



## **Sustainable Irrigation Water Management in Horticultural Crops of Arid and Semi-Arid Regions: Approaches and Challenges**

**Mani Jabbari<sup>1</sup>, Iman Hajirad<sup>\*2</sup>, Mitra Jabbari<sup>3</sup>**

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

**Received:** 05 January 2025/ **Revised:** 20 January 2025/ **Accepted:** 19 February 2025

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2077016.1048>

### **Abstract**

Water scarcity in arid and semi-arid regions is one of the fundamental and persistent challenges to the sustainability of horticultural production. In recent years, climate change, rising temperatures, and declining rainfall have intensified the pressure on both surface and groundwater resources. These conditions have made the need for intelligent and efficient water management in horticulture more critical than ever. The present study aims to propose practical strategies for sustainable water management in orchards located in Iran's dry regions, focusing on three innovative irrigation techniques: Regulated Deficit Irrigation (RDI), Partial Root-zone Drying (PRD), and Subsurface Drip Irrigation (SDI). These methods, through precise control of irrigation timing and volume, can reduce water consumption by 30–50% without significant yield loss and, in some cases, even enhance product quality. In the RDI method, specific growth stages of the plant are deliberately subjected to limited water stress to increase water use efficiency. The PRD method involves irrigating only part of the root zone while keeping the other part dry, stimulating physiological responses that reduce water consumption. The SDI system delivers water directly to the root zone below the soil surface, minimizing surface evaporation. Successful implementation of these approaches requires continuous soil moisture monitoring using tools such as tensiometers and moisture sensors, the use of accurate climatic data for irrigation scheduling, and hands-on training for orchardists. Findings indicate that integrating these irrigation techniques with supportive policies such as financial incentives, field-based education, and digital extension services can significantly improve water productivity, reduce pressure on groundwater resources, and enhance the resilience of horticultural production against drought. Ultimately, it is recommended that agricultural managers and policymakers focus on developing smart irrigation systems, modernizing outdated irrigation networks, and promoting farmer participation in local decision-making to facilitate the transition toward sustainable horticulture in the country's dry regions.

**Keywords:** Arid Regions, Deficit Irrigation, Implementation Policies, Reclaimed Water, Water Productivity.



## مدیریت پایدار آب آبیاری در محصولات باغی مناطق خشک و نیمه‌خشک: رویکردها و چالش‌ها

مانی جباری<sup>۱</sup>، ایمان حاجی‌راد<sup>۲\*</sup>، میترا جباری<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران.
۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

دریافت: ۱۱ دی ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۲۴ بهمن ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۹ اسفند ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2077016.1048>

## چکیده

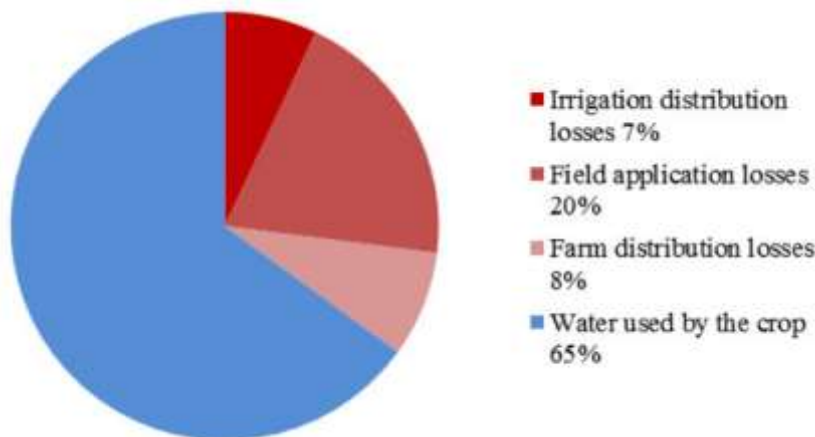
کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از چالش‌های بنیادی و مداوم در مسیر پایداری تولیدات باغی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، افزایش دمای هوا، و کاهش بارندگی موجب شده‌اند که فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی بیش از پیش افزایش یابد. این شرایط، ضرورت مدیریت هوشمند و کارآمد آب در بخش باغبانی را دوچندان کرده است. مطالعه حاضر با هدف ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت پایدار آب در باغ‌های مناطق خشک ایران انجام شده و تمرکز اصلی آن بر سه روش نوین آبیاری شامل کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI)، خشک‌کردن جزئی ریشه (PRD) و آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) است. این روش‌ها با مدیریت دقیق میزان و زمان آبیاری، امکان کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی مصرف آب را بدون افت قابل توجه عملکرد فراهم می‌سازند و حتی در برخی موارد کیفیت محصول را بهبود می‌بخشند. در روش RDI، بخشی از دوره رشد گیاه به‌طور هدفمند با کمبود نسبی آب مواجه می‌شود تا کارایی مصرف آب افزایش یابد. در روش PRD، تنها بخشی از ریشه‌ها آبیاری می‌شوند و بخش دیگر خشک نگه داشته می‌شود تا گیاه با واکنش‌های فیزیولوژیک خاص، مصرف آب خود را کاهش دهد. روش SDI نیز با رساندن آب به ناحیه ریشه در زیر سطح خاک، تبخیر سطحی را به حداقل می‌رساند. اجرای موفق این روش‌ها نیازمند پایش مداوم رطوبت خاک با ابزارهایی نظیر تانسیمتر و حسگرهای رطوبتی، استفاده از داده‌های اقلیمی دقیق، و آموزش عملی باغداران است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تلفیق این سه روش آبیاری با سیاست‌های حمایتی، از جمله ارائه تسهیلات مالی، آموزش‌های میدانی، و ترویج دیجیتال، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری آب، کاهش فشار بر منابع زیرزمینی و افزایش تاب‌آوری تولیدات باغی در برابر خشکسالی شود. در نهایت، توصیه می‌شود مدیران و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی با تمرکز بر توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند، نوسازی شبکه‌های فرسوده، و مشارکت فعال کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های محلی، مسیر گذار به باغبانی پایدار در مناطق خشک کشور را تسهیل نمایند.

کلمات کلیدی: آب بازبافتی، بهره‌وری آب، سیاست‌های اجرایی، کم‌آبیاری، مناطق خشک.

## مقدمه

کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تولید محصولات باغی را به شدت تحت تأثیر قرار داده و موجب شده است که الگوهای سنتی مصرف آب دیگر قابلیت پاسخ‌گویی به شرایط اقلیمی جدید را نداشته باشند. در بسیاری از مناطق، رقابت میان بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت برای دسترسی به منابع محدود آب تشدید شده و این موضوع لزوم تغییر رویکرد در مدیریت آب را برجسته کرده است (Bahraseman et al., 2025). شکل (۱) نشان می‌دهد که بخش کشاورزی بیشترین سهم را در مصرف منابع آب به خود اختصاص می‌دهد، در حالی که بهره‌وری واقعی آب در این بخش پایین است و بخش قابل توجهی از آب تخصیص‌یافته بدون تبدیل به عملکرد اقتصادی از دست می‌رود. این شکاف میان آب مصرف‌شده و آب مؤثر در تولید نشان می‌دهد که مسئله اصلی کمبود آب نیست، بلکه ناکارآمدی در نحوه تخصیص و مدیریت آب است؛ به عبارتی، بهبود روش‌های آبیاری می‌تواند قبل از هرگونه توسعه منابع جدید، منجر به افزایش بهره‌وری شود (Postel, 1999; Chartzoulakis, 2021).

با وجود حجم گسترده منابع علمی در زمینه آبیاری، بسیاری از این مطالعات ماهیت تئوریک داشته و کمتر به شرایط واقعی بهره‌برداران در مناطق خشک پرداخته‌اند. بنابراین، تمرکز این مقاله به‌جای ارائه نظریات گسترده، بر معرفی و تحلیل چند راهکار اجرایی و قابل پیاده‌سازی مدیریت آب در باغ‌ها است؛ راهکارهایی که قابلیت اجرا با تجهیزات موجود و انطباق با محدودیت‌های اقتصادی و فنی باغداران را دارند (Feres et al., 2003). در این راستا، سه رویکرد کلیدی شامل کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI)، کم‌آبیاری ناقص ریشه (PRD) و آبیاری موضعی به‌عنوان روش‌های برتر مدیریت آب در شرایط کم‌آبی انتخاب شده‌اند. این روش‌ها نه تنها مصرف آب را کاهش می‌دهند، بلکه می‌توانند بهره‌وری آب را به‌واحد تولید اقتصادی افزایش دهند و تاب‌آوری سیستم‌های باغی را در برابر خشکسالی ارتقا بخشند (Villalobos, 2003; Chartzoulakis, 2021). هدف این مقاله، ارائه یک تحلیل کاربردی از این روش‌ها با تمرکز بر نحوه اجرا، شاخص‌های تصمیم‌گیری در مزرعه و پیامدهای اقتصادی برای بهره‌برداران است. همچنین پیشنهادهایی عملی برای باغداران و توصیه‌های سیاستی برای مدیران منابع آب و تصمیم‌گیران بخش کشاورزی ارائه خواهد شد تا زمینه انتقال دانش از سطح مطالعات پژوهشی به سطح اجرا فراهم گردد (Feres et al., 2003; Chartzoulakis, 2021).



شکل ۱. میزان تلفات آب در بخش کشاورزی (Chartzoulakis, 2021)  
Figure 1. Water losses in the agricultural sector (Chartzoulakis, 2021)

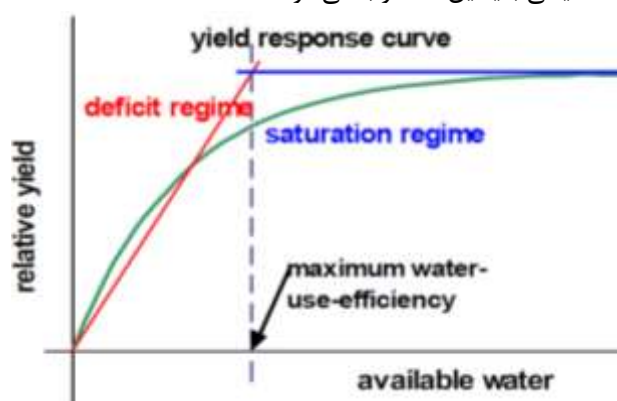
## آب و تولیدات کشاورزی

بخش کشاورزی در حال حاضر بیش از ۷۰ درصد از کل منابع آب برداشت‌شده را به خود اختصاص می‌دهد و این سهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک حتی بیشتر است. هرچند آبیاری به‌عنوان یک فناوری سنتی هزاران سال در تولیدات کشاورزی به‌کار گرفته شده است، اما گسترش واقعی اراضی آبی عمدتاً پس از قرن بیستم و در پی توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن رخ داده است. این توسعه در ابتدا موجب افزایش محسوس تولید و امنیت غذایی شد، اما از دهه ۱۹۸۰ به بعد، افزایش هزینه‌های احداث، شور شدن خاک، محدودیت منابع آب

شیرین و نگرانی‌های زیست‌محیطی باعث کاهش شتاب توسعه آبیاری شد (Chartzoulakis, 2021; Sharma et al., 2025). با وجود این چالش‌ها، افزایش جمعیت و فشار بر منابع تولید غذا همچنان موجب حفظ وابستگی سیستم‌های تولید به آبیاری شده است و انتظار می‌رود فشار بر منابع آب کشاورزی در آینده افزایش یابد.

در چنین شرایطی، پایداری تولید در گرو پایداری منابع آب است و این موضوع در مناطق خشک به معنای تمرکز بر کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری آب به جای توسعه برداشت آب است. راهبردهایی مانند کشت ارقام کم‌نیاز به آب، استفاده از سامانه‌های آبیاری با حداقل تلفات تبخیری و نفوذ عمقی، و کاهش هدررفت آب در شبکه‌های توزیع و ذخیره‌سازی از جمله اولویت‌های اصلی مدیریت منابع آب محسوب می‌شوند. گذار از شیوه‌های سنتی به سیستم‌های کم‌مصرف تنها با ارائه حمایت فنی، سیاست‌گذاری مشوق محور و ایجاد انگیزه اقتصادی برای بهره‌برداران امکان‌پذیر است (Bahraseman et al., 2025). در واکنش به کمبود آب، سیاست‌های متعددی با هدف ارتقای بهره‌وری آب در سطح مزرعه و حوضه آبریز طراحی شده‌اند که عمدتاً بر دو محور متمرکز هستند: نخست، بهبود بهره‌وری تخصیصی آب از طریق سازوکارهایی مانند قیمت‌گذاری هدفمند، تنظیم هوشمند حق‌آبه و بازطراحی الگوهای توزیع منابع آبی، و دوم، ارتقای بهره‌وری کاربردی آب با تکیه بر فناوری‌های نوین آبیاری و بهینه‌سازی زمان‌بندی و الگوی توزیع آب در مزرعه. ترکیب این دو رویکرد، چارچوبی یکپارچه برای مدیریت پایدار منابع آب در سیستم‌های باغی ایجاد می‌کند و مبنایی برای ورود به بحث روش‌های نوین مدیریت آب در فصل بعد خواهد بود (Gómez-Limón et al., 2020).

