مقاله پژوهشی نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۱/ ۱۴۰۳. ص۳۳-۴۹
https://doi.org/10.22092/jwra.2024.363300.1003

شبیه‌سازی ضریب تخلیه آب خاک بر پایه تبخیر- تعرق روزانه در مراحل مختلف رشد ذرت علوفه‌ای در دشت قزوین

رضا سعیدی*

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

دریافت: شهریور ۱۴۰۲ پذیرش: فروردین ۱۴۰۳

چکیده

برای یک برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، باید میزان تخلیه روزانه آب خاک در طول دوره رشد گیاه برآورد شود. تخلیه آب خاک وابسته به مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه است. در این پژوهش مقدار تبخیر-تعرق روزانه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در بستر کشت مینی‌لایسیمتر از طریق پایش مداوم رطوبت خاک انجام شد. مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها به‌صورت روزانه و توسط دستگاه پرومتر AP_4 اندازه‌گیری شد. حد تخلیه مجاز آب خاک در چهار مرحله رشد اولیه (C_1)، توسعه (C_2)، میانی (C_3) و پایانی (C_4)، بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها تعیین شد. به این صورت که لحظه افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها (در هر مرحله رشد) نسبت به گیاهان شاهد، زمان اتمام آب سهل‌الوصول و انجام آبیاری جدید بود. متغیر-های اصلی شامل اثر مرحله رشد بر میزان تبخیر-تعرق گیاه و ضریب تخلیه مجاز آب خاک بود که در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و با سه تکرار بررسی شد. برای شبیه‌سازی مقدار ضریب تخلیه مجاز آب خاک (P) بر اساس تبخیر-تعرق روزانه گیاه (ET_c)، از توابع (مدل‌های) رگرسیونی استفاده شد. واسنجی مدل‌ها با داده‌های روزانه در مراحل اولیه و توسعه رشد و ارزیابی مدل‌ها با داده‌های روزانه در مراحل میانی و پایانی رشد انجام شد. هم‌چنین مدل خطی فائو-۵۶ با مدل‌های معرفی‌شده در پژوهش حاضر مقایسه شد. نتایج نشان داد که نرخ ET_c ذرت (S.C 704) در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب در بازه ۴/۵ - ۱/۵، ۷/۱ - ۳/۹ ، ۷/۵ -۱/۴ و ۲/۱ - ۰/۲ میلی‌متر در روز قرار داشت. حد تخلیه مجاز آب خاک در مراحل رشد مذکور به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۶۶، ۰/۶۱ و ۰/۷ محاسبه شد. حساسیت متفاوت در مراحل رشد گیاه باعث شد که حد آب سهل‌الوصول در دوره رشد ثابت نباشد. در مراحل مختلف رشد، افزایش مقدار ET_c موجب کاهش ضریب P و کاهش مقدار ET_c، باعث افزایش ضریب P شد. توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم، توانی و خطی فائو-۵۶ بررسی شد. تابع درجه دوم با شاخص‌های آماری RMSE=۰/۰۰۰۳۵، NRMSE=۰/۰۵۴، ME=۰/۰۰۰۸، CRM=-۰/۰۰۰۰۵، R^2=۰/۹۹۹ و EF=۰/۹۹۹، مدل بهینه در تخمین ضریب P بود. دلیل ضعف عملکرد مدل فائو-۵۶، ثابت بودن حد تخلیه سهل‌الوصول آب و متوسط نرخ ET_c در فصل رشد بود. ازاین‌رو مدل فائو-۵۶ اصلاح شد. دستاورد پژوهش این بود که بدون پایش روزانه رطوبت خاک، می‌توان ضریب تخلیه مجاز آب خاک را با استفاده از ET_c برآورد نمود. این روش به‌خصوص در برنامه‌ریزی آبیاری با دورهای کوتاه، مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: حساسیت مرحله رشد، آب سهل‌الوصول، مدل‌سازی رگرسیونی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **saeidi@org.ikiu.ac.ir**

CC BY

مقدمه

شناخت روابط بین آب، خاک، گیاه، اتمسفر و واکنش‌های آن‌ها نسبت به هم در محیط کشت گیاه، می تواند برای مدیریت بهینه منابع آبی در بخش کشاورزی اثرگذار باشد. میزان آب موجود در محیط کشت گیاه، متغیر وابسته به رفتار هر یک از اجزای خاک، گیاه و اتمسفر است. به‌طوری‌که طراحی صحیح و مدیریت سامانه‌های آبیاری نوین مستلزم درک جامع زمان جذب آب از خاک توسط گیاهان است. برای این منظور، ضروری است که روابط متقابل بین اقلیم، خاک و رشد گیاه بررسی گردد (واندِربورگ و همکاران، ۲۰۲۱). در میان گیاهان زراعی ذرت دارای نیاز آبی بالاست که به علت کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک لازم هست که راه‌کارهایی برای بهبود مدیریت مصرف آب درکشت ذرت ارائه شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهشی گزارش شد که رابطه‌ی بین پتانسیل آب برگ، پتانسیل آب خاک و تعرق گیاه ذرت، به هیدرولیک خاک، ریشه گیاه و مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها بستگی دارد. ازاین‌رو پاسخ گیاه ذرت به کمبود آب خاک، کاهش مقدار جذب آب و تعرق است (هایات و همکاران، ۲۰۲۰).

بر این اساس برای انجام برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط استاندارد محیطی (بدون تنش آبی)، باید نیاز آبی گیاه در زمان مناسب خود تأمین گردد. به این معنی که مقدار آب موردنیاز گیاه همواره به‌صورت سهل‌الوصول در خاک فراهم باشد و در لحظه تخلیه آب سهل‌الوصول، آبیاری مجدد انجام گیرد. دراین‌باره نشریه فائو-۵۶ اعلام کرد که هرگاه رطوبت خاک کافی باشد (شرایط استاندارد برقرار باشد)، آب موردنیاز برای تبخیر-تعرق گیاه به‌سرعت تأمین می‌شود. در این شرایط کَسری از کل آب قابل‌استفاده خاک (TAW[1]) که بدون وجود محدودیت توسط گیاه جذب می‌شود، آب سهل‌الوصول خاک (RAW[2]) است. در این شرایط نسبت بین RAW و TAW با ضریبی بنام ضریب تخلیه آب خاک (P) تعریف می‌شود (رابطه ۱). مقدار P بین اعداد صفر و یک بوده و برای انواع گیاهان، متفاوت است (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$RAW=P.\ TAW \qquad (۱)$$

بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته، حد RAW مقدار ثابتی نداشته و متغیری است که به میزان حساسیت جذب آب در مراحل فیزیولوژیکی رشد گیاه وابسته است. در یک تحقیق در مورد حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت اعلام شد که مرحله گل‌دهی ذرت (مرحله میانی رشد) بیشترین حساسیت به تنش آبی را در میان سایر مراحل رشد داشته است (شی و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر در پژوهشی در منطقه قزوین گزارش شد که به دلیل حساسیت متفاوت در مراحل مختلف رشد ذرت، میزان جذب آب از خاک توسط گیاه (در مراحل رشد) و حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW) متفاوت بوده است (سعیدی، c ۱۴۰۱). مطالب مذکور در نشریه فائو-۳۳ نیز تأیید شد. به‌طوری‌که میزان حد تخلیه مجاز آب خاک درکشت ذرت برای مراحل رشد استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن به ترتیب ۴۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۰ درصد گزارش شد (دورنبوث و کسّام، ۱۹۷۹). در پژوهش دیگر در منطقه کرج، بیشینه مقدار حد تخلیه مجاز آب خاک گیاه ذرت در چهار مرحله‌ی استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن، به ترتیب ۴۲/۸، ۵۹/۲، ۵۸/۹ و ۶۷/۵ درصد برآورد شد (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). طی تحقیقی در کلرادوی آمریکا گزارش شد که مقدار حد تخلیه مجاز آب خاک در مراحل رشد ذرت متفاوت بود. به‌طوری‌که مقدار آن در مرحله رشد چهار برگی ۵۰ درصد، در مرحله ۱۶ برگی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد، در مرحله خمیری شدن دانه‌ها ۵۰ درصد و در مرحله رسیدن محصول بین ۶۰ تا ۷۰ درصد گزارش شد (اِل‌کیسی و برونر، ۲۰۰۹).

