

Comparison of Water Uptake Reduction Functions in Water Stress Conditions by Using the Constant and Separate Coefficients in Maize Growth Stages

Reza Saeidi* 

Corresponding Author, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: saeidi@org.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.14.2023
Revised: 08.06.2023
Accepted: 09.26.2023

Keywords:
Growth stage sensitivity,
Modeling,
Stress coefficient,
Water requirements

ABSTRACT

Background and Objectives: For the reduction of water deficiency effects in the agricultural sector, it is necessary to manage optimal water consumption. Irrigation scheduling should be based on the actual water requirement during the crop growth period. So, the crop growth stage sensitivity is considered in the water uptake process. Applying water uptake reduction functions ($\alpha(h)$) in water stress conditions is one of the methods for irrigation scheduling. In past research, the calibration and evaluation of water uptake reduction functions have been done by constant coefficients in the crop growth period. But the aim of this research, is to compare the water uptake reduction functions by application of constant and separate coefficients, in crop growth stages. Therefore, the accuracy of estimation of actual $\alpha(h)$ data, is investigated in crop growth period.

Materials and Methods: This research was conducted on maize S. C 704 in the Qazvin region. The mini-lysimeter with a diameter of 40 cm and a height of 70 cm was used for crop cultivation. The main factor was defined as soil water depletion at levels of 45% (I_1), 55% (I_2), 60% (I_3), 65% (I_4), 70% (I_5), 75% (I_6), 80% (I_7) and 85% (I_8), relative to total available water. The sub-main factor was selected as the sensitivity to water stress in the growth stages of initial (P_1), development (P_2), mid (P_3) and late (P_4). Thus, the effect of soil water depletion (water stress) on water uptake amount was investigated in maize growth stages (separately). The experiment was performed as factorial and in a completely randomized design, with 32 treatments and three repetitions. Daily soil moisture was measured by moisture meter (HH₂ model and made by ΔT company). For simulation the water uptake reduction (in water stress conditions), were applied the models of Van Genuchten (1987), Dirksen et al. (1988) and Homaei et al. (2002). The actual data of $\alpha(h)$ in I_1 , I_3 , I_5 , and I_7 treatments were used for model calibration. For this work, the model coefficients were estimated constantly (in whole growth period) and variably (in 4 growth stages). The model evaluation was performed for the estimation of $\alpha(h)$ actual values in I_2 , I_4 , I_6 , and I_8 treatments. The statistics indicators of CRM, EF, R^2 , RMSE, and ME were used for model evaluation.

Results: The effect of soil water depletion and crop growth stages sensitivity on water uptake was significant at the level of 1%. From I_1 to I_8 treatments, the water uptake amount in the whole growth period decreased by slope of 7.4%. But the water uptake amounts in the initial, development, mid and late stages were decreased to 5%, 6.9%, 9% and

4.6%, respectively. As a result, the most sensitive growth stage of maize (relative to water stress) was included the mid, development, initial and late, respectively. The models calibration showed that in a specific model, the function coefficients amounts were different in growth stages (compared to whole of growth period). The best priorities for optimal model choosing, was assigned to application of separate coefficients in the crop growth stages. Among the different models, the Van Genuchten model with statistical indices of CRM=0.032, EF=0.928, $R^2=0.942$, RMSE=0.057 and ME=0.1, was determined as the optimal model.

Conclusion: The results of this research showed that the modeling accuracy was increased by applying variable coefficients in water uptake reduction functions. Due to different sensitivity in crop growth stages, a better estimation of the actual water uptake amount is done in water stress conditions. As a result, the actual crop water requirement is calculated more accurately. Also, the water consumption amount is considered according to actual crop needs, which will cause better management of water resources.

Cite this article: Saeidi, Reza. 2023. Comparison of Water Uptake Reduction Functions in Water Stress Conditions by Using the Constant and Separate Coefficients in Maize Growth Stages. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (3), 23-44.




© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21457.3655

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مقایسه توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی، با کاربرد ضرایب ثابت و جداگانه در مراحل رشد ذرت

رضا سعیدی* 

نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
رایانامه: saeidi@org.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: برای کاهش اثرات کمبود آب در بخش کشاورزی نیاز به مدیریت بهینه مصرف آب است. بنابراین برنامه‌ریزی آبیاری باید براساس نیاز آبی واقعی در طول دوره رشد گیاه باشد. به طوری که حساسیت مراحل مختلف رشد گیاه در فرآیند جذب آب، در نظر گرفته شود. یکی از روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری، کاربرد توابع کاهش جذب آب ($\alpha(h)$) در شرایط تنش آبی است. در پژوهش‌های گذشته واسنجی و ارزیابی توابع کاهش جذب آب، با ضرایب ثابت در کل دوره رشد گیاه انجام شده است. اما هدف از پژوهش حاضر این است که توابع کاهش جذب آب با کاربرد ضرایب ثابت و جداگانه در مراحل رشد، مقایسه شوند. از این رو دقت تخمین داده‌های واقعی ضریب $\alpha(h)$ در طول دوره رشد گیاه بررسی می‌گردد.
تاریخ دریافت: ۰۲/۰۳/۲۴ تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۷/۰۴	
واژه‌های کلیدی: حساسیت مرحله رشد، ضریب تنش، مدل‌سازی، نیاز آبی	مواد و روش‌ها: این پژوهش بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ و در منطقه قزوین انجام شد. از مینی لایسیمترهای استوانه‌ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر به عنوان بستر کشت استفاده شد. فاکتور اصلی در قالب تخلیه آب خاک در هشت سطح (I_1) ۴۵، (I_2) ۵۵، (I_3) ۶۰، (I_4) ۶۵، (I_5) ۷۰، (I_6) ۷۵، (I_7) ۸۰ و (I_8) ۸۵ درصد از کل آب در دسترس خاک تعریف شد. فاکتور فرعی نیز به صورت حساسیت چهار مرحله اولیه (P_1)، توسعه (P_2)، میانی (P_3) و پایانی (P_4) رشد گیاه ذرت به تنش آبی، انتخاب شد. یعنی اثر سطوح مختلف تخلیه آب خاک (تنش آبی) بر میزان جذب آب گیاه، در مراحل رشد ذرت (به طور جداگانه) بررسی شد. از این رو آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی، با ۳۲ تیمار و سه تکرار اجرا شد. با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دلتاتی (ΔT) مدل HH2، مقدار رطوبت روزانه خاک اندازه‌گیری شد. به منظور شبیه‌سازی میزان کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی، مدل‌های ون‌گونوختن (۱۹۸۷)، دیرکسین و همکاران (۱۹۸۸) و مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) به کار گرفته شد. برای واسنجی مدل‌ها از داده‌های واقعی $\alpha(h)$ در تیمارهای I_1 ، I_3 ، I_5

I_7 استفاده شد. در واسنجی مدل‌ها، یک‌بار ضرایب آن‌ها به‌طور ثابت (در کل دوره رشد) و بار دیگر به‌طور متغیر برای ۴ مرحله رشد برآورد شد. ارزیابی مدل‌ها نیز در راستای تخمین مقادیر واقعی $\alpha(h)$ در تیمارهای I_2, I_4, I_6 و I_8 انجام شد. برای این کار از آماره‌های CRM, R^2 , EF, RMSE و ME استفاده شد.

یافته‌ها: اثر دو فاکتور کمبود آب خاک و حساسیت فیزیولوژیکی مراحل رشد گیاه بر میزان جذب آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. از تیمار I_1 الی I_8 مقدار جذب آب در کل دوره رشد گیاه، با شیب ۷/۴ درصد کاهش یافت. اما مقدار جذب آب در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۵، ۶/۹، ۹ و ۴/۶ درصد کاهش پیدا کرد. در نتیجه حساس‌ترین مراحل رشد ذرت (نسبت به تنش آبی)، به ترتیب شامل مراحل میانی، توسعه، اولیه و پایانی رشد بود. واسنجی مدل‌ها نشان داد که در یک مدل مشخص، ضرایب تابع در هر یک از مراحل رشد نسبت به کل دوره رشد تفاوت داشت. براساس نتایج، اولویت‌های برتر برای انتخاب مدل‌های بهینه، به حالت کاربرد ضرایب جداگانه در مراحل رشد اختصاص یافت. در بین مدل‌های مختلف، مدل ون‌گنوختن با شاخص‌های آماری ($\% CRM=3/2$, $EF=0/928$, $R^2=0/942$ و $RMSE=0/057$ و $ME=0/1$ به‌عنوان مدل بهینه تعیین شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که با کاربرد ضرایب متغیر در توابع کاهش جذب آب، دقت مدل‌سازی افزایش می‌یابد. با توجه به حساسیت متفاوت گیاه در مراحل رشد، تخمین بهتری از میزان واقعی جذب آب در شرایط تنش آبی انجام می‌گیرد. در نتیجه نیاز آبی واقعی گیاه با دقت بیشتری محاسبه می‌شود. هم‌چنین میزان مصرف آب مطابق با نیاز واقعی گیاه در نظر گرفته می‌شود که باعث مدیریت بهتر منابع آبی خواهد بود.

استناد: سعیدی، رضا (۱۴۰۲). مقایسه توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی، با کاربرد ضرایب ثابت و جداگانه در مراحل رشد ذرت.