به‌طور کلی، پاسخ عملکرد گیاه به آب تا نقطه‌ای که رطوبت خاک به آستانه اشباع نزدیک می‌شود، روندی صعودی دارد و پس از آن، افزایش میزان آب تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد نخواهد داشت (Hillel, 1997). همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول یک روند خطی و بی‌انتهای نیست، بلکه پس از رسیدن به سطحی بهینه از تأمین آب، شیب پاسخ عملکرد کاهش یافته و در صورت اشباع بیش از حد خاک حتی افت عملکرد نیز رخ می‌دهد. با این حال، به دلیل نبود ابزارهای دقیق پایش وضعیت رطوبت خاک و دشواری تشخیص لحظه بروز تنش آبی در مزرعه، بسیاری از کشاورزان برای جلوگیری از ریسک کاهش عملکرد به آبیاری بیش از نیاز روی می‌آورند. این رفتار که در نگاه فردی نوعی مدیریت احتیاطی تلقی می‌شود، در مقیاس منطقه‌ای به تلفات گسترده آب، ایجاد شرایط غرقابی، تسهیل شیوع بیماری‌های خاکزاد، آبشویی عناصر غذایی، آلودگی آب‌های زیرزمینی و در نهایت کاهش کیفیت و عملکرد محصول منجر می‌شود (Chartzoulakis, 2021). از این رو، مدیریت علمی و هدفمند آب در باغبانی نه تنها یک ضرورت فنی، بلکه یک اقدام اقتصادی و زیست‌محیطی بنیادین محسوب می‌شود.



شکل ۲. واکنش عملکرد گیاه به آب (Chartzoulakis, 2021)

Figure 2. Crop yield response to water (Chartzoulakis, 2021)

### مدیریت پایدار آب در کشاورزی

مدیریت پایدار آب در کشاورزی با هدف تطبیق آب موجود و نیازهای آبی از نظر کمیت و کیفیت، مکان و زمان، با هزینه معقول و با تأثیر زیست‌محیطی قابل قبول انجام می‌شود. اتخاذ آن شامل مشکلات فنی، رفتار اجتماعی جوامع روستایی، محدودیت‌های اقتصادی، چارچوب قانونی و نهادی و شیوه‌های کشاورزی است (Sharma et al., 2025).

مدیریت تقاضای زیر آب بیشترین توجه را به برنامه‌ریزی آبیاری (چه زمان و مقدار آبیاری شود) معطوف کرده و نقش کمتری به روش‌های آبیاری (نحوه اعمال آب در باغ و مزرعه) داده است. پارامترهای زیادی مانند رشد محصول و حساسیت آن به تنش آبی،

شرایط آب و هوایی و در دسترس بودن آب در خاک، زمان آبیاری یا به اصطلاح تناوب آبیاری را تعیین می‌کنند. با این حال، این تناوب به روش آبیاری بستگی دارد و بنابراین، هم برنامه‌ریزی آبیاری و هم روش آبیاری به هم مرتبط هستند (Chartzoulakis, 2021).

### بهره‌وری آب در محصولات باغی

آب مورد استفاده در آبیاری از طریق تبخیر از سطح محصول یا خاک مصرف می‌شود و همچنین ممکن است به صورت رواناب و نفوذ عمقی از بین برود. در بسیاری از موارد، چنین تلفات آبی ممکن است در داخل حوضه بازبایی و دوباره استفاده شود، البته با کمی کاهش کیفیت. به عنوان مثال، حفاظت از آب با هدف افزایش راندمان آبیاری با تغییر روش آبیاری، اگر تلفات حفظ شده قابل بازبایی باشد، ممکن است منجر به صرفه‌جویی خالص آب نشود به دلیل این عدم قطعیت، بهره‌وری آب (WP)<sup>1</sup> به عنوان نسبت عملکرد (که به عنوان خروجی بیولوژیکی یا اقتصادی اندازه‌گیری می‌شود) به تبخیر- تعرق محصول (ET)<sup>2</sup> تعریف می‌شود (Seckler, 1996; Sharma et al., 2025). برخلاف بهبود راندمان، بهبود بهره‌وری آب با افزایش عملکرد و یا کاهش تبخیر-تعرق محصول همیشه منجر به صرفه‌جویی خالص می‌شود و در نتیجه نیاز به آب کشاورزی را کاهش می‌دهد.

بهره‌وری آب در کشاورزی آبی بسیار متفاوت است و به عوامل بیوفیزیکی و مدیریتی زیادی بستگی دارد. از آنجا که تغییرات در تبخیر-تعرق محصول در بین محصولات کشاورزی در حد چند برابر است، مهم‌ترین عامل مؤثر بر بهره‌وری آب، ارزش اقتصادی محصول است. محصولات باغی معمولاً ارزش بالایی دارند و بنابراین بهره‌وری آب آن‌ها معمولاً از بهره‌وری آب محصولات زراعی بیشتر است. به عنوان مثال، با استفاده از مقادیر فعلی برای عملکرد و تبخیر-تعرق محصول مشخصه کشاورزی کالیفرنیا، بهره‌وری آب ذرت حدود ۰/۲۰ دلار در متر مکعب است، در حالی که بهره‌وری آب بادام ۰/۷۰ دلار در متر مکعب (Fereres et al., 2003). با این وجود، این موضوع به توضیح روند تغییر سطح زیر کشت آبی از محصولات زراعی به محصولات باغی در بسیاری از مناطق کم‌آب کمک می‌کند، روندی که احتمالاً در سراسر جهان افزایش خواهد یافت.

در همین راستا، مطالعات داخلی نیز بر اهمیت بهره‌وری آب و حجم آب مصرفی تأکید دارند. به طوری که عباسی و همکاران (۱۴۰۲) در یک پژوهش میدانی گسترده، حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب ۳۵ محصول زراعی، باغی، و سبزی و صیفی (پوشش‌دهنده بیش از ۸۵ درصد سطح زیر کشت آبی کشور) را با اندازه‌گیری عملکرد و حجم آب مصرفی در قطب‌های تولید، ارزیابی کردند. یافته‌ها نشان داد که میانگین وزنی حجم آب آبیاری محصولات مورد مطالعه ۸۰۳۲ مترمکعب بر هکتار بوده و حجم کل آب آبیاری محصولات آبی کشور حدود ۷۱/۱ میلیارد مترمکعب (۷۰٪ آب تجدیدپذیر) تخمین زده می‌شود. بر اساس نتایج، بهره‌وری آب آبیاری محصولات به طور متوسط ۱/۹ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد؛ ضمن اینکه زعفران و پسته بیشترین درآمد ناخالص به ازای واحد حجم آب آبیاری را به خود اختصاص دادند که این یافته‌ها همسو با اهمیت ارزش اقتصادی محصول بر بهره‌وری آب می‌باشد.

علاوه بر این، راندمان آبیاری نیز به عنوان یک شاخص مهم در مدیریت آب کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. در همین زمینه، عباسی و عباسی (۱۴۰۲) در پژوهشی، راندمان آبیاری در ایران را با استفاده از دو بانک داده شامل داده‌های منتشرشده از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴ و نتایج یک پروژه میدانی (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰) ارزیابی کردند. یافته‌ها روند کلی مثبت و افزایشی راندمان‌ها را نشان داد؛ به طوری که متوسط راندمان کل آبیاری در کشور حدود ۵۷ درصد تعیین شد که این میزان نزدیک به کشورهای توسعه‌یافته است. تحلیل‌ها حاکی از آن است که بهبود راندمان علاوه بر اقدامات مدیریتی، تحت تأثیر کم‌آبیاری اجباری ناشی از کمبود منابع آب نیز بوده که این امر به عنوان یک تهدید جدی برای منابع خاک مطرح است و نیاز به تدابیر کنترلی دارد. این یافته اهمیت تمایز بین راندمان و بهره‌وری آب را پررنگ‌تر می‌کند، چرا که افزایش راندمان لزوماً به صرفه‌جویی خالص آب منجر نمی‌شود، در حالی که بهبود بهره‌وری آب چنین پیامدی را به دنبال دارد و همچنین می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از کم‌آبیاری اجباری که خاک را تهدید می‌کند، کمک کند.

### فرآیندهای مدیریت آبیاری محصولات باغبانی

برای دستیابی به مدیریت مؤثر آب در باغات مناطق خشک و نیمه‌خشک، سه سؤال اصلی باید توسط بهره‌بردار پاسخ داده شود: چه مقدار آب لازم است، در چه زمانی باید آبیاری انجام شود و با چه روشی می‌توان این آب را به صورت کارآمد به ناحیه فعال ریشه رساند. اگرچه

در سال‌های اخیر روش‌ها و ابزارهای متعددی برای برنامه‌ریزی آبیاری توسعه یافته است، اما در بسیاری از مناطق باغی ایران، تصمیم‌گیری در مورد آبیاری همچنان بر اساس تجربه سنتی انجام می‌شود و کمتر از شاخص‌های علمی و قابل سنجش استفاده می‌گردد. این مسئله یکی از دلایل اصلی اتلاف منابع آبی و عدم انطباق الگوی مصرف آب با شرایط خشکسالی است (Sharma et al., 2025). یکی از پایه‌های علمی مدیریت آبیاری، برآورد تبخیر-تعرق (ET) است که نشان می‌دهد گیاه واقعاً چه میزان آب مصرف می‌کند. استانداردسازی این مفهوم از طریق توسعه مدل FAO-Penman-Monteith توسط Doorenbos and Pruitt (1974) و به‌روزرسانی آن توسط Allen et al. (1998) و Walter et al. (2000) در چارچوب ASCE، امکان محاسبه دقیق نیاز آبی را فراهم کرده است. در این روش ابتدا تبخیر-تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) بر اساس شرایط اقلیمی محاسبه می‌شود و سپس با ضرب آن در ضریب گیاهی (K<sub>c</sub>)، که متناسب با نوع محصول و مرحله رشد است، نیاز واقعی آبی محصول تعیین می‌گردد. امروزه مقادیر K<sub>c</sub> برای اغلب محصولات باغی مانند پسته، زیتون، انگور و بادام در دسترس است و استفاده از آن می‌تواند مبنای طراحی برنامه آبیاری کم‌تنش و هدفمند در مناطق خشک ایران قرار گیرد. در شرایط محدودیت آبی، واکنش گیاه به کمبود رطوبت از دو طریق اصلی بروز می‌کند: نخست، کاهش رشد رویشی و کوچک شدن سایه‌انداز که به معنای کاهش توان فتوسنتزی و کاهش تدریجی تعرق است و دوم، بسته شدن روزنه‌ها که مستقیماً باعث کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش مصرف آب می‌شود. بر اساس مطالعات Jarvis and McNaughton (1986)، نقش هدایت آیرودینامیکی<sup>۱</sup> در تنظیم تعرق باید مورد توجه قرار گیرد، زیرا در باغات با تاج پوشش بلند مانند زیتون و پسته، تبادل رطوبت و گاز با جو بسیار مؤثرتر از سیستم‌های زراعی کوتاه‌قد انجام می‌شود. Villalobos et al. (2000) نشان دادند که در درختان زیتون، تغییرات رسانایی روزنه به‌طور مستقیم و تقریباً خطی بر تعرق اثر می‌گذارد، در حالی که در محصولات کوتاه‌قد، این رابطه بسیار ضعیف‌تر است و کاهش روزنه‌ها الزاماً کاهش متناسبی در تعرق ایجاد نمی‌کند.

در نتیجه می‌توان گفت که در باغات مناطق خشک ایران، که پوشش گیاهی دارای ارتفاع و توده هوایی قابل تبادل با جو است، مدیریت آبیاری از طریق کنترل زمان و شدت اعمال آب (مانند روش‌های آبیاری RDI و PRD) می‌تواند به‌صورت مؤثری موجب کاهش مصرف آب بدون افت محسوس عملکرد شود. در مقابل، در سیستم‌های ردیفی و یکنواخت مانند سبزی‌کاری یا غلات، کاهش آبیاری به‌تنهایی برای صرفه‌جویی آب کافی نیست و باید همراه با اقدامات مکمل مانند استفاده از مالچ، سایه‌دهی یا کاهش تبخیر سطحی انجام شود. از منظر اجرایی، برای بهره‌برداران و سیاست‌گذاران آب در مناطق خشک، ضروری است که تصمیم‌گیری در مورد آبیاری از الگوی سنتی زمان‌بندی ثابت به سمت مدیریت مبتنی بر شاخص‌هایی مانند مرحله رشد، ضریب گیاهی و وضعیت واقعی سایبان گیاه تغییر یابد. این امر مستلزم آن است که داده‌های تبخیر-تعرق و ضرایب K<sub>c</sub> به‌صورت قابل فهم و عملی (از طریق سامانه‌های اطلاع‌رسانی محلی، پیامک یا اپلیکیشن‌های ساده آبیاری) در اختیار باغداران قرار گیرد و همزمان سازوکارهای حمایتی و ترویجی، کشاورزان را به استفاده از روش‌های آبیاری مانند RDI و PRD تشویق کند. همچنین توصیه می‌شود در برنامه‌های ترویجی و آموزشی، به‌جای تأکید صرف بر مفاهیم تئوریک، مهارت «زمان و میزان باز و بسته کردن آب» متناسب با شرایط واقعی مزرعه آموزش داده شود تا مدیریت آب از سطح نظری به سطح تصمیم‌گیری عملی در باغ منتقل گردد.

