهد (Xue et al., 2012). بدین ترتیب ضرورت توسعه فناوری‌های کارآمد تصفیه، به‌کارگیری روش‌های آبیاری بهینه و پایش مستمر کیفیت آب و خاک ضروری است. در میان منابع آب غیرمتعارف، آب شور یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود. استفاده از فناوری‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای، آبیاری متناوب و آبیاری ترکیبی با توزیع یکنواخت آب و زمان‌بندی دقیق آبیاری، باعث کاهش تجمع شوری در سطح خاک و شستشوی نمک‌ها می‌شود و به این ترتیب اثرات منفی آب شور بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به حداقل می‌رسد. استفاده از فاضلاب شهری و صنعتی نیز سابقه‌ای طولانی در بخش کشاورزی دارد و رعایت فرآیندهای تصفیه مناسب و محدودیت‌های کیفی، برای تضمین ایمنی محصولات و پایداری خاک، ضروری است (Arora

et al., 2008). آبیاری با فاضلاب در صورت تصفیه ناقص می‌تواند منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین و باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک در خاک شود که سلامت انسان و کیفیت محصولات کشاورزی را تهدید می‌کند (Macherius et al., 2012).

بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب در بخش کشاورزی با بهره‌گیری از آب‌های نامتعارف نیازمند رویکردی جامع است که شامل تصفیه مناسب، پایش مستمر، انتخاب روش‌های آبیاری بهینه و ترکیب راهکارهای صرفه‌جویی آب باشد. با عنایت به فشار شدید وارد بر منابع آب تجدیدپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهره‌برداری از آب‌های نامتعارف نه تنها به تأمین نیازهای کشاورزی کمک می‌کند، بلکه نقش مهمی در کاهش فشار بر منابع آب شیرین، افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و تحقق توسعه پایدار در این مناطق ایفا می‌کند. بدین ترتیب و با توجه به موارد بیان‌شده، هدف این مطالعه، بررسی و تحلیل کاربرد منابع آب نامتعارف در مدیریت پایدار آب بخش کشاورزی است. این پژوهش بر شناسایی نقش آب‌های بازیافتی، آب شور، آب باران و دیگر منابع غیرمتعارف در کاهش فشار بر منابع آب شیرین، ارتقای بهره‌وری آبیاری و بهبود پایداری بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تمرکز دارد. همچنین، مطالعه حاضر به ارزیابی فناوری‌های تصفیه و روش‌های آبیاری بهینه مرتبط با استفاده از آب‌های نامتعارف و اثرات زیست‌محیطی و سلامت انسانی آنها می‌پردازد تا چارچوبی علمی برای استفاده مؤثر و پایدار از این منابع فراهم آورد.

پیشینه تحقیق

مطالعات اخیر به طور گسترده به بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف، به‌ویژه آب‌های بازیافتی، در کشاورزی تحت شرایط کم‌آبی پرداخته‌اند. Ballesteros-Olza et al. (2022) نشان دادند که استفاده از آب‌های بازیافتی به‌عنوان یک جایگزین پایدار در کشاورزی اسپانیا، علاوه بر امکان‌پذیری فنی، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی نیز فراهم می‌کند. به موازات آن، Expósito et al. (2024) با انجام ارزیابی جامع هزینه‌های تولید آب بازیافتی برای مصارف کشاورزی در حوزه مدیترانه، نشان دادند که پذیرش این فناوری به توان مالی کشاورزان و بازگشت سرمایه بستگی دارد و این عامل نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت آن دارد. Abou-Shady et al. (2023) روندهای استفاده مجدد از آب در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ را بررسی و ۱۷ مانع اصلی از جمله چالش‌های قانونی، مالی و فنی را شناسایی کردند. در مقابل، آن‌ها ۱۰ مزیت کلیدی استفاده از آب بازیافتی را معرفی کردند که اهمیت این فناوری در امنیت آبی جهانی را نمایان می‌سازد. Silva (2023) نیز در یک مرور نظام‌مند بر بازچرخانی فاضلاب شهری، تأکید کرد که ادغام سامانه‌های بازچرخانی در برنامه‌ریزی شهری می‌تواند به توسعه پایدار شهرها کمک شایانی نماید. Florides et al. (2023) تصویری جامع از وضعیت جهانی بازچرخانی آب ارائه کردند و به بررسی نوآوری‌های فناورانه، سیاست‌های کلان و چارچوب‌های نهادی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده مجدد از آب، علاوه بر کاهش فشار بر منابع آبی طبیعی، بهره‌وری منابع را بهبود بخشیده و دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی را تسهیل می‌کند. در همین راستا، Sampaio et al. (2024) با تمرکز بر ابعاد مختلف پایداری، تأکید کردند که موفقیت برنامه‌های بازچرخانی آب مستلزم توجه هم‌زمان به مؤلفه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. مشارکت فعال ذی‌نفعان، مدیریت ریسک‌های بهداشتی، انتخاب فناوری‌های متناسب با شرایط محلی و پایبندی به الزامات قانونی از جمله عوامل تعیین‌کننده در تضمین اثربخشی و پایداری این برنامه‌ها به شمار می‌روند.

با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی مدیریت منابع آب و فشار فزاینده بر منابع آب شیرین، دستیابی به مدیریت پایدار آب در کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مستلزم رویکردی چندلایه و یکپارچه است. این رویکرد باید هم بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف، شامل آب شور، آب بازیافتی و جمع‌آوری آب باران، و هم به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری قطره‌ای، کم‌آبیاری کنترل‌شده و سامانه‌های هوشمند مبتنی بر حسگر و نرم‌افزار مدیریت آب، را در نظر بگیرد. ترکیب این راهبردها امکان کاهش فشار بر منابع آب شیرین، افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و بهبود بهره‌وری مصرف آب را فراهم می‌کند. پژوهش حاضر با تحلیل دقیق این مؤلفه‌ها و بررسی کاربردهای تلفیقی آن‌ها، قصد دارد راهکارهای عملی و قابل اجرا برای مدیریت پایدار منابع آب در کشاورزی ارائه دهد و به سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران کمک کند تا ضمن ارتقای عملکرد محصولات، فشار بر منابع محدود آب را کاهش دهند.

