

## بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق

علی شهیدی فر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

مدیریت بهینه آب در بخش کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به یکی از اساسی‌ترین ضرورت‌های توسعه پایدار تبدیل شده است. از آنجا که بخش عمده منابع آب شیرین در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، افزایش کارایی مصرف آب و کاهش تلفات آبی، جایگاهی محوری در سیاست‌گذاری‌های علمی و اجرایی یافته است. در این میان، سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های آبیاری تحت فشار، ظرفیت بالایی برای بهبود بهره‌وری آب دارند؛ با این حال، کارایی واقعی این سامانه‌ها زمانی به حداکثر می‌رسد که زمان‌بندی و مقدار آبیاری بر پایه برآورد دقیق نیاز آبی گیاه تنظیم شود. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین نیاز آبی، تبخیر و تعرق است که نقش بنیادینی در طراحی، بهره‌برداری و کنترل سامانه‌های آبیاری ایفا می‌کند. هدف مقاله حاضر، بررسی نقش مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق در بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و تبیین چارچوبی علمی برای استفاده از این مدل‌ها در تصمیم‌گیری آبیاری است. روش تحقیق از نوع توصیفی - تحلیلی و مبتنی بر مرور نظام‌مند منابع معتبر داخلی و خارجی است. در این مقاله، ابتدا مبانی نظری تبخیر و تعرق، آبیاری قطره‌ای و ارتباط میان این دو مفهوم تبیین شده، سپس مدل‌های متداول برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق شامل مدل‌های تجربی، ترکیبی، فیزیکی و هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه، ظرفیت این مدل‌ها در زمان‌بندی آبیاری، کاهش تنش آبی، جلوگیری از آبیاری بیش از حد، کاهش زه‌آب و ارتقای عملکرد و بهره‌وری آب تحلیل شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مدل‌های دقیق پیش‌بینی تبخیر و تعرق، به‌ویژه مدل مرجع پنمن - مانتیث و نیز مدل‌های داده‌محور و یادگیری ماشین در شرایط کمبود داده یا تغییرپذیری اقلیمی، می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی برنامه آبیاری قطره‌ای داشته باشد. همچنین، ادغام داده‌های هواشناسی، سنجش‌ازدور، حسگرهای رطوبت خاک و سامانه‌های تصمیم‌یار، افق جدیدی در مدیریت هوشمند آب آبیاری گشوده است. با این حال، محدودیت در دسترسی به داده‌های دقیق، هزینه‌های فناوری، نیاز به کالیبراسیون محلی و پیچیدگی اجرایی از جمله چالش‌های مهم این حوزه محسوب می‌شود. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که گذار از آبیاری مبتنی بر تجربه به آبیاری مبتنی بر پیش‌بینی علمی تبخیر و تعرق، یکی از مؤثرترین راهبردها برای ارتقای بهره‌وری آب در کشاورزی معاصر است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی مصرف آب، سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق، مهندسی آب

## ۱. مقدمه

آب، زیربنایی ترین منبع طبیعی برای استمرار حیات و توسعه نظام های انسانی است و در بخش کشاورزی، اهمیت آن از هر زمان دیگری آشکارتر شده است. افزایش جمعیت، رشد نیاز غذایی، گسترش تنش های اقلیمی، کاهش بارندگی مؤثر، افزایش دما و افت منابع آب زیرزمینی سبب شده است که مسأله بهره‌وری مصرف آب به یکی از موضوعات محوری پژوهش و سیاست‌گذاری در جهان تبدیل شود. در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، این موضوع از حساسیت دوچندان برخوردار است؛ زیرا از یک سو بخش کشاورزی سهم عمده‌ای از مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد و از سوی دیگر، محدودیت منابع آب تجدیدپذیر، ادامه الگوهای سنتی مصرف را ناممکن می‌سازد. در ایران نیز، بحران آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه، ضرورت بازنگری در شیوه‌های آبیاری و مدیریت مزرعه را به‌طور جدی مطرح کرده است.

در دهه‌های اخیر، توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار، به‌ویژه آبیاری قطره‌ای، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش راندمان کاربرد آب مورد توجه قرار گرفته است. آبیاری قطره‌ای به دلیل انتقال مستقیم آب به ناحیه ریشه، کاهش تبخیر سطحی، محدود کردن رشد علف‌های هرز، امکان تزریق کود و کنترل دقیق‌تر میزان آب، نسبت به روش‌های سنتی دارای مزیت‌های قابل توجهی است. با این حال، صرف استفاده از تجهیزات پیشرفته و سامانه قطره‌ای، تضمین‌کننده بهره‌وری مطلوب آب نیست. اگر مقدار و زمان آبیاری متناسب با نیاز واقعی گیاه تنظیم نشود، حتی پیشرفته‌ترین سیستم‌های آبیاری نیز ممکن است به هدررفت آب، افت عملکرد یا کاهش کیفیت محصول منجر شوند. از این رو، مسئله اصلی نه فقط نوع سامانه آبیاری، بلکه کیفیت مدیریت آن است.

در این زمینه، مفهوم تبخیر و تعرق به‌عنوان شاخصی کلیدی برای تعیین نیاز آبی گیاه، جایگاهی بنیادین دارد. تبخیر و تعرق مجموع آبی است که از سطح خاک و سطوح گیاهی به جو بازمی‌گردد و در عمل، بیانگر بخشی عمده از تلفات آبی مزرعه و نیاز واقعی گیاه به آب است. برآورد دقیق این متغیر، پایه علمی بسیاری از تصمیم‌گیری‌های مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری است. هرچه این برآورد دقیق‌تر باشد، می‌توان زمان و عمق آبیاری را با دقت بیشتری تنظیم کرد و به‌این ترتیب، از آبیاری کمتر از نیاز یا بیشتر از نیاز جلوگیری نمود.