### مدیریت آبیاری و زمان‌بندی مصرف آب در باغبانی

برنامه‌ریزی آبیاری به معنای تعیین زمان مناسب شروع آبیاری و میزان آب قابل اعمال برای هر نوبت است. مدیریت درست آبیاری نه‌تنها موجب افزایش بهره‌وری آب و انرژی می‌شود، بلکه می‌تواند از غرقاب شدن، نفوذ عمقی آب و هدررفت کود و نهاده‌های شیمیایی جلوگیری کرده و شرایط بهینه رطوبتی برای رشد ریشه در منطقه فعال خاک را فراهم کند. نتیجه این فرایند، افزایش عملکرد، بهبود کیفیت محصول و کاهش مخاطراتی مانند صعود املاح شور در پروفیل خاک خواهد بود (Chartzoulakis, 2021). در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رقابت برای منابع آب شدید است، برنامه‌ریزی علمی آبیاری اهمیت بیشتری می‌یابد؛ زیرا مصرف بیش از حد آب توسط یک بهره‌بردار می‌تواند به معنای کمبود برای سایر کشاورزان یا بخش‌های شرب و صنعت باشد. روش‌های زمان‌بندی آبیاری را می‌توان بر اساس اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک، محاسبه بیلان آب خاک یا پایش تنش آبی گیاه انجام داد. این روش‌ها از قواعد تجربی ساده تا

مدل‌های مدیریتی پیشرفته مزرعه متغیر هستند و به دلیل نیاز به تجهیزات فنی، آموزش و همراهی سازمان‌های ترویجی، در بسیاری از کشورها هنوز به‌طور کامل در عمل پیاده‌سازی نشده‌اند (Huygen et al., 1995; Chartzoulakis, 2021).

### تکنیک‌های برنامه‌ریزی آبیاری

#### ۱- تخمین و اندازه‌گیری آب خاک

مدیریت دقیق آبیاری در مناطق خشک، نیازمند شناخت وضعیت واقعی رطوبت خاک در محدوده ریشه است؛ زیرا آب خاک به‌طور مستقیم بر وضعیت آب گیاه و در نتیجه رشد و عملکرد آن تأثیر می‌گذارد (Chartzoulakis, 2021). در سیستم‌های باغی مناطق خشک ایران، کشاورزان اغلب بر اساس تجربه یا مشاهده ظاهری اقدام به آبیاری می‌کنند، در حالی که مطالعات نشان می‌دهد تغییرپذیری رطوبت خاک در عمق و فضا می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های اشتباه شود (Peyremorte and Chol, 1992). بنابراین، استفاده ترکیبی از روش‌های ارزان‌قیمت محلی و ابزارهای نوین سنجش رطوبت خاک می‌تواند به بهبود بهره‌وری آب کمک کند. با توجه به اهمیت انتخاب روش مناسب اندازه‌گیری رطوبت خاک، جدول (۱) مزایا و محدودیت‌های هر روش را در شرایط باغداری مناطق خشک ایران نشان می‌دهد.

جدول ۱. ارزیابی روش‌های تخمین و اندازه‌گیری آب خاک در باغات مناطق خشک (براساس Peyremorte and Chol, 1992; Chartzoulakis, 2021)  
Table 1. Evaluation of methods for estimating and measuring soil water in orchards in arid regions (Peyremorte and Chol, 1992; Chartzoulakis, 2021)

| روش / ابزار                             | کاربرد عملی در مزرعه                             | مزایا                               | محدودیت اجرایی در ایران   | توصیه برای باغداران و مدیران  |
|---|--|-------------------------------------|---|---|
| مشاهده ظاهری و لمس خاک                  | تشخیص اولیه نیاز آبیاری با توجه به رطوبت سطحی    | بدون هزینه، سازگار با دانش محلی     | دقت کم، احتمال خطا در خاک‌های شنی یا شور                            | استفاده فقط به‌عنوان تشخیص اولیه و نه مبنای اصلی تصمیم‌گیری آبیاری (Chartzoulakis, 2021). |
| TDR (اندازه‌گیری رطوبت خاک)             | اندازه‌گیری دقیق درصد رطوبت در عمق ریشه          | داده کمی و قابل تحلیل               | هزینه خرید و نیاز به آموزش فنی                                      | پیشنهاد برای باغ‌های تجاری پسته، زیتون و انگور با هدف صادرات.                             |
| تانسیمتر / سایکرومتر خاک                | تشخیص لحظه شروع تنش قبل از بروز علائم ظاهری گیاه | امکان کنترل دقیق زمان آبیاری        | حساس به شوری و نیازمند کالیبراسیون محلی (Peyremorte and Chol, 1992) | نصب در کنار سیستم آبیاری قطره‌ای و استفاده توسط اپراتور محلی آموزش‌دیده.                  |
| سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای / پهپاد) | پایش منطقه‌ای رطوبت و ارسال هشدار آبیاری         | مناسب برای مدیریت کلان دشت‌های باغی | نیاز به سیستم پردازش داده و اتصال سازمانی                           | اجرای پایلوت توسط جهاد کشاورزی و ارسال پیامک هشدار آبیاری به باغداران.                    |

#### ۲- پارامترهای تنش محصول

در بسیاری از باغات مناطق خشک، آبیاری نه بر اساس وضعیت واقعی گیاه، بلکه براساس تقویم ثابت یا تجربه محلی انجام می‌شود. این در حالی است که گیاه خود می‌تواند پیام‌های دقیقی درباره شروع تنش آبی ارسال کند و این پیام‌ها در صورت ثبت و تحلیل، می‌توانند مبنایی برای آبیاری هوشمند باشند (Itier et al., 1993; Deumier et al., 1996; Berhe et al., 2022). استفاده از پارامترهای تنش محصول به‌ویژه در سیستم‌های RDI و PRD اهمیت دارد، زیرا در این روش‌ها آبیاری به‌طور عمدی کاهش یا محدود می‌شود و لازم است تنش در حد کنترل‌شده باقی بماند تا عملکرد اقتصادی حفظ شود (Chartzoulakis, 2021). برای مقایسه کاربرد این شاخص‌ها در شرایط باغ‌های خشک، جدول (۲) ارائه می‌شود.

جدول ۲. ارزیابی کاربردی شاخص‌های تنش محصول در باغات مناطق خشک ایران

Table 2. Practical evaluation of crop stress indices in orchards in dry regions of Iran

| کاربرد پیشنهادی در RDI / PRD   | محدودیت اجرایی در ایران                            | مزیت میدانی  | روش برداشت داده                  | پارامتر / شاخص تنش                           |
|--|--|--|----------------------------------|--|
| تنها برای هشدار اولیه - مناسب برای باغ‌های سنتی کوچک (Chartzoulakis, 2021) | بسیار وابسته به تجربه فردی، بروز علائم دیر هنگام   | بدون هزینه، سریع   | مشاهده چشمی توسط باغدار          | ظاهر گیاه (رنگ برگ، پژمردگی، براقیت سطح برگ) |
| توصیه برای مزارع تحقیقاتی یا پایلوت‌های آبیاری هوشمند                      | دستگاه گران و نیازمند اپراتور فنی                  | تشخیص دقیق لحظه شروع تنش   | اندازه‌گیری با فشارسنج برگ       | پتانسیل آب برگ                               |
| مناسب برای باغ‌های پسته و زیتون تحت مدیریت RDI صادراتی                     | فناوری محدود در ایران، نیازمند زیرساخت داده‌برداری | دقت بسیار بالا در تشخیص تنش قبل از افت عملکرد (Itier et al., 1993) | نصب حسگر قطر سنج (Dendrometer)   | تغییر قطر ساقه یا میوه                       |
| قابل اجرا توسط سازمان‌های آب و جهاد کشاورزی برای هشداردهی منطقه‌ای         | نیاز به پردازش تصویر و شبکه ارتباطی                | امکان پایش وسیع و غیر تماسی  | سنجش از راه دور یا دوربین حرارتی | دمای پوشش گیاهی (ترموگراف مادون قرمز)        |
| فقط در پروژه‌های تحقیقاتی و الگوسازی اولیه                                 | فناوری کم‌یاب، هزینه بالا                          | تشخیص دقیق مصرف آب واقعی گیاه                                      | نصب حسگر روی تنه                 | جریان شیره گیاهی (Sap Flow)                  |

### ۳- پارامترهای اقلیمی

در مقیاس‌های منطقه‌ای و حتی در سطح باغ‌های متوسط تا بزرگ، استفاده از پارامترهای اقلیمی به‌عنوان مبنای برآورد نیاز آبی گیاه، یکی از روش‌های متداول برنامه‌ریزی آبیاری است (Allen et al., 1998). در این روش، داده‌های آب‌وهوایی نظیر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی وارد معادلات تبخیر - تعرق مرجع ( $ET_0$ ) شده و سپس با ضرب در ضریب گیاهی، نیاز واقعی آبی گیاه ( $ET_c$ ) محاسبه می‌گردد (Chartzoulakis, 2021; Berhe et al., 2022). بنابراین، استفاده از اطلاعات اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک که دسترسی به داده‌های هواشناسی امکان‌پذیر است، می‌تواند مبنای طراحی تقویم آبیاری قرار گیرد. جدول (۳) مقایسه‌ای از روش‌های تعیین نیاز آبی بر پایه پارامترهای اقلیمی در باغات مناطق خشک ایران را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که اتصال این داده‌ها به سامانه‌های هشداردهی می‌تواند تصمیم‌گیری مزرعه‌ای را بهبود دهد. با توجه به اینکه در مناطق خشک ایران مانند کرمان، یزد و خراسان ایستگاه‌های اقلیمی فعال وجود دارد، این روش می‌تواند به‌صورت سامانه‌ای (SMS یا پنل تحت وب) در اختیار باغداران قرار گیرد، اما چالش اصلی، عدم اتصال این داده‌ها به سیستم تصمیم‌گیری مزرعه است.

جدول ۳. کاربرد پارامترهای اقلیمی در تعیین نیاز آبی گیاه در مناطق خشک ایران

Table 3. Application of climatic parameters in determining plant water requirements in arid regions of Iran

| پیشنهاد اجرایی برای مدیران آب و باغداران                                | محدودیت اجرایی در ایران                                  | مزیت علمی و مدیریتی                            | شرح کاربرد   | روش اقلیمی                                  |
|---|--|--|--|---|
| اتصال داده‌های هواشناسی به سامانه پیامکی برای باغداران                  | نیاز به داده‌های دقیق و پایش روزانه                      | دقت بالا و مورد تأیید FAO (Allen et al., 1998) | استفاده از داده‌های هواشناسی برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع | محاسبه $ET_0$ با معادله FAO-Penman-Monteith |
| تدوین جدول $K_c$ بومی شده برای پسته، زیتون و انگور توسط تحقیقات کشاورزی | عدم بروز بودن ضرایب $K_c$ در ایران (Chartzoulakis, 2021) | امکان مدیریت مرحله‌ای آبیاری                   | ضرب $ET_0$ در $K_c$ مناسب برای هر مرحله رشد                | استفاده از ضریب گیاهی ( $K_c$ )             |
| مناسب برای واحدهای کوچک فاقد ایستگاه هواشناسی                           | خطا در مناطق بادخیز و دمای بالا                          | مقاوم در برابر قطع داده الکترونیکی             | استفاده از عدد تبخیر سیستم حوضچه‌ای                        | تبخیر سنج کلاس A                            |
| اجرای پایلوت توسط وزارت جهاد کشاورزی + آب منطقه‌ای در دشت‌های بحرانی    | نیاز به پردازش تصویر و اتصال سازمانی                     | امکان مدیریت کلان در سطح حوضه آبریز            | دریافت $ET$ از تصاویر ماهواره‌ای                           | سنجش از دور اقلیمی                          |

#### ۴- معادله بیلان آب خاک

روش بیلان آب خاک یکی از دقیق‌ترین رویکردها برای برنامه‌ریزی آبیاری است که در آن ورودی‌ها و خروجی‌های آب در ناحیه ریشه بر اساس یک معادله حفاظت آب<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود (Hess, 1996; Berhe et al., 2022). این مدل با در نظر گرفتن بارش، آبیاری، تبخیر-تعرق، نفوذ عمقی و رواناب سطحی، مقدار آب قابل دسترس خاک<sup>۲</sup> را در هر زمان تخمین می‌زند. در مناطق خشک ایران، اجرای کامل مدل بیلان آب خاک نیازمند زیرساخت داده و خدمات ترویجی هوشمند است؛ اما می‌توان با ساده‌سازی معادله و اتصال آن به سامانه‌های پیام‌رسانی هوشمند، آن را برای باغ‌های پسته، زیتون، انگور و انار بومی‌سازی کرد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، اگرچه اجرای کامل بیلان آب خاک به زیرساخت داده‌برداری نیاز دارد، اما می‌توان با طراحی نسخه ساده‌شده این مدل و ارسال «شاخص شروع آبیاری» به باغدار، کاربری این روش را در سطح عملیاتی مزرعه ممکن کرد (Chartzoulakis, 2021; Hess, 1996).