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۰ (۳)، ۴۴-۲۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21457.3655



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

$$S = \alpha(h) \times S_{\max} \quad (1)$$

در رابطه ۱؛ S میزان جذب واقعی آب توسط گیاه (میلی‌متر)، $\alpha(h)$ ضریب کاهش جذب آب توسط گیاه در اثر کمبود آب خاک (تنش آبی) و S_{\max} حداکثر میزان جذب آب به‌وسیله گیاه در شرایط استاندارد (میلی‌متر) می‌باشد. در مدل فیدس و همکاران (۱۹۷۸)، تابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی به‌صورت یک تابع خطی تکه‌ای است که میزان جذب آب توسط آن در شرایط پتانسیل خاک اشباع، صفر است. با کاهش پتانسیل ماتریک از حالت اشباع تا ظرفیت زراعی خاک، مقدار جذب آب به‌طور خطی افزایش یافته و به حد استاندارد می‌رسد (۵). در اثر کاهش بیش‌تر رطوبت نسبت به حد ظرفیت زراعی خاک، مقدار جذب آب توسط گیاه به‌صورت خطی کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد (۶). برای شبیه‌سازی میزان کاهش جذب آب (ضریب α) نسبت به مکش ماتریک خاک در شرایط تنش آبی، می‌توان از توابعی که توسط ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دیرکسن و آگوستیچن (۱۹۸۸) و همایی و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است، استفاده نمود (۷، ۸ و ۹). پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با کاربرد توابع مذکور برای شبیه‌سازی ضریب α در شرایط تحت تنش‌های شوری و آبی گزارش شده است. به‌طوری‌که در پژوهشی توابع جذب آب برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط اثر متقابل تنش شوری خاک و مرحله رشد ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل‌های جمع‌پذیر ون‌گنوختن و ضرب‌پذیر دیرکسن و ماس-هافمن با مقادیر حداکثر خطا (ME) به‌ترتیب برابر با ۰/۳۱ و ۰/۳۶ و ضریب تبیین (R^2) به‌ترتیب برابر با ۰/۸۳۹ و ۰/۷۰۳، به‌عنوان مدل‌های بهینه برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت توصیه شدند (۱۰). در پژوهش دیگر پاسخ گیاه ریحان به تنش‌های

مقدمه

کمبود منابع آب باکیفیت و بحران تنش آبی در کشت محصولات زراعی آبی، همواره توجه متخصصان و برنامه‌ریزان بخش آبیاری را به‌سوی مدیریت بهینه مصرف آب معطوف می‌نماید. کم‌آبیاری گیاه (اعمال تنش آبی) نوعی مدیریت منابع آب است، که پتانسیل صرفه‌جویی آب را افزایش داده و در مناطق پُرجمعیت خشک و نیمه‌خشک، مصرف آب باکیفیت شیرین را کاهش می‌دهد (۱). تنش آبی باعث می‌شود که هورمون آبسازیک اسید وارد اندام‌های هوایی گیاه شده و به‌صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل می‌نماید. در این شرایط گیاه با بستن روزنه‌های خود، اقدام به کاهش جذب آب و تعرق، حفظ رطوبت و جلوگیری از اتلاف آب می‌کند (۲). رابطه بین پتانسیل آب برگ، پتانسیل آب خاک و تعرق گیاه ذرت، به هیدرولیک خاک، ریشه گیاه و مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها بستگی دارد. از این رو پاسخ گیاه ذرت به اعمال تنش آبی، کاهش مقدار جذب آب و تعرق است (۳). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که قسمت‌های زیادی از اقلیم ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک فراگرفته، که با مشکل خشکی و شوری آب و خاک روبه‌رو هستند. در این میان کاربرد مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی روابط بین متغیرهای مزرعه‌ای (مانند رطوبت خاک) و مقدار تعرق گیاه، می‌تواند از ابزارهای مفید مدیریتی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب باشد (۴). تاکنون مدل‌هایی برای شبیه‌سازی میزان کاهش جذب آب توسط گیاه در شرایط کاربرد تنش‌های آبی ارائه شده است. یکی از مدل‌های پایه در این‌باره، مدل فیدس و همکاران (۱۹۷۸) است (۵) که مطابق رابطه ۱ و بر اساس آن در یک شرایط خاص، اگر خاکی نتواند نیاز آبی گیاه را برای انجام حداکثر تعرق فراهم آورد، از میزان جذب آب به‌وسیله ریشه‌های گیاه (نسبت به شرایط استاندارد منطقه) کم می‌شود.

مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله رشد رویشی، اثر بیش‌تری بر کاهش عملکرد محصول ذرت داشته است (۱۵). از این‌رو در نظر گرفتن اثر حساسیت مراحل رشد گیاه در کاربرد توابع کاهش جذب آب، ممکن است که شبیه‌سازی دقیق‌تری از داده‌های واقعی را به‌همراه داشته باشد. در میان گیاهان زراعی، ذرت نقش راهبردی در تولید غذای انسان و دام دارد و به‌دلیل این‌که تحت کشت آبی قرار می‌گیرد، می‌تواند مورد مناسبی برای مطالعات مربوط به مدیریت بهینه مصرف آب باشد (۱۶). ذرت از جمله گیاهان با نیاز آبی بالاست، که به‌علت کمبود آب در مناطق خشک نیاز به ارائه راه‌کارهایی برای بهبود مدیریت مصرف آب در کشت ذرت می‌باشد (۱۷). سناریوی مطرح شده در پژوهش حاضر این است که با توجه به مراحل فیزیولوژیکی رشد ذرت، می‌توان توابع کاهش جذب آب را با دو شیوه ضرایب ثابت و متغیر در طول دوره رشد، واسنجی نمود و کارایی مدل‌های موردنظر را در شبیه‌سازی مقادیر جذب آب ارزیابی کرد. با این کار عملکرد مدل‌های جذب آب در شرایط اعمال تنش آبی بر روی ذرت، به‌طور دقیق‌تر بررسی می‌شود. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، در قالب مقایسه توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی، با کاربرد ضرایب ثابت و جداگانه در مراحل رشد ذرت تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در سال ۱۳۹۹ و در منطقه قزوین، پژوهشی بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مزرعه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(د) (با موقعیت جغرافیایی عرض ۲۳' ۱۹' ۳۶" شمالی و طول جغرافیایی ۳۸' ۰۰' ۵۰" شرقی) انجام شد. با هدف اعمال تنش آبی بر گیاه، از مینی‌لایسیمترهای استوانه‌ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر

شوری و خشکی، با استفاده از توابع کاهش جذب آب مدل‌سازی شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها (توابع کاهش جذب آب) بر اساس داده‌های مشاهده‌ای گیاه ریحان نشان داد که مدل مفهومی اصلاح شده همایی و همکاران (۱۱) قادر بوده است که واکنش گیاه به تنش شوری، کم‌آبی و تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی را (در کل دوره رشد)، با دقت مناسب ($R^2=0/97$ ، $NRMSE=8/5\%$ و $ME=12/4\%$) شبیه‌سازی نماید (۱۲).

اغلب واسنجی ضرایب توابع جذب آب و ارزیابی آن‌ها، به‌منظور شبیه‌سازی مقادیر کاهش جذب آب (به‌طور ثابت) در کل دوره رشد گیاه انجام شده است. اما در نشریه فائو-۵۶ دوره رشد گیاهان زراعی به چهار مرحله متمایز اولیه^۱، توسعه^۲، میانی^۳ و پایانی^۴ رشد تقسیم شده است (۱۳). از این‌رو این احتمال وجود دارد که گیاهان در مراحل فیزیولوژیکی رشد خود، حساسیت متفاوتی (غیریکسان) به اعمال تنش‌های محیطی نشان بدهند. در پژوهشی در منطقه قزوین، یک میزان تنش آبی ثابت به‌طور جداگانه در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بر گیاه ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین تا کم‌ترین مقدار عملکرد محصول، به‌ترتیب مربوط به اعمال تنش آبی در مراحل رشد ۴ برگی، خمیری شدن دانه، ۱۲ برگی و گل‌دهی گیاه بود. نتیجه مذکور بیانگر حساسیت متفاوت به تنش آبی و نیاز ذرت به جذب آب در مراحل مختلف رشد بوده است (۱۴). در پژوهش دیگر در شهرستان شاهرود، با حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، تنش آبی اعمال شد. نتایج نشان داد تنش آبی در

- 1- Initial stage
- 2- Development stage
- 3- Mid stage
- 4- Late stage

مدیریت مصرف آب در آبیاری، در کف هر مینی لایسیمتر از لوله‌ای سوراخ‌دار و بستر شن (به‌عنوان زهکش) استفاده شد. خاک داخل مینی لایسیمترها، مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه بادی و کود حیوانی با نسبت ۳، ۱ و ۱ بود که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شد.

به‌عنوان بستر کشت استفاده شد. با این کار، میزان رطوبت خاک و آب جذب شده توسط گیاه تحت کنترل بود. البته در پژوهش‌های دیگر نیز، از مینی لایسیمترهایی با ابعاد مذکور برای بررسی میزان تبخیر- تعرق ذرت و پاسخ آن به سطوح مختلف آبیاری استفاده شد (۱۸ و ۱۹). به‌منظور کنترل و

جدول ۱- مشخصات خاک مینی لایسیمتر.

Table 1. Mini lysimeter soil specifications.

مقدار Value	واحد Unit	پارامتر Parameter
0.43	dS.m ⁻¹	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک Electrical conductivity of saturated soil extract
7.1	-	اسیدیته (pH) Acidity (pH)
لوم شنی Sandy loam	-	بافت خاک Soil texture
57	%	شن Sand
33	%	سیلت Silt
10	%	رس clay
25	%	رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه The weighted moisture content of field capacity
11	%	رطوبت وزنی نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point moisture content
1.36	g.cm ⁻³	جرم مخصوص ظاهری Bulk density

محصول ذرت در تاریخ ۱۳۹۹/۰۸/۰۱ 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 (۱۳). شیوه کاشت بذور به این صورت بود که در هر مینی لایسیمتر تعداد سه بذر به‌صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد.

