

Estimation parameters of potato root water uptake model under salinity stress in greenhouse conditions

Majid Raoof^{1*} , Haruyuki Fujimaki² 

¹ Professor, Department of Water Engineering and Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Professor, The National University Corporation Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori, 680-0001, Japan

Extended Abstract

Introduction

Accurate prediction of root water uptake under salinity stress contributes to efficient water management in arid and semi-arid regions. Salinity caused by irrigation is a major limiting factor for crop production in these dry environments. Despite water scarcity, the amount of irrigation water must exceed evapotranspiration to leach excess salts and prevent further soil salinization. To minimize water consumption while avoiding yield reduction, precise prediction of root water uptake under salinity stress is essential. Macroscopic root water uptake models, which employ stress response functions describing the dependence of reduction coefficients on matric or osmotic potential at each soil depth, are widely used in soil water and solute transport simulation models such as HYDRUS and SWAP.

Materials and Methods

In this study, an optimization approach was used to determine the root water uptake parameters within a macroscopic model, and the corresponding root water uptake was quantified. The experimental work was conducted in a greenhouse using potato plants. Six pots were prepared for cultivation, three of which were subjected to salinity stress, while the remaining three were used to measure potential transpiration. Each pot was equipped with two moisture sensors installed at different depths to monitor soil moisture and electrical conductivity. Two potato seed tubers were planted in each pot on September 1, 2018, and ten days later (after germination), the number of plants was reduced to one per pot. To prevent soil evaporation, the pot surfaces were covered during the daytime. The pots were weighed manually on a daily basis to determine the actual transpiration rate. The drought stress period began on December 13, 2018, after the volumetric water content had been reduced to 0.35. Salinity stress was applied to the relevant treatments immediately after the onset of drought stress in two stages. In the first stage, irrigation was performed using a 3000-ppm NaCl solution starting on December 13, 2018. Since no reduction in plant transpiration was observed by December 23, 2018, a 5000-ppm NaCl solution was applied on December 23, marking the second stage of salinity stress. The experiments were continued until the relative transpiration (the ratio of actual to potential transpiration) dropped below 0.5. After completing the experiments and following full plant development, all pots were emptied. At the end of the experiment and after the salinity stress period, the root density distribution was determined by harvesting the plants. The root uptake parameters were estimated inversely by minimizing the sum of squared differences between the observed and simulated daily transpiration rates. Finally, root water uptake at each depth and time was calculated by substituting the linearly interpolated osmotic potential into the stress response function.

Results and Discussion

The results showed that the optimized daily transpiration agreed well with the observed values. In addition, the deviations in the three optimized stress response functions were small under low to moderate stress levels, indicating the reliability of the method. In the non-stress treatments, most of the root volume was in the first and fourth soil quartiles. The high root volume in the fourth quartile (the lower part of the soil profile) was due to the limitation of root penetration by the impermeable bottom of the pots. In the salinity-stress treatments, no specific trend was observed, which indicates that the plant showed no consistent pattern in root development and water uptake due to the presence of osmotic

stress. A comparison between the calculated and measured transpiration values around the 1:1 line shows that, in both the non-stress and salinity-stress treatments, most points were located below the 1:1 line and tended toward the calculated transpiration values. This indicates that the transpiration equation is overestimated and can be corrected by a coefficient for potato. In the salinity-stress treatments, transpiration values were much lower than those in the non-stress treatments. The average value of parameter P_2 (the exponent of the water uptake reduction coefficient equation) was obtained as 4.98. The average value of parameter ho_{50} (the osmotic potential at which root water uptake reaches 50% of its potential uptake) was obtained as 4244 cm of water. A comparison of the ho_{50} values shows that potatoes are less tolerant to salinity than canola and more tolerant than bean. In the non-stress treatments, since irrigation was not carried out with saline water, no significant reduction in the uptake reduction coefficient was observed; therefore, the uptake reduction coefficient (α) can be considered equal to unity in this case. In all three salinity-stress treatments, as the salt concentration in the soil solution increased (due to irrigation with saline water and the reduction in soil moisture caused by root water uptake), the uptake reduction coefficient decreased.

Conclusion

As time progressed, and particularly during the mid-growth stage of the potato plants, the transpiration values in the stressed treatments became closer to the mean transpiration of the non-stressed treatments. In the late growth stage, the application of salinity stress in the salinity-stressed treatments led to a decrease in both transpiration and relative transpiration values. This indicates a reduction in the root water uptake capacity in the pots subjected to salinity stress, resulting from an increase in osmotic potential. In the non-stressed treatments, since irrigation was not carried out with saline water, no considerable reduction in the uptake reduction coefficient was observed; therefore, the uptake reduction coefficient (α) may be considered equal to unity in this case. In all three salinity-stressed treatments, as the salt concentration in the soil solution increased due to irrigation with saline water and the reduction in soil moisture caused by root water uptake, the uptake reduction coefficient decreased. In the salinity-stressed treatments, as the osmotic potential increased from 100 to 10,000 cm, the root uptake coefficient decreased from 1 to zero.

Keywords: Macroscopic uptake model, Transpiration, Root density, Osmotic potential, Uptake reduction coefficient

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the **University of Mohaghegh Ardabili** and Arid Land Research Center (ALRC) of **Tottori University** of Japan for their financial and logistical support, which significantly contributed to the success of this research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available at a reasonable request to the corresponding author

Authors' contribution

Majid Raoof: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Software, Writing – original draft; **Haruyuki Fujimaki:** Supervision, Validation, Writing – review & editing.

*Corresponding Author, E-mail: m_raoof@uma.ac.ir

Citation: Raoof, M., & Fujimaki, H. (2026). Estimation parameters of potato root water uptake model under salinity stress in greenhouse conditions. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3): 148-161.

doi: 10.22098/mmws.2026.19799.1814

Received: 15 May 2026, Received in revised form: 22 June 2026, Accepted: 27 June 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 148-161.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





برآورد پارامترهای مدل جذب آب ریشه گیاه سیب زمینی تحت تنش شوری در شرایط گلخانه‌ای

مجید رثوف^{۱*}، هارایوکی فوجیماکی^۲

^۱ استاد گروه مهندسی آب و پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ استاد، مرکز تحقیقات سرزمین‌های خشک، دانشگاه ملی توتوری، ۱۳۹۰ هماساکا، توتوری، ۶۸۰-۰۰۰۱ ژاپن

چکیده

پیش‌بینی دقیق جذب آب ریشه تحت تنش شوری برای مدیریت کارآمد آب در اراضی خشک و نیمه‌خشک ضروری است. در این تحقیق، با استفاده از روش بهینه‌سازی معکوس، پارامترهای مدل ماکروسکوپی جذب آب ریشه برای گیاه سیب‌زمینی در شرایط شوری برآورد شد. آزمایش‌های گلخانه‌ای در شش گلدان شامل سه گلدان تحت تنش شوری و سه گلدان شاهد برای تعیین تعرق بالقوه انجام گرفت. در هر گلدان، تعداد ۲ سنسور رطوبت و هدایت الکتریکی در اعماق مختلف نصب شد و برای جلوگیری از تبخیر، سطح خاک پوشانده شد. وزن گلدان‌ها نیز روزانه اندازه‌گیری شد تا تعرق روزانه به‌دست آید. نتایج نشان داد که در تیمارهای بدون تنش، ضریب کاهش جذب آب ریشه در طول دوره آزمایش تقریباً ثابت و برابر یک بود. در مقابل، در تیمارهای دارای تنش شوری، با افزایش غلظت نمک و افزایش پتانسیل اسمزی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر، ضریب کاهش جذب آب ریشه از ۱ به صفر کاهش یافت که نشان‌دهنده افت شدید توان جذب آب توسط ریشه در شرایط شوری است. مقایسه پارامترهای برآوردشده نشان داد که میانگین P_2 برابر ۴/۹۸ و میانگین $ho50$ برابر ۴۲۴۴ سانتی‌متر آب به‌دست آمد. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که مدل نسبت به P_2 حساس‌تر از $ho50$ است. تعرق روزانه بهینه‌شده نیز تطابق خوبی با مشاهدات داشت. این نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای برآوردشده می‌توانند برای بهبود شبیه‌سازی جذب آب ریشه در مدل‌های HYDRUS و SWAP و نیز برای مدیریت آبیاری در شرایط استفاده از آب شور مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: مدل جذب ماکروسکوپی، تعرق، تراکم ریشه، پتانسیل اسمزی، ضریب کاهش جذب