جدول ۴. کاربرد مدل بیلان آب خاک در باغات مناطق خشک ایران

Table 4. Application of soil water balance model in orchards in arid regions of Iran

| توصیه به سیاستگذاران و مدیران آبیاری                 | محدودیت‌ها و چالش‌ها  | فرصت اجرا در ایران                          | نقش در معادله مدیریت آبیاری                    | مولفه بیلان آب خاک          |
|--|---|---|--|-----------------------------|
| الزام ثبت‌نام حجمی آبیاری در طرح‌های نوین            | عدم ثبت دقیق حجم آبیاری   | داده آبیاری قابل ثبت دستی توسط کشاورز       | تعیین مقدار آب ورودی به پروفیل ریشه            | ورودی‌ها (آبیاری + بارندگی) |
| ارائه ET روزانه از طریق پنل پیامکی جهاد کشاورزی      | عدم دسترسی لحظه‌ای باغداران به ET                                     | اتصال به داده‌های اقلیمی                    | تعیین مقدار آب مصرف‌شده توسط گیاه              | خروجی‌ها (ETc)              |
| اجرای طرح آموزش مفهوم آب مؤثر                        | کشاورزان آن را «آبیاری خوب» تلقی می‌کنند و به‌عنوان هدررفت نمی‌شناسند | در خاک‌های شنی کرمان و یزد قابل توجه است    | نشان‌دهنده تلفات آب ناشی از آبیاری بیش از نیاز | نفوذ عمقی                   |
| توصیه به اجرای میکروتراسینگ کم‌هزینه + تسطیح نقطه‌ای | نبود تسطیح سطحی و ناآگاهی باغداران                                    | در باغات دیم‌کاری اصلاح‌شده قابل مدیریت است | خروج آب از محدوده ریشه در باغات شیب‌دار        | رواناب سطحی                 |
| ایجاد اپلیکیشن ساده بیلان آبیاری برای باغداران       | نبود ابزارهای گزارش‌گیر آنلاین  | امکان سنجش با سنسور ساده یا مدل موبایلی     | مهم‌ترین متغیر تصمیم‌گیرنده برای شروع آبیاری   | ذخیره آب در خاک             |

#### ۵- برنامه‌ریزی مؤثر آبیاری

اگرچه ابزارها و روش‌های متعددی برای برنامه‌ریزی آبیاری معرفی شده‌اند، اما کاربرد واقعی آن‌ها در مزارع و باغات مناطق خشک بسیار محدود بوده است. مهم‌ترین علت، نه ضعف فنی روش‌ها، بلکه ناتوانی سیستم‌های تحویل آب و ساختار نهادی مدیریت آب در اجرای بیلان آب خاک در سطح مزرعه است (Chartzoulakis, 2021). در بسیاری از شبکه‌های آبیاری ایران، آب بر اساس نوبت‌دهی سنتی و نه بر اساس نیاز واقعی ریشه و بیلان آب خاک توزیع می‌شود. این عدم هماهنگی میان مدل علمی (بیلان آب خاک) و ساختار اجرایی (نظام توزیع آب کشاورزی)، باعث می‌شود حتی کشاورزانی که به اطلاعات فنی دسترسی دارند نتوانند برنامه‌ریزی مؤثر انجام دهند. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، عامل اصلی ناکارآمدی برنامه‌ریزی آبیاری در ایران، عدم هم‌راستایی نظام تحویل آب با منطق بیلان آب خاک است. تا زمانی که ورودی آب قابل‌مدیریت و ثبت‌شدنی نباشد، خروجی مدل بیلان آب خاک نیز قابل‌اتکا نخواهد بود (Chartzoulakis, 2021).

1. Water Conservation Equation  
2. Readily Available Water

جدول ۵. موانع و الزامات اجرایی‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر بیلان آب خاک

Table 5. Obstacles and requirements for implementing irrigation planning based on soil water balance

| چالش اجرایی                                | ریشه مشکل   | تأثیر بر بیلان آب خاک در مزرعه  | پیشنهاد اصلاح سیاستی / مدیریتی  |
|--|---|---|---|
| نوبت‌بندی سنتی آبرسانی در شبکه‌های کانالی  | تحويل حجمی نامنظم و بدون انعطاف                           | بیلان آب خاک قابل محاسبه نیست زیرا ورودی آب ثابت و قابل پیش‌بینی نیست | ایجاد نظام تخصیص آب تطبیقی بر اساس نیاز واقعی   |
| قیمت‌گذاری غیرواقعی آب                     | عدم انگیزه برای صرفه‌جویی                                 | بیلان آب خاک به‌عنوان ابزار مدیریت مصرف بی‌اثر می‌ماند                | اصلاح تعرفه آب + ارائه مشوق برای ثبت مصرف و اجرای بیلان آب خاک                                    |
| نبود سامانه ثبت و پایش آبیاری در سطح مزرعه | عدم ثبت ورودی واقعی آب                                    | مدل بیلان آب خاک ورودی داده معتبر ندارد                               | ایجاد اپلیکیشن ساده ثبت آبیاری توسط کشاورز + اتصال به جهاد کشاورزی                                |
| فاصله میان تحقیقات و اجرا                  | نتایج تحقیقاتی به زبان قابل فهم برای کشاورز ارائه نمی‌شود | بیلان آب خاک در حد گزارش باقی می‌ماند                                 | تولید «نسخه ساده بیلان آب خاک» برای کشاورزان با شاخص رنگی (سبز = عدم نیاز، قرمز = نیاز به آبیاری) |
| نبود آموزش و ترویج دیجیتال                 | ارتباط یک‌سویه از بالا به پایین                           | کشاورزان به مدل اعتماد نمی‌کنند                                       | استفاده از پیامک، کانال‌های مجازی و کارگاه‌های میدانی برای آموزش بیلان آب خاک                     |

### روابط آب در گیاهان و اهمیت آن در مدیریت آبیاری

تنش آبی زمانی رخ می‌دهد که سرعت تعرق بیشتر از توان جذب آب توسط ریشه‌ها باشد. در این وضعیت، گیاه برای جلوگیری از افت شدید رشد، مکانیسم‌هایی مانند بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق را فعال می‌کند تا توازن آب حفظ شود (Fernández et al., 2003). یکی از پاسخ‌های مهم گیاه در شرایط کم‌آبی، سیگنال‌دهی ریشه است؛ به این معنا که وقتی بخشی از ریشه در خاک خشک قرار می‌گیرد، پیام تنش از طریق هورمون‌ها به برگ منتقل شده و روزنه‌ها بسته می‌شوند. این فرآیند، پایه علمی روش‌هایی مانند RDI و PRD است که بر ایجاد تنش کنترل‌شده برای صرفه‌جویی در آب استوار هستند (Fernández et al., 2003; Dichio et al., 2007). از آنجا که حساسیت گیاه به کمبود آب در مراحل مختلف رشد یکسان نیست، شناخت دوره‌های بحرانی و کم‌حساسیت فنولوژیک اهمیت زیادی برای طراحی الگوی آبیاری بهینه دارد. اجرای موفق کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و کم‌آبیاری ناقص ریشه (PRD) زمانی امکان‌پذیر است که مدیر مزرعه بداند در چه دوره‌ای می‌توان آبیاری را کاهش داد بدون اینکه عملکرد اقتصادی افت کند (Dichio et al., 2007).

### روش‌های آبیاری

آبیاری سطحی رایج‌ترین روش برای اعمال آب به زمین است. تعدادی از تکنیک‌های آبیاری سطحی در باغبانی استفاده می‌شوند، اما همه آنها یک محدودیت اساسی دارند؛ عمق آب اعمال شده توسط سرعت نفوذ خاک تعیین می‌شود. با آبیاری سطحی، طراحی‌های مهندسی بهتر، مدیریت و آماده‌سازی زمین (به عنوان مثال، تسطیح لیزری)، آبیاری سطحی می‌تواند در خاک‌های یکنواخت با سرعت نفوذ متوسط تا کم کارآمد باشد، اما در خاک‌های ناهمگن و/یا با بافت سبک ناکارآمد است (Nikolaou et al., 2020).

### روش‌های آبیاری موضعی

آبیاری موضعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت تقاضای آب در باغبانی مناطق خشک شناخته می‌شود، زیرا با انتقال مستقیم آب به ناحیه فعال ریشه، تلفات تبخیر و رواناب سطحی را به حداقل می‌رساند و امکان کنترل دقیق حجم آبیاری را فراهم می‌کند (Keller and Bliesner, 1990; Elkaoud et al., 2025). در این روش، آب با دبی پایین و در دفعات بیشتر اعمال می‌شود و رطوبت خاک در محدوده بهینه نگه داشته می‌شود که این امر تنش آبی گیاه را کاهش داده و شرایط رشد پایدار را فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از سیستم‌های قطره‌ای می‌تواند مصرف آب را ۳۰ تا ۷۰ درصد کاهش و عملکرد محصول را ۲۰ تا ۹۰ درصد افزایش دهد (Postel et al., 2001). راندمان کاربرد آب در آبیاری موضعی ممکن است به بیش از ۹۵ درصد برسد و این سیستم علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، قابلیت انجام کودآبیاری، کاهش شوری در ناحیه ریشه و بهبود بهداشت گیاهی را نیز دارد (Chartzoulakis, 2021). با این حال، هزینه اولیه نصب سیستم و حساسیت به گرفتگی قطره‌چکان‌ها از محدودیت‌های اصلی توسعه آن به شمار می‌رود که با انتخاب صحیح فیلتر، مدیریت فشار و آموزش نگهداری دوره‌ای قابل کنترل است (Fereres and Goldhamer, 1990). با توجه به شرایط کم‌آبی

و لزوم افزایش بهره‌وری آب در بخش باغبانی، به‌کارگیری آبیاری موضعی در کنار راهکارهای پشتیبان مالی، ترویجی و مدیریتی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد اولویت‌دار برای مدیریت هوشمند آب در مناطق خشک توصیه شود (Chartzoulakis et al., 1991). ترکیب صرفه‌جویی در مصرف آب و عملکرد بالاتر در آبیاری قطره‌ای معمولاً حداقل ۵۰ درصد راندمان مصرف آب، یعنی عملکرد در واحد آب را افزایش می‌دهد (جدول ۶)، و آن را به یک فناوری پیشرو در چالش جهانی افزایش تولید محصول در مواجهه با محدودیت‌های جدی آب تبدیل می‌کند. اگرچه مساحت آبیاری موضعی در طول دو دهه گذشته ۵۰ برابر شده است، اما هنوز کمتر از ۲٪ از مساحت آبیاری شده جهان را تشکیل می‌دهد. موانع اصلی گسترش آن، هزینه بالای سرمایه‌گذاری، از ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ یورو در هکتار، و حساسیت بالا به گرفتگی است (Chartzoulakis, 2021).

جدول ۶. آب آبیاری، عملکرد و کارایی مصرف آب در کیوی آبیاری شده با سیستم‌های مختلف (Chartzoulakis et al., 1991)

Table 6. Irrigation water, yield and water use efficiency in kiwi irrigated with different systems (Chartzoulakis et al., 1991)

| Irrigation system  | (mm) Water used | Yield (kg tree <sup>-1</sup> ) | WUE (kg mm <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------|
| Drip               | 340             | 33.2 a                         | 4.00 a                     |
| Micro-sprinkler    | 477             | 30.9 a                         | 2.65 b                     |
| Overhead sprinkler | 782             | 34.6 a                         | 1.81 c                     |

(\*) به طور متوسط ۱۰ سال

سیستم آبیاری قطره‌ای یکی از کارآمدترین روش‌های آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که موجب افزایش بهره‌وری آب و بهبود عملکرد محصولات باغی می‌شود. اجزای اصلی این سیستم شامل چهار بخش است: منبع فشار مانند ایستگاه پمپاژ یا مخزن ذخیره آب، بخش کنترل شامل فیلترها، مخزن کود، تنظیم‌کننده‌های فشار و شیرآلات، خطوط انتقال آب شامل لوله‌های اصلی و فرعی، و قطره‌چکان‌ها که آب را به صورت دقیق و یکنواخت به پای گیاه می‌رسانند (Chartzoulakis, 2021). در شرایط کم‌آبی، بهبود طراحی و مدیریت سیستم آبیاری نقش کلیدی دارد. اقداماتی چون تنظیم فشار و دبی، انتخاب فیلتر متناسب با کیفیت آب، اتوماسیون آبیاری و استفاده از کودآبیاری به صورت هدفمند می‌تواند مصرف آب را تا ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده و بهره‌وری را افزایش دهد. این روش همچنین امکان کنترل بهتر بیماری‌های خاک‌زاد و علف‌های هرز را فراهم می‌کند. در خاک‌های با نفوذ بالا، ترکیب سیستم قطره‌ای با میکروآب‌پاش‌ها می‌تواند موجب یکنواختی بیشتر آبیاری و افزایش توسعه ریشه شود. میکروآب‌پاش‌ها علاوه بر پوشش سطح وسیع‌تر، به کاهش خطر یخ‌زدگی و تهویه بهتر خاک نیز کمک می‌کنند (Feres et al., 2003). از دیدگاه اجرایی، تمرکز بر نگهداری منظم سیستم، کنترل گرفتگی قطره‌چکان‌ها و استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق محلی برای زمان‌بندی آبیاری ضروری است. بهره‌گیری از سنسورهای رطوبت خاک یا سامانه‌های پایش ساده می‌تواند به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و صرفه‌جویی واقعی در مصرف آب کمک کند. در مجموع، در مناطق خشک ایران، استفاده از سیستم‌های آبیاری موضعی هوشمند همراه با آموزش کشاورزان و حمایت سیاست‌گذاران در زمینه تأمین تجهیزات و تسهیلات مالی می‌تواند گامی مؤثر در مدیریت پایدار آب کشاورزی و حفظ تولید باغی باشد.

