نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۶۲۳-۶۰۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 609-623

مقاله علمی-پژوهشی

اثر برآورد جداگانه ضریب K_s در مراحل رشد ذرت، بر تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه در شرایط تنش آبی

رضا سعیدی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

برآورد صحیح ضریب تنش تبخیر-تعرق گیاه (K_s)، باعث تخمین دقیق تبخیر-تعرق در شرایط تنش آبی می‌شود. در این پژوهش گیاه ذرت در مینی‌لایسیمتر کشت و مقدار تبخیر-تعرق روزانه آن اندازه‌گیری شد. آزمایش در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی انجام شد. تنش آبی از طریق تخلیه آب خاک در سطوح (I_1) ۵۵٪، (I_2) ۶۵٪، (I_3) ۷۵٪ و (I_4) ۸۵٪ کل آب در دسترس خاک، اعمال شد. در تیمار شاهد (I_0)، میزان آب خاک در حد سهل‌الوصول نگه‌داشته شد. حد آب سهل‌الوصول یک‌بار به‌طور ثابت در کل دوره رشد در نظر گرفته شد و میزان آن برابر با تخلیه ۴۰٪ از کل آب در دسترس خاک (بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته) تعریف شد. بار دیگر حد آب سهل‌الوصول به‌طور جداگانه در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت برآورد شد. در لحظه افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های ذرت در اثر تنش آبی، میزان رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. سپس حد آب سهل‌الوصول در مراحل رشد مذکور، به ترتیب برابر با ۴۵٪، ۶۵٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ برآورد شد. از این‌رو، ضریب K_s یک‌بار به‌صورت متغیر (در چهار مرحله رشد) و یک‌بار به‌طور ثابت در کل دوره رشد ذرت برآورد شد. مقادیر تبخیر-تعرق ذرت تحت تنش آبی، بر اساس ضرب مقدار تبخیر-تعرق تیمار شاهد در ضریب K_s محاسبه شد. سپس مقادیر واقعی و تخمینی تبخیر-تعرق ذرت در شرایط تنش آبی، باهم مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از ضریب K_s ثابت برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد، موفقیت‌آمیز نبود. اما با کاربرد ضریب K_s متغیر، حساسیّت گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد، در نظر گرفته شد. از این‌رو برآورد مناسب‌تری از مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط تنش آبی انجام شد. درنتیجه برای تعیین میزان تبخیر-تعرق ذرت در شرایط مدیریت کم‌آبیاری، باید ضرایب K_s جداگانه در مراحل مختلف رشد در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، حساسیت مرحله رشد، ضریب تنش، مقاومت روزنه‌ای

مقدمه

تخمین دقیق تبخیر-تعرق واقعی گیاه در شرایط مختلف محیطی، معیاری مهم برای تعیین نیاز آبیاری گیاه به شمار می‌رود. برای این منظور باید مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه با روش‌های مستقیم و یا غیرمستقیم برآورد شود. طبق تعریف نشریه فائو-۵۶، هرگاه گیاه در شرایط نامطلوب (غیر استاندارد) محیطی مانند وجود تنش شوری، حاصلخیزی کم خاک، تنش آبی، ماندابی و وجود آفات و بیماری‌ها قرار بگیرد، مقدار تبخیر-تعرق آن نسبت به شرایط پتانسیل (استاندارد) منطقه کاهش می‌یابد. در این شرایط (غیراستاندارد) از ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) برای نشان دادن میزان کاهش تبخیر-تعرق گیاه نسبت به شرایط استاندارد منطقه استفاده می‌شود (Allen et al., 1998). از این‌رو استفاده از مدل‌ها، معادلات کاربردی و یا ضرایب تنش، روشی کم‌هزینه‌تر برای محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه در شرایط غیراستاندارد یک منطقه است. در این‌باره در پژوهشی گزارش شد که تنش آبی از عوامل بسیار مؤثر در کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده گیاه نسبت به شرایط استاندارد هر منطقه است (سعیدی، ۱۴۰۰ c). در شرایط اِعمال تنش آبی، آب کافی برای تعرق گیاه در دسترس نیست. درنتیجه مقدار مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ گیاه افزایش یافته و در نهایت روزنه‌های برگ مسدود می‌شود (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳). افزایش مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها و کاهش تعرق گیاه در شرایط اِعمال تنش آبی، یک نوع سازگاری است که گیاه برای کاهش تخلیه آب از خود نشان می‌دهد (فتحی و همکاران، ۱۳۹۶). فرایند مقابله با تنش آبی به این صورت است که در

۱- دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.3.11.2

شرایط کمبود آب خاک (تنش آبی)، هورمون آبسزیک اسید وارد اندام‌های هوایی گیاه شده و به‌صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل می‌نماید و باعث بسته شدن روزنه‌های برگ‌ها می‌شود. در نتیجه گیاه با بستن روزنه‌های خود، اقدام به حفظ رطوبت و جلوگیری از اتلاف آب می‌کند. به‌طوری‌که افزایش دمای برگ و کاهش تثبیت CO_2، تاوان این عمل خواهد بود (ماهرخ و همکاران، ۱۳۹۸). در میان گیاهان زراعی، ذرت گیاهی آبی است و از لحاظ نقش راهبردی آن در تولید غذای انسان و دام، می‌تواند در پژوهش‌های مرتبط با مدیریت کم‌آبیاری موردمطالعه قرار بگیرد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۹). در این‌باره در آزمایشگاهی در کالیفرنیا، گیاه ذرت در گلدان‌هایی با جنس PVC با قطر ۲۰ و طول ۱۰۰ سانتی‌متر کاشته شد و میزان تبخیر-تعرق گیاه بررسی شد (Lacerda et al., 2016). همچنین در کشور آلمان، میزان کاهش تعرق ذرت در پاسخ به خشک شدن خاک، در گلدان‌های PVC با قطر ۹ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر مطالعه شد (Hayat et al., 2020).

در پژوهشی در منطقه تایوان جنوبی اثر سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت آزمایش شد. نتایج نشان داد که در سطوح آبیاری مذکور، مقدار تبخیر-تعرق ذرت به ترتیب ۶۰۵، ۵۲۶، ۴۵۵، ۳۸۳ و ۳۳۱ میلی‌متر برآورد شد. به‌طوری‌که کم‌آبیاری باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به سطح آبیاری کامل شد. همچنین در سطوح آبیاری ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد، مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت (تبخیر-تعرق در شرایط تحت تنش نسبت به شرایط بدون تنش) به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۰/۷۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۴ محاسبه شد (Greaves and Wang, 2017). در تحقیقی در دشت‌های مرکزی آمریکا، مقدار تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اِعمال کم‌آبیاری (تنش آبی) در دوره رشد گیاه، باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل شد. به‌طوری‌که مقدار تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب ۶۴۸، ۵۶۷، ۵۲۴، ۵۰۷، ۴۲۲ و ۳۶۸ میلی‌متر برآورد شد (Trout and Dejonge, 2017).

در نشریه فائو-۵۶ گزارش شد که با افزایش تبخیر-تعرق گیاه، تخلیه آب از خاک در عمق توسعه ریشه گیاه افزایش می‌یابد و آنگاه که میزان تخلیه آب خاک بیشتر از حد آب سهل‌الوصول (RAW[1]) شد، شرایط تنش آبی ایجاد می‌شود (Allen et al., 1998). در زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک، گیاه شروع به بستن تدریجی روزنه‌ها می‌نماید که این کار باعث کاهش تعرق گیاه می‌شود. بنابراین با تشخیص زمان افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها نسبت به شرایط بهینه رطوبتی (تیمار تحت کنترل)، می‌توان حد آب سهل‌الوصول خاک را برآورد نمود (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). از این‌رو پارامتر RAW، یکی از پارامترهای مهم و مورد نیاز برای محاسبه ضریب تنش تبخیر-تعرق گیاه (K_s) در شرایط تنش آبی به‌شمار می‌رود. مقدار RAW به نوع گیاه، شرایط اقلیمی منطقه و دوره رشد گیاه بستگی دارد. به‌طوری که مقدار RAW در شرایط استاندارد برای کل دوره رشد ذرت، در نشریه فائو-۵۶ برابر با ۰/۵۵ (Allen et al., 1998)، در کشور رومانی برابر با ۰/۴۵ تا ۰/۵ (Berbecel and Eftimescu, 1972) و در ایالت آیوای آمریکا برابر با ۰/۴ (Beer et al., 1967) گزارش شده است. از سوی دیگر در پژوهشی در منطقه قزوین گزارش شد که میزان حساسیّت گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد متفاوت است. در پژوهش مذکور یک حد ثابت تنش آبی، در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بر ذرت اِعمال شد. مقدار کل تبخیر-تعرق در تیمار شاهد و تیمارهای تحت تنش آبی در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها به‌ترتیب ۴۶۲، ۴۰۱، ۳۲۲، ۳۰۴ و ۳۵۵ میلی‌متر برآورد شد. نتایج نشان داد که با اِعمال یک‌بار تنش آبی (به‌صورت جداگانه) در مراحل مختلف رشد، مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به تیمار شاهد (تبخیر-تعرق نسبی) به‌میزان برابر کاهش نیافته است (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). درنتیجه وجود حساسیّت متفاوت در مراحل رشد ذرت، باعث می‌شود که میزان جذب آب از خاک توسط گیاه (در مراحل رشد) و حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW) متفاوت باشد. به‌همین دلیل در نشریه فائو-۳۳، مقدار حد آب سهل‌الوصول خاک در کشت ذرت برای مراحل رشد استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن به‌ترتیب ۴۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۰ درصد گزارش شده است (Doorenbos and Kassam, 1979). از این‌رو با توجه به تفاوت مقدار RAW در مراحل مختلف رشد ذرت، این نکته مشخص می‌شود که مقدار ضریب K_s در کل دوره رشد ذرت عدد ثابتی نخواهد بود. بلکه برای هر مرحله رشد، باید مقدار متفاوتی از ضریب K_s برآورد شود.