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_raoof@uma.ac.ir

استناد: رثوف، مجید و هارایوکی، فوجیماکی (۱۴۰۵). برآورد پارامترهای مدل جذب آب ریشه گیاه سیب‌زمینی تحت تنش شوری در شرایط گلخانه‌ای.

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۶(۳)، ۱۴۸-۱۶۱.

doi: 10.22098/mmws.2026.19799.1814

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۱۴۸ تا ۱۶۱.

© نویسندگان:

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

تنش شوری ناشی از آبیاری، یکی از چالش‌های عمده در تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. در این شرایط، به‌منظور پیشگیری از تجمع نمک در نیم‌رخ خاک و حفظ تراز شوری، اعمال آب مازاد بر نیاز تبخیر و تعرق (تأمین نیاز آب‌شویی) الزامی است (Ayers and Westcot, 1985; Abrol et al., 1988). منابع آب و جلوگیری از کاهش عملکرد محصول، پیش‌بینی دقیق فرآیند جذب آب توسط ریشه (RWU) تحت تنش شوری حائز اهمیت است. مدل‌های ماکروسکوپی جذب آب ریشه که با بهره‌گیری از توابع پاسخ تنش، وابستگی ضرایب کاهش جذب به پتانسیل ماتریکی و اسمزی را در اعماق مختلف خاک توصیف می‌کنند، به‌طور گسترده در مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب و املاح، نظیر HYDRUS (Šimůnek et al., 2006) و SWAP (Van Dam et al., 2008) به کار گرفته می‌شوند. در این رویکرد، نرخ واقعی جذب آب که یکی از مؤلفه‌های معادله پیوستگی محسوب می‌شود، از طریق حاصل ضرب ضریب کاهش (α) در نرخ بالقوه جذب آب (S_p) مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Feddes et al., 1978; Feddes and Raats, 2004):

$$S = \alpha S_p \quad (1)$$

در مدل‌های ماکروسکوپی جذب آب توسط ریشه، روش‌های متفاوتی برای تعیین اثر تنش ترکیبی آب و شوری پیشنهاد شده‌اند (Homaee et al., 2002; Feddes and Raats, 2004). در نرم-افزار هایدروس (Šimůnek et al., 2006)، دو روش افزایشی (معادله ۲) و ضربی (معادله ۳) برای شبیه‌سازی کاهش جذب آب تحت اعمال تنش آبی (آب) و شوری وجود دارد.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} + \frac{h_o}{h_{o50}} \right)^p} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_w \alpha_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o}{h_{o50}} \right)^{p_2}} \quad (3)$$

که α_s و α_w به ترتیب ضرایب کاهش ناشی از تنش خشکی و شوری هستند، h و h_o به ترتیب پتانسیل فشاری و پتانسیل اسمزی و h_{50} ، h_{o50} ، p و p_1 و p_2 ضرایب ثابت هستند (van Genuchten, 1987) که از برازش معادله بر اعداد اندازه‌گیری شده قابل استخراج هستند. پارامترهای h_{50} و h_{o50} بیانگر آهنگ جذب آب در زمانی است که مقدار جذب آب توسط ریشه به ۵۰ درصد پتانسیل جذب در اثر تنش آبی و شوری رسیده باشد. همواره یکی از سؤالات اساسی این است که برای هر یک از گیاهان زراعی کدام مدل کاهش جذب آب مناسب‌تر است. آهنگ جذب آب توسط

ریشه تابعی از تراکم یا فعالیت ریشه، (β ، cm^{-1}) و آهنگ تعرق بالقوه، (T_p ، cm d^{-1}) بوده و از معادله ۴ قابل استخراج است:

$$S_p = \beta T_p \quad (4)$$

که در آن β بیانگر تراکم ریشه نرمال شده گیاه مورد نظر بوده و از رابطه ۵ قابل محاسبه است (Fujimaki et al., 2008).

$$\beta = \frac{p_r}{\int p_r dz} \quad (5)$$

از آنجا که مقدار تعرق گیاه برابر مجموع کل آب جذب شده در کل محیط ریشه دوانی گیاه در یک دوره زمانی معین است، با تلفیق روابط ۵، ۴ و ۱، می‌توان مقدار تعرق گیاه را در یک سیستم بسته به حجم معین با معادله ۶ استخراج نمود.

$$T_{cal} = \frac{T_p}{\int p_r dz} \int \alpha p_r dz \quad (6)$$

که در آنها p_r تراکم ریشه‌های فعال است که اغلب با چگالی طول ریشه (cm^{-2}) نشان داده می‌شود و z عمق (cm) است.

همایی و همکاران (۲۰۰۲) ضرایب کاهش را طی یک تحقیقات گلخانه‌ای با استفاده از دستگاه انعکاس سنجی زمانی (TDR) برای کشت یونجه (*Medicago sativa* L) به‌دست آوردند. آنها مقادیر پارامتر را با برازش رابطه بین پتانسیل جذب در ناحیه ریشه و تعرق نسبی (یعنی نسبت تعرق واقعی به بالقوه) تعیین کردند. آن‌ها همچنین فرض کردند که تعرق نسبی با ضریب کاهش در مدل ماکروسکوپی جذب آب توسط ریشه ($\alpha = \frac{T}{T_p}$) برابر است. چنانچه توزیع فعالیت ریشه یکنواخت و تابع کاهش خطی باشد، این روش از نظر ریاضی درست خواهد بود. اما به‌طور کلی، انتشار و توزیع ریشه یکنواخت نیست و توابع کاهش غیرخطی هستند. تابع جذب آب کاهشی فدس و همکاران (۱۹۷۸) از سه بخش خطی تشکیل شده است اما در حالت کلی و در تمام دامنه رطوبتی غیر خطی است. نرخ تعرق بالقوه نه تنها به شرایط هواشناسی بلکه به سطح رشد مانند شاخص سطح برگ (LAI) نیز بستگی دارد. اگر میزان تعرق از گیاهان بدون تنش با رویش و گسترش سطح برگ حداکثر، به عنوان T_p تعریف شود، گیاهان با سطح برگ کمتر در نتیجه تنش هرگز نمی‌توانند به T_p برسند.

Dudley and Shani (2003) مقادیر پارامترهای جذب بهینه شده را با آزمون و خطا به‌دست آوردند و مدل‌های مدل جذب آب ریشه، از جمله مدل جریان پتانسیل توسط نیما و هنکس (۱۹۷۳)، را ارزیابی کردند. Dudley and Shani (2003) از تفاوت بین عملکرد پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده کردند، با این فرض که عملکرد متناسب با تعرق تجمعی است. Skaggs et al. (2006) همچنین فرض کردند که عملکرد نسبی وابسته به ضریب کاهش جذب آب است که خود بستگی به توابع کاهش ناشی از تنش کم آب و شوری یا EC خاک برای انواع محصولات دارد.

