



## Investigation of maize root response to different ionic composition using macroscopic reduction functions

Abouzar Bazrafshan<sup>1</sup>, Mehdi Shorafa<sup>2</sup>, Mohammad Hossein Mohammadi<sup>3</sup>, Ali Asghar Zolfaghari<sup>4</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: [abouzar2010iut@gmail.com](mailto:abouzar2010iut@gmail.com)

2. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: [m\\_shorafa@ut.ac.ir](mailto:m_shorafa@ut.ac.ir)

3. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: [mhmohmad@ut.ac.ir](mailto:mhmohmad@ut.ac.ir)

4. Desertification Department, Faculty of Desert Science, University of Semnan, Semnan, Iran, E-mail: [azolfaghari@semnan.ac.ir](mailto:azolfaghari@semnan.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Nov. 10, 2024

**Revised:** Dec. 24, 2024

**Accepted:** Feb. 1, 2024

**Published online:** May. 2025

**Keywords:**

Electrical Conductivity,  
Ion Concentration,  
Osmotic Potential,  
Salinity Stress.

### ABSTRACT

In this study, our aim is to investigate the effect of salinity stress of NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> ionic compositions in maize (*Zea Mays* L.) root mass. Two parallel greenhouse experiments were conducted in pots in a randomized complete design with 4 replicates. The different salinity levels (0, 61, 126, 252 and 336 kPa) were similarly applied in both ionic compositions. The osmotic potential in pots was kept constant after the treatment initiation. The maize root response was investigated using osmotic potential, ion concentration and electrical conductivity salinity parameters and then were evaluated by linear Maas-Hoffman and non-linear van Genuchten-Hoffman models. The imposed salinity stress significantly affected root mass in both NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> ionic compositions. The results of this study revealed that osmotic potential is a more appropriate parameter than ion concentration and electrical conductivity for maize root response to salinity stress. Based on osmotic potential, the salinity threshold values of NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> ionic compositions were obtained 0 kPa and 2.49 kPa, respectively which implies effect of ion type on sensitivity of maize root mass to salinity stress. The estimated root mass values using reduction functions indicated that exponential model of van Genuchten-Hoffman in both NaCl+CaCl<sub>2</sub> (nRMSE=4.71) and CaCl<sub>2</sub> (nRMSE=5.69) ionic compositions had more accuracy than linear model of Maas-Hoffman. In addition, modeling efficiency of exponential model (EF=0.991) was larger than linear model (EF=0.98).

Cite this article: Bazrafshan, A., Shorafa, M., Mohammadi, M. H., & Zolfaghari, A. A. (2025). Investigation of maize root response to different ionic composition using macroscopic reduction functions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 685-700. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384928.669833>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384928.669833>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Low precipitation and high evapotranspiration due to the increasing of weather temperature cause drought stress and soil salinization. In order to fill the gap between demand and supply of freshwater, use of marginal waters including urban wastewater, drainage water and saline water is necessary in arid and semi-arid areas. Plant yield is primarily in relation with physiological response to abiotic stresses. Salt stress affect maize yield in two ways including osmotic stress generated by saline solution around roots and ionic effect (ion toxicity) resulting from excessive ion absorption. Plant response to salinity stress depends on the ionic compositions in soil solution, accumulation of ions in plant tissue and climate conditions. The reports by different studies indicate that nonlinear models could provide higher performances than linear models. The main objectives of this research were: (1) investigating maize root mass response to salt stress using different salt compositions (2) evaluating salinity water uptake reduction functions using maize root tissue.

### Materials and Methods

Two parallel experiments were performed in a greenhouse with maize. The average air temperature and relative humidity of greenhouse were  $30 \pm 10$  °C and  $30 \pm 20$  %, respectively. The soil material was collected from the layer of 0-30 cm depth from agricultural field in Abyek area situated in Qazvin province. The soil material was passed through a 4 mm sieve for cultivation and part of the soil samples were passed through a 2-mm sieve for determination of soil physical and chemical properties. The maize (*Zea mays*, L., var. SC704), was cultivated in pots. Soil texture was determined with the Hydrometer method. The pH and EC were measured in the saturated soil extract. The saline water separately were produced by NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> salt compositions in tap water. Five salinity treatment with osmotic potentials 0, -61, -126, -252 and -336 were provided for each salt composition. As the salinity treatments started, the matric potential in the salinity experiment was kept at -10 kPa, using the hanging water column technique. From the moment that salt water replaced the tap water in the pots, the quantity of drainage water was recorded daily for each pot and the root water uptake was calculated.

### Results and discussions

Salinity of irrigation water significantly affected maize root mass in both NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> salt compositions. Salinity stress differently decreased root mass in both salt compositions due to ion type effect. In both NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> salt compositions, S<sub>3</sub> and S<sub>4</sub> salinity treatments showed insignificant difference, while S<sub>2</sub> salinity treatment showed significant difference with S<sub>0</sub>, S<sub>3</sub> and S<sub>4</sub> salinity treatments. However, NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> salt compositions showed significant and insignificant difference between S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> salinity treatments, respectively. This different is related to beneficial effect of Ca<sup>2+</sup> ion in CaCl<sub>2</sub> salt composition in mild salinity level (S<sub>2</sub>). Comparing linear regression models in NaCl+CaCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> salt compositions showed that response of root mass to osmotic potential is more relevant than ion concentration and electrical conductivity. On the other hand, evaluating response of root mass to salinity indicated that nonlinear van Genuchten-Hoffman model had lower nRMSE and higher EF than linear Maas-Hoffman model.

### Conclusion

The results indicated that maize root mass influenced by ion type in different salt compositions under similar osmotic potential. Investigation of different salinity parameters showed that osmotic potential is more appropriate parameter relative to ion concentration and electrical conductivity for utilizing in simulation models and irrigation planning in saline condition. In addition, evaluating reduction functions indicated that estimation efficiency of exponential model on measured data was higher than linear model.

### Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

### Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

### Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

### Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

## بررسی پاسخ ریشه ذرت به ترکیبات یونی مختلف با استفاده از توابع کاهش کلان

ابوذر بذرافشان<sup>۱</sup>، مهدی شرفا<sup>۲</sup>، محمدحسین محمدی<sup>۳</sup>، علی اصغر ذوالفقاری<sup>۴</sup><sup>۱</sup>. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:[abouzar2010iut@gmail.com](mailto:abouzar2010iut@gmail.com)<sup>۲</sup>. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:[m\\_shorafa@ut.ac.ir](mailto:m_shorafa@ut.ac.ir)<sup>۳</sup>. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:[mhmohmad@ut.ac.ir](mailto:mhmohmad@ut.ac.ir)<sup>۴</sup>. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: [azolfaghari@semnan.ac.ir](mailto:azolfaghari@semnan.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

این تحقیق به منظور بررسی تنش شوری ترکیبات یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم بر وزن ریشه ذرت انجام شد. دو آزمایش گلخانه‌ای به طور موازی مربوط به هر ترکیب یونی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار انجام شد. سطوح شوری مختلف (۰، ۶۱، ۱۲۶، ۲۵۲ و ۳۳۶ کیلوپاسکال) به صورت مشابه در هر دو ترکیب یونی اعمال شدند. بعد از شروع تیمارهای شوری، پتانسیل اسمزی گلدان‌ها ثابت نگه داشته شد. پاسخ ریشه ذرت با استفاده از پارامترهای شوری پتانسیل اسمزی، غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک بررسی شد و سپس توسط مدل‌های خطی ماس-هافمن و غیرخطی ونگنوختن-هافمن ارزیابی شدند. تنش شوری به طور معنی‌دار وزن ریشه را در هر دو ترکیب یونی تحت تاثیر قرار داد. نتایج تحقیق نشان داد که پاسخ وزن ریشه ذرت به تنش شوری توسط پارامتر پتانسیل اسمزی بهتر از غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی شرح داده می‌شود. بر اساس پتانسیل اسمزی مقدار حد آستانه شوری ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و ترکیب یونی کلرورکلسیم به ترتیب صفر و ۲/۴۹ کیلوپاسکال به دست آمد، که نشان‌دهنده تاثیر نوع یون بر حساسیت ریشه ذرت به تنش شوری می‌باشد. مقادیر وزن ریشه برآورد شده با استفاده از توابع کاهش نشان داد که دقت مدل نمایی ونگنوختن-هافمن در هر دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم ( $nRMSE = 4/71$ ) و کلرورکلسیم ( $nRMSE = 5/69$ ) بالاتر از مدل خطی ماس-هافمن می‌باشد. همچنین کارایی برآورد مدل نمایی با  $EF = 0/991$  بالاتر از مدل خطی با  $EF = 0/98$  بود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۴

## واژه‌های کلیدی:

پتانسیل اسمزی،

تنش شوری،

قابلیت هدایت الکتریکی،

غلظت یون.