در شرایط طبیعی مزرعه، خاک با بافت لوم شنی (خاک آزمایش) پس از انجام عملیات شخم دارای جرم مخصوص ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود. از این‌رو خاک داخل مینی لایسیمترها، به تراکم مذکور رسانده شد. سپس با غرقاب نمودن خاک، از هرگونه نشست احتمالی خاک در دوره رشد گیاه جلوگیری شد. بذور گیاهان در تاریخ ۱۳۹۹/۰۳/۱۵ کاشته شد و

تعریف نشریه فائو-۵۶، مرحله اولیه رشد گیاه از زمان کاشت بذر تا پوشیدگی ۱۰ درصدی سطح زمین توسط اندام‌های گیاهی را شامل می‌شود. مرحله توسعه گیاه از ادامه مرحله قبل آغاز شده و تا تکمیل رشد رویشی گیاه را در بر می‌گیرد. مرحله میانی رشد از زمان رشد زایشی گیاه (گل‌دهی) شروع شده 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 (۱۳). براساس تعاریف نشریه فائو-۵۶، مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد گیاه ذرت (تیمارهای مرحله رشد) به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز (مجموعاً ۱۴۰ روز) بوده است. برای برنامه‌ریزی آبیاری (تعیین زمان و حجم آب آبیاری) نیاز به پایش مقدار رطوبت روزانه خاک بود. برای این کار با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دلتاتی (ΔT) مدل HH₂، مقدار رطوبت روزانه خاک در مرکز سطح هر مینی‌لایسیمتر و در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. برای تشخیص عمق توسعه ریشه گیاه، مینی‌لایسیمترهای جداگانه‌ای در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه در دوره رشد، عمق آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مورد نحوه کار با دستگاه رطوبت‌سنج نیز قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که در یک نمودار، داده‌های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی اِشیل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تهیه شد (شکل ۱).

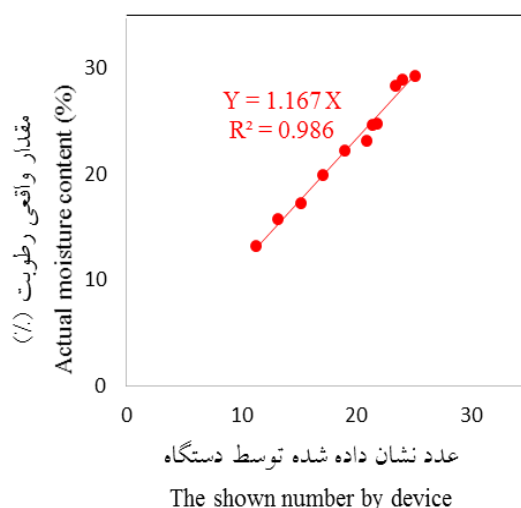
بعد از جوانه‌زنی و رسیدن گیاهان به چهار برگ، بهترین گیاه برای اعمال تیمارها باقی ماند و سایر گیاهان از سطح خاک حذف شدند. پس از جوانه‌زنی بذور، برای حذف اثر تبخیر از سطح خاک و اندازه‌گیری دقیق میزان آب جذب شده توسط گیاه، از مالچ پلاستیکی با رنگ روشن و به‌صورت ورقه‌های نازک بر روی سطح خاک استفاده شد. هم‌چنین برای جلوگیری از جذب گرمای تابشی خورشید و احتمال تشکیل قطره‌های آب در زیر مالچ و تأثیر آن بر مقدار رطوبت خاک، مالچ پلاستیکی با فاصله (بسیار کمی) از سطح خاک قرار داده شد (۲۰).

تیمارهای پژوهش از دو بخش فاکتور اصلی و فرعی تشکیل شد. فاکتور اصلی در قالب حداکثر تخلیه مجاز آب خاک^۱ (MAD) در هشت سطح (I₁) ۴۵، (I₂) ۵۵، (I₃) ۶۰، (I₄) ۶۵، (I₅) ۷۰، (I₆) ۷۵، (I₇) ۸۰ و (I₈) ۸۵ درصد کل آب در دسترس خاک^۲ (TAW) تعریف شد. علت انتخاب میزان ۴۵ درصد تخلیه مجاز آب خاک در تیمار شاهد (I₁) این بود که در پژوهشی بر روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در منطقه قزوین، کم‌ترین مقدار MAD در طول دوره رشد ذرت عدد ۴۵ درصد گزارش شد (۱۹). فاکتور فرعی نیز به‌صورت حساسیت چهار مرحله اولیه (P₁)، توسعه (P₂)، میانی (P₃) و پایانی (P₄) رشد گیاه ذرت به تنش آبی، انتخاب شد. مفهوم تیمارها این بود که اثر سطوح مختلف تخلیه آب خاک (تنش آبی) بر میزان جذب آب گیاه، در هریک از مراحل رشد ذرت (به‌طور جداگانه) بررسی شود. برای این منظور آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی، با ۳۲ تیمار و سه تکرار اجرا شد.

از سوی دیگر برای تعیین بازه زمانی مراحل رشد مدنظر، به گزارش نشریه فائو-۵۶ مراجعه شد. طبق

1- Maximum allowable depletion, MAD

2- Total available water, TAW



شکل ۱- منحنی واسنجی دستگاه رطوبت سنج خاک.

Figure 1. Calibration curve of the soil moisture meter.

طریق رابطه ۲ محاسبه شد و در زمان رسیدن میزان رطوبت خاک به θ_m ، عملیات آبیاری انجام شد. در طول دوره رشد گیاه، بارندگی اتفاق نیفتاد و نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق آبیاری تأمین شد. در هر تیمار حجم آب مورد نیاز در هر دور آبیاری، با هدف جبران کمبود رطوبت خاک تا حد FC تعیین شد. به این منظور از آب باکیفیت چاه با هدایت الکتریکی ۰/۵۱ دسی زیمنس بر متر، برای آبیاری گیاهان استفاده شد. با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک $(\theta_{FC} - \theta_m)$ ، چگالی ظاهری خاک، عمق ریشه و مساحت سطح خاک در مینی لایسیمتر، حجم آب آبیاری بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد (۲۱). به دلیل تأمین کمبود رطوبت خاک تا حد FC، آب اضافی برای تبدیل به زه آب و خروج از انتهای مینی لایسیمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود. در این پژوهش، مسأله تجمع تدریجی املاح حاصل از آب آبیاری در خاک نیز بررسی شد. به طوری که در پایان فصل رشد و پس از برداشت محصول، میزان شوری همه لایه های خاک اندازه گیری شد. به علت کیفیت مطلوب آب آبیاری، حتی در تیمار با بیشترین مقدار آب مصرفی (تیمار I₁)، شوری

زمان انجام آبیاری در تیمارها پس از تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) تعیین شد. به این ترتیب برای محاسبه مقدار پارامتر MAD از رابطه ۲ استفاده شد. برای این منظور، لازم بود که درصد رطوبت وزنی خاک در دو حد ظرفیت مزرعه^۱ (FC) و نقطه پژمردگی دائم^۲ (PWP) اندازه گیری شود. بنابراین خاک اشباع در دستگاه صفحات فشاری و تحت فشارهای مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر قرار داده شد و به ترتیب درصد رطوبت وزنی خاک در دو حد FC و PWP اندازه گیری و در جدول ۱ ارائه شد.

$$MAD = \left(\frac{\theta_{FC} - \theta_m}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \right) \times 100 \quad (2)$$

در رابطه ۲، MAD معرف حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک (درصد)، θ_m مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد) 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) می باشد. در این پژوهش بر اساس سطوح مختلف MAD (تعیین شده در تیمارها)، مقدار θ_m از

1- Field capacity, FC

2- Permanent wilting point, PWP

خاک در مینی‌لایسیمتر که تعداد چهار لایه در نظر گرفته شد.

توابع کاربردی و ارزیابی آن‌ها: به‌منظور شبیه‌سازی میزان کاهش جذب آب در شرایط کاربرد تنش آبی، از توابع کاهش جذب آب که معادلات آن به شرح روابط ۵ تا ۸ است، استفاده شد. روابط ۵ و ۶ به نام مدل‌های سیگموئیدی و ن‌گنوختن (۱۹۸۷) و روابط ۷ و ۸ به ترتیب به نام‌های مدل تعدیل شده دیرکسین و همکاران (۱۹۸۸) و مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) نامیده می‌شوند (۷، ۸ و ۲۴). در این پژوهش کاربرد مدل‌های مذکور یک‌بار در کل دوره رشد گیاه (با ضرایب ثابت) و بار دیگر با در نظر گرفتن حساسیت هر یک از مراحل رشد (با ضرایب متغیر) انجام شد و در نهایت کارایی آن‌ها نسبت به هم مقایسه شد. روش کار به این صورت بود که ابتدا فرآیند واسنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های واقعی $\alpha(h)$ در تیمارهای I_1, I_3, I_5 و I_7 انجام شد. سپس ارزیابی مدل‌ها (واسنجی شده) با هدف تخمین مقادیر واقعی $\alpha(h)$ در تیمارهای I_2, I_4, I_6 و I_8 صورت گرفت. از این‌رو در واسنجی مدل‌ها، یک‌بار ضرایب آن‌ها به‌طور ثابت برای کل دوره رشد و بار دیگر به‌طور جداگانه برای هر یک از ۴ مرحله رشد برآورد شد. منظور از ضرایب مدل‌ها، پارامترهای a, P و α_0 در روابط ۵ تا ۸ بود که توسط نرم‌افزار SPSS (به‌صورت ثابت و متغیر) در فرآیند واسنجی برآورد شد.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h}{h_{50}} \right]^p} \quad (5)$$

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{ah}{h_{50}} \right)^p} \quad (6)$$

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}} \right]^p} \quad (7)$$

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0) / \alpha_0 \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{max}} \right]^p} \quad (8)$$

عصاره اشباع خاک حدود یک دسی‌زیمنس بر متر بود. بر اساس گزارش نشریه فائو-۲۹ آستانه تحمل ذرت به شوری خاک مقدار ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر بود (۲۲)، که با توجه به حداکثر میزان شوری تجمعی خاک در پژوهش حاضر، تنش شوری بر گیاه اعمال نشد.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_m)}{100} \times \rho_b \times D_{rz} \times A \quad (3)$$

در رابطه ۳، 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، ρ_b چگالی ظاهری خاک ($g.cm^{-3}$)، D_{rz} عمق ریشه گیاه (m) و A مساحت سطح مقطع مینی‌لایسیمتر (m^2).