به‌طور گسترده از مدل‌های HYDRUS/SWAP استفاده کرده‌اند، اما پارامترسازی P2 و ho50 برای سیب‌زمینی در مناطق خشک همچنان مبهم است و اغلب متکی بر مقادیر تعمیم‌یافته‌ای است که قادر به بازنمایی پاسخ‌های اختصاصی این گیاه نیستند. علاوه بر این، به‌کارگیری «مدل‌سازی معکوس» (Inverse Modeling) برای استخراج این پارامترها، به دلیل یکتا نبودن پاسخ‌ها (non-uniqueness of solutions) با پیچیدگی همراه است.

با وجود مطالعات متعدد پیرامون پاسخ گیاهان به تنش، هنوز خلأ پژوهشی در تعیین معکوس پارامترهای جذب آب ریشه سیب‌زمینی و تحلیل پویای ضریب کاهش جذب در شرایط تنش شوری وجود دارد. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ، به بررسی کمی واکنش گیاه به تنش‌ها پرداخته و با استخراج دقیق ضرایب کاهش جذب، چارچوبی برای بازنمایی رفتار واقعی جذب آب ریشه در شرایط گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. بر این اساس، هدف نهایی این مطالعه، تحلیل اثر سطوح مختلف تنش شوری بر تعرق گیاه و استخراج پارامترهای اختصاصی مدل جذب آب برای گیاه سیب‌زمینی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آزمایش‌ها

در این تحقیق به تعداد ۶ گلدان، به قطر ۱۵ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر در داخل گلخانه در مرکز تحقیقات اراضی خشک دانشگاه توتوری ژاپن در نظر گرفته شد. گلدان‌ها دارای رنگ سفید بودند که تغییرات دما در داخل گلدان را به حداقل ممکن برسانند. سه گلدان A، B و C برای تعیین تحمل گیاه سیب‌زمینی به تنش شوری و سه گلدان دیگر (G، H و I) نیز برای تعیین تعرق پتانسیل گیاه سیب‌زمینی در نظر گرفته شد. گلدان‌ها با خاک شنی توتوری (جدول ۱) پر شد و دو سنسور دی الکتریک (Pullman, WA, 5TE)، در هر یک از گلدان‌ها به طور افقی و به نحوی قرار داده شد که پروب وسط (هر سنسور دارای ۳ پروب هستند)، در اعماق ۵ و ۱۵ سانتیمتری خاک قرار گرفتند. سنسورهای مذکور (Pullman, WA, 5TE) برای اندازه‌گیری رطوبت، هدایت الکتریکی توده (δ_b) و دما در گام‌های زمانی یک ساعته مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ شماتیک گلدان‌های مورد استفاده و سنسورهای داخل آن‌ها را نشان می‌دهد. حجم آب آبیاری بر مبنای میانگین تعرق روزانه سه گلدان G، H و I محاسبه می‌شد. دوره تنش خشکی از تاریخ ۲۰۱۸/۱۲/۱۳ و بعد از اینکه رطوبت حجمی به ۰/۳۵ رسیده شد، آغاز شد.

(Fujimaki et al. (2008) به ارائه یک مدل جذب آب و بررسی تغییرات پارامترهای جذب آب توسط ریشه گیاه سویا در اثر تنش شوری پرداختند. آن‌ها آبیاری گیاه سویا در گلخانه را با آب بدون شوری آغاز و سپس با آب با شوری ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر ادامه داده و سپس با آبیاری با آب با شوری ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به اتمام رساندند. نتایج تحقیق (Fujimaki et al. (2008) نشان داد که تعرق نسبی گیاه سویا در اثر اعمال تنش شوری به شدت کاهش یافته و همچنین مدل ارائه شده در تحقیق آن‌ها به خوبی مقدار کاهش جذب آب توسط ریشه و کاهش تعرق گیاه سویا را پیش‌بینی می‌نماید.

(Yanagawa and Fujimaki (2013) در یک تحقیق به بررسی تحمل کلزا به تنش‌های خشکی و شوری از نظر پارامترهای مدل جذب آب ریشه پرداخته و مدل ارائه شده توسط Fujimaki et al. (2008) را برای گیاه کلزا اصلاح نموده و گسترش دادند. آن‌ها آزمایشی را تحت تنش خشکی، تنش شوری و بدون تنش انجام دادند. دو پروب رطوبت و شوری خاک در هر یک از گلدان‌های تحت تنش برای پایش رطوبت خاک و هدایت الکتریکی قرار داده شد. وزن گلدان‌ها به صورت روزانه و دستی اندازه‌گیری شد تا تعرق روزانه بدست آید. جذب آب در هر عمق و زمان با جایگزینی پتانسیل‌های ماتریک و اسمزی خطی درون یابی شده در تابع پاسخ تنش محاسبه شد. تعیین توابع پاسخ به تنش نشان داد که کلزا نسبت به جاتروفا (*Jatropha*) حساسیت بیشتری به خشکی دارد. در حالی که از نظر تعرق به اندازه جاتروفا به تنش شوری متحمل است. تأثیر پتانسیل ماتریک نسبت به پتانسیل اسمزی برای جذب آب ریشه کلزا بیشتر بود.

تعدادی از تحقیقات در این زمینه با حداقل کردن خطای بین رطوبت آب خاک اندازه‌گیری شده و مدلسازی شده، پارامترهای جذب آب توسط ریشه را شبیه‌سازی نمودند. از جمله این تحقیقات شامل (Rasiah et al. (1992)، (Vrugt et al. (2001)، (Hupet et al. (2002)، (Zuo et al. (2004)، (Skaggs et al. (2006)، (Lapides et al. (2025)، (Amiri and Verdi (2025) و (Rabbel et al. (2018) است. تحقیقاتی نیز در زمینه شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه و استخراج ضرایب جذب آب توسط ریشه با نرم‌افزارهای مختلف صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه چغندر قند با نرم‌افزار Hydrus-3D (Raoof, 2022)، شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه چمن با نرم‌افزار Hydrus (Raoof, 2022) و اشاره نمود. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در مدل‌سازی جذب آب ریشه، همچنان یک شکاف پژوهشی قابل توجه در تعیین پارامترهای تنش اختصاصی برای گیاه سیب‌زمینی وجود دارد؛ گیاهی که حساسیت بالایی به تنش اسمزی نشان می‌دهد. اگرچه مطالعات موجود

اولیه ppm ۳۰۰۰ برای ارزیابی واکنش اولیه گیاه در نظر گرفته شد و با توجه به عدم مشاهده تغییرات محسوس در تعرق، غلظت ppm ۵۰۰۰ برای اعمال تنش شوری شدیدتر و بررسی واکنش گیاه در سطوح بالاتر اعمال شد. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر پارامترهای جذب آب و تعرق را در شرایط شوری متنوع فراهم می‌آورد. بعد از اتمام آزمایش‌ها و رشد کامل گیاه سیب زمینی، تمامی گلدان‌ها تخلیه شدند تا توزیع تراکم ریشه در گلدان‌ها استخراج شوند. ریشه‌های موجود در گلدان‌ها در لایه‌های ۵-، ۱۰-۵، ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتیمتری و با استفاده از الک کردن تر خارج شدند. سپس ریشه‌های هوا خشک شده با استفاده از یک اسکنر مسطح، با وضوح ۳۰۰ dpi اسکن شدند. طول کل ریشه در هر لایه با روش درون مقطعی تعیین شده و سپس توزیع تراکم ریشه برای هر گلدان در چارک‌های مختلف استخراج شد.