### شیوه‌های کم‌آبیاری در مدیریت آب مناطق خشک

در گذشته، برنامه‌ریزی آبیاری معمولاً بر تأمین کامل نیاز آبی گیاهان استوار بود و محدودیت منابع آب کمتر مورد توجه قرار می‌گرفت. با افزایش فشار بر منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و رقابت بخش‌های شرب و صنعت، سهم آب کشاورزی به‌طور پیوسته کاهش یافته است. از این رو، تمرکز بر افزایش بهره‌وری آب و استفاده از روش‌های کم‌آبیاری به جای تأمین کامل نیاز آبی ضروری است. این رویکردها علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌توانند عملکرد اقتصادی کشاورزان را نیز حفظ کنند (Nouri et al., 2023).

### کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI)<sup>۱</sup>

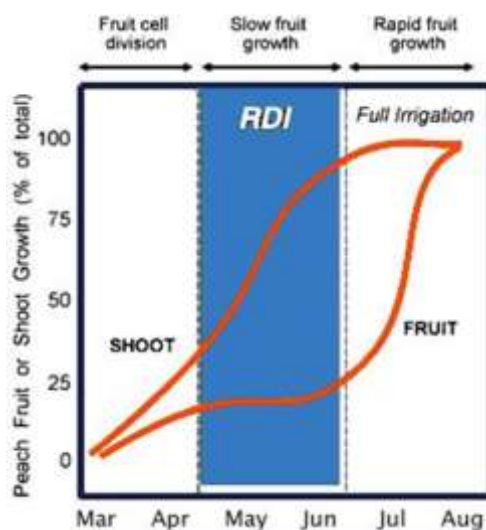
کم‌آبیاری تنظیم‌شده، یکی از روش‌های مؤثر و کاربردی مدیریت آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با هدف افزایش بهره‌وری

آب و حفظ عملکرد اقتصادی محصولات باغی با حداقل مصرف آب طراحی شده است (شکل ۴). در این روش، گیاه به صورت کنترل شده در بخشی از فصل رشد در معرض تنش آبی قرار می‌گیرد تا با کاهش محدود رشد رویشی و عملکرد، بتوان از آب صرفه‌جویی شده برای سایر بخش‌های زراعی استفاده کرد (Chartzoulakis, 2021, Wu et al., 2025). این استراتژی در شرایط کم‌آبی ایران، به‌ویژه در باغ‌های پسته، زیتون و انگور، می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در حفظ پایداری تولید ایفا کند.

اجرای موفق RDI نیازمند شناخت دقیق مراحل حساس رشد گیاه و تعیین بازه‌های زمانی قابل تحمل برای تنش آبی است. به‌طور معمول در دوره‌های رشد رویشی که نیاز گیاه به آب کمتر است، میزان آبیاری کاهش می‌یابد و در مراحل بحرانی مانند گلدهی و تشکیل میوه، تأمین آب به صورت کامل انجام می‌شود. این روش نه تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود، بلکه کنترل رشد رویشی، بهبود کیفیت محصول و افزایش درصد ماده خشک را نیز در پی دارد (Feres et al., 2003; Chartzoulakis, 2021).

تجربه‌های مزرعه‌ای در مناطق خشک نشان داده است که کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی حجم آب آبیاری در دوره‌های کم‌حساسیت گیاه می‌تواند بدون کاهش محسوس عملکرد اقتصادی، بهره‌وری آب را تا بیش از ۴۰ درصد افزایش دهد. در مطالعات انجام‌شده بر روی زیتون، RDI موجب کاهش مصرف آب از ۴۳۲ به ۳۲۱ میلی‌متر در سال شد، در حالی که عملکرد میوه تنها حدود ۱۰ درصد کاهش یافت و بهره‌وری آب از ۰/۴۹ به ۰/۷۳ کیلوگرم روغن در میلی‌متر افزایش پیدا کرد (Chartzoulakis et al., 1991). این نتایج بیانگر آن است که RDI می‌تواند در مقایسه با آبیاری کامل، عملکرد اقتصادی بهتری نسبت به حجم آب مصرفی ارائه دهد. برای اجرای کاربردی RDI در شرایط باغ‌های ایران، چند اقدام کلیدی ضروری است: نخست، پایش مداوم رطوبت خاک و وضعیت گیاه از طریق ابزارهایی مانند سنسور یا حسگرهای رطوبتی ساده که به کشاورزان امکان می‌دهد زمان دقیق آبیاری را تعیین کنند. دوم، تدوین برنامه آبیاری مرحله‌ای متناسب با نیاز واقعی گیاه در هر دوره رشد (رویشی، زایشی و رسیدگی). سوم، آموزش عملی باغداران برای تشخیص علائم تنش آبی خفیف و زمان مناسب شروع و پایان آبیاری. چهارم، استفاده از سیستم‌های آبیاری موضعی نظیر قطره‌ای به منظور کنترل دقیق‌تر حجم و یکنواختی توزیع آب در ناحیه فعال ریشه. و در نهایت، تدوین دستورالعمل‌های بومی متناسب با اقلیم و ویژگی‌های خاک و گیاه هر منطقه برای اجرای دقیق‌تر روش (Feres & Goldhamer, 1990; Wu et al., 2025). به‌طور کلی، اجرای کم‌آبیاری تنظیم‌شده علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب، می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سیاست‌های حمایتی در مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی باشد. پیشنهاد می‌شود مدیران و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی با طراحی برنامه‌های آموزشی و ترویجی، ارائه مشوق‌های اقتصادی و ایجاد زیرساخت‌های فناورانه، زمینه گسترش این روش را در باغ‌های مناطق خشک کشور فراهم کنند. این رویکرد علاوه بر ارتقای بهره‌وری منابع آبی، موجب تاب‌آوری بیشتر نظام تولید باغی در برابر تغییرات اقلیمی خواهد شد (Chartzoulakis, 2021; Andreu-Coll et al., 2024).

توسعه کم‌آبیاری تنظیم‌شده بدون درک اولیه الگوهای رشد درخت و میوه امکان‌پذیر نیست. کم‌آبیاری تنظیم‌شده باید در دوره‌ای اعمال شود که رشد شاخه سریع و رشد میوه کند باشد (شکل ۳). مراحل لازم برای اجرای موفقیت‌آمیز کم‌آبیاری تنظیم‌شده عبارتند از اندازه‌گیری رشد شاخه و میوه برای تعیین دوره کم‌آبیاری تنظیم‌شده برای گونه‌ها یا ارقام میوه؛ تعیین توزیع ناحیه ریشه (عرض و عمق)؛ تعیین الگوی خیس‌شدگی سیستم آبیاری و تخمین ناحیه ریشه خیس‌شده؛ تدوین برنامه آبیاری فصلی (مقدار و فاصله) بر اساس نوع خاک و  $E_{pan}$  یا  $E_{T_0}$ ، و نصب حسگرهای رطوبت خاک (عمق و تعداد آنها به خاک بستگی دارد). در طول دوره کم‌آبیاری تنظیم‌شده: اندازه‌گیری و ثبت مکش خاک و آبیاری در فشار ۲۰۰- کیلوپاسکال، و آبیاری تا خیس شدن ۰/۳ متر بالای ناحیه ریشه (Wu et al., 2025).



شکل ۳. الگوی معمول رشد شاخه و میوه برای هلو و دوره کاربرد کم‌آبیاری تنظیم‌شده (Chartzoulakis, 2021)

Figure 3. Typical branch and fruit growth pattern for peach and adjusted drought application period (Chartzoulakis, 2021)

### خشک‌کردن جزئی ریشه (PRD)<sup>۱</sup>

خشک‌کردن جزئی ریشه، یکی از روش‌های نوین و کارآمد آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با هدف افزایش بهره‌وری آب و حفظ عملکرد اقتصادی گیاهان توسعه یافته است (شکل ۴). در این روش، نیمی از سیستم ریشه گیاه در معرض خشکی قرار می‌گیرد، در حالی که نیمه دیگر به طور معمول آبیاری می‌شود. این جابجایی به صورت متناوب در دوره‌های ۷ تا ۱۴ روزه انجام می‌گیرد و سبب تحریک پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه برای ایجاد تعادل بین رشد رویشی و زایشی می‌شود. این فرایند بر پایه‌ی توانایی گیاه در پاسخ به تنش آبی کنترل‌شده استوار است، به گونه‌ای که بخشی از ریشه‌ها پیام‌های هورمونی مرتبط با کمبود آب را تولید کرده و از این طریق مکانیسم‌های صرفه‌جویی در مصرف آب فعال می‌شوند (Chartzoulakis, 2021; Dry et al., 2000).

در شرایط تنش آبی کنترل‌شده، ریشه‌های بخش خشک هورمون اسید آبسازیک تولید می‌کنند که از طریق جریان تعلق به برگ منتقل شده و باعث کاهش بازشدگی روزنه‌ها و محدود شدن اتلاف آب می‌شود. این واکنش موجب بهبود کارایی مصرف آب و کاهش نیاز آبی گیاه بدون افت محسوس عملکرد می‌گردد. اگرچه کاهش نسبی فتوسنتز به‌عنوان نتیجه‌ی طبیعی این فرآیند مشاهده می‌شود، اما جابجایی منظم ناحیه خشک و مرطوب موجب می‌شود اثر منفی آن موقتی بوده و تعادل بین رشد و تولید حفظ شود (Loveys et al., 2000; Dry et al., 2000).

آزمایش‌های میدانی و تجاری در تاکستان‌ها و باغ‌های مرکبات نشان داده است که در صورت اجرای صحیح PRD، مصرف آب می‌تواند تا ۵۰ درصد کاهش یابد، بدون آنکه افت قابل توجهی در عملکرد مشاهده شود. افزون بر این، کیفیت میوه‌ها نیز حفظ شده یا حتی در برخی موارد بهبود یافته است. نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که PRD نسبت به روش آبیاری کم‌تنش تنظیم‌شده (RDI) در حفظ عملکرد و بهبود کیفیت میوه برتری دارد و در بسیاری از گونه‌های باغی مانند انگور، زیتون و گلابی موفقیت‌آمیز بوده است (Dry et al., 2000; Loveys et al., 1997; Clancy, 1999).

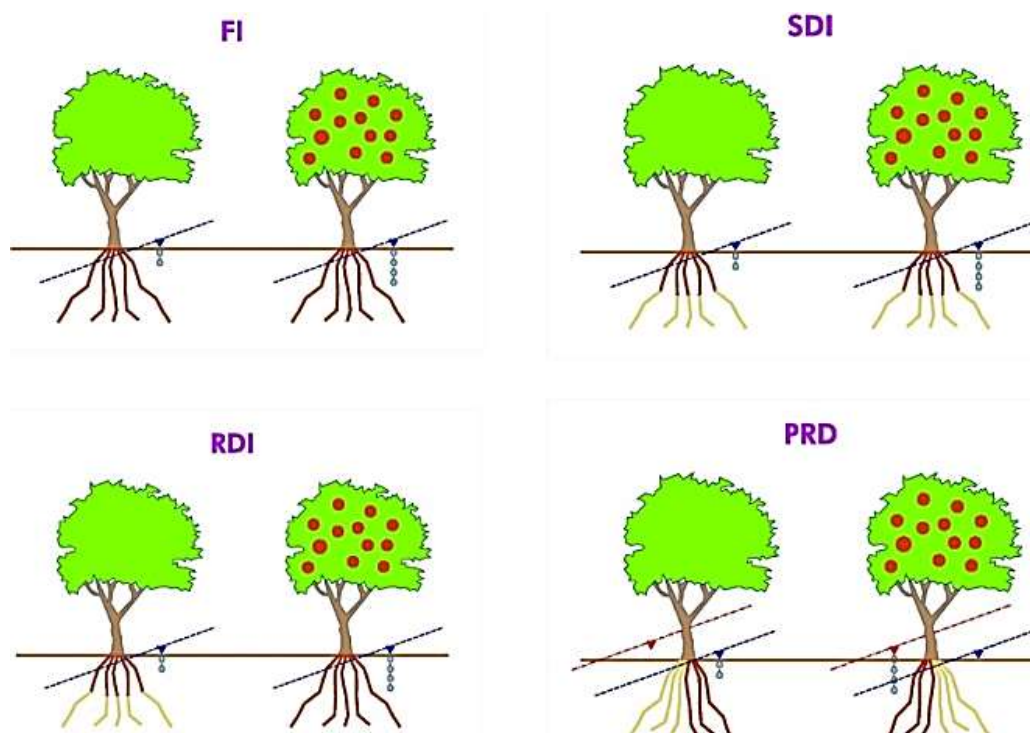
از نظر اجرایی، این روش به راحتی می‌تواند در سیستم‌های آبیاری موجود پیاده‌سازی شود و تنها به افزودن یک خط مجزای آبیاری نیاز دارد تا امکان جابجایی ناحیه خشک و مرطوب فراهم گردد. هرچند هزینه اولیه نصب ممکن است نسبت به سیستم‌های سنتی کمی بیشتر باشد، اما در مناطق خشک که هزینه آب و اهمیت منابع آبی بسیار بالاست، استفاده از این روش کاملاً مقرون‌به‌صرفه است. کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، کاهش تلفات تبخیر و نفوذ عمقی، و بهبود سلامت خاک از مزایای جانبی اجرای این روش به شمار می‌رود (Chartzoulakis, 2021).