میزان تخلیه آب خاک یک متغیر وابسته به دو پارامتر مقدار جذب آب توسط گیاه (تعرق) و تبخیر از سطح خاک است. به‌طوری‌که در پژوهشی بر روی ذرت اعلام شد که مقدار تخلیه رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاه (با صرف‌نظر از اثرات حاشیه‌ای) وابسته به میزان

1 - Total available water, TAW
2 - Readily available water, RAW

تبخیر-تعرق روزانه گیاه است. افزایش مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه موجب کاهش آب خاک و محدود شدن میزان رطوبت سهل‌الوصول می‌گردد (سعیدی، d ۱۴۰۱). ازاین‌رو پارامتر تبخیر-تعرق روزانه گیاه در برآورد ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک (P) در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، تأثیرگذار است. در نشریه فائو-۵۶ گزارش شد که مقدار ضریب P با علامت منفی به تبخیر-تعرق روزانه گیاه وابسته است. به این معنی که افزایش تبخیر-تعرق روزانه گیاه موجب کاهش ضریب P و کاهش تبخیر-تعرق روزانه باعث افزایش ضریب P می‌شود. به‌طوری‌که مقدار ضریب P از عدد ۰/۳ برای گیاهان باریشه کم‌عمق و تبخیر-تعرق زیاد (بیش از هشت میلی متر بر روز) تا عدد ۰/۷ برای گیاهان باریشه عمیق و تبخیر-تعرق کم (کم‌تر از سه میلی‌متر بر روز) متغیر بوده است (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸). در نشریه فائو-۵۶ مقدار ضریب P (نسبت بین RAW و TAW) در طول دوره رشد گیاهان، به‌طور ثابت در نظر گرفته‌شده است. این مقدار ثابت مربوط به شرایطی است که همواره تبخیر-تعرق پنج میلی‌متر در روز، در طول دوره رشد گیاه برقرار بوده باشد؛ اما برای تبخیر-تعرق متفاوت با آن (غیر از پنج میلی‌متر بر روز) مقدار P از طریق رابطه $P=P_{constant}+0.04(5-ET_c)$ اصلاح می‌شود. در این رابطه، پارامتر $P_{constant}$ ضریب ثابت تخلیه سهل‌الوصول آب خاک در کل دوره رشد گیاه است که مقدار آن برای ذرت ۰/۵۵ گزارش‌شده است. عدد ۰/۰۴ یک ضریب ثابت، عدد پنج بیانگر متوسط میزان تبخیر-تعرق روزانه گیاه در کل فصل رشد و پارامتر ET_c معرف تبخیر-تعرق روزانه گیاه است. ازاین‌رو برای مقدار P اصلاح‌شده محدوده‌ای بین ۰/۱ تا ۰/۸ در نظر گرفته‌شده است. دراین‌باره شکل (۱) که نشان‌دهنده تغییرات مقدار P نسبت به سطوح مختلف تبخیر-تعرق گیاهان است، ارائه‌شده است (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸)؛ بنابراین شکل (۱) نشان می‌دهد که برای شرایط تبخیر-تعرق پنج میلی متر در روز، ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک (P) عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ اما افزایش یا کاهش میزان تبخیر-تعرق روزانه گیاه، نقشی معکوس در مقدار ضریب P می‌گذارد.

شکل ۱- میزان ضریب تخلیه آب برای سطوح مختلف تبخیر-تعرق (فائو-۵۶)

پرواضح است که اصل رابطه اصلاحی فائو-۵۶ یک رابطه کلی بوده و برخی از جزئیات در آن لحاظ نشده است. نکته چالش‌برانگیز این است که در رابطه مذکور، متوسط تبخیر-تعرق روزانه در کل دوره رشد و برای همه گیاهان، عدد پنج میلی‌متر در روز بوده و هم‌چنین ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک، دارای مقدار ثابت در طول دوره رشد بوده است. البته مؤلفه‌های مؤثری مانند شرایط اقلیمی هر منطقه، مشخصات خاک، نوع گیاه و مراحل مختلف رشد گیاه باعث می‌شوند که رابطه مذکور قابلیت تعمیم به شرایط واقعی را نداشته نباشد. در نظر است که رابطه ارائه‌شده در نشریه فائو-۵۶، برای یک اقلیم خاص (منطقه قزوین)، خاک، گیاه مشخص (ذرت) و مراحل

فیزیولوژیکی رشد گیاه، اصلاح گردد. ازاین‌رو هدف از پژوهش حاضر، برآورد ضریب P با توجه به نرخ تبخیر- تعرق روزانه ذرت (در منطقه قزوین) است. این کار از طریق واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های (توابع) رگرسیونی برای شرایط حاکم در پژوهش، انجام می‌گیرد. به این صورت که از طریق مدل‌های رگرسیونی و با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت تبخیر-تعرق روزانه و حد تخلیه مجاز آب خاک در مراحل رشد گیاه ذرت، میزان آب قابل تخلیه از خاک شبیه‌سازی می‌شود. سابقه تخمین متغیرهای گیاهی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، در پژوهش‌های گذشته نیز وجود داشته است. در تحقیقی بر روی ذرت، رابطه خطی $ET=-0.717\ EC+15.07$ بین مقدار تبخیر-تعرق و هدایت الکتریکی آب ارائه شد (لاکردا و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیق دیگر، عملکرد محصول گندم نسبت به سه سطح آبیاری (۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر) و چهار سطح شوری (۰/۸، ۲، ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر)، با توابع خطی، لگاریتمی، درجه دوم و نمایی (در قالب تابع تولید آب-شوری-عملکرد) مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که تابع درجه دوم مدل بهینه تولید بوده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۲). در منطقه قزوین، تیمارهای شوری آب آبیاری (EC_w) و کود نیتروژن (F) بر روی گیاه ذرت مطالعه شد. نتایج نشان داد که 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 تخمین مقدار تبخیر-تعرق ذرت (میلی‌متر) در شرایط وجود تنش‌های شوری و حاصلخیزی بود (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). به‌طورکلی با استفاده از نتایج حاصل این امکان وجود دارد که بدون پایش روزانه مقدار رطوبت خاک، حد تخلیه مجاز آب خاک را به‌صورت روزانه تعیین نمود. به‌طوری که برای شرایط کشت گیاهان باریشه‌های کم‌عمق و یا کاربرد سامانه‌هایی با دورهای آبیاری کوتاه‌مدت، قابلیت بهره‌برداری خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

تشریح کلیات پژوهش

در سال ۱۴۰۰ پژوهشی بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مزرعه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) شهر قزوین (با موقعیت جغرافیایی "۲۳ '۱۹ °۳۶ عرض شمالی و "۳۸ '۰۰ °۵۰ طول شرقی) انجام شد. به‌منظور امکان کنترل روزانه رطوبت خاک و تبخیر-تعرق گیاه، بستر کشت گیاهان، مینی‌لایسیمترهای استوانه‌ای (به تعداد ۱۵ عدد) با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بود (شکل ۲). در پژوهش‌های دیگر نیز، از مینی‌لایسیمترهایی با ابعاد مذکور برای بررسی میزان اجزاء تبخیر-تعرق ذرت استفاده شد (سعیدی، ۱۴۰۰). در کف هر مینی‌لایسیمتر لوله‌ای سوراخ‌دار (به‌عنوان زهکش) تعبیه شد و شن روی آن ریخته شد تا حجم آب مصرفی در آبیاری قابل مدیریت باشد. خاکی با مشخصات جدول (۱) داخل مینی لایسیمترها قرار داده شد که مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه بادی و کود حیوانی با نسبت ۳، ۱ و ۱ بود. با یک آزمایش مشخص شد که خاک با بافت لوم شنی (خاک آزمایش) پس از انجام عملیات شخم در مزرعه و اولین آبیاری، دارای جرم مخصوص ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. ازاین‌رو خاک به‌صورت لایه‌لایه داخل مینی‌لایسیمترها ریخته شد و به تراکم مذکور رسانده شد (جدول ۱). سپس از طریق یک‌بار آبیاری خاک، از ایجاد هرگونه جریان ترجیحی و نشست احتمالی خاک در دوره رشد گیاه جلوگیری شد. بذور گیاهان در تاریخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۱ کاشته شد و محصول ذرت در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۱۶ به‌صورت علوفه‌ای برداشت شد. فاصله زمانی بین کاشت تا برداشت محصول ۱۴۰ روز بود که ضمن توجه به رقم ذرت و اقلیم منطقه، بازه زمانی دوره رشد ذرت با گزارش نشریه فائو-۵۶ مطابقت داشت (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸). شیوه کاشت بذور به این صورت بود که در هر مینی‌لایسیمتر تعداد سه بذر به‌صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد. پس از جوانه‌زنی بذور، بهترین گیاه نگه‌داشته شد و سایر گیاهان از سطح خاک

حذف شدند. در مورد تأثیر بافت خاک بر اجرای پژوهش حاضر عرض می‌شود که ضریب تخلیه مجاز آب خاک (P) ، نسبت بین مقدار آب سهل‌الوصول (RAW) و کل آب در دسترس خاک (TAW) است (رابطه ۱؛ RAW=P.TAW). برای تخلیه آب خاک در دو حد RAW و TAW، یک فشار مکشی (منفی) مشخص بر خاک اعمال می‌شود که به‌طور متوسط حدود ۵-۶ اتمسفر برای حد RAW و ۱۵ اتمسفر برای حد TAW است (علیزاده، ۱۳۸۵). البته فشارهای مکشی مذکور، به‌طور دقیق‌تر و بسته به نوع گیاه می‌تواند اندکی متفاوت باشد؛ اما نکته مهم این است که معیار اصلی برای تعیین ضریب P، اعمال یک فشار مکشی مشخص بر خاک در دو حد RAW و TAW است. به‌این‌ترتیب اگر بافت خاک سبک باشد، مقدار آب زیادتری و اگر بافت خاک سنگین باشد، مقدار آب کم‌تری در هر دو حد RAW و TAW از خاک اشباع خارج می‌شود. درنتیجه از تقسیم RAW بر TAW یک عدد بی‌بُعدی حاصل می‌شود که مقدار آن (ضریب P) در هر نوع بافت خاکی یکسان خواهد بود. به‌این‌ترتیب صورت که برای تعیین ضریب P یک گیاه مشخص، اثر بافت خاک خنثی می‌گردد. به دلایل مذکور، در مراجع معتبر علمی مانند نشریه فائو-۵۶ نیز، هیچ اثری از بافت خاک برای تعیین ضریب P در نظر گرفته نشده است (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸).