استناد: بذرافشان؛ ابوذر، شرفا؛ مهدی، محمدی؛ محمدحسین، ذوالفقاری؛ علی اصغر، (۱۴۰۴) بررسی پاسخ ریشه ذرت به ترکیبات یونی مختلف با استفاده از توابع کاهش

کلان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۳)، ۶۸۵-۷۰۰ <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384928.669833>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384928.669833>

## مقدمه

شوری یک تنش غیرزیستی محدود کننده رشد گیاهان است که به طور معنی دار به عملکرد محصولات کشاورزی آسیب می‌رساند (Vennam et al., 2024). کاهش عملکرد گیاهان تحت تنش شوری بستگی به سطح تحمل گیاه به میزان شوری خاک دارد (Shirvastava and Kumar, 2015). گیاهان به دو دسته مقاوم به شوری (هالوفیت) و حساس به شوری (گلیکوفیت) طبقه بندی شده‌اند که گیاه ذرت جز گیاهان حساس به شوری قرار دارد که در محیط‌های با شوری پایین رشد می‌کند (Himabindu et al., 2016). تنش شوری در مراحل اولیه رشد گیاه ذرت با محدود کردن توسعه برگ از طریق کاهش طول سلول‌ها سبب کاهش رشد ریشه‌های ذرت شده و به فیزیولوژی برگ‌ها مانند فتوسنتز از طریق کاهش نسبت پتاسیم به سدیم آسیب می‌رساند (Vennam et al., 2024). تنش شوری از طریق تنش اسمزی ناشی از محلول شوری محیط اطراف ریشه و اثر ویژه یون (سمیت یون) ناشی از جذب زیاد یون‌ها، بر عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Zhao et al., 2010). عملکرد گیاهان عمدتاً مرتبط با پاسخ فیزیولوژیکی آنها به تنش‌های محیطی می‌باشد (Zhang et al., 2023). Chaves et al (2009)، گزارش کردند که پاسخ اولیه گیاهان به تنش شوری به وسیله سیگنال‌های تنش اسمزی تهییج می‌شود و بیشترین تأثیر مستقیم تنش اسمزی روی گیاه جلوگیری از جذب آب توسط گیاه می‌باشد که منجر به کاهش پتانسیل آب گیاه می‌گردد (Maathuis, 2014). در مجموع، تغییر در پتانسیل آب گیاه انعکاس تغییر در پتانسیل آب خاک می‌باشد (Zhang et al., 2023). شوری خاک در منابع علمی معمولاً با استفاده از سه پارامتر شوری شامل پتانسیل اسمزی، غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی کمی‌سازی شده است (Oster et al., 2012). یون‌های سدیم، کلسیم، کبر، منیزیم، پتاسیم، سولفات، کربنات و نیترات نقش مهمی را در محلول و شوری خاک بازی می‌کنند (Bernstein, 1975). یون‌ها در محلول خاک به صورت ایده ال رفتار نمی‌کنند و به دلیل تشکیل جفت یون‌ها، فعالیت یون‌ها معمولاً بسیار کمتر از غلظت یون‌ها می‌باشد (Ben-Gal et al., 2009). از آنجایی که سرعت واکنش‌های شیمیایی وابسته به فعالیت یون‌ها می‌باشد، بنابراین برهمکنش یون‌ها بایستی بر اساس فعالیت یا پتانسیل اسمزی مورد نظر قرار گیرد (Cramer, 2002). بر طبق مطالعه Shannon and Grieve (1999)، واکنش گیاه به تنش شوری به ترکیب یونی در محلول خاک، غلظت یون‌ها در بافت گیاه، زمان در معرض قرارگیری به محیط شور و همچنین شرایط اقلیمی منطقه بستگی دارد. عمدتاً اثرات نوع یون‌ها بسته به تحمل گیاه به شوری، در سطوح بالای شوری و افزایش غلظت یون‌هایی مانند سدیم و کلر ظاهر می‌گردند که سبب سمیت در بافت گیاه می‌شوند (Munns and Tester, 2008; Bazrafshan et al., 2020).

کمی‌سازی پاسخ تعلق، اجزای عملکرد و ریشه گیاهان به تنش شوری با استفاده از مدل‌های با دو رویکرد خرد (میکروسکوپی) و کلان (ماکروسکوپی) انجام می‌شود (de Willigen et al., 2012). مدل‌های جذب آب با رویکرد خرد اولین بار توسط (Gardner, 1960) ارائه شد. در این مدل‌ها نرخ جذب آب با هدایت هیدرولیکی خاک و تفاوت مکش ماتریک بین خاک و سطح ریشه گیاه متناسب می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۴). کاربرد مدل‌های جذب آب با رویکرد خرد به دلیل اندازه‌گیری پارامترها در شرایط واقعی خاک و ریشه بسیار مشکل می‌باشد (Albasha et al., 2015). معمولاً مدل‌های جذب آب با رویکرد کلان به منظور بررسی پاسخ گیاه به شوری مورد استفاده قرار گرفته اند (Wang et al., 2023). مدل‌های کلان بر اساس حل عددی معادله ریچاردز با در نظر گرفتن عامل جذب آب شرح داده می‌شوند و مقدار آب جذب شده توسط گیاه برابر با میزان تعلق واقعی و در شرایط بدون محدودیت آبی در خاک برابر با تعلق بالقوه در نظر گرفته شده و به صورت کلی زیر بیان می‌شوند (Skaggs et al., 2006).

$$S = \frac{T_p}{Z_r} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه،  $Z_r$  عمق توسعه ریشه (m)،  $T_p$  تعلق بالقوه ( $\text{md}^{-1}$ ) و  $S$  تعلق واقعی ( $\text{md}^{-1}$ ) می‌باشد. در شرایط تنش شوری نیاز آبی گیاه برای حداکثر تعلق ( $T_p$ ) فراهم نمی‌شود و به اندازه  $\alpha(h_0)$  که به آن تابع کاهش گویند از تعلق بالقوه کاسته می‌شود (Skaggs et al., 2006).

$$S = \alpha(h_0) \frac{T_p}{Z_r} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که  $h_0$  پتانسیل اسمزی خاک می‌باشد. بنابراین، معادله ریچاردز با در نظر گرفتن عامل جذب آب توسط گیاه به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )،  $t$  زمان (d)،  $z$  عمق (m)،  $K(h)$  ضریب آبدوزی غیراشباع خاک ( $\text{md}^{-1}$ )،  $h$  پتانسیل

ماتریک (m) و S مقدار آب جذب شده به وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک در واحد زمان ( $m^3 m^{-3} d^{-1}$ ) است. بنابراین توسعه توابع کاهش با استفاده از عامل جذب آب گیاه (سینک ترم) به منظور بررسی و برآورد پاسخ گیاهان تحت تنش‌های محیطی مانند شوری انجام شد و مدل‌های مربوطه به صورت خطی و نمایی توسط محققان مختلف ارائه شدند. ابتدا مدل‌های خطی به منظور بررسی پاسخ گیاهان به تنش شوری استفاده شد، اما در دهه‌های اخیر مدل‌های نمایی مختلفی به منظور افزایش دقت برآورد توسط محققان توسعه یافته‌اند که دارای دقت و کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های خطی می‌باشند (Wang et al., 2023). در رابطه با پاسخ گیاهان به تنش شوری مطالعات مختلفی با استفاده از مدل‌های مختلف خطی و نمایی گزارش شده است. (Jalali and Kapourchal 2020) با مطالعه تنش شوری بر اندام‌های هوایی گیاه ذرت نشان دادند که مدل‌های نمایی بهتر از مدل خطی اجزای عملکرد ذرت را برآورد می‌نمایند. همچنین، سرایی تبریزی و همکاران (۱۳۹۵)، با مطالعه تأثیر تنش شوری بر عملکرد ریحان نشان دادند که مدل نمایی و گنگوختن-هافمن بهتر از مدل خطی ماس-هافمن کاهش عملکرد را برآورد می‌نماید. (Yang et al 2020) با مطالعه تأثیر تنش شوری بر عملکرد و تعرق گوجه فرنگی نشان دادند که دقت برآورد عملکرد و تعرق گیاه توسط مدل‌های نمایی بالاتر از مدل خطی ماس-هافمن بود. بذرافشان و همکاران (۱۳۹۸) با مطالعه تنش شوری بر جذب آب و عملکرد ذرت در شرایط تقاضای تبخیر مختلف نشان دادند که مدل نمایی و گنگوختن-هافمن بهتر از مدل خطی ماس-هافمن کاهش جذب آب و عملکرد را برآورد می‌نماید.