بنابراین، خشک‌کردن جزئی ریشه را می‌توان یکی از گزینه‌های کلیدی برای مدیریت پایدار منابع آب در باغ‌های مناطق خشک دانست. به منظور موفقیت در پیاده‌سازی این روش، پیشنهاد می‌شود که آموزش عملی کشاورزان در زمینه زمان‌بندی جابجایی ناحیه

مرطوب و خشک، استفاده از حسگرهای رطوبت خاک و آشنایی با شاخص‌های تنش آبی در برنامه‌های ترویجی گنجانده شود. از منظر سیاست‌گذاری نیز، حمایت مالی از تجهیز سامانه‌های آبیاری موجود و ایجاد سازوکارهای تشویقی برای بهره‌برداران می‌تواند به گسترش استفاده از این روش در سطح مزرعه کمک کند. در نهایت، تلفیق روش PRD با سایر راهبردهای آبیاری هوشمند، مانند آبیاری قطره‌ای و سامانه‌های پایش خودکار رطوبت خاک، می‌تواند مسیر دستیابی به مدیریت کارآمد و پایدار آب در باغبانی مناطق خشک را هموار سازد (Fereres et al., 2003; Chartzoulakis, 2021).

#### آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI)<sup>۱</sup>

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی یکی از مؤثرترین روش‌های نوین مدیریت آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (شکل ۴). در این روش، آب از طریق لوله‌های مدفون در زیر خاک مستقیماً به ناحیه فعال ریشه هدایت می‌شود و با مکش ماتریک خاک در اطراف لوله پخش می‌گردد. این سیستم با حذف تلفات تبخیر سطحی و رواناب، موجب افزایش چشمگیر بهره‌وری آب و پایداری تولید در شرایط محدودیت منابع آبی می‌شود. این فناوری به‌ویژه در باغ‌های پسته، زیتون، انگور و سایر محصولات با ارزش افزوده بالا توصیه می‌شود که به آبیاری دقیق و یکنواخت نیاز دارند (Chartzoulakis, 2021; Fereres et al., 2003).



شکل ۴. الگوی گرافیکی استراتژی‌های آبیاری کامل (FI)، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI)، کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و خشک کردن جزئی ریشه (PRD) در درختان میوه (Galindoa et al., 2018)

Figure 4. Graphical model of full irrigation (FI), subsurface drip irrigation (SDI), regulated deficit irrigation (RDI), and partial root drying (PRD) strategies in fruit trees (Galindoa et al., 2018)

از مهم‌ترین مزایای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌توان به صرفه‌جویی ۳۰ تا ۵۰ درصدی در مصرف آب، افزایش راندمان جذب کود، یکنواختی پخش آب، کاهش بیماری‌ها و علف‌های هرز و امکان انجام آبیاری‌های مکرر و سبک اشاره کرد. در عین حال، هزینه اولیه نسبتاً بالا و احتمال گرفتگی قطره‌چکان‌ها از محدودیت‌های این روش است که با طراحی مناسب، استفاده از فیلتر ۲۰۰ مش و شست‌وشوی منظم سیستم قابل کنترل خواهد بود. برای محصولات باغی، عمق نصب لوله‌ها معمولاً بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر برای سبزیجات و ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر برای درختان متغیر است (Chartzoulakis, 2021).

در شرایط خشک ایران، اجرای صحیح این سیستم نیازمند توجه به کیفیت آب است. در صورت وجود ذرات معلق یا مواد آلی، تزریق دوره‌ای اسید یا کلر در پایان فصل آبیاری می‌تواند از گرفتگی جلوگیری کند. همچنین، استفاده از سامانه‌های پایش رطوبت خاک مانند حسگرهای TDR و تانسیومتر در کنار SDI باعث می‌شود آبیاری دقیق‌تر و مطابق نیاز واقعی گیاه انجام شود. این ترکیب نه تنها موجب صرفه‌جویی در منابع آبی می‌گردد، بلکه کیفیت و پایداری محصول را نیز افزایش می‌دهد (Peyremorte and Chol, 1992; Chartzoulakis, 2021).

به‌منظور کاربردی‌سازی این روش در باغ‌های مناطق خشک کشور، پیشنهاد می‌شود مدیران منابع آب و سیاستگذاران با حمایت مالی از کشاورزان در نصب سیستم‌های SDI، آموزش نگهداری و مدیریت فنی را در برنامه‌های ترویجی بگنجانند. ایجاد طرح‌های پایلوت در استان‌های خشک مانند کرمان، یزد و خراسان می‌تواند به الگوسازی و انتقال تجربه موفق کمک کند. در نهایت، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به عنوان یک راهکار کلیدی برای افزایش بهره‌وری آب و کاهش فشار بر منابع زیرزمینی توصیه می‌شود (Chartzoulakis, 2021; Fereres and Goldhamer, 1990).

### کاهش نیازهای آبیاری در باغبانی مناطق خشک

افزایش فشار بر منابع آب و رقابت میان بخش‌های مختلف مصرف‌کننده، ضرورت مدیریت پایدار آب در کشاورزی را بیش از پیش نمایان ساخته است. در مناطق خشک، کاهش مصرف واقعی آب بدون افت عملکرد محصول، از طریق ترکیب فناوری‌های نوین آبیاری و مدیریت علمی تنش آبی امکان‌پذیر است. در این راستا، راهبردهای کلیدی شامل بهبود کارایی سامانه‌های آبیاری، مدیریت کم‌آبیاری و استفاده از منابع جایگزین آب می‌باشد (Chartzoulakis, 2021). در شرایطی که روش‌های سنتی آبیاری هنوز در بخش عمده‌ای از باغ‌های کشور رایج است، توسعه و نگهداری صحیح سامانه‌های آبیاری موضعی مانند آبیاری قطره‌ای و میکروسپرینکلر، مؤثرترین ابزار برای کاهش تلفات تبخیری و نفوذ عمقی محسوب می‌شود. در صورت طراحی و بهره‌برداری درست، راندمان کاربرد آب در این سیستم‌ها می‌تواند به بیش از ۸۰ درصد برسد. همچنین استفاده از آبیاری زیرسطحی قطره‌ای در باغ‌های جدید موجب کاهش تبخیر سطحی و افزایش یکنواختی توزیع آب می‌گردد (Fereres & Goldhamer, 1990; Villalobos et al., 2003).

از سوی دیگر، مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و خشک‌کردن جزئی ناحیه ریشه (PRD) از روش‌های نوین مدیریت تنش آبی در باغبانی مناطق خشک هستند. در روش RDI، آبیاری در مراحل غیرحساس رشد گیاه کاهش یافته و در دوره‌های بحرانی ادامه می‌یابد، در حالی که روش PRD با آبیاری متناوب دو سوی ریشه، واکنش‌های فیزیولوژیک تنظیمی را تحریک می‌کند که منجر به بهبود بهره‌وری آب و کیفیت میوه می‌شود. هر دو روش قادرند مصرف آب را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهند بدون آنکه عملکرد اقتصادی باغ به طور محسوسی کاهش یابد (Chalmers et al., 1981; Goldhamer & Fereres, 2001; Dry et al., 2000). در برخی گونه‌های درختی مانند هلو و بادام، اجرای کم‌آبیاری پس از برداشت نیز به‌عنوان یک راهکار ساده و کم‌هزینه مورد توجه قرار گرفته است. کاهش دفعات آبیاری پس از برداشت می‌تواند تا ۲۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی ایجاد کند، بدون اینکه تأثیر منفی بر گلدهی یا باردهی سال بعد داشته باشد (Larson et al., 1988). علاوه بر این، به‌کارگیری روش‌های مکمل مانند مالچ‌پاشی، سایه‌انداز و پوشش گیاهی کف باغ به کاهش تبخیر سطحی و تثبیت رطوبت خاک کمک می‌کند (Chartzoulakis, 2021).

یکی دیگر از محورهای مؤثر در کاهش نیاز آبی، استفاده از منابع آب جایگزین از جمله فاضلاب تصفیه‌شده شهری (آب بازیافتی) است. مطالعات نشان داده‌اند که در صورت پایش دقیق کیفیت، استفاده از این آب در باغ‌های مرکبات و زیتون نه تنها تأثیر منفی بر عملکرد ندارد بلکه با تأمین مواد مغذی خاک، به پایداری منابع آب کمک می‌کند. این رویکرد، همراه با بهره‌گیری از بارش‌های فصلی در برنامه‌ریزی آبیاری، می‌تواند مکمل مؤثری برای مدیریت کم‌آبی در مناطق خشک باشد (Parsons et al., 2001; Fereres et al., 2003). در مجموع، ترکیب این رویکردها چارچوبی جامع برای کاهش نیاز آبی در باغبانی مناطق خشک ایجاد می‌کند. جدول (۷) مجموعه‌ای از مهم‌ترین روش‌های مدیریتی، مزایا، محدودیت‌ها و توصیه‌های اجرایی مربوط به این حوزه را ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای کشاورزان، مدیران مزرعه و سیاست‌گذاران باشد (Fereres et al., 2003; Chartzoulakis, 2021).

جدول ۷. روش‌ها و فناوری‌های کلیدی مدیریت پایدار آب در باغ‌های مناطق خشک  
Table 7. Key methods and technologies for sustainable water management in dryland gardens

| ردیف | روش یا فناوری مدیریت آب                                 | هدف اصلی                                     | مزایا و تأثیرات کلیدی                                      | محدودیت‌ها / چالش‌ها                      | پیشنهاد‌های اجرایی و سیاستی  | منابع  |
|------|---|--|--|---|--|--|
| ۱    | آبیاری موضعی (قطره‌ای / میکرو)                          | کاهش تبخیر و نفوذ عمقی                       | راندمان کاربرد آب تا ۸۵٪؛ کاهش بیماری‌های قارچی و شوری خاک | هزینه اولیه بالا، گرفتگی قطره‌چکان‌ها     | آموزش نگهداری سیستم‌ها، یارانه برای تجهیزات، استفاده از فیلتر خودتمیزشونده | Fereres & Goldhamer (1990); Chartzoulakis (2021)   |
| ۲    | آبیاری زیرسطحی قطره‌ای                                  | حذف تبخیر سطحی خاک                           | صرفه‌جویی ۱۰-۲۰٪ نسبت به قطره‌ای سطحی                      | نیاز به طراحی دقیق و کنترل گرفتگی لوله‌ها | استفاده در باغ‌های جدید با خاک سبک، ترویج از طریق پروژه‌های پایلوت         | Villalobos et al. (2003)                           |
| ۳    | کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI)                               | اعمال تنش ملایم در مراحل غیرحساس رشد         | صرفه‌جویی ۲۰-۳۰٪ آب بدون افت عملکرد؛ بهبود کیفیت میوه      | نیاز به شناخت دقیق مراحل رشد              | آموزش مرحله‌بندی رشد و نصب حسگرهای ساده رطوبت خاک                          | Chalmers et al. (1981); Goldhamer & Fereres (2001) |
| ۴    | خشک‌کردن جزئی ناحیه ریشه (PRD)                          | تحریک پاسخ هورمونی برای کنترل رشد رویشی      | بهبود بهره‌وری آب و کیفیت میوه، نفوذ بهتر نور در تاج       | پیچیدگی در طراحی و تعویض نوبتی آبیاری     | اجرای آزمایشی در باغ‌های پسته و زیتون؛ پشتیبانی فنی از اپراتورهای آبیاری   | Dry et al. (2000); Fernández et al. (2003)         |
| ۵    | کم‌آبیاری پس از برداشت                                  | کاهش مصرف در دوره غیر بحرانی                 | صرفه‌جویی تا ۲۰٪ آب بدون اثر بر عملکرد سال بعد             | خطر خشکیدگی در خاک‌های سبک                | اجرای محدود به گونه‌های مقاوم مثل هلو و بادام                              | Larson et al. (1988)                               |
| ۶    | مدیریت تبخیر سطحی (مالچ، سایه‌انداز، پوشش گیاهی کف باغ) | کاهش تبخیر خاک و تنظیم دمای سطحی             | صرفه‌جویی ۱۰-۱۵٪؛ بهبود حفظ رطوبت خاک                      | هزینه نصب یا تأمین مالچ در مقیاس وسیع     | استفاده از مالچ‌های زیست‌تجزیه‌پذیر در طرح‌های ترویجی                      | Chartzoulakis (2021)                               |
| ۷    | استفاده از آب بازآفتی (فاضلاب تصفیه‌شده)                | تأمین منبع جایگزین پایدار                    | افزایش پایداری تأمین آب؛ بازگردانی مواد مغذی به خاک        | نگرانی درباره آلودگی و پذیرش اجتماعی      | تدوین دستورالعمل‌های کیفی و پایش شوری؛ اطلاع‌رسانی عمومی                   | Parsons et al. (2001); Fereres et al. (2003)       |
| ۸    | آبیاری هوشمند مبتنی بر داده اقلیمی                      | تصمیم‌گیری بر پایه ET و K <sub>c</sub> واقعی | کاهش خطای انسانی؛ امکان برنامه‌ریزی دقیق                   | نیاز به داده لحظه‌ای و زیرساخت ارتباطی    | نیاز به داده لحظه‌ای و زیرساخت ارتباطی                                     | Allen et al. (1998); Chartzoulakis (2021)          |

### رویکردهای جدید برای برنامه‌ریزی آبیاری پایدار

مدیریت مؤثر آب در باغ‌های مناطق خشک تنها به تخصیص پایدار منابع آبی محدود نمی‌شود، بلکه نیازمند به‌کارگیری روش‌های علمی و اجرایی برای کاهش مصرف آب و حفظ عملکرد محصول است. یکی از رویکردهای موفق در این زمینه، کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) است که بر کاهش کنترل‌شده آبیاری در دوره‌هایی از رشد گیاه استوار است که گیاه حساسیت کمتری به تنش آبی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که اجرای RDI می‌تواند موجب کاهش مصرف آب تا ۳۰٪، بهبود کیفیت میوه و افزایش راندمان مصرف آب شود (Marsal et al., 2002; Chartzoulakis, 2021). با این حال، کاربرد تجاری این روش هنوز محدود است، زیرا اجرای دقیق آن به سیستم‌های آبیاری مدرن، تجهیزات پایش رطوبت خاک و آزادی در تصمیم‌گیری مدیریتی نیاز دارد. برای غلبه بر این چالش‌ها، توسعه و استفاده از سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS)<sup>۱</sup> پیشنهاد می‌شود که با بهره‌گیری از داده‌های بلادرنگ (لحظه‌ای) خاک و هوا، می‌توانند وضعیت تنش آبی گیاه را پیش‌بینی کرده و برنامه آبیاری بهینه را ارائه دهند (Fernández et al., 2009). به‌طور عملی، توصیه می‌شود

آبیاری پیش از رسیدن رطوبت خاک به آستانه بحرانی انجام شود تا از بروز آب‌گریزی خاک و کاهش نفوذ آب جلوگیری گردد. همچنین، استفاده از قوانین چندمعیاره در زمان‌بندی آبیاری می‌تواند ضمن افزایش کارایی مصرف آب، به مدیران آب و سیاست‌گذاران کمک کند تا نشان دهند که بهره‌برداری از منابع محلی در چارچوب پایداری زیست‌محیطی انجام می‌شود (Clothier et al., 2010).