شکل ۲- تصویری از مشخصات مینی‌لایسیمتر

جدول ۱- مشخصات همه لایه‌های خاک در مینی‌لایسیمتر

پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	$dS.m^{-1}$	۰/۴۸
اسیدیته (pH)	-	۷/۱
بافت خاک	-	لوم شنی
شن	٪	۵۷
سیلت	٪	۳۳
رس	٪	۱۰
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	٪	۲۴
رطوبت وزنی حد پژمردگی	٪	۱۰/۳
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۳۶

معرفی تیمار

این پژوهش برای تخمین ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک (P) با در نظر گرفتن مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه ذرت (ET_c)انجام شد. ازاین‌رو دو پارامتر مذکور تحت تأثیر حساسیت‌های فیزیولوژیکی در مراحل مختلف رشد ذرت قرار داشتند. به‌این‌ترتیب منظور فاکتور اصلی موردنظر شامل اثر حساسیت چهار مرحله اولیه (C_1)، توسعه (C_2)، میانی (C_3) و پایانی (C_4) رشد گیاه ذرت بر میزان تبخیر-تعرق و حد تخلیه مجاز آب خاک بود. در مراحل مختلف فیزیولوژیکی رشد گیاه، میزان تبخیر-تعرق و حد تخلیه مجاز آب خاک متفاوت بود. ازاین‌رو در تحلیل آماری اثر حساسیت مراحل رشد (تک عامل اصلی) بر دو صفت مذکور، در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و با سه تکرار بررسی شد. به‌این‌ترتیب دلیل که نشان داده شود میزان تبخیر-تعرق گیاه و حد تخلیه مجاز آب خاک در طول دوره رشد، در چه سطحی دارای اختلاف معنی‌دار و یا غیر معنی‌دار بوده است.

در منطقه موردمطالعه، چهار مرحله رشد ذرت به‌این‌ترتیب دارای بازه زمانی ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز (مجموعاً ۱۴۰ روز) بودند. طبق تعریف نشریه فائو-۵۶، مرحله اولیه رشد گیاه از زمان کاشت بذر تا پوشیدگی ۱۰ درصدی سطح زمین توسط اندام‌های گیاهی را شامل می شود. مرحله توسعه گیاه از ادامه مرحله قبل آغازشده و تا تکمیل رشد رویشی گیاه را در برمی‌گیرد. مرحله میانی رشد از زمان رشد زایشی گیاه (گل‌دهی) شروع‌شده و تا ابتدای رسیدن بیولوژیک محصول ادامه دارد. مرحله پایانی رشد نیز از رسیدگی بیولوژیک محصول تا خشک شدن طبیعی اندام‌های گیاه (پایان عمر گیاه) را شامل می‌شود (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸). ازاین‌رو روش تعیین بازه زمانی مراحل رشد به‌این‌ترتیب صورت بود که از جوانه‌زنی بذر تا زمانی که ۱۰ درصد پوشیدگی سطح زمین بااندام‌های گیاهی مُحرز شود، از سطح خاک و گیاه عکس گرفته شد. به‌طوری‌که از روی عکس‌های روزانه، لحظه ۱۰ درصد پوشیدگی سطح زمین و پایان مرحله اولیه رشد شناسایی شد. در ادامه مراحل رشد نیز ثبت زمانی رویدادهای مهم فیزیولوژیکی گیاه مانند زمان گل‌دهی، ظهور بلال، سفت شدن دانه‌ها، خشک شدن برگ‌ها و سایر اندام‌ها موجب شد که بتوان بازه زمانی مراحل توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت را بر اساس تعریف نشریه فائو-۵۶ تعیین نمود.

برآورد نرخ تبخیر-تعرق

برای اندازه‌گیری میزان تبخیر-تعرق گیاه و تعیین حجم آب آبیاری، نیاز به پایش مقدار رطوبت روزانه خاک بود. برای این کار با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دِلتاتی (ΔT) مدل HH_2، مقدار رطوبت روزانه خاک در هر مینی‌لایسیمتر اندازه‌گیری شد. در مورد نحوه کار با دستگاه رطوبت‌سنج نیز قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت‌شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که در یک نمودار، داده‌های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده‌های ثبت‌شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی اِشِل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تهیه شد.

برای برآورد تبخیر- تعرق روزانه گیاه، مقدار رطوبت خاک در اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵ و ۴۵-۶۰ سانتی‌متری هر مینی‌لایسیمتر اندازه‌گیری شد؛ زیرا از مراحل اولیه رشد تا بلوغ گیاه، عمق توسعه ریشه گیاه متغیر بود و جذب آب در ابتدای رشد از لایه‌های اولیه خاک آغاز می‌شد و در دوران بلوغ، کل محدوده مینی لایسیمتر را دربَر داشت. به‌طور متوسط عمق ریشه ذرت در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب حدود ۲۴، ۴۵، ۵۶ و ۶۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. ازاین‌رو بیلان رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک بررسی شد و با استفاده از رابطه (۲) مجموع مقادیر تبخیر- تعرق در چهار لایه مینی‌لایسیمتر، به‌عنوان مقدار تبخیر- تعرق روزانه گیاه محاسبه شد (سعیدی، b ۱۴۰۱).

$$(ET_c)_i = \sum_{j=1}^{j=4}\left[\frac{(\theta_{i-1}-\theta_i)}{100} \times \rho b \times D_j\right] \quad (۲)$$

$(ET_c)_i$: تبخیر- تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر) در لایه j، θ: مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i: شمارنده روزهای بین دو آبیاری در لایه j، $(\theta_{i-1}-\theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρb: چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب)، D_j: عمق یک‌لایه خاک (لایه j) در مینی‌لایسیمتر (۱۵۰ میلی‌متر)، j: شمارنده لایه‌های خاک در مینی‌لایسیمتر که تعداد چهار لایه در نظر گرفته‌شده بود (j=1 to 4). لازم به ذکر است که ارتفاع چهار لایه ۱۵ سانتی‌متری خاک جمعاً می‌شود ۶۰ سانتی‌متر؛ اما ارتفاع هر مینی‌لایسیمتر ۷۰ سانتی‌متر بود که ۱۰ سانتی‌متر زیرین مینی‌لایسیمتر اختصاص داده شد به محل نصب لوله زهکش و فیلتر ماسه‌ای اطراف آن.

برنامه‌ریزی آبیاری

در این پژوهش زمان انجام آبیاری در هر مرحله رشد، بر اساس حد تخلیه مجاز رطوبت خاک تعیین شد. به‌طوری‌که شرایط استاندارد رطوبت خاک فراهم و آب به‌صورت سهل‌الوصول در دسترس گیاه بوده باشد. حد تخلیه مجاز رطوبت خاک بر اساس واکنش روزنه‌های گیاه به آغاز تنش آبی تعیین شد که با افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها نسبت به گیاهان شاهد (تحت کنترل) همراه بود؛ زیرا اگر آب کافی برای تعرق گیاه در دسترس نباشد، مقدار مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ گیاه افزایش‌یافته و درنهایت روزنه‌های برگ مسدود می‌شوند (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳). افزایش میزان دو ثانیه بر سانتی‌متر در مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاه ذرت (نسبت به گیاهان تحت کنترل) آستانه آغاز تنش آبی بود که در پژوهش مانوئل و همکاران (۱۹۷۱) نیز تأیید شد. برای این کار یک تیمار شاهد در نظر گرفته شد که در آن عملیات آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC[3]) و نقطه پژمردگی دائم (PWP[4]) انجام شد؛ زیرا در پژوهشی در منطقه قزوین گزارش شد که حد رطوبت سهل‌الوصول خاک (RAW) حتی در مراحل حساس رشد ذرت، بیش از ۰/۴ است (سعیدی، a ۱۴۰۱). از سوی دیگر برای تعیین حد RAW در مراحل رشد C_1 الی C_4، مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاهان تحت تیمار و شاهد به‌صورت روزانه و توسط دستگاه پرومتر AP_4 اندازه‌گیری شد. تیمار شاهد تحت رطوبت سهل‌الوصول قرار داشت و سایر تیمارها با کاهش روزانه رطوبت خاک همراه بودند. با محدود شدن دسترسی گیاه به آب خاک و کاهش جذب آب (در تیمارها)، مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه افزایش یافت. در این شرایط لحظه افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاهان تحت تیمار نسبت به گیاهان شاهد، به‌عنوان زمان اتمام آب سهل الوصول خاک در نظر گرفته شد. در این زمان قبل از این‌که آبیاری انجام شود، مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شد و از طریق رابطه (۳)، حد رطوبت سهل‌الوصول خاک در مرحله رشد موردنظر برآورد و بلافاصله آبیاری انجام شد. لازم به ذکر است که برای این کار، مقدار رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. به‌منظور اطمینان بیشتر نسبت به تشخیص محدوده عمق توسعه ریشه گیاهان، مینی‌لایسیمترهای جداگانه‌ای در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه در مرحله رشد مدنظر، عمق آن‌ها اندازه‌گیری شد.

$$RAW = \left(\frac{\theta_{FC}-\theta_m}{\theta_{FC}-\theta_{PWP}}\right) \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، RAW: معرف حد تخلیه رطوبت سهل‌الوصول خاک (اعشاری)، θ_m: مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد) در زمان افزایش مقاومت روزنه‌ای گیاه و قبل از انجام آبیاری، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد) و θ_{PWP}: رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) است. برای تعیین مقدار θ_{FC} و θ_{PWP}، خاک اشباع در دستگاه صفحات فشاری (به ترتیب تحت‌فشارهای مکشی یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر) قرار داده شد و سپس درصد رطوبت وزنی خاک با استفاده از دستگاه آون (گرم‌خانه) اندازه‌گیری و در جدول (۱) ارائه شد.

