

# برآورد جداگانه اجزای تبخیر و تعرق ذرت با استفاده از مدل‌های تجربی در شرایط تنش آبی

رضا سعیدی<sup>۱</sup>

دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup>، قزوین، ایران.  
saeidi@org.ikiu.ac.ir

دریافت: بهمن ۱۴۰۰ و پذیرش: خرداد ۱۴۰۱

## چکیده

در برنامه‌ریزی آبیاری، اجزای تبخیر- تعرق شامل نیاز آبی واقعی گیاه (تعرق) و تلفات آب (تبخیر) نقش دارند. در این پژوهش، برای مدیریت کم‌آبیاری، مقادیر اجزای تبخیر- تعرق ذرت در شرایط تنش آبی شبیه‌سازی شد. تنش آبی از طریق کاهش آب خاک نسبت به حد آب سهل‌الوصول اعمال شد. تیمارها شامل تخلیه مجاز آب خاک در چهار سطح (I<sub>0</sub>) ۴۰٪، (I<sub>1</sub>) ۵۵٪، (I<sub>2</sub>) ۷۰٪ و (I<sub>3</sub>) ۸۵٪ از کل آب قابل استفاده خاک بود. مقادیر تبخیر- تعرق ذرت و اجزای آن (مقدار تبخیر و مقدار تعرق به‌طور جداگانه)، در بستر کشت مینی‌لایسیمتر اندازه‌گیری شد. جمع مقادیر تبخیر- تعرق، جزء تعرق و جزء تبخیر (در کل دوره رشد ذرت) به‌ترتیب برابر با ۴۴۳، ۳۱۹ و ۱۲۴ میلی‌متر (I<sub>0</sub>)، ۴۰۱، ۲۸۲ و ۱۱۹ میلی‌متر (I<sub>1</sub>)، ۳۰۳، ۲۱۱ و ۹۲ میلی‌متر (I<sub>2</sub>) و ۲۰۱، ۱۲۷ و ۷۴ میلی‌متر (I<sub>3</sub>) بود. کمبود آب خاک باعث کاهش مقدار تبخیر- تعرق و اجزای آن نسبت به حالت رایج در منطقه (تیمار I<sub>0</sub>) شد. کاهش تلفات تبخیر از نکات مطلوب در این شیوه کم‌آبیاری (دور آبیاری بلند) بود. برای شبیه‌سازی مقادیر تعرق و تبخیر، از داده‌های تبخیر- تعرق (در تیمار I<sub>0</sub>)، ضرایب تنش تبخیر- تعرق (K<sub>s</sub>) و حساسیت مرحله رشد گیاه (K<sub>pi</sub>) و کاربرد توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی، به‌عنوان مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. با استفاده از داده‌های واقعی، ضرایب مجهول در توابع توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد و مدل‌های رگرسیونی ایجاد شد. آماره‌های ارزیابی مدل‌ها نشان دادند که تابع خطی با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) ۰/۹۱ و تابع درجه دوم با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) ۰/۸۷۴، به‌ترتیب، مدل‌های بهینه برای برآورد مقدار تعرق و تبخیر در شرایط تنش آبی بوده‌اند. از طریق برآورد جداگانه اجزای تبخیر- تعرق ذرت، می‌توان نیاز آبی واقعی گیاه و تلفات تبخیر را دقیق‌تر برآورد کرد. در این صورت معیار مناسبی برای برنامه‌ریزی آبیاری و محاسبه راندمان مصرف آب در دست خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تلفات تبخیر، حساسیت مرحله رشد، ضریب تنش، مدل‌سازی رگرسیونی

<sup>۱</sup> - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup>، قزوین، ایران.

## مقدمه

می نماید. در این شرایط گیاه با بستن روزنه های خود، اقدام به کاهش تعرق، حفظ رطوبت و جلوگیری از اتلاف آب می کند (ماهرخ و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین واکنش گیاه به اعمال تنش آبی، کاستن از مقدار تعرق خود است. به طوری که در منطقه تایوان جنوبی، مقدار تبخیر- تعرق ذرت تحت سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۶۰۵، ۵۲۶، ۴۵۵، ۳۸۳ و ۳۳۱ میلی متر برآورد شد (گریوز و وانگ، ۲۰۱۷). در پژوهشی در ترکیه، مقدار تبخیر- تعرق ذرت تحت سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۰ و ۳۵ درصد نیاز آبی گیاه، اندازه گیری شد. نتایج نشان داد در اثر اعمال تنش آبی، مقدار تبخیر- تعرق ذرت (در کل دوره رشد) کاهش یافت و در سطوح آبیاری مذکور به ترتیب ۷۳۸، ۵۸۳ و ۳۹۰ میلی متر برآورد شد (اوپچاک و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش های مذکور تأثیر تنش آبی بر تبخیر- تعرق گیاه ذرت، به صورت کاهش مقدار تبخیر- تعرق در کل دوره رشد گزارش شد؛ اما با توجه به این که نشریه فائو-۵۶ دوره رشد گیاهان زراعی را به چهار مرحله متمایز<sup>۵</sup> اولیه،<sup>۶</sup> توسعه،<sup>۷</sup> میانی<sup>۸</sup> و پایانی رشد تقسیم کرده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸)، امکان تفاوت حساسیت گیاه به تنش آبی در مراحل مختلف رشد وجود دارد. مرحله اولیه رشد گیاه از تاریخ کاشت بذر شروع شده و تا زمانی که پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد از سطح زمین را پوشاند، ادامه می یابد. مرحله توسعه گیاه از ادامه مرحله قبل آغاز شده و تا زمان رسیدن به سطح سایه اندازی کامل گیاه ادامه دارد. مرحله میانی رشد از زمان برقراری پوشش کامل گیاه (که مصادف با آغاز گل دهی است) شروع شده و تا ابتدای رسیدن بیولوژیک محصول ادامه دارد. در این مرحله، ضریب گیاهی تبخیر- تعرق ( $K_c$ ) به بیشترین مقدار خود می رسد. مرحله پایانی رشد از رسیدگی بیولوژیک محصول آغاز شده و تا خشک شدن طبیعی برگ های گیاه (پلاسیدگی کامل) و ریزش آن ها ادامه می یابد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

بحران کمبود منابع آب باکیفیت در بخش کشاورزی، تلاش پژوهشگران و برنامه ریزان آبیاری را به سمت مدیریت مصرف آب بر اساس نیاز آبی واقعی گیاه معطوف می نماید. آنچه به عنوان نیاز خالص آبی گیاه در نظر گرفته می شود، پارامتر تبخیر- تعرق گیاه<sup>۲</sup> (ET) است که بر اساس شرایط استاندارد (بدون تنش) و یا غیراستاندارد (تنشزا) محیط تحت کشت، مقدار آن می تواند متفاوت باشد. پارامتر تبخیر- تعرق شامل دو جزء تبخیر از سطح خاک<sup>۳</sup> (E) و تعرق گیاه<sup>۴</sup> (T) است که تعرق به عنوان جزء مطلوب و تبخیر به عنوان جزء نامطلوب محسوب می شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). از این رو تعیین نیاز آبی گیاه منطبق بر مقدار واقعی تعرق و حتی الامکان حذف جزء نامطلوب تبخیر از سطح خاک، می تواند باعث صرفه جویی در مصرف آب و افزایش راندمان کاربرد آب شود. در میان گیاهان زراعی، ذرت، گیاهی است که به صورت آبی تحت کشت می رود و از لحاظ نقش استراتژیک آن در تولید غذای انسان و دام، می تواند در پژوهش های مرتبط با برنامه ریزی آبیاری مورد مطالعه قرار بگیرد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۹). در بین تنش های محیطی، تنش آبی در قالب کم آبیاری گیاه و به منظور مدیریت بهره وری مصرف آب اعمال می شود. در این باره تحقیقی تحت سه رژیم آبیاری شامل (I<sub>1</sub>) ۱۰۰، (I<sub>2</sub>) ۷۵ و (I<sub>3</sub>) ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت انجام شد (عزیزیان و سپاسخواه، ۲۰۱۴). نتایج نشان داد که مقدار بهره وری مصرف آب در تولید زیست توده خشک ذرت به ترتیب ۲/۱۵، ۲/۳۲ و ۲/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد؛ یعنی با کاهش مصرف آب در آبیاری، مقدار بهره وری مصرف آب افزایش داشته است.

در پژوهش دیگر گزارش شد که تنش آبی باعث می شود که هورمون آبسازیک اسید وارد اندام های هوایی گیاه شده و به صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل

<sup>۶</sup>Development stage<sup>۷</sup>Middle stage<sup>۸</sup>Late stage<sup>۲</sup>Evapotranspiration, ET<sup>۳</sup>Evaporation, E<sup>۴</sup>Transpiration, T<sup>۵</sup>Initial stage

تبخیر- تعرق پیش‌بینی شده ( $ET_p$ ) و اندازه‌گیری شده ( $ET_M$ ) برآزش داده شد (لی و ما، ۲۰۱۹). در منطقه قزوین، تیمارهای شوری آب آبیاری ( $EC_w$ ) شامل مقادیر ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس در متر و حاصلخیزی خاک ( $F$ ) شامل مصرف ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد کود نیتروژن (بر اساس نیاز کودی گیاه)، بر روی گیاه ذرت مطالعه شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیونی درجه دوم با معادله  $ET=326.7+16.3F^2-3.53EC_w^2+5.37F.EC_w$  و ضریب تبیین ۰/۹۷۸، بهترین مدل برای برآورد مقدار تبخیر- تعرق ذرت (بر واحد میلی‌متر) در شرایط وجود تنش‌های شوری و حاصلخیزی بود (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷).

تحقیقی در برزیل، تحت تیمارهای شوری آب آبیاری شامل مقادیر ۰/۵، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ دسی‌زیمنس در متر، بر روی مقدار تبخیر- تعرق گیاه ذرت انجام شد. نتایج نشان داد رابطه خطی  $ET=-0.717 EC+15.07$  با ضریب تبیین ( $R^2$ ) ۰/۷۶ بین مقدار تبخیر- تعرق ذرت (بر واحد لیتر بر گیاه) و سطح شوری آب ارائه شد (لاکردا و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش دیگر از مدل‌های ساده رگرسیونی برای برآورد مقدار تبخیر- تعرق واقعی گندم در مناطق خشک مصر استفاده شد. دو تیمار شامل سطوح آبیاری بر اساس مقدار تبخیر- تعرق محاسباتی گیاه ( $A$ ) و آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک نسبت به حد ظرفیت مزرعه ( $B$ ) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد در تیمارهای  $A$  و  $B$  به ترتیب دو رابطه نمایی با معادله  $ET_a=0.131(GDD)^{1.1405}$  و  $ET_a=0.1201(GDD)^{1.1203}$  تعرق واقعی ( $ET_a$ ) و درجه-روز-رشد ( $GDD$ ) برآزش داده شد (سالاما و همکاران، ۲۰۱۵). آگاهی از مقدار اجزای تبخیر و تعرق در مراحل رشد گیاه و شرایط مختلف محیطی (مانند مدیریت کم‌آبیاری)، می‌تواند برنامه‌ریزی دقیق‌تری را برای تعیین نیاز آبی واقعی گیاه و کنترل تلفات تبخیر ایجاد کند. در این خصوص و در کشور چین، اجزای تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه ذرت با استفاده از روش میکروولایسمتری در سیستم آبیاری جویچه‌ای برآورد شد.