#### کاربرد تصویربرداری حرارتی در آبیاری دقیق

هدایت روزنه‌ها یکی از شاخص‌های حساس به کمبود آب خاک است؛ زمانی که روزنه‌ها باز هستند، دمای برگ به دلیل تبخیر و تعرق پایین‌تر است، اما با بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش آبی، دمای برگ افزایش می‌یابد. بر همین اساس، تصویربرداری حرارتی<sup>۱</sup> می‌تواند به‌عنوان ابزاری غیرتماسی و سریع برای پایش وضعیت آبی گیاه استفاده شود. مطالعات نشان داده‌اند که این فناوری قادر است گیاهان تحت تنش و بدون تنش را در تاکستان‌ها (Grant et al., 2007) و نیز تفاوت بین سطوح مختلف کم‌آبیاری را در شرایط گلخانه‌ای تشخیص دهد. با ترکیب داده‌های حرارتی با متغیرهای هواشناسی، می‌توان به‌صورت دقیق هدایت روزنه‌ها و وضعیت واقعی آب گیاه را برآورد کرد (Fernández et al., 2009).

در مناطق خشک ایران، استفاده از تصاویر حرارتی هوایی یا پهپادی می‌تواند ابزار کارآمدی برای شناسایی بخش‌هایی از باغ باشد که دچار کمبود رطوبت‌اند و نیاز بیشتری به آبیاری دارند. این فناوری به مدیران آب و کشاورزان امکان می‌دهد تا آبیاری هدفمند و منطقه‌بندی‌شده<sup>۲</sup> را اجرا کنند و از هدررفت منابع آب جلوگیری شود. به‌طور کاربردی، توصیه می‌شود که تصویربرداری حرارتی به‌عنوان بخش مکمل سیستم‌های هوشمند آبیاری<sup>۳</sup> در طرح‌های پایلوت مناطق خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد تا تصمیم‌گیری آبیاری بر پایه داده‌های واقعی برگ و خاک انجام شود.

#### کودآبیاری<sup>۴</sup> در مدیریت آبیاری مناطق خشک

کودآبیاری به معنای تزریق کودهای محلول همراه با آب آبیاری به ناحیه فعال ریشه است و یکی از روش‌های مؤثر در افزایش بهره‌وری آب و کود در سیستم‌های آبیاری مدرن، به‌ویژه آبیاری قطره‌ای و میکروجت محسوب می‌شود (Chartzoulakis, 2021). این روش با رساندن دقیق مواد غذایی به محدوده جذب ریشه، موجب افزایش کارایی مصرف کود، کاهش تلفات عناصر غذایی و بهبود کیفیت محصول می‌گردد. از دیدگاه زیست‌محیطی، کودآبیاری روشی سازگار با محیط‌زیست است زیرا با کنترل محل و زمان کوددهی، از آلودگی منابع آب زیرزمینی جلوگیری می‌کند. همچنین امکان تنظیم مقدار و زمان تزریق کود بر اساس مرحله رشد گیاه و شرایط رطوبتی خاک وجود دارد و بدین ترتیب، تغذیه گیاه به‌صورت هدفمند و بهینه انجام می‌شود. در مناطق خشک ایران، که کمبود آب و هزینه بالای نهاده‌ها چالش اصلی کشاورزان است، استفاده از کودآبیاری در کنار سیستم‌های آبیاری تحت فشار می‌تواند به کاهش مصرف آب، افزایش راندمان مصرف کود و بهبود عملکرد اقتصادی باغ‌ها کمک کند. اجرای موفق این روش مستلزم توجه به چند نکته کلیدی است: استفاده از کودهای کاملاً محلول در آب و سازگار با کیفیت آب منطقه، جلوگیری از رسوب و گرفتگی قطره‌چکان‌ها از طریق فیلتراسیون و شست‌وشوی دوره‌ای سیستم، و تزریق کنترل‌شده کود از طریق پمپ‌های ونتوری یا سیستم‌های فشار تفاضلی با نظارت بر دبی و غلظت محلول. به‌طور کلی، کودآبیاری می‌تواند یکی از مؤثرترین ابزارها برای افزایش پایداری تولید در مناطق خشک باشد، به شرط آنکه طراحی سیستم، آموزش اپراتور و پایش کیفی آب و کود به‌صورت مستمر انجام گیرد (Chartzoulakis, 2021; Keller & Bliesner, 1990).

#### توصیه‌هایی برای بهترین شیوه‌های آبیاری در مناطق خشک

بخش کشاورزی اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب است و با افزایش رقابت برای منابع آبی میان بخش‌های شهری و صنعتی، ضرورت ارتقای بهره‌وری در این بخش بیش از پیش احساس می‌شود. مدیریت پایدار آب در کشاورزی نیازمند مجموعه‌ای از اقدامات فناورانه، مدیریتی و سیاستی است که هر یک می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف و افزایش کارایی آب ایفا کند (Zhao et al., 2024).

1. Thermal Imaging  
2. Site-specific irrigation  
3. Smart Irrigation DSS  
4. Fertigation

یکی از مؤثرترین اقدامات، کاهش تلفات آب در شبکه‌های انتقال و توزیع است که می‌تواند از طریق فناوری‌های نوین مانند تله‌متری، GIS و سنسج از دور و نیز بازسازی زیرساخت‌های قدیمی صورت گیرد. در سطح مزرعه، بهبود راندمان سیستم‌های آبیاری اهمیت زیادی دارد؛ به‌گونه‌ای که در آبیاری سطحی، تسطیح زمین و استفاده از لوله‌های درجه‌دار موجب افزایش کارایی می‌شود، در سیستم‌های بارانی، تنظیم فشار و اجرای آبیاری در شرایط بدون باد راندمان را بالا می‌برد، و در سیستم‌های موضعی، استفاده از قطره‌چکان‌های مناسب، کنترل فشار و فیلتراسیون مؤثرترین راهکارها برای صرفه‌جویی در مصرف آب هستند (Parra-López et al., 2025).

در مناطق خشک، بهره‌گیری از تکنیک‌های نوآورانه مانند کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI)، آبیاری زیرسطحی و کودآبیاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کودآبیاری با تزریق محلول کود به آب آبیاری، تغذیه هدفمند گیاه را ممکن ساخته و علاوه بر افزایش راندمان مصرف کود، موجب بهبود کیفیت محصول و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌شود. استفاده از کودهای محلول در آب، نظارت بر غلظت محلول، و شست‌وشوی دوره‌ای سیستم از الزامات اجرای موفق این روش است (Wu et al., 2025).

از نظر سیاست‌گذاری، قیمت‌گذاری حجمی و تصاعدی آب، تعیین تعرفه‌های فصلی و اعمال نرخ‌های ویژه در دوره‌های خشکسالی از ابزارهای مؤثر برای تشویق کشاورزان به صرفه‌جویی و تأمین منابع مالی لازم جهت نگهداری شبکه‌های آبیاری است. همچنین، استفاده مجدد از آب‌های بازیافتی و شور تصفیه‌شده می‌تواند در کاهش فشار بر منابع آب شیرین مؤثر باشد، مشروط بر آنکه آموزش و حمایت فنی و فرهنگی مناسب برای کشاورزان فراهم گردد. مشارکت ذی‌نفعان محلی و کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با آب از عوامل کلیدی موفقیت مدیریت پایدار است. تشکیل تشکل‌های آبیاری محلی و آموزش کاربران نهایی، ضمن افزایش مقبولیت اجتماعی، به کاهش تعارضات آبی کمک می‌کند. در کنار این رویکرد مشارکتی، ظرفیت‌سازی نهادی و انسانی شامل تربیت نیروهای متخصص، تجهیز مراکز تحقیقاتی به فناوری‌های نوین مانند GIS و سنسج از دور و بازنگری در قوانین و ساختارهای اجرایی ضروری است (Toan et al., 2023).

در بعد فنی، انتخاب الگوی کشت متناسب با اقلیم و بارندگی فصلی، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی، کاهش وابستگی به محصولات پرباب‌بر، و به‌کارگیری کشت‌های کوتاه‌دوره از راهکارهای مؤثر برای کاهش فشار بر منابع آبی هستند. در حوزه خاک‌ورزی نیز روش‌هایی مانند خاک‌ورزی حفاظتی و کانتوری، استفاده از مالچ، نگهداری بقایای گیاهی، اصلاح بافت خاک و افزایش مواد آلی به حفظ رطوبت خاک و کاهش تبخیر کمک می‌کند. در نهایت، تحقق مدیریت پایدار آب در مناطق خشک تنها از طریق ترکیب اقدامات فنی، مدیریتی، اقتصادی و نهادی امکان‌پذیر است. اجرای همزمان اصلاحات قانونی، آموزش مستمر، استفاده از فناوری‌های نوین و مشارکت فعال کشاورزان می‌تواند مسیر دستیابی به کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر خشکسالی را هموار سازد.

### نتیجه‌گیری

مدیریت پایدار آب در باغبانی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورتی حیاتی در مواجهه با بحران کم‌آبی و تغییرات اقلیمی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تمرکز بر روش‌های آبیاری موضعی (قطره‌ای و زیرسطحی)، آبیاری کم‌تنش تنظیم‌شده (RDI) و خشک‌کردن جزئی ریشه (PRD) می‌تواند ضمن کاهش ۳۰ تا ۷۰ درصدی مصرف آب، کیفیت و عملکرد محصولات باغی را نیز حفظ یا حتی بهبود دهد. اجرای موفق این رویکردها نیازمند پایش دقیق وضعیت رطوبت خاک و گیاه، آموزش عملی باغداران در زمینه زمان و مقدار آبیاری و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند پایش و کنترل آبیاری است. در کنار این اقدامات فنی، تحقق مدیریت پایدار آب در سطح ملی نیازمند حمایت سیاستی و نهادی است. ایجاد سازوکارهای حمایتی مالی شامل یارانه، تسهیلات کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی برای تجهیز باغ‌ها به سامانه‌های نوین آبیاری، تدوین و اجرای نظام قیمت‌گذاری واقعی آب کشاورزی همراه با مشوق‌های مصرف بهینه، توسعه طرح‌های پایلوت منطقه‌ای در استان‌های خشک برای ارزیابی عملی روش‌های RDI و PRD، و ایجاد سامانه‌های دیجیتال و پیامکی هشدار آبیاری بر پایه داده‌های اقلیمی و رطوبتی از جمله اقدامات ضروری است. همچنین، ترویج استفاده از آب‌های بازیافتی تصفیه‌شده و بازچرخانی آب با تدوین دستورالعمل‌های ایمنی و پایش کیفی مناسب، برنامه‌ریزی برای آموزش و توانمندسازی باغداران از طریق دوره‌های ترویجی و مدرسه‌های مزرعه‌ای، و تقویت همکاری میان بخش‌های تحقیق، ترویج و اجرا برای انتقال سریع فناوری‌های نوین آبیاری، از دیگر راهکارهای کلیدی برای تحقق اهداف مدیریت پایدار آب در بخش باغبانی کشور محسوب می‌شود. در مجموع، تلفیق فناوری‌های نوین آبیاری با سیاست‌های حمایتی و سازوکارهای اجرایی منسجم، می‌تواند مسیر گذار از مدیریت سنتی به مدیریت هوشمند، پایدار و کارآمد آب در باغبانی ایران را هموار سازد و ضمن افزایش بهره‌وری، پایداری منابع آبی و امنیت غذایی کشور را تضمین کند.