3 -Field capacity, FC
4- Permanent wilting point, PWP

در طول دوره رشد گیاه، بارندگی اتفاق نیفتاد و نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق آبیاری تأمین شد. هدف از آبیاری نیز تأمین کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه بود. ازاین‌رو بر اساس کمبود مقدار رطوبت خاک $(\theta_{FC} - \theta_m)$ در عمق توسعه ریشه، چگالی ظاهری و مساحت سطح خاک در مینی‌لایسیمتر، حجم آب آبیاری از طریق رابطه (۴) محاسبه شد. به دلیل تأمین کمبود رطوبت خاک تا حد FC، آب اضافی برای تبدیل به زهاب و خروج از انتهای مینی‌لایسیمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود. آب موردنیاز برای آبیاری از آب باکیفیت چاه با هدایت الکتریکی ۰/۵۱ دسی‌زیمنس بر متر تأمین شد که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه شد. برای اطمینان بیشتر، مسئله تجمع تدریجی املاح حاصل از آب آبیاری در خاک نیز بررسی شد. به‌طوری‌که در پایان فصل رشد و پس از برداشت محصول، میزان شوری همه لایه‌های خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میزان شوری عصاره اشباع خاک حدود یک دسی زیمنس بر متر بود. بر اساس گزارش نشریه فائو-۲۹ آستانه تحمل ذرت به شوری خاک مقدار ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر بود (آیرز و وِستکات، ۱۹۸۵). لذا با توجه به میزان شوری عصاره اشباع خاک در پایان دوره کشت، مشخص شد که هیچ تنش شوری بر گیاه اعمال نشده است.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_m)}{100} \times \rho b \times D_{rz} \times A \qquad (۴)$$

V: حجم آب آبیاری (m^3)، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_m: رطوبت وزنی خاک (درصد) بلافاصله قبل از انجام آبیاری، ρb: چگالی ظاهری خاک ($g.cm^{-3}$)، D_{rz}: عمق ریشه گیاه (m) و A: مساحت سطح مقطع مینی‌لایسیمتر (m^2).

جدول ۲- کیفیت و میزان عناصر موجود در آب آبیاری

هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	سدیم ($meq.L^{-1}$)	منیزیم ($meq.L^{-1}$)	کلسیم ($meq.L^{-1}$)	پتاسیم ($meq.L^{-1}$)	سولفات ($meq.L^{-1}$)	بی‌کربنات ($meq.L^{-1}$)	کربنات ($meq.L^{-1}$)	کلر ($meq.L^{-1}$)
۰/۵۱	۲/۱۷	۰/۹۲	۱/۴۳	۰/۳۱	۱/۵۱	۱/۱۸	۰/۵۴	۱/۸۳

واسنجی مدل‌های رگرسیونی و ارزیابی آن‌ها

در پژوهش حاضر معادلاتی باهدف تخمین ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک (P) بر اساس نرخ تبخیر-تعرق روزانه گیاه (ET_c) به‌کاربرده شد. به‌طوری‌که ضریب P یک متغیر وابسته به پارامتر ET_c (متغیر مستقل) بود. معادلات کاربردی شامل رابطه خطی ارائه‌شده در نشریه فائو-۵۶ (رابطه ۵) و روابط خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی (به ترتیب روابط ۶ الی ۱۰) در پژوهش حاضر بود که در قالب مدل‌های رگرسیونی مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۳). بین رابطه (۵) با روابط (۶) الی (۱۰) تفاوت‌های کلی وجود داشت. در رابطه فائو-۵۶ (رابطه ۵) پارامتر P_c[5] بیانگر یک حد ثابت برای تخلیه سهل‌الوصول آب در کل دوره رشد ذرت، با مقدار عددی ۰/۵۵ بود (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸). عدد پنج در معادله مذکور (رابطه ۵) نیز نشان‌دهنده میزان متوسط تبخیر-تعرق روزانه در کل دوره رشد گیاه ذرت بود که این عدد برای همه گیاهان و در کل دوره رشد عدد ثابتی فرض شده بود؛ اما در روابط (۶ الی ۱۰) ارائه‌شده در پژوهش حاضر و با توجه به حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت، مقادیر متغیر برای حد تخلیه سهل‌الوصول آب در هر مرحله رشد (P_{c-i}) در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که P_{c-i} همان پارامتر RAW بود که بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای گیاه و در هر مرحله رشد به‌صورت مُجَزا برآورد شد. از سوی دیگر به‌جای عدد پنج که در معادله فائو-۵۶ استفاده شد، متوسط میزان تبخیر-تعرق روزانه در مرحله رشد مدنظر (ET_{c-i}) قرار داده شد. ازاین‌رو حساسیت‌های مربوط به تبخیر-تعرق روزانه و حد تخلیه سهل‌الوصول آب در مراحل رشد ذرت در نظر گرفته شد و از توابع رگرسیونی متنوّع برای مدل‌سازی ضریب P بر اساس پارامتر ET_c استفاده شد.

5 - P constant

واسنجی ضرایب مجهول (A و B) در روابط (۶) الی (۱۰)، از طریق نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای واسنجی و ارزیابی منطقی مدل‌های رگرسیونی، از داده‌های غیرتکراری استفاده شد. به‌طوری‌که با استفاده از داده‌های واقعی P و ET_c در دو مرحله اولیه (C_1) و توسعه رشد (C_2) گیاه، مدل‌ها واسنجی شد و ضرایب مجهول A و B تعیین شد. سپس از داده‌های واقعی P و ET_c در مراحل میانی (C_3) و پایانی (C_4) رشد برای ارزیابی مدل‌های مذکور (واسنجی شده) استفاده شد. در مرحله ارزیابی مدل‌ها، داده‌های واقعی ET_c (در مراحل میانی و پایانی رشد) در مدل‌ها قرار داده شد و مقادیر تئوری ضریب P شبیه‌سازی شد. سپس داده‌های ضریب P در دو حالت واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌ها، با یکدیگر مقایسه شدند و اعتبار مدل‌های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل روابط (۱۱) الی (۱۶) استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳- توابع کاربردی و آماره‌های ارزیابی آن‌ها

شماره رابطه	نام تابع	معادله مربوطه
۵	خطی (فائو-۵۶)	$P= P_c + 0.04 (5- ET_c)$
۶	خطی	$P= P_{c-i} + A (ET_{c-i} - ET_c)$
۷	نمایی	$P= P_{c-i} . e^{A(ET_{c-i}-ET_c)}$
۸	لگاریتمی	$P= P_{c-i} + A. \ln (ET_{c-i} - ET_c)$
۹	درجه دوم	$P= P_{c-i} + A (ET_{c-i} - ET_c) + B (ET_{c-i} - ET_c)^2$
۱۰	توانی	$P= P_{c-i} (ET_{c-i} - ET_c)^A$
۱۱	آماره حداکثر خطا	$ME = \max\lvert P_1 - O_1\rvert_{1=1}^{n}$
۱۲	آماره ریشه میانگین مربعات خطا	$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}}$
۱۳	آماره ریشه میانگین مربعات خطای نرمال	$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{\bar{O}}$
۱۴	آماره ضریب تبیین	$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O}).(P_i-\bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2.\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}$
۱۵	آماره کارایی مدل‌سازی	$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2-\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}$
۱۶	آماره ضریب باقی‌مانده	$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i-\sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i}$

در روابط (۵) الی (۱۰)؛ P: ضریب تخلیه سهل الوصول آب خاک (بی‌بُعد)، P_c: حد ثابت آب سهل الوصول در کل دوره رشد گیاه است که در نشریه فائو-۵۶ مقدار آن برای ذرت ۰/۵۵ گزارش‌شده است، ET_c: تبخیر-تعرق روزانه (میلی‌متر)، P_{c-i}: حد آب سهل‌الوصول در مرحله رشد مدنظر (بی‌بُعد)، i: شمارنده مراحل رشد گیاه (شامل چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد)، A و B: ضرایب ثابت معادلات و ET_{c-i}: متوسط تبخیر-تعرق روزانه در مرحله رشد مدنظر (میلی‌متر) بود.

روابط (۱۱) الی (۱۶) به ترتیب معرف ME[۶]: حداکثر خطا، RMSE[۷]: ریشه میانگین مربعات خطا، NRMSE[۸]: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، R^2[۹]: ضریب تبیین، EF[۱۰]: کارایی مدل‌سازی و CRM[۱۱]: ضریب باقیمانده بود. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره‌های RMSE، NRMSE، ME و CRM و عدد نزدیک به یک برای آماره‌های R^2 و EF در هر مدل،

6- Maximum error, ME
7 - Root of mean squared error, RMSE
8 - Normalized root of mean squared error, NRMSE
9 - Coefficient of determination, R^2
10 - Efficiency of modeling, EF
11 - Coefficient of residual mass, CRM

نشان‌دهنده بهینه بودن آن مدل برای تخمین مقدار ضریب تخلیه سهل‌الوصول آب خاک بود. در روابط (۱۱) الی (۱۶)، حروف n، O^{12} و P^{13} به ترتیب بیانگر تعداد تیمارها، داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌ها بود.