از این‌رو در پژوهشی در منطقه قزوین، میزان حساسیت مراحل مختلف رشد ذرت به تنش آبی، بررسی شد. به این صورت که یک حد ثابت تنش آبی، در مراحل رشد چهار برگگی، ۱۲ برگگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بر ذرت اعمال شد. مقدار کل تبخیر- تعرق در تیمارهای شاهد، چهار برگگی، ۱۲ برگگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها به ترتیب ۴۶۲، ۴۰۱، ۳۲۲/۵، ۳۰۴/۵ و ۳۵۵ میلی‌متر برآورد شد. نتایج نشان داد که با اعمال یک‌بار تنش آبی (به صورت جداگانه) در مراحل مختلف رشد، مقدار تبخیر- تعرق ذرت نسبت به تیمار شاهد، به میزان برابر کاهش نیافته است. به طوری که بیش‌ترین تا کم‌ترین مقدار تبخیر- تعرق مربوط به اعمال تنش کم‌آبی در مراحل رشد چهار برگگی، خمیری شدن دانه‌ها، ۱۲ برگگی و گل‌دهی بود. در نتیجه حساسیت تبخیر- تعرق ذرت به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد یکسان نبوده است (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). در پژوهشی در شهرستان شاهرود تنش آبی با حذف یک مرحله آبیاری، در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ اجرا شد. نتایج نشان داد اعمال تنش آبی در مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله رشد رویشی، تأثیر بیشتری بر کاهش عملکرد محصول داشت. علت این بود که در مرحله گل‌دهی، علاوه بر ورود گیاه به مرحله زایشی که امکان رشد مجدد و افزایش ارتفاع نبود، گیاه با افزایش دما نیز روبه‌رو شده بود (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶).

از سوی دیگر پژوهش‌هایی برای مدل‌سازی مقدار تبخیر- تعرق ذرت در منطقه مورد مطالعه انجام شده است. به عنوان نمونه، مقدار تبخیر- تعرق ذرت تابستانه در شرایط آبیاری قطره‌ای، در کشور چین مدل‌سازی شد. بر اساس روش موازنه آب خاک و در سطوح آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰ و ۸۰ درصد تبخیر- تعرق گیاه، مقدار تبخیر- تعرق ذرت نسبت به شرایط وجود و عدم وجود خاک‌پوش (مالچ) مدل‌سازی شد. در شرایط کاربرد خاک‌پوش رابطه خطی با معادله  $ET_p=0.9ET_M+3.23$  و در شرایط بدون خاک‌پوش رابطه  $ET_p=0.86ET_M+4.82$  بین مقدار

نتایج نشان داد در کل دوره رشد، ۳۰ تا ۴۰ درصد از مقدار کل تبخیر- تعرق گیاه ذرت به جزء تبخیر از سطح خاک و مابقی به جزء تعرق گیاه اختصاص یافت (فریرا و همکاران، ۲۰۱۲).

جمع بندی پژوهش های گذشته این بود که امکان استفاده گسترده از مدل های رگرسیونی، برای مدل سازی مقدار تبخیر- تعرق گیاه بر اساس پارامترهای مختلف محیطی و مدیریتی وجود دارد؛ اما آنچه که در پژوهش حاضر دارای اهمیت بوده و آن را نسبت به تحقیقات گذشته متمایز می سازد، تفکیک اجزاء تبخیر- تعرق ذرت و برآورد آن ها از طریق پارامترهای قابل اندازه گیری در منطقه است. از این رو هدف از انجام پژوهش، برآورد جداگانه مقادیر تبخیر و تعرق ذرت با استفاده از مدل های تجربی (رگرسیونی)، در شرایط تنش آبی و در منطقه قزوین است. با مدل سازی جداگانه اجزاء تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش زای محیطی، می توان نگاه واقع بینانه تری نسبت به نیاز آبی گیاه، تلفات تبخیر از سطح خاک و راندمان آب کاربردی در آبیاری داشت. همچنین می توان نیاز آبی گیاه را بر اساس مقدار تعرق واقعی گیاه تعیین نمود و از مصرف بیش از اندازه آب جلوگیری کرد.

## مواد و روش ها

### کلیات پژوهش

در دانشگاه بین المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup> پژوهشی بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، انجام شد. هدف از انجام پژوهش، مدل سازی مقدار اجزاء جداگانه تبخیر و تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی (مدیریت کم آبیاری) بود. محل انجام پژوهش واقع در شهر قزوین و در موقعیت جغرافیایی با عرض شمالی ۳۳° ۱۹' ۳۶" و طول شرقی ۳۸° ۰۰' ۵۰" بود. برای بستر کشت، از مینی لایسیمترهای استوانه ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی متر (شکل ۱) استفاده شد تا کار برآورد اجزاء تبخیر و تعرق ذرت (به صورت جدا از هم) امکان پذیر شود. در پژوهش های گذشته نیز از مینی لایسیمترهایی با ابعاد مذکور برای کشت ذرت استفاده شده است (دهقانی سانچ و همکاران، ۱۳۹۶). خاک

بستر کشت از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بین المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup> تأمین شد و مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شد. مقدار چگالی ظاهری خاک آماده کشت (شخم خورده) در شرایط طبیعی مزرعه، برابر با ۱/۳۶ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد. از این رو با توجه به حجم هر مینی لایسیمتر، وزن مشخصی از خاک برای رسیدن به چگالی (تراکم) مذکور، در آن ها ریخته شد و به طور یکنواخت متراکم شد. سپس از طریق غرقاب نمودن مینی لایسیمترها، از بروز هرگونه نشست احتمالی خاک در دوره رشد گیاه جلوگیری شد. روش کاشت بذور به این صورت بود که در داخل هر مینی لایسیمتر تعداد سه بذور به صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد (دهقانی سانچ و همکاران، ۱۳۹۶؛ سعیدی، ۱۴۰۰ b). پس از جوانه زنی بذور و خارج شدن گیاهان از خاک، تعداد بوته ها در مینی لایسیمترها با توجه به رعایت تراکم تعداد ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار برای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱) تعیین شد. به این صورت که بر اساس مساحت سطح خاک در مینی لایسیمترها، فقط یک بوته در وسط سطح هر مینی لایسیمتر باقی ماند و بوته اضافی از سطح خاک قطع شد. در نشریه فائو-۵۶ چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت علوفه ای در یک دوره ۱۴۰ روزه، به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز در نظر گرفته شده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). در پژوهش حاضر نیز از زمان کاشت بذور تا هنگام برداشت علوفه ای محصول ذرت، فاصله زمانی ۱۴۰ روز طی شد و بازه زمانی مراحل رشد ذرت، مطابق با گزارش فائو-۵۶ منطبق شد. البته ویژگی های مراحل مختلف رشد گیاه (بر اساس گزارش فائو-۵۶) در پژوهش حاضر نیز، در کنترل بازه زمانی مراحل رشد نقش مهمی داشت. با توجه به این که در دوره رشد گیاه بارندگی مؤثری اتفاق نیفتاد، نیاز آبی گیاهان صرفاً از طریق انجام آبیاری تأمین شد. آبیاری مینی لایسیمترها به صورت سطحی و با استفاده از آب چاه با هدایت الکتریکی ۰/۵ دسی زیمنس در متر و اسیدیتته ۷/۱ انجام شد. سایر ویژگی های آبیاری در جدول (۲) نشان

خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به ترتیب تحت فشارهای مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد (سعیدی، ۱۴۰۰ b). داده‌های اصلی در این پژوهش شامل مقادیر تبخیر-تعرق، تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک بود که به صورت روزانه اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- تصویری از مینی لایسیمتر استفاده شده در پژوهش حاضر

داده شد. به‌طور کلی، آزمایش به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی اجرا شد و تیمارهای آبیاری بر اساس حد تخلیه مجاز رطوبتی خاک در چهار سطح (I<sub>0</sub>)، ۴۰، ۵۵ (I<sub>1</sub>)، ۷۰ (I<sub>2</sub>) و ۸۵ درصد کل آب قابل استفاده خاک<sup>۹</sup> (TAW) تعریف شد. به طوری که پس از تخلیه آب خاک در سطوح مذکور، عملیات آبیاری برای رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه<sup>۱۰</sup> (FC) انجام شد. علت مقادیر انتخاب شده این بود که در نشریه فائو-۵۶ متوسط ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک در کل دوره رشد ذرت برابر با ۰/۵۵ گزارش شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). از سوی دیگر در پژوهشی در منطقه قزوین، ضریب مذکور در حساس‌ترین مرحله رشد ذرت برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شد (سعیدی، ۱۴۰۰ a). از این رو اطمینان حاصل شد که در تیمار I<sub>0</sub> (تیمار شاهد)، حتی در مراحل حساس رشد ذرت نیز، تنش آبی بر گیاه وارد نشده است. مقدار TAW بر اساس اختلاف رطوبت خاک بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP<sup>۱۱</sup>) محاسبه شد. درصد رطوبت وزنی

جدول ۱- مشخصات خاک مینی لایسیمتر

پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	dS.m <sup>-1</sup>	۰/۴۸
اسیدیته (pH)	-	۷/۱
بافت خاک	-	لوم شنی
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	۲۴
رطوبت وزنی حد پژمردگی	%	۱۰/۳
چگالی ظاهری	g.cm <sup>-3</sup>	۱/۳۶

جدول ۲- ویژگی‌های آب مورد استفاده برای آبیاری

هدایت الکتریکی (dS.m <sup>-1</sup> )	سدیم (meq.L <sup>-1</sup> )	منیزیم (meq.L <sup>-1</sup> )	کلسیم (meq.L <sup>-1</sup> )	پتاسیم (meq.L <sup>-1</sup> )	سولفات (meq.L <sup>-1</sup> )	بی‌کربنات (meq.L <sup>-1</sup> )	کربنات (meq.L <sup>-1</sup> )	کلر (meq.L <sup>-1</sup> )
۰/۵	۲/۳۶	۰/۸۸	۱/۳۵	۰/۲	۱/۴۲	۱/۱۲	۰/۴۱	۱/۷۴

مقدار رطوبت روزانه خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دل‌تا تی (ΔT)، در مرکز سطح هر مینی لایسیمتر و در اعماق مذکور اندازه‌گیری شد. در طی دوره حیات گیاه و با توجه به عمق توسعه ریشه آن، مجموع مقادیر کاهش رطوبت خاک در چهار لایه خاک به‌عنوان

#### اندازه‌گیری تبخیر-تعرق و اجزاء آن

برآورد تبخیر-تعرق گیاه در فاصله بین دو آبیاری، از طریق پایش مقدار رطوبت خاک در اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵ و ۴۵-۶۰ سانتی‌متری هر مینی لایسیمتر انجام شد. روش کار به این صورت بود که

