

**Research Article**

**Effects of Simultaneous Stresses of Salinity, Water Deficit, and Deficiency of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium on Evapotranspiration Stress Coefficient of Corn Plants Under Field Conditions**

Faramarz Zargar Yaghoubi<sup>1</sup>, Mahdi Sarai Tabrizi<sup>2</sup>, Ali Mohammadi Torkashavnd<sup>3</sup>, Hadi Ramezani Etedali<sup>4</sup>

1-Department of Soil Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: [faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir](mailto:faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir)

2-Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: [m.sarai@iau.ac.ir](mailto:m.sarai@iau.ac.ir)

3-Department of Soil Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: [a-mohammadi@srbiau.ac.ir](mailto:a-mohammadi@srbiau.ac.ir)

4-Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: [ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

**Received:** January 26, 2026

**Revised:** April 13, 2026

**Accepted:** May 9, 2026

**Published:** May 13, 2026

**Extended Abstract**

**Background and Objectives**

Nowadays, seeking strategies to minimize the consumption of agricultural inputs, including water and fertilizers, while evaluating crop yield variations under real field conditions and simultaneous environmental stresses is of great importance. So, in this research, maize (*Zea mays* L.) evapotranspiration stress coefficient ( $K_s$ ) was evaluated under simultaneous salinity, water, and NPK macronutrients deficiency stresses at field conditions.

**Materials and Methods**

This research was conducted in 2022 to simulate the  $K_s$  coefficient of forage maize (Sc. 704 cultivar) under field conditions and the simultaneous effects of three abiotic stresses: water, salinity, and fertilizer. In this regard, empirical functions (mathematical-statistical) were determined to predict the evapotranspiration stress coefficient ( $K_s$ ). The cultivation was carried out at the Aliabad-e- Fashafouyeh Agricultural and Livestock Farm in Hasanabad, Tehran province, using a randomized complete blocks design (RCBD) in a  $4^3$  factorial arrangement with three replications. The factors included 1- irrigation at four levels ( $W_0$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ , and  $W_3$ ) providing 100%, 80%, 60%, and 40% of the crop water requirement, respectively; 2- irrigation water salinity at four levels ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ , and  $S_3$ ) with EC of 1.8, 5.2, 8.6, and 10 dS/m, respectively; and 3- fertilization at four levels ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ , and  $F_3$ ) providing 100%, 80%, 60%, and 40% of the plant's nutritional requirements for NPK macronutrients, respectively. Irrigation levels were controlled using the Time Domain Reflectometry (TDR) device, and salinity levels were achieved by mixing local saline well water with fresh non-saline water. The  $K_s$  coefficient was calculated from the ratio of the evapotranspiration (ET) of the plant under stress to the ET of the plant under non-stress conditions (control treatment). This coefficient indirectly reflects the crop yield, such that as  $K_s$  increases towards one, the yield will also increase.

**Results**

The results indicated that at each level of water stress, the  $K_s$  coefficient decreased with increasing salinity and NPK macronutrients deficiency stress. Specifically, under the most severe applied stress ( $W_3S_3F_3$ ), this

coefficient reached 0.38, representing a 62% reduction compared to the control treatment. This trend was also observed under constant fertilizer conditions, and the results showed a decrease in the evapotranspiration coefficient with increased salinity and water stresses. Furthermore, the steepest decline in  $K_s$  occurred under water stress conditions, highlighting the significant impact of irrigation water amount on changes in the plant's  $K_s$  coefficient. Consequently, each stress individually contributed to the reduction of the crop water requirement ( $ET_c$ ), among them, the effect of water stress was 56% greater than salinity stress, ranking first in reducing the slope of  $K_s$ . The stress of NPK macronutrients deficiency had the least impact on the slope of  $K_s$  in the maize plant. Finally, an exponential empirical function with statistical indices of  $r^2$ , RMSE, ME, EF, and CRM equal to 0.997, 0.005, 0.011, 0.998, and 0.023, respectively, was found to be the most suitable function for estimating  $K_s$  based on the percentage of simultaneous salinity, water, and NPK macronutrients deficiency stresses applied to maize.