۲-۲- کالیبراسیون سنسورهای Pullman, WA, 5TE

سنسورهای Pullman, WA, 5TE قابلیت اندازه‌گیری رطوبت، هدایت الکتریکی و دما را دارند. این سنسورها می‌توانند در اعماق دلخواه در خاک نصب شده و برای بازه‌های زمانی مختلف (از یک ثانیه تا چند روز) تنظیم شده و داده‌برداری انجام دهند. سنسورهای 5TE باید به دیتا لاگرهای EM50 متصل شوند. برای به‌دست آوردن داده‌های رطوبتی دقیق از سنسورهای (Pullman, WA, 5TE)، سنسورها در دومرحله کالیبره شدند. با توجه به اینکه داده‌های خروجی از سنسور با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده دارای اختلاف بودند، در مرحله اول، اعداد خروجی از سنسور با یک رابطه خطی به رطوبت خاک ارتباط داده شدند (معادله ۷).

$$\theta_c = \alpha_{5TE} \theta \quad (7)$$

که در آن θ_c ، α_{5TE} و θ به ترتیب اعداد تصحیح شده سنسور، ضریب اصلاحی و اعداد خام سنسور است.

در مرحله دوم، برای از بین بردن اثرات دما روی رطوبت اصلاح شده گام قبلی، از آنجا که تغییرات پارامتر خروجی سنسور با تغییرات دما، خطی به‌دست آمد، معادله (۸) پیشنهاد شد.

$$\theta_r = \theta_c - \alpha_T (T - T_{ref}) \quad (8)$$

که در آن α_T ، T و T_{ref} به ترتیب ضریب دمایی، دما ($^{\circ}K$) و دمای مبنا ($^{\circ}K$) است. همچنین θ_c عدد سنسور برای دمای مبنا T_{ref} و θ_r عدد قرائت شده سنسور در دمای T است.

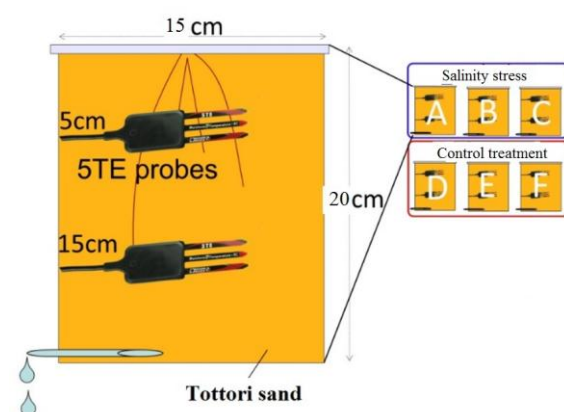
۲-۳- استخراج پتانسیل ماتریک و اسمزی

در گام اول برای به‌دست آوردن پتانسیل ماتریک، با به‌دست آمدن مقادیر رطوبت در زمان‌ها و عمق‌های مختلف، مقادیر پتانسیل ماتریک متناظر با هر رطوبت، با استفاده از منحنی مشخصه آب خاک (برای خاک شنی توتوری) استخراج شد (شکل ۲). برای خاک

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک شنی توتوری

Table 1- Physical and chemical properties of Tottori sandy soil

Property	Unit	Value
Sand	%	97.2
Silt	%	2.8
Clay	%	0
Soil Texture	-	Sand
Bulk Density	gr cm ⁻³	1.4
PH	-	7.45
EC	dS m ⁻¹	0.01
Total Carbon	gr kg ⁻¹	0.05
Total Nitrogen	gr kg ⁻¹	0.03
Available Phosphorus	mgr kg ⁻¹	2.6
Exchangeable Potassium	mgr kg ⁻¹	81.4
Exchangeable Calcium	mgr kg ⁻¹	63.6
Exchangeable Magnesium	mgr kg ⁻¹	64.7



شکل ۱- نمایی از گلدان‌های مورد آزمایش برای بررسی اثر

تنش خشکی و شوری روی جذب آب ریشه گیاه سیب زمینی

Figure 1- A view of the pots used for investigating the effect of drought and salinity stress on water uptake by potato roots

همچنین تنش شوری روی تیمارهای مربوطه، بلافاصله بعد از اعمال تنش خشکی، در دو مرحله اعمال شد. در مرحله اول، آبیاری با محلول NaCl با غلظت ppm ۳۰۰۰ و از تاریخ ۲۰۱۸/۱۲/۱۳ انجام شد. از آنجا که کاهشی در مقدار تعرق گیاه تا تاریخ ۲۰۱۸/۱۲/۲۳ مشاهده نشد، محلول NaCl با غلظت ppm ۵۰۰۰ در تاریخ ۲۰۱۸/۱۲/۲۳ استفاده شد (مرحله دوم تنش شوری). آزمایش‌ها تا زمانی ادامه یافتند که تعرق نسبی (نسبت تعرق واقعی به پتانسیل) کمتر از ۰/۵ شد. مبنای انتخاب غلظت‌های ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm بر اساس سطوح تنش شوری قابل تحمل و پاسخ‌دهی فیزیولوژیکی گیاه سیب‌زمینی و همچنین غلظت‌های شوری رایج در خاک‌های کشاورزی صورت گرفته است. این غلظت‌ها با در نظر گرفتن تحقیقات پیشین در زمینه تنش شوری بر محصولات مشابه انتخاب شدند تا طیف معناداری از پاسخ گیاه به شوری، از تنش خفیف تا تنش شدیدتر، مورد بررسی قرار گیرد. غلظت

که در آن W ضریب تبدیل واحد $(\frac{cm.kg}{J})$ ، M جرم مولکولی $NaCl$ $(\frac{gr}{mol})$ ، X ضریب اسمزی، R ثابت گازها $(\frac{J}{mol.K})$ ، T دما (K) است.

۴-۲- استخراج ضرایب جذب ریشه تحت تنش

خشکی و شوری

از یک طرف، با جای گذاری معادله ۲ در معادله ۶ مقدار تعرق گیاه در روزهای مختلف و تحت تنش خشکی و شوری متفاوت محاسبه شد. از طرف دیگر با وزن کردن گلدان‌ها در هر روز مقدار تعرق اندازه‌گیری شده استخراج شد. جهت استخراج ضرایب جذب ریشه تحت تنش خشکی و شوری، شامل پارامترهای h_{50} ، $h_{0.50}$ و p در معادله ۲، از مقایسه مقادیر تعرق اندازه‌گیری شده و محاسبه شده و حداقل کردن خطای بین این دو پارامتر استفاده شد. مقادیر پارامترهای h_{50} ، $h_{0.50}$ و p در تابع جذب، با حل معکوس به روش حداکثر همسایگی لونبرگ-مارکوارت (Marquardt, 1963) برآورد شد (معادله ۱۲)

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{T=1}^N [T_{cal} - T]^2 \right)^{0.5} \quad (12)$$

۵-۲- آنالیز حساسیت و شاخص‌های ارزیابی

آنالیز حساسیت حد یا درجه‌ی حساسیت یک مدل ریاضی را به پارامترهای ورودی آن نشان می‌دهد. آنالیز حساسیت روشی برای ارزیابی و واسنجی مدل‌های ریاضی است. به‌طور کلی، آنالیز حساسیت را به دو روش کیفی و کمی می‌توان اجرا کرد. در این تحقیق، آنالیز حساسیت مدل نسبت به دو پارامتر P_2 و $h_{0.50}$ مورد بررسی قرار گرفت.