پیش‌بینی تبخیر و تعرق در گذشته عمدتاً بر مبنای روابط تجربی ساده یا داده‌های محدود اقلیمی انجام می‌شد، اما امروزه با گسترش داده‌های هواشناسی، توسعه مدل‌های فیزیکی و آماری، پیشرفت فناوری سنسورهای دور و ظهور روش‌های هوش مصنوعی، افق‌های جدیدی برای برآورد و پیش‌بینی دقیق‌تر این متغیر گشوده شده است. مدل‌هایی نظیر پنمن، پنمن - مانتیث، هارگریوز - سامانی، بلانی - کریدل، پرستلی - تیلور و نیز مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم، هر یک در شرایط خاص، برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق کاربرد یافته‌اند. این مدل‌ها، بسته به نوع داده‌های در دسترس، مقیاس زمانی، منطقه اقلیمی و هدف مدیریتی، می‌توانند در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به کار روند.

از سوی دیگر، یکپارچه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق با سامانه‌های هوشمند کنترل آبیاری، حسگرهای رطوبت خاک، اطلاعات ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای تصمیم‌یار، زمینه شکل‌گیری کشاورزی دقیق را فراهم کرده است. در چنین رویکردی، به‌جای تعیین ثابت و سنتی دور آبیاری، سامانه می‌تواند به‌صورت پویا و بر اساس شرایط واقعی مزرعه و وضعیت اقلیمی، مقدار آب مورد نیاز را تخمین زده و اعمال کند. این تحول می‌تواند کاهش چشمگیر مصرف آب، بهبود عملکرد محصول و کاهش هزینه‌های تولید را در پی داشته باشد.

با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت علمی آب در کشاورزی و نقش کلیدی تبخیر و تعرق در برنامه‌ریزی آبیاری، مقاله حاضر بر آن است تا با رویکردی علمی و تحلیلی، نقش مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق را در بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای بررسی کند. تمرکز اصلی مقاله بر این پرسش است که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌های مناسب برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق، سامانه‌های آبیاری قطره‌ای را از حالت نیمه‌تجربی به سطح مدیریت هوشمند و بهینه ارتقا داد.

## ۲. بیان مسئله

بحران کم‌آبی و افت مستمر منابع آب تجدیدپذیر، در بسیاری از مناطق جهان به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، مدیریت آب کشاورزی را به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های علمی و اجرایی تبدیل کرده است. در کشورهای نظیر ایران، که متوسط بارندگی سالانه پایین‌تر از میانگین جهانی است و پراکنش زمانی و مکانی بارش نیز نامتوازن است، بخش کشاورزی با فشار روزافزون برای کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری مواجه است. با وجود توسعه نسبی سامانه‌های آبیاری تحت فشار، هنوز بخش قابل توجهی از آب در مزرعه به دلیل برنامه‌ریزی نامناسب، زمان‌بندی غیردقیق و برآورد نادرست نیاز آبی گیاه هدر می‌رود.

در این میان، آبیاری قطره‌ای به‌عنوان یک فناوری کارآمد، ظرفیت بالقوه زیادی برای صرفه‌جویی در مصرف آب دارد؛ اما تحقق این ظرفیت به طراحی و بهره‌برداری علمی وابسته است. در بسیاری از مزارع و باغ‌ها، اگرچه سیستم قطره‌ای نصب شده است، اما تصمیم‌گیری درباره زمان و مقدار آبیاری همچنان بر پایه تجربه سنتی، تقویم ثابت، یا برآوردهای تقریبی انجام می‌شود. این وضعیت سبب می‌شود که در برخی دوره‌ها گیاه با کم‌آبی و تنش مواجه شود و در دوره‌های دیگر، آبیاری اضافی رخ دهد که نه تنها به هدررفت آب می‌انجامد، بلکه می‌تواند موجب شست‌وشوی عناصر غذایی، کاهش تهویه خاک، افزایش بیماری‌ها و افت کارایی سیستم شود.

هسته مرکزی این مسئله، نبود برآورد دقیق و بهنگام از نیاز آبی واقعی گیاه است. یکی از معتبرترین شاخص‌ها برای بیان این نیاز، تبخیر و تعرق است که تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دما، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد، ویژگی‌های گیاهی و شرایط خاک قرار دارد. تغییرپذیری زمانی و مکانی این عوامل سبب می‌شود که نیاز آبی گیاه یک متغیر پویا باشد و نتوان آن را با نسخه‌های ثابت و یکسان برای کل فصل رشد مدیریت کرد. از این رو، عدم استفاده از مدل‌های دقیق پیش‌بینی تبخیر و تعرق، یکی از دلایل اصلی ناکارآمدی در مدیریت آبیاری محسوب می‌شود.

گرچه مدل‌های متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق توسعه یافته‌اند، اما انتخاب و به‌کارگیری مناسب آن‌ها همچنان یک چالش مهم است. برخی مدل‌ها به داده‌های کامل هواشناسی نیاز دارند و در بسیاری از مناطق، چنین داده‌هایی در دسترس نیست. برخی دیگر ساده‌ترند اما دقت کمتری دارند. از طرفی، مدل‌های جدید مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی توانسته‌اند در بسیاری از مطالعات، دقت بالاتری در پیش‌بینی تبخیر و تعرق ارائه دهند، اما نیازمند داده‌های آموزشی مناسب، پردازش تخصصی و زیرساخت‌های فنی هستند. این شکاف میان دانش موجود و کاربرد عملی، سبب شده است که در بسیاری از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، ظرفیت بالقوه فناوری به فعلیت کامل نرسد.

مسئله اصلی این مقاله آن است که چگونه می‌توان با اتکا به مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق، مدیریت آبیاری قطره‌ای را به‌گونه‌ای بهینه کرد که هم نیاز آبی گیاه به‌درستی تأمین شود و هم مصرف آب به حداقل لازم برسد. این پرسش، فقط یک سؤال فنی نیست، بلکه به موضوعاتی چون بهره‌وری منابع، امنیت غذایی، سازگاری با تغییر اقلیم و پایداری کشاورزی نیز پیوند دارد. از این منظر، بررسی ابعاد نظری، کاربردی و فناورانه این موضوع، ضرورتی علمی و عملی به شمار می‌رود.