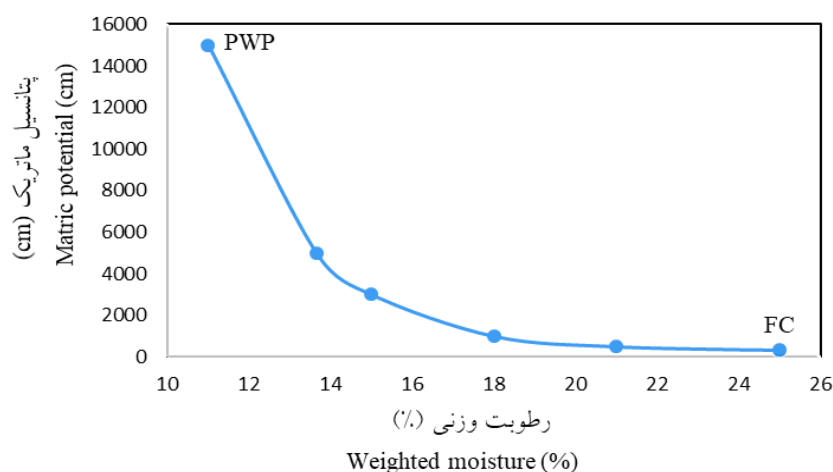
با توجه به حذف اثر تبخیر از سطح مینی‌لایسیمترها و عدم خروج زه‌آب از آن‌ها در عملیات آبیاری، می‌توان گفت که کاهش رطوبت خاک در فاصله بین دو آبیاری بیانگر میزان جذب آب و تعرق گیاه بوده است. از این‌رو برای محاسبه دقیق میزان جذب آب توسط گیاه (به‌خصوص در زمان تکمیل رشد ریشه گیاه) از رابطه ۴ استفاده شد (۲۳). در رابطه ۴ عمق خاک در هر مینی‌لایسیمتر به چهار لایه مساوی تقسیم شد و از طریق تجمیع میزان کاهش رطوبت روزانه در لایه‌های خاک، مقدار دقیق جذب آب توسط گیاه محاسبه شد.

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

در رابطه ۴، $(T_r)_i$ مقدار جذب آب توسط گیاه (سانتی‌متر)، θ مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i شمارنده روزهای بین دو آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$ اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρ_b چگالی ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب)، D عمق لایه خاک در مینی‌لایسیمتر (سانتی‌متر)، j شمارنده لایه‌های

برای برآورد مقادیر پتانسیل ماتریک (h) خاک براساس واحد سانتی‌متر، از منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شد (۲۵). لازم به ذکر است که برای ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک، قبل از کشت گیاه اقدام به برداشت مستقیم نمونه‌های دست نخورده از خاک مینی‌لایسیمتر شد. سپس خاک دست نخورده در آزمایشگاه با آب مقطر اشباع شد. در مرحله بعد، خاک اشباع تحت فشارهای مختلف مکشی از یک تا ۱۵ بار (در دستگاه صفحات فشاری) قرار گرفت و نسبت به رطوبت وزنی معادل، منحنی مشخصه آن ترسیم شد (شکل ۲). در طول دوره آزمایش نیز، براساس تعریف پتانسیل ماتریک مدنظر و با توجه به مقدار رطوبت خاک، میزان پتانسیل ماتریک از روی منحنی مشخصه برآورد شد. با توجه به حساسیت متفاوت گیاه به اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد، میزان پتانسیل ماتریک در محدوده‌های h^* ، h_{50} و h_{max} به صورت جداگانه (در مراحل رشد) و ثابت در کل دوره رشد، به شرح جدول ۲ اندازه‌گیری شد.

در روابط ۵ تا ۸، $\alpha(h)$ تابع کاهش جذب آب است که مقدار آن برابر با میزان آب جذب شده توسط گیاه در شرایط تنش آبی (غیراستاندارد) نسبت به شرایط بدون تنش (استاندارد) می‌باشد. h پتانسیل ماتریک ناشی از کمبود آب خاک (سانتی‌متر) است، h_{50} مقدار پتانسیل ماتریکی که به دلیل تنش آبی، میزان جذب آب توسط گیاه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (سانتی‌متر)، a و P پارامترهای تجربی که با توجه به نوع خاک، گیاه و شرایط اقلیمی منطقه واسنجی می‌شود، h^* پتانسیل ماتریک آستانه کاهش جذب آب توسط گیاه در اثر تنش آبی (سانتی‌متر)، α_0 پارامتر تجربی مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) و h_{max} حداکثر پتانسیل ماتریک (سانتی‌متر) قابل تحمل توسط گیاه است که در یک سطح بسیار کم، گیاه به فعالیت حیاتی خود ادامه می‌دهد و هنوز زنده است. در شرایط واقعی، رسیدن تنش آبی به حدی که گیاه روزنه‌های خود را به طور مداوم بسته نگه‌داشته و دیگر تعرق انجام ندهد (هنوز گیاه زنده است)، می‌تواند بیانگر محدوده پتانسیل h_{max} باشد. بسته بودن روزنه‌های گیاهی نیز توسط دستگاه پرومتر قابل تشخیص می‌باشد.



شکل ۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک.

Figure 2. Soil moisture characteristic curve.

جدول ۲- میزان پتانسیل ماتریک در محدوده‌های تعیین شده در معادلات جذب آب.

Table 2. The matric potential amount in determined limits in the water uptake equations.

کل دوره رشد Whole growth period	مرحله رشد P ₄ P ₄ Growth stage	مرحله رشد P ₃ P ₃ Growth stage	مرحله رشد P ₂ P ₂ Growth stage	مرحله رشد P ₁ P ₁ Growth stage	حد پتانسیل ماتریک Matric potential limit
3013	4101	2002	2769	3430	h*
6550	7255	5542	6348	6852	h ₅₀
12300	13624	10407	11921	12867	h _{max}

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر مقدار جذب آب توسط گیاه، در سطوح متفاوت تخلیه آب خاک (هشت سطح I₁ تا I₈) و چهار مرحله رشد گیاه ذرت (P₁ تا P₄) بررسی شد. کمبود آب خاک و حساسیت فیزیولوژیکی متفاوت در مراحل رشد گیاه، دو فاکتور اصلی مؤثر بر میزان کاهش جذب آب بود. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۳ نشان داد که هر یک از فاکتورهای مذکور و اثر متقابل آن‌ها بر میزان جذب آب توسط گیاه، در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. دلیل نتایج مذکور این بود که در شرایط تنش آبی، پتانسیل آبی که در دسترس گیاه می‌باشد، کاهش می‌یابد و از این رو آب به سهولت توسط گیاه جذب نمی‌شود. هم‌چنین در دوره‌هایی از رشد گیاه ذرت (مراحل توسعه و میانی) که مربوط به رشد سریع پوشش گیاهی، گل‌دهی، گرده‌افشانی و تولید میوه (بلال) است، نیاز به جذب آب بیش‌تر می‌باشد و از این رو حساسیت به کمبود آب خاک بیش‌تر می‌شود. به‌طور مشابه و در پژوهش‌های گذشته نیز گزارش شد که در زمان گل‌دهی گیاه ذرت، گرده‌افشانی و تشکیل بلال، حساسیت گیاه به تنش آبی بیش‌تر از سایر مراحل رشد بوده است (۱۵، ۲۶ و ۲۷).

در مرحله بعد با استفاده از مدل‌های واسنجی شده، اقدام به شبیه‌سازی مقادیر واقعی $\alpha(h)$ در تیمارهای I₂، I₄، I₆ و I₈ شد تا صحت عملکرد مدل‌ها بررسی شود. در مرحله صحت‌سنجی، داده‌های $\alpha(h)$ در دو حالت مشاهده‌ای (واقعی) و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها (روابط ۵ تا ۸) بود، با یکدیگر مقایسه شد و اعتبار مدل‌های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا^۱ (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، ضریب تبیین^۳ (R²)، کارایی مدل‌سازی^۴ (EF) و ضریب باقی‌مانده^۵ (CRM) استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های مذکور در روابط ۹ تا ۱۳ ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره‌های ME، RMSE و CRM و مقدار نزدیک به یک برای آماره‌های R² و EF در هر مدل، نشان‌دهنده بهینه بودن آن مدل در پیش‌بینی مقادیر $\alpha(h)$ بود. در روابط ۹ تا ۱۳، حروف n، O^۱ و P^۷ به ترتیب بیانگر تعداد تیمارها، داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده $\alpha(h)$ توسط مدل‌ها بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (11)$$

- 1- Maximum error, ME
- 2- Root of mean squared error, RMSE
- 3- Coefficient of determination, R²
- 4- Efficiency of modeling, EF
- 5- Coefficient of residual mass, CRM
- 6- Observed, O
- 7- Predicted, P

جدول ۳- تجزیه واریانس صفت مورد بررسی در طرح.