## Conclusions

By having the evapotranspiration stress coefficient ( $K_s$ ), it is possible to determine the actual evapotranspiration of maize ( $ET_c$ ) and estimate the crop water requirement. Undoubtedly, by reducing the volume of applied water under environmental stress conditions, water savings will be achieved while meeting the actual needs of the maize. The results showed that by maintaining crop yield, water productivity and production sustainability can be increased. This approach can serve as a scientific basis for revising traditional irrigation patterns and sustainable water resources policies in forage maize fields under similar conditions.

**Keywords:** Empirical functions, Exponential modeling, Macronutrient, Single cross 704.

## Author Contributions

Conceptualization, M.S.T. and F.Z.Y.; Vadouszone-hydrology, M.S.T. and F.Z.Y.; software, M.S.T.; validation, M.S.T.; formal analysis, M.S. and F.Z.Y.; investigation, M.S., F.Z.Y. and A.M.T. and M.S.T.; resources, M.S.T. and F.Z.Y.; data curation, M.S.T. and H.R.E.; writing-original draft preparation, M.N.H. and A.H.; writing-review and editing, M.S.T. and F.Z.Y.; visualization, M.S.T.; supervision, M.S.T. and A.M.T.; project administration, M.S.T.; funding acquisition, F.Z.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

## Acknowledgements

This paper is published as a part of a Ph.D. thesis supported by the Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. The authors are thankful to the Islamic Azad University for financial supports.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Ethical considerations

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

**Cite this article:** Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A. & Ramezani Etedali, H. (2026). Effects of simultaneous stresses of salinity, water deficit, and deficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium on evapotranspiration stress coefficient of corn plants under field conditions. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 61-80.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.71288.1035>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.  
Publisher: The University of Tabriz





نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۱

صفحه‌های ۶۱ تا ۸۰، بهار ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.71288.1035>

E-ISSN: 3092-6106



### مقاله پژوهشی

## تأثیر تنش‌های هم‌زمان شوری، کم‌آبی و کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر ضریب تنش تبخیر و تعرق گیاه ذرت در شرایط مزرعه‌ای

فرامرز زرگر یعقوبی<sup>۱</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۲</sup>✉، علی محمدی ترکشوند<sup>۳</sup>، هادی رضانی اعتدالی<sup>۴</sup>

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir](mailto:faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir)

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [m.sarai@iau.ac.ir](mailto:m.sarai@iau.ac.ir)

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [a-mohammadi@srbiau.ac.ir](mailto:a-mohammadi@srbiau.ac.ir)

۴- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

### چکیده

امروزه بهینه‌سازی مصرف آب و نهاده‌های کشاورزی در شرایط تنش‌های هم‌زمان محیطی اهمیت زیادی دارد. این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ با هدف شبیه‌سازی ضریب تنش تبخیر و تعرق ( $K_s$ ) ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط تنش‌های هم‌زمان کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) در شرایط مزرعه‌ای در منطقه علی‌آباد فشافویه، شهرستان حسن‌آباد، استان تهران، ایران انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل ( $4^3$ ) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) اجرا گردید. ضریب  $K_s$  از نسبت تبخیر و تعرق گیاه در شرایط تنش به تبخیر و تعرق گیاه در شرایط بدون تنش (تیمار شاهد) محاسبه شد. نتایج نشان داد که  $K_s$  با افزایش شدت تنش‌ها به‌طور معنادار کاهش یافت، به طوری که در شدیدترین سطح تنش مقدار آن به ۰/۳۸ رسید که بیانگر کاهش ۶۲ درصدی نسبت به شاهد بود. در میان تنش‌ها، تنش کم‌آبی بیشترین تأثیر را بر کاهش  $K_s$  نشان داد و اثر آن ۵۶ درصد بیشتر از تنش شوری بر شیب کاهش  $K_s$  برآورد شد. مدل نمایی ارائه شده با دقت بالا ( $RMSE=0.0109$  و  $r^2=0.998$ ) توانایی مناسبی در پیش‌بینی مقدار  $K_s$  داشت. نتایج نشان داد که استفاده از  $K_s$  برآورد شده می‌تواند در تخمین تبخیر و تعرق واقعی و مدیریت بهینه مصرف آب گیاه ذرت علوفه‌ای در شرایط تنش‌های هم‌زمان کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی پرمصرف در شرایط مشابه این پژوهش مفید باشد.