تاکنون مطالعات پاسخ به شوری عمدتاً روی اندام‌های هوایی (برگ و ساقه) و تعرق (جذب آب) گیاهان انجام شده است و مطالعات بر روی بافت ریشه گیاه که جذب آب گیاه را انجام می‌دهد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه ریشه گیاه به طور مستقیم در ارتباط با شوری محلول خاک می‌باشد و همچنین جذب آب توسط ریشه‌ها انجام می‌شود، بررسی پاسخ وزن ریشه به تنش شوری بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Wang et al., 2020). بر این اساس، این تحقیق با هدف بررسی پاسخ وزن ریشه گیاه ذرت به تنش شوری با استفاده از ترکیبات یونی مختلف و ارزیابی توابع کاهش جذب آب تحت تنش شوری در شرایط گلخانه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت کشت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۸ دقیقه و طول جغرافیایی ۶۰ درجه و با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا انجام شد. متوسط دما و رطوبت نسبی گلخانه به ترتیب ۳۰ درجه سلسیوس و ۳۰ درصد بود. گیاه ذرت (*Zea mays, L., var. SC704*) در گلدان‌هایی با ارتفاع و قطر به ترتیب ۳۶ و ۲۷ سانتی‌متر کشت شدند. خاک مورد آزمایش از مزرعه کشاورزی واقع در شهرستان آبیگ استان قزوین از عمق (۳۰-۰) سانتی‌متر برداشت شد. جهت کاشت گیاه، خاک‌ها از الک ۴ میلی‌متری و به منظور انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی از الک دومیلی‌متری عبور داده شدند. اسیدیته (pH) و قابلیت هدایت الکتریکی خاک به ترتیب به وسیله دستگاه pH متر و هدایت سنج الکتریکی (Rhoades, 1996) و جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه (Soil Survey Staff, 2014) اندازه‌گیری شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

| رس (%) | سیلت (%) | شن (%) | کلاس بافت خاک | رطوبت ظرفیت مزرعه ( $m^3 m^{-3}$ ) | pH  | EC <sub>e</sub> (dS $m^{-1}$ ) | رطوبت اشباع ( $m^3 m^{-3}$ ) |
|--------|----------|--------|---------------|------------------------------------|-----|--------------------------------|------------------------------|
| ۹      | ۱۹/۳     | ۷۱/۷   | Sandy loam    | ۰/۲۷                               | ۷/۸ | ۰/۴                            | ۰/۳۹                         |

## کاشت گیاه

جهت کاشت گیاه ذرت ۴۰ عدد گلدان پلاستیکی به منظور اعمال تیمار شوری با ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم (۲۰ عدد گلدان) و کلرورکلسیم (۲۰ عدد گلدان) استفاده شد. در هر گلدان مقدار ۱۸ کیلوگرم خاک ریخته شد. به منظور انجام عمل آیشویی و اعمال مکش ماتریک ۱۰۰ سانتی‌متر (مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه) یک عدد تانسومتر در مرکز گلدان‌ها قرار داده شد.

سپس خاک تمام گلدان‌ها به جرم مخصوص ظاهری حاکم بر مزرعه (۱/۵۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب) رسانده شدند. قبل از کاشت، بذره‌های ذرت ضدعفونی گردیدند و سه عدد بذر ذرت برای تمام گلدان‌ها در یک راستا و به فاصله مساوی کاشت شدند. سپس در مرحله سه برگی گیاه در هر گلدان یک بوته انتخاب و دو بوته دیگر حذف شدند. به منظور کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان، لایه‌ای از ذرات شن

سفید به ضخامت دو سانتی متر بر سطح خاک قرار داده شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در دو مرحله قبل از کاشت گیاه (اواخر فروردین ماه) و قبل از شروع اعمال تیمارهای شوری (اواسط اردیبهشت ماه) در مرحله سه برگی اضافه شدند.

### اعمال تیمارها

به منظور اعمال تیمارها، سطوح شوری مختلف با فشارهای اسمزی (۰، ۶۱، ۱۲۶، ۲۵۲ و ۳۳۶ کیلوپاسکال) که به ترتیب با  $S_0$  (تیمار شاهد)،  $S_1$  (تیمار حد آستانه شوری)،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  تعیین شدند، به صورت جداگانه با استفاده از ترکیب نمک‌های کلرورسدیم و کلرورکلسیم با نسبت مولی (۲:۱) و نمک کلرورکلسیم تهیه شدند. فشار اسمزی سطوح مختلف غلظت نمک با استفاده از معادله وانت هوف محاسبه گردید (Kirkham 2014).

$$\pi = -iMRT$$

رابطه (۴)

که در این رابطه  $\pi$  پتانسیل اسمزی (MPa)،  $i$  ضریب معادله وانت هوف ( $\text{mol mol}^{-1}$ )،  $M$  غلظت محلول ( $\text{mol cm}^{-3}$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها ( $R = 8.3188 \text{ MPa cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) و  $T$  دما بر حسب کلوین (K) می‌باشد.

سپس EC سطوح مختلف شوری به وسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی (JENWAY- 4320) اندازه گیری شد. فشار اسمزی و قابلیت هدایت الکتریکی متقابل سطوح شوری در هر دو ترکیب یونی در جدول (۲) نشان داده شده است. پس از استقرار بوته‌ها (مرحله سه برگی گیاه ذرت)، تیمارهای شوری به صورت روزانه به تمام گلدان‌ها تا زمان برداشت گیاه اعمال شدند. با استفاده از تانسومترها، سطوح شوری مختلف در محلول خاک گلدان‌ها به وسیله اعمال حجم بالای آب آبیاری روزانه با در نظر گرفتن مقدار جز آبشویی ( $LF=0.5$ ) تثبیت شدند (Meskini et al., 2018). حجم بالای آب زهکش شده در گلدان‌ها با استفاده از آب آبیاری که به صورت روزانه اعمال شد، سبب جلوگیری از تجمع نمک در خاک گلدان‌ها و تثبیت فشار اسمزی محلول خاک گلدان شد.

جدول ۲- تیمارهای شوری استفاده شده در مطالعه

| کلرورکلسیم                  |                     |                           | کلرورسدیم+کلرورکلسیم        |                     |                        |       |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|-------|
| EC<br>( $\text{dSm}^{-1}$ ) | غلظت<br>یون<br>(mM) | پتانسیل<br>اسمزی<br>(kPa) | EC<br>( $\text{dSm}^{-1}$ ) | غلظت<br>یون<br>(mM) | پتانسیل اسمزی<br>(kPa) |       |
| ۰                           | ۰                   | ۰                         | ۰                           | ۰                   | ۰                      | $S_0$ |
| ۲/۳                         | ۸/۵                 | -۶۱                       | ۱/۷                         | ۱۰/۲                | -۶۱                    | $S_1$ |
| ۴/۵                         | ۱۷/۵                | -۱۲۶                      | ۳/۳۶                        | ۲۱                  | -۱۲۶                   | $S_2$ |
| ۸/۶۶                        | ۳۵                  | -۲۵۲                      | ۶/۳۳                        | ۴۲                  | -۲۵۲                   | $S_3$ |
| ۱۱/۲                        | ۴۶/۵                | -۳۳۶                      | ۸/۳۵                        | ۵۶                  | -۳۳۶                   | $S_4$ |

### توابع کاهش جذب آب در شرایط شور

به منظور بررسی پاسخ گیاهان به تنش شوری مدل‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل‌ها عمدتاً از داده‌های جذب آب ریشه (تعرق گیاه) و اجزای عملکرد برگ و ساقه استفاده شده است (Wu et al., 2021). در این تحقیق برازش مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بر داده‌های وزن خشک ریشه ذرت انجام شد.

الف) مدل خطی ماس-هافمن

$$\alpha(h_o) = 1 - \frac{B}{360} (h_o^* - h_o) \quad \text{رابطه (۵)}$$

ب) مدل نمایی ونگنوختن-هافمن

$$\alpha(h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o}{h_{o50}}\right)^p} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط بالا،  $B$  شیب خط و ۳۶۰ ضریبی است که شوری خاک ( $\text{dS m}^{-1}$ ) را به فشار اسمزی متناظر خود برحسب سانتی متر آب تبدیل می‌نماید.  $h_{o50}$  مقدار شوری است که در آن جذب آب ۵۰٪ کاهش می‌یابد،  $p$  نیز ضریب تجربی است که وابسته به خاک، گیاه و اقلیم می‌باشد (Homaei et al., 2002).  $h_o^*$  مقدار حد آستانه شوری و  $h_o$  مقدار شوری خاک می‌باشد.

## شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها

توابع کاهش خطی ماس-هافمن و نمایی ونگنوختن-هافمن بر داده‌های وزن خشک ریشه گیاه ذرت در سطوح شوری مختلف برازش داده شدند و سپس به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها از شاخص‌های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا نرمال (nRMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب جرم باقیمانده (CRM) و راندمان مدل (EF) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$nRMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right)^{1/2} \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$CRM = \left( \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad \text{رابطه ۹}$$

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

در معادلات مربوطه nRMSE، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال،  $R^2$ ، ضریب تبیین،  $O_i$ ، مقدار واقعی داده،  $P_i$ ، مقدار برآورد شده توسط مدل،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر واقعی،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و  $n$ ، تعداد جفت داده اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده می‌باشند.