چارچوب مفهومی

تغییرات اقلیمی[1]، تأثیرات محیط‌زیستی و حفاظت از منابع طبیعی

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم، تأثیرات گسترده‌ای بر چرخه هیدرولوژیک، کیفیت و کمیت منابع آب دارد و ثبات پایداری اکوسیستم‌های آبی را به مخاطره می‌اندازد. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و وقوع شدید خشکسالی‌های طولانی‌مدت و سیلاب‌های ناگهانی می‌تواند منجر به بی‌ثباتی منابع آب شیرین در سطح جهانی شود (Velasco-Muñoz et al., 2018). بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تحت تأثیر این تغییرات قرار می‌گیرد؛ اثرات شامل کاهش رطوبت خاک، افزایش نرخ تبخیر و تعرق، تغییر بازده رواناب و ناهماهنگی در نیاز آبی گیاهان است (Zhang et al., 2017).

براساس گزارش توسعه منابع آب جهانی سازمان ملل متحد، تا سال ۲۰۳۰، حدود ۴۰ درصد از جمعیت جهان با کمبود آب آشامیدنی مواجه خواهند شد؛ وضعیتی که تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و توسعه پایدار ایجاد می‌کند. در کنار تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری ناپایدار و مدیریت ناکارآمد منابع آب، فشارها را تشدید کرده است. پیامدهای این مدیریت ناکارآمد شامل افت سطح آب‌های زیرزمینی، شور شدن خاک‌های زراعی، نفوذ آب دریا به سفره‌های ساحلی و آلودگی منابع زیرزمینی به ویژه از طریق نیترات‌ها است (Aznar-Sánchez et al., 2019). این روند علاوه بر اثرات مستقیم بر کیفیت و کمیت منابع آب، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی از جمله افزایش هزینه‌های تولید، کاهش درآمد کشاورزان و تهدید امنیت غذایی دارد. از منظر محیط‌زیستی، ادامه چنین شرایطی موجب تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش تنوع زیستی و گسترش پدیده بیابان‌زایی می‌شود (Kögler & Söffker, 2017). در پاسخ به این چالش‌ها، بسیاری از کشورها سیاست‌ها و برنامه‌های ملی و منطقه‌ای برای بهبود بهره‌وری مصرف آب و کاهش اثرات منفی فعالیت‌های کشاورزی بر منابع آبی تدوین کرده‌اند. سازمان ملل متحد نیز در اهداف توسعه پایدار ۲۰۳۰، مدیریت منابع آب و فاضلاب را به‌طور ویژه مورد توجه قرار داده و از استراتژی‌های کاهش کمبود آب، افزایش بهره‌وری مصرف و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی حمایت می‌کند (Vanham et al., 2018). تحقق این اهداف نیازمند تلفیق اصلاح سیاست‌ها، به‌کارگیری فناوری‌های نوین مدیریت آب و تغییر نگرش جهانی به سمت بهره‌برداری پایدار از منابع محدود است. در بخش کشاورزی، استفاده همزمان از فناوری‌های پیشرفته آبیاری، منابع آب نامتعارف و استراتژی‌های مدیریت یکپارچه، می‌تواند نقش محوری در افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی، کاهش فشار بر منابع آب شیرین و تضمین امنیت غذایی ایفا کند.

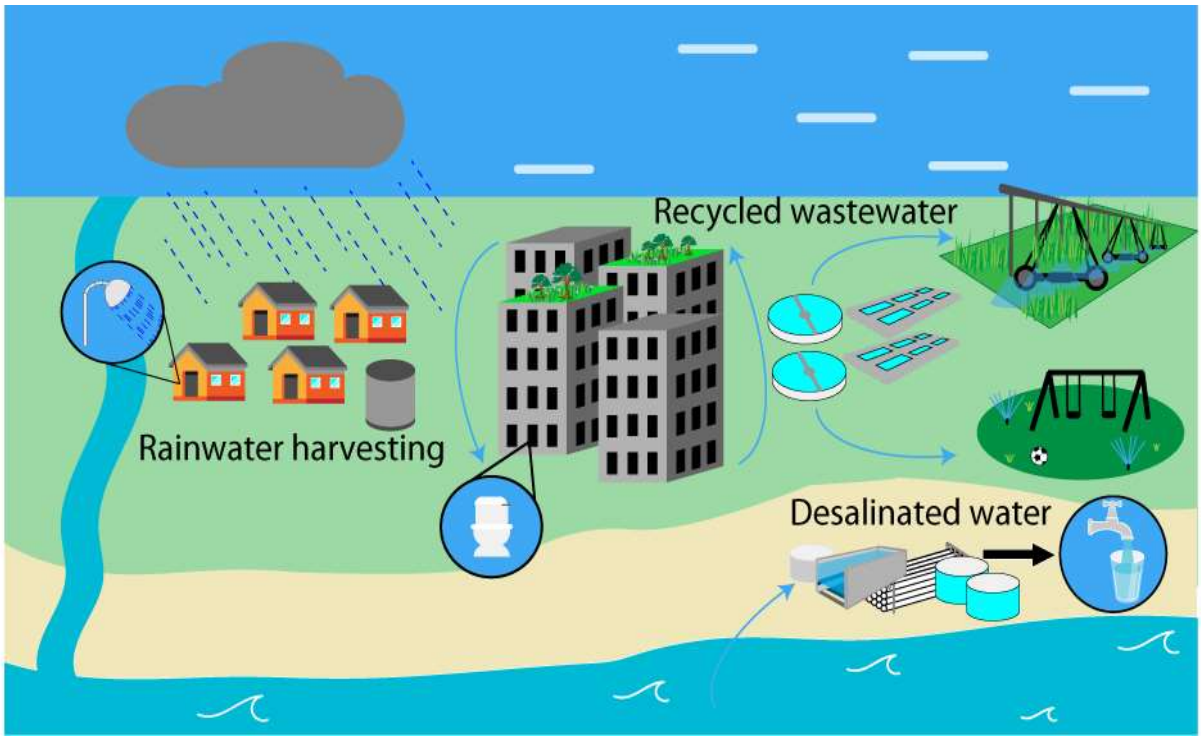
منابع آب نامتعارف[2]