جهت مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده تعرق گیاه سیب زمینی، علاوه بر ضریب رگرسیون (R^2)، از شاخص‌های ارزیابی آماری زیر استفاده شد.

۱- خطای نسبی (RE): این پارامتر بر حسب درصد بیان می‌شود و هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان دهنده‌ی دقت بالای مدل است (Raouf et al., 2022).

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

۲- ضریب جرم باقیمانده (CRM): تمایل مدل در برآورد بالاتر یا پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد، هرگاه CRM منفی شود، نشان می‌دهد که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و برعکس (Raouf et al., 2022).

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (14)$$

۳- نسبت خطای متوسط هندسی (GMER): این پارامتر بیانگر پیش برآوردی یا کم بر آوردی مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر

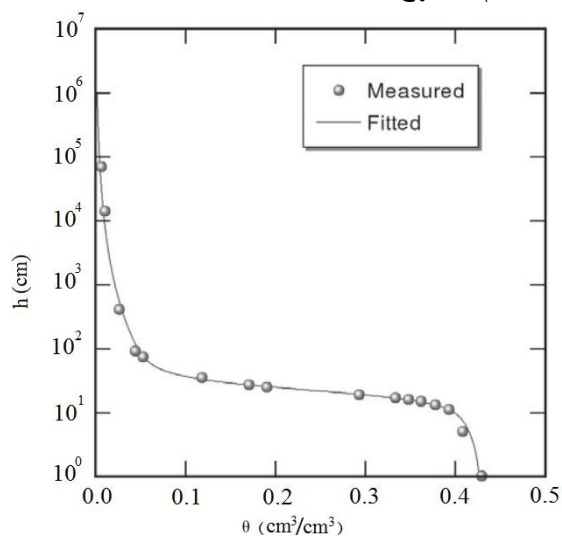
شنی توتوری (مورد استفاده در این تحقیق به عنوان بسترکشت)، معادله منحنی نگهداشت آب خاک زورموهل و دورنر (۱۹۹۸)، مورد استفاده قرار گرفت (معادله ۹).

$$\theta = \frac{\omega \theta_{sat}}{[1 + (-\alpha_1 h)^{n_1}]^{1-1/n_1}} + \frac{(1 - \omega) \theta_{sat}}{[1 + (-\alpha_2 h)^{n_2}]^{1-1/n_2}} \quad (9)$$

که در آن ω ، α_1 ، α_2 ، n_1 و n_2 پارامترهای برازش می‌باشند. برای خاک شنی توتوری (بستر کشت در تحقیق حاضر)، مقادیر $\theta_{sat} = 0.429$ ، $\omega = 0.736$ ، $\alpha_1 = 0.0469$ ، $\alpha_2 = 0.141$ ، $n_1 = 4.87$ و $n_2 = 1.33$ برای شاخه خشک شدگی منحنی مشخصه استخراج شده‌اند (فوجیماکي و همکاران ۲۰۰۸). از آن‌جا که معادله ۹ بصورت صریح برای h قابل حل نیست، از روش تصنیف یا دو بخشی برای حل معادله استفاده شد. در گام دوم برای به‌دست آوردن پتانسیل اسمزی، با داشتن هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده (با سنسور 5TE)، ابتدا مقدار غلظت املاح آب خاک با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه شد

$$TDS = 640 EC \quad (10)$$

که در آن $TDS=c$ غلظت املاح موجود در محلول $(\frac{mg}{lit})$ و EC هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده $(\frac{dS}{m})$ است. سپس با داشتن غلظت املاح ($c=TDS$)، پتانسیل اسمزی از رابطه وانت هوف (معادله ۱۱) استخراج شد.

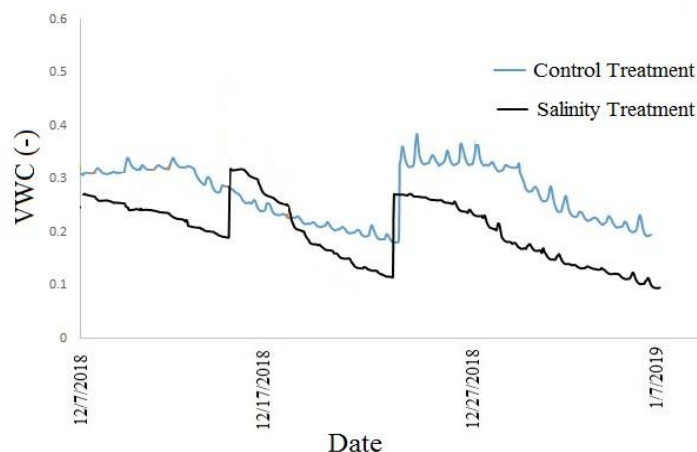


شکل ۲- منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و برازش داده شده

برای خاک شنی توتوری (فوجیماکي و همکاران ۲۰۰۸)

Figure 2- Measured and fitted characteristic curves for the sandy soil of Totori (Fujimaki et al., 2008)

$$h_0 = 2 w \frac{c}{M} \times R T \quad (11)$$

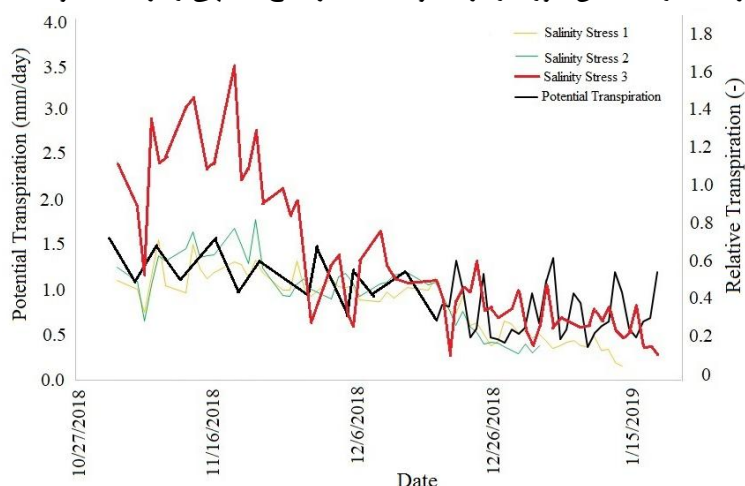


شکل ۴- تغییرات میانگین رطوبت خاک برای گلدان‌های بدون تنش و تنش شوری

Figure 4- Mean soil moisture variations for unstressed and salt-stressed pots

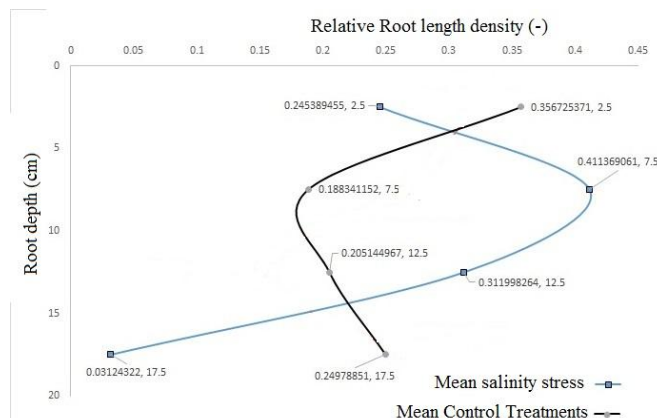
عمق ۵ و ۱۵ سانتیمتری عمق خاک نشان می‌دهد. چنانچه از شکل مشخص است، مقادیر EC در عمق ۵ سانتیمتری خاک همواره از عمق ۱۵ سانتیمتری خاک بیشتر بوده است که می‌تواند به دلیل جذب بیشتر آب از لایه بالایی خاک و در نتیجه باقی ماندن بیشتر نمک در لایه‌های بالایی خاک باشد. شکل ۸ مقایسه میانگین مقادیر تعرق اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را برای تیمارهای بدون تنش و با تنش شوری، در اطراف خط ۱:۱ نشان می‌دهد. در هر دو سری تیمارهای بدون تنش و دارای تنش شوری، بیشتر نقاط در پایین خط ۱:۱ قرار گرفته و به سمت تعرق محاسبه شده گرایش دارند. این موضوع بیانگر آن است که معادله ۶ دارای بیش برآوردی است و می‌تواند توسط یک ضریب برای سیب زمینی اصلاح شود. در تیمارهای دارای تنش شوری مقادیر تعرق به مراتب کمتر از تیمارهای بدون تنش است. فوجیماکی و همکاران (۲۰۰۸) نیز نتایج مشابهی را برای گیاه لوبیا استخراج نمودند.