## تجزیه‌های آماری

این پژوهش به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت. به منظور برازش مدل‌ها و تعیین پارامترهای بهینه مدل‌های کاهش، از جعبه ابزار Solver نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 انجام شد.

## نتایج و بحث

جدول (۳) مقادیر وزن خشک ریشه و معنی‌داری بین سطوح مختلف شوری را در هر دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم و کلوروکلسیم نشان می‌دهد. با افزایش پتانسیل اسمزی محلول خاک، کاهش وزن ریشه گیاه در ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم و کلوروکلسیم متفاوت بود. در ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم، وزن خشک ریشه گیاه در تیمارهای  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  به ترتیب ۱۶/۰۲، ۳۲/۵۱، ۷۱/۶۶، ۷۷/۵۲ درصد و در ترکیب یونی کلوروکلسیم، ۱۴/۶۴، ۳۳/۴۵، ۷۹/۱ و ۸۷/۷۴ درصد نسبت به تیمار شاهد ( $S_0$ ) کاهش یافت. نتایج نشان داد که ترکیب یونی کلوروکلسیم سبب کاهش بیشتر وزن ریشه نسبت به ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم در سطوح شوری بالا ( $S_3$  و  $S_4$ ) شد. با توجه به پتانسیل اسمزی ثابت در هر دو ترکیب یونی، این تغییرات مربوط به اثر سمیت یون کلر در نمک کلوروکلسیم می‌باشد. بر طبق مطالعه Munns and Tester, (2008) در سطوح شوری پایین تنش اسمزی عامل کاهش جذب آب و عملکرد گیاه می‌گردد اما با افزایش تنش شوری، انتقال یون‌ها از محلول خاک (جذب توسط ریشه‌ها) به بافت‌های مختلف گیاه افزایش می‌یابد و با تجمع در بافت‌های گیاه، سبب القای اثر یون (سمیت یون) شده و منتج به کاهش وزن ریشه و یا عملکرد گیاه می‌گردد. بنابراین، در این مطالعه با توجه به عدم تشابه نمودارهای پاسخ وزن خشک ریشه با پتانسیل اسمزی ثابت (شکل ۱) در هر دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم و کلوروکلسیم و همچنین بر طبق مطالعات Munns and Tester, (2008) و Rengasami, (2009) پاسخ ذرت در سطوح شوری  $S_1$  و  $S_2$  تحت تاثیر تنش اسمزی و در سطوح شوری  $S_3$  و  $S_4$  تحت تاثیر اثر ویژه یون‌ها (سمیت یون کلر) به دلیل تجمع یون‌ها در بافت گیاه‌ها باشد.

تغییرات معنی‌دار وزن خشک ریشه با افزایش سطح شوری در هر دو ترکیب یونی متفاوت بود که تأثیر نوع یون را در تنش شوری یکسان نشان می‌دهد. در هر دو ترکیب یونی بین سطوح شوری  $S_3$  و  $S_4$  اختلاف معنی‌دار در وزن ریشه وجود نداشت در صورتی که سطح متوسط شوری ( $S_2$ ) با تیمار شاهد و همچنین با سطوح تنش شوری  $S_3$  و  $S_4$  اختلاف معنی‌دار نشان دادند. تنها تفاوت آزمون معنی‌داری بر وزن ریشه بین دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم و کلوروکلسیم مربوط به اختلاف معنی‌دار سطح شوری  $S_2$  با  $S_1$  در ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوروکلسیم و عدم اختلاف معنی‌دار سطح شوری  $S_2$  با  $S_1$  در ترکیب یونی کلوروکلسیم می‌باشد. عدم اختلاف معنی‌دار سطح شوری  $S_2$  با  $S_1$  در ترکیب یونی کلوروکلسیم، مربوط به اثر مفید یون کلسیم در ترکیب یونی کلوروکلسیم می‌باشد که به عنوان یک عنصر



ضدتنش در مقابله با شوری نقش بسزایی دارد. این نتایج با مطالعه تنش شوری (Ben-Gal et al (2009 بر روی گیاه ذرت کاملاً مطابقت دارد.

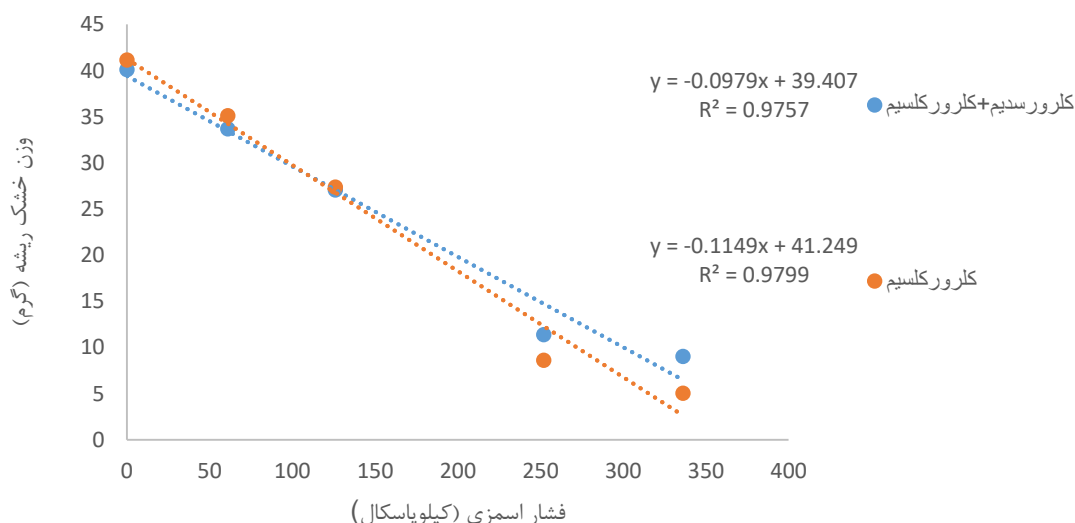
**جدول ۳- میانگین مقادیر وزن خشک ریشه در تیمارهای ترکیبات یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم**

| S <sub>4</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>1</sub> | S <sub>0</sub> |                      |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| ۹/۰۱±۱/۵c      | ۱۱/۳۶±۲/۵c     | ۲۷/۰۵±۴/۶b     | ۳۳/۶۶±۹/۰۱b    | ۴۰/۰۸±۷/۸a     | کلوروسدیم+کلوراکلسیم |
| ۵/۰۴±۱/۳a      | ۸/۵۹±۲/۰۴c     | ۲۷/۳۶±۴b       | ۳۵/۰۹±۴/۵a     | ۴۱/۱۱±۷/۵a     | کلوراکلسیم           |

حروف مشابه در هر ردیف در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند

### پاسخ ریشه به پتانسیل اسمزی

جدول (۴)، پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های وزن خشک ریشه و پتانسیل اسمزی در هر دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم بر مدل‌های ماس-هافمن و ونگنوختن-هافمن را نشان می‌دهد. همچنین، شکل (۱)، برازش مدل رگرسیون خطی بر داده‌های شوری در هر دو ترکیب یونی را نشان می‌دهد. مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم در سطوح شوری پایین همگرا هستند و وقتی که سطح تنش شوری افزایش می‌یابد از همگرایی کاسته شده و پاسخ وزن خشک ریشه به دو ترکیب یونی تفاوت بیشتری پیدا می‌کند. در واقع در مقادیر پتانسیل اسمزی یکسان این دو ترکیب یونی رفتار متفاوتی دارند که به علت اثر نوع یون‌های موجود در دو ترکیب یونی می‌باشد که به دلیل اندازه و بار یون‌ها سبب برهمکنش و تشکیل جفت یون‌ها در محلول خاک می‌شوند (Maiti and Rogers, 2011). با توجه به کاهش بیشتر وزن خشک ریشه در ترکیب یونی کلوراکلسیم، در پتانسیل اسمزی برابر سمیت یون کلر عامل کاهش توده ریشه می‌باشد. این نتایج با مطالعه تنش شوری (Tavakkoli et al. (2011 بر روی رقم‌های مختلف گیاه جو مطابقت دارد. بر اساس نتایج مدل خطی ماس-هافمن، حد آستانه و درصد شیب کاهش وزن خشک ریشه در دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم متفاوت بود. مقادیر حد آستانه و شیب کاهش وزن خشک ریشه به ترتیب برای ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم برابر با صفر کیلوپاسکال و ۰/۲۵ درصد و برای ترکیب یونی کلوراکلسیم برابر با ۲/۴۹ کیلوپاسکال و ۰/۲۸ درصد بود. بر اساس مدل نمایی ونگنوختن-هافمن، مقادیر پارامترهای  $\pi_{50}$  و  $p$  به ترتیب برای ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم برابر با ۱۶۸/۸۱ کیلوپاسکال و ۱/۹۱ و برای ترکیب یونی کلوراکلسیم برابر با ۱۵۵/۱۶ کیلوپاسکال و ۲/۴۸ بود. تفاوت مقادیر پارامتر  $\pi_{50}$  مربوط به دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم نیز منطبق با کاهش بیشتر وزن ریشه توسط نمک کلوراکلسیم می‌باشد.