کمبود منابع آب، یکی از چالش‌های کلیدی قرن بیست‌ویکم، یک پدیده چندبعدی با ابعاد فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. عدم تطابق میان منابع آب طبیعی و نیازهای انسانی، همراه با رشد جمعیت، شهرنشینی، صنعتی شدن و تغییرات اقلیمی، فشار بر منابع آب را افزایش داده و در برخی موارد به تنش‌های اجتماعی و حتی درگیری‌های سیاسی منجر شده است (Macedonio et al., 2012). بخش کشاورزی، که بیشترین سهم مصرف آب شیرین جهانی را دارد، بیشترین آسیب را متحمل می‌شود و تأمین پایدار آب برای آن اهمیت ویژه‌ای دارد. به منظور مقابله با بحران کم‌آبی، بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف به‌عنوان یک راهکار پایدار و نوآورانه در دستور کار بسیاری از کشورها قرار گرفته است. این منابع شامل آب‌های شور، فاضلاب تصفیه‌شده، رواناب‌های جمع‌آوری‌شده و حتی بارورسازی ابرها هستند و استفاده از آن‌ها نیازمند فناوری‌های پیشرفته و مدیریت تخصصی است. ظرفیت بالقوه این منابع برای کاهش وابستگی به منابع متعارف و تأمین پایدار آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بسیار چشمگیر است (Yazdandoost et al., 2021). تعریف مدرن آب‌های نامتعارف شامل هر منبعی است که استفاده از آن مستلزم فناوری‌ها و راهکارهای مدیریتی نوین باشد (Ji et al., 2020). نمونه‌هایی مانند فاضلاب تصفیه‌شده، آب‌های شور و آب باران، این امکان را فراهم می‌کنند که منابع پیش‌تر غیرقابل بهره‌برداری به منابع قابل اعتماد تبدیل شوند. در دهه ۱۹۹۰، با پیشرفت فناوری‌های تصفیه، حتی آب‌های زیرزمینی شور یا دارای مواد آلی بالا نیز به‌عنوان منابع نامتعارف شناخته شدند که پیش از مصرف نیازمند فرآیندهای تصفیه و بهسازی بودند (Indelicato et al., 1993). کشورهایی مانند

1. Climate change
2. Unconventional Water Resources

عراق، هند، سوریه، چین، آفریقای جنوبی و تونس، با کاهش بارش و محدودیت منابع آب متعارف، جمع‌آوری و ذخیره آب باران را به‌عنوان یک راهکار عملی دوباره احیا کرده‌اند. حتی در کشورهای با منابع آبی نسبتاً فراوان، نظیر آلمان، از دهه ۱۹۸۰ پروژه‌های جمع‌آوری آب باران به‌طور گسترده اجرا و امکان‌سنجی آن به‌طور علمی بررسی شده است (Ji et al., 2020).

از سوی دیگر، بارورسازی ابرها در سطح جهانی برای افزایش بارش در مناطق خشک به کار گرفته شده است. چین بزرگ‌ترین پروژه‌های باروری ابرها را اجرا کرده و تجربه مشابهی در امارات متحده عربی، ایران، هند و ایالات متحده ثبت شده است (Chien et al., 2017). همچنین، سازه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها برای ذخیره‌سازی آب در سفره‌های زیرزمینی و استفاده در دوره‌های خشکسالی، راهکاری مؤثر در افزایش تاب‌آوری منابع آب به شمار می‌آیند. در خاورمیانه، بهره‌برداری از آب‌های فسیلی تجدیدناپذیر و توسعه این سازه‌ها، به دلیل محدودیت‌های اقلیمی و مشکلات اقتصادی و اجتماعی، به یک ضرورت تبدیل شده است (Rahman et al., 2012). با کاهش مستمر منابع آب متعارف، استفاده از آب‌های نامتعارف به یک گزینه رقابتی برای تأمین نیازهای کشاورزی تبدیل شده است. مطالعات نشان می‌دهند که بهره‌برداری از این منابع، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری منابع آب و امنیت غذایی دارد (Aznar-Sánchez et al., 2017; 2019). این روند بیانگر آن است که منابع نامتعارف نه تنها مکمل منابع متعارف هستند، بلکه به‌عنوان یک استراتژی اصلی برای مدیریت پایدار آب مطرح می‌شوند. به‌طور کلی، بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف به‌عنوان یک ابزار کلیدی برای تحقق مدیریت پایدار منابع آب در بخش کشاورزی شناخته می‌شود. این منابع، گرچه مستلزم فناوری‌های پیشرفته و راهکارهای مدیریتی تخصصی هستند، ظرفیت قابل توجهی برای کاهش فشار بر منابع آب متعارف، ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و مقابله با چالش‌های ناشی از کم‌آبی فراهم می‌کنند. بهره‌برداری کارآمد و پایدار از این منابع نیازمند تدوین چارچوب‌های سیاستی یکپارچه، ایجاد حمایت‌های قانونی مؤثر و سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های نوین است، به‌گونه‌ای که بتواند همزمان اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را تقویت نموده و نقش مؤثری در تضمین امنیت منابع آبی جهانی ایفا کند.



شکل ۱. منابع آب نامتعارف (Quon et al., 2023)

Figure 1. Unconventional Water Resources (Quon et al., 2023)

شکل ۲. سیستم جمع‌آوری آب از مه
Figure 2. Fog Water Harvesting System

روش‌های استحصال آب‌های نامتعارف

استخراج و بهره‌برداری از منابع آب‌های نامتعارف، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای مقابله با بحران جهانی کم‌آبی، مجموعه‌ای از فناوری‌ها و فرآیندهای متنوع را دربرمی‌گیرد که با هدف افزایش دسترسی به منابع جایگزین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته‌اند. این فناوری‌ها نه‌تنها امکان تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب را فراهم می‌کنند، بلکه می‌توانند فشار وارد بر منابع متعارف را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. در میان این فناوری‌ها، تصفیه و بازچرخانی فاضلاب جایگاه ویژه‌ای دارد. این روش، از طریق جمع‌آوری فاضلاب شهری، صنعتی یا کشاورزی و تصفیه چندمرحله‌ای آن، آب را برای استفاده مجدد در آبیاری، صنایع یا حتی مصارف شرب آماده می‌سازد. هرچند هزینه بالای تصفیه کامل و الزامات بهداشتی از محدودیت‌های آن به شمار می‌رود، اما مزایای آن در کاهش فشار بر منابع طبیعی و بهبود کیفیت محیط‌زیست چشمگیر است (Jiménez et al., 2008).