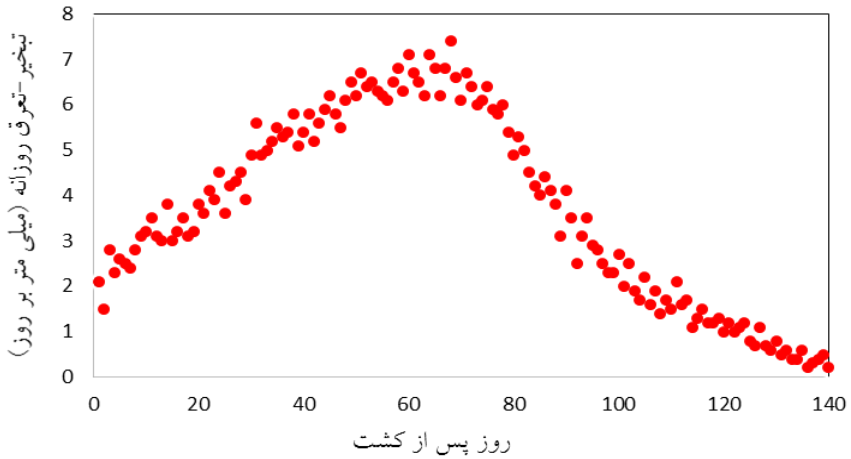
نتایج و بحث

تبخیر-تعرق

مقادیر روزانه تبخیر-تعرق گیاه ذرت از طریق رابطه (۲) برآورد شد و در شکل (۳) نمایش داده شد. با توجه به شکل (۳) نرخ تبخیر-تعرق گیاه ذرت در طول دوره رشد یکسان نبود و مقدار آن در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب در بازه ۱/۵-۴/۵، ۳/۹-۷/۱، ۱/۴-۷/۵ و ۰/۲- ۲/۱ میلی‌متر بر روز قرار داشت. متوسط تبخیر-تعرق روزانه ذرت در مراحل رشد مذکور به ترتیب ۳/۱، ۵/۸، ۴ و ۱ میلی‌متر بر روز برآورد شد و جدول (۴) نشان داد که اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین آن‌ها وجود داشت. در سامانه نیاز آبی گیاهان کشور متوسط تبخیر-تعرق روزانه برای منطقه قزوین در مراحل رشد مذکور به ترتیب ۳/۴، ۶/۲، ۴/۷ و ۱/۱۵ میلی‌متر بر روز برآورد شد که به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود. دلیل تفاوت معنی‌دار بین مقادیر تبخیر-تعرق روزانه در مراحل رشد این بود که مرحله اولیه رشد مربوط به آغاز رشد و نمو گیاه بود و در مرحله پایانی نیز رسیدگی فیزیولوژیک و تکمیل فرآیند رشد اتفاق می‌افتاد. ازاین‌رو مقدار تبخیر- تعرق گیاه در دو مرحله رشد مذکور، کم بود؛ اما در مرحله توسعه، رشد سریع اندام‌های گیاه و نیاز به تعرق زیاد و در مرحله میانی رشد، آغاز گل‌دهی گیاه، گرده‌افشانی و تشکیل بلال، دلیل بالا بودن میزان تبخیر-تعرق بود (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶؛ فار و فیسی، ۲۰۰۹؛ همتی و همکاران، ۱۳۹۳).

از سوی دیگر مقادیر تجمعی تبخیر-تعرق روزانه ذرت در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب برابر با ۷۸، ۲۳۲، ۱۸۲ و ۲۷ میلی‌متر برآورد شد. مجموع تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد مقدار ۵۱۹ میلی‌متر برآورد شد که عملکرد ماده خشک گیاهی متناسب با آن برای یک بوته در مقیاس مینی‌لایسیمتر، عدد ۱۴۴ گرم بود. به‌طور مشابه در منطقه کرج پژوهشی بر روی ذرت انجام شد و میزان تبخیر-تعرق گیاه در سیستم آبیاری قطره‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق ذرت در مراحل اولیه، توسعه و میانی رشد به ترتیب ۷۹، ۱۴۲ و ۱۵۵ محاسبه شد (دهقانی‌سانیج و همکاران، ۱۳۹۶). ازاین‌رو نتایج پژوهش مذکور به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود. به‌طورکلی بررسی میزان تبخیر-تعرق روزانه ذرت نشان داد که نمی‌توان یک حد ثابتی از میزان تبخیر-تعرق، در طول دوره رشد ذرت در نظر گرفت؛ زیرا تفاوت معنی‌دار بین مقادیر تبخیر-تعرق روزانه ذرت در طول دوره رشد وجود داشت. ازاین‌رو مدل خطی فائو-۵۶ (رابطه ۵) که متوسط تبخیر-تعرق گیاهان در کل دوره رشد را عدد پنج میلی‌متر در روز در نظر می‌گیرد، چندان با شرایط واقعی مطابقت نداشته و نیاز به اصلاح آن مشاهده می‌شود.

12 - Observed, O
13 - Predicted, P



شکل ۳- مقدار تبخیر-تعرق روزانه ذرت در طول فصل کشت

جدول ۴- تجزیه واریانس مقادیر تبخیر-تعرق گیاه و حد تخلیه مجاز آب خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		تبخیر-تعرق	حد تخلیه مجاز آب خاک
مراحل رشد	۳	۳۳/۱**	۰/۳۶**
خطا	۶	۱/۲۳	$۱/۶\times۱۰^{-۵}$
ضریب تغییرات (٪)		۵/۰۱	۴/۷

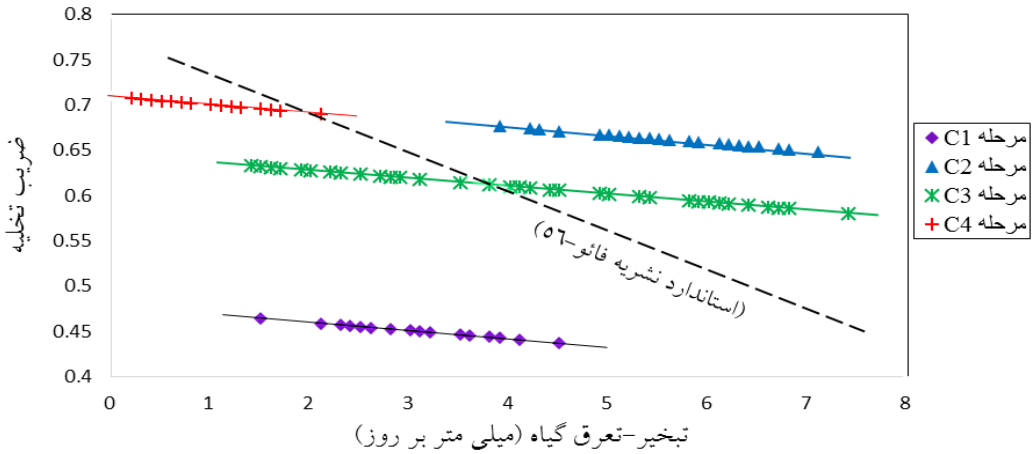
**: معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

ضریب تخلیه آب خاک

لحظه اتمام آب سهل‌الوصول خاک در مراحل مختلف رشد گیاه، بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه (افزایش نسبت به گیاه شاهد) شناسایی شد. در این زمان مقادیر P_{c-i} (در روابط ۶ الی ۱۰) که معرف حد RAW در مراحل رشد گیاه بود، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد. به‌طوری‌که مقدار P_{c-i} در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۶۶، ۰/۶۱ و ۰/۷ برآورد شد. نتایج نشان داد که حد آب سهل الوصول خاک در کل دوره رشد گیاه ثابت نبود و در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌دار بود. اثر حساسیت مراحل رشد در میزان جذب آب توسط گیاه، باعث تفاوت در مقدار آن شد. در پژوهش‌های گذشته نیز حد تخلیه مجاز آب خاک درکشت ذرت، برای مناطق مختلف بررسی شد و نتایج حاصل با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ اِل‌کیسی و برونر، ۲۰۰۹، دورنبوث و کستام، ۱۹۷۹؛ جارالله‌ی، ۱۳۸۰).