**۳. اهمیت و ضرورت تحقیق**

اهمیت این موضوع از چند جنبه قابل تبیین است. نخست، از منظر منابع آب، کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در بسیاری از کشورهاست؛ بنابراین هرگونه بهبود در کارایی مصرف آب در این بخش می‌تواند تأثیری چشمگیر بر تعادل منابع آب داشته باشد. دوم، از منظر اقتصادی، بهینه‌سازی آبیاری می‌تواند هزینه‌های آب، انرژی و کود را کاهش داده و عملکرد اقتصادی مزرعه را ارتقا دهد. سوم، از منظر زیست‌محیطی، کاهش مصرف بیش از حد آب و جلوگیری از زه‌آب اضافی، در کاهش شورشدگی خاک، افت سطح آب زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌ها نقش دارد.

همچنین، ضرورت استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق در شرایط تغییر اقلیم بیش از گذشته احساس می‌شود. افزایش نوسانات دمایی، وقوع امواج گرما، تغییر الگوی بارش و افزایش تبخیر بالقوه، سبب شده است که روش‌های سنتی برآورد نیاز آبی دیگر پاسخ‌گوی شرایط جدید نباشند. به‌کارگیری مدل‌های علمی و پویا، امکان سازگاری بهتر سامانه‌های آبیاری با شرایط متغیر اقلیمی را فراهم می‌سازد.

از منظر فناوریانه نیز، پیشرفت در حسگرها، اینترنت اشیا، داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوشمند، فرصت بی‌سابقه‌ای برای تحول در مدیریت آبیاری ایجاد کرده است. اما بهره‌گیری مؤثر از این فرصت‌ها نیازمند چارچوب نظری و تحلیلی روشن است. مقاله حاضر می‌کوشد این خلأ را تا حدی پوشش دهد.

**۴. اهداف تحقیق****۴-۱. هدف کلی**

تبیین نقش مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق در بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای.

**۴-۲. اهداف جزئی**

۱. تشریح مبانی نظری تبخیر و تعرق و ارتباط آن با نیاز آبی گیاه.
۲. بررسی ویژگی‌ها و ظرفیت‌های سامانه آبیاری قطره‌ای در مدیریت مصرف آب.
۳. معرفی و تحلیل مدل‌های متداول برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق.
۴. ارزیابی نقش این مدل‌ها در زمان‌بندی و کنترل آبیاری قطره‌ای.
۵. تحلیل مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های کاربرد مدل‌های پیش‌بینی در مدیریت مزرعه.
۶. ارائه پیشنهادهایی برای توسعه مدیریت هوشمند آبیاری مبتنی بر پیش‌بینی تبخیر و تعرق.

**۵. سؤالات تحقیق**

۱. تبخیر و تعرق چه جایگاهی در تعیین نیاز آبی گیاه و مدیریت آبیاری قطره‌ای دارد؟
۲. مهم‌ترین مدل‌های برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق کدام‌اند و چه ویژگی‌هایی دارند؟

۳. استفاده از مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق چگونه می تواند مصرف آب در سیستم های آبیاری قطره ای را بهینه کند؟

۴. مهم ترین چالش ها و الزامات کاربرد این مدل ها در شرایط واقعی مزرعه چیست؟

## ۶. روش تحقیق

این مقاله از نوع مروری - تحلیلی است و با استفاده از منابع علمی معتبر داخلی و خارجی تدوین شده است. برای گردآوری داده ها از کتاب ها، مقالات علمی - پژوهشی، گزارش های تخصصی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، مقالات نمایه شده در پایگاه هایی مانند اسکوپوس، ساینس دایرکت، اشپرینگر و گوگل اسکالر و همچنین برخی منابع معتبر فارسی در حوزه آبیاری، مهندسی آب و هواشناسی کشاورزی استفاده شده است. معیار انتخاب منابع شامل اعتبار علمی، ارتباط مستقیم با موضوع، روزآمد بودن نسبی و استنادپذیری بوده است.

در مرحله تحلیل، ابتدا مفاهیم کلیدی شامل تبخیر و تعرق، نیاز آبی گیاه، بهره‌وری آب و آبیاری قطره‌ای تعریف و تبیین شد. سپس مدل های مختلف پیش بینی تبخیر و تعرق بر اساس رویکرد مدل سازی، نوع داده مورد نیاز و کاربرد در مدیریت آبیاری دسته بندی و مقایسه شدند. در نهایت، یافته ها در قالب تحلیل مفهومی و جداول ساختاریافته ارائه شده اند.

## ۷. مبانی نظری و پیشینه مفهومی

### ۷-۱. مفهوم تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق یکی از بنیادی ترین مؤلفه های چرخه هیدرولوژیک و از مهم ترین شاخص های نیاز آبی گیاهان است. این واژه به مجموع دو فرایند اشاره دارد: تبخیر از سطح خاک و سطوح مرطوب، و تعرق از طریق روزنه های گیاه. در مزرعه، این دو فرایند به شدت با یکدیگر درهم تنیده اند و جدا کردن آن ها از نظر عملی همیشه آسان نیست. از این رو، در برنامه ریزی آبیاری معمولاً مجموع آن ها یعنی تبخیر و تعرق مورد توجه قرار می گیرد.

آلن و همکاران در راهنمای مشهور سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، تبخیر و تعرق مرجع را به عنوان مبنای استاندارد برآورد نیاز آبی گیاه معرفی کرده اند و نشان داده اند که این شاخص، تحت تأثیر مستقیم تابش، دما، رطوبت هوا و سرعت باد قرار دارد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). به همین دلیل، تبخیر و تعرق یک متغیر ثابت نیست و در مقیاس روزانه، هفتگی و فصلی نوسان دارد.

در ادبیات علمی، معمولاً میان تبخیر و تعرق مرجع و تبخیر و تعرق واقعی گیاه تفاوت قائل می شوند. تبخیر و تعرق مرجع، نرخ اتلاف آب از یک سطح مرجع استاندارد را نشان می دهد، در حالی که تبخیر و تعرق واقعی گیاه با اعمال ضریب گیاهی و در نظر گرفتن مرحله رشد، تراکم پوشش و تنش های محیطی محاسبه می شود. این تمایز برای برنامه ریزی آبیاری بسیار مهم است؛ زیرا سامانه آبیاری باید بر اساس نیاز واقعی محصول تنظیم شود، نه صرفاً شرایط جوی.