<sup>11</sup> Permanent wilting point, PWP

<sup>9</sup> Total available water, TAW

<sup>10</sup> Field capacity, FC

سری دوم و پس از جوانه زنی بذور، برای حذف اثر تبخیر و برآورد جزء تعرق گیاه، از مالچ پلاستیکی با رنگ روشن و به شکل ورقه های نازک بر روی سطح خاک استفاده شد. برای جلوگیری از جذب گرمای تابشی خورشید توسط مالچ و انتقال آن به خاک، مالچ با فاصله ی پنج سانتی متری از سطح خاک قرار داده شد. لذا تهویه ی مناسب در سطح خاک امکان پذیر شد و از تشکیل قطره های آب در زیر مالچ و تأثیر آن بر مقدار رطوبت خاک جلوگیری شد (سعیدی، ۱۴۰۰ b). همچنین مینی لایسیمترها در داخل یک ترانشه به گونه ای قرار داده شدند تا سطح خاک در مینی لایسیمترها با زمین اطراف آن هم سطح باشند. با این کار از اثر مستقیم نور خورشید بر سطوح جانبی مینی لایسیمترها و احتمال تعرق در سطوح متصل به خاک جلوگیری شد؛ بنابراین تغییرات روزانه رطوبت خاک در سری دوم مینی لایسیمترها فقط مربوط به تعرق گیاه بود و اختلاف آن با داده های سری اول، نشان دهنده مقدار تبخیر روزانه از سطح خاک بود. به طور کلی تعداد ۲۴ مینی لایسیمتر (برای اجرای چهار تیمار در سه تکرار و دو سری مینی لایسیمتر) در نظر گرفته شد.

#### تعیین زمان و حجم آب آبیاری

زمان انجام آبیاری بر اساس حد تخلیه مجاز آب در تیمارها تعریف شده بود. به این صورت که در تیمارهای  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  و  $I_3$  به ترتیب پس از تخلیه ۴۰، ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درصد از کل آب قابل استفاده در خاک (در عمق توسعه ریشه)، عملیات آبیاری انجام شد. لازم به ذکر است که برای تشخیص عمق توسعه ریشه، برای هر تیمار و مراحل مختلف رشد گیاه مینی لایسیمتراهای جداگانه ای در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه، عمق آن اندازه گیری شد. هدف مورد نظر برای محاسبه حجم آب آبیاری، جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه (FC) بود. از این رو با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک  $(\theta_{FC} - \theta_i)$ ، چگالی ظاهری خاک، عمق ریشه و مساحت سطح خاک در مینی لایسیمتر، حجم آب آبیاری بر اساس رابطه (۲) تعیین شد. در این شرایط آب اضافی برای تبدیل به زه آب و

تبخیر- تعرق گیاه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در خاک مینی لایسیمترها هیچ گونه درز و ترکمی وجود نداشت و به دلیل انجام آبیاری تا حد FC، زه آب خروجی از مینی لایسیمترها نیز وجود نداشت؛ بنابراین اطمینان حاصل شد که روتد کاهشی مقدار رطوبت خاک (در منطقه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر- تعرق گیاهان بوده است. قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که در یک نمودار، داده های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی واسنجی (با معادله مشخص) برای تبدیل داده های دستگاه به داده های واقعی رطوبت تهیه شد. در این شرایط از طریق پایش روزانه رطوبت خاک و محاسبه بیلان آب در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار روزانه تبخیر- تعرق گیاه توسط رابطه (۱) فراهم شد. لازم به ذکر است که ابتدا مقدار تبخیر- تعرق در هر لایه ۱۵ سانتی متری خاک محاسبه شد و سپس مجموع مقادیر تبخیر- تعرق در چهار لایه مینی لایسیمتر، به عنوان مقدار تبخیر- تعرق روزانه در نظر گرفته شد.

$$(ET_C)_i = \sum_{j=1}^{j=4} \left[ \frac{(\theta_{i-1} - \theta_i)}{100} \times \rho b \times D_j \right] \quad (1)$$

$(ET_C)_i$ : تبخیر- تعرق روزانه گیاه (سانتی متر)،  $\theta$ : مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)،  $i$ : شمارنده روزهای بین دو آبیاری،  $(\theta_{i-1} - \theta_i)$ : اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)،  $\rho b$ : چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی متر مکعب)،  $D$ : عمق لایه خاک در مینی لایسیمتر (سانتی متر)،  $j$ : شمارنده لایه های خاک در مینی لایسیمتر که تعداد چهار لایه ۱۵ سانتی متری در نظر گرفته شده بود. از سوی دیگر با هدف برآورد جداگانه مقادیر اجزاء تبخیر و تعرق ذرت، همه تیمارها در دو سری مینی لایسیمتر و دارای شرایط کاملاً یکسان اجرا شد. در سری اول، سطح خاک مینی لایسیمتر بدون پوشش و در حالت طبیعی قرار داشت. از این رو تغییرات روزانه رطوبت خاک در بین دو آبیاری، نشان دهنده مجموع مقادیر تبخیر و تعرق گیاهان بود؛ اما در

تبخیر استفاده شد. توابع مذکور شامل فرم‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بود که بین متغیرهای مستقل و وابسته برازش داده شد. برای این کار نرم‌افزار SPSS به کار گرفته شد و برای واسنجی توابع مذکور و تولید ضرایب آن‌ها، از مقادیر واقعی تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر استفاده شد. برای در نظر گرفتن اثر سطوح مختلف تنش آبی در فرایند مدل‌سازی، از رابطه ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ (رابطه ۴) برای محاسبه ضریب  $K_s$  استفاده شد.

$$E \text{ و } T = f(ET_c, K_s, K_{pi}, A_0) \quad (۳)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (\text{آلین و همکاران، ۱۹۹۸}) \quad (۴)$$

در رابطه (۴)،  $TAW$ : کل آب قابل استفاده خاک (بین دو حد  $FC$  و  $PWP$ ) در عمق توسعه ریشه گیاه (سانتی‌متر)،  $D_r$ : مقدار تخلیه آب خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (سانتی‌متر) و  $RAW$ : مقدار تخلیه آبی که گیاه بدون تنش آبی از خاک جذب می‌کند (سانتی‌متر). لازم به ذکر است که اگر مقدار رطوبت وزنی خاک برای پارامترهای  $TAW$ ،  $RAW$  و  $D_r$ ، در چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب) و عمق توسعه ریشه گیاه (سانتی‌متر) ضرب شوند، حاصل آن مقدار ارتفاع آب خاک بر واحد سانتی‌متر است. در این صورت با قرار دادن مقادیر پارامترهای مذکور در رابطه (۴)، مقدار ضریب  $K_s$  محاسبه می‌شود. در تیمار  $I_0$ ، مقدار  $D_r$  و  $RAW$  با هم برابر بود و مقدار ضریب  $K_s$  مساوی عدد یک شد؛ اما در سایر تیمارها (تحت تنش آبی) مقدار  $D_r$  بیشتر از  $RAW$  تعریف شده است. از این‌رو بر اساس مقدار ۴۰ درصد برای  $RAW$  و مقادیر ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درصد برای  $D_r$  در تیمارهای  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  به ترتیب مقدار ضریب  $K_s$  در تیمارهای مذکور برابر با ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ محاسبه شد.

برای شبیه‌سازی مقدار تعرق، روابط (۵) الی (۹) و برای شبیه‌سازی مقدار تبخیر، روابط (۱۰) الی (۱۴) که به ترتیب نشان‌دهنده توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بود، مورد استفاده قرار گرفت. در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مجهول  $A_0$ ،  $A_1$ ،  $A_2$  و  $K_{pi}$  برای توابع

خروج از انتهای مینی‌لایسمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود. در پژوهش حاضر، مسئله تجمع تدریجی املاح حاصل از آب آبیاری در خاک نیز رصد شد. به طوری که در پایان فصل رشد و پس از برداشت محصول، میزان شوری همه لایه‌های خاک اندازه‌گیری شد. به علت کیفیت مطلوب آب، حتی در تیمار دارای بیشترین مقدار آبیاری، شوری عصاره اشباع خاک به میزان ۱/۳ دسی‌زیمنس در متر بود. با توجه به این‌که در نشریه فائو-۵۶ آستانه تحمل شوری عصاره اشباع خاک برای گیاه ذرت علوفه‌ای مقدار ۱/۸ دسی‌زیمنس در متر گزارش شد، از این‌رو اطمینان حاصل شد که از نظر میزان شوری خاک، هیچ تنش شوری بر گیاه اعمال نشده است.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_i)}{100} \times \rho b \times D \times A \quad (۲)$$

$V$ : حجم آب آبیاری (مترمکعب)،  $\theta_{FC}$ : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)،  $\theta_i$ : رطوبت وزنی خاک قبل از انجام آبیاری (درصد)،  $\rho b$ : چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب)،  $D$ : عمق توسعه ریشه (متر) و  $A$ : مساحت سطح خاک (مترمربع).

### معادلات کاربردی

در این پژوهش از رابطه (۳) برای مدل‌سازی اجزای تبخیر-تعرق ذرت در شرایط تنش آبی استفاده شد. به این صورت که پارامترهای تعرق ( $T$ ) و تبخیر ( $E$ ) به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تبخیر-تعرق در تیمار  $I_0$  ( $ET_c$ )، ضریب تنش تبخیر-تعرق ( $K_s$ ) و ضریب حساسیت مرحله رشد گیاه ( $K_{pi}$ ) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. به بیان دیگر پارامترهای تبخیر و تعرق گیاه به صورت مجزا، وابسته به مقدار تبخیر-تعرق، ضرایب تنش و حساسیت مرحله رشد گیاه بوده است. پارامتر  $A_0$  نیز نشان‌دهنده اثر سایر عوامل مؤثر بر مقادیر مدل‌سازی شده تعرق و تبخیر بود که به عنوان بردار ثابت در نظر گرفته شد. برای انجام مدل‌سازی، از توابع رگرسیونی ارائه شده در نرم‌افزار اکسل به عنوان توابع تولید پارامترهای تعرق و

(۱۵) الی (۱۹) ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره های RMSE، ME و CRM و نزدیک به یک برای آماره های  $R^2$  و EF در هر مدل، نشان دهنده بهینه بودن آن مدل برای برآورد مقادیر تعرق و تبخیر بوده است. در روابط (۱۵) الی (۱۹)، حروف  $n$ ،  $O^{18}$  و  $P^{19}$  به ترتیب بیانگر تعداد تیمارها، داده های مشاهده ای در مقیاس مینی لایسیمتر و پیش بینی شده توسط مدل ها بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (15)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (17)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (19)$$