البته در پژوهش‌های گذشته تاکنون و در شرایط تنش آبی، مقدار ضریب K_s در کل دوره رشد گیاه ذرت به‌صورت عددی ثابت گزارش شده است. به‌طوری که در پژوهشی در منطقه کرج، آزمایشی با سه سطح آبیاری کامل و کم‌آبیاری در حد ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بر روی گیاه سویا انجام شد. نتایج نشان داد که متوسط ضریب تنش آبی (K_s) در تیمارهای کم‌آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد، به‌ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۰/۷۶ برآورد شد (سرائی تبریزی و همکاران، ۱۳۹۱). در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه لرستان، اثر چهار سطح آبیاری شامل، (I_{125}) ۱۲۵٪، (I_{100}) ۱۰۰٪، (I_{75}) ۷۵٪ و (I_{50}) ۵۰٪ نیاز آبی گیاه بر روی ذرت مطالعه شد. در این پژوهش مقدار ضریب تخلیه مجاز رطوبتی بر اساس نشریه فائو-۵۶، معادل ۰/۵۵ در کل دوره رشد ذرت در نظر گرفته شد. از این‌رو مقدار متوسط ضریب تنش آبی (K_s) در طول

1- Readily available water, RAW

دوره رشد ذرت برای تیمارهای I_{125}، I_{100}، I_{75} و I_{50} به‌ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۷۸، ۰/۵۷ و ۰/۳۲ به‌دست آمد (کردی و همکاران، ۱۴۰۰). در پژوهش مذکور مقدار ضریب K_s در تیمار آبیاری کامل (I_{100}) برابر با ۰/۷۸ برآورد شد، در حالی‌که انتظار می‌رفت عدد یک برای آن محاسبه شود. به‌نظر می‌رسد عدم توجه به حساسیّت متفاوت گیاه به تنش آبی در مراحل مختلف رشد و ثابت درنظر گرفتن مقدار RAW در طول دوره رشد ذرت، از دلایل نتایج به‌دست آمده باشد.

جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد که با تعیین حد تخلیه مجاز آب خاک (آب سهل‌الوصول)، می‌توان ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) را در تیمارهای کم‌آبیاری محاسبه کرد و به‌دنبال آن، مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه را نسبت به شرایط استاندارد منطقه برآورد نمود. البته با توجه به حساسیّت متفاوت گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد، باید ضرایب تنش متفاوتی در طول دوره رشد گیاه درنظر گرفت. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر حساسیّت مرحله رشد ذرت بر تخمین ضریب K_s و مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه، در شرایط تنش آبی است. به‌این صورت که یک‌بار با در نظر گرفتن حد ثابت برای آب سهل‌الوصول خاک در کل دوره رشد ذرت و بار دیگر با در نظر گرفتن حد متغیر برای آب سهل‌الوصول خاک (در مراحل فنولوژیکی رشد ذرت)، ضرایب تنش تبخیر-تعرق (K_s) برآورد شد. حد ثابت برای آب سهل‌الوصول خاک به‌گونه‌ای انتخاب شد که در هیچ یک از مراحل رشد ذرت، تنش آبی بر گیاه اِعمال نشود. حد متغیر برای آب سهل‌الوصول خاک در مراحل مختلف رشد نیز بر اساس واکنش پارامتر مقاومت روزنه‌ای گیاه به تنش آبی، تعیین شد. درنهایت دو روش مذکور (برای برآورد ضریب K_s) با یکدیگر مقایسه شد تا نشان داده شود که کدام‌یک از روش‌ها برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه در شرایط تنش آبی، مناسب‌تر است. با این کار، امکان برآورد دقیق‌تر میزان تبخیر-تعرق گیاه ذرت و نیاز آبی آن، در شرایط مدیریت کم‌آبیاری فراهم شد.

مواد و روش‌ها

در سال ۱۴۰۰، پژوهشی در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) در موقعیت جغرافیایی با عرض شمالی "۲۳ '۱۹ °۳۶ و طول شرقی "۳۸ '۰۰ °۵۰ واقع در شهر قزوین انجام شد. گیاه مورد مطالعه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که با هدف کشت علوفه‌ای، در مینی‌لایسیمترهایی استوانه‌ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، تحت کشت قرار گرفت. انتخاب ابعاد مذکور برای مینی‌لایسیمتر (در کشت ذرت)، در پژوهش دهقانی سانیج و همکاران (۱۳۹۶) نیز گزارش شده است. برای کنترل مقدار آب داده شده به خاک (در فرآیند آبیاری) و هدایت هرگونه زه‌آب احتمالی به بیرون، در کف هر مینی‌لایسیمترها از بستر شن و لوله‌های سوراخ‌دار (به‌عنوان زهکش) استفاده شد. خاک لازم برای پُر کردن مینی‌لایسیمترها از مزرعه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) تأمین شد و مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شد. به‌دلیل این‌که خاک شخم زده شده و آماده کشت در شرایط طبیعی مزرعه، دارای چگالی ظاهری برابر با ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود، از این‌رو خاک داخل مینی‌لایسیمترها به تراکم مذکور رسانده شد. برای جلوگیری از نشست احتمالی خاک در دوره رشد گیاه، مینی‌لایسیمترها قبل از کشت آبیاری سنگین (غرقاب) شد و زهاب آن از طریق لوله‌های زهکش انتهایی تخلیه شد. روش کاشت بذور به‌این صورت بود که در سطح هر مینی‌لایسیمتر تعداد سه بذر به‌صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد. این شیوه کاشت ذرت در مینی‌لایسیمتر، در پژوهش‌های دهقانی سانیج و همکاران (۱۳۹۶) و سعیدی (b ۱۴۰۰) گزارش شد.

برای مَرزبندی مراحل رشد ذرت، از گزارش نشریه فائو-۵۶ استفاده شد. نشریه فائو-۵۶ برای یک دوره ۱۴۰ روزه رشد ذرت علوفه‌ای (مخصوص ارقام دیررس مانند سینگل کراس ۷۰۴) چهار مرحله اولیه (D_1)، توسعه (D_2)، میانی (D_3) و پایانی (D_4) رشد را به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز در نظر گرفته است (Allen et al., 1998). از این‌رو فاصله زمانی کاشت بذور (۱۴۰۰/۰۲/۲۹) تا هنگام برداشت علوفه‌ای محصول (۱۴۰۰/۰۷/۱۴)، ۱۴۰ روز بود و بازه زمانی مراحل رشد ذرت در پژوهش حاضر، بر اساس گزارش فائو- ۵۶ درنظر گرفته شد. لازم به‌ذکر است که بازه‌های زمانی ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ همواره در طول دوره رشد گیاه در پژوهش حاضر کنترل شد و نتایج نشان داد که تفاوتی وجود نداشت. کنترل آن هم به این صورت بود که بر اساس گزارش نشریه فائو-۵۶، مرحله اولیه رشد گیاه از تاریخ کاشت بذر شروع شده و تا زمانی که پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد از سطح زمین را بپوشاند، ادامه می‌یافت. مرحله توسعه گیاه از ادامه مرحله قبل آغاز شده و تا زمان رسیدن به سطح سایه‌اندازی کامل گیاه ادامه داشت. مرحله میانی رشد از زمان برقراری پوشش کامل گیاه (که مصادف با آغاز گل‌دهی بود) شروع شده و تا ابتدای رسیدن بیولوژیک محصول ادامه داشت. مرحله پایانی رشد نیز از زمان رسیدگی بیولوژیک محصول آغاز شده و تا خشک شدن طبیعی برگ‌های گیاه (پلاسیدگی کامل) و ریزش آن‌ها ادامه می‌یافت (Allen et al., 1998).