شکل شماره ۶ میانگین تغییرات تراکم نسبی طول ریشه نسبت به عمق را برای دو تیمار بدون تنش و تنش شوری نشان می‌دهد. چنانچه از شکل ۶ مشخص است در تیمارهای بدون تنش، اکثر حجم ریشه در چارک اول و چهارم از سطح خاک قرار گرفته است. دلیل بالا بودن حجم ریشه در چارک چهارم (بخش زیرین)، محدود شدن عمق ریشه دوانی گیاه توسط سطوح نفوذناپذیر گلدان بوده است. در تیمارهای تنش شوری، روند خاصی مشاهده نمی‌شود. عدم مشاهده الگوی مشخص در توزیع ریشه ممکن است ناشی از تغییر پاسخ ریشه به افزایش پتانسیل اسمزی، محدودیت جذب آب و تجمع نمک در برخی لایه‌ها باشد. جهت تعیین اثر تنش شوری روی میزان جذب آب توسط ریشه و ضریب ثابت کاهش جذب (α) ، داده‌های مربوط به هدایت الکتریکی مستخرج از سنسورها مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۷ تغییرات میانگین هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده برای تیمارهای تنش شوری را برای دو



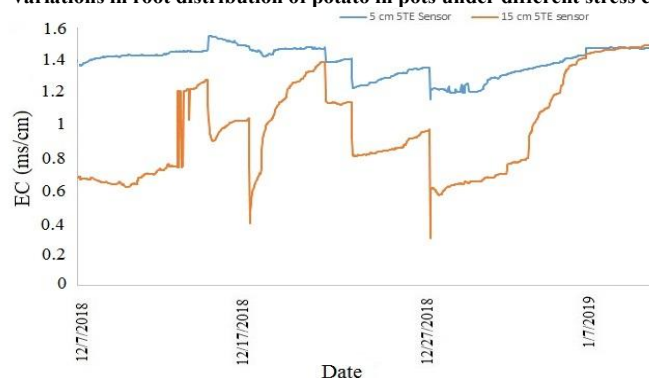
شکل ۵- تغییرات میانگین تعرق پتانسیل و نسبی برای تیمار بدون تنش و تنش‌های شوری

Figure 5- Mean changes in potential and relative transpiration for the unstressed treatment and salinity stresses



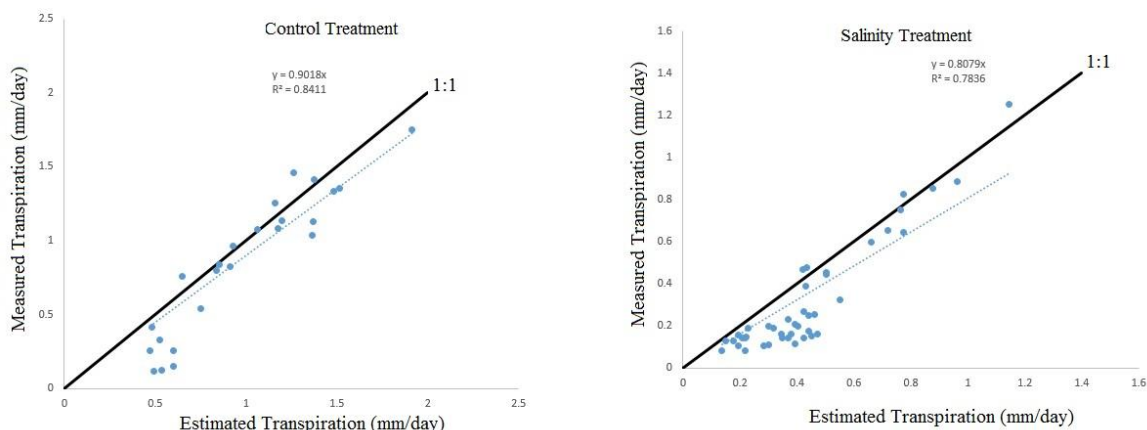
شکل ۶- تغییرات تراکم طول ریشه در اعماق مختلف

Figure6- Variations in root distribution of potato in pots under different stress conditions



شکل ۷- تغییرات میانگین هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده برای تیمارهای تنش شوری

Figure7- Mean changes in electrical conductivity measured for salinity stress treatments



شکل ۸- مقایسه میانگین مقادیر تعرق اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در اطراف خط ۱:۱

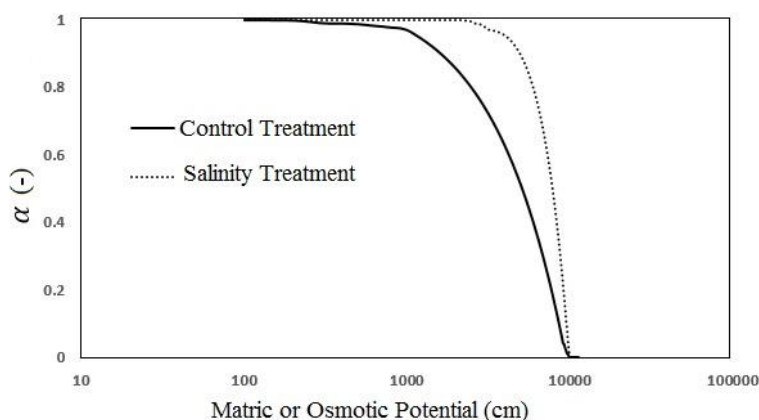
Figure-8. Comparison of mean measured and calculated transpiration values around the 1:1 line

تیمارهای بدون تنش (میانگین ۳ تیمار) و تیمارهای دارای تنش شوری نشان می‌دهد. در تیمارهای بدون تنش، از آن‌جا که آبیاری با آب شور انجام نمی‌شود کاهش قابل ملاحظه‌ای در ضریب کاهش جذب مشاهده نشد به طوریکه می‌توان ضریب α را برای این حالت برابر واحد در نظر گرفت. در هر سه تیمار دارای تنش شوری با افزایش غلظت NaCl در محلول آب در خاک (در اثر آبیاری با آب شور و کاهش رطوبت در اثر جذب آب توسط ریشه) ضریب کاهش جذب کاهش یافت.