### نتایج و بحث

#### تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر

مجموع مقادیر تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر از سطح خاک در کل دوره رشد گیاه، از تیمار  $I_0$  تا  $I_3$  به ترتیب در بازه ۴۴۲/۷ تا ۲۰۱/۴، ۳۱۹/۳ تا ۱۲۷ و ۱۲۳/۴ تا ۷۴ میلی متر برآورد شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که اعمال تنش آبی بر گیاه از طریق کاهش آب خاک (نسبت به حد آب سهل الوصول)، باعث کاهش تبخیر-تعرق گیاه نسبت به شرایط استاندارد (تیمار  $I_0$ ) شد. این شرایط برای اجزاء تعرق و تبخیر نیز وجود داشت. برای حصول نتایج دقیق تر در مورد تغییرات داده های تیمار تحت تنش نسبت به تیمار شاهد، مقدار تجمعی ۱۰ روزه داده ها (در طول دوره رشد) در نمودارهایی در شکل (۳) بررسی شد. تحلیل داده های تجمعی ۱۰ روزه باعث شد تا شیب نرمالی برای روند تغییرات داده ها به دست آید. به طوری که در کل دوره رشد ذرت و در تیمارهای  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  مقدار تبخیر-تعرق

مذکور برآورد شد. به این صورت که مقادیر ضرایب  $A_0$ ،  $A_1$ ،  $A_2$  در کل دوره رشد به طور ثابت و مقدار  $K_p$  برای هر کدام از مراحل رشد (چهار مرحله رشد) به طور مجزا برآورد شد. در نتیجه اثر حساسیت مرحله رشد گیاه در قالب ضریب  $K_p$  در نظر گرفته شد. به این ترتیب با استفاده از مدل های تجربی تولید شده و داشتن مقادیر واقعی تبخیر-تعرق و ضریب  $K_s$  امکان برآورد مقادیر تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک فراهم شد.

$$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c)) \quad (5)$$

$$T = K_{pi} \cdot A_0 \cdot e^{A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c)} \quad (6)$$

$$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot \ln(K_s \cdot ET_c)) \quad (7)$$

$$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c) + A_2 \cdot (K_s \cdot ET_c)^2) \quad (8)$$

$$T = K_{pi} \cdot A_0 \cdot (K_s \cdot ET_c)^{A1} \quad (9)$$

$$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c)) \quad (10)$$

$$E = K_{pi} \cdot A_0 \cdot e^{A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c)} \quad (11)$$

$$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot \ln(K_s \cdot ET_c)) \quad (12)$$

$$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s \cdot ET_c) + A_2 \cdot (K_s \cdot ET_c)^2) \quad (13)$$

$$E = K_{pi} \cdot A_0 \cdot (K_s \cdot ET_c)^{A1} \quad (14)$$

### ارزیابی مدل ها

در این مرحله با استفاده از مدل های تجربی تولید شده در پژوهش و مقادیر واقعی متغیرهای مستقل، اقدام به شبیه سازی مقادیر تعرق و تبخیر در طول دوره رشد گیاه ذرت شد. سپس داده های مشاهده ای (واقعی) در مقیاس مینی لایسیمتر و پیش بینی شده توسط مدل ها، با یکدیگر مقایسه شد و اعتبار مدل های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره های ارزیابی شامل حداکثر خطا<sup>۱۳</sup> (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱۴</sup> (RMSE)، ضریب تبیین<sup>۱۵</sup> ( $R^2$ )، کارایی مدل سازی<sup>۱۶</sup> (EF) و ضریب باقیمانده (CRM)<sup>۱۷</sup> استفاده شد. معادلات مربوط به آماره های مذکور در روابط

17- Coefficient of residual mass, CRM

18- Observed, O

19- Predicted, P

13- Maximum error, ME

14- Root of mean squared error RMSE,

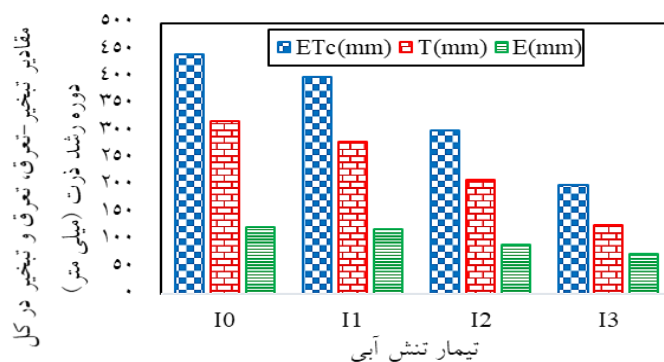
15- Coefficient of determination,  $R^2$

16- Efficiency of modeling, EF

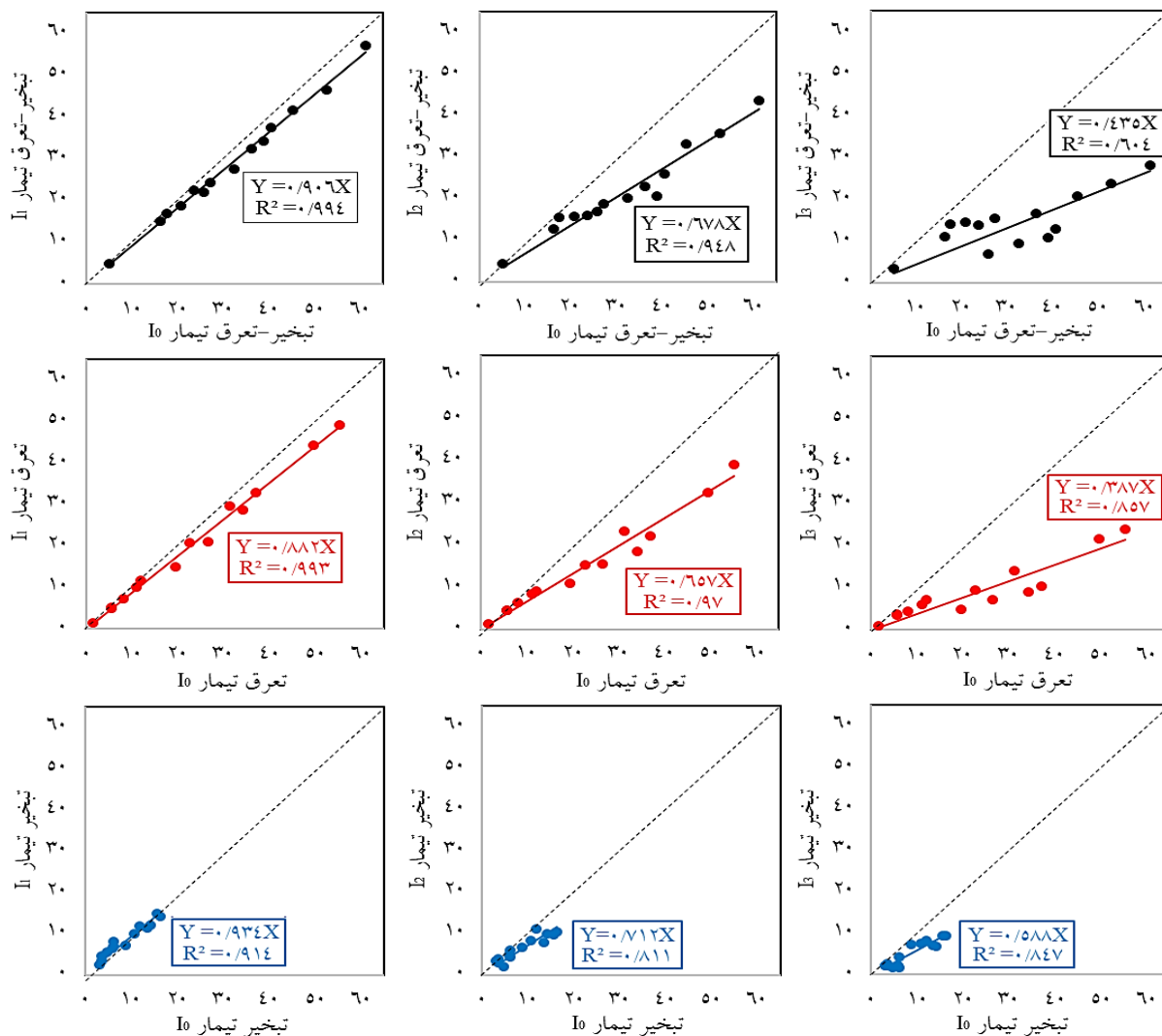


پژوهش حاضر) با شیب بیشتری کاهش یافته است. در این باره در نشریه فائو-۵۶ نیز گزارش شد که در شرایط تحت تنش آبی باید یک ضریب  $K_s$  (کوچکتر از یک) برای ضریب گیاهی پایه  $K_{cb}$  در نظر گرفت، زیرا تعرق گیاه با شدت بیشتری نسبت به تبخیر- تعرق کاهش می یابد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

به ترتیب با ضرایب ۰/۹، ۰/۶۷ و ۰/۴۳، مقدار تعرق به ترتیب با ضرایب ۰/۸۸، ۰/۶۵ و ۰/۳۸ و مقدار تبخیر به ترتیب با ضرایب ۰/۹۳، ۰/۷۱ و ۰/۵۸، نسبت به تیمار  $I_0$  کاهش یافت (شکل ۳). علت نتایج به دست آمده این بود که وقتی رطوبت خاک به کم تر از حد سهل الوصول می رسد، پتانسیل آب خاک برای جذب توسط گیاه کاهش می یابد. در این میان، مقدار تعرق نسبت به پارامتر تبخیر- تعرق (در



شکل ۲- مقادیر تجمعی تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر از سطح خاک در کل دوره رشد گیاه ذرت



شکل ۳- واکنش مقادیر واقعی تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر در تیمارهای تنش آبی، نسبت به تیمار تحت کنترل (I<sub>0</sub>)

(I<sub>0</sub>) ۱۰۰، (I<sub>1</sub>) ۸۰، (I<sub>2</sub>) ۶۰ و (I<sub>3</sub>) ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت (در کل دوره رشد) در سطوح آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۹۵/۶، ۸۵ و ۷۱/۶ درصد برآورد شد (سعیدی، c ۱۴۰۰). در پژوهشی در منطقه باجگاه شیراز، اثر سه رژیم آبیاری شامل (I<sub>1</sub>) ۱۰۰، (I<sub>2</sub>) ۷۵ و (I<sub>3</sub>) ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت آزمایش شد. نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آبیاری از سطح I<sub>1</sub> به I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب ۱۹ و ۴۲ درصد از مقدار تبخیر-تعرق ذرت کاهش یافت. همچنین از مقدار تعرق ذرت به ترتیب ۲۵ و ۴۳ درصد کاسته شد (عزیزیان و سپاسخواه، ۲۰۱۴).