**واژه‌های کلیدی:** توابع تجربی، سینگل کراس ۷۰۴، عناصرهای غذایی پرمصرف، مدل‌سازی نمایی.

استناد به این مقاله: زرگر یعقوبی، ف.، سرائی تبریزی، م.، محمدی ترکشوند، ع. و رضانی اعتدالی، ه. (۱۴۰۵). تأثیر

تنش‌های هم‌زمان شوری، کم‌آبی و کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر ضریب تنش تبخیر و تعرق گیاه ذرت در شرایط مزرعه‌ای. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۱)، ۸۰-۶۱.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.71288.1035>

## مقدمه

تنش‌ها به مجموعه عواملی اطلاق می‌شود که خارج از دامنه تحمل یا مطلوب گیاه بوده و بر اثر آن کاهش رشد گیاه و کیفیت محصول مشاهده می‌شود (Zargar Yaghoubi *et al.*, 2023). امروزه محدودیت‌های منابع تولید (آب و خاک) چه از نظر کیفی و کمی همواره مطرح بوده و این امر استفاده بهینه از منابع آب و خاک موجود را ضروری می‌سازد (Sarai Tabrizi *et al.*, 2014). از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در ایران در بخش کشاورزی با توجه به وضعیت منابع آب و خاک، تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی پرمصرف می‌باشد. راهکارهای مدیریتی متعددی برای مقابله با تنش‌های غیرزنده کم‌آبی، شوری و تغذیه‌ای پیشنهاد شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بهینه‌سازی مدیریت آبیاری، تلفیق منابع آب شور و شیرین، اصلاح و آبشویی خاک‌های شور، افزایش کارایی مصرف آب، بهبود مدیریت کوددهی، اجرای زهکشی مؤثر و معرفی ارقام متحمل اشاره کرد. این رویکردها در مطالعات متعددی به وسیله (Maas & Hoffman, 1977; Rhoades *et al.*, 1992; Bresler & Hoffman, 1986; Van Genuchten & Hoffman, 1984; Ayers & Westcot, 1985; Oster, 1994; Shalhevet, 1994; Hanson *et al.*, 1999) و (Saeidi, 2024) مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

مقاومت گیاهان به تنش‌ها یک صفت پیچیده است که تحت تأثیر عواملی چون ژنتیک، فیزیولوژی گیاه و عوامل محیطی از جمله نور، دما، CO<sub>2</sub> و رطوبت قرار دارد (Moles *et al.*, 2016). کاهش پتانسیل آب خاک بر اثر تنش‌های کم‌آبی و شوری، توانایی گیاه در جذب آب را محدود می‌کند. علاوه بر این، تنش کمبود عناصر غذایی با تأثیر بر رشد و کارایی ریشه‌های گیاه و فرآیندهای متابولیکی، به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش جذب آب و اُفت توسعه سلولی در بافت‌های گیاهی می‌شود که در نهایت شدت فتوسنتز، تولید ماده آلی و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Munns, 2011). در چنین شرایط دشواری، روزه‌ها برای کاهش تعرق بسته می‌شوند و تبادلات گازی بین گیاه و محیط به حداقل می‌رسد. در پژوهشی تأثیر دو سطح کمبود آب آبیاری (تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) و چهار سطح قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری (۱/۷، ۴، ۶ و ۸ dS/m) بر روی گیاه آفتابگردان آزمایش شد. نتایج نشان داد که تنش‌ها بر روی افزایش مقاومت روزه‌ها، کاهش رشد برگ و کاهش انرژی گیاه برای فتوسنتز تأثیر گذار بود به طوری که با افزایش شدت تنش‌ها، عملکرد و مصرف آب به‌وسیله گیاه کاهش یافت (Xin *et al.*, 2016). همچنین، در پژوهش دیگری بر روی گوجه گیلاسی، اثر دو سطح شوری آب آبیاری (۴ و ۷ dS/m) و سه سطح تنش کم‌آبی (۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصدی تخلیه رطوبتی خاک) بررسی و مشاهده شد که اثر تنش شوری بر عملکرد، تبخیر و تعرق کل (ET<sub>T</sub>) و کارایی مصرف آب (WUE) معنادار بود و تنش شوری ۷ dS/m موجب کاهش عملکردی ۲۷ درصدی و کاهش ۱۹/۲ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد (بدون تنش) شد (Ramezani Moghadam *et al.*, 2018).