نمک‌زدایی آب دریا و فناوری‌های مرتبط مانند اسمز معکوس و تقطیر چندمرحله‌ای نیز از مهم‌ترین روش‌های تولید آب شیرین از منابع شور محسوب می‌شوند. این فناوری‌ها با حذف نمک‌ها و املاح محلول، آب را به کیفیت قابل‌قبول برای شرب و کشاورزی تبدیل می‌کنند. در حالی که راندمان بالای تولید آب از مزایای این فناوری‌هاست، مصرف زیاد انرژی و تولید پساب شور از چالش‌های زیست‌محیطی آن‌ها به شمار می‌رود (Elimelech & Phillip, 2011; Greenlee et al., 2009; Lattemann & Höpner, 2008). در این میان، روش‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند تقطیر خورشیدی تلاش دارند تا با بهره‌گیری از انرژی خورشید، هزینه‌های انرژی را کاهش داده و امکان استفاده در مناطق روستایی و دورافتاده را فراهم کنند (Kalogirou, 2005). در سطح محلی، استفاده از منابع سطحی و اتمسفری از جمله جمع‌آوری و ذخیره آب باران، استحصال آب از مه و رطوبت هوا، راهکاری مؤثر برای تأمین آب در مناطق با بارش محدود یا رطوبت نسبی بالا فراهم می‌آورد (شکل ۱ و ۲). این روش‌ها معمولاً هزینه کمی دارند و با بهره‌گیری از انرژی طبیعی، امکان تأمین آب در مقیاس‌های کوچک را ایجاد می‌کنند، هرچند راندمان پایین و وابستگی به شرایط اقلیمی از محدودیت‌های آن‌ها است (Gould, 1999; Zamani et al., 2021; Shafeian et al., 2022).

از سوی دیگر، در مناطق دارای منابع زیرسطحی، آب‌های زیرزمینی غیرسنتی و آب‌های فسیلی نیز به‌عنوان گزینه‌هایی قابل استفاده مطرح‌اند. استخراج این منابع، به‌ویژه در شرایط بحران آبی، می‌تواند نیازهای کوتاه‌مدت را برطرف کند، اما به دلیل ماهیت غیرقابل تجدید این ذخایر، استفاده بلندمدت از آن‌ها مستلزم مدیریت محتاطانه است (Custodio, 2002). در همین راستا، استفاده از سازه‌های تغذیه مصنوعی و بازچرخانی آب زیرزمینی نیز در بسیاری از کشورها برای افزایش تاب‌آوری منابع آب توسعه یافته است.

در حوزه صنعتی، بازیابی و بهره‌برداری از آب حاصل از فرآیندهای صنعتی، از جمله خنک‌کننده‌ها و تولید انرژی، به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش مصرف آب تازه مورد توجه قرار گرفته است (Puyol et al., 2017). همچنین، فناوری‌های نوین مانند غشاهای پیشرفته، امکان حذف مؤثرتر آلاینده‌ها، نمک‌ها و میکروارگانیسم‌ها را فراهم آورده‌اند و مسیر تولید آب باکیفیت بالا را هموار کرده‌اند (Shannon et al., 2008). افزون بر این، فناوری‌های نوظهور همچون استحصال آب از رطوبت خاک یا استخراج از هیدرات‌های یخی نیز در سال‌های اخیر به‌عنوان گزینه‌هایی آینده‌نگر در حال بررسی هستند (Ingrao et al., 2023; Yu et al., 2021). این رویکردها، اگرچه هنوز در مراحل آزمایشی و توسعه فناوری قرار دارند، اما در چشم‌انداز بلندمدت می‌توانند در مدیریت پایدار منابع آبی نقش‌آفرین باشند. در مجموع، می‌توان گفت که بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف نه‌تنها یک راهکار مکمل، بلکه ضرورتی راهبردی برای تضمین امنیت آبی و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و صنعتی در شرایط اقلیمی متغیر است. انتخاب رویکرد مناسب در هر منطقه باید بر پایه ارزیابی دقیق شرایط اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی و فناوری صورت گیرد، زیرا تلفیق چندین روش می‌تواند به توسعه مدل‌های کارآمدتر و پایدارتر در مدیریت منابع آب منجر شود.

فناوری‌های آبیاری

در دهه‌های اخیر، تحولات فناورانه چشمگیری در حوزه آبیاری رخ داده است؛ تحولاتی که هدف اصلی آن‌ها بهینه‌سازی مصرف آب، افزایش بهره‌وری و ارتقای پایداری تولیدات کشاورزی بوده است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که الگوهای مختلف آبیاری، از روش‌های سنتی غرقابی تا سامانه‌های پیشرفته بارانی و قطره‌ای، هر یک در تعامل با نوع محصول، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی، کارایی متفاوتی از خود نشان داده‌اند. با این حال، روند جهانی حرکت از الگوهای پرمصرف به سمت فناوری‌های کارآمدتر و هوشمند، بیانگر تغییر رویکردی اساسی در مدیریت منابع آب کشاورزی است.

پیشرفت در حوزه ابزارهای اندازه‌گیری و کنترل، از جمله تانسیومترها، لایسیمترها، حسگرهای رطوبتی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، امکان نظارت دقیق و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم کرده است. سامانه آبیاری قطره‌ای، که نخستین بار در دهه ۱۹۴۰ در استرالیا معرفی شد، با بهره‌گیری از لوله‌های پلیمری سبک و مقاوم به‌سرعت گسترش یافت و به یکی از کارآمدترین روش‌های آبیاری تبدیل شد. به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند اتوماسیون، میکروکنترلرها، و سامانه‌های کنترل هوشمند موجب شده است این روش نسبت به آبیاری‌های غرقابی و بارانی از لحاظ مصرف آب و کود، کارایی بالاتری داشته باشد (Guerbaoui et al., 2013; Lamm, 2016). علاوه بر آن، مفهوم کم‌آبیاری به‌عنوان رویکردی مبتنی بر مدیریت تنش آبی، بهینه‌سازی رشد گیاه و حفظ عملکرد در شرایط محدودیت منابع معرفی شده است. این راهبرد، به‌ویژه در ترکیب با فناوری‌های سنجش از دور و حسگرهای مادون قرمز، می‌تواند میزان مصرف آب را کاهش دهد بی‌آنکه افت قابل توجهی در عملکرد گیاهان ایجاد کند (Fereres & Soriano, 2007).