**۷-۲. نیاز آبی گیاه و ضریب گیاهی**

نیاز آبی گیاه تابعی از تبخیر و تعرق و ویژگی های فیزیولوژیک و فنولوژیک گیاه است. در روش استاندارد فائو، تبخیر و تعرق گیاه از حاصل ضرب تبخیر و تعرق مرجع در ضریب گیاهی به دست می آید (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). ضریب گیاهی بسته به نوع محصول، مرحله رشد، تراکم برگ، ارتفاع گیاه و شرایط مدیریتی تغییر می کند. برای مثال، در مراحل اولیه رشد که سطح پوشش گیاهی کم است، سهم تبخیر از سطح خاک بیشتر بوده و ضریب گیاهی پایین تر است، اما در مراحل میانی رشد، با توسعه کامل تاج پوشش، تعرق گیاه غالب می شود و ضریب گیاهی افزایش می یابد.

دورنبوس و پرویت نیز در آثار کلاسیک خود بر این نکته تأکید کرده اند که تعیین دقیق ضریب گیاهی برای شرایط محلی، یکی از پیش شرط های مدیریت صحیح آبیاری است (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷). در سامانه آبیاری قطره ای، این موضوع حتی حساس تر است؛ زیرا الگوی خیس شدن خاک، محدودتر و موضعی تر است و تفاوت میان تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه باید با دقت بیشتری مدنظر قرار گیرد.

**۷-۳. آبیاری قطره ای و جایگاه آن در بهره وری آب**

آبیاری قطره ای روشی است که در آن آب با دبی کم و به صورت مکرر، مستقیماً در ناحیه ریشه گیاه توزیع می شود. این روش به طور نظری یکی از بالاترین راندمان های کاربرد آب را در میان روش های آبیاری دارد. مزایای آن شامل کاهش تبخیر سطحی، کاهش رواناب، محدود کردن رشد علف های هرز، امکان کودآبیاری، بهبود یکنواختی توزیع آب و افزایش قابلیت کنترل مدیریتی است (امیری و همکاران، ۱۳۹۴).

با این حال، کارایی واقعی آبیاری قطره ای تنها زمانی محقق می شود که برنامه آبیاری دقیق باشد. اگر دور آبیاری بیش از حد کوتاه یا عمق آبیاری بیش از نیاز باشد، رطوبت اضافی می تواند به اعماق پایین تر نفوذ کند و علاوه بر هدررفت آب، شست و شوی عناصر غذایی را نیز به همراه داشته باشد. برعکس، اگر آبیاری کمتر از نیاز انجام شود، گیاه با تنش رطوبتی مواجه می شود و عملکرد کاهش می یابد. از این رو، مدیریت مبتنی بر پیش بینی تبخیر و تعرق، حلقه مفقوده بسیاری از سامانه های قطره ای موجود است.

**۷-۴. پیشینه پژوهش**

مطالعات متعددی در سطح بین المللی بر اهمیت تبخیر و تعرق در مدیریت آبیاری تأکید کرده اند. آلن و همکاران، مدل پنمن - مانیت فائو را به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر و تعرق مرجع معرفی کرده اند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). هارگریوز و سامانی روشی ساده تر بر پایه دما پیشنهاد کردند که در شرایط محدودیت داده کاربرد زیادی یافته است (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵). تودوریچ و همکاران، کارایی روش های ساده تر را در مناطق مدیترانه ای بررسی کردند و نشان دادند که انتخاب مدل باید با اقلیم و کیفیت داده ها متناسب باشد (تودوریچ و همکاران، ۲۰۱۳).

در سال های اخیر، مدل های هوش مصنوعی نیز مورد توجه قرار گرفته اند. کومار و همکاران نشان دادند که شبکه های عصبی مصنوعی می توانند در پیش بینی تبخیر و تعرق روزانه عملکرد مطلوبی داشته باشند، به ویژه زمانی که روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی پیچیده باشد (کومار و همکاران، ۲۰۰۲). تراوت و فرناندز نیز در پژوهش های خود بر نقش زمان بندی دقیق آبیاری در سامانه های تحت فشار و اثر آن بر بهره وری آب تأکید کرده اند (تراوت و فرناندز، ۱۹۹۵).

در پژوهش های داخلی نیز موضوع برآورد تبخیر و تعرق و ارتباط آن با مدیریت آبیاری در مناطق مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه، علیزاده در کتاب مرجع «هواشناسی کاربردی» و نیز منابع مرتبط با آبیاری، اهمیت استفاده از شاخص های اقلیمی در برنامه ریزی آبیاری را به تفصیل شرح داده است (علیزاده، ۱۳۹۰). همچنین، پژوهش های متعدد در نشریات تخصصی مهندسی آبیاری و آب ایران نشان داده اند که دقت مدل های برآورد تبخیر و تعرق در اقلیم های متفاوت کشور یکسان نیست و نیاز به ارزیابی محلی وجود دارد.

## ۸. مدل های برآورد و پیش بینی تبخیر و تعرق

مدل های تبخیر و تعرق را می توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد: مدل های تجربی، مدل های ترکیبی، مدل های مبتنی بر سنجش از دور و مدل های داده محور یا هوشمند.

### ۸-۱. مدل های تجربی

این مدل ها معمولاً بر پایه یک یا چند متغیر اقلیمی ساده توسعه یافته اند و از نظر محاسباتی نسبتاً آسان هستند. مدل بلانی - کریدل و مدل هارگریوز - سامانی از شناخته شده ترین نمونه های این گروه اند.

مدل هارگریوز - سامانی از داده های دمای حداقل و حداکثر و تابش برون جو استفاده می کند و در مناطقی که داده های رطوبت نسبی، سرعت باد یا تابش واقعی در دسترس نیست، کاربرد زیادی دارد (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵). مزیت اصلی این مدل، سادگی و نیاز کم به داده است؛ اما در شرایط اقلیمی خاص، به ویژه در مناطقی با باد شدید یا رطوبت بالا، ممکن است دقت آن کاهش یابد.