در واقع زمانی که میزان آب خاک کاهش پیدا می‌کند، در صورت عدم جبران آن، غلظت نمک در منطقه ریزوسفر افزایش یافته (افزایش فشار اسمزی) و هم‌زمانی این دو با هم، محدودیت رشد گیاه را تشدید می‌کند. مطالعه تنش‌های وارد شده به گیاه ذرت به دلیل تأمین غذای انسان و علوفه دام بسیار با اهمیت می‌باشد. نتایج عزیزیان و سپاس‌خواه (۲۰۱۴) در کشت ذرت Sc.704 نشان داد که کاهش آب آبیاری موجب افت معنادار تبخیر و تعرق و تعرق خالص گردید. همچنین افزایش شوری باعث کاهش تعرق و افزایش تبخیر از سطح خاک شد که این امر به کاهش رشد تاج‌پوشش و ریشه‌های گیاه نسبت داده شد. در تحقیق دیگری، اعمال تنش ۵۰ درصدی نیاز آبی ذرت در مرحله رشد رویشی آسیب جبران‌ناپذیری بر عملکرد گیاه وارد آورد و مشخص گردید که مرحله رشد زایشی (گل‌دهی) و اوایل پُر شدن دانه، حساس‌ترین مرحله به تنش کم‌آبی می‌باشد (Hemmati *et al.*, 2014).

علاوه بر عملکرد، اعمال یک حد ثابت از تنش کم‌آبی در مراحل رشد چهار برگی، دوازده برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه، اثرهای متفاوتی بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه داشت به طوری که کم‌ترین مقدار تبخیر و تعرق مربوط به مرحله گل‌دهی بود که علت آن حساسیت بیشتر ذرت به تنش کم‌آبی در این مرحله بود (Saeidi & Sotoudehnia, 2021). در پژوهشی دیگر با افزایش تنش شوری در منطقه ریزوسفر ذرت، پتانسیل آب موجود در خاک کاهش یافت و جذب آب به وسیله گیاه کم شد. از این رو، با کاهش کیفیت آب آبیاری (افزایش هدایت الکتریکی از ۰/۵ به ۷/۵ dS/m) مقدار تبخیر و تعرق و عملکرد به ترتیب ۳۱ و ۶۰ درصد کاهش یافت (Lacerda et al., 2016). پژوهشی نشان داد که حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت منجر به عملکرد به ترتیب ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۵ تن بر هکتار شد که نشان از اثر بیشینه تنش کم‌آبی در مرحله گل‌دهی بر کاهش عملکرد محصول دارد (Mohammadi Bahmadi & Armin, 2017). در تحقیق دو ساله دیگری اثر افزایش شوری آب آبیاری و کمبود نیتروژن خاک باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای ذرت شد که این امر موجب کاهش تعرق گیاه گردید (Saeidi et al., 2021). بنابراین، برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصولات زراعی، برای تعیین نیاز آبی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور معمول، عوامل اقلیمی، گیاهی (ژنوتیپ)، شرایط مدیریتی کشت، کیفیت خاک و تغییرات شرایط محیطی در طول فصل رشد بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه مؤثر هستند و مقدار آن را نسبت به مقدار پتانسیل منطقه (شرایط ایده‌آل) متمایز می‌کنند. در صورت مساعد نبودن شرایط فوق برای تبخیر و تعرق، گیاه با تنش مواجه شده و از عملکرد محصول کاسته می‌شود (Allen et al., 1988).