Table 3. Variance analysis of the investigated trait in the plan.

میانگین مربعات average of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
جذب آب Water uptake		
4.75 ^{ns}	2	تکرار Repetition
164936 ^{**}	3	مرحله رشد Growth stage
23884 ^{**}	7	تنش آبی Water stress
15748 ^{**}	21	تنش آبی × مرحله رشد Water stress × growth stage
251	62	خطا Error

ns و ** به ترتیب عدم تفاوت معنی دار و تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد

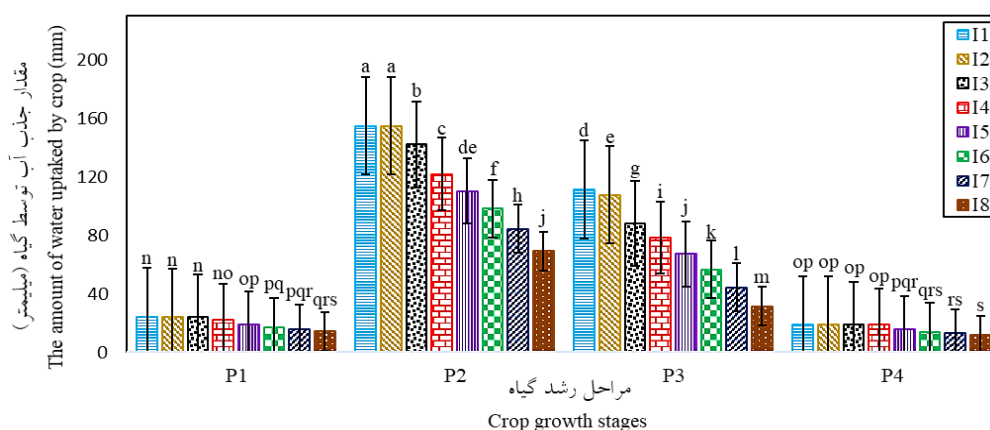
به ازای هر پنج درصد افزایش در MAD، مقدار جذب آب در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۵، ۶/۹، ۹ و ۴/۶ درصد کاهش پیدا کرد. این در حالی بود که به طور متوسط در کل دوره رشد گیاه، میزان جذب آب در تیمارهای I₁ تا I₈ با شیب ۷/۴ درصد کاهش یافت. در نتیجه حساس ترین مراحل رشد ذرت به تنش آبی، به ترتیب مراحل میانی، توسعه، اولیه و پایانی رشد بود. به همین دلیل میانگین مقادیر جذب آب در شکل ۳، در مراحل حساس رشد (توسعه و میانی) دارای هم پوشانی کم تر و در مراحل غیر حساس رشد (اولیه و پایانی) دارای هم پوشانی بیش تر بود. به طور مشابه پژوهشی در فلات چین بر روی ذرت انجام شد و گزارش شد که نسبت تعرق گیاه به کل تبخیر- تعرق (T/ET) در کل دوره رشد به طور متوسط ۵۳ درصد و در مرحله گل دهی تا بلوغ گیاه (دوره میانی رشد) به مقدار ۶۳/۳ درصد بوده است. اما در مرحله پایانی رشد از مقدار تعرق گیاه و جذب آب کاسته شد. دلیل آن مربوط به بلوغ گیاه، زرد شدن و ریزش برگ های گیاه در مرحله پایانی

به منظور بررسی مقادیر جذب آب در تیمارهای مختلف، نتیجه مقایسه میانگین داده های اندازه گیری شده در شکل ۳ ارائه شد. بر این اساس مقادیر جذب آب در تیمارهای I₁ تا I₈ به ترتیب برابر با ۲۴، ۲۴، ۲۲، ۱۹/۱، ۱۷/۲، ۱۶ و ۱۴/۳ میلی متر (در مرحله اولیه رشد)، ۱۵۵، ۱۵۵، ۱۴۲، ۱۲۲، ۱۱۰، ۹۸، ۸۴/۲ و ۶۹ میلی متر (در مرحله توسعه)، ۱۱۱/۳، ۱۰۷/۶، ۸۸، ۷۸/۴، ۶۷/۲، ۵۶/۵، ۴۴/۳ و ۳۱/۵ میلی متر (در مرحله میانی رشد) و ۱۸/۷، ۱۸/۷، ۱۸/۷، ۱۶، ۱۴/۱، ۱۳ و ۱۱/۸ میلی متر (در مرحله پایانی رشد) بود. نتایج نشان داد که در شرایط مختلف تخلیه آب خاک (تیمارهای I₁ تا I₈)، بیش ترین تا کم ترین میزان جذب آب گیاه مربوط به مراحل رشد توسعه (P₂)، میانی (P₃)، اولیه (P₁) و پایانی (P₄) بود. دلیل آن به نیازهای متفاوت تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک، در مراحل مختلف رشد گیاه مربوط می شود. بر این اساس، با افزایش حد تخلیه مجاز آب خاک (در تیمارهای I₁ الی I₈)، مقادیر جذب آب در مراحل مختلف رشد به طور ثابت کاهش نیافت. به طوری که

(۱۹۷۹) و وردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۱)، به متفاوت بودن حداکثر تخلیه مجاز آب خاک در مراحل رشد ذرت اشاره شده بود (۱۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲). به‌طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش حد تخلیه مجاز آب خاک، تنش آبی بر گیاه اعمال می‌شود که در نهایت موجب کاهش مقدار جذب آب توسط گیاه می‌شود. افزایش حد تخلیه مجاز آب خاک، نوعی کم‌آبایی گیاه محسوب می‌شود که باتوجه به حساسیت متفاوت مراحل رشد به آن، باید حتی‌الامکان کم‌آبایی را در مراحل غیرحساس رشد انجام داد. از این‌رو با انتخاب حد مناسبی از کم‌آبایی و توجه به حساسیت مراحل رشد گیاه، می‌توان در افزایش بهره‌وری مصرف آب توسط گیاه نقش مثبتی ایفا کرد.

رشد بود که موجب کاهش تعرق شد (۲۸). در پژوهش دیگر نیز گزارش شد که به‌دلیل حساسیت بیش‌تر ذرت به تنش آبی در مرحله گل‌دهی (مرحله میانی رشد)، ضریب حساسیت گیاه بیش‌تر از سایر مراحل رشد بود (۲۹). نتایج پژوهش‌های مذکور، بیانگر نتایج پژوهش حاضر مبنی بر حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت به کمبود آب خاک بوده است.

به‌دلیل حساسیت متفاوت به تنش آبی در مراحل رشد ذرت، آستانه تحمل تنش آبی در طول دوره رشد یکسان نبود. این مسأله باتوجه به مقادیر جذب آب تیمارهای I₁ تا I₈ در مراحل مختلف رشد، به خوبی نشان داده شد. به‌طور مشابه در پژوهش‌های الکیسی و برونر (۲۰۰۹)، سعیدی (۲۰۲۲a)، دورنبوس و کسّام



شکل ۳- مقایسه میانگین مقادیر جذب آب، در سطوح متفاوت تخلیه آب و مراحل رشد گیاه.

Figure 3. The average comparison of water uptake values, at different levels of water depletion and crop growth stages.

ضرایب مجهول (α_0 و P , a) یک‌بار به‌طور ثابت و بار دیگر به‌طور مُجْزَا (برای هر یک از مراحل رشد) برآورد شد و در جدول ۴ ارائه شد. داده‌ها در جدول ۴ نشان دادند که انتخاب ضرایب متغیر (در طول دوره رشد) برای توابع، نکته قابل توجهی بوده است. زیرا در یک مدل مشخص، تفاوت‌های محسوسی در مقدار ضرایب تابع در هر یک از مراحل رشد و نسبت به کل دوره رشد مشاهده شد. در بعضی از مدل‌ها (مانند رابطه ۵ و ۶) بین مقدار توان P و حساسیت مرحله رشد

به‌منظور مدل‌سازی میزان کاهش جذب آب در طول دوره رشد گیاه، روابط ۵ تا ۸ برای شرایط پژوهش حاضر واسنجی شد. برای این کار از داده‌های واقعی جذب آب در تیمارهای I₁, I₃, I₅ و I₇ استفاده شد. به‌این صورت که مقادیر واقعی نسبت کاهش جذب آب ($\alpha(h)$) در تیمارهای مذکور محاسبه شد و ضرایب مجهول در توابع (روابط ۵ تا ۸) توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد. البته باتوجه به موضوع پژوهش و حساسیت مراحل رشد به تنش آبی،

گیاه، ارتباطی وجود داشت. به طوری که با افزایش حساسیت مرحله رشد، مقدار توان P کاهش می‌یافت. در نتیجه از طریق واسنجی توابع کاهش جذب آب با کاربرد ضرایب ثابت در کل دوره رشد گیاه، نمی‌توان انتظار داشت که نتایج دقیقی برای شبیه‌سازی مقادیر جذب آب در هر یک از مراحل رشد گیاه به دست بیاید.