نیاز آبی گیاهان صرفاً از طریق انجام آبیاری تأمین شد زیرا بارندگی در دوره رشد گیاه وجود نداشت. آبیاری مینی‌لایسیمترها به‌صورت سطحی و با استفاده از آب چاه با هدایت الکتریکی ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدیته ۷/۱ انجام شد. مقدار کل آب در دسترس خاک (TAW)[1] به‌صورت اختلاف وزنی رطوبت خاک بین

1- Total available water, TAW

دو حد ظرفیت مزرعه (FC)[1] و نقطه پژمردگی دائم (PWP)[2] تعریف شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به‌ترتیب تحت فشارهای مکشی یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. یکی از محورهای اصلی پژوهش حاضر مربوط به تعریف حد تخلیه مجاز آب خاک یا حد آب سهل‌الوصول برای گیاه (RAW) بود که برای محاسبه و کنترل آن، از رابطه (۱) استفاده شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC}-\theta_0}{\theta_{FC}-\theta_{PWP}} \quad \text{(Saeidi et al., 2021)} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، RAW: حد آب سهل‌الوصول، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_0: رطوبت وزنی خاک (درصد) در زمان انجام آبیاری و θ_{PWP}: رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات خاک مینی‌لایسیمتر

پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	$dS.m^{-1}$	۰/۳۷
اسیدیته (pH)	-	۷/۳
بافت خاک	-	لوم شنی
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	۲۴/۱
رطوبت وزنی حد پژمردگی	%	۱۰/۳
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۳۶

اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها

به‌منظور تعیین آستانه اِعمال تنش آبی بر گیاه ذرت، مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها در طول دوره رشد گیاه اندازه‌گیری شد. پارامتر مقاومت روزنه‌ای به‌صورت روزانه و در ساعت مشخص (۷ صبح) توسط دستگاه پرومتر[3] مدل AP4 (ساخت شرکت دِلتا تی) اندازه‌گیری شد (شکل ۱). برای این کار در مینی‌لایسیمترهای مدنظر، تعداد سه برگ جوان از هر گیاه انتخاب شد و میانگین داده‌های دستگاه به‌عنوان مقدار مقاومت روزنه‌ای در نظر گرفته شد. روش کار به این صورت بود که مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها در گیاهانی که به سَمت تنش آبی میل می‌کردند نسبت به گیاهانی که در شرایط بهینه رطوبتی (تیمار تحت کنترل) قرار داشتند، مقایسه شد. به‌این صورت که خاک تیمار شاهد، همیشه رطوبت بهینه داشت و به تیمارهای تحت تنش اجازه داده می‌شد که رطوبت خاک آن‌ها به کم‌تر از رطوبت خاک تیمار شاهد برسد. اِعمال تنش آبی باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای گیاهان در آستانه تنش، نسبت به گیاهان در شرایط بدون تنش می‌شد. از این‌رو در لحظه افزایش مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان، مقدار رطوبت وزنی خاک اندازه‌گیری شد و آن به‌عنوان آستانه اتمام آب سهل‌الوصول در طی مراحل رشد ذرت درنظر گرفته شد. در این زمان و قبل از انجام آبیاری، برای اندازه‌گیری حد آب سهل‌الوصول خاک بر اساس رابطه (۱) اقدام شد.

معرفی تیمارها

در جدول (۲) شرح کامل تیمارهای اصلی (شاهد) و فرعی (تحت تنش) در پژوهش ارائه شده است. تیمارهای اصلی (I_0) شامل درنظر گرفتن دو صورت متفاوت از تخلیه مجاز آب خاک در طی دوره رشد ذرت بود و هر دو تیمار در جایگاه تیمار شاهد (تحت کنترل) قرار داشتند. به‌این صورت که با اطمینان از عدم اِعمال تنش آبی بر گیاه، حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW) یک‌بار به‌طور ثابت در کل دوره رشد و دیگر بار به‌طور متغیر در مراحل مختلف رشد گیاه تعریف شد. در تیمار حد آب سهل‌الوصول ثابت، تخلیه مجاز آب خاک در کل دوره رشد ذرت به‌میزان ۴۰ درصد از کل آب در دسترس خاک (TAW) انتخاب شد. یعنی در هر زمانی از دوره رشد، پس از اتمام (تخلیه) ۴۰ درصد از رطوبت بین حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) تیمارهای مربوطه آبیاری شدند. علت انتخاب مقدار مذکور این بود که در پژوهشی در منطقه قزوین گزارش شد که در تمام مراحل رشد ذرت، حد آب سهل‌الوصول کم‌تر از ۴۰ درصد نخواهد بود (سعیدی، a ۱۴۰۰). در نشریه فائو-۳۳ نیز کم‌ترین مقدار حد آب سهل‌الوصول خاک در طول دوره رشد ذرت مربوط به مرحله استقرار گیاه بود و عددی برابر با ۴۰ درصد برای آن گزارش شد (Doorenbos and Kassam, 1979). حد آب سهل‌الوصول متغیر نیز بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه نسبت به تنش آبی و انجام حداکثر تخلیه مجاز آب خاک (بدون اِعمال تنش آبی) در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت تعیین شد. از این‌رو در هر دو تیمار اصلی این اطمینان وجود داشت که قبل از اِعمال تنش آبی بر گیاه، عملیات آبیاری انجام شده است.

اما در تیمارهای فرعی (تحت تنش)، حد تخلیه مدیریتی آب خاک در چهار سطح (I_1) ۵۵، (I_2) ۶۵، (I_3) ۷۵ و (I_4) ۸۵ درصد کل آب دردسترس خاک (TAW) در کل دوره رشد تعریف شد. به‌بیان دیگر، در تیمارهای مذکور به‌ترتیب پس از تخلیه ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درصد آب خاک بین دو حد FC و PWP، آبیاری انجام شد. علت انتخاب مقادیر مذکور برای تیمارهای فرعی این بود که در نشریه فائو-۵۶ متوسط مقدار تخلیه مجاز آب خاک در کل دوره رشد ذرت برابر با ۰/۵۵ گزارش شد (Allen et al., 1998). از این‌رو با انتخاب مقدار ۵۵ درصد برای تیمار اول و تفاوت ۱۰ درصدی مقدار تخلیه آب خاک در سه سطح دیگر، تیمارهای تنش آبی اِعمال شدند. آزمایش در سه تکرار و به‌صورت طرح پایه کاملاً تصادفی اجرا شد. به‌طور کلی روش

1- Field capacity, FC
2- Permanent wilting point, PWP
3-AP4 Porometer

تحقیق به‌این صورت بود که ابتدا ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) با استفاده از رابطه (۲) برای تیمارهای فرعی (تحت تنش آبی) محاسبه شد. سپس مقدار تبخیر-تعرق گیاه در تیمارهای فرعی (تیمارهای I_i)، بر اساس ضرب مقدار واقعی تبخیر-تعرق تیمارهای شاهد در ضریب K_s، تخمین زده شد (رابطه ۳).

شکل ۱- نحوه اندازه‌گیری مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌های ذرت با دستگاه پرومتر AP4

درنهایت مقادیر واقعی تبخیر-تعرق گیاه در تیمارهای فرعی با مقادیر تخمین زده توسط داده‌های دو تیمار شاهد، با هم مقایسه شدند. با این کار حساسیّت مرحله رشد ذرت برای محاسبه ضریب K_s و تخمین دقیق‌تر مقدار تبخیر-تعرق گیاه در شرایط مدیریت تخلیه آب خاک (تنش آبی) بررسی شد. به بیان دیگر تحقیق شد که آیا درنظر گرفتن یک مقدار ثابت ضریب K_s در کل دوره رشد گیاه مناسب‌تر است، یا این‌که برای مراحل مختلف رشد ذرت باید ضرایب K_s جداگانه‌ای برآورد شود.

$$K_s=\frac{TAW-D_r}{TAW-RAW} \quad \text{(Allen et al., 1998)} \qquad (۲)$$

$$ET_{c\,adj} = K_s \times ET_c \quad \text{(Allen et al., 1998)} \qquad (۳)$$

در رابطه (۲)، TAW: کل آب دردسترس خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر)، D_r: مقدار تخلیه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر) و RAW: مقدار آب سهل‌الوصول خاک (میلی‌متر) بود. لازم به‌ذکر است که اگر مقدار رطوبت وزنی خاک در پارامترهای TAW، RAW و D_r، در چگالی ظاهری خاک و عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر) ضرب شوند، حاصل آن مقدار ارتفاع آب خاک بر واحد میلی‌متر می‌باشد (رابطه ۴). در این‌صورت با قرار دادن مقادیر پارامترهای مذکور در رابطه (۲)، مقدار ضریب K_s محاسبه می‌شود.

در رابطه (۳)، $ET_{c\ adj}$: مقدار تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر) در تیمار تحت تنش آبی (شرایط غیر استاندارد) و ET_c: مقدار تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر) در تیمار تحت کنترل (شرایط استاندارد منطقه) بود.

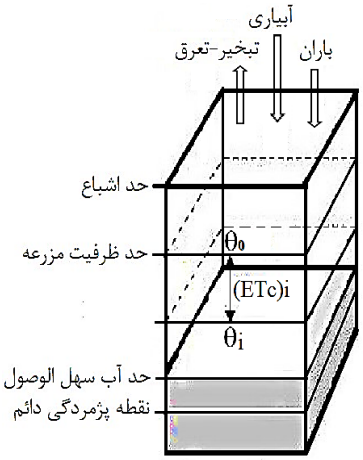
$$d = \theta \times \rho b \times D \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، d: مقدار ارتفاع آب خاک (میلی‌متر)، θ: مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، ρb: چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب) و D: عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر) بود.