### ۸-۲. مدل های ترکیبی و فیزیکی

مدل پنمن و نسخه تکامل یافته آن یعنی پنمن - مانتیث، از مهم ترین مدل های این گروه هستند. مدل پنمن - مانتیث فائو، با ترکیب مؤلفه های انرژی و آیرودینامیک، به عنوان روش استاندارد جهانی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع شناخته می شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

این مدل به داده هایی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش نیاز دارد و در صورت دسترسی به داده های دقیق، یکی از معتبرترین روش ها برای برآورد تبخیر و تعرق است. نقطه ضعف آن، وابستگی به کامل بودن داده های هواشناسی است. در بسیاری از مناطق روستایی یا ایستگاه های ضعیف، داده های لازم برای این مدل به صورت کامل و دقیق در دسترس نیست.

### ۸-۳. مدل های مبتنی بر سنجش از دور

با توسعه فناوری ماهواره ای، امکان برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس مکانی گسترده فراهم شده است. مدل هایی مانند سیال و متریک با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های انرژی سطح، تبخیر و تعرق واقعی را برآورد می کنند (باشتیانسن و همکاران، ۱۹۹۸؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۷). این مدل ها به ویژه برای مدیریت آبیاری در سطح مزرعه های بزرگ، شبکه های آبیاری و پایش منطقه ای منابع آب اهمیت دارند.

مزیت اصلی آن‌ها، ارائه تصویر مکانی از تغییرات تبخیر و تعرق است؛ اما نیاز به پردازش تخصصی تصاویر، هزینه داده یا نرم‌افزار و محدودیت تفکیک زمانی در برخی ماهواره‌ها از جمله محدودیت‌های این روش‌هاست.

#### ۴-۸. مدل‌های داده‌محور و هوش مصنوعی

در دهه‌های اخیر، مدل‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی - فازی، ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم‌های درختی برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها قادرند روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای ورودی و تبخیر و تعرق را بیاموزند و در بسیاری از مطالعات، عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند (کومار و همکاران، ۲۰۰۲؛ تراومن و همکاران، ۲۰۱۸).

نقطه قوت این مدل‌ها، انعطاف‌پذیری و توان بالا در الگوگیری از داده‌هاست. با این حال، آن‌ها نیازمند داده‌های تاریخی کافی، تنظیم مناسب پارامترها و ارزیابی دقیق هستند. افزون بر آن، برخی از این مدل‌ها شفافیت فیزیکی کمتری دارند و بیشتر به‌عنوان «جعبه سیاه» عمل می‌کنند.

جدول ۱. مقایسه مهم‌ترین مدل‌های برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق

نوع مدل	نمونه مدل	داده‌های مورد نیاز	مزایا	محدودیت‌ها	کاربرد در آبیاری قطره‌ای
تجربی	هارگریوز - سامانی	دمای حداقل و حداکثر، تابش برون‌جو	ساده، کم‌هزینه، مناسب مناطق کم‌داده	دقت کمتر در برخی اقلیم‌ها	مناسب برای مدیریت اولیه و مناطق فاقد داده کامل
تجربی	بلانی - کریدل	دما و ساعات روشنایی	محاسبه آسان	حساس به کالیبراسیون محلی	قابل استفاده در مقیاس تقریبی
ترکیبی	پنمن - مانیتث فائو	دما، رطوبت، باد، تابش	دقت بالا، استاندارد جهانی	نیازمند داده کامل و دقیق	بسیار مناسب برای زمان‌بندی دقیق آبیاری
سنجش‌ازدور	سبال / متریک	تصاویر ماهواره‌ای، داده انرژی سطح	پوشش مکانی وسیع، منطقه‌ای	پردازش پیچیده، نیاز به تخصص	مناسب برای مزارع بزرگ و مدیریت شبکه
هوشمند	شبکه عصبی مصنوعی	داده‌های اقلیمی تاریخی	توان روابط غیرخطی	نیاز به داده آموزشی و تنظیم مدل	مناسب برای پیش‌بینی پویا و هوشمند
هوشمند	ماشین بردار پشتیبان	داده‌های اقلیمی و گاه داده مزرعه	دقت مناسب در داده‌های محدود	حساسیت به انتخاب پارامتر	کاربرد مناسب در سامانه‌های تصمیم‌یار

جدول ۱ نشان می‌دهد که هیچ مدل واحدی برای همه شرایط بهترین گزینه نیست. انتخاب مدل باید بر اساس هدف کاربرد، سطح داده‌های در دسترس، مقیاس مکانی و زمانی، و زیرساخت فنی انجام شود. برای مثال، در یک باغ کوچک با دسترسی محدود به داده هواشناسی، مدل‌های ساده‌تر ممکن است عملی‌تر باشند؛ اما در سامانه‌های پیشرفته آبیاری قطره‌ای با ایستگاه خودکار و کنترلر هوشمند، مدل پنمن - مانیتث یا مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند دقت و کارایی بالاتری فراهم کنند.

## ۹. نقش مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق در بهینه سازی آبیاری قطره ای

### ۹-۱. تعیین دقیق زمان آبیاری

یکی از اساسی ترین کارکردهای مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق، کمک به تعیین زمان مناسب آبیاری است. در روش های سنتی، دور آبیاری معمولاً ثابت یا مبتنی بر تجربه کشاورز است، در حالی که نیاز آبی گیاه به صورت روزانه تغییر می کند. پیش بینی تبخیر و تعرق این امکان را فراهم می کند که آبیاری بر اساس نیاز واقعی و متغیر گیاه تنظیم شود. این امر به ویژه در آبیاری قطره ای که معمولاً با دوره های کوتاه و حجم آب کم انجام می شود، اهمیت زیادی دارد.

وقتی تبخیر و تعرق روزانه افزایش می یابد، مثلاً در دوره های گرم و بادخیز، سیستم می تواند فاصله بین دو آبیاری را کاهش دهد یا حجم هر نوبت آبیاری را افزایش دهد. برعکس، در روزهای خنک تر یا مرطوب تر، می توان دور آبیاری را افزایش داد یا عمق آبیاری را کاهش داد. چنین مدیریتی از تنش آبی و نیز آبیاری اضافی جلوگیری می کند.