اما در مورد تبخیر از سطح خاک، بیشترین مقدار تبخیر در تیمار I<sub>0</sub> انجام شد؛ زیرا دور آبیاری در تیمار I<sub>0</sub>

به منظور مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها، در پژوهشی مشابه گزارش شد که تنش آبی از طریق کاهش پتانسیل آب سلول‌های گیاهی، باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای، انسداد روزنه برگ‌ها و در نهایت کاهش تبخیر-تعرق گیاه می‌شود (هانز و هاپکینز، ۲۰۰۸). در تحقیقی بر روی ذرت گزارش شد که در شرایط کمبود رطوبت خاک (تنش آبی)، هورمون آبسزیک اسید (ABA) به عنوان مکانیسم پیغام هورمونی وارد اندام‌های هوایی شده و به صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل نموده و باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. در این شرایط گیاه با توقف تعرق خود، اقدام به حفظ رطوبت کرده و از اتلاف آب جلوگیری می‌کند (ماهرخ و همکاران، ۱۳۹۸). در منطقه قزوین، تبخیر-تعرق گیاه ذرت تحت سطوح آبیاری شامل

کوتاه‌تر از بقیه تیمارها بود و به دلیل مرطوب‌تر بودن سطح خاک نسبت به سایر تیمارها (در کل دوره رشد)، مقدار تبخیر در تیمار I<sub>0</sub> بیشتر بود. به همین ترتیب با افزایش فاصله زمانی بین دو آبیاری در تیمارهای I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> از مقدار تبخیر از سطح خاک در سایر تیمارها کاسته شد. در پژوهشی مشابه بر روی ذرت در منطقه قزوین گزارش شد که در دوره‌های آبیاری کوتاه، آب آبیاری معمولاً صرف خیس کردن سطح خاک شده و فاصله بین دو آبیاری هم‌پوشانی بیشتری با زمان انجام تبخیر پیدا می‌کند. در نتیجه سهم تبخیر از سطح خاک در دوره‌های آبیاری کوتاه بیشتر از دوره‌های آبیاری بلند بوده و نیازمند مدیریتی مطلوب در جهت کاهش تلفات تبخیر آب است (سعیدی، ۱۴۰۰ b). در پژوهشی دیگر بر روی ذرت در ایالت آیوا اعلام شد که مقدار آب موجود در سطح خاک به‌عنوان یک عامل محدودکننده برای تبخیر محسوب شده، ولی تأثیری در مقدار تعرق گیاه ندارد. به‌طوری که هنگام خشک شدن سطح خاک در روزهای پس از آبیاری و غیربارانی، سهم تبخیر از سطح خاک روند کاهشی می‌یابد (شیائو و همکاران، ۲۰۱۶).

از سوی دیگر، تنش آبی در مراحل مختلف رشد ذرت، اثر یکنواخت و ثابت بر پارامتر تبخیر- تعرق و اجزای آن نداشت. به‌طوری که بیشترین تا کم‌ترین مقدار کاهش تعرق و تبخیر- تعرق گیاه در اثر تنش آبی، متعلق به مراحل رشد میانی، توسعه، اولیه و پایانی بود. آغاز گل‌دهی گیاه، گرده‌افشانی و تشکیل بلال در مرحله میانی رشد، دلیل بالا بودن حساسیت گیاه به تنش آبی در این مرحله رشد بود (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶؛ فار و فیسی، ۲۰۰۹؛ همتی و همکاران، ۱۳۹۳). در مرحله توسعه نیز به علت رشد سریع اندام‌های گیاه و نیاز به تعرق زیاد، گیاه به اعمال تنش آبی حساس بود؛ اما در مرحله اولیه رشد به دلیل آغاز رشد و نمو گیاه و در مرحله پایانی به سبب رسیدگی فیزیولوژیک، شروع پلاسیدگی گیاه و به‌طور کلی کم بودن مقدار تبخیر- تعرق و تعرق گیاه، واکنش دو پارامتر مذکور به تنش آبی چندان محسوس نبود. به‌طور مشابه در پژوهشی

در منطقه قزوین گزارش شد که اگر یک حد ثابت تنش آبی به‌طور جداگانه در مراحل مختلف رشد ذرت اعمال شود، اثر متفاوتی بر میزان کاهش تبخیر- تعرق گیاه مشاهده می‌شود. از این‌رو اولویت حساسیت مراحل رشد ذرت به تنش آبی به‌ترتیب مربوط به مراحل گل‌دهی، ۱۲ برگی، خمیری شدن دانه‌ها و چهار برگی گزارش شد. به‌طوری که در مرحله رشد چهار برگی، کم‌ترین میزان حساسیت تعرق گیاه ذرت به تنش آبی وجود داشت (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). نتایج پژوهش مذکور از نظر حساسیت کم تعرق ذرت به تنش آبی در مرحله اولیه رشد، با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. از سوی دیگر در چین گزارش شد که مقدار تبخیر از سطح خاک در اوایل دوره رشد ذرت، زیاد و مقدار تعرق در این مرحله رشد، کم بود. توصیه شد که با اتخاذ تدابیر مناسب (مانند مالچ کردن سطح خاک در این مرحله رشد)، می‌توان موجب کاهش هدر رفت آب از طریق تبخیر شد. در همین پژوهش بیان شد که از مقدار تعرق ذرت در دوره‌های پایانی رشد کاسته شد. دلیل آن مربوط به بلوغ گیاه، زرد شدن و ریزش برگ‌های گیاه در دوره پایانی رشد بود که موجب کاهش تعرق شد (ژو و همکاران، ۲۰۱۷). پژوهش ژو و همکاران (۲۰۱۷) نیز مؤید کم بودن میزان تعرق گیاه ذرت در مراحل اولیه و پایانی رشد بود و از این‌رو با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. در پژوهش دیگر برای بررسی مقدار اجزای تبخیر- تعرق ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در منطقه کرج گزارش شد که مقدار تعرق گیاه در دوره‌های اولیه، توسعه و میانی رشد به‌ترتیب برابر با ۱۲/۷۸، ۸۱/۳۱ و ۱۱۸/۹۵ میلی‌متر (در سیستم آبیاری زیرسطحی) و ۵/۸۸، ۷۶/۸۲ و ۱۱۸/۲۱ میلی‌متر (در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی) برآورد شد (دهقانی سانج و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهش اخیر، بیشتر بودن مقدار تعرق گیاه به‌ترتیب مربوط به مراحل میانی، توسعه و اولیه رشد بود. از این‌رو حساسیت مراحل رشد ذرت در پژوهش دهقانی سانج و همکاران (۱۳۹۶) با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشته است. نتایج کلی این بخش از پژوهش نشان داد که

رشد مقدار ۵۳ درصد و در دوره ی گل دهی تا بلوغ گیاه (دوره میانی رشد) مقدار ۶۳/۳ درصد بود و در دوره ی پایانی رشد از مقدار آن کاسته شد. علاوه بر آن اعلام شد که نسبت سهم تعرق به تبخیر- تعرق ذرت، در شرایط کشت دیم (تنش آبی) کم تر بود (ژو و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج پژوهش مذکور نشان داد که سهم تعرق گیاه در مرحله میانی رشد بیشتر بود و کمبود آب خاک به عنوان یک تنش محیطی، باعث کاهش سهم جزء تعرق گیاه شد. در پژوهش های دیگر مقدار عملکرد محصول ذرت (متغیر وابسته) بر اساس مقدار تبخیر- تعرق گیاه (متغیر مستقل) مدل سازی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، به دلیل حساسیت بیشتر گیاه به تنش آبی در مرحله گل دهی، ضریب حساسیت گیاه در مرحله رشد مذکور بیشتر از بقیه مراحل گزارش شد (کیپکوریر و ریس، ۲۰۰۲؛ شی و همکاران، ۲۰۲۰). برای ارزیابی عملکرد مدل های تجربی، مقادیر مدل سازی شده تعرق نسبت به مقادیر واقعی آن، در شکل (۴) بررسی شد. بر اساس شکل (۴) مدل هایی که بیشترین همبستگی را حول خط ۱:۱ داشته اند، مدل بهینه برای برآورد مقدار تعرق بوده اند. برای این منظور، از طریق مقادیر پارامترهای آماری در جدول (۴)، مدل بهینه شناسایی شد. نتایج نشان داد که در بین مدل های مختلف، مدل خطی دارای بهترین کارایی مدل سازی (EF) و همبستگی بین متغیرها ( $R^2$ ) و کم ترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بود. البته مدل خطی به دلیل سادگی معادله آن نسبت به سایر مدل ها، با استقبال بیشتری نیز می تواند روبه رو باشد. از این رو مدل خطی با معادله  $T = K_p \cdot ET_c$  (۱.۵۷ + ۰.۹۲۸  $K_s$ ) در اولویت انتخاب قرار گرفت. در مورد سایر مدل ها، به ترتیب فرم های توانی، درجه دوم، لگاریتمی و نمایی در اولویت های بعدی قرار گرفتند. آماره های CRM و ME نشان دادند که همه مدل ها، کم برآورد بودند و کم ترین خطا در شبیه سازی مقدار تعرق به ترتیب مربوط به مدل های درجه دوم، خطی، توانی، لگاریتمی و نمایی بوده است. در پژوهش های گذشته نیز، تحقیقات مشابهی با استفاده از مدل های رگرسیونی انجام

در مدیریت کم آبیاری ذرت، افزایش دادن حد تخلیه مجاز رطوبتی خاک (از طریق افزایش فاصله زمانی بین دو آبیاری) اگرچه باعث کاهش تعرق گیاه (در اثر تنش آبی) می شود، اما مقدار جزء تبخیر را نیز کاهش می دهد؛ زیرا در اثر طولانی شدن دور آبیاری، کم تر سطح خاک مرطوب شده و از این رو مقدار تبخیر از سطح خاک در دوره رشد گیاه کاهش می یابد؛ اما در مدیریت های کم آبیاری که دور آبیاری بر اساس شرایط استاندارد (بدون تنش) تعریف شده و فقط حجم آب آبیاری کم تر از آبیاری کامل است، سهم بیشتری از آب کاربردی صرف جزء تبخیر (تلفات آب آبیاری) می شود. در نتیجه در مدیریت کم آبیاری ذرت، آبیاری کامل گیاه با دوره های آبیاری بلند می تواند سودمندتر از کم آبیاری گیاه با دوره های آبیاری کوتاه باشد.