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات میزان ضریب تخلیه آب خاک در مراحل مختلف رشد نسبت به میزان تبخیر-تعرق روزانه گیاه، در شکل (۴) ترسیم شد. در شکل (۴) به دلیل تفاوت در حد تخلیه سهل‌الوصول آب خاک، یک نمودار مُجَزا به هر یک از مراحل رشد ذرت اختصاص داده شد. نتایج نشان داد که نمودارها یک‌فاصله قابل‌توجهی نسبت به استاندارد تعریف‌شده در نشریه فائو-۵۶ داشته‌اند؛ زیرا در نشریه فائو-۵۶ مقدار ضریب P برای گیاه ذرت و در شرایط تبخیر-تعرق پنج میلی‌متر بر روز، عدد ثابت ۰/۵۵ اعلام شد؛ اما به دلیل وابستگی ضریب P به تبخیر-تعرق روزانه گیاه، گزارش شد که هرگاه شدت تبخیر-تعرق گیاه بالا باشد، مقدار ضریب P بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کم‌تر از عدد ۰/۵۵ بوده و هنگامی‌که تبخیر-تعرق گیاه کم باشد، ضریب P حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از عدد مذکور است (آلِن و همکاران، ۱۹۹۸). به این معنی که نشریه فائو-۵۶ محدوده‌ای بین ۰/۳ تا ۰/۷۵ برای ضریب P گیاه ذرت قائل شده است. البته در پژوهش حاضر نیز رَوَند تغییرات ضریب تخلیه

آب خاک نسبت به میزان تبخیر-تعرق روزانه ذرت، منطبق بر گزارش نشریه فائو-۵۶ (در شکل ۱) بود. به این صورت که افزایش مقدار تبخیر-تعرق روزانه (نسبت به متوسط آن در مرحله رشد) موجب کاهش ضریب تخلیه و کاهش مقدار تبخیر-تعرق روزانه، باعث افزایش ضریب تخلیه آب خاک شد (شکل ۴). در اثر افزایش شدت تبخیر-تعرق گیاه نسبت به متوسط آن در دوره رشد، مقدار ضریب P در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب ۳/۱، ۲/۵، ۳/۷ و ۱ درصد کاهش یافت. در مقابل و در اثر کاهش شدت تبخیر-تعرق گیاه نیز مقدار ضریب P در مراحل رشد مذکور به ترتیب ۲/۸، ۱/۷، ۴/۸ و ۱/۳ درصد افزایش پیدا کرد. نتایج مذکور نشان داد که در پژوهش حاضر بازه تغییرات ضریب P کوتاه‌تر شده و پراکندگی مقدار آن نسبت به گزارش نشریه فائو-۵۶ کم‌تر شد. برای مقایسه نتایج یک پژوهش مشابه در کشور برزیل بررسی شد که در آن میزان آب در دسترس گیاه سویا با استفاده از معادله وَن‌گنوختن تخمین زده شد. نمودارها نشان دادند که با افزایش میزان تعرق روزانه گیاه از ۱ به ۷ میلی‌متر در روز، مقدار پارامتر RAW از عدد ۰/۲۲ به ۰/۱۷ کاهش پیداکرده بود. بر اساس نتایج مذکور، افزایش میزان تعرق گیاه باعث کاهش حد RAW شده بود (دی‌مِلو و همکاران، ۲۰۲۳). ازاین‌رو نتایج پژوهش اخیر از جهت ارتباط بین دو پارامتر تعرق و حد RAW، با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. درمجموع با توجه به تحلیل نتایج در این بخش از پژوهش، لزوم بازنگری و اصلاح مدل ارائه‌شده در نشریه فائو-۵۶ (رابطه ۵)، آشکار شد.



شکل ۴- ضریب تخلیه مجاز آب (P) برای مقادیر متفاوت تبخیر-تعرق روزانه، در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت

مدل‌سازی رگرسیونی ضریب تخلیه و ارزیابی مدل‌ها

به‌منظور واسنجی روابط (۶) الی (۱۰) از داده های واقعی ضریب تخلیه و تبخیر-تعرق روزانه در مراحل اولیه و توسعه رشد استفاده شد و با نرم‌افزار SPSS، ضرایب ثابت مدل‌ها به شرح جدول (۵) برآورد شد. به این صورت که ضرایب A و B برای مراحل رشد، ثابت در نظر گرفته شد. آماره F در جدول (۵) نشان داد که روابط رگرسیونی برازش داده‌شده بین متغیرهای وابسته و مستقل، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده‌اند. از سوی دیگر تغییری در مدل خطی فائو-۵۶ (رابطه ۵) داده نشد و به‌طور مستقیم مورد ارزیابی و مقایسه با سایر مدل ها قرار گرفت.

جدول ۵- ضرایب واسنجی شده برای مدل‌های موردبررسی در این پژوهش

	مدل خطی	مدل نمایی	مدل لگاریتمی	مدل درجه دوم	مدل توانی
ضریب A	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱
ضریب B	-	-	-	-۶×۱۰^{-۱۱}	-
آماره F	۳۸۶/۱**	۳۵۸/۷**	۲۶۸/۲**	۳۹۲**	۱۹۰/۵**

**: نشان‌دهنده معنی‌داری مدل در برآورد پارامتر مدنظر، در سطح احتمال یک درصد است

در مرحله بعد، عملکرد کلیه مدل‌ها (روابط ۵ الی ۱۰) در تخمین داده‌های واقعی ضریب تخلیه آب، ارزیابی شد. برای این کار از مدل‌های واسنجی شده (در مرحله قبل) استفاده شد و مقادیر ضریب P به‌صورت روزانه، برای مراحل میانی و پایانی رشد تخمین زده شد. مقادیر شاخص‌های آماری برای صحت‌سنجی عملکرد مدل‌ها، در جدول (۶) ارائه شد. اولویت‌دهی در انتخاب مدل بهینه، بر اساس کم‌ترین مقدار (نزدیک به صفر) در آماره‌های RMSE، NRMSE، ME و CRM و بیش ترین مقدار (حداکثر عدد یک) در آماره‌های R^2 و EF انجام شد. نتایج جدول (۶) نشان داد که با در نظر گرفتن مجموع مقادیر اولویت‌های آماری برای هر مدل، به ترتیب مدل‌های خطی و درجه دوم، نمایی، لگاریتمی، خطی فائو-۵۶ و توانی به‌عنوان مدل‌های بهینه در تخمین ضریب P معرفی شدند. شکل (۵) نشان داد که مدل خطی فائو-۵۶ به دلیل ثابت در نظر گرفتن حد تخلیه سهل‌الوصول آب و متوسط تبخیر-تعرق روزانه در کل دوره رشد ذرت، عملکرد مناسبی برای تخمین ضریب P بر اساس میزان تبخیر-تعرق روزانه نداشته است؛ اما سه مدل، خطی، درجه دوم و نمایی معرفی‌شده در پژوهش حاضر، انطباق بسیار خوبی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده ضریب P برقرار نمودند (شکل ۶). در ارزیابی مدل‌های مذکور آماره های R^2 و EF با مقدار ۰/۹۹۹، نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌ها و کارایی مطلوب مدل‌سازی بود. نزدیک به ۰/۰۰۱ بودن مقدار آماره ME و کم‌تر از ۰/۱ بودن مقدار آماره‌های RMSE و NRMSE در مدل‌های مذکور نشان دادند که خطای ناچیزی در تخمین مقدار ضریب P وجود داشته است. آماره CRM نیز نشان داد که مدل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و درجه دوم، بیش برآورد و مدل‌های خطی فائو-۵۶ و توانی، کم برآورد بوده اند.

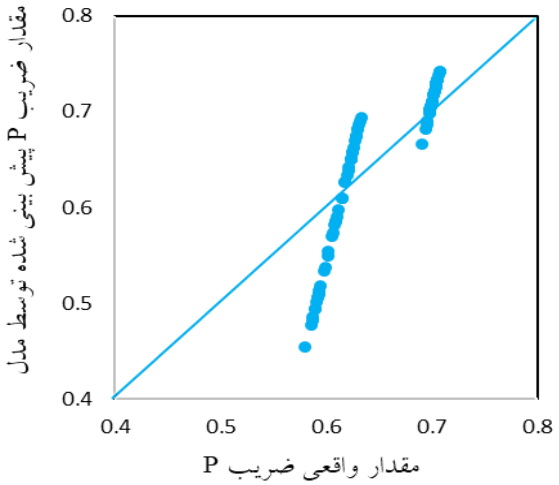
پژوهش مشابهی در مورد تخمین ضریب تخلیه آب خاک بر اساس مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه مشاهده نشد؛ اما در پژوهشی با استفاده از روابط رگرسیونی، شاخص تنش خشکی گیاه ذرت (CWSI) بر اساس مقدار رطوبت خاک (θ) مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل درجه دوم با شاخص‌های آماری R^2=۰/۹۸۸، RMSE=۲/۲۹ و ME=۰/۷۹۴ به‌عنوان بهترین مدل و مدل توانی با شاخص‌های آماری R^2=۰/۶۵، RMSE=۱۰/۷۳ و ME=۴/۸۹ به‌عنوان ضعیف‌ترین مدل برای این کار انتخاب شدند (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۱). نتایج پژوهش اخیر از جهت ترتیب اولویت‌ها در انتخاب مدل بهینه، مشابه نتایج پژوهش حاضر بود.