در رابطه (۲) برای شرایطی که محدودیت آب وجود نداشت، مقدار D_r و RAW با هم برابر بود و مقدار ضریب K_s مساوی عدد یک می‌شد. اما در تیمارهای تحت تنش آبی، مقدار D_r بیشتر از RAW بود و مقدار ضریب K_s کوچک‌تر از عدد یک می‌شد. از این‌رو بر اساس مقدار ۴۰ درصد برای حد آب سهل‌الوصول ثابت و مقادیر ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درصد برای D_r در تیمارهای I_1، I_2، I_3 و I_4، به‌ترتیب مقدار ضریب K_s در تیمارهای مذکور برابر با ۰/۷۵، ۰/۵۸، ۰/۴۱ و ۰/۲۵ محاسبه شد. اما بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای گیاه به آغاز تنش آبی، مقدار حد آب سهل‌الوصول خاک در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر با ۴۵، ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درصد برآورد شد. درنتیجه به‌ترتیب مراحل رشد مذکور، مقدار ضریب K_s در تیمارهای تنش آبی برابر با ۰/۸۱۸، ۱، ۱ و ۱ (تیمار I_1)، ۰/۶۳۶، ۱، ۰/۸۷۵ و ۱ (تیمار I_2)، ۰/۴۵۴، ۰/۷۱۴، ۰/۶۲۵ و ۰/۸۳۳ (تیمار I_3) و ۰/۲۷۲، ۰/۴۲۸، ۰/۳۷۵ و ۰/۵ (تیمار I_4) برآورد شد. لازم به‌ذکر است در تیمار حد آب سهل‌الوصول متغیر، در تیمارها و مراحلی از رشد که مقدار ضریب K_s بزرگ‌تر از عدد یک می‌شد، به‌این معنی بود که گیاه (در آن مرحله رشد و تیمار خاص) تحت تنش آبی نبوده است و از این‌رو مقدار یک برای ضریب K_s درنظر گرفته شد. زیرا عدد بزرگ‌تر از یک برای مقدار ضریب K_s معنی نداشت.

جدول ۲- تشریح تیمارهای پژوهش

نوع تیمار	جزئیات تیمار	توضیحات تکمیلی
اصلی (شاهد)	حد آب سهل‌الوصول ثابت	حد تخلیه مجاز آب خاک به‌میزان ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کل دوره رشد
	حد آب سهل‌الوصول متغیر	حد تخلیه مجاز آب خاک در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت، تا حد واکنش مقاومت روزنه‌ای گیاه به تنش آبی (افزایش مقاومت روزنه‌ای)
فرعی (تحت تنش)	تخلیه مدیریتی آب خاک در سطح ۵۵ درصد	حد تخلیه مجاز آب خاک به‌میزان ۵۵ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کل دوره رشد
	تخلیه مدیریتی آب خاک در سطح ۶۵ درصد	حد تخلیه مجاز آب خاک به‌میزان ۶۵ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کل دوره رشد
	تخلیه مدیریتی آب خاک در سطح ۷۵ درصد	حد تخلیه مجاز آب خاک به‌میزان ۷۵ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کل دوره رشد
	تخلیه مدیریتی آب خاک در سطح ۸۵ درصد	حد تخلیه مجاز آب خاک به‌میزان ۸۵ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کل دوره رشد



شکل ۲- موازنه آب در واحد حجم خاک، برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه (Allen et al., 1998)

بیلان آب خاک و برآورد تبخیر-تعرق

در روزهای بین آبیاری‌ها مقدار رطوبت خاک در اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵ و ۴۵-۶۰ سانتی‌متری هر مینی‌لایسیمتر اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت روزانه خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج[1] ساخت شرکت دِلتا تی (ΔT) اندازه‌گیری شد. قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به‌این صورت که در یک نمودار، داده‌های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی اِشِل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تهیه شد. با توجه به این‌که در خاک مینی‌لایسیمترها هیچ‌گونه دَرز و تَرَکی وجود نداشت و آبیاری هم تا حد رطوبت FC انجام می‌شد، از این‌رو آب اضافی برای خروج از انتهای مینی‌لایسیمترها وجود نداشت. درنتیجه رَوَند کاهشی مقدار رطوبت خاک در روزهای بین دو آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر-تعرق گیاهان بود. بنابراین در طی دوره رشد گیاه، مجموع مقادیر کاهش رطوبت خاک در چهار لایه خاک به‌عنوان تبخیر-تعرق گیاه در نظر گرفته شد. در این شرایط از طریق محاسبه روزانه بیلان آب خاک (شکل ۲) در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار روزانه تبخیر-تعرق گیاه توسط رابطه (۵) فراهم شد. لازم به ذکر است که ابتدا مقدار تبخیر-تعرق در هر لایه ۱۵ سانتی‌متری خاک محاسبه شد و سپس مجموع مقادیر تبخیر- تعرق در ۴ لایه مینی‌لایسیمتر، به‌عنوان مقدار تبخیر- تعرق روزانه در نظر گرفته شد.

$$(ET_c)_i = \sum_{j=1}^{j=4}\left[\frac{(\theta_{i-1}-\theta_i)}{100}\times \rho b \times D_j\right] \qquad (۵)$$

$(ET_c)_i$: تبخیر- تعرق روزانه گیاه (سانتی‌متر)، θ: مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i: شمارنده روزهای بین دو آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρb: چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب)، D: عمق لایه خاک در مینی‌لایسیمتر (سانتی‌متر)، j: شمارنده لایه‌های خاک در مینی‌لایسیمتر که تعداد ۴ لایه ۱۵ سانتی‌متری در نظر گرفته شده بود.

زمان و حجم آب آبیاری

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، مقدار رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه به‌صورت روزانه اندازه‌گیری و کنترل شد. زمان

1- Moisture meter

انجام آبیاری بر اساس حد تخلیه مجاز آب در تیمارها تعریف شده بود. به این صورت که در تیمار با حد آب سهل‌الوصول ثابت و تیمارهای I_1، I_2، I_3 و I_4 به ترتیب پس از تخلیه ۴۰، ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درصد از کل آب قابل‌استفاده در خاک (در عمق توسعه ریشه)، عملیات آبیاری انجام شد. اما در تیمار با حد آب سهل‌الوصول متغیر در مراحل رشد، در لحظه واکنش مقاومت روزنه‌ای برگ گیاه به اِعمال تنش آبی (افزایش مقاومت روزنه‌ای) آبیاری انجام شد. برای تشخیص عمق توسعه ریشه گیاه در دوره رشد، برای هر مرحله رشد گیاه مینی‌لایسیمترهای جداگانه‌ای در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه، عمق آن اندازه‌گیری شد. حجم آب آبیاری به‌اندازه‌ای تعیین شد که کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه (FC) برطرف شود. از این‌رو با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک $(\theta_{FC} - \theta_i)$، چگالی، عمق ریشه و مساحت سطح خاک در مینی‌لایسیمتر، حجم آب آبیاری بر اساس رابطه (۶) محاسبه شد. در این شرایط آب اضافی برای تبدیل به زهاب و خروج از انتهای مینی‌لایسیمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود.

$$V = \frac{(\theta_{FC}-\theta_0)}{100} \times \rho b \times D \times A \qquad (۶)$$

V: حجم آب آبیاری (مترمکعب)، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_0: رطوبت وزنی خاک قبل از انجام آبیاری (درصد)، ρb: چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D: عمق توسعه ریشه (متر) و A: مساحت سطح خاک (مترمربع).

مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده

در این پژوهش داده‌های مشاهده‌ای در شرایط تنش آبی (O)[1] شامل مقادیر واقعی تبخیر-تعرق گیاه در تیمارهای I_1، I_2، I_3 و I_4 بود. منظور از داده‌های پیش‌بینی‌شده (P)[2] نیز شامل مقدار تبخیر-تعرق گیاه در همان تیمارهای تحت تنش بود که از طریق ضرب مقدار تبخیر-تعرق تیمار شاهد در ضریب K_s به‌دست آمده بود. البته همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد مقدار ضریب K_s به دو صورت ثابت (در تیمار حد آب سهل‌الوصول ثابت) و متغیر (در تیمار حد آب سهل‌الوصول متغیر) وجود داشت. در این شرایط داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) و پیش‌بینی‌شده، با یکدیگر مقایسه شدند و اعتبار داده‌های پیش‌بینی‌شده ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا (ME)[3]، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)[4]، ضریب تبیین (R^2)[5]، کارایی مدل‌سازی (EF)[6]، ضریب باقیمانده (CRM)[7] و ریشه میانگین مربع خطای نرمال‌شده (NRMSE)[8] استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های ارزیابی در روابط (۷) الی (۱۲) ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره‌های RMSE، NRMSE، ME و CRM و نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2 و EF، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب معادله برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق گیاه در شرایط تنش آبی بوده است.