#### مدل سازی تعرق و ارزیابی مدل ها

ضرایب توابع مربوط به مدل سازی مقدار تعرق گیاه (روابط ۵ الی ۹) توسط نرم افزار SPSS برآورد شد و در جدول (۳) ارائه شد. مقادیر ضرایب  $A_0$ ،  $A_1$ ،  $A_2$  در کل دوره رشد ذرت به صورت ثابت بود و ضریب  $K_p$  برای هر مرحله از رشد، مقدار خاص خود را داشت. به طوری که در اغلب مدل ها، ضریب  $K_p$  در مراحل توسعه و میانی رشد (مراحل ۲ و ۳) دارای بیشترین مقدار و در مراحل اولیه و پایانی رشد (مراحل ۱ و ۴) دارای کم ترین مقدار بود. علت آن می تواند به مقدار سهمی که تعرق گیاه در پارامتر تبخیر- تعرق و در مراحل مختلف رشد داشته است، مربوط باشد. از این رو می توان نتیجه گرفت که در این قبیل مدل سازی ها باید حساسیت مراحل رشد گیاه نیز در نظر گرفته شود و نمی توان شرایط یکسانی را برای کل دوره رشد لحاظ نمود. از سوی دیگر، آماره F در جدول (۳) نشان داد مدل هایی که بین متغیرهای وابسته و مستقل برازش داده شده اند، در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده اند. در پژوهشی مشابه در فلات چین، پارامتر تبخیر- تعرق ذرت به دو جزء تبخیر از خاک و تعرق گیاه تفکیک شد. نتایج نشان داد که نسبت تعرق به تبخیر- تعرق (T/ET) ذرت در کل دوره ی

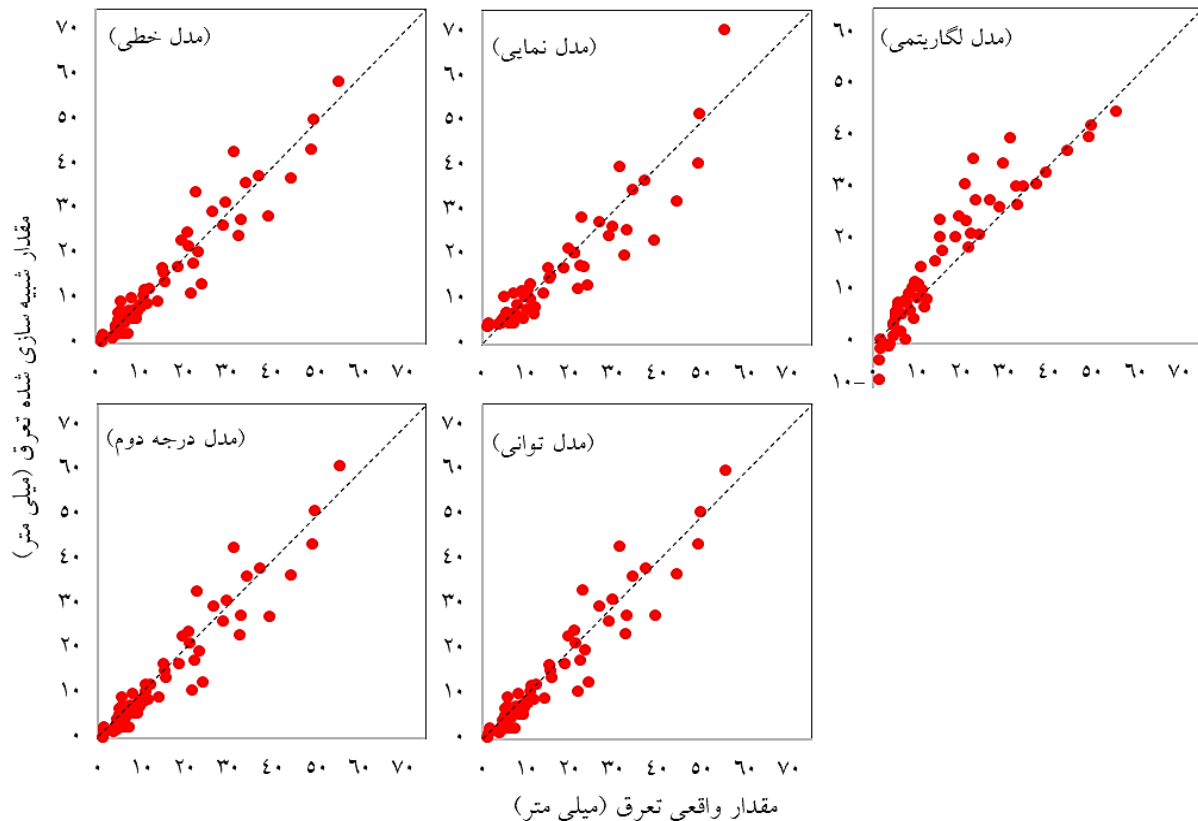
بین نرخ تعرق گیاه (Y) و نرخ جریان شیره گیاهی (X) برازش داده شد (ژو و همکاران، ۲۰۱۷). پژوهش‌های مذکور نشان دادند که قابلیت برازش رابطه خطی بین مقدار تعرق گیاه و سایر متغیرهای مرتبط به آن وجود دارد و از رابطه خطی می‌توان به‌عنوان مدل شبیه‌سازی مقدار تعرق استفاده نمود. از این‌رو بر اساس دستاورد پژوهش حاضر می‌توان در شرایط اعمال مدیریت کم‌آبیاری بر ذرت، با استفاده از پارامتر تبخیر- تعرق در شرایط استاندارد ( $ET_c$ ) و ضرایب  $K_p$  و  $K_s$ ، مقدار تعرق گیاه را در دوره رشد آن برآورد کرد. از طریق برآورد مقدار تعرق گیاه، نیاز آبی واقعی گیاه برآورد شده و می‌توان در شرایط کاربرد مالچ در سطح خاک، آن را به‌عنوان نیاز آبیاری گیاه لحاظ نمود. به این ترتیب از مصرف بیش از اندازه آب جلوگیری به‌عمل آمده و در افزایش راندمان مصرف آب توسط گیاه، مؤثر خواهد بود.

شده است. در کشور چین و در شرایط آبیاری قطره‌ای تحت سطوح آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰ و ۸۰ درصد تبخیر- تعرق گیاه، مقدار تعرق ذرت مطالعه شد. در این پژوهش مقدار تعرق ذرت نسبت به شرایط وجود و عدم وجود خاک‌پوش (مالچ) مدل‌سازی شد. در شرایط کاربرد خاک‌پوش رابطه خطی با معادله  $T_p=0.93T_M+15.53$  و در شرایط بدون خاک‌پوش رابطه  $T_p=1.05T_M+18.1$  بین مقدار تعرق پیش‌بینی شده ( $T_p$ ) و اندازه‌گیری شده ( $T_M$ ) برازش داده شد (لی و ما، ۲۰۱۹). در پژوهشی در شمال‌شرقی گریلی واقع در آمریکا، تأثیر شش رژیم آبیاری شامل ۱۰۰٪، ۸۵٪، ۷۵٪، ۷۰٪، ۵۵٪ و ۴۰٪ نیاز آبی گیاه بر ذرت علوفه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد بین مقدار تعرق نرمال شده ( $T/ET_0$ ) و عملکرد زیست‌توده گیاهی (Y) رابطه‌ای خطی به‌صورت  $Y=27.64 \times (T/ET_0) - 0.312$  قابل برازش بود (تروت و دیجانگ، ۲۰۱۷). در پژوهش دیگر بر روی ذرت در کشور چین، رابطه خطی با معادله  $Y=0.764X+4.944$

جدول ۳- ضرایب فرم‌های مختلف مدل‌های تجربی برای برآورد مقدار تعرق گیاه

ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	لگاریتمی	درجه دوم	توانی
A <sub>0</sub>	-۱/۵۷	۷/۴۰۱	-۲۰/۶۳۱	-۰/۳۶۸	۰/۵۸۷
A <sub>1</sub>	۰/۹۲۸	۰/۰۳۶	۱۳/۷۶۲	۰/۷۹۳	۱/۱۱۳
A <sub>2</sub>	-	-	-	۰/۰۰۳	-
K <sub>P1</sub>	۰/۵۱	۰/۵۲۹	۰/۴۲۳	۰/۵۱۷	۰/۵۲۴
K <sub>P2</sub>	۱/۰۶۵	۱/۰۵۸	۱/۲۵۲	۱/۰۳۱	۱/۰۵۴
K <sub>P3</sub>	۱/۰۵	۱/۱۷۱	۱/۰۲۵	۱/۰۴۸	۱/۰۶۲
K <sub>P4</sub>	۰/۷۰۵	۰/۵۵	۰/۴۰۹	۰/۷۱	۰/۷۲۴
F	۳۹۰/۷**	۲۶۳**	۱۶۸/۶**	۲۵۸/۷**	۳۹۶/۴***

\*\* نشان‌دهنده معنی‌داری کلی تابع در برآورد پارامتر مدنظر، در سطح احتمال یک درصد است



شکل ۴- صحت سنجی مدل های تجربی پیش بینی کننده مقدار تعرق گیاه

جدول ۴- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل های تجربی در برآورد مقدار تعرق

نام مدل	ME	RMSE	R <sup>2</sup>	EF	CRM
خطی	۱۱/۹ <sup>(۲)</sup>	۴/۲۷۱ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۱ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۰۱ <sup>(۱)</sup>	۰/۰۵۲ <sup>(۳)</sup> *
نمایی	۱۵/۶۹ <sup>(۵)</sup>	۵/۱۶۱ <sup>(۵)</sup>	۰/۸۵۹ <sup>(۵)</sup>	۰/۸۵۵ <sup>(۵)</sup>	۰/۰۳۱ <sup>(۲)</sup>
لگاریتمی	۱۳/۳۶ <sup>(۴)</sup>	۴/۷۷ <sup>(۴)</sup>	۰/۸۸ <sup>(۴)</sup>	۰/۸۷۶ <sup>(۴)</sup>	۰/۰۳ <sup>(۱)</sup>
درجه دوم	۱۱/۸ <sup>(۱)</sup>	۴/۴۰۳ <sup>(۳)</sup>	۰/۹۰۵ <sup>(۳)</sup>	۰/۸۹۵ <sup>(۳)</sup>	۰/۰۵۳۳ <sup>(۴)</sup>
توانی	۱۱/۹۲ <sup>(۳)</sup>	۴/۳۷۵ <sup>(۲)</sup>	۰/۹۰۶ <sup>(۲)</sup>	۰/۸۹۶ <sup>(۲)</sup>	۰/۰۵۳۴ <sup>(۵)</sup>

\*: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص های آماری است

#### مدل سازی تبخیر و ارزیابی مدل ها

برای مدل سازی مقدار تبخیر از سطح خاک از روابط (۱۰) الی (۱۴) در پژوهش حاضر استفاده شد. در فرآیند مدل سازی مقدار تبخیر، مقدار آماره F در جدول (۵) نشان داد که مدل های کاربردی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده اند. ضرایب روابط مذکور توسط نرم افزار SPSS برآورد شد و در جدول (۵) ارائه شد. در این بخش از پژوهش نیز مقادیر ضرایب A<sub>0</sub>، A<sub>1</sub>، A<sub>2</sub> در کل دوره رشد ذرت به صورت ثابت بود و ضریب K<sub>p</sub> برای هر مرحله از رشد، مقدار خاص خود را داشت. مقدار ضریب K<sub>p</sub> نشان

داد که حساسیت جزء تبخیر در مراحل رشد ذرت با حساسیت جزء تعرق تفاوت داشت. به طوری که در اغلب مدل ها، بیشترین تا کمترین مقدار ضریب K<sub>p</sub> مربوط به مراحل رشد اولیه، توسعه، پایانی و میانی رشد بود. علت آن به این صورت می تواند تفسیر شود که از مرحله جوانه زنی بذر تا بخشی از مرحله توسعه گیاه، سطح خاک هنوز از طریق اندام های گیاهی به طور کامل پوشیده نشده است. از این رو در دوره رشد مذکور، بیشترین مقدار تبخیر از سطح خاک وجود داشته است. به طوری که در پژوهشی بر روی ذرت در غرب اروگوئه، گزارش شد در زمانی که