جدول ۴- ضرایب واسنجی شده توابع کاهش جذب آب، به صورت ثابت و متغیر در دوره رشد گیاه.

Table 4. The calibrated coefficients of water uptake reduction functions, in the form of constant and variable during the crop growth period.

$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0) / \alpha_0 \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{\max}} \right]^p}$	$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}} \right]^p}$	$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{ah}{h_{50}} \right)^p}$	$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h}{h_{50}} \right]^p}$	معادله مدل Model equation
8	7	6	5	شماره رابطه (مدل) Model number
-	-	0.882	-	مرحله رشد P ₁ P ₁ Growth stage
-	-	1.012	-	مرحله رشد P ₂ P ₂ Growth stage
-	-	1.165	-	مرحله رشد P ₃ P ₃ Growth stage
-	-	0.903	-	مرحله رشد P ₄ P ₄ Growth stage
-	-	1.111	-	کل دوره رشد Whole growth period
0.32	0.64	2.394	2.943	مرحله رشد P ₁ P ₁ Growth stage
0.604	0.704	2.215	2.178	مرحله رشد P ₂ P ₂ Growth stage
0.806	0.648	2.186	1.802	مرحله رشد P ₃ P ₃ Growth stage
1.883	1.602	2.688	3.305	مرحله رشد P ₄ P ₄ Growth stage
0.534	0.498	2.164	1.867	کل دوره رشد Whole growth period
0.568	-	-	-	مرحله رشد P ₁ P ₁ Growth stage
0.389	-	-	-	مرحله رشد P ₂ P ₂ Growth stage
0.279	-	-	-	مرحله رشد P ₃ P ₃ Growth stage
0.098	-	-	-	مرحله رشد P ₄ P ₄ Growth stage
0.362	-	-	-	کل دوره رشد Whole growth period

تیمارهای مذکور شد. به طوری که شبیه‌سازی پارامتر $\alpha(h)$ نیز، با دو شیوه کاربرد ضرایب ثابت و متغیر در دوره رشد گیاه انجام شد. سپس مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی پارامتر $\alpha(h)$ در تیمارهای I₂، I₄، I₆ و

به منظور تعیین اعتبار مدل‌های واسنجی شده، از داده‌های مربوط به تیمارهای I₂، I₄، I₆ و I₈ استفاده شد. برای این کار با استفاده از مدل‌های واسنجی شده، اقدام به شبیه‌سازی مقادیر پارامتر $\alpha(h)$ در

(سازگاری گیاهان به تنش‌ها) به بیانی دیگر تأیید شده است. در این باره در پژوهشی گزارش شد که در شرایط تحت تنش خشکی، با تجمع پرولین در اندام‌های گیاه اسپرس، توانایی گیاه برای بقاء افزایش یافت. به طوری که افزایش غلظت پرولین، به دلیل نقش این اسید آمینه برای تنظیم فعالیت اُسمزی گیاه بوده است. در حقیقت واکنش مذکور، نوعی سازگاری گیاه در شرایط تحت تنش خشکی بود که برای ادامه حیات انجام می‌شد (۳۳). در ارزیابی مدل و ن‌گنوختن (رابطه ۶)، آماره‌های حداکثر خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب با مقادیر ۰/۱ و ۰/۰۵ نشان دادند که خطای قابل اغمازی در تخمین پارامتر $\alpha(h)$ وجود داشته است. در مجموع برای درک بهتر عملکرد مدل‌های ۵ تا ۸ در پیش‌بینی مقادیر $\alpha(h)$ ، شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شد. به طور کلی مدل ۶ بهترین برازش را با داده‌های واقعی کاهش جذب آب ایجاد کرد. علت این بود که در مدل ۶ نسبت پتانسیل ماتریک خاک (h) به پارامتر h_{50} تعیین‌کننده مقدار ضریب کاهش جذب آب ($\alpha(h)$) بود. h_{50} حد وسط جذب آب را از محدوده شرایط استاندارد تا بیش‌ترین میزان تنش داشت و از این جهت کسر $\frac{h}{h_{50}}$ در تیمارهای پژوهش، دارای شیب تعدیل شده بود. به بیان دیگر، به علت افزایش و یا کاهش متوازن کسر $\frac{h}{h_{50}}$ در محدوده‌های مختلف تحت تنش، خروجی مدل ۶ به مقادیر واقعی $\alpha(h)$ نزدیک‌تر بود. از سوی دیگر وجود ضریب a در مدل ۶ نیز باعث شد که مقدار خطا حتی نسبت به مدل ۵ نیز اصلاح گردد. اما در مدل ۸ بین h^* تا h_{max} دامنه وسیع‌تری از نظر مقدار پتانسیل مکشی وجود داشت و موجب می‌شد که مدل مذکور قادر به پیش‌بینی صحیح ضریب کاهش جذب آب در همه تیمارهای تحت تنش نباشد. به طوری که در تعدادی از تیمارهای پژوهش، مقدار پیش‌بینی شده $\alpha(h)$ نسبت به مقدار واقعی آن واگرا شد.

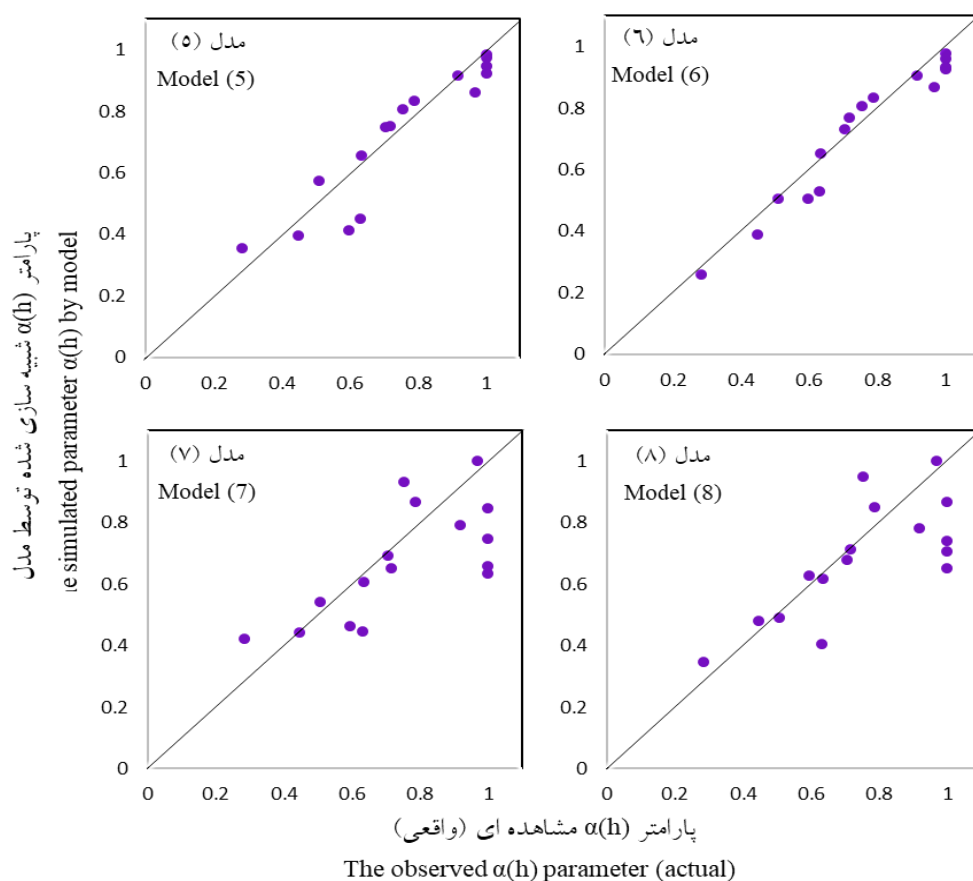
ME مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه و ارزیابی توابع نشان داد که کدام یک از شیوه‌های کاربرد ضرایب (در توابع)، می‌تواند دقت مناسب‌تری برای تخمین میزان کاهش جذب آب، در طول دوره رشد گیاه داشته باشد. برای این منظور از آماره‌های R^2 ، EF، CRM، RMSE و ME استفاده شد و مقادیر آماره‌های مذکور در جدول ۵ ارائه شد تا تابع بهینه براساس شاخص‌های آماری انتخاب شود. به این صورت که مجموع اعداد اولویت‌ها (داخل پراتنز در جدول ۵) برای هر مدل محاسبه شد و مدل‌ها بر اساس آن رتبه‌بندی شدند. آماره‌های ارزیابی در جدول ۵ نشان دادند که اولویت‌های برتر در انتخاب مدل‌های بهینه، به حالت کاربرد ضرایب جداگانه در مراحل رشد اختصاص یافت. این مسأله نشان داد که استفاده از ضرایب مجزا برای توابع در هر مرحله رشد، باعث می‌شود که پیش‌بینی دقیق‌تری از میزان کاهش جذب آب انجام شود. در بین توابع مختلف روابط ۵ و ۶ در شرایط کاربرد ضرایب جداگانه در مراحل رشد (مدل‌های و ن‌گنوختن)، به ترتیب به عنوان اولویت اول و دوم برای مدل بهینه برگزیده شدند. در ارزیابی توابع مذکور مقادیر ضریب R^2 به ترتیب برابر با ۰/۹۴۲ و ۰/۸۷۱ و کارایی مدل‌سازی (آماره EF) برابر با ۰/۹۲۸ و ۰/۸۵۸ برآورد شد، که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌ها و کارایی مطلوب مدل‌سازی بود. البته در روش کاربرد ضریب ثابت در توابع نیز، اولویت انتخاب مدل بهینه به مدل‌های و ن‌گنوختن داده شد. آماره CRM نشان داد که همه مدل‌ها، مقدار $\alpha(h)$ را اندکی کم‌تر از اندازه واقعی آن برآورد کرده‌اند. دلیل آن به این مسأله بر می‌گردد که در واقعیت، گیاهان توانایی سازگاری نسبت به تنش‌های محیطی (مانند تنش آبی) را دارند. بنابراین این خصوصیت باعث شد که مقدار $\alpha(h)$ برآورد شده توسط مدل‌های مذکور، کم‌تر از مقدار واقعی آن باشد. در پژوهش‌های گذشته نیز استدلال فوق

جدول ۵- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار توابع کاهش جذب آب.