در نهایت با قرار دادن مقادیر غلظت نمک حل شده در معادله ۱۱، مقادیر h_0 محاسبه شده و در معادله ۲ قرار داده شد و با داشتن این پارامتر و رطوبت در زمان‌های مختلف، مقادیر ضریب کاهش جذب (α)، برای تیمارهای دارای تنش شوری و بدون تنش استخراج شد. شایان ذکر است که مقادیر h_0 برای تیمارهای بدون تنش برابر صفر در نظر گرفته شد و بنابراین ترم $\frac{h_0}{h_{050}}$ برای این تیمارها، از معادله ۲ حذف شد. شکل ۹ تغییرات ضریب کاهش جذب آب توسط ریشه (α) نسبت به تغییرات پتانسیل اسمزی را برای

همکاران (۲۰۰۸) برای گیاه لوبیا و تحقیقات یاناگوا و فوجیمای (۲۰۱۳) برای گیاه کانولا همخوانی نشان می‌دهد.

در تیمارهای تنش شوری، با افزایش پتانسیل اسمزی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰۰ سانتیمتر، ضریب α از عدد ۱ به صفر کاهش نشان داد. نتایج این بخش با نتایج مستخرج از تحقیقات فوجیمای و



شکل ۹- تغییرات ضریب کاهش جذب آب توسط ریشه (α) نسبت به پتانسیل اسمزی

Figure 9- Variations in root water uptake reduction coefficient (α) with respect to osmotic potential

گفت که تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد که مدل مورد نظر نسبت به پارامتر P_2 حساس‌تر از پارامتر h_{050} است. در تمام موارد مقدار پارامتر CRM منفی و مقادیر GMER بیشتر از واحد به‌دست آمده است که نشان می‌دهد که مدل بیش برآورد بوده است. تنها به ازای مقادیر بهینه پارامترهای P_2 و h_{050} ، مقدار خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد شده و در این محدوده مدل دارای عملکرد بسیار خوبی بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این این تحقیق اثر تنش شوری روی گیاه سیب زمینی در یک خاک شنی، در گلخانه مرکز اراضی خشک ژاپن (دانشگاه توتوری) مورد تحقیق قرار گرفت. دو مرحله تنش شوری، با آبیاری با آب شور (به ترتیب با غلظت ۳۰۰۰ ppm و ۵۰۰۰ ppm) اعمال شد و مقادیر تعرق گیاه به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. همچنین رطوبت خاک به صورت ساعتی با سنسورهای نصب شده در گلدان‌ها اندازه‌گیری شد. با گذشت زمان و در اواسط دوره رشد گیاه سیب زمینی، مقادیر تعرق تیمارهای دارای تنش به میانگین تعرق تیمارهای بدون تنش نزدیک تر شده است. در اواخر دوره رشد و در اثر اعمال تنش شوری در تیمارهای دارای تنش شوری، مقادیر تعرق و تعرق نسبی در تیمارهای دارای تنش شوری کاهش یافته است که بیانگر کاهش توان جذب آب توسط ریشه در گلدان‌های دارای تنش شوری و در اثر بالا رفتن پتانسیل اسمزی است. با به‌کارگیری روش حل معکوس (Inverse method)، پارامترهای کلیدی مدل جذب آب ریشه برای گیاه سیب‌زمینی در شرایط تنش شوری استخراج شد.

جدول شماره ۱ مقادیر بهینه شده پارامترهای P_2 و h_{050} (ضرایب ثابت معادله ۳)، میانگین و ضریب تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای مذکور به روش حل معکوس استخراج شده است. میانگین ضریب P_2 (توان معادله ضریب کاهش جذب) برابر ۴/۹۸ به‌دست آمده است. فوجیمای و همکاران (۲۰۰۸) این مقدار را برای لوبیا برابر ۵/۳۲ و یاناگوا و فوجیمای (۲۰۱۳) نیز برای کانولا برابر ۴/۹ استخراج نموده‌اند. میانگین پارامتر h_{050} (پتانسیل اسمزی در نقطه ای که جذب ریشه گیاه به ۵۰ درصد جذب پتانسیل می‌رسد) برابر ۴۲۴۴ سانتیمتر آب به‌دست آمد. این مقدار برای کانولا برابر ۴۳۹۵ سانتیمتر آب (یاناگوا و فوجیمای ۲۰۱۳) و برای لوبیا برابر ۳۲۲۱ سانتیمتر آب (فوجیمای و همکاران ۲۰۰۸) به‌دست آمده است. مقایسه مقادیر h_{050} نشان می‌دهد که گیاه سیب زمینی نسبت به کانولا کم تحمل‌تر و نسبت به لوبیا دارای تحمل بیشتری نسبت به تنش شوری است. جدول شماره ۲ نیز تحلیل حساسیت مدل را نسبت به تغییرات پارامترهای P_2 و h_{050} (ضرایب ثابت معادله ۳)، مقادیر بهینه این پارامترها و مقادیر پارامترهای ارزیابی مدل نشان می‌دهد. جهت بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات هر کدام از این دو پارامتر، یکی از آنها ثابت در نظر گرفته شده و پارامتر دیگر به اندازه ± 10 و ± 20 میانگین پارامتر تغییر داده شده است، تا میزان تغییر در پارامترهای ارزیابی استخراج شده و در نهایت تأثیرگذاری هر پارامتر مشخص شود. ستون آخر جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر تغییر پارامتر P_2 روی میانگین تغییرات پارامترهای R^2 ، RMSE، RE، CRM و GMER بیشتر از اثر تغییر پارامتر h_{050} بوده است. لذا می‌توان

جدول ۱- مقادیر بهینه شده پارامترهای P_2 و h_{050} و معیارهای مقایسه مربوطه

Table 1- Optimized values of parameters P_2 and h_{050} and their associated comparison criteria

Treatment	P_2	h_{050}	RMSE (mm d ⁻¹)
A	3876	4.63	0.31
B	4325	5.48	0.37
C	4532	4.84	0.46
Average	4244	4.98	
CV	441	0.37	

جدول شماره ۲- تحلیل حساسیت مدل جذب ریشه نسبت به مقادیر ضریب جذب P_2 و h_{050} و پارامترهای مقایسه مربوطه

Table 2. Sensitivity analysis of the root absorption model regarding P_2 and h_{050} coefficients and related comparison parameters

uptake coefficient	Parameter Value	Statistical Parameter					Mean Variation
		R2	RMSE	RE	CRM	GMR	
P_2	4.98 (Optimal Value)	0.7836	0.381	8.24	-0.032	1.11	-0.097
	5.48	0.7325	0.446	15.32	-0.173	1.22	0.1338
	5.98	0.6354	0.602	19.35	-0.245	1.28	7.844
	4.48	0.7125	0.487	16.21	-0.189	1.26	-0.1662
	3.98	0.5689	0.658	21.3	-0.352	1.43	0.15
h_{050}	4244 (Optimal Value)	0.7836	0.381	8.24	-0.032	1.11	-0.066
	4668	0.7725	0.426	12.36	-0.125	1.18	0.1038
	5093	0.6943	0.557	16.45	-0.184	1.26	5.336
	3820	0.7245	0.446	13.52	-0.142	1.2	-0.105
	3395	0.6132	0.614	17.31	-0.202	1.34	0.108

برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق با محدودیت منابع آبی مطرح می‌باشند.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از دانشگاه محقق اردبیلی به علت تامین بخشی از هزینه‌های طرح حاضر در قالب طرح درون سازمانی با کد ۱۴۰۳/۵/۲۵۸۵۷ و مرکز تحقیقات اراضی خشک ژاپن (وابسته به دانشگاه توتوری) به علت تامین بخشی از هزینه‌ها و وسایل و دستگاه‌های مورد نیاز طرح، تقدیر و تشکر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

"نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند."

دسترسی به داده‌ها

"داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت."