### ۹-۲. تعیین مقدار بهینه آب آبیاری

مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق نه تنها زمان، بلکه مقدار مورد نیاز آب را نیز مشخص می کنند. در سامانه قطره ای، آب باید به گونه ای توزیع شود که ناحیه فعال ریشه به اندازه کافی مرطوب شود، بدون آنکه نفوذ عمقی یا رواناب موضعی رخ دهد. برآورد دقیق تبخیر و تعرق همراه با در نظر گرفتن راندمان سیستم، ضریب گیاهی و ویژگی های خاک، به محاسبه عمق خالص و ناخالص آبیاری کمک می کند.

این موضوع به ویژه در شرایط محدودیت منابع آب اهمیت دارد. در چنین شرایطی، مدیر مزرعه می تواند با تکیه بر پیش بینی تبخیر و تعرق، کم آبیاری تنظیم شده را به صورت علمی اجرا کند؛ یعنی در دوره هایی که حساسیت گیاه کمتر است، مقدار آبیاری را اندکی کاهش دهد، بدون آنکه کاهش شدید عملکرد رخ دهد. این رویکرد در محصولات باغی و برخی گیاهان زراعی ارزش اقتصادی بالایی دارد.

### ۹-۳. افزایش بهره وری مصرف آب

بهره وری آب معمولاً به نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرف شده اطلاق می شود. هرچه بتوان با آب کمتر، عملکرد برابر یا نزدیک به حداکثر تولید کرد، بهره وری افزایش می یابد. مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق از طریق تنظیم دقیق آبیاری، به کاهش تلفات غیر ضروری و هم زمان حفظ شرایط مطلوب رطوبتی گیاه کمک می کنند.

پژوهش های متعدد نشان داده اند که زمان بندی آبیاری مبتنی بر تبخیر و تعرق، در بسیاری از محصولات، به افزایش بهره وری آب و گاهی حتی افزایش عملکرد منجر می شود؛ زیرا از تنش های پنهان و نوسانات شدید رطوبتی جلوگیری می کند (پریا و همکاران، ۲۰۱۵).

### ۹-۴. کاهش زه آب و شست و شوی عناصر غذایی

در آبیاری قطره ای، اگر حجم آب بیش از ظرفیت نگهداری ناحیه ریشه باشد، آب به لایه های عمیق تر نفوذ کرده و علاوه بر هدررفت، سبب شست و شوی نیترات و سایر عناصر غذایی می شود. این مسئله هم از نظر اقتصادی زیان بار است و هم از نظر

زیست محیطی مخاطره آمیز. پیش بینی دقیق تبخیر و تعرق، با کاهش خطای برآورد نیاز آبی، احتمال چنین رخدادهایی را کم می کند.

در مزرعه هایی که کودآبیاری انجام می شود، این مزیت اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا مدیریت نادرست آبیاری می تواند کارایی مصرف کود را نیز به شدت کاهش دهد.

## ۵-۹. سازگاری با تغییرات اقلیمی و نوسانات فصلی

تغییر اقلیم موجب افزایش عدم قطعیت در نیاز آبی گیاهان شده است. دوره های گرمای شدید، تغییر الگوی باد و رطوبت، و نوسانات بارندگی، همگی می توانند تبخیر و تعرق را به طور معناداری تغییر دهند. مدل های پیش بینی، به ویژه مدل هایی که از داده های بهنگام یا پیش بینی هواشناسی استفاده می کنند، این امکان را می دهند که مدیریت آبیاری با شرایط متغیر هماهنگ شود.

در چنین شرایطی، آبیاری قطره ای مبتنی بر مدل، از یک سامانه ایستا به یک سامانه پویا تبدیل می شود که قابلیت پاسخ گویی به تغییرات محیطی را دارد.

جدول ۲. کارکردهای مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق در مدیریت آبیاری قطره ای

حوزه اثر	سازوکار اثرگذاری	پیامد مدیریتی
زمان بندی آبیاری	تعیین پویا و روزانه نیاز آبی	کاهش آبیاری زودهنگام یا دیرهنگام
مقدار آب آبیاری	محاسبه دقیق عمق آبیاری خالص و ناخالص	جلوگیری از کم آبی یا آبیاری اضافی
بهره وری آب	تطبیق مصرف آب با نیاز واقعی گیاه	افزایش عملکرد به ازای واحد آب
مدیریت تغذیه	کاهش نفوذ عمقی و شست و شوی کود	افزایش کارایی کودآبیاری
کاهش تنش گیاه	حفظ رطوبت در محدوده مطلوب ناحیه ریشه	پایداری رشد و کاهش افت عملکرد
سازگاری اقلیمی	پاسخ گویی به تغییرات روزانه و فصلی هوا	تاب آوری بیشتر سیستم آبیاری
مدیریت هوشمند	اتصال به حسگرها و سامانه های کنترل	خودکارسازی تصمیم آبیاری

جدول ۲ نشان می دهد که نقش مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق صرفاً محدود به محاسبه یک شاخص اقلیمی نیست، بلکه این مدل ها به طور مستقیم در قلب تصمیم گیری مدیریتی آبیاری قرار می گیرند. در واقع، هرچه برآورد تبخیر و تعرق به واقعیت مزرعه نزدیک تر باشد، تصمیمات آبیاری دقیق تر، اقتصادی تر و پایدارتر خواهند بود.

## ۱۰. ادغام مدل های پیش بینی با سامانه های هوشمند آبیاری

### ۱۰-۱. حسگرهای رطوبت خاک و اعتبارسنجی پیش بینی

یکی از رویکردهای مؤثر در افزایش دقت تصمیم گیری، ترکیب مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق با داده های واقعی مزرعه است. حسگرهای رطوبت خاک می توانند نشان دهند که آیا برآورد مدل با وضعیت حقیقی ناحیه ریشه همخوانی دارد یا نه. در این رویکرد، مدل تبخیر و تعرق نیاز بالقوه را برآورد می کند و حسگر خاک، وضعیت واقعی ذخیره آب را تأیید یا اصلاح می کند.

این ترکیب، به‌ویژه در خاک‌های با بافت متفاوت یا در شرایطی که یکنواختی توزیع آب کامل نیست، به بهبود دقت برنامه‌ریزی آبیاری کمک می‌کند.