درمجموع پژوهش‌های گذشته نشان داد که امکان استفاده گسترده از مدل‌های رگرسیونی، برای شبیه سازی مقادیر متغیرهای مهم در محیط رشد گیاه وجود داشت. ازاین‌رو مدل‌های بهینه معرفی‌شده در پژوهش حاضر می‌تواند برای تخمین مقدار ضریب تخلیه مجاز آب خاک بر اساس مقدار تبخیر-تعرق روزانه ذرت، مورداستفاده قرار بگیرد. به‌طورکلی دستاورد قابل‌توجه پژوهش این بود که مدل خطی فائو-۵۶ با در نظر گرفتن جزئیات مراحل رشد گیاه، اصلاح و ارتقاء داده شد. نتایج به‌دست‌آمده به برنامه‌ریزان بخش آبیاری کمک می‌کند تا بدون سنجش روزانه رطوبت خاک و صرفاً از طریق داده های هواشناسی و محاسبه تبخیر-تعرق روزانه، میزان آب سهل‌الوصول خاک را برآورد نمایند. این مسئله در صورت مدیریت آبیاری با دورهای کوتاه (به دلیل کم بودن عمق ریشه گیاه و یا بالا بودن مقدار تبخیر-تعرق روزانه)، بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

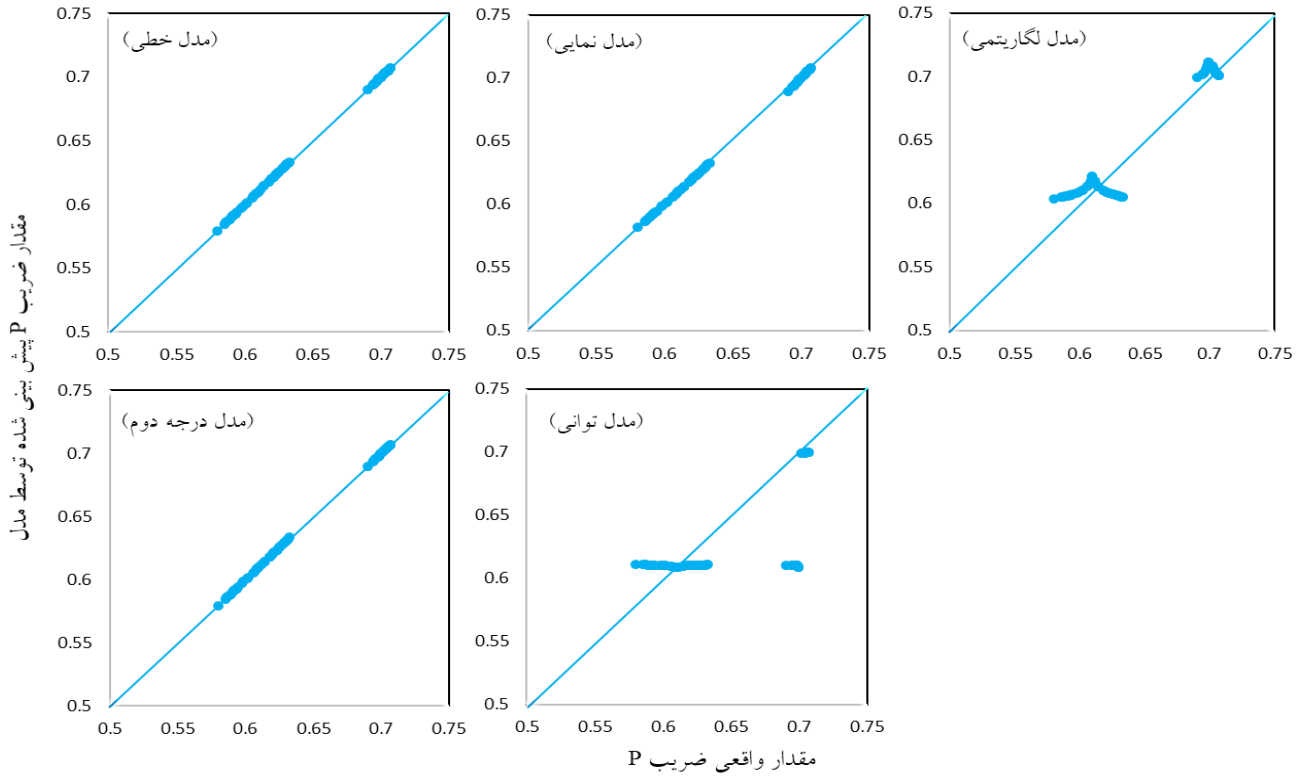
جدول ۶- مقدار شاخص‌های آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها

شماره رابطه	نام مدل	CRM	EF	R^2	RMSE	NRMSE	ME
۵	خطی (فائو-۵۶)	۰/۰۱۱ (۴) *	۰/۰۶۷ (۴)	۰/۵۹ (۳)	۰/۰۴۸ (۴)	۷/۴۰۹ (۴)	۰/۱۲۶ (۴)
۶	خطی	-۵×۱۰^{-۶} (۱)	۰/۹۹۹ (۱)	۰/۹۹۹ (۱)	۳۵×۱۰^{-۵} (۱)	۰/۰۵۴ (۱)	۸×۱۰^{-۴} (۱)
۷	نمایی	-۲۵×۱۰^{-۵} (۲)	۰/۹۹۹ (۱)	۰/۹۹۹ (۱)	۵×۱۰^{-۴} (۲)	۰/۰۷۶ (۲)	۱۴×۱۰^{-۴} (۲)
۸	لگاریتمی	-۰/۰۰۲ (۳)	۰/۶۱۹ (۲)	۰/۶۲۴ (۲)	۰/۰۱۳ (۳)	۲/۰۳۸ (۳)	۰/۰۲۷ (۳)
۹	درجه دوم	-۵×۱۰^{-۶} (۱)	۰/۹۹۹ (۱)	۰/۹۹۹ (۱)	۳۵×۱۰^{-۵} (۱)	۰/۰۵۴ (۱)	۸×۱۰^{-۴} (۱)
۱۰	توانی	۰/۰۶۶ (۵)	۰/۰۸۵ (۳)	۰/۰۰۵ (۴)	۰/۱۳۹ (۵)	۲۱/۶۱ (۵)	۰/۷ (۵)

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس آماره‌های ارزیابی است



شکل ۵- عملکرد مدل خطی فائو-۵۶ (رابطه ۵) در تخمین ضریب P، برای مراحل میانی و پایانی رشد



شکل ۶- عملکرد مدل‌های معرفی‌شده در پژوهش حاضر (روابط ۶ الی ۱۰) در تخمین ضریب P، برای مراحل میانی و پایانی رشد

نتیجه‌گیری

تبخیر-تعرق روزانه گیاه ذرت که متغیر مستقل اصلی در پژوهش حاضر بود، دارای مقادیری از ۰/۲ میلی متر بر روز (در مرحله پایانی رشد) تا ۷/۵ میلی‌متر بر روز (در مرحله میانی رشد) بود. به همین دلیل مدل خطی نشریه فائو-۵۶ که در آن متوسط تبخیر-تعرق روزانه گیاه عدد پنج میلی‌متر بر روز بود، چندان قابل‌تعمیم به شرایط واقعی نبود. بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه به تنش آبی، حد تخلیه سهل‌الوصول آب خاک برآورد شد که مقدار آن در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۶۶، ۰/۶۱ و ۰/۷ بود. درنتیجه به دلیل حساسیت متفاوت گیاه به تخلیه آب خاک در مراحل رشد، نمی‌توان یک حد ثابت برای تخلیه مجاز آب خاک در نظر گرفت. واکنش ضریب P نسبت به تبخیر-تعرق روزانه ذرت این بود که افزایش تبخیر-تعرق روزانه موجب کاهش ضریب P و کاهش تبخیر-تعرق روزانه باعث افزایش ضریب P شد. البته در پژوهش حاضر بازه تغییرات و پراکندگی مقدار ضریب P، نسبت به گزارش نشریه فائو-۵۶ کوتاه‌تر شد.

با واسنجی مدل‌های پیشنهادی و ارزیابی آن‌ها مشخص شد که مدل‌های خطی و درجه دوم معرفی‌شده در پژوهش حاضر، بهترین مدل برای تخمین مقدار ضریب P بر اساس تبخیر-تعرق روزانه گیاه ذرت بود. در بین تعداد شش مدل ارزیابی‌شده، مدل خطی نشریه فائو-۵۶ اولویت پنجم را کسب کرد؛ زیرا مدل خطی فائو-۵۶ به دلیل ثابت در نظر گرفتن حد تخلیه سهل‌الوصول آب و متوسط تبخیر-تعرق روزانه در کل دوره رشد ذرت، عملکرد مناسبی برای تخمین ضریب P نداشت. درنتیجه با اصلاح و ارتقاء مدل خطی فائو-۵۶، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر مقدار ضریب P فراهم شد. دستاورد کاربردی پژوهش این بود که می‌توان ضریب تخلیه آب را به‌طور مستقیم از طریق تبخیر-تعرق روزانه و درنتیجه با استفاده از داده‌های هواشناسی تخمین زد. ازاین‌رو به پایش روزانه رطوبت خاک نیازی نخواهد بود. در مواقعی که عمق ریشه گیاه کم و یا تبخیر-تعرق روزانه گیاه زیاد است و بسته به آن دورهای آبیاری کوتاه انتخاب می‌شود، کاربرد روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر قابل توصیه هست. درنتیجه با تخمین دقیق‌تر ضریب تخلیه آب می‌توان برنامه آبیاری را بر اساس زمان مناسب و حجم صحیح مصرف آب تنظیم نمود تا آب موردنیاز گیاه تأمین‌شده و از مصرف بیش‌ازحد آب جلوگیری شود.

تشکر و قدردانی

نویسنده از گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) که موجبات تسهیل انجام این تحقیق را فراهم نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نماید.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسنده مقاله است.

فهرست منابع

۱. علیزاده، امین، ۱۳۸۵. طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی. انتشارات آستان قدس رضوی. جلد اول، صص. ۱-۴۵۲.