$$ME = \max|P_i - O_i|_{i=1}^{n} \qquad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \qquad (۸)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O}).(P_i-\bar{P})\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2.\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2} \qquad (۹)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2-\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \qquad (۱۰)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i-\sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \qquad (۱۱)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \qquad (۱۲)$$

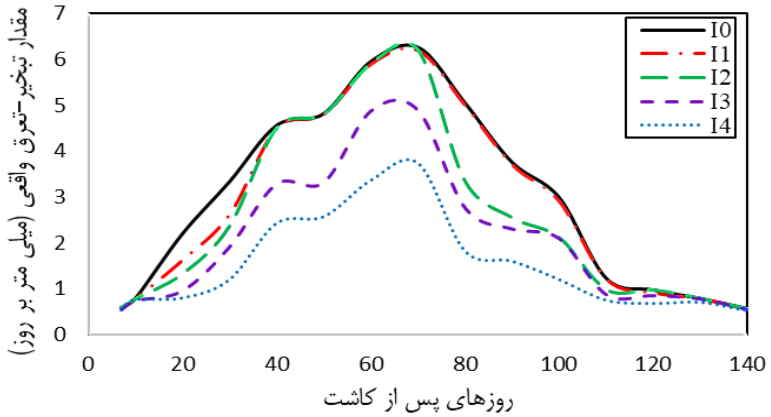
نتایج و بحث

تبخیر-تعرق واقعی

رَوَند تغییرات تبخیر-تعرق روزانه ذرت در دوره رشد، در شکل (۳) نشان داده شد. کم‌ترین مقادیر تبخیر-تعرق گیاه در مراحل اولیه و پایانی رشد و بیشترین آن در مراحل توسعه و میانی رشد انجام شد. در مرحله اولیه رشد به دلیل آغاز رشد و نمو گیاه و در مرحله پایانی به سبب رسیدگی و شروع پَلاسیدگی گیاه، میزان تبخیر-تعرق کم بود. ولی در مرحله توسعه رشد به علت رشد سریع اندام‌های گیاه و در مرحله میانی به دلیل آغاز گل‌دهی گیاه، گرده‌افشانی و تشکیل بلال، میزان تبخیر-تعرق ذرت بیشتر بود (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶؛ همتی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Farre and Faci, 2009). از این‌رو نتایج جدول (۳) نشان داد که سطوح مختلف تنش آبی، اثر معنی‌دار در سطح یک درصد بر کاهش میزان تبخیر-تعرق ذرت داشت. همچنین بین مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل مختلف رشد و اثر متقابل تنش آبی و مرحله رشد، اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود داشت. از سوی دیگر با توجه به شکل (۴)، مراحل میانی (D_2)، توسعه (D_3)، اولیه (D_1) و پایانی (D_4) رشد به ترتیب بیشترین تا کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق را داشتند. در این‌باره در پژوهشی در چین نیز گزارش شد که مقدار تبخیر از سطح خاک در اوایل دوره رشد ذرت، زیاد و مقدار تعرق در این مرحله رشد، کم بود. همچنین 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 (Zhou et

1- Observed, O
2- Predicted, P
3- Maximum error, ME
4- Root mean square errorRMSE ,
5- Coefficient of determination
6- Efficiency of modeling, EF
7 - Coefficient of residual mass, CRM
8- Normalized root mean square error, NRMSE

(al., 2017). همچنین در منطقه قزوین، تبخیر-تعرق گیاه ذرت تحت سطوح آبیاری شامل (I_0) ۱۰۰، (I_1) ۸۰، (I_2) ۶۰ و (I_3) ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، بررسی شد. مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_0)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_1)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I_2)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I_3) برآورد شد. نتایج نشان داد که حساسیت متفاوت گیاه در مراحل مختلف رشد و اِعمال تنش آبی به‌عنوان یک تنش محیطی- مدیریتی، نقش مؤثری در کاهش جذب آب توسط گیاه و تعرق واقعی آن بر عهده داشت. لذا انتخاب مرحله ی رشد مناسب و اعمال حد منطقی از تنش آبی در مدیریت های کم‌آبیاری، باعث انجام تبخیر-تعرق بهینه در راستای افزایش بهره‌وری مصرف آب بوده است (سعیدی، c ۱۴۰۰).

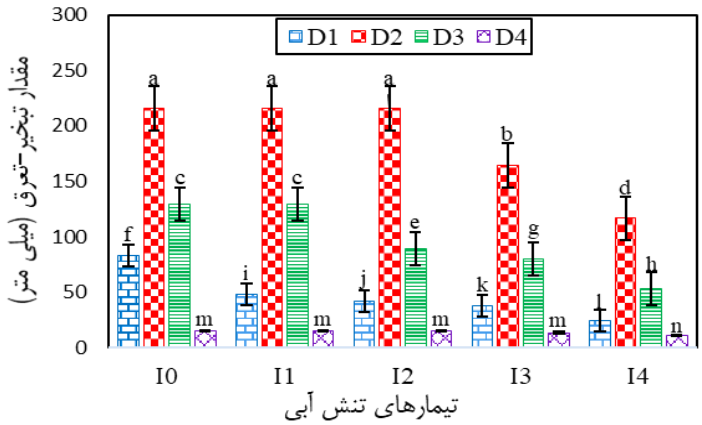


شکل ۳ مقدار تبخیر-تعرق روزانه در طول دوره رشد ذرت و در تیمارهای مختلف تنش آبی

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات موردبررسی در طرح

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات تبخیر-تعرق
تکرار	۲	۲/۴۵^{ns}
تنش آبی	۴	۶۷۲۱/۶**
مرحله رشد	۳	۸۳۹۲۶**
تنش آبی×مرحله رشد	۱۲	۱۳۱۳**
خطا	۳۸	۰/۹۲

ns و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد



شکل ٤- مقایسه میانگین مقادیر تجمعی تبخیر-تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد و در تیمارها

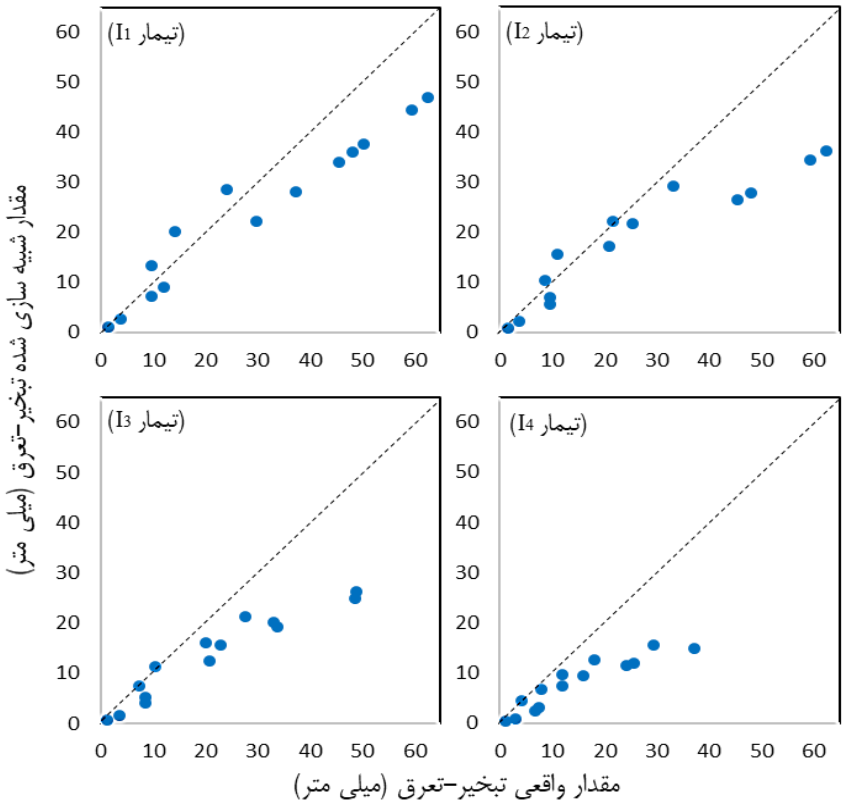
به‌طورکلی مجموع مقادیر تبخیر-تعرق در دوره رشد ذرت، در تیمارهای I_0، I_1، I_2، I_3 و I_4 به ترتیب برابر با ۴۴۳، ۴۰۸، ۳۶۱، ۲۹۶ و ۲۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج مذکور نشان داد که در تیمارهای I_1 الی I_4، تنش آبی باعث کاهش میزان تبخیر-تعرق گیاه نسبت به شرایط تحت کنترل (تیمار I_0) شد. به‌طور مشابه در پژوهشی در منطقه باجگاه شیراز، اثر سه رژیم آبیاری شامل (I_1) ۱۰۰، (I_2) ۷۵ و (I_3) ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت آزمایش شد. نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آبیاری از سطح I_1 به سطوح I_2 و I_3، به ترتیب ۱۹ و ۴۲ درصد از مقدار تبخیر- تعرق ذرت کاهش یافت (Azizian, and Sepaskhah, 2014). در پژوهش دیگر در کشور ترکیه، مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۰ و ۳۵ درصد نیاز آبی گیاه، اندازه‌گیری 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 میلی‌متر برآورد شد (Ucak et al., 2016). بنابراین آنچه که به‌عنوان اثر کمبود آب خاک بر گیاه اِعمال می‌شود، با کاهش جذب آب و تعرق توسط گیاه همراه بوده و نتیجه‌اش کاهش عملکرد محصول خواهد بود.