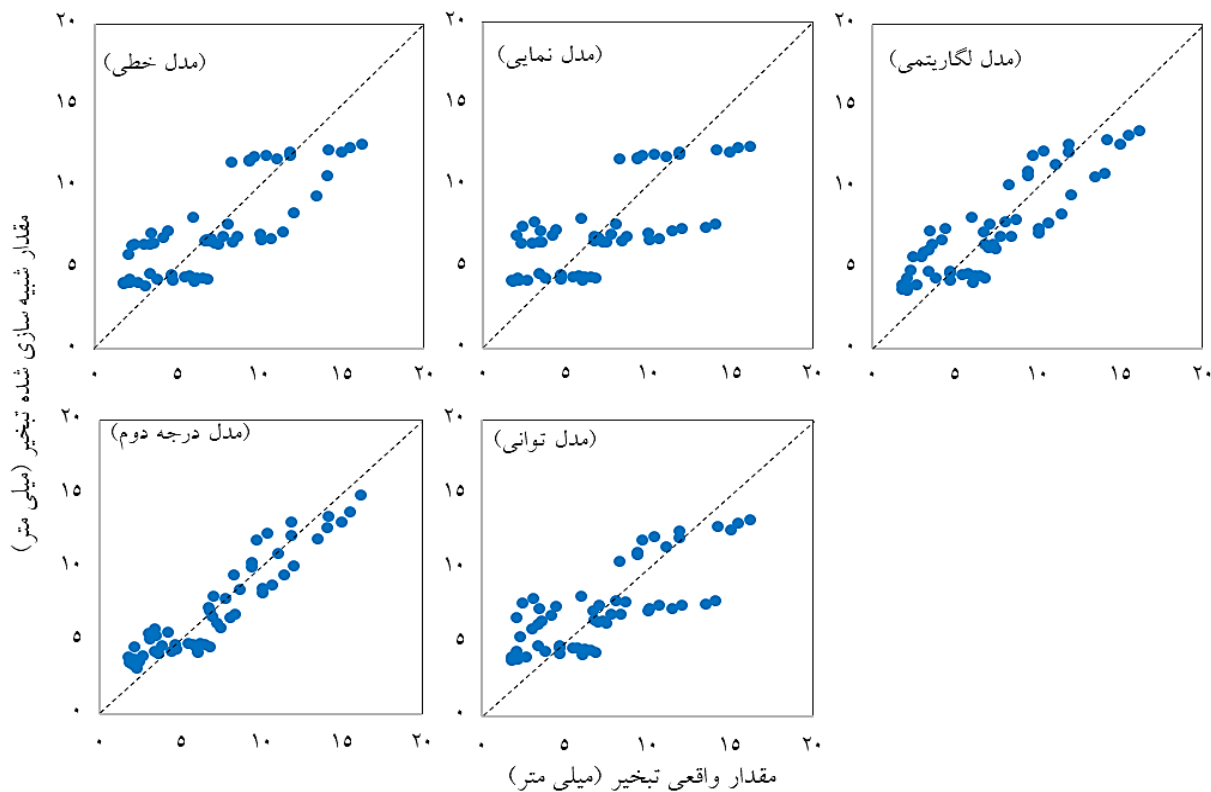
سطح خاک بدون پوشش گیاهی بود و گیاه تحت تأثیر تنش آبی بود، نسبت تبخیر به تبخیر- تعرق ذرت ( $E/ET$ ) حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش داشت (گیمنز و همکاران، ۲۰۱۶). در مرحله میانی نیز به دلیل پوشش کامل سطح خاک توسط گیاه، کمترین مقدار تبخیر از سطح خاک اتفاق افتاده است؛ اما این که چرا در مرحله پایانی رشد دوباره مقدار تبخیر افزایش یافته است، ممکن است به این علت باشد که در مرحله پایانی رشد، مقدار تعرق گیاه به سمت توقف کامل (به دلیل پلاسیدگی و خشکیدگی گیاه) پیش می‌رود؛ بنابراین آنچه به عنوان پارامتر تبخیر- تعرق در مرحله پایانی رشد وجود دارد، به نظر می‌رسد که غالباً متعلق به جزء تبخیر از سطح خاک باشد. در نتیجه حساسیت مرحله رشد گیاه، باید برای برآورد مقدار تبخیر از سطح خاک نیز در نظر گرفته شود. همچنین اولویت دادن به پوشاندن سطح خاک در مراحل مختلف رشد، مسئله‌ای است که می‌تواند بر سهم اجزای مطلوب و نامطلوب تبخیر- تعرق گیاه اثرگذار باشد. در این باره گزارش شد که با مدیریت مناسب آبیاری در کشت ذرت (کاربرد مالچ)، می‌توان از مقدار تبخیر از سطح خاک کاسته و به مقدار تعرق گیاه افزود. در این صورت مقدار بهره‌وری مصرف آب افزایش می‌یابد (میرزایی الموتی و رمضان‌ی اعتدالی، ۱۳۹۶). در فرآیند شبیه‌سازی مقدار تبخیر، شکل (۵) نشان داد که در مدل درجه دوم بهترین همبستگی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده تبخیر ایجاد شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها، پارامترهای آماری در جدول (۶) بررسی شد. از نظر آماره‌های ارزیابی، به ترتیب مدل‌های درجه دوم، لگاریتمی، خطی، توانی و نمایی برای برآورد مقدار جزء تبخیر، اولویت‌بندی شدند. به این ترتیب مدل درجه دوم با معادله  $E = K_{pi} \cdot (4.525 + 0.273 (K_s \cdot ET_c) - 0.005 (K_s$

( $ET_c$ )<sup>2</sup>، به عنوان بهترین مدل تجربی برای برآورد مقدار تبخیر از سطح خاک در شرایط اعمال تنش آبی معرفی شد. در مورد سایر مدل‌ها، کم‌تر بودن مقدار آماره  $R^2$  از عدد ۰/۶ در مدل‌های نمایی و توانی نشان داد که در این مدل‌ها، متغیرهای مستقل نتوانسته‌اند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. از این‌رو مدل‌های نمایی و توانی برای مدل‌سازی مقدار تبخیر در شرایط پژوهش حاضر قابل توصیه نبود. مقدار آماره CRM نشان داد که مدل درجه دوم یک مدل کم‌برآورد و سایر مدل‌ها، مدل‌هایی بیش‌برآورد نسبت به شرایط واقعی بوده‌اند. به‌طور مشابه در پژوهشی در آمریکا، رژیم‌های آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که رابطه درجه دوم با معادله  $Y = -2.06E-2 + 5.98E-2$  بین مقدار عملکرد نسبی محصول ( $Y$ ) و تبخیر نسبی از سطح خاک ( $E$ ) قابل برازش بود (تروت و دیجانگ، ۲۰۱۷). در سایر پژوهش‌ها و در شرایط توأمان اعمال تنش‌های شوری و خشکی، تابع درجه دوم به عنوان مدل بهینه برای برآورد مقدار عملکرد گوجه‌فرنگی در منطقه کرج معرفی شد (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹). از این‌رو نتایج پژوهش‌های گذشته نیز تأیید کردند که مدل رگرسیونی درجه دوم به عنوان یک مدل تجربی، کارایی لازم برای برآورد پارامترهای گیاهی را دارد. نتیجه کلی این که از طریق برآورد مقدار واقعی جزء تبخیر در شرایط تنش آبی (کم‌آبیاری)، می‌توان معیار دقیق‌تری از میزان تلفات آب آبیاری به دست آورد. از این‌رو با توجه به حجم تلفات آب، شاید بتوان تصمیمات قاطعانه‌تری برای مدیریت صحیح مصرف آب و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آن اتخاذ نمود.

جدول ۵- ضرایب فرم های مختلف مدل های تجربی برای برآورد مقدار تبخیر از سطح خاک

ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	لگاریتمی	درجه دوم	توانی
A <sub>0</sub>	۶/۶۹۱	۶/۷۹۸	۴/۳۸۵	۴/۵۲۵	۵/۰۸۲
A <sub>1</sub>	-۰/۰۲۹	-۰/۰۰۳	۱/۰۶۲	-۰/۲۷۳	-۰/۱۳
A <sub>2</sub>	-	-	-	-۰/۰۰۵	-
K <sub>P1</sub>	۱/۶۸۶	۱/۶۸۶	۱/۷۰۴	۱/۶۸	۱/۷۰۱
K <sub>P2</sub>	-۰/۹۶۲	-۰/۹۷۸	-۰/۹۲۸	۱/۰۰۹	-۰/۹۳۶
K <sub>P3</sub>	-۰/۵۹۱	-۰/۵۹۶	-۰/۵۸	-۰/۵۸	-۰/۵۸۳
K <sub>P4</sub>	-۰/۹۵۲	-۰/۹۴۶	۱/۰۵۵	۱/۰۶	۱/۰۲۹
آماره F	۹۴/۳**	۹۴/۱**	۹۹**	۶۷/۸**	۹۸/۳**

\*\* نشان دهنده معنی داری کلی تابع در برآورد پارامتر مدنظر، در سطح احتمال یک درصد است



شکل ۵- صحت سنجی مدل های تجربی پیش بینی کننده مقدار تبخیر از سطح خاک

جدول ۶- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل های تجربی در برآورد مقدار تبخیر

نام مدل	CRM	EF	R <sup>2</sup>	RMSE	ME
خطی	-۰/۰۰۳۶ <sup>(۳)</sup> *	-۰/۶۲۷ <sup>(۳)</sup>	-۰/۶۳۲ <sup>(۳)</sup>	۲/۳۹ <sup>(۳)</sup>	۴/۲۶ <sup>(۳)</sup>
نمایی	-۰/۰۰۳۵ <sup>(۳)</sup>	-۰/۵۰۲ <sup>(۵)</sup>	-۰/۵۰۲ <sup>(۵)</sup>	۲/۷۶ <sup>(۵)</sup>	۶/۴۸ <sup>(۵)</sup>
لگاریتمی	-۰/۰۱۵۶ <sup>(۵)</sup>	-۰/۷۳۵ <sup>(۳)</sup>	-۰/۷۴۹ <sup>(۲)</sup>	۲/۰۱ <sup>(۲)</sup>	۳/۸۱ <sup>(۲)</sup>
درجه دوم	-۰/۰۰۲۷ <sup>(۱)</sup>	-۰/۸۶۶ <sup>(۱)</sup>	-۰/۸۷۴ <sup>(۱)</sup>	۱/۴۳ <sup>(۱)</sup>	۲/۵ <sup>(۱)</sup>
توانی	-۰/۰۰۱ <sup>(۴)</sup>	-۰/۵۷۱ <sup>(۴)</sup>	-۰/۵۷۴ <sup>(۴)</sup>	۲/۵۶ <sup>(۴)</sup>	۶/۲۹ <sup>(۴)</sup>

\*: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص های آماری است



## نتیجه گیری

آبیاری کوتاه باشد. در فرآیند مدل‌سازی مقادیر تبخیر و تعرق، ضریب  $K_p$  به خوبی حساسیت مرحله رشد گیاه را نشان داد. به طوری که بیشترین حساسیت پارامترهای تعرق و تبخیر به ترتیب مربوط به مراحل میانی و اولیه رشد بود. در بین مدل‌های مختلف، مدل خطی به عنوان مدل بهینه برای برآورد مقدار تعرق گیاه انتخاب شد. البته سادگی مدل خطی نسبت به سایر مدل‌ها نیز می‌تواند باعث استقبال بیشتر کاربران از آن باشد. در مورد شبیه‌سازی مقدار تبخیر، مدل درجه دوم دارای اولویت اول بود. نتیجه کلی این‌که از طریق مقدار تبخیر-تعرق در شرایط استاندارد ( $ET_c$ )، ضرایب  $K_s$  و  $K_p$  امکان برآورد مقادیر تعرق گیاه و تبخیر در دوره رشد ذرت و برای شرایط تنش آبی وجود داشت. از این‌رو در شرایط مدیریت کم‌آبیاری می‌توان با کاربرد مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، مقادیر جداگانه اجزاء تبخیر-تعرق گیاه را برآورد کرد و به دنبال آن تصمیمات راهبردی برای مدیریت نیاز آبی گیاه و کاهش تلفات آبیاری اتخاذ نمود.