## ۲-۱۰. اینترنت اشیا و کنترل خودکار

با گسترش اینترنت اشیا، امکان اتصال ایستگاه‌های هواشناسی محلی، حسگرهای مزرعه، شیرهای برقی و کنترلرهای آبیاری در یک شبکه هوشمند فراهم شده است. در چنین سامانه‌ای، داده‌های اقلیمی به‌صورت لحظه‌ای دریافت می‌شوند، مدل تبخیر و تعرق اجرا می‌شود و سپس سیستم، فرمان لازم برای شروع یا توقف آبیاری را صادر می‌کند.

این فناوری می‌تواند خطاهای انسانی را کاهش دهد، زمان واکنش به تغییرات اقلیمی را افزایش دهد و اجرای آبیاری را دقیق‌تر کند. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که سامانه‌های تصمیم‌یار مبتنی بر اینترنت اشیا، در مدیریت آب مزرعه به‌ویژه در گلخانه‌ها و باغ‌های با ارزش اقتصادی بالا، ظرفیت زیادی دارند (جونز، ۲۰۰۴).

## ۳-۱۰. سنجش‌از‌دور و پایش مکانی مزرعه

در مزارع بزرگ یا باغ‌هایی با ناهمگنی مکانی، استفاده از یک مقدار واحد تبخیر و تعرق برای کل مزرعه ممکن است کافی نباشد. تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی می‌توانند تغییرات مکانی پوشش گیاهی، دمای سطح، شاخص‌های تنش و تبخیر و تعرق را نشان دهند. ادغام این داده‌ها با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، زمینه اجرای آبیاری متغیر مکانی را فراهم می‌کند.

چنین رویکردی، یکی از جلوه‌های کشاورزی دقیق است و می‌تواند به‌ویژه در باغ‌های وسیع، مزارع تحقیقاتی و سامانه‌های پیشرفته تولید، بسیار سودمند باشد.

## ۱۱. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق

### ۱-۱۱. محدودیت داده‌های هواشناسی

بسیاری از مدل‌های دقیق، به داده‌های کامل و باکیفیت هواشناسی نیاز دارند. در عمل، کمبود ایستگاه‌های هواشناسی، نقص داده‌ها، کالیبراسیون نامناسب ابزارها یا فاصله زیاد ایستگاه تا مزرعه می‌تواند دقت برآورد را کاهش دهد. در مناطق روستایی، این مسئله یکی از اصلی‌ترین موانع کاربرد عملی مدل‌های پیشرفته است.

### ۲-۱۱. تفاوت‌های محلی و نیاز به کالیبراسیون

یک مدل ممکن است در یک اقلیم یا منطقه عملکرد بسیار خوبی داشته باشد، اما در منطقه‌ای دیگر دقت کافی نداشته باشد. به همین دلیل، ارزیابی و کالیبراسیون محلی مدل‌ها اهمیت زیادی دارد. ضرایب گیاهی، رفتار هیدرولیکی خاک، آرایش سیستم قطره‌ای، نوع محصول و مدیریت مزرعه همگی می‌توانند بر دقت تصمیم‌نهایی تأثیر بگذارند.

## ۳-۱۱. پیچیدگی اجرایی و نیاز به دانش فنی

استفاده از مدل های پیشرفته و سامانه های هوشمند مستلزم دانش فنی، آموزش بهره برداران و پشتیبانی تخصصی است. در بسیاری از مناطق، کشاورزان هنوز به روش های سنتی عادت دارند و پذیرش فناوری های جدید ممکن است با مقاومت یا دشواری همراه باشد.

## ۴-۱۱. هزینه های سرمایه گذاری و نگهداری

نصب ایستگاه هواشناسی خودکار، حسگرهای خاک، کنترلرهای هوشمند و نرم افزارهای مدیریت آبیاری، هزینه هایی را به سیستم تحمیل می کند. هرچند این هزینه ها در بلندمدت می توانند با صرفه جویی در آب و انرژی جبران شوند، اما برای بسیاری از بهره برداران کوچک، مانع اولیه مهمی به شمار می روند.

جدول ۳. مهم ترین مزایا و چالش های کاربرد مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق در آبیاری قطره ای

بُعد	مزایا	چالش ها
فنی	دقت بیشتر در زمان بندی و مقدار آبیاری	نیاز به داده و کالیبراسیون مناسب
اقتصادی	کاهش مصرف آب، انرژی و کود	هزینه تجهیزات و سامانه های هوشمند
زراعی	کاهش تنش و افزایش پایداری عملکرد	وابستگی به مهارت مدیریتی بهره بردار
زیست محیطی	کاهش زه آب، شورشدگی و افت منابع آب	خطر خطا در صورت داده نامعتبر
مدیریتی	امکان خودکارسازی و تصمیم یار هوشمند	پیچیدگی بهره برداری و نگهداری

همان گونه که جدول ۳ نشان می دهد، منافع کاربرد مدل های پیش بینی تبخیر و تعرق بسیار گسترده است، اما تحقق این منافع به فراهم بودن زیرساخت داده، آموزش کاربران و انتخاب درست مدل بستگی دارد. بنابراین، توسعه این رویکرد باید همراه با سرمایه گذاری نهادی، فنی و آموزشی باشد.

## ۱۲. بحث

یافته های تحلیلی مقاله حاضر نشان می دهد که تبخیر و تعرق، حلقه اتصال میان اقلیم، گیاه و مدیریت آب است و هرگونه تلاش برای بهینه سازی مصرف آب در سامانه های آبیاری قطره ای، بدون اتکا به برآورد دقیق این متغیر، با محدودیت جدی مواجه خواهد بود. اگرچه آبیاری قطره ای ذاتاً یک روش کم مصرف و کارآمد محسوب می شود، اما این مزیت بالقوه، تنها در صورتی به بهره وری واقعی تبدیل می شود که زمان بندی و مقدار آبیاری با نیاز واقعی گیاه هماهنگ باشد.