برآورد تبخیر-تعرق (بر اساس حد آب سهل‌الوصول ثابت در دوره رشد)

در یکی از تیمارهای شاهد، حد آب سهل‌الوصول به‌طور ثابت در کل دوره رشد ذرت در نظر گرفته شد. به این صورت که برای اطمینان از عدم اِعمال تنش آبی در مراحل حساس رشد ذرت، تخلیه مجاز آب خاک به میزان ۴۰ درصد تعیین شد. از این‌رو بر اساس مقدار ۴۰ درصد برای حد آب سهل‌الوصول ثابت و مقادیر تخلیه آب خاک به میزان ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درصد در تیمارهای I_1، I_2، I_3 و I_4 به ترتیب مقادیر ضریب تنش آبی K_s در تیمارهای مذکور برابر با ۰/۷۵، ۰/۵۸، ۰/۴۱ و ۰/۲۵ محاسبه شد. بر اساس تعریف ضریب تنش آبی K_s در نشریه فائو-۵۶ انتظار این بود که از ضرب مقدار K_s در مقدار تبخیر-تعرق در تیمار شاهد، مقدار تبخیر-تعرق در تیمار تحت تنش آبی برآورد شود. از این‌رو کل دوره رشد ذرت به بازه‌های زمانی ده روزه تقسیم شد و در هر بازه زمانی، مقادیر تجمعی تبخیر-تعرق تیمار شاهد در ضریب K_s ضرب شد. سپس مقادیر برآورد شده تبخیر-تعرق برای تیمار تحت تنش آبی، با مقادیر واقعی آن در شکل (۵) مقایسه شد. نتایج نشان داد در مراحلی از دوره رشد که مقدار تبخیر-تعرق واقعی کم بود (مانند مراحل اولیه و پایانی رشد)، مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق به خط ۱:۱ نزدیک‌تر بود. اما در مراحلی که مقدار تبخیر-تعرق واقعی زیادتر بود (مانند مراحل توسعه و میانی رشد)، مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق دور از خط ۱:۱ بود. به دلیل این‌که مقدار حد آب سهل‌الوصول ثابت (۴۰ درصد) به مقدار حد آب سهل‌الوصول در مرحله اولیه رشد (۴۵ درصد) نزدیک بود، ضریب K_s ثابت تا حدودی توانست مقدار تبخیر-تعرق را در این مرحله رشد شبیه‌سازی نماید. اما در مراحل توسعه، میانی و پایانی رشد که حد آب سهل‌الوصول در آن‌ها به ترتیب برابر با ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درصد بود، مقادیر شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق با مقادیر واقعی آن فاصله داشت. البته در مرحله پایانی رشد به علت کم بودن مقدار تبخیر-تعرق واقعی، تأثیر ضریب K_s چندان محسوس نبود و فاصله بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق کم‌تر بود. از این‌رو مقدار تبخیر-تعرق (تحت تنش) در مراحل حساس توسعه و میانی رشد ذرت، تخمین مناسبی توسط ضریب K_s ثابت نداشته است. به‌طوری‌که با توجه به شکل (۵) و مقادیر CRM در جدول (۴)، مقادیر شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق کم‌تر از مقادیر واقعی آن برآورد شده است. سایر مقادیر آماره‌های ارزیابی در جدول (۴) و به‌خصوص آماره‌های RMSE و NRMSE نیز نشان دادند که با ثابت بودن مقدار ضریب K_s در دوره رشد، تخمین مقدار تبخیر-تعرق در شرایط تنش آبی، قابل‌تعمیم به مقادیر واقعی نبود. در پژوهشی مشابه در شمال شرقی کشور برزیل، ضریب تنش آبی خاک (K_s) به روش فائو برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی ذرت برآورد شد. مقدار تبخیر-تعرق در کل دوره رشد و برای شرایط بدون تنش برابر با ۴۳۱/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای شرایطی که مقدار رطوبت خاک به کم‌تر از سطح RAW رسید، ضریب تنش K_s محاسبه شد. مقدار RAW در کل دوره رشد ذرت برابر با ۰/۵۵ کل آب در دسترس خاک (TAW) در نظر گرفته شد و از طریق آن، متوسط ضریب K_s در کل دوره رشد برابر با ۰/۸۲ برآورد شد. در این شرایط مقدار تبخیر-تعرق واقعی ذرت بر اساس مقدار ضریب K_s مذکور محاسبه شد و آماره‌های R^2 و RMSE در فرایند شبیه‌سازی تبخیر-تعرق به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۱/۷۳ میلی‌متر بر روز بود. نتایج نشان داد که تعیین ضریب K_s بر اساس ثابت بودن حد آب سهل‌الوصول در دوره رشد، چندان موفقیت‌آمیز نبوده است (Lyra et al., 2016).

برآورد تبخیر-تعرق (بر اساس حد آب سهل‌الوصول متغیر در دوره رشد)

در این بخش از پژوهش، مقدار حد آب سهل‌الوصول به‌صورت جداگانه در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت در نظر گرفته شد. لحظه اتمام آب سهل‌الوصول خاک بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای گیاه به آغاز تنش آبی تعیین شد. در این زمان متوسط مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاه در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به ترتیب برابر با ۳/۴، ۳/۸، ۲/۹ و ۴/۴ ثانیه بر سانتی‌متر (در تیمار شاهد) و ۳/۷، ۴/۹، ۴/۵ و ۷/۷ ثانیه بر سانتی‌متر (در تیمار تحت تنش) اندازه‌گیری شد.



شکل ۵- ارتباط بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق بر اساس حد آب سهل‌الوصول ثابت در دوره رشد

جدول ٤- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار ضریب Ks در تخمین مقدار تبخیر-تعرق ذرت (در شرایط حد آب سهل‌الوصول ثابت در دوره رشد)

نام تیمار	CRM	EF	R^2	RMSE	ME	NRMSE
I_1	۰/۱۸۵	۰/۸۰۸	۰/۹۴۲	۸/۹۷	۱۵/۶۳	۰/۳۰۸
I_2	۰/۲۸۹	۰/۶۰۸	۰/۸۸۵	۱۲/۴۸	۲۶/۲۷	۰/۴۸۳
I_3	۰/۳۷۱	۰/۴۷۶	۰/۹۱۴	۱۰/۹۵	۲۳/۷۹	۰/۵۱۸
I_4	۰/۴۶	۰/۲۳۹	۰/۸۵۷	۹/۲۱	۲۲/۳۸	۰/۶۲۹