Table 5. The statistical parameters value for evaluation the validity of water uptake reduction functions.

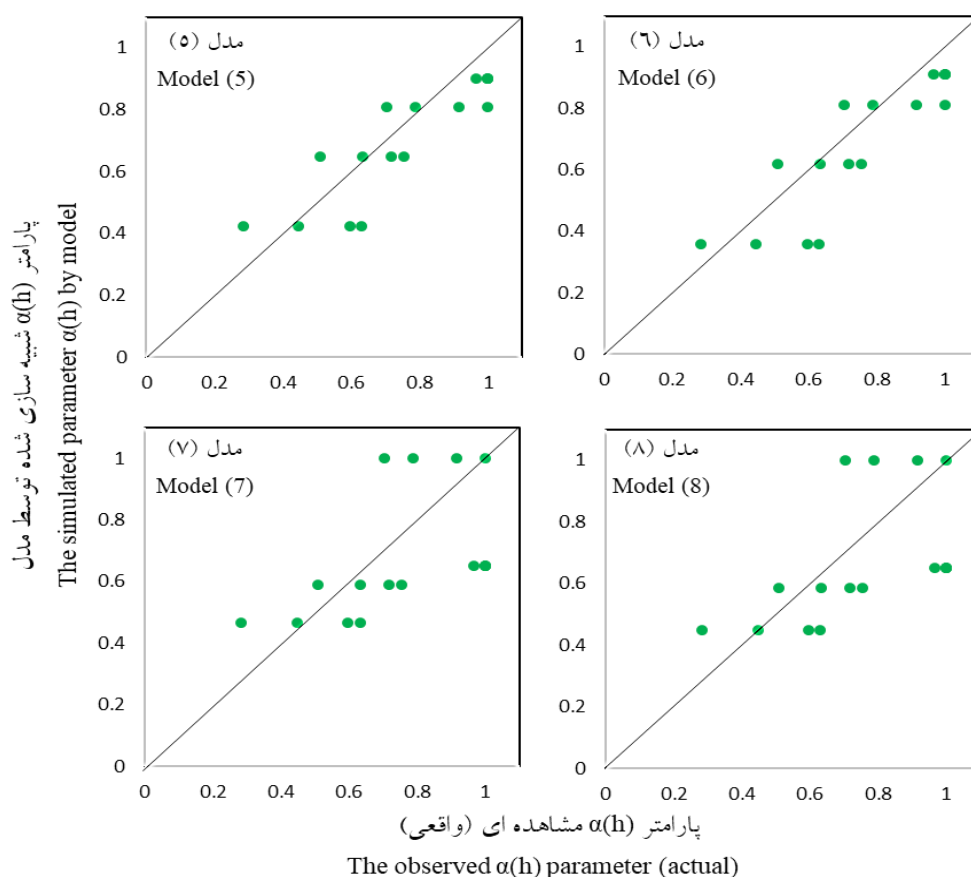
ME	RMSE	R ²	EF	CRM	شماره رابطه (مدل) Model number	حالت ارزیابی تابع Function evaluation mode
0.181 ⁽²⁾	0.081 ⁽²⁾	0.871 ⁽²⁾	0.858 ⁽²⁾	0.028 ^{(1)*}	5	با ضرایب جداگانه در مراحل رشد With separate coefficients in the growth stages
0.1 ⁽¹⁾	0.057 ⁽¹⁾	0.942 ⁽¹⁾	0.928 ⁽¹⁾	0.032 ⁽²⁾	6	
0.363 ⁽⁸⁾	0.171 ⁽⁶⁾	0.503 ⁽⁶⁾	0.374 ⁽⁶⁾	0.099 ⁽⁷⁾	7	
0.348 ⁽⁵⁾	0.16 ⁽⁵⁾	0.546 ⁽⁵⁾	0.448 ⁽⁵⁾	0.086 ⁽⁴⁾	8	
0.206 ⁽³⁾	0.117 ⁽³⁾	0.76 ⁽³⁾	0.705 ⁽³⁾	0.067 ⁽³⁾	5	با ضریب ثابت در کل دوره رشد With a constant coefficient in the growth period
0.271 ⁽⁴⁾	0.129 ⁽⁴⁾	0.759 ⁽⁴⁾	0.641 ⁽⁴⁾	0.095 ⁽⁶⁾	6	
0.349 ⁽⁶⁾	0.214 ⁽⁷⁾	0.277 ⁽⁸⁾	0.02 ⁽⁷⁾	0.093 ⁽⁵⁾	7	
0.35 ⁽⁷⁾	0.216 ⁽⁸⁾	0.289 ⁽⁷⁾	0.006 ⁽⁸⁾	0.101 ⁽⁸⁾	8	

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



شکل ۴- عملکرد توابع کاهش جذب آب در تخمین پارامتر $\alpha(h)$ ، با استفاده از ضرایب جداگانه در مراحل رشد.

Figure 4. Performance of water uptake reduction functions in estimation of $\alpha(h)$ parameter, by using the separate coefficients in growth stages.



شکل ۵- عملکرد توابع کاهش جذب آب در تخمین پارامتر $\alpha(h)$ ، با استفاده از ضرایب ثابت در کل دوره رشد.

Figure 5. Performance of water uptake reduction functions in estimation of $\alpha(h)$ parameter, by using the constant coefficients in growth period.

خشکی در قالب سه سطح تخلیه رطوبتی ۷۰، ۶۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی گیاه اعمال شد. نتایج نشان داد که مدل ون‌گنوختن با مقادیر آماری $ME=0/15$ و $RMSE=3$ بیش‌ترین تطابق را بین داده‌های پیش‌بینی شده و واقعی $\alpha(h)$ در منطقه پارس‌آباد (استان اردبیل) برقرار کرده است (۳۵). پژوهش‌های گذشته دقت و کارایی مدل ون‌گنوختن را برای پیش‌بینی نسبت کاهش جذب آب گیاهان در شرایط تنش آبی تأیید کردند، که از این‌رو با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشته است. اما آنچه که بیش از نتایج پژوهش‌های گذشته بررسی شد، اثبات توانایی مدل ون‌گنوختن در پیش‌بینی مقادیر پارامتر $\alpha(h)$ در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت بود. به‌طورکلی نتایج

در پژوهش‌های مشابه پیشین، مدل‌های کاهش جذب آب برای کل دوره رشد گیاه ذرت دانه‌ای و در شرایط اقلیمی اهواز ارزیابی شد. تیمارهای آبیاری شامل سه سطح I_1 (۱۰۰)، I_2 (۸۰) و I_3 (۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بود. نتایج نشان داد که برای تیمار I_2 مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۷) با شاخص‌های آماری $RMSE=0/1$ و $R^2=0/35$ و برای تیمار I_3 نیز مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۷) با شاخص‌های $R^2=0/51$ و $RMSE=0/1$ بهترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده (واقعی) نسبت به سایر مدل‌ها داشته است (۳۴). در پژوهش دیگر توابع کاهش جذب آب برای کل دوره رشد گیاه فلفل و در شرایط کاربرد تنش‌های هم‌زمان خشکی و شوری، ارزیابی شد. تنش

در فرآیند مدل‌سازی نسبت کاهش جذب آب (پارامتر $\alpha(h)$)، ضرایب توابع به صورت ثابت و متغیر در طول دوره رشد واسنجی شد که مقادیر ضرایب توابع با یکدیگر تفاوت داشت. علت تفاوت مذکور به حساسیت فیزیولوژیکی گیاه در مراحل رشد مربوط بود. از طریق ارزیابی توابع مشخص شد که با کاربرد ضرایب جداگانه در مراحل رشد گیاه نسبت به ضریب ثابت (در کل دوره رشد)، شبیه‌سازی دقیق‌تری از داده‌ها انجام شده است. در میان مدل‌های وِن‌گنوختن (روابط ۵ و ۶)، دیرکسن و همکاران (رابطه ۷) و همایی و همکاران (رابطه ۸)، مدل وِن‌گنوختن (رابطه ۶) به عنوان تابع بهینه شناخته شد. در ارزیابی تابع بهینه (با ضرایب جداگانه)، مقدار آماره‌های CRM، EF ، R^2 ، RMSE و ME به ترتیب برابر با ۰/۰۳۲، ۰/۹۲۸، ۰/۹۴۲، ۰/۰۵۷ و ۰/۱ بود، که نشان‌دهنده دقت مناسب تابع مذکور در شبیه‌سازی داده‌های $\alpha(h)$ بود. البته تابع مذکور با ضرایب ثابت (در دوره رشد) دارای آماره‌های CRM، EF ، R^2 ، RMSE و ME به ترتیب برابر با ۰/۰۹۵، ۰/۶۴۱، ۰/۷۵۹، ۰/۱۲۹ و ۰/۲۷۱ بود، که بیانگر تفاوت قابل‌توجه شیوه مدل‌سازی‌ها در پژوهش حاضر، نسبت به پژوهش‌های گذشته بوده است. در نتیجه با ایجاد تغییرات جزئی در ساختار توابع و اتخاذ تدابیر علمی، می‌توان نسبت به شبیه‌سازی دقیق‌تر مقادیر جذب آب در شرایط تنش‌های محیطی اقدام نمود. به این ترتیب برنامه‌ریزی آبیاری منطبق بر نیاز آبی واقعی گیاهان انجام شده که نتیجه آن مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی خواهد بود.