مشارکت نویسندگان

مجید رثوف: تعریف اولیه پروژه، رهبری و انجام آزمایش‌ها، مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **هاریوکی فوجیمایی:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

ضریب کاهش جذب (α) با افزایش پتانسیل اسمزی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر، روندی نزولی را طی می‌کند و مقدار میانگین h_{050} برابر با ۴۲۴۴ سانتی‌متر آب، جایگاه حد واسط سبب‌زمینی را از نظر تحمل به شوری در مقایسه با ارقام حساس (مانند لوبیا) و مقاوم (مانند کلزا) تثبیت می‌کند. نکته حائز اهمیت در تحلیل حساسیت مدل، حساسیت بیشتر برون‌دادها نسبت به پارامتر P_2 (توان معادله) در مقایسه با پارامتر h_{050} است که نشان می‌دهد دقت در برازش این توان، نقشی کلیدی در کاهش خطای مدل‌سازی ایفا می‌کند. بهره‌گیری از این پارامترهای بهینه‌شده که در محدوده خطای کمتر از ۱۰ درصد استخراج شده‌اند، ظرفیت‌های نوینی را برای ارتقای دقت مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نظیر HYDRUS و SWAP فراهم می‌آورد. با جای‌گذاری این ضرایب اختصاصی در مدل‌های مذکور، می‌توان شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در محیط ریشه را با اطمینان بالاتری انجام داد که این امر به نوبه خود، زیربنای تدوین راهبردهای دقیق آبیاری در مناطق تحت تنش شوری است. در واقع، شناخت دقیق آستانه‌های کاهش جذب ریشه، مدیران منابع آب را قادر می‌سازد تا با مدیریت هوشمندانه غلظت نمک در پروفیل خاک، از افت ناگهانی تعرق گیاه پیشگیری کرده و تعادلی پایدار میان بهره‌وری مصرف آب و عملکرد محصول در شرایط استفاده از منابع آب شور ایجاد نمایند. لذا این نتایج نه تنها به عنوان داده‌های عددی دقیق، بلکه به عنوان ابزاری تصمیم‌ساز

منابع

رئوف، مجید، اکبری باصری، زینب، رسولزاده، علی، و عزیزی مبصر، جوانشیر (۱۴۰۱). تحلیل حساسیت نرم افزار Hydrus نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه گیاه مرجع چمن. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۳)، ۹۴-۱۰۷. doi: 10.22098/mmws.2022.10847.1090

رئوف، مجید (۱۴۰۱). تأثیر پارامترهای ورودی نرم‌افزار Hydrus 3D روی شبیه‌سازی همزمان حرکت آب و جذب ریشه چغندرقد. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰ (۴۶)، ۳۷۷-۳۹۳. doi: 10.22125/iwe.2021.142421

References

- Abrol, I.P., Yadav, J.S.P., & Massoud, F.I. (1988). Salt-affected soil and their management. *FAO Soils Bull.* 39. FAO, Rome. doi:10.4060/CA9215EN
- Amiri, Z., & Verdi, A. (2025). Modeling root water uptake of landscape groundcovers with HYDRUS-1D and particle swarm optimization. *Agricultural Water Management*. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109972
- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. doi: 10.1596/978-1-4648-1459-4
- Dudley, L.M., & Shani, U. (2003). Modeling plant response to drought and salt stress: Reformulation of the root-sink term. *Vadose Zone Journal*. 2:751-758. doi:10.2136/vzj2003.7510
- Feddes, R.A., & Raats, P.A.C. (2004). Unsaturated-zone modeling: Progress, challenges, and applications parameterizing the soil-water-plant root system. pp. 1-95-141, Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands. doi:10.2136/vzj2006.0162br
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. & Zaradny, H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs*. Pudoc. Wageningen. 189 pp. doi:10.37501/soilsa/161944
- Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, Y. & Inoue, M. (2008). Parameter estimation of a root water uptake model under salinity stress. *Vadose Zone Journal*, 7:31-38. doi:10.2136/vzj2007.0025
- Homaee, M., Feddes, R.A., & Dirksen, C. (2002). A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. *Soil Science. Society of American Journal*, 66:1764-1772. doi:10.2136/sssaj2002.1764
- Hupet, F., Lambot, S., Javaux, M., & Vanclooster, M. (2002). On the identification of macroscopic root water uptake parameters from soil water content observations. *Water Resource Research*, 38(12):1300. doi:10.1029/2002WR001556
- Lapides, D. A., Dralle, D. N., Hahm, W. J., Dietrich, W. E., & Rempe, D. M. (2025). Root water uptake resolved by distributed moisture storage changes through soil and weathered bedrock. *Water Resources Research*, 61, e2025WR040778. doi:10.1029/2025WR040778
- Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Applied Mathematics*. 11:431-441. doi:10.1137/0111030
- Nimah, M.N., & Hanks, R.J. (1973). Model for estimating soil, water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. *Soil Science. Society of American Journal*, Proc. 37: 522-527. doi:10.1007/BF00296706
- Rabbel, I. Bogen, H. Neuwirth, B., & Dieckkrüger, B. (2018). Using sap flow data to parameterize the Feddes water stress model for Norway spruce. *Water*, 10 (3), doi:10.3390/w10030279
- Raoof, M. (2022). Effect of Hydrus 3D Input Parameters on Simultaneous Simulation of Water Movement and Sugar Beet Root Water Uptake. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*. 46(2), 377-393. (In Persian) doi: 10.22125/iwe.2021.142421
- Raoof, M., Akbari Baseri, Z., Rasoulzadeh, A., & Azizi Mobaser, J. (2022). Sensitivity analysis of Hydrus software to input data in simulating water movement and root uptake of grass as a reference plant. *Water and Soil Management and Modeling*. 2(3): 94-107. (In Persian) doi:10.22098/mmws.2022.10847.1090
- Rasiah, V., Carison, G. C., & Kohl, R. A. (1992). Assessment of functions and parameter estimation methods in root water uptake simulation. *Soil Science. Society of American Journal*, 56:1267-1271. doi:10.2136/sssaj
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., & Šejna, M. (2006). The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, PC Progress, Prague, Czech Republic. doi:10.1029/2002WR001340
- Skaggs, T. H., Shouse, P. J., & Poss, J. A., 2006. Irrigation of forage crops with saline drainage waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone Journal*, 5:824-837. doi:10.2136/vzj2005.0120
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., & J. G. Kroes, 2008. Advances of modeling

- water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, doi:10.2136/vzj2007.0060
- van Genuchten, M.Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, U.S. Salinity Laboratory. USDA, ARS, Riverside, CA. doi:10.3390/w12061594
- Vrugt, J.A., J.W. Hopmans., & J. Simunek. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of American Journal*, 65(4):10271037. doi:10.2136/sssaj2001.6541027x
- Wagner, B., Tarnawski, V. R. Hennings., Müller, V., Wessolek, U., & Plagge, R. (2001). Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102, 275-297. doi:10.1016/S0016-7061(01)00037-4
- Yanagawa, A., & Fujimaki, H. (2013): Tolerance of canola to drought and salinity stresses in terms of root water uptake model parameters. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, 61: 73–80. doi:10.2478/johh-2013-0009
- Zuo, Q., M. Lei., & R. Zhang. 2004. Simulating soil water flow with root-water-uptake applying an inverse method. *Soil Science*, 169(1):13–24. doi:10.1097/01. ss.0000112018.97541.85
- Zurmühl, T., & W. Durner. 1998. Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse modeling. *Soil Science Society of American Journal*, 62(4): 874–880. doi:10.2136/sssaj1998