از میان مدل های مختلف، مدل پنمن - مانتیث فائو همچنان معتبرترین مرجع برای برآورد تبخیر و تعرق است؛ با این حال، در شرایطی که داده ها ناقص باشند، مدل های ساده تر یا داده محور می توانند جایگزین هایی عملی ارائه دهند. این نتیجه با مطالعات متعددی هم راستا است که نشان داده اند انتخاب مدل بهینه باید تابعی از شرایط محلی، کیفیت داده ها و سطح فناوری در دسترس باشد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵).

همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که آینده مدیریت آبیاری به سمت ادغام چندمنبعی داده‌ها حرکت می‌کند؛ یعنی ترکیب داده‌های هواشناسی، حسگرهای مزرعه، تصاویر سنجش‌ازدور و الگوریتم‌های پیش‌بینی. در چنین ساختاری، برآورد تبخیر و تعرق دیگر یک محاسبه منفرد نیست، بلکه بخشی از یک سامانه تصمیم‌یار هوشمند است که می‌تواند با تغییر شرایط محیطی، برنامه آبیاری را به‌طور مستمر اصلاح کند. این تحول، به‌ویژه در کشاورزی دقیق و سامانه‌های پیشرفته تولید، اهمیت راهبردی دارد.

در عین حال، نباید از شکاف میان ظرفیت علمی و اجرای میدانی غافل شد. در بسیاری از مناطق، داده کافی، زیرساخت فنی یا آموزش لازم برای استفاده مؤثر از این مدل‌ها وجود ندارد. بنابراین، موفقیت در این حوزه نیازمند رویکردی چندبعدی است که علاوه بر توسعه مدل، بر انتقال فناوری، آموزش بهره‌برداران و بومی‌سازی راهکارها نیز تأکید کند.

### نتیجه‌گیری

مقاله حاضر با هدف بررسی نقش مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق در بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای تدوین شد. تحلیل مبانی نظری و مطالعات موجود نشان داد که تبخیر و تعرق مهم‌ترین مبنای علمی برای برآورد نیاز آبی گیاه و تنظیم برنامه آبیاری است. همچنین روشن شد که آبیاری قطره‌ای، هرچند از نظر ساختاری یکی از کارآمدترین روش‌های آبیاری است، اما تحقق کامل مزایای آن به مدیریت دقیق و داده‌محور وابسته است.

مدل‌های مختلف برآورد و پیش‌بینی تبخیر و تعرق، از مدل‌های تجربی ساده تا مدل‌های ترکیبی، ماهواره‌ای و هوشمند، هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. انتخاب مدل مناسب باید با توجه به شرایط اقلیمی، کیفیت داده‌ها، مقیاس کاربرد و امکانات فنی صورت گیرد. یافته‌ها نشان داد که استفاده از این مدل‌ها در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌تواند به تعیین دقیق‌تر زمان و مقدار آبیاری، کاهش تنش آبی، جلوگیری از آبیاری اضافی، کاهش زه‌آب، افزایش بهره‌وری آب و ارتقای عملکرد محصول منجر شود.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که گذار از مدیریت سنتی آبیاری به مدیریت هوشمند مبتنی بر پیش‌بینی تبخیر و تعرق، یکی از اساسی‌ترین راهبردها برای مقابله با بحران آب در کشاورزی است. این گذار مستلزم توسعه زیرساخت داده، بومی‌سازی مدل‌ها، آموزش کاربران و یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین در سطح مزرعه است.

### منابع

- علیزاده، ا. (۱۳۹۰). هواشناسی کاربردی. مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- امیری، ا.، نصیری، م.، و رضایی، ح. (۱۳۹۴). بررسی کارایی آبیاری قطره‌ای و تأثیر آن بر بهره‌وری مصرف آب در محصولات باغی. فصلنامه آبیاری و زهکشی ایران، ۸(۲)، ۹۵-۱۱۰.
- خوش‌گفتارمنش، م.، و سپاسخواه، ا. ر. (۱۳۹۲). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های متفاوت ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۷(۶۷)، ۱-۱۵.
- سپاسخواه، ا. ر. (۱۳۸۵). اصول و مبانی آبیاری. شیراز: انتشارات دانشگاه شیراز.

- فرش، ع.، و همکاران. (۱۳۹۶). مقایسه مدل‌های تجربی و استاندارد فائو پنمن - مانیتیت در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در مناطق خشک ایران. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۱۰(۱)، ۴۵-۵۸.
- کریمی، پ.، و همکاران. (۱۳۹۷). کاربرد داده‌های سنجش‌ازدور در برآورد نیاز آبی و مدیریت آبیاری. *مجله مهندسی آب و خاک*، ۳۱(۴)، ۷۸۱-۷۹۶.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (۱۹۹۸). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper ۵۶. Rome: FAO.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (۲۰۰۷). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ۱۳۳(۴), ۳۸۰-۳۹۴.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (۱۹۹۸). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): ۱. Formulation. *Journal of Hydrology*, ۲۱۲-۲۱۳, ۱۹۸-۲۱۲.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (۱۹۵۰). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (۱۹۷۷). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper ۲۴. Rome: FAO.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (۱۹۸۵). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, ۱(۲), ۹۶-۹۹.
- Jones, H. G. (۲۰۰۴). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, ۵۵(۴۰۷), ۲۴۲۷-۲۴۳۶.
- Kumar, M., Raghuwanshi, N. S., Singh, R., Wallender, W. W., & Pruitt, W. O. (۲۰۰۲). Estimating evapotranspiration using artificial neural network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ۱۲۸(۴), ۲۲۴-۲۳۳.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (۲۰۱۵). Crop evapotranspiration estimation with FAO۵۶: Past and future. *Agricultural Water Management*, ۱۴۷, ۴-۲۰.
- Trout, T. J., & DeJonge, K. C. (۲۰۱۷). Water productivity of maize in the US high plains. *Irrigation Science*, ۳۵, ۲۵۱-۲۶۶.
- Trautmann, T., et al. (۲۰۱۸). Machine learning approaches for estimating reference evapotranspiration using limited climate data. *Agricultural Water Management*, ۲۰۸, ۲۸۶-۲۹۷.
- Todorovic, M., Karic, B., & Pereira, L. S. (۲۰۱۳). Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, ۴۸۱, ۱۶۶-۱۷۶.