در پژوهش حاضر، مقادیر تبخیر-تعرق ذرت، تعرق و تبخیر از سطح خاک در شرایط مدیریت کم‌آبیاری بررسی شد. نتایج نشان داد که اعمال تنش آبی بر گیاه از طریق کاهش آب خاک (نسبت به حد آب سهل‌الوصول)، باعث کاهش تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر نسبت به شرایط استاندارد منطقه شد. به طوری که در کل دوره رشد ذرت و در تیمارهای  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  مقدار تبخیر-تعرق به ترتیب با ضرایب  $0/9$ ،  $0/67$  و  $0/43$ ، مقدار تعرق به ترتیب با ضرایب  $0/88$ ،  $0/65$  و  $0/38$  و مقدار تبخیر به ترتیب با ضرایب  $0/93$ ،  $0/71$  و  $0/58$ ، نسبت به تیمار  $I_0$  کاهش یافت. علت این بود که در شرایط مذکور، پتانسیل آب خاک برای جذب توسط گیاه کاهش یافت و با افزایش فاصله زمانی بین دو آبیاری (افزایش حد تخلیه مدیریتی آب خاک)، سطح خاک کم‌تر مرطوب شده و تبخیر از آن کاهش یافت. از این‌رو در مدیریت کم‌آبیاری ذرت، آبیاری کامل گیاه با دوره‌های آبیاری بلند می‌تواند سودمندتر از کم‌آبیاری گیاه با دوره‌های

## فهرست منابع

- دهقانی سانچ، ح. کنعانی، ا. و س. اخوان. ۱۳۹۶. ارزیابی تبخیر-تعرق ذرت و اجزای آن و ارتباط آن‌ها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. مجله آب و خاک. ۳۱(۶): ۱۵۴۹-۱۵۶۰.
- سعیدی، ر. a. ۱۴۰۰. اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۲): ۱۰۷-۱۲۲.
- سعیدی، ر. b. ۱۴۰۰. جداسازی تبخیر و تعرق در کشت ذرت و بررسی پاسخ آن‌ها به سطوح مختلف آبیاری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۵): ۱۲۶۳-۱۲۷۳.
- سعیدی، ر. c. ۱۴۰۰. بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری. مجله آب و خاک. ۳۵(۳): ۳۳۵-۳۴۸.
- سعیدی، ر. و ع. ستوده‌نیا. ۱۴۰۰. واکنش عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، تحت تأثیر تنش آبی در مراحل مختلف رشد (در دشت قزوین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۳): ۶۱۱-۶۲۰.
- سعیدی، ر. رمضان‌الاعتدالی، ه. ستوده‌نیا، ع. نظری، ب. و ع. کاورانی. ۱۳۹۹. مدیریت مصرف آب شور و کود نیتروژن در کشت ذرت. مجله آب و خاک. ۳۴(۴): ۸۶۱-۸۷۷.
- سعیدی، ر. ستوده‌نیا، ع. رمضان‌الاعتدالی، ه. کاویانی، ع. و ب. نظری. ۱۳۹۷. مطالعه تأثیر تنش‌های شوری آب و حاصلخیزی خاک، بر تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۴): ۹۴۵-۹۵۴.

۸. ماهرخ، ع. نبی پور، م. روشنفکر، ح. و ر. چوکان. ۱۳۹۸. واکنش برخی صفات فیزیولوژیکی ذرت دانه ای به تنش خشکی و کاربرد هورمون های سیتوکینین و اکسین. مجله تنش های محیطی در علوم زراعی. ۱۲(۱): ۱-۱۵.
۹. محمدی، م. لیاقت، ع. و ح. مولوی. ۱۳۸۹. بهینه سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت گوجه فرنگی در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در منطقه کرج. مجله آب و خاک. ۲۴(۳): ۵۸۳-۵۹۲.
۱۰. محمدی بهمدی، م. و م. آرمین. ۱۳۹۶. اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف ذرت در شرایط کشت تأخیری. مجله تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی. ۴(۱): ۱۷-۳۴.
۱۱. میرزایی الموتی، ل. و ه. رضانی اعتدالی. ۱۳۹۶. بررسی اثر مدیریت های مختلف آبیاری بر سهم مجزا تبخیر و تعرق با استفاده از مدل AquaCrop. چهاردهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر. ۳ الی ۴ آبان ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
۱۲. همتی، ر. مقصودی، ک. و ی. امام. ۱۳۹۳. پاسخ های مورفو-فیزیولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه خشک شمال فارس. مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۴(۱۱): ۶۷-۷۴.
13. Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper. 56: 1-326.
14. Azizian, A. and A. R. Sepaskhah. 2014. Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. Journal of Plant Production. 8(2): 183- 214.
15. Farre, I. and J. M. Faci. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. Journal of Agricultural Water Management. 96: 383–394.
16. Ferreira, M. I. Silvestre, J. Conceic, N. and A. C. Malheiro. 2012. Crop and stress coefficients in rain fed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. Journal of irrigation science. 30: 433–447
17. Gimenez, L. Petillo, M. G. Paredes, P. and L. S. Pereira. 2016. Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability. Journal of water. 8(309): 1-22.
18. Greaves, G. and Y. Wang. 2017. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. Journal of Plant Production Science. 20(4): 353-365.
19. Huner, N. P. and W. G. Hopkins. 2008. Introduction to Plant Physiology: Wiley, New York
20. Kipkorir, E. D. and D. Raes. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. Journal of Irrigation and Drainage Systems. 16: 47–52.
21. Lacerda, C. F. Ferreira, J. F. S. Liu, X. and D. L. Suarez. 2016. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 202: 192-202.
22. Li, F. and Y. Ma. 2019. Evaluation of the dual crop coefficient approach in estimating evapotranspiration of drip-irrigated summer maize in Xinjiang, China. Journal of Water. 11(1053): 125-140.
23. Saeidi, R. Ramezani-Etedali, H. Sotoodenia, A. Kaviani, A. and B. Nazari. 2021. Salinity and fertility stresses modifies  $K_s$  and readily available water coefficients in maize (Case study: Qazvin region). Journal of irrigation science. 39: 299- 313.
24. Salama, M. A. Yousef, Kh. M. and A. Z. Mostafa. 2015. Simple equation for estimating actual evapotranspiration using heat units for wheat in arid regions. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 8: 418-427.
25. She, R. Tong, L. Du, T. and M. Shukla. 2020. Response and Modeling of Hybrid Maize Seed Vigor to Water Deficit at Different Growth Stages. Journal of Water. 12(11): 1-20.

26. Trout, T. J. and K. C. Dejonge. 2017. Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrigation Science*. 35: 251–266.
27. Ucak, A. B. Ayasan, T. and N. Turan. 2016. Yield, quality and water use efficiencies of silage maize as effected by deficit irrigation treatments. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*. 4(12): 1228-1239.
28. Xiao, X. Sauer, T. J. Singer, J. W. Horton, R. Ren, T. and J. L. Heitman. 2016. Partitioning evaporation and transpiration in a maize field using heat-pulse sensors for evaporation measurement. *Journal of American society of agricultural and biological engineers*. 59(2): 591- 599.
29. Zhou, S. Liu, W. and W. Lin. 2017. The ratio of transpiration to evapotranspiration in a rain fed maize field on the Loess Plateau of China. *Journal of water science and technology*. 17(1): 221-228.
30. Separate Estimation of Maize Evapotranspiration Components by Using the Experimental Models, under Water Stress Conditions.

## Separate Estimation of Maize Evapotranspiration Components by Using Experimental Models under Water Stress Conditions

R. Saeidi<sup>1</sup>

Assistant Prof., Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

saeidi@org.ikiu.ac.ir

Received: January 2022 and Accepted: June 2022

### Abstract

For irrigation planning, parameters such as actual crop water needs (transpiration) and water losses (evaporation) are considered. In this research, for management of deficit irrigation, the amounts of maize evapotranspiration components were simulated under water stress conditions. Water stress was applied by reducing the soil water, relative to the readily available water. Four treatments were defined as depletion of the available soil water by 40% ( $I_0$ ), 55% ( $I_1$ ), 70% ( $I_2$ ), and 85% ( $I_3$ ). The amounts of maize evapotranspiration and its components (transpiration and evaporation rates separately) were measured in a mini-lysimeter. The seasonal total values of evapotranspiration and components of transpiration and evaporation were equal to 443, 319 and 124 mm ( $I_0$ ), 401, 282 and 119 mm ( $I_1$ ), 303, 211 and 92 mm ( $I_2$ ), and 201, 127 and 74 mm ( $I_3$ ), respectively. Soil water deficiency reduced the evapotranspiration and its components relative to the normal conditions (treatment  $I_0$ ). Reduction of evaporation losses was favorable point in this deficit irrigation method (long irrigation interval). Transpiration and evaporation values were simulated based on the evapotranspiration data (in  $I_0$ ), evapotranspiration stress coefficient ( $K_s$ ), and crop growth stage sensitivity ( $K_{pi}$ ). For this purpose, we used the linear, exponential, logarithmic, polynomial, and power functions as the regression models. By using the actual data, unknown coefficients in the functions were estimated by SPSS software and regression models were generated. Statistical analyses showed that the linear function ( $R^2=0.91$ ) and polynomial function ( $R^2=0.874$ ) were the optimal models for estimation of transpiration and evaporation components (under water stress conditions), respectively. The actual water requirement of crop and evaporation losses can be estimated more accurately by separate estimation of evapotranspiration components. This would provide a suitable criterion for irrigation planning and calculation of water use efficiency.

**Keywords:** Evaporation losses, Growth stage sensitivity, Regression modeling, Stress coefficient

---

<sup>1</sup> - Corresponding author: Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.