## منابع

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO.
- Andreu-Coll, L., Carbonell-Barrachina, Á. A., Burló, F., Galindo, A., García-Brunton, J., López-Lluch, D. B., Martínez-Font, R., Noguera-Artiaga, L., Sendra, E., Hernández-Ariola, P., & Melgarejo, P. (2024). Regulated deficit irrigation perspectives for water efficiency in apricot cultivation: A review. *Agronomy*, 14(6), 1219. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061219>
- Bahraseman, S. E., Firoozzare, A., Boccia, F., Pourmohammad, F., & Ameri, A. H. (2025). Determining the best strategies to improve agricultural water productivity in arid and semi-arid regions: An ordinal priority approach. *Journal of Arid Environments*, 231, 105458. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105458>
- Berhe, G. T., Baartman, J. E., Veldwisch, G. J., Grum, B., & Ritsema, C. J. (2022). Irrigation development and management practices in Ethiopia: A systematic review on existing problems, sustainability issues and future directions. *Agricultural Water Management*, 274, 107959. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107959>
- Boland, A. M., Mitchell, P. D., Jerie, P. H., & Goodwin, I. (1993). The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science*, 68(2), 261–274. <https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516351>
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F. J., & Fereres, E. (2001). Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrigation Science*, 20, 65–71. <https://doi.org/10.1007/s002710000030>
- Caspari, H. W., Einhorn, T., Neal, S., Aspach, P., & Leib, B. G. (2002). *Irrigation volume rather than placement determines response of apple to deficit irrigation* [Abstract]. XXVI International Horticultural Congress, Toronto, Canada.
- Chalmers, D. J., Mitchell, P. D., & Van Heek, L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(3), 307–312.
- Chartzoulakis, K. (2021). Sustainable irrigation water management in horticultural crops in dry environments. *Acta Horticulturae*, 1315, 475–488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1315.58>
- Chartzoulakis, K., Michelakis, N., & Vougioukalou, E. (1991). Growth and production of kiwi under different irrigation systems. *Fruits*, 46(1), 75–81.
- Clancy, A. (1999). Revenina has the capacity to deliver diverse requirements. *Australian Viticulture*, 3(4), 38–42.
- Clothier, B. E., Green, S. R., & Deurer, M. (2010). The sustainable use of water resources for agriculture and horticulture. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 72, XIX–XXVI.
- de Haas, M., Frankema, E., & Giller, K. E. (2025). 22 Growing towards a food secure Africa in 2050: Reflections and pathways. In *Pathways to African Food Security* (pp. 267–278).
- Deumier, J. M., Leroy, P., & Peyremorte, P. (1996). *Tools for improving management of irrigated agricultural crop systems*. Paper presented at the Irrigation Scheduling: from Theory to Practice, ICID/FAO Workshop, FAO Water Report No. 8, Rome, Italy.
- Dichio, B., Xiloyannis, C., Sofo, A., & Montanaro, G. (2007). Effects of post-harvest regulated deficit irrigation on carbohydrate and nitrogen partitioning, yield quality and vegetative growth of peach trees. *Plant and Soil*, 290(1–2), 127–137. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9144-x>
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M. C., Sánchez-Blanco, M. J., & Torrecillas, A. (1996). Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, 16(3), 115–123. <https://doi.org/10.1007/BF02215619>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1974). *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO.
- Dry, P. R., Loveys, B. R., Stoll, M., Stewart, D., & McCarthy, M. G. (2000). Partial root drying – An update. *The Australian & New Zealand Grapegrower and Winemaker*, 438, 35–39.
- Ebel, R. C., Proebsting, E. L., & Evans, R. G. (1995). Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience*, 30(6), 1229–1232. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.6.1229>
- Elkaoud, N., Ismail, S., Mahmoud, R., Taraby, H., Shang, S., Wang, D., & Rayan, M. (2025). Efficient and effective irrigation water management using sprinkler robot. *Eng*, 6(7), 138. <https://doi.org/10.3390/eng6070138>
- Fereres, E., & Goldhamer, D. A. (1990). Irrigation of deciduous fruit and nut trees. In B. A. Stewart & D. R. Nielsen (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops* (pp. 987–1017). ASA, CSSA, SSSA.
- Fereres, E., Martinich, D. A., Aldrich, T. M., Castel, J. R., Holzappel, E., & Schulbach, H. (1982). Water requirements of young almond trees under drip irrigation in the Central Valley. *California Agriculture*, 36(5–6), 11–12.
- Fereres, E., Goldhamer, D. A., & Parsons, L. R. (2003). Irrigation water management of horticultural crops. *HortScience*, 38(5), 1036–1042. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.38.5.1036>
- Fernández, J. E., Lemeur, R., Steppe, K., Chartzoulakis, K., Marsal, J., Grant, O. M., & Xiloyannis, C. (2009). Water shortage and efficient water use in horticulture. *Acta Horticulturae*, 817, 363–366. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.817.37>

- Fernández, J. E., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., & Girón, I. F. (2003). Influence of partial soil wetting on water relation parameters of the olive tree. *Agronomie*, 23(5–6), 545–552. <https://doi.org/10.1051/agro:2003035>
- Galindo, A., Collado-González, J., Griñán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J., Girón, I. F., Rodríguez, P., Cruz, Z. N., Memmi, H., Carbonell-Barrachina, A. A., Hernández, F., Torrecillas, A., Moriana, A., & Pérez-López, D. (2018). Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural Water Management*, 202, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.011>
- Gardner, W. R. (1993). The future of irrigated areas. In D. R. Buxton, R. Shibles, R. A. Forsberg, B. L. Blad, K. H. Asay, G. M. Paulsen, & R. F. Wilson (Eds.), *International Crop Science* (Vol. 1, pp. 97–99). Crop Science Society of America.
- Goldberg, D., Gornat, B., & Bar-Yosef, B. (1971). Distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 96(5), 645–648.
- Goldhamer, D. A., & Fereres, E. (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20(3), 115–125. <https://doi.org/10.1007/s002710100034>
- Goldhamer, D. A., & Salinas, M. (2000). Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand. *Proceedings of the International Society of Citriculture, IX Congress*, 227–231.
- Goldhamer, D. A., & Viveros, M. (2000). Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrigation Science*, 19(3), 125–131. <https://doi.org/10.1007/s002710000011>
- Goldhamer, D. A., & Beede, R. (1992). *Results of four years of regulated deficit irrigation on deep rooted pistachio trees*. 1992–93 Annual Report of the California Pistachio Industry (pp. 96–101). California Pistachio Commission.
- Goldhamer, D. A., Sibbett, G. S., Phene, R. C., & Katayama, D. G. (1994). Early irrigation cutoff has little effect on French prune production. *California Agriculture*, 48(4), 13–17. <https://doi.org/10.3733/ca.v048n04p13>
- Goldhamer, D. A., Salinas, M., Crisosto, C., Day, K. R., Soler, M., & Moriana, A. (2002). Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592, 343–350. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.592.48>
- Gómez-Limón, J. A., Gutiérrez-Martín, C., & Montilla-López, N. M. (2020). Agricultural water allocation under cyclical scarcity: The role of priority water rights. *Water*, 12(6), 1835. <https://doi.org/10.3390/w12061835>
- Grant, O. M., Tronina, L., Jones, H. G., & Chaves, M. M. (2007). Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 815–825. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl153>
- Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., & Yeager, J. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7(1), 23–29. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.7.1.23>
- Hess, T. M. (1996). A microcomputer scheduling program for supplementary irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15(3), 233–243. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(96\)00016-1](https://doi.org/10.1016/0168-1699(96)00016-1)
- Hillel, D. (1997). *Small-scale irrigation for arid zones: Principles and options*. FAO.
- Hsiao, T. C. (2000). Leaf and root growth in relation to water status. *HortScience*, 35(6), 1051–1058. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.6.1051>
- Huguet, J. G., Li, S. H., Lorendeau, J. Y., & Pelloux, G. (1992). Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science*, 67(5), 631–640. <https://doi.org/10.1080/00221589.1992.11516293>
- Huygen, J., van den Broek, B. J., & Kabat, P. (1995). *Hydra Model Trigger: A soil water balance and crop growth simulation system for irrigation water management purposes*. Paper submitted to the ICID/FAO Workshop, Irrigation Scheduling: From Theory to Practice, Rome, Italy.
- Itier, B., Flura, D., & Belabbes, K. (1993). An alternative way for C.W.S.I. calculation to improve relative evapotranspiration estimates: Results of an experiment over soybean. *Acta Horticulturae*, 335, 333–340. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.335.40>
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13(3), 651–656. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00651>
- Jarvis, P. G., & McNaughton, K. G. (1986). Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15, 1–49. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60119-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60119-1)
- Jensen, M. E. (1993). *The impacts of irrigation and drainage on the environment*. 5th Gulhati Memorial Lecture, 15th ICID Congress, The Hague.
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold.
- Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C., & Nielsen, D. R. (Eds.). (1999). *Crop yield response to deficit irrigation*. Kluwer Academic Publishers.
- Klepper, B., Browning, V. D., & Taylor, H. M. (1971). Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48(6), 683–685. <https://doi.org/10.1104/pp.48.6.683>

- Lampinen, B. D., Shackel, K. A., Southwick, S. M., & Olson, W. H. (2001). Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrigation Science*, 20(2), 47–54. <https://doi.org/10.1007/s002710000026>
- Larson, K. D., DeJong, T. M., & Johnson, R. S. (1988). Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113(3), 296–300.
- Loveys, B. R., Dry, P. R., Stoll, M., & McCarthy, M. G. (2000). Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 537, 187–197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.18>
- Loveys, B. R., Grant, J., Dry, P. R., & McCarthy, M. G. (1997). Progress in the development of partial root-zone drying. *The Australian Grapegrower and Winemaker*, 403, 18–20.
- Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., & Girona, J. (2002). Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: An evaluation based on vegetative and productive response. *European Journal of Agronomy*, 17(2), 111–122. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00002-4)
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., & Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425–431. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425>
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy*, 10(8), 1120. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081120>
- Nouri, M., Homae, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480>
- Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., & Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. *Agricultural Water Management*, 309, 109347. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109347>
- Parsons, L. R., Wheaton, T. A., & Castle, W. S. (2001). High application rates of reclaimed water benefit citrus tree growth and fruit production. *HortScience*, 36(7), 1273–1277. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.7.1273>
- Peretz, J., Evans, R. G., & Proebsting, E. L. (1984). Leaf water potentials for management of high frequency irrigation on apples. *Transactions of the ASAE*, 27(2), 437–442. <https://doi.org/10.13031/2013.32811>
- Peyremorte, P., & Chol, P. (1992). *Pilotage automatique optimisé des irrigations localisées* [Optimized automatic control of localized irrigation]. Paper presented at the Workshop on Real-Time Sensing and Control of Automated Irrigation Systems, 16th ICID European Regional Conference, Budapest, Hungary.
- Postel, S. (1999). *Pillar of sand: Can the irrigation miracle last?* W.W. Norton & Company.
- Postel, S., Polak, P., Gonzales, F., & Keller, J. (2001). Drip irrigation for small farmers: A new initiative to alleviate hunger and poverty. *Water International*, 26(1), 3–13. <https://doi.org/10.1080/02508060108686882>
- Proebsting, E. L., Drake, S. R., & Evans, R. G. (1984). Irrigation management, fruit quality, and storage life of apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109(2), 229–232.
- Pruitt, W. E., Fereres, E., Henderson, D. W., & Hagan, R. M. (1984). Evapotranspiration losses of tomatoes under drip and furrow irrigation. *California Agriculture*, 38(5–6), 10–11.
- Richards, L. A., & Neal, O. R. (1936). Some field observations with tensiometers. *Soil Science Society of America Journal*, 1(C), 71–91. <https://doi.org/10.2136/sssaj1936.036159950001000C0013x>
- Rosegrant, M. W., & Cai, X. (2002). Global water demand and supply projections: Results and prospects to 2025. *Water International*, 27(2), 170–182. <https://doi.org/10.1080/02508060208686992>
- Seckler, D. (1996). *The new era of water resources management: From 'dry' to 'wet' water savings* (Research Report 1). International Water Management Institute (IWMI).
- Sharma, S., Yost, M. A., & Reeve, J. R. (2025). Roles of organic agriculture for water optimization in arid and semi-arid regions. *Sustainability*, 17(12), 5452. <https://doi.org/10.3390/su17125452>
- Stegman, E. C., Schatz, B. G., & Gardner, J. C. (1990). Yield sensitivities of short season soybean to irrigation management. *Irrigation Science*, 11(2), 111–119. <https://doi.org/10.1007/BF00189449>
- Stewart, J. I., Cuenca, R. H., Pruitt, W. O., Hagan, R. M., & Tosso, L. (1977). *Determination and utilization of water production functions on principal California crops* (W-67 California Contributing Project Report). University of California, Davis.
- Toan, T. D., & Tu, B. A. (2023). Use of level-of-service-based water pricing to sustain irrigated agriculture: A case of modernized irrigation system in Vietnam. *Water*, 15(9), 1780. <https://doi.org/10.3390/w15091780>
- Villalobos, F. J., Orgaz, F., Testi, L., & Fereres, E. (2000). Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*, 13(2–3), 155–163. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00071-X)
- Walter, I. A., Allen, R. G., Elliott, R., Mecham, B., Jensen, M. E., Itenfisu, D., Howell, T. A., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R. H., Wright, J. L., & Martin, D. (2000). *ASCE's standardized reference evapotranspiration equation*. Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium, ASAE.

- Wu, X., Huang, Z., Huang, C., Liu, Z., Liu, J., Cao, H., & Gao, Y. (2025). Regulated deficit irrigation improves yield formation and water and nitrogen use efficiency of winter wheat at different soil fertility levels. *Agronomy*, *15*(8), 1874. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081874>
- Zhao, Q., Tian, G., Zhu, M., Li, J., & Wu, X. (2024). The impact of water marketization mechanisms on improving water use efficiency: An empirical study from water rights trading in China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *55*, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101957>