شکل ۱- رابطه بین وزن خشک ریشه و فشار اسمزی در دو ترکیب یونی کلوروسدیم+کلوراکلسیم و کلوراکلسیم



جدول ۴- مقادیر پارامترهای بهینه شده مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنختن-هافمن بر اساس پتانسیل اسمزی

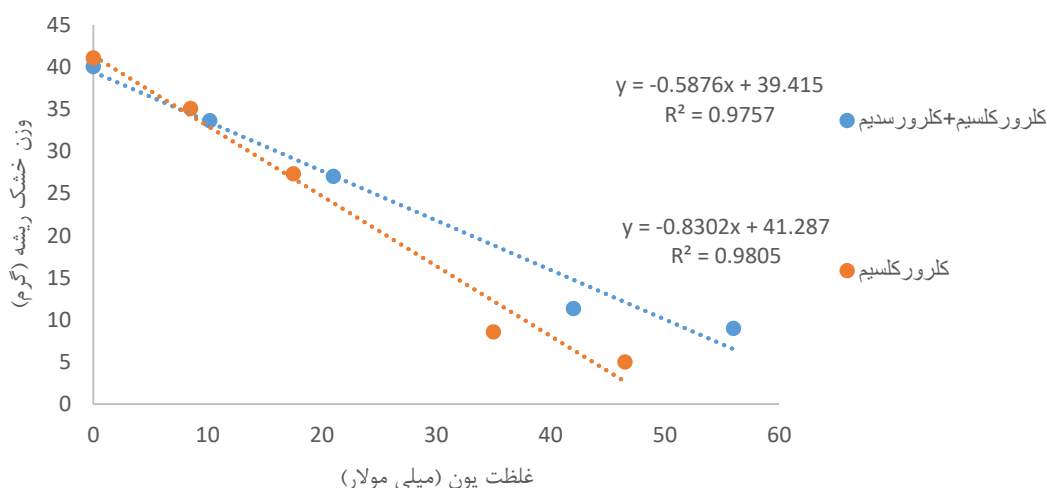
| ونگنختن-هافمن |                  | ماس-هافمن     |        |                      |
|---------------|------------------|---------------|--------|----------------------|
| p             | $\pi_{50}$ (kPa) | $\pi_T$ (kPa) | B      |                      |
| ۱/۹۱          | ۱۶۸/۸۱           | ۰             | ۰/۰۰۲۵ | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۲/۴۸          | ۱۵۵/۱۶           | ۲/۴۹          | ۰/۰۰۲۸ | کلرورکلسیم           |

## پاسخ ریشه به غلظت یون

جدول (۵)، پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های وزن خشک ریشه و غلظت یون‌ها در هر دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم را بر مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنختن-هافمن نشان می‌دهد. همچنین، شکل (۲)، برازش مدل رگرسیون خطی بر داده‌های وزن خشک ریشه و غلظت یون‌ها را در هر دو ترکیب یونی نشان می‌دهد. مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که پاسخ ریشه به غلظت یون در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم همگرایی کمتری نسبت به پاسخ ریشه به پتانسیل اسمزی دارد که این عامل مربوط به نوع پارامتر شوری (غلظت یون) می‌باشد که در رابطه با پاسخ ریشه گیاه به تنش شوری، پارامتر پتانسیل اسمزی به عنوان پارامتر مناسب‌تری جهت کاربرد در مدل‌های شبیه‌سازی و همچنین افزایش صحت و کارایی مدل‌ها عمل می‌نماید. به هر حال مانند پاسخ وزن ریشه به پتانسیل اسمزی، در سطوح شوری بالاتر از همگرایی دو مدل رگرسیونی ترکیب‌های یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم کاسته می‌شود که به علت سمیت یون‌ها به ویژه یون کلر در ترکیب یونی کلرورکلسیم می‌باشد. بر اساس نتایج مدل خطی ماس-هافمن، حد آستانه و درصد شیب کاهش وزن خشک ریشه در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم متفاوت بود. مقادیر حد آستانه و شیب کاهش وزن خشک ریشه به ترتیب برای ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم برابر با صفر میلی‌مولار و ۱/۵ درصد و برای ترکیب یونی کلرورکلسیم برابر با ۰/۴۴ میلی‌مولار و ۲ درصد بود که نشان‌دهنده کاهش بیشتر وزن ریشه ذرت در ترکیب یونی کلرورکلسیم می‌باشد. بر اساس مدل نمایی ونگنختن-هافمن، مقادیر پارامترهای  $C_{50}$  و  $p$  به ترتیب برای ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم برابر با ۲۸/۱۴ میلی‌مولار و ۱/۹۲ و برای ترکیب یونی کلرورکلسیم برابر با ۲۱/۵۵ میلی‌مولار و ۲/۴۸ بود.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای بهینه شده مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنختن-هافمن بر اساس غلظت یون

| ونگنختن-هافمن |               | ماس-هافمن  |       |                      |
|---------------|---------------|------------|-------|----------------------|
| p             | $C_{50}$ (mM) | $C_T$ (mM) | B     |                      |
| ۱/۹۲          | ۲۸/۱۴         | ۰          | ۰/۰۱۵ | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۲/۴۸          | ۲۱/۵۵         | ۰/۴۴       | ۰/۰۲  | کلرورکلسیم           |



شکل ۲- رابطه بین وزن خشک ریشه و غلظت یون در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم

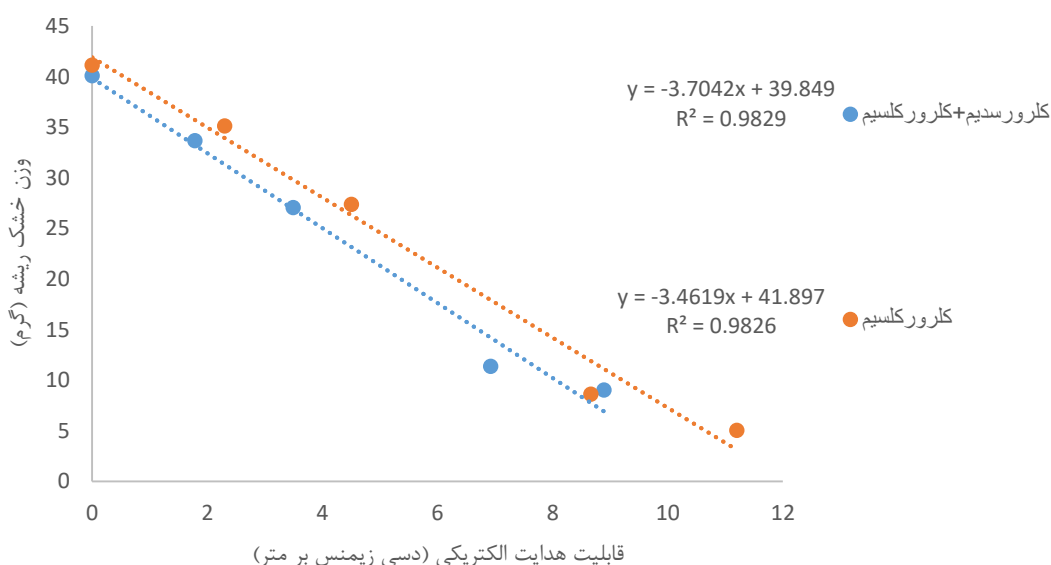
### پاسخ ریشه به قابلیت هدایت الکتریکی

جدول (۶)، پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های وزن خشک ریشه و قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک در هر دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم را بر مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن نشان می‌دهد. همچنین، شکل (۳)، برازش مدل رگرسیون خطی بر داده‌های وزن خشک ریشه و قابلیت هدایت الکتریکی در هر دو ترکیب یونی را نشان می‌دهد. مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که پاسخ ریشه به قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک در هر دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم به صورت مجزا و بدون تاثیر روی یکدیگر می‌باشد که نشان‌دهنده تغییر رفتار پارامتر شوری قابلیت هدایت الکتریکی نسبت به پارامترهای شوری پتانسیل اسمزی و غلظت یون می‌باشد. لذا در مناطق مختلف با ترکیب‌های شوری متفاوت آب و خاک، در نظر گرفتن پارامتر شوری مناسب به منظور کاربرد در برنامه‌ریزی آبیاری و همچنین مدل‌های شبیه‌سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به نتایج مربوطه استفاده از قابلیت هدایت الکتریکی سبب کاهش صحت و کارایی مدل‌ها می‌شود.