۲. جاراللهی، رقیه، ۱۳۸۰. تعیین ضریب آب سهل‌الوصول در مراحل مختلف رشد برای ذرت دانه‌ای در کرج. *نشریه علوم خاک و آب*، ۱۵(۲)، صص. ۲۹۰-۲۹۸.

۳. دهقانی‌سانیج، حسین، کنعانی، الهه، و اخوان، سمیرا، 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)، صص. ۱۵۴۹-۱۵۶۰. **doi:10.22067/JSW.V31I6.64019**

۴. سعیدی، رضا، ضرابی، محمد مهدی، و ستوده‌نیا، عباس، ۱۴۰۱. مدل‌سازی مقدار رطوبت خاک با استفاده از شاخص تنش آبی (CWSI) در کشت ذرت. *نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۲(۴۷)، صص. ۳۸۷-۴۰۵. **doi: 10.22125/IWE.2022.146416**

۵. سعیدی، رضا، a ۱۴۰۱. کاربرد مقاومت روزنه‌ای، دمای پوشش سبز و شاخص تنش آبی محصول در تعیین زمان آبیاری ذرت. *نشریه دانش آب وخاک*، ۳۲(۱)، صص. ۱۵۹-۱۷۵.

۶. سعیدی، رضا، b ۱۴۰۱. برآورد جداگانه اجزای تبخیر و تعرق ذرت با استفاده از مدل‌های تجربی در شرایط تنش آبی. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۶(۲)، صص. ۲۳۳-۲۵۰.

۷. **doi:10.22092/jwra.2022.357478.910**

۸. سعیدی، رضا، c ۱۴۰۱. اثر برآورد جداگانه ضریب Ks در مراحل رشد ذرت، بر تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه در شرایط تنش آبی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۳(۱۶)، صص. ۶۰۹-۶۲۳. **dor: 20.1001.1.20087942.1401.16.3.11.2**

۹. سعیدی، رضا، d ۱۴۰۱. ارزیابی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره در تخمین اجزای تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای، در شرایط تنش شوری. *نشریه تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۵۳(۱)، صص. ۷۱-۸۴. **doi: 10.22059/IJSWR.2022.335453.669157**

۱۰. سعیدی، رضا، ۱۴۰۰. جداسازی تبخیر و تعرق در کشت ذرت و بررسی پاسخ آن‌ها به سطوح مختلف آبیاری. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۲(۵)، صص. ۱۲۶۳-۱۲۷۳. **doi: 10.22059/IJSWR.2021.318297.668881**

۱۱. سعیدی، رضا، ستوده‌نیا، عباس، رمضانی اعتدالی، هادی، کاویانی، عباس، و نظری، بیژن، ۱۳۹۷. مطالعه تأثیر تنش‌های شوری آب و حاصلخیزی خاک، بر تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای. *مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۴۹(۴)، صص. ۹۴۵- ۹۵۴. **doi: 10.22059/IJSWR.2018.247876.667815**

۱۲. سیفی، کرم.، میرلطیفی، سید مجید، دهقانی سانیج، حسین، و ترابی، منوچهر، ۱۳۹۳. ارزیابی همبستگی بین مقدار رطوبت خاک و شاخص تنش آب گیاه پسته در خاک سیلت لوم. اولین همایش ملی پسته ایران، شهریور ۱۳۹۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صص. ۱-۱۵.

۱۳. محمدی، مسعود، قهرمان، بیژن، داوری، کامران، وظیفه‌دوست، مجید، و نوری، حمیده، ۱۳۹۲. بهینه‌سازی مصرف آب و عملکرد گندم زمستانه در شرایط تنش شوری و خشکی با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی: شهرستان برخوار). *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۷(۳)، صص. ۲۹۹-۳۱۴. **doi:10.22092/JWRA.2013.128836**

۱۴. محمدی بهمدی، محمد و آرمین، محمد، ۱۳۹۶. اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف ذرت در شرایط کشت تأخیری. *مجله تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی*، ۴(۱)، صص. ۱۷- ۳۴.

۱۵. وردی نژاد، وحیدرضا، بشارت، سینا، عبقری، هیراد، و احمدی، حجت، 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)، صص. ۱۳۴۴- ۱۳۵۲. **doi:10.22067/JSW.V0I0.12146**

۱۶. همتی، رحیمه، مقصودی، کبری، و امام، یحیی، ۱۳۹۳. پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه‌خشک شمال فارس. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۴(۱۱)، صص. ۶۷-۷۴.

17. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith. M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper, 56, pp.1-326.
18. Alkaisi, M. M. and broner, I., 2009. Crop water uuse and growth stages. Colorado state university extension, 715(4), pp.28-43.
19. Ayers, R. S. and Westcot, D. W., 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No.29, pp. 32.
20. De Melo, M. L. A., Inforsato, L., Pinheiro, E. A. R. and De Jong, Q., 2023. Plant available water predicted by a flux-based approach. *Journal of geoderma*, 429(1), pp.1-17. **doi:10.1016/j.geoderma.2022.116253.**
21. Doorenbos, J. and Kassam, A. K., 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33. FAO, pp.58.
22. 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(3), pp.383–394. **doi:10.1016/j.agwat.2008.07.002**.
23. 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, pp.1965. **doi:10.3389/fpls.2019.01695.**
24. 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. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(3), pp. 192-202. **doi:10.1111/jac.12145**.
25. Manuel, F., Sanchez, D. and Paul, J., 1971. Behavior of corn and sorghum under water stress and during recovery. *Journal of Plant Physiology*, 48 (5), pp. 613-616. **doi:10.1104/pp.48.5.613.**
26. She, R., Tong, L., Du, T. and Shukla. M., 2020. Response and Modeling of Hybrid Maize Seed Vigor to Water Deficit at Different Growth Stages. *Journal of Water*, 12(11), pp.1-20. **doi: 10.3390/w12113289.**
27. Vanderborght, J., Couvreur, V., Meunier, F., Schnepf, A., Vereecken, H., Bouda, M. and Javaux. M., 2021. Hydraulic root architecture models to macroscopic representations of root hydraulics in soil water flow and land surface models. *Journal of Hydrology and Earth System Science*, 25(9), pp. 4835–4860. **doi: 10.5194/hess-2021-14.**
28. Water requirement system of crops, 2023. *Available at http://niwr.ir/Login.aspx.*
29. Yang, X., Soothar, R., Rahu, A., Wang, Y., Li, B., Mirjat, M., Soomro, S., Shaikh, S. and Chandio. F., 2023. Integrated effects of water stress and plastic film mulch on yield and water use efficiency of grain maize crop under conventional and alternate furrow irrigation method. *Journal of water*, 15(5), 1-16. **doi:10.3390/w15050924**.

Simulation of the Amount of Allowable Water Depletion Coefficient, Based on Daily Evapotranspiration in Different Growth Stages of Silage Maize in Qazvin Plain, Iran

R. Saeidi*

PhD. of 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: August 2023 and Accepted: April 2024

Abstract

For an accurate irrigation schedule, the daily soil water depletion should be estimated during the crop growth period. Soil water depletion is dependent on daily evapotranspiration. In this research, daily evapotranspiration of S.C 704 maize was measured in mini-lysimeters. Estimation of daily evapotranspiration was done by continuous measurement of soil moisture. Leaves stomatal resistance was measured daily, by AP_4 Porometer device. Soil water allowable depletion was determined in four growth stages of initial (C_1), development (C_2), mid (C_3), and late (C_4), based on the leaves stomatal resistance response. At each growth stage, when leaves stomatal resistance increased relative to the control crops, readily available water was ending and the time was right for new irrigation. The main variables included growth stage effect on crop evapotranspiration and water depletion coefficient, which was investigated in a completely randomized basic design, with three replications. Regression functions (models) were used for simulation of allowable soil water depletion coefficient (P) based on the daily evapotranspiration (ET_c). The models were calibrated by daily data at initial and development stages, and were evaluated by daily data in mid and late stages. The FAO-56 linear model was compared with the models introduced in this research. The results showed that maize ET_c (S.C 704) in initial, development, mid, and late stages was in the range of 1.5-4.5, 3.9 -7.1, 1.4 -7.5, and 0.2 -2.1 $mm.d^{-1}$, respectively. The allowable soil water depletion in the mentioned stages was calculated as 0.45, 0.66, 0.61 and 0.7, respectively. Different sensitivity in crop growth stages caused readily available water limit not to be constant during growth period. The ET_c increase caused a decrease in P, and decrease in ET_c increased P. Linear, exponential, logarithmic, polynomial, power, and FAO-56 linear functions were investigated. Polynomial function with statistical indices of RMSE=0.00035, NRMSE=0.054, ME=0.0008, CRM=-0/000005, R^2=0.999 and EF=0.999, was the optimal model in estimation of P coefficient. The reason for weak performance of FAO-56 model was the constant limit for readily available water and mean ET_c rate in the growing season. Therefore, the FAO-56 model was modified. The research result was to estimate the soil water allowable depletion coefficient (by using ET_c), without daily measurement of soil moisture. This method will be useful in irrigation scheduling, especially those with short intervals.

Keywords: Growth stage sensitivity, Readily available water, Regression modeling

* - Corresponding author's email: **saeidi@org.ikiu.ac.ir**