نوآوری‌های اخیر در عرصه آبیاری هوشمند و دیجیتال، گامی فراتر نهاده‌اند و امکان مدیریت پویا و خودکار منابع آب را فراهم کرده‌اند. بهره‌گیری از حسگرهای خاک، داده‌های هواشناسی، و الگوریتم‌های پیش‌بینی نیاز آبی گیاهان، شرایطی را فراهم می‌سازد که تصمیم‌گیری در خصوص زمان و مقدار آبیاری با دقت بالا و در لحظه انجام گیرد. فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی، با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مکانی و زمانی، به کشاورزان امکان می‌دهند که الگوهای مصرف آب را بهینه‌سازی کرده و کارایی کل سامانه آبیاری را ارتقا دهند (Singh et al., 2014). همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، روش‌های مختلف آبیاری از نظر ویژگی‌های فنی، میزان بهره‌وری، هزینه‌های اجرا و نیاز به فناوری‌های پشتیبان تفاوت‌های چشمگیری دارند. به‌عنوان مثال، آبیاری غرقابی گرچه ساده و کم‌هزینه است، اما به دلیل تلفات بالای تبخیر و نفوذ عمقی، بهره‌وری آبی پایینی دارد. در مقابل، آبیاری قطره‌ای با کنترل دقیق توزیع آب، مصرف را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده و عملکرد محصولات را بهبود می‌بخشد، هرچند نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری فنی است. روش‌های نوینی مانند کم‌آبیاری و آبیاری هوشمند نیز با تکیه بر داده‌های لحظه‌ای و فناوری‌های دیجیتال، امکان مدیریت دقیق‌تر منابع را فراهم کرده‌اند. در عین حال، استفاده از منابع غیرمتعارف نظیر آب بازیافتی و آب باران ذخیره‌شده، می‌تواند در تکمیل این سامانه‌ها نقش مؤثری ایفا کند. در یک چشم‌انداز کلان، هم‌گرایی فناوری‌های دیجیتال، خودکار و پایش‌محور با روش‌های سنتی آبیاری، مسیر تازه‌ای برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک گشوده است. این ترکیب فناورانه، نه تنها به صرفه‌جویی در منابع آب منجر می‌شود، بلکه به کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش بهره‌وری و تقویت امنیت غذایی کمک می‌کند. انتخاب نظام

آبیاری متناسب با شرایط اقلیمی، نوع محصول و سطح دسترسی به فناوری، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت راهبردهای مدیریت پایدار آب دارد.

جدول ۱. فناوری‌های نوین آبیاری و تأثیر آن‌ها بر بهره‌وری آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک

Table 1. Modern Irrigation Technologies and Their Impact on Water Productivity in Arid and Semi-Arid Regions

شماره	منابع	فناوری‌ها و نوآوری‌های مرتبط	محدودیت‌ها	مزایا	ویژگی‌ها	روش آبیاری
1	Mitrică et al., 2017	استفاده از تانسیومتر، سنجش از دور برای بهینه‌سازی زمان و حجم آب	هدررفت زیاد آب، عدم کنترل دقیق مصرف آب، آسیب احتمالی به خاک	ساده و ارزان، مناسب برای زمین‌های هموار	آب به طور کامل بر سطح زمین پخش می‌شود	**آبیاری غرقابی**
2	Guerbaoui et al., 2013	حسگرهای رطوبت خاک، سیستم‌های کنترل خودکار جریان آب	نیاز به انرژی، تبخیر زیاد، هزینه بالاتر نسبت به غرقابی	پوشش یکنواخت، مناسب برای بسیاری از محصولات	آب از طریق باران‌سازها به شکل قطرات باران توزیع می‌شود	**آبیاری بارانی**
3	De Wrachien et al., 2013	سیستم‌های اتوماتیک، میکروکنترلرها، IoT، سنسورهای رطوبت خاک، GIS	هزینه اولیه بالا، نیاز به نگهداری مداوم	صرفه‌جویی قابل توجه در آب، افزایش عملکرد و کیفیت محصولات	آب به طور مستقیم به ریشه گیاه می‌رسد	**آبیاری قطره‌ای**
4	Du et al., 2015	ترکیب با سنجش از دور، مادون قرمز، سیستم‌های هوشمند پیش‌بینی نیاز آبی	نیاز به نظارت دقیق، مناسب فقط برای برخی محصولات	صرفه‌جویی در مصرف آب، حفظ عملکرد محصول	محدود کردن رشد رویشی و مصرف آب	**کم‌آبیاری**
5	Gebru et al., 2021	سیستم‌های ذخیره‌سازی هوشمند، سنجش حجم و کیفیت آب	محدودیت در حجم آب ذخیره شده، نیاز به ساخت سازه‌های ذخیره‌سازی	کاهش فشار بر منابع آب، قابل استفاده در مناطق خشک	ذخیره رواناب از بام یا زمین	**جمع‌آوری آب باران**
6	Faria et al., 2020	فناوری‌های تصفیه پیشرفته، پایش آنلاین کیفیت آب، الگوریتم‌های مدیریت ریسک	نیاز به تصفیه مناسب، نظارت کیفیت آب، امکان تجمع آلاینده‌ها	کاهش مصرف آب شیرین، افزایش پایداری منابع آب	استفاده از فاضلاب تصفیه شده	**استفاده از آب بازیافتی**

راندمان مصرف آب (WUE)[1]

راندمان مصرف آب به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادین توسعه پایدار در کشاورزی، نقشی تعیین‌کننده در دستیابی به بیشترین بازده تولیدی با کمترین مصرف آب و حداقل تلفات ناشی از تبخیر، رواناب و زهکشی زیرزمینی دارد. در شرایطی که فشار بر منابع آب شیرین به دلیل رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است، ارتقای بهره‌وری مصرف آب به یکی از محورهای اصلی سیاست‌گذاری و نوآوری فناورانه در کشاورزی تبدیل شده است. دستیابی به بهره‌وری مطلوب آب مستلزم رویکردی تلفیقی است که هم‌زمان بر فناوری، مدیریت و طراحی نظام‌های آبیاری استوار باشد. فناوری‌های نوین آبیاری مانند سامانه‌های قطره‌ای هوشمند، حسگرهای رطوبت خاک و سیستم‌های اتوماسیون، با پایش مستمر شرایط خاک و گیاه، امکان تنظیم دقیق میزان و زمان آبیاری را فراهم می‌سازند و بدین ترتیب ضمن صرفه‌جویی در آب، کیفیت و ارزش غذایی محصولات را افزایش می‌دهند (Zhang et al., 2019).

براساس پژوهش Boutraa (2010)، ارتقای بهره‌وری مصرف آب نه تنها بازده اقتصادی و تولید غذا را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی، می‌تواند به حفظ خدمات اکوسیستمی نیز کمک کند. در این میان، مجموعه‌ای از راهکارهای مدیریتی و فناورانه به‌منظور افزایش بهره‌وری مصرف آب پیشنهاد شده است. جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب باران از جمله روش‌هایی است که در مطالعات Attwater et al. (2017) به‌عنوان منبع مکمل برای آبیاری مطرح شده و می‌تواند وابستگی به منابع آب متعارف را کاهش دهد. رویکردهایی همچون آبیاری تکمیلی و کم‌آبیاری نیز با هدف استفاده بهینه از بارش‌های طبیعی و کنترل رشد رویشی گیاه، در عین

1. Water Use Efficiency

حفظ عملکرد محصول، مصرف آب را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند (Morison et al., 2017; Holzapfel et al., 2009). ترکیب این راهبردها با فناوری‌های سنجش از دور، سنسورهای خاک و سامانه‌های مادون قرمز، امکان مدیریت دقیق‌تر آبیاری و تنظیم آن بر اساس نیاز واقعی گیاه را فراهم می‌کند (Kalpakian et al., 2014). علاوه بر این، استفاده از سامانه‌های خودکار و ابزارهای نظارتی مانند تانسیومترها، لایسیمترها، نرم‌افزارهای مدیریت آب و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، زمینه‌ساز برنامه‌ریزی بهینه و کاهش هدررفت آب در مزرعه است (Guerbaoui et al., 2013).