بر اساس نتایج مدل خطی ماس-هافمن، حد آستانه و درصد شیب کاهش وزن خشک ریشه در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم متفاوت بود. مقادیر حد آستانه و شیب کاهش وزن خشک ریشه به ترتیب برای ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم برابر با صفر دسی‌زیمنس بر متر و  $9/3$  درصد داکامتر بر زیمنس و برای ترکیب یونی کلرورکلسیم برابر با  $0/48$  دسی‌زیمنس بر متر و  $8/7$  درصد داکامتر بر زیمنس بود. بر اساس مدل نمایی ونگنوختن-هافمن، مقادیر پارامترهای  $EC_{50}$  و  $p$  به ترتیب برای ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم برابر با  $4/65$  دسی‌زیمنس بر متر و  $2/005$  و برای ترکیب یونی کلرورکلسیم برابر با  $5/48$  دسی‌زیمنس بر متر و  $2/65$  بود. مقادیر ضریب  $p$  مدل نمایی در رابطه با برآورد وزن خشک ریشه گیاه در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم متفاوت بود و مقادیر بالاتری را در ترکیب یونی کلرورکلسیم نسبت به ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم نشان داد که به دلیل تفاوت تاثیر یون‌ها روی اجزای گیاه تحت تنش شوری می‌باشد. به هر حال علاوه بر اثر نوع ترکیب یونی، متغیرهای اقلیم شامل دما، تابش و رطوبت نسبی نیز بر مقدار ضریب  $p$  تاثیر می‌گذارند (Homaee et al., 2002). با توجه به شرایط ثابت هر دو آزمایش مربوط به دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم، متغیرهای اقلیمی بر روی ضریب  $p$  در این آزمایش تاثیر نداشتند.

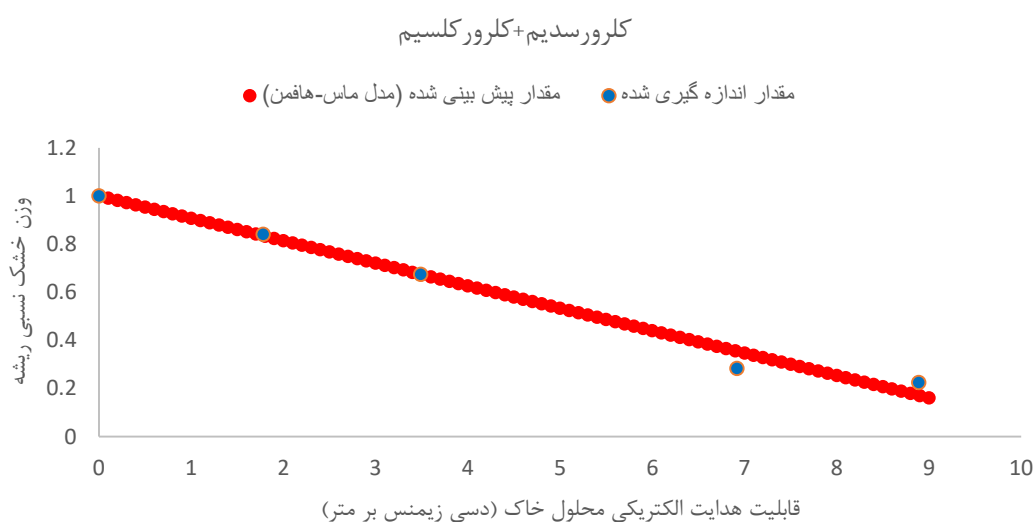
جدول ۶- مقادیر پارامترهای بهینه شده مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی

|                      | ونگنوختن-هافمن |                      | ماس-هافمن         |         |
|----------------------|----------------|----------------------|-------------------|---------|
|                      | $p$            | $EC_{50} (dSm^{-1})$ | $EC_T (dSm^{-1})$ | $B$     |
| کلرورسدیم+کلرورکلسیم | $2/005$        | $4/65$               | $0$               | $0/093$ |
| کلرورکلسیم           | $2/65$         | $5/48$               | $0/48$            | $0/087$ |

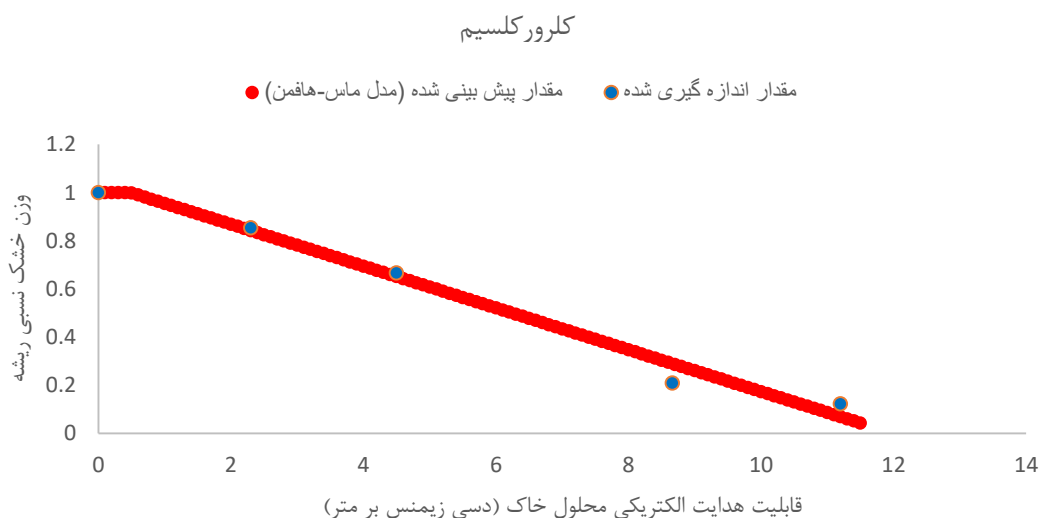


شکل ۳- رابطه بین وزن خشک ریشه و قابلیت هدایت الکتریکی در دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم

مقایسه پارامترهای حد آستانه شوری در هر سه پارامتر شوری پتانسیل اسمزی، غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی نشان داد که در ترکیب یونی کلرور کلسیم، کاهش وزن ریشه به دلیل جذب بالاتر یون کلسیم توسط ریشه‌ها در سطح شوری بالاتری ( $S_2$ ) اتفاق می‌افتد، در صورتی که وزن ریشه تحت تاثیر تنش شوری ترکیب یونی کلرور سدیم+کلرور کلسیم در سطح شوری پایین‌تر ( $S_1$ ) کاهش یافت. با توجه به اینکه گیاهان به‌طور واقعی در معرض املاح موجود در محلول خاک هستند و در نظر گرفتن عصاره اشباع و یا نسبت‌های مختلف خاک به آب سبب تغییر پارامترهای مدل‌های کاهش جذب آب می‌گردد (de Jong van Lier et al., 2009)، بنابراین در این مطالعه، مقادیر این پارامترها بر اساس شوری محلول خاک ( $EC_{sw}$ ) به‌دست آمد. با توجه به اینکه رطوبت گلدان‌ها در مکش ۱۰۰ سانتی متر تثبیت شده است، گیاهان، شوری محیط ریشه را که همان شوری محلول خاک در رطوبت مشخص ظرفیت مزرعه است را تحمل هاکند. برخی منابع نتایج را بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک نشان می‌دهند، که بر مقادیر حد آستانه و درصد شیب کاهش وزن خشک ریشه نیز بر اساس عصاره اشباع نتایج متفاوتی خواهند داشت. در این تحقیق به منظور نشان دادن روند کاهش وزن ریشه گیاه با شوری، از پارامتر شوری قابلیت هدایت الکتریکی استفاده شد و نمودارهای مربوط به هر دو ترکیب یونی کلرور سدیم+کلرور کلسیم و کلرور کلسیم با استفاده از مدل خطی ماس-هافمن در شکل‌های (۴ و ۵)، و مدل نمایی و گنگوختن-هافمن در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده است.