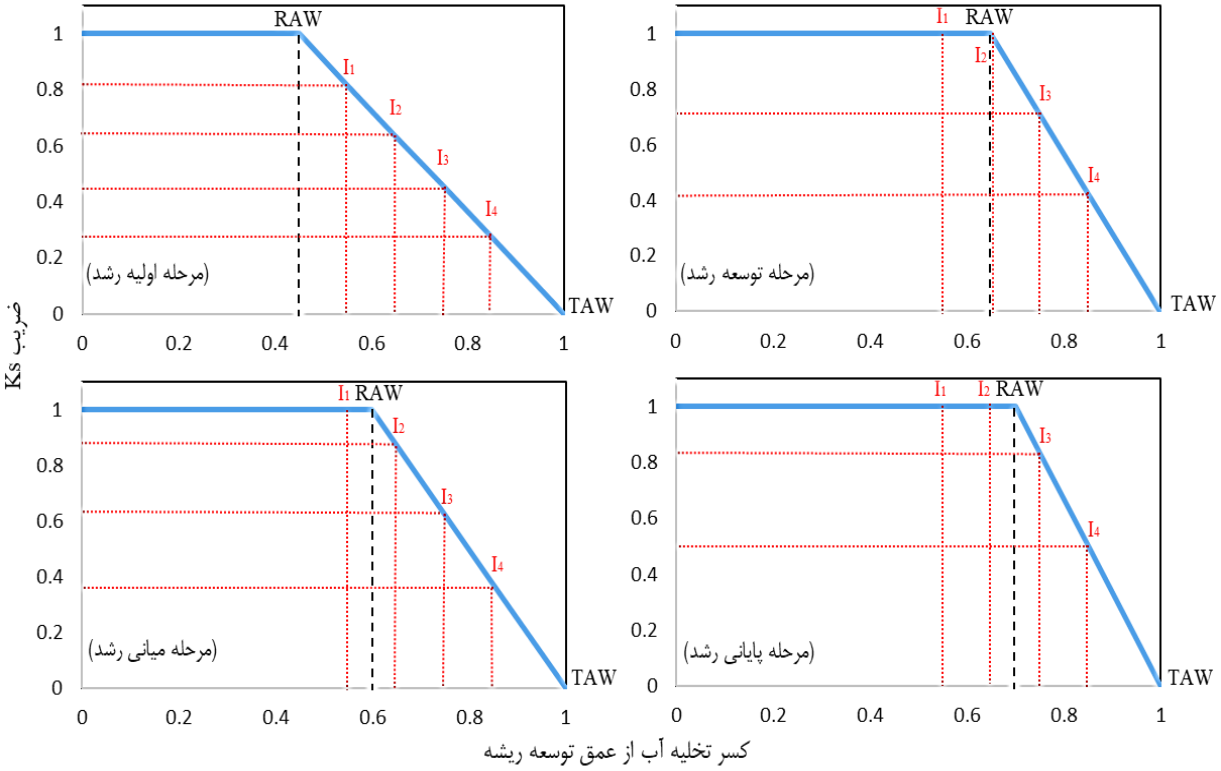
بیشترین مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاه در مرحله پایانی رشد ثبت شد که به دلیل رسیدگی محصول و کاهش هدایت روزنه‌ای در گیاه بود. به این ترتیب در لحظه ثبت واکنش گیاهی به تنش آبی، مقدار حد آب سهل‌الوصول در مراحل مذکور رشد به ترتیب برابر با ۴۵، ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درصد برآورد شد. مقادیر متفاوت حد آب سهل‌الوصول، نشان‌دهنده حساسیّت و واکنش متفاوت گیاه به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد ذرت بوده است. از این‌رو ثابت فرض کردن مقدار حد آب سهل‌الوصول در کل دوره رشد گیاه، باعث بروز خطا در برآورد ضریب تنش K_s خواهد شد. در برخی از پژوهش‌های گذشته نیز به متغیر بودن مقدار حد آب سهل‌الوصول در مراحل رشد ذرت اشاره شده بود. در پژوهشی در منطقه کرج، بیشینه مقدار RAW گیاه ذرت علوفه‌ای در چهار مرحله‌ی استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن، به ترتیب ۴۲/۸، ۵۹/۲، ۵۸/۹ و ۶۷/۵ درصد تعیین شد (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). طی پژوهشی در کلرادوی آمریکا گزارش شد که مقدار RAW ذرت در مراحل رشد متفاوت بود و در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۶ برگی، خمیری شدن دانه‌ها و رسیدن محصول به ترتیب ۵۰، ۶۰-۷۰، ۵۰ و ۶۰-۷۰ درصد بود (Alkaisi and broner, 2009). در پژوهش حاضر، تنوع میزان تخلیه آب خاک در تیمارها و حساسیّت متفاوت گیاه به تنش آبی در مراحل مختلف رشد وجود داشت. از این‌رو ممکن بود که در یک مرحله رشد، همه تیمارها باعث اِعمال تنش آبی بشوند و اما در مرحله رشد دیگر، فقط تعدادی از تیمارها باعث اِعمال تنش آبی بشوند. این مسئله به‌خوبی در شکل (۶) نشان داده شد.

به‌طوری‌که در مرحله اولیه رشد تیمارهای I_1، I_2، I_3 و I_4، در مرحله میانی تیمارهای I_2، I_3 و I_4 و در مراحل توسعه و پایانی رشد تیمارهای I_3 و I_4 باعث اِعمال تنش آبی بر گیاه ذرت شده است. در این شرایط، تا زمانی که آب سهل‌الوصول در عمق توسعه ریشه وجود داشت، مقدار ضریب K_s برابر با عدد یک شد و هنگامی‌که تخلیه آب خاک فراتر از حد آب سهل‌الوصول خاک بود، مقدار ضریب K_s کوچک‌تر از عدد یک شد. از این‌رو مقدار ضریب K_s در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۰/۸۱۸، ۱، ۱ و ۱ (تیمار I_1)، ۰/۶۳۶، ۱، ۰/۸۷۵ و ۱ (تیمار I_2)، ۰/۴۵۴، ۰/۷۱۴، ۰/۶۲۵ و ۰/۸۳۳ (تیمار I_3) و ۰/۲۷۲، ۰/۴۲۸، ۰/۳۷۵ و ۰/۵ (تیمار I_4) برآورد شد.

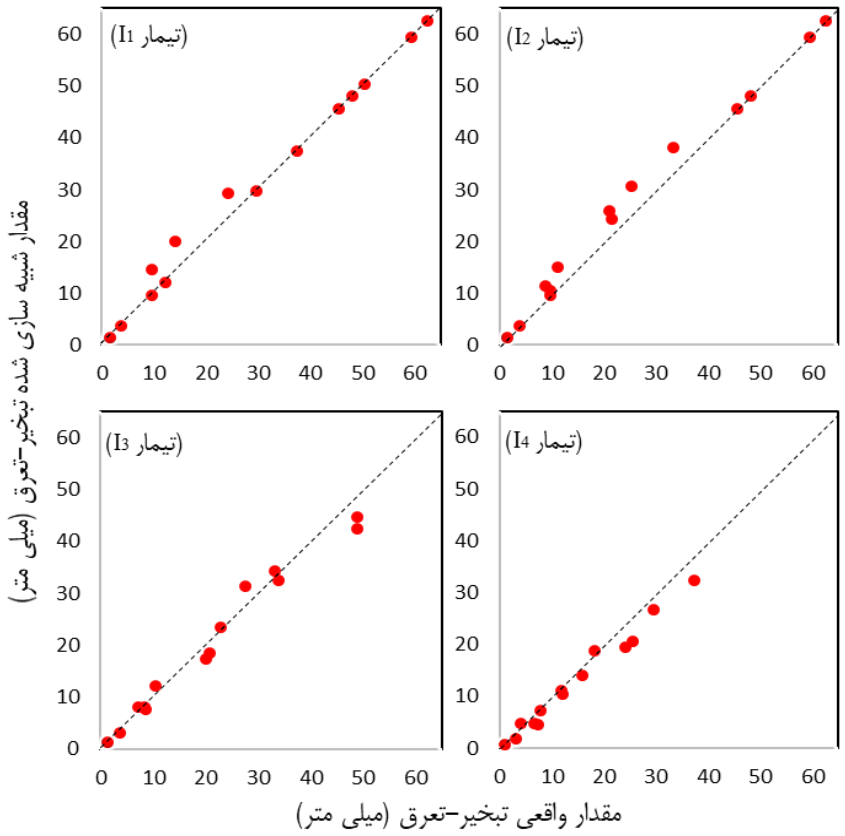
در ادامه برای شبیه‌سازی مقدار تبخیر-تعرق در تیمارهای تحت تنش آبی، مقادیر ضریب K_s (مربوط به هر تیمار و هر مرحله رشد) در مقدار تبخیر-تعرق تیمار شاهد ضرب شد. سپس مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق (در تیمارهای تنش آبی)، در شکل (۷) مقایسه شد. نتایج نشان داد که با متغیر در نظر گرفتن مقدار ضریب K_s در طول دوره رشد ذرت، برآورد مناسب‌تری از مقدار تبخیر-تعرق در شرایط تنش آبی انجام شد. به‌طوری‌که آماره‌های ارزیابی در جدول (۵)، شرایط بهینه‌تری را نسبت به جدول (۴) نشان داد. افزایش ضریب تبیین (R^2) و کارایی مدل‌سازی (EF) و کاهش میزان حداکثر خطا (ME)، ضریب باقیمانده (CRM)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و به‌خصوص کم‌تر از ۱۰ درصد شدن آماره NRMSE، همگی مؤید عملکرد بهتر شبیه‌سازی بوده است. نتیجه کلی این‌که واکنش‌های گیاهی به تنش آبی (مانند افزایش مقاومت روزنه‌ای)، می‌تواند حساسیّت مراحل مختلف رشد گیاه را تعیین کند و معیار مناسبی برای محاسبه ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پس از تخلیه آب خاک در چهار سطح (I_1) ۵۵، (I_2) ۶۵، (I_3) ۷۵ و (I_4) ۸۵ درصد کل آب در دسترس خاک، آبیاری گیاه انجام شد. در این شرایط، واکنش‌های متفاوتی از سوی مقاومت روزنه‌ای گیاه ذرت نسبت به سطوح تخلیه آب خاک، در مراحل مختلف رشد ذرت ثبت شد. از این‌رو حساسیّت گیاه ذرت به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد متفاوت بود. به‌طوری‌که حد آب سهل‌الوصول در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۴۵، ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درصد برآورد شد.