از منظر اقتصادی و محیط‌زیستی، بهبود بهره‌وری مصرف آب ضمن افزایش سودآوری کشاورزان و کاهش هزینه‌های تولید، نقش بسزایی در کاهش فشار بر منابع محدود آب و مهار اثرات منفی زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، عامل کلیدی در تضمین امنیت غذایی و پایداری اکولوژیکی محسوب می‌شود. همان‌گونه که Xue et al. (2017) اشاره کرده‌اند، در شرایط جهانی کنونی که کمبود آب به چالشی چندبعدی و فرابخشی تبدیل شده است، افزایش بهره‌وری مصرف آب نه تنها یک ضرورت اقتصادی بلکه پیش‌شرطی برای تاب‌آوری اجتماعی و زیست‌محیطی به شمار می‌رود.

بهره‌وری مصرف آب را می‌توان از دو منظر کاهش حجم آب مصرفی برای دستیابی به تولید مشخص، یا افزایش عملکرد حاصل از مقدار معینی آب مصرفی ارزیابی کرد (Ma et al., 2016). تحقق این اهداف نیازمند به‌کارگیری هم‌زمان فناوری‌های دقیق آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای، کم‌آبیاری کنترل‌شده و آبیاری تکمیلی است. ترکیب این فناوری‌ها با سیاست‌های حمایتی، نظام‌های مدیریتی هوشمند و آموزش کشاورزان، چارچوبی جامع برای استفاده پایدار از منابع آب فراهم می‌آورد. در مجموع، ارتقای بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی حاصل هم‌افزایی میان دانش فنی، مدیریت کارآمد منابع، و سیاست‌گذاری هدفمند است. چنین رویکردی نه تنها به کاهش فشار بر منابع آبی و حفظ کیفیت محصولات کمک می‌کند، بلکه مسیر دستیابی به امنیت غذایی و توسعه پایدار را در سطح ملی و جهانی هموار می‌سازد (Zhang et al., 2019).

بحث

در دهه‌های اخیر، کمبود منابع آب به یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. رشد جمعیت، توسعه سریع بخش کشاورزی و تغییرات اقلیمی فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع آب شیرین وارد کرده‌اند و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۳۰ کمبود آب آشامیدنی ممکن است به حدود ۴۰ درصد برسد. در چنین شرایطی، اتخاذ رویکردهای جامع و یکپارچه در مدیریت منابع آب، ضروری است. این رویکردها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که ضمن حفظ کارایی تولید، پایداری منابع آب و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را در بلندمدت تضمین کنند. یکی از محورهای کلیدی این تحول، بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف شامل فاضلاب تصفیه‌شده، آب‌های شور و آب‌های جمع‌آوری‌شده از باران است (Ji et al., 2020). این منابع با کاهش وابستگی به منابع سطحی و زیرزمینی، امکان ادامه فعالیت‌های کشاورزی در شرایط کم‌آبی را فراهم می‌آورند. استفاده پایدار از این منابع نیازمند سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تصفیه، نظارت کیفی مستمر و چارچوب‌های قانونی برای تضمین سلامت و ایمنی مصرف است. در عین حال، فناوری‌های نوین آبیاری نقش محوری در افزایش بهره‌وری مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات ایفا می‌کنند. روش‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای هوشمند، کم‌آبیاری کنترل‌شده و آبیاری تکمیلی، در ترکیب با سنسورهای رطوبت خاک، داده‌های اقلیمی و مدل‌های پیش‌بینی، امکان تنظیم دقیق زمان و میزان آبیاری را فراهم می‌آورند و از اتلاف منابع جلوگیری می‌کنند (Zhang et al., 2019). این فناوری‌ها علاوه بر کاهش مصرف آب، کیفیت و ارزش غذایی محصولات را ارتقا می‌دهند و اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از رواناب‌ها و نشت کود را محدود می‌کنند.

ادغام این فناوری‌ها با سامانه‌های هوشمند مدیریت آب، شامل تانسیومترها، لایسیمترها و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، امکان برنامه‌ریزی دقیق آبیاری و کاهش هدررفت آب را فراهم می‌سازد. افزون بر این، جمع‌آوری آب باران و بهره‌گیری همزمان از منابع نامتعارف، می‌تواند بخشی از نیاز آبی کشاورزی را تأمین کرده و فشار بر منابع آب محدود را کاهش دهد (Attwater et al., 2017; Morison et al., 2017). تجارب موفق کشورهایی مانند چین، هند، ایران و امارات در پروژه‌های باروری ابرها و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، نشان‌دهنده تأثیر مثبت اقدامات نوآورانه بر امنیت آبی و توسعه پایدار کشاورزی است. این تجربیات تأکید می‌کنند که ترکیب چندلایه راهبردها شامل فناوری‌های نوین آبیاری، منابع آب نامتعارف، جمع‌آوری آب باران، آبیاری تکمیلی و سیستم‌های سنجش از دور می‌تواند

بهره‌وری آب را به حداکثر رسانده و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهد. بدین ترتیب، توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیازمند رویکردی یکپارچه است که بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف، فناوری‌های پیشرفته آبیاری، مدیریت دقیق زمان و مقدار آب و سیاست‌های حمایتی محیط‌زیستی را در برگیرد. این رویکرد، ضمن کاهش فشار بر منابع آب و بهبود عملکرد و کیفیت محصولات، امنیت غذایی و خدمات اکوسیستم را تقویت می‌کند و بستر مناسبی برای توسعه پایدار و مقابله با چالش‌های ناشی از کم‌آبی و تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