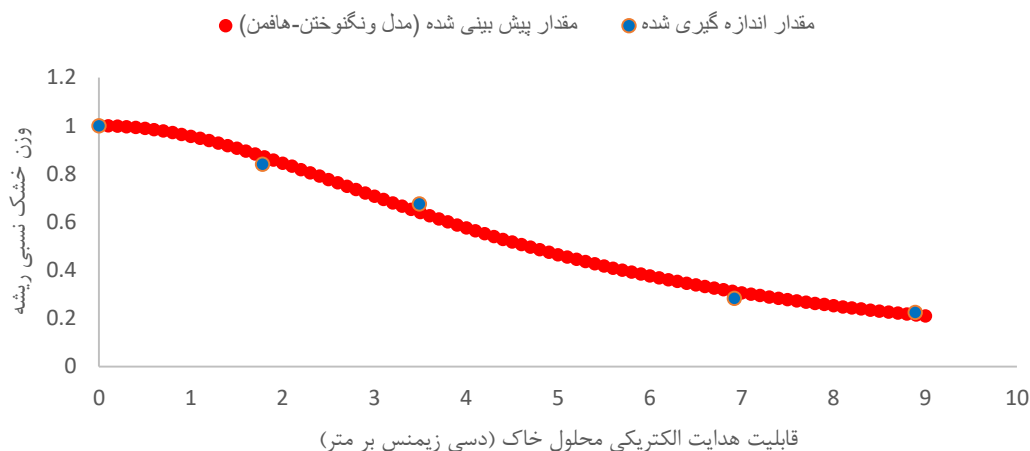


شکل ۴- برازش مدل خطی ماس-هافمن بر وزن خشک نسبی ریشه در دو ترکیب یونی کلرور سدیم+کلرور کلسیم و کلرور کلسیم



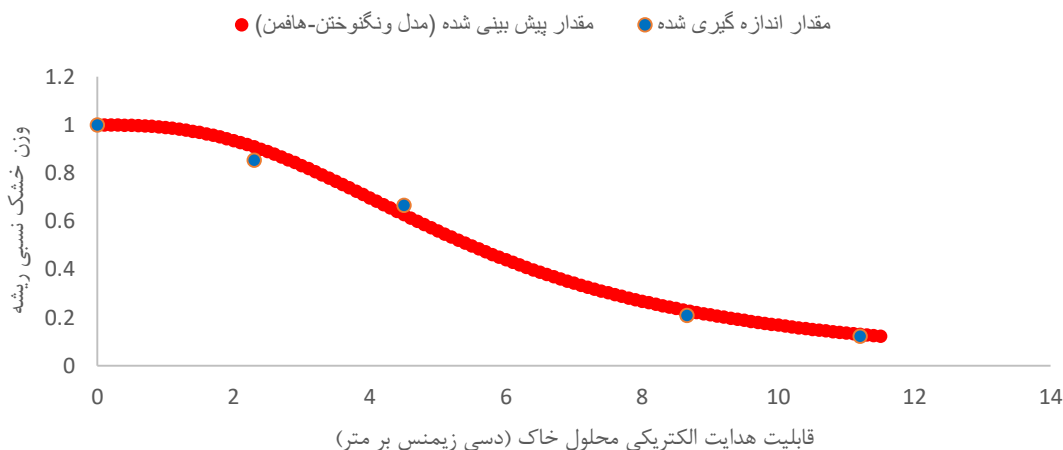
شکل ۵- برازش مدل خطی ماس-هافمن بر وزن خشک نسبی ریشه در ترکیب یونی کلرور کلسیم

### کلرورسديم+کلرورکلسيم



شکل ۶- برازش مدلی ونگونختن-هافمن بر وزن خشک نسبی ریشه در ترکیب یونی کلرورسديم+کلرورکلسيم

### کلرورکلسيم



شکل ۷- برازش مدلی ونگونختن-هافمن بر وزن خشک نسبی ریشه در ترکیب یونی کلرورکلسيم

### ارزیابی مدل‌های پاسخ وزن خشک ریشه به شوری

جداول (۷، ۸ و ۹) مقادیر آماره‌های مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگونختن-هافمن را بر اساس پارامترهای شوری پتانسیل اسمزی، غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک نشان می‌دهند. مدل‌های ماس-هافمن و ونگونختن-هافمن به داده‌های اندازه‌گیری شده وزن خشک ریشه ذرت در دو ترکیب یونی کلرورسديم+کلرورکلسيم و کلرورکلسيم برازش داده شدند. تخمین‌های مدل‌ها وقتی که  $R^2$  و EF به مقدار یک نزدیک می‌شود، بهترین کارایی را نشان می‌دهد و وقتی که nRMSE به صفر نزدیک می‌شود، داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به هم نزدیک‌تر شده و دقت مدل بالاتر خواهد بود. همچنین، CRM شاخصی است که بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل‌ها را نشان می‌دهد. CRM منفی و مثبت به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد و CRM نزدیک به صفر نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به هم نزدیک هستند. بر اساس مقادیر به دست آمده ضریب تبیین ( $R^2$ ) و nRMSE، دقت برازش مدل نمایی ونگونختن-هافمن بالاتر از مدل خطی ماس-هافمن برای تبیین وزن خشک ریشه در هر دو ترکیب یونی کلرورسديم+کلرورکلسيم و کلرورکلسيم می‌باشد. این نتایج با مطالعه Jalali et al (2017) بر روی گندم دوروم و مطالعه Saadat and Homaei (2015) بر روی سورگوم مطابقت دارد که مدل نمایی ونگونختن-هافمن دارای دقت بیشتری نسبت به

مدل خطی ماس-هافمن می‌باشد.

مقایسه پارامترهای شوری پتانسیل اسمزی، غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که کارایی هر دو مدل ماس-هافمن و ونگنوختن-هافمن جهت تخمین وزن خشک ریشه بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک بالاتر بود و همچنین مقادیر کارایی مدل‌ها (EF) بر اساس دو پارامتر پتانسیل اسمزی و غلظت یون تفاوت بسیار کمی داشتند. بر اساس مقادیر CRM، مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بیش‌برآوردی داده‌های اندازه‌گیری شده را در هر دو ترکیب یونی نشان می‌دهد. ترکیب یونی کلرورکلسیم مقدار CRM کمتری (منفی‌تر) را نسبت به ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم نشان داد که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی بالاتر و اختلاف بیشتر داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین، مقادیر منفی CRM مدل خطی ماس-هافمن بیش‌برآوردی در داده‌های اندازه‌گیری شده ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم را نشان می‌دهد اما مقادیر CRM در ترکیب یونی کلرورکلسیم مثبت و نزدیک به صفر بود. بنابراین بر اساس نتایج آماره CRM، علاوه بر تاثیر نوع مدل‌ها (خطی یا نمایی)، ترکیب یونی محلول خاک نیز در ارزیابی بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی داده‌های شبیه‌سازی شده تاثیرگذار بود.

جدول ۷- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بر اساس پتانسیل اسمزی

| R <sup>2</sup> | CRM       | EF    | nRMSE |                      |
|----------------|-----------|-------|-------|----------------------|
|                |           |       |       | ماس-هافمن            |
| ۰/۹۷۶          | -۰/۰۱۱    | ۰/۹۷۴ | ۸/۰۵  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۸           | ۰/۰۰۰۰۲۶۵ | ۰/۹۸  | ۸/۶۴  | کلرورکلسیم           |
|                |           |       |       | ونگنوختن-هافمن       |
| ۰/۹۹۱          | -۰/۰۰۶    | ۰/۹۹۱ | ۴/۷۱  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۹۲          | -۰/۰۱۶    | ۰/۹۹۱ | ۵/۶۹  | کلرورکلسیم           |

جدول ۸- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بر اساس غلظت یون

| R <sup>2</sup> | CRM       | EF    | nRMSE |                      |
|----------------|-----------|-------|-------|----------------------|
|                |           |       |       | ماس-هافمن            |
| ۰/۹۷۶          | -۰/۰۱۱    | ۰/۹۷۴ | ۸/۰۵  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۸۱          | ۰/۰۰۰۰۱۰۵ | ۰/۹۸۱ | ۸/۵۱  | کلرورکلسیم           |
|                |           |       |       | ونگنوختن-هافمن       |
| ۰/۹۹۱          | -۰/۰۰۶    | ۰/۹۹۱ | ۴/۶۸  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۹۲          | -۰/۰۱۶    | ۰/۹۹۱ | ۵/۶۵  | کلرورکلسیم           |

جدول ۹- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل خطی ماس-هافمن و مدل نمایی ونگنوختن-هافمن بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی

| R <sup>2</sup> | CRM       | EF    | nRMSE |                      |
|----------------|-----------|-------|-------|----------------------|
|                |           |       |       | ماس-هافمن            |
| ۰/۹۸۳          | -۰/۰۰۴    | ۰/۹۸۳ | ۶/۶۲  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۸۴          | ۰/۰۰۰۰۸۰۶ | ۰/۹۸۴ | ۷/۷۴  | کلرورکلسیم           |
|                |           |       |       | ونگنوختن-هافمن       |
| ۰/۹۹۳          | -۰/۰۰۵    | ۰/۹۹۳ | ۴/۱۵  | کلرورسدیم+کلرورکلسیم |
| ۰/۹۹۲          | -۰/۰۱۶    | ۰/۹۹۲ | ۵/۵۳  | کلرورکلسیم           |