شکل ٦- موقعیت تیمارهای پژوهش بر روی منحنی ضریب K_s، در مراحل مختلف رشد ذرت



شکل ۷- ارتباط بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تبخیر-تعرق بر اساس حد آب سهل‌الوصول متغیر در دوره رشد

جدول ۵- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار ضریب Ks در تخمین مقدار تبخیر-تعرق ذرت (در شرایط حد آب سهل‌الوصول متغیر در دوره رشد)

نام تیمار	CRM	EF	R^2	RMSE	ME	NRMSE
I_1	-۰/۰۳۹	۰/۹۸۵	۰/۹۸۹	۲/۴۶	۵/۸۶	۰/۰۸۴
I_2	-۰/۰۷	۰/۹۸	۰/۹۸۹	۲/۷۶	۵/۳۴	۰/۱۰۷
I_3	۰/۰۳۶	۰/۹۷	۰/۹۷۷	۲/۶	۶/۳۱	۰/۰۹۳
I_4	۰/۱۳۲	۰/۹۳۵	۰/۹۸	۲/۶۸	۵/۰۵	۰/۰۹۸

به دلیل کوچک بودن اندام‌های گیاهی (به‌خصوص برگ‌های گیاه) در مرحله اولیه رشد و رسیدگی (تکامل رشد) گیاه در مرحله پایانی، میزان تبخیر-تعرق در مراحل مذکور کم‌تر بود. اما به علت گستردگی و رشد سریع اندام‌های گیاه در مرحله توسعه و انجام فرایند گل‌دهی و میوه دهی در مرحله میانی رشد، میزان تبخیر-تعرق ذرت در آن مراحل رشد بیشتر بود. در این شرایط، ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) یک‌بار به‌صورت متغیر (در چهار مرحله رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی) برآورد شد و بار دیگر به‌طور ثابت در کل دوره رشد ذرت در نظر گرفته شد. مقادیر تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای تنش آبی از طریق مقادیر ضرایب K_s (در روش‌های مذکور) برآورد شد و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگر حد آب سهل‌الوصول و ضریب K_s در کل دوره رشد ثابت باشد، تخمین مقدار تبخیر-تعرق گیاه (تحت تنش) در مراحل حساس توسعه و میانی رشد ذرت، چندان قابل‌قبول نخواهد بود. متوسط مقدار آماره‌های EF، R^2، CRM، RMSE، ME و NRMSE برای روش ضریب K_s ثابت، به ترتیب برابر با ۰/۵۳۳، ۰/۸۹۹، ۰/۳۲۶، ۱۰/۴، ۲۲/۰۲ و ۰/۴۸۴ برآورد شد. اما با متغیر در نظر گرفتن مقدار ضریب K_s در طول دوره رشد ذرت، برآورد مناسب‌تری از مقدار تبخیر-تعرق در شرایط تنش آبی انجام شد. به‌طوری‌که متوسط مقدار آماره‌های مذکور برای روش ضریب K_s متغیر، به ترتیب برابر با ۰/۹۶۸، ۰/۹۸۴، ۰/۰۱۴، ۲/۶۲، ۵/۶۴ و ۰/۰۹۵ محاسبه شد. نتیجه کلی پژوهش حاضر این بود که با در نظر گرفتن حساسیّت مراحل رشد ذرت، امکان برآورد دقیق‌تر ضریب تنش

تبخیر-تعرق (K_s) ذرت و تخمین تبخیر-تعرق آن در شرایط تنش آبی فراهم شد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در شرایط مدیریت کم‌آبیاری ذرت، ضرایب K_s به‌صورت جداگانه در مراحل مختلف رشد محاسبه شود.

منابع

دهقانی سانیج، ح.، کنعانی، ا. و اخوان، س. 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.

سرائی تبریزی،م.، پارسی‌نژاد، م.، لیاقت، ع. م. و بابازاده، ح. ۱۳۹۱. تعیین نیاز آبی و ضرایب گیاهی سویا در مراحل مختلف رشد. نشریه زراعت، ۹۷: ۱۱۲-۱۲۱.

سعیدی، ر.، رمضانی اعتدالی، ه.، ستوده نیا، ع.، نظری، ب. و کاویانی، ع. ۱۳۹۹. مدیریت مصرف آب شور و کود نیتروژن در کشت ذرت. مجله آب و خاک، ۳۴(۴): ۸۶۱- ۸۷۷.

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 ستوده‌نیا، ع. 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.

سیفی، ا.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانیج، ح. و ترابی، م. ۱۳۹۳. تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۴(۱): ۱۲۳-۱۳۶.

فتحی، ح.، امیری، م. ا.، ایمانی، ع.، حاجیلو، ج. و نیکبخت، ج. ۱۳۹۶. تحمل به تنش کم‌آبیاری نژادگان‌های بادام روی پایه GN15 بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و دمای برگ. مجله علوم و فنون باغبانی ایران، ۱۸(۲): ۱۵۹-۱۷۶.

کردی، م.، نصرالهی، ع. ح. و سعیدی‌نیا، م. ۱۴۰۰. برآورد شاخص‌های مختلف تنش آبی ذرت علوفه‌ای جهت مدیریت کم‌آبیاری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۸): ۲۱۸۲-۲۱۹۰.

ماهرخ، ع.، نبی‌پور، م.، روشنفکر، ح. و چوکان، ر. ۱۳۹۸. واکنش برخی صفات فیزیولوژیکی ذرت دانه‌ای به تنش خشکی و کاربرد هورمون‌های سیتوکینین و اکسین. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۲(۱): ۱-۱۵.

محمدی بهمدی، م. و آرمین، م. 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.

وردی نژاد، و.، بشارت، س.، عبقری، ه. و احمدی، ح. ۱۳۹۰. برآورد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا. مجله آب و خاک، ۲۵(۶): ۱۳۴۴- ۱۳۵۲.

همتی، ر.، مقصودی، ک. و امام، ی. ۱۳۹۳. پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه‌خشک شمال فارس. مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۴(۱۱): ۶۷-۷۴.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper No.56, 1-326.

Alkaisi, M. M. and broner, I. 2009. Crop water uuse and growth stages. Colorado state university extension. No. 4.715

Azizian, A. and Sepaskhah, A. R. 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.

Berbecel, O. and Eftimescu, M. 1972. Effect of agro meteorological conditions on maize growth management. Institute of meteorology. Bucharest.

Beer, C. E., Shrader, W. D. and Schwanke, P. K. 1967. Interrelationships of plant population and soil fertility in determining corn yields in clay loam at Ames, Iowa. Res Bull.

Doorenbos, J. and Kassam, A. K. 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33. FAO, United Nations, Rome.

Farre, I. and Faci, J. M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. Journal of agricultural water management. 96: 383–394.

Greaves, G. and Wang, Y. 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.

Hayat, F., Ahmed, M. A., Zarebanadkouki, M., Javaux, M., Cai, G. and Carminati, A. 2020. Transpiration reduction in maize (Zea maysL) in response to soil drying. Journal of frontiers in plant science, 10: 1965.

Lacerda, C. F., Ferreira, J. F. S., Liu, X. and Suarez, D. L. 2016. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress.

Trout T. J. and Dejonge K. C. 2017. Water productivity of maize in the US high plains. Journal of irrigation science, 35: 251–266.

Ucak, A. B., Ayasan, T. and Turan, N. 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.

Zhou, S., Liu, W. and Lin, W. 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.

Journal of agronomy and crop science, 202: 192-202.

Lyra, G. B., Souza, J. L., Silva, E. C., Lyra, G. B., Teodoro, I., Ferreira-Júnior, R. A. and Souza, R. C. 2016. Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil. Journal of meteorological applications. 23: 26-34.

Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodenia, A., Kaviani, A. and Nazari, B. 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.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 609-623

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۶۲۳-۶۰۹

Effect of Separate Estimation of K_s Coefficient in Maize Growth Stages on Estimating the Actual Crop Evapotranspiration Rate, under Water Stress Conditions

R. Saeidi [1]*

Recived: Mar.18, 2022 Accepted: Apr.10, 2022

Abstract

The correct estimation of crop evapotranspiration stress coefficient (K_s), causes the accurate estimation of evapotranspiration under water stress conditions. In this research, maize was planted in mini-lysimeter and its daily evapotranspiration amount was measured. The experiment was performed in a completely randomized design. Water stress was applied by soil water depletion at levels of 55% (I_1), 65% (I_2), 75% (I_3) and 85% (I_4) of total available water (TAW). In control treatment (I_0), the soil water amount was kept in readily available limit. The readily available water limit (RAW) was considered as constant in the growing season and its rate was defined as the depletion of 40% of TAW. In another method, the RAW limit was estimated separately at the maize growth stages of initial, development, mid and late. At the time of increasing the stomatal resistance of leaves (due to water stress), soil moisture was measured. The RAW limit in the mentioned growth stages, was estimated to be 45%, 65%, 60% and 70%, respectively. Therefore, the K_s coefficient was estimated in two methods of variable (in four growth stages) and the constant (in the growth period). Maize evapotranspiration amounts under water stress were estimated by multiplying the control evapotranspiration amount on the K_s coefficients. Then, the actual and estimated amounts of maize evapotranspiration (under water stress conditions) were compared. The results showed that using the constant K_s coefficient for estimating the maize evapotranspiration amount in the growth stages, was not successful. By using the variable K_s coefficient, was considered the maize sensitivity to water stress in the growth stages. Therefore, a suitable estimation of maize evapotranspiration amount was performed under water stress conditions. As a result, for determination the maize evapotranspiration amount under low irrigation management conditions, must be considered the separate K_s coefficients in the growth stages.

Keywords: Growth stage sensitivity, Stomatal resistance, Stress coefficient, Water stress

1-Ph. D. of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
(*-Corresponding author email: saeidi@org.ikiu.ac.ir)