تقدیر و تشکر

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

پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد توابع کاهش جذب آب با ضرایب ثابت در کل دوره رشد، حساسیت فیزیولوژیکی گیاه را در نظر نمی‌گیرد و به همین دلیل، نتایج مدل‌سازی‌ها برای بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (در طول دوره رشد) دارای دقت کافی نمی‌باشد. بنابراین لازم است که در کاربرد مدل‌های کاهش جذب آب از ضرایب مُجزا در مراحل رشد گیاه استفاده نمود، تا برآورد دقیق‌تری از میزان جذب آب به عمل آورد. با این کار می‌توان نیاز آبی واقعی گیاه را نیز در شرایط تنش محاسبه کرد، که نتیجه آن افزایش بهره‌وری مصرف آب در تولید محصولات زراعی خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر اثر سطوح مختلف تخلیه آب خاک (تنش آبی) و حساسیت مراحل رشد گیاه ذرت، بر جذب آب (توسط گیاه) بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر دو فاکتور مذکور بر جذب آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. یکی از علت‌ها، کاهش پتانسیل آب خاک و عدم سهل‌الوصول بودن آب برای گیاه، در شرایط تنش آبی بود. از سوی دیگر نیاز آبی و حساسیت فیزیولوژیکی متفاوت گیاه باعث شد که جذب آب در مراحل مختلف رشد تفاوت داشته باشد. بر این اساس بیش‌ترین تا کم‌ترین میزان جذب آب گیاه در مراحل رشد توسعه (P_2)، میانی (P_3)، اولیه (P_1) و پایانی (P_4) انجام شد. به علت حساسیت متفاوت در مراحل رشد و به‌ازای هر پنج درصد افزایش تخلیه آب خاک، مقدار جذب آب در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۵، ۶/۹، ۹ و ۴/۶ درصد کاهش پیدا کرد. از این رو دوره رشد زایشی شامل گل‌دهی، گرده‌افشانی و تولید بلال، حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به کمبود آب خاک بود.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش به صورت مستقل و در یک پژوهش آزاد جمع‌آوری شده، که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشد.

اصول اخلاقی

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده است و این موضوع مورد تأیید وی می‌باشد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید نویسنده مقاله است.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است ولی از آزمایشگاه و امکانات گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره) استفاده گردیده است.

مشارکت نویسندگان

همه امور مربوط به اجرای طرح، داده‌برداری، تحلیل داده‌ها، تهیه مقاله و اصلاح و نهایی‌سازی آن توسط تک نویسنده مقاله انجام شده است.

منابع

1. Mukherjee, S., Kumar Dash, P., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. *Journal of environmental processes*. 10, 1-21.
2. Mahrokh, A., Nabipour, M., Roshanfekr, H., & Choukan, R. (2019). Response of some grain maize physiological parameters to drought stress and application of auxin and cytokinin hormones. *Journal of environmental stresses in crop sciences*. 12 (1), 1-15. [In Persian]
3. Hayat, F., Ahmed, M. A., Zarebanadkouki, M., Javaux, M., Cai, G., & Carminati, A. (2020). Transpiration reduction in maize (*Zea mays* L.) in response to soil drying. *Journal of frontiers in plant science*. 10, 1965.
4. Seifi, S., Alizadeh, A., Davari, K., & Banayan Aval, M. (2015). Evaluation of water uptake functions under simultaneous salinity and water stress conditions in Turf Grass. *Iranian journal of irrigation and drainage*. 9 (1), 131-142. [In Persian]
5. Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. *Production, Wageningen*. 189 P.
6. Alizadeh, H. A., Liaghat, A. M., & Noorimohamadeh, M. (2009). Evaluating water uptake reduction functions under salinity and water stress conditions. *Journal of water and soil*. 23 (3), 88-97.
7. Van Genuchten, M. Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research report. US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
8. Dirksen, C., & Augustijn, D. C. (1988). Root water uptake function for non-uniform pressure and osmotic potentials. *Agriculture*. Pp. 188.
9. Homae, M., Feddes, R. A., & Dirksen, C. (2002a). A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Journal of soil science*. 66, 1764-1772.
10. Saeidi, R., & Liaghat, A. M. (2023). Use of water uptake functions for maize yield simulation under the conditions of interaction of soil salinity stress and growth stages. *Journal of water research in agriculture*. 37 (1), 1-15. [In Persian]
11. Homae, M., Feddes, R. A., & Dirksen, C. (2002b). Simulation of root water uptake. III. Non-uniform transient combined salinity and water stress.

- Journal of agriculture and water management*. 57, 127-144.
12. Babazadeh, H., Alizadeh, H., & Saraei-Tabrizi, M. (2016). Developing modified conceptual model for plants response to simultaneous salinity and water stress. *Iranian journal of soil and water research*. 47 (2), 281-292. [In Persian]
 13. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No.56. Pp. 1-326.
 14. Saeidi, R., & Sotoodehnia, A. (2021). Yield reaction to evapotranspiration of maize, under the effect of water stress at different growth stages (in Qazvin plain). *Iranian journal of soil and water research*. 52 (3), 611-620. [In Persian]
 15. Mohammadi Behmadi, M., & Armin, M. (2017). Effect of drought stress on yield and yield components of different corn cultivars in delayed planting conditions. *Journal of applied research of plant eco physiology*. 4 (1), 17-34. [In Persian]
 16. Saeidi, R., Ramezani-Etedali, H., Sotoodehnia, A., Kaviani, A., & 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.
 17. Yang, X., Soothar, R., Rahu, A., Wang, Y., Li, B., Mirjat, M., Soomro, S., Shaikh, S., & 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.
 18. Dehghanisani, H., Kanani, E., & Akhavan, S. (2018). Evaluation of corn evapotranspiration and its components and relationship between leaf area index and components in surface and subsurface drip irrigation systems. *Journal of water and soil*. 31 (6), 1549-1560. [In Persian]
 19. Saeidi, R. (2022a). Application of the stomatal resistance, canopy temperature and crop water stress index in determining of maize irrigation time. *Journal of water and soil science*. 32 (1), 159-175. [In Persian]
 20. Saeidi, R. (2021a). Separation the evaporation and transpiration in maize cultivation and investigation of their response to different irrigation levels. *Iranian journal of soil and water research*. 52 (5), 1263-1273. [In Persian]
 21. Saeidi, R. (2021b). Investigation the intra-seasonal sensitivity of maize evapotranspiration to water stress, at different irrigation levels. *Journal of water and soil*. 35 (3), 335-348. [In Persian]
 22. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. Pp. 32.
 23. Saeidi, R. (2022b). Separate estimation of maize evapotranspiration components by using experimental models under water stress conditions. *Journal of water research in agriculture*. 36 (2), 233-251. [In Persian]
 24. Homaei, M., Feddes, R. A., & Dirksen, C. (2002c). Simulation of root water uptake: II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Journal of agricultural water management*. 57 (2), 111-126.
 25. Hoseini, Y., Ramezani-Moghaddam, J., Nikpour, M. R., & Abdoli, A. (2018). Evaluating water uptake functions under simultaneous salinity and water stress conditions in cherry tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of water research in agriculture*. 32 (2), 248-266. [In Persian]
 26. Farre, I., & 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.
 27. Hemati, R., Maghsoudi, K., & Emam, Y. (2014). Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in northern semi-arid region of Fars. *Journal of crop production and processing*. 4 (11), 67-75. [In Persian]

28. Zhou, S., Liu, W., & 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.
29. She, R., Tong, L., Du, T., & Shukla, M. (2020). Response and modeling of hybrid maize seed vigor to water deficit at different growth stages. *Journal of water*. 12 (11), 1-20.
30. Alkaisi, M. M., & Broner, I. (2009). Crop water use and growth stages. *Colorado state university extension*. 4, 1-189.
31. Doorenbos, J., & Kassam, A. K. (1979). Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33. *FAO*. 1-201.
32. Verdinejad, V. R., Besharat, S., Abghari, H., & Ahmadi, H. (2011). Estimation of maximum allowable deficit in different growth stages of fodder mays using canopy-air temperature difference. *Journal of water and soil*. 25 (6), 1344-1352. [In Persian]
33. Veisipoor, A., Majidi, M. M., & Mirlohi, A. (2012). Traits relationship in sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) under normal and water stress conditions. *Iranian journal of field crop science*. 42 (4), 745-756. [In Persian]
34. Shirmohammadi, A., Soltani Mohammadi, A., & Broumand Nasab, S. (2020). Evaluation of reduced grain water absorption models in Ahwaz climatic conditions. *Iranian journal of irrigation and drainage*. 3 (14), 930-941. [In Persian]
35. Hoseini, Y., Babazadeh, H., & Khakpoor, B. (2016). Evaluating water uptake reduction functions under salinity and water stress conditions in pepper. *Journal of water research in agriculture*. 29 (4), 509-523. [In Persian]