## نتیجه گیری

نتایج تحقیق نشان داد که وزن ریشه گیاه در شرایط شور علاوه بر سطح شوری تحت تاثیر اثرات یون های مختلف محلول خاک نیز می باشد و اثرات نوع یون ها در ترکیب های یونی مختلف به دلیل شرایط محلول و برهمکنش یون ها با تشکیل جفت یون ها متفاوت بود. عدم اختلاف معنی دار وزن خشک ریشه ذرت در سطح شوری پایین در ترکیب یونی کلرورکلسیم به دلیل وجود یون غالب کلسیم و جذب آن توسط ریشه ها هاباشد که یک یون مفید در مقابله با تنش شوری می باشد، در صورتی که در ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم برهمکنش یون ها به دلیل تشکیل جفت یون و همچنین رقابت جذب سدیم و کلسیم توسط ریشه ها سبب کاهش جذب کمتر کلسیم شد. پاسخ وزن ریشه ذرت در هر دو ترکیب یونی کلرورسدیم+کلرورکلسیم و کلرورکلسیم در سطوح شوری پایین  $S_1$  و  $S_2$  تحت تاثیر تنش اسمزی بود اما در سطوح شوری بالا  $S_3$  و  $S_4$  تحت تاثیر اثر ویژه یون قرار گرفت. بررسی پارامترهای شوری نشان داد که پتانسیل اسمزی پارامتر مناسب تری نسبت به غلظت یون و قابلیت هدایت الکتریکی جهت استفاده در مدل های شبیه سازی و برنامه ریزی های آبیاری در شرایط شور می باشد. همچنین، ارزیابی توابع کاهش نشان داد که کارایی تخمین مدل نمایی بر داده های اندازه گیری شده وزن ریشه گیاه بالاتر از مدل خطی بود. با توجه به نتایج این مطالعه، در نظر گرفتن ترکیب یون ها جهت مدیریت مصرف آب های شور و همچنین مدیریت تغذیه گیاه بسیار مهم و تاثیرگذار می باشد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

بذرافشان، ابودر؛ شرفا، مهدی؛ محمدی، محمدحسین؛ ذوالفقاری، علی اصغر (۱۳۹۸). پاسخ ذرت به تنش شوری با استفاده از مدل های جذب آب در فصول مختلف. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۹)، ۲۱۷۱-۲۱۸۲.

سرای تبریزی، مهدی؛ بابازاده، حسین؛ همایی، مهدی؛ کاوه، فریدون؛ پارسی نژاد، مسعود (۱۳۹۵). تعیین حد آستانه کاهش عملکرد ریحان و ارزیابی مدل های جذب آب تحت شرایط تنش شوری. آب و خاک، ۳۰ (۱)، ۳۰-۴۰.

سیفی، سودابه؛ عزیزاده، امین؛ داوری، کامران؛ بنایان اول، محمد (۱۳۹۴). ارزیابی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی در گیاه چمن. آبیاری و زهکشی ایران، ۹ (۱)، ۱۳۱-۱۴۲.

## REFERENCES

- Albasha, R., Mailhol, J. C., & Cheviron, B. (2015). Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models-experimental and numerical analysis. *Agricultural Water Management*, 155, 22-29.
- Bazrafshan, A., Shorafa, M., Mohammadi, M. H., Zolfaghari, A. A., van der Zee, S., & van de Craats, D. (2020). Comparison of the individual salinity and water deficit stress using water use, yield, and plant parameters in maize. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192:448.
- Bazrafshan, A., Shorafa, M., Mohammadi, M. H., & Zolfaghari, A. A. (2019). Maize Response to Salinity Stress using water uptake models in different seasons. *Iranian Journal of Soil and Waters Sciences*, 50, 2171-2182. (In Persian).
- Ben-Gal, A., Borochoy-Neori, H., Yermiyahu, U., & Shani, U. (2009). Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? *Environmental and Experimental Botany*, 65, 232-237.
- Bernstein, L. (1975). Effects of salinity and sodicity on plant growth. *Annual Review Phytopathology*, 13, 295-312.
- Chaves, M.M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103, 551-560.
- Cramer, G. R. (2002). Sodium-calcium interactions under salinity stress. In: Läuchli, A., Lüttge, U. (Eds.), *Salinity: Environment, Plants, Molecules*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 205-227.
- De Jong van Lier, Q., Van Dam, J. C., & Metselaar, K. (2009). Root water extraction under combined water and osmotic stress. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 862-875.
- De Willigen, P., van Dam, J. C., Javaux, M., & Heinen, M. (2012). Root water uptake as simulated by three soil water flow models. *Vadose Zone Journal*, 11, 811-822.
- Gardner, W. R. (1960). Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*, 89: 60-73.

- Homaee, M., Feddes, R. A., & Dirksen, C. (2002). A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1764–1772.
- Himabindu, Y., Chakradhar, T., Reddy, M. C., Kanygin, A., Redding, K. E., & Chandrasekhar, T. (2016). Salt-tolerant genes from halophytes are potential key players of salt tolerance in glycophytes. *Environmental and Experimental Botany*, 124, 39–63.
- Jalali, V., & Kapourchal, S. A. (2020). Assessing four different macroscopic water uptake models for maize plant (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Irrigation and Drainage*, 70, 70–83.
- Kirkham, M. B. (2014). Principles of soil and plant water relations. Cambridge: Academic Press.
- Maathuis, F. J. M. (2014). Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 65, 849–858.
- Maiti, A., & Rogers, R. D. (2011). A correlation-based predictor for pair-association in ionic liquids. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13, 12138–12145.
- Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M. H., & Neyshabouri, M. R. (2018). Revisiting the wet and dry ends of soil integral water capacity using soil and plant properties. *Soil Research*, 56, 331–345.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
- Oster, J. D., Letey, J., Vaughan, P., Wu, L., & Qadir, M. (2012). Comparison of transient state models that include salinity and matric stress effects on plant yield. *Agricultural Water Management*, 103, 167–175.
- Rengasamy, P. (2010). Osmotic and ionic effects of various electrolytes on the growth of wheat. *Australian Journal of Soil Research*, 48, 120–124.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solid. P. 417–435. In: Sparks, D. L., Helmke, P. A., Leppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. & Summer, M. E. (Eds), Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods Soil Science Society American Inc. Book series, No. 5, Madison, WI, USDA.
- Saadat, S., & Homaee, M. (2015). Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management*, 152, 119–124.
- Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., Homaee, M., Kaveh, F., & Parsinejad, M. (2016). Determining the threshold value of basil yield reduction and evaluation of water uptake models under salinity stress condition. *Journal of Water and soil science*. 30(1), 30–40. (In Persian)
- 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)
- Shannon, M. C., & Grieve, C. M. (1999). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78, 5–38.
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22, 123–131.
- Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T., Shouse, P. J., & Poss J. A. (2006). Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management*, 86, 140–149.
- Soil Survey Staff. (2014). Soil taxonomy, 12th ed. Washington DC: USDANRCS, Washington DC, USA.
- Tavakkoli, E., Fatehi, F., Coventry, S., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2011). Additive effects of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions on barley growth under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 62, 2189–2203.
- Vennam, R. R., Bheemanahalli, R., Reddy, K. R., Dhillon, J., Zhang, X., & Adeli, A. (2024). Early-season maize responses to salt stress: Morpho-physiological, leaf reflectance, and mineral composition. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100994.
- Wang, H., Liang, L. Y., Liu, S., An, T. T., Fang, Y., Xu, B. C., Zhang, S. Q., Deng, X. P., Palta, J. A., Siddique, K. H. M., & Chen, Y. L. (2020). Maize genotypes with deep root systems tolerate salt stress better than those with shallow root systems during early growth. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206, 711–721.
- Wang, T., Xu, Y., Zuo, Q., Shi, J., Wu, X., Liu, L., Sheng, J., Jiang, P., & Ben-Gal, A. (2023). Evaluating and improving soil water and salinity stress response functions for root water uptake. *Agricultural Water Management*, 287, 108451.
- Wu, X., Shi, J., Zuo, Q., Zhang, M., & Ben-Gal, A. (2021). Parameterization of the water stress reduction function based on soil-plant water relations. *Irrigation Science*, 39, 101–122.
- Yang, H., Du, T. S., Mao, X. M., & Shukla, M. K. (2020). Modeling tomato evapotranspiration and yield responses to salinity using different macroscopic reduction functions. *Vadose Zone Journal*, 10, 1–15.
- Zaidi, P. H., Shahid, M., Seetharam, K., & Vinayan, M. T. (2022). Genomic regions associated with salinity





stress tolerance in tropical maize (*Zea Mays* L.). *Frontiers in Plant Sciences*, 13, 869270

Zhang, X., Yang, H., Shukla, M. K., & Du, T. (2023). Proposing a crop-water-salt production function based on plant response to stem water potential. *Agricultural Water Management*, 178, 108162

Zhao, K. F., Song, J., Fan, H., Zhou, S., & Zhao, M. (2010). Growth response to ionic and osmotic stress of NaCl in salt-tolerant and salt-sensitive maize. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52, 468–475