توسعه پایدار کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مستلزم رویکردی یکپارچه است که بهره‌وری مصرف آب، حفظ عملکرد محصولات و کاهش اثرات زیست‌محیطی را همزمان هدف قرار دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های نوین آبیاری، از جمله آبیاری قطره‌ای، کم‌آبیاری کنترل‌شده و آبیاری تکمیلی، با مدیریت هوشمند منابع آب و بهره‌گیری از منابع نامتعارف نظیر آب‌های شور، فاضلاب تصفیه‌شده و آب باران، می‌تواند فشار بر منابع آب شیرین را کاهش داده و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را افزایش دهد. این رویکرد، ضمن بهینه‌سازی مصرف آب، کیفیت و عملکرد محصولات را ارتقاء می‌دهد و امنیت غذایی و حفاظت از اکوسیستم‌ها را تقویت می‌کند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، نیاز به نگهداری تخصصی و الزامات بهداشتی و کمبود هماهنگی نهادی، بهره‌برداری کامل از فناوری‌ها و منابع جایگزین را محدود می‌سازد. بر اساس این یافته‌ها توصیه می‌شود توسعه و ترویج فناوری‌های نوین آبیاری و سیستم‌های مدیریت هوشمند آب اولویت‌بندی شود، زیرساخت‌ها و سیاست‌های حمایتی برای بهره‌برداری از منابع آب غیرمتعارف تقویت گردد، آموزش و افزایش آگاهی کشاورزان در مورد فناوری‌ها و منابع جایگزین صورت گیرد، پژوهش‌های کاربردی برای ارزیابی اثرات بلندمدت و بهینه‌سازی روش‌های تلفیقی انجام شود و چارچوب مدیریتی یکپارچه‌ای در سطح ملی و منطقه‌ای برای هماهنگی منابع آب و نهادهای مرتبط ایجاد گردد. اجرای این استراتژی جامع، تلفیق فناوری‌های نوین، منابع نامتعارف و سیاست‌های محیط‌زیستی، توسعه پایدار کشاورزی را تضمین کرده و کشاورزی را در برابر چالش‌های کمبود آب و تغییرات اقلیمی مقاوم می‌سازد.

منابع

Abou-Shady, A., Siddique, M. S., & Yu, W. (2023). A critical review of recent progress in global water reuse during 2019–2021 and perspectives to overcome future water crisis. *Environments, 10*(9), 159. https://doi.org/10.3390/environments10090159

Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., & Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chemistry, 111*(4), 811–815. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.049

Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & Valera, D. L. (2017). Perceptions and acceptance of desalinated seawater for irrigation: A case study in the Níjar District (Southeast Spain). *Water, 9*(6), 408. https://doi.org/10.3390/w9060408

Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., Velasco-Muñoz, J. V., & Valera, D. L. (2019). Aquifer sustainability and the use of desalinated seawater for greenhouse irrigation in the Campo de Níjar, Southeast Spain. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(6), 898. https://doi.org/10.3390/ijerph16060898

Ballesteros-Olza, M., Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Gómez-Ramos, A., & Bolinches, A. (2022). Using reclaimed water to cope with water scarcity: An alternative for agricultural irrigation in Spain. *Environmental Research Letters, 17*(12), 125002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acaa3c

Boutraa, T. (2010). Improvement of water use efficiency in irrigated agriculture: A review. *Journal of Agronomy, 9*(1), 1–8. https://doi.org/10.3923/ja.2010.1.8

Chien, S. S., Hong, D. L., & Lin, P. H. (2017). Ideological and volume politics behind cloud water resource governance–weather modification in China. *Geoforum, 85*, 225–233. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.012

Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation: What does it mean? *Hydrogeology Journal, 10*(2), 254–277. https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6

Damkjaer, S., & Taylor, R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. *Ambio, 46*(5), 513–531. https://doi.org/10.1007/s13280-017-0912-y

De Wrachien, D., Lorenzini, G., & Medici, M. (2013). Sprinkler irrigation systems: State-of-the-art of kinematic analysis and quantum mechanics applied to water jets. *Irrigation and Drainage, 62*(4), 407–413. https://doi.org/10.1002/ird.1715

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science, 333*(6043), 712–717. https://doi.org/10.1126/science.1200488

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science, 333*(6043), 712–717. https://doi.org/10.1126/science.1200488

Expósito, A., Lorenzo Lopez, A. M., & Berbel, J. (2024). How much does reclaimed wastewater cost? A comprehensive analysis for irrigation uses in the European Mediterranean context. *Water Reuse, 14*(3), 434–447. https://doi.org/10.2166/wr.2024.014

Faria, D., Oliveira, A., Baeza, J. A., de Miera, B. S., Calvo, L., Gilarranz, M. A., & Naval, L. (2020). Sewage treatment using aqueous phase reforming for reuse purpose. *Journal of Water Process Engineering, 37*, 101413. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101413

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany, 58*(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Florides, F., Giannakoudi, M., Ioannou, G., Lazaridou, D., Lamprinidou, E., Loukoutos, N., Spyridou, M., Tosounidis, E., Xanthopoulou, M., & Katsoyiannis, I. A. (2024). Water reuse: A comprehensive review. *Environments, 11*(4), 81. https://doi.org/10.3390/environments11040081

Gebru, T. A., Brhane, G. K., & Gebremedhin, Y. G. (2021). Contributions of water harvesting technologies intervention in arid and semi-arid regions of Ethiopia in ensuring households' food security, Tigray in focus. *Journal of Arid Environments, 185*, 104373. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104373

Gould, J. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply*. Intermediate Technology Publications.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research, 43*(9), 2317–2348. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010

Guerbaoui, M., Afou, Y., Ed-Dahhak, A., Lachhab, A., & Bouchikhi, B. (2013). PC-based automated drip irrigation system. *International Journal of Engineering Science and Technology, 5*(2), 221–225.

Haq, M. A., & Khan, M. Y. (2022). Crop water requirements with changing climate in an arid region of Saudi Arabia. *Sustainability, 14*(21), 13554. https://doi.org/10.3390/su142113554

Holzapfel, E. A., Pannunzio, A., Lorite, I., Silva de Oliveira, A., & Farkas, I. (2009). Design and management of irrigation systems. *Chilean Journal of Agricultural Research, 69*(Suppl. 1), 17–25. https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000500003

Hu, Y., & Wu, W. (2018). Review and development strategy of irrigation with unconventional water resources in China. *Chinese Journal of Engineering Science, 20*(2), 69–76.

Indelicato, S., Tamburino, V., & Zimbone, S. M. (1993). Unconventional water resource use and management. In *Ressources en eau: Développement et gestion dans les pays méditerranéens* (pp. 235–244).

Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisingh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon, 9*(8), e18867. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18867

Ji, L., Wu, T., Xie, Y., Huang, G., & Sun, L. (2020). A novel two-stage fuzzy stochastic model for water supply management from a water-energy nexus perspective. *Journal of Cleaner Production, 274*, 123386. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123386

Jiménez, B., & Asano, T. (2008). *Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs*. IWA Publishing.

Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science, 31*(3), 242–281. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001

Kalpakian, J., Legrouri, A., Ejekki, F., Doudou, K., Berrada, F., Ouardaoui, A., & Kettani, D. (2014). Obstacles facing the diffusion of drip irrigation technology in the Middle Atlas region of Morocco. *International Journal of Environmental Studies, 71*(1), 63–75. https://doi.org/10.1080/00207233.2013.860072

Kögler, F., & Söffker, D. (2017). Water (stress) models and deficit irrigation: System-theoretical description and causality mapping. *Ecological Modelling, 361*, 135–156. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.07.027

Lamm, F. R. (2016). Cotton, tomato, corn, and onion production with subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASABE, 59*(1), 263–278. https://doi.org/10.13031/trans.59.11024

Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination, 220*(1–3), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009

Macedonio, F., Drioli, E., Gusev, A. A., Bardow, A., Semiat, R., & Kurihara, M. (2012). Efficient technologies for worldwide clean water supply. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 51*, 2–17. https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.011

Macherius, A., Eggen, T., Lorenz, W., Moeder, M., Ondruschka, J., & Reemtsma, T. (2012). Metabolization of the bacteriostatic agent triclosan in edible plants and its consequences for plant uptake assessment. *Environmental Science & Technology, 46*(20), 10797–10804. https://doi.org/10.1021/es302189f

Malinowski, P. A., Stillwell, A. S., Wu, J. S., & Schwarz, P. M. (2015). Energy-water nexus: Potential energy savings and implications for sustainable integrated water management in urban areas from rainwater harvesting and gray-water reuse. *Journal of Water Resources Planning and Management, 141*(12), A4015003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000549

Mitrică, B., Mitrică, E., Enciu, P., & Mocanu, I. (2017). An approach for forecasting of public water scarcity at the end of the 21st century, in the Timiș Plain of Romania. *Technological Forecasting and Social Change, 118*, 258–269. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.02.021

Morison, J. I. L., Baker, N. R., Mullineaux, P. M., & Davies, W. J. (2008). Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363*(1491), 639–658. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2175

Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0 °C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble. *Atmospheric Research, 265*, 105908. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105908

Özerol, G., Bressers, H., & Coenen, F. (2012). Irrigated agriculture and environmental sustainability: An alignment perspective. *Environmental Science & Policy, 23*, 57–67. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.06.001

Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology, 7*, 2106. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106

Qadir, M. (2020). *UN-Water analytical brief on unconventional water resources*. UN-Water.

Qadir, M., Smakhtin, V., Koo-Oshima, S., & Guenther, E. (2022). Global water scarcity and unconventional water resources. In J. A. S. Machado (Ed.), *Unconventional water resources* (pp. 3–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95876-6_1

Quon, H., & Jiang, S. (2023). Decision making for implementing non-traditional water sources: A review of challenges and potential solutions. *npj Clean Water, 6*(1), 56. https://doi.org/10.1038/s41545-023-00254-7

Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Ferreira, J. L., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management, 99*, 61–75. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003

Rzayev, M. A. (2017). Problems of water protection against adverse impact of irrigated agriculture and approaches to their solution in arid zones. *Water Resources, 44*(1), 158–166. https://doi.org/10.1134/S0097807817010125

Sampaio, V., Santos, A. S., & Lima, M. M. (2024). Decision support tools for water reuse: A systematic review. *Water Science & Technology, 90*(10), 2713–2733. https://doi.org/10.2166/wst.2024.184

Shafeian, N., Ranjbar, A. A., & Gorji, T. B. (2022). Progress in atmospheric water generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161*, 112325. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112325

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature, 452*(7185), 301–310. https://doi.org/10.1038/nature06599

Silva, J. A. (2023). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water, 15*(17), 3064. https://doi.org/10.3390/w15173064

Singh, A. (2014). Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *Journal of Hydrology, 519*, 1688–1697. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.049

UN-Water. (2020). *Water and climate change*. In *The United Nations World Water Development Report*. UN-Water.

Vanham, D., Hoekstra, A. Y., Wada, Y., Bouraoui, F., de Roo, A., Mekonnen, M. M., van de Bund, W. J., Batelaan, O., Pavelic, P., Bastiaanssen, W. G. M., & others. (2018). Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards SDG target 6.4: An evaluation of indicator 6.4.2 "Level of water stress." *Science of the Total Environment, 613–614*, 218–232. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.056

Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & López-Serrano, M. J. (2018). Advances in water use efficiency in agriculture: A bibliometric analysis. *Water, 10*(3), 377. https://doi.org/10.3390/w10030377

Xue, J., Guan, H., Huo, Z., Wang, F., Huang, G., & Boll, J. (2017). Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater. *Agricultural Water Management, 194*, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.005

Xue, Z.-J., Liu, S.-Q., Liu, Y.-L., & Yan, Y.-L. (2012). Health risk assessment of heavy metals for edible parts of vegetables grown in sewage-irrigated soils in suburbs of Baoding City, China. *Environmental Monitoring and Assessment, 184*(6), 3503–3513. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2194-2

Yannopoulos, S., Antoniou, G., Kaiafa-Saropoulou, M., & Angelakis, A. N. (2016). Historical development of rainwater harvesting and use in Hellas: A preliminary review. *Water Supply, 17*(4), 1022–1034. https://doi.org/10.2166/ws.2016.170

Yazdandoost, F., Noruzi, M. M., & Yazdani, S. A. (2021). Sustainability assessment approaches based on water-energy nexus: Fictions and nonfictions about non-conventional water resources. *Science of the Total Environment, 758*, 143703. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143703

Yu, Y. S., Zhang, X., Liu, J. W., Lee, Y., & Li, X. S. (2021). Natural gas hydrate resources and hydrate technologies: A review and analysis of the associated energy and global warming challenges. *Energy & Environmental Science, 14*(11), 5611–5668. https://doi.org/10.1039/D1EE01206J

Zamani, N., Maleki, M., & Eslamian, F. (2021). Fog water harvesting investigation as a water supply resource in arid and semi-arid areas. *Water Productivity Journal, 1*(4), 43–52.

Zhang, Y., Zhang, Y., Shi, K., & Yao, X. (2017). Research development, current hotspots, and future directions of water research based on MODIS images: A critical review with a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research, 24*(18), 15226–15239. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9120-y