آلن و همکاران (۱۹۸۸) در نشریه شماره ۵۶ فائو با عنوان راهنمای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع بیان کردند که تبخیر و تعرق بالقوه گیاهان به مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها وابستگی کامل داشته و این ویژگی (مقاومت روزنه‌ای) بر پایه گونه‌های گیاهی و مدیریت زراعی متفاوت می‌باشد. مقاومت روزنه‌ای تحت تأثیر اقلیم و آب قابل‌استفاده خاک بوده و با محدود شدن دسترسی گیاه به آب خاک، مقاومت روزنه‌ای افزایش و تعرق کاهش می‌یابد. بنابراین، مدیریت صحیح مصرف آب در شرایط تنش در کشت ذرت بسیار حایز اهمیت می‌باشد. از فاکتور  $K_s$  که مقدار آن از نسبت تبخیر و تعرق واقعی گیاه در شرایط تنش ( $ET_s$  در شرایط تنش) به تبخیر و تعرق گیاه در شرایط بدون تنش ( $ET_0$ ) محاسبه می‌گردد، به عنوان ضریب تنش تبخیر و تعرق یاد می‌شود که از طریق آن می‌توان به مقدار واقعی تبخیر و تعرق گیاه در منطقه مطالعاتی، دست یافت و از مصرف غیرضروری آب جلوگیری به عمل آورد.

فاکتور  $K_s$  در شرایط ایده‌آل و بدون تنش برابر واحد بوده و در شرایط تنشی به زیر یک کاهش پیدا می‌کند. رودنیک و همکاران (۲۰۱۷) اثر سه رژیم آبیاری کامل، محدود (۷۵ درصد آبیاری کامل) و دیم را با ۵ سطح کودی نیتروژن به مقدار ۰، ۸۴، ۱۴۰، ۱۹۶ و ۲۵۲ کیلوگرم بر هکتار بر روی ذرت مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان دهنده کاهش معنادار ضریب  $K_s$  در شرایط دیم و آبیاری محدود نسبت به آبیاری کامل و مصرف کم‌تر نیتروژن نسبت به مصرف کامل آن بود. بنابراین، هر زمان که مقدار جریان آب به سمت ریشه گیاه، برای تأمین آب مورد نیاز تعرق کافی نباشد، گیاه با افزایش مقاومت روزنه‌ای و بستن جزئی آن‌ها، از شدت تعرق خود می‌کاهد.

مطالعه حاضر برای پیش‌بینی اثرهای تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر روی ضریب  $K_s$  گیاه انجام شد که با آگاهی از دامنه نوسانات پارامترهای فوق می‌توان به یک برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب رسید و نیاز آبی گیاه را تنها از طریق تبخیر و تعرق تعیین و از مصرف غیرضروری آب جلوگیری کرد. از طرفی ضرورت بررسی هم‌زمان تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی در شرایط مزرعه‌ای نه تنها به دلیل محدودیت مطالعات پیشین که عمدتاً به ارزیابی منفرد یا دوتایی تنش‌ها پرداخته‌اند، بلکه شواهد علمی نشان می‌دهند که اثرات این تنش‌ها در شرایط واقعی از مجموع اثرات منفرد آن‌ها بیشتر است. با وجود مطالعات متعدد، مدل‌های

تجربی-آماری اندکی برای بررسی همزمان سه‌عاملی ارائه شده و تاکنون ضریب  $K_s$  به‌عنوان شاخص کلیدی کارایی مصرف آب در تعامل با این سه عامل تنش به‌طور جامع بررسی نشده است. مطالعات پیشین با وجود پرداختن به برخی از این تنش‌ها، فاقد چارچوب جامع مدل‌سازی برای پیش‌بینی عملکرد تحت ترکیب هر سه عامل با در نظر گرفتن ضریب  $K_s$  هستند. بنابراین، ارائه چنین مدل‌های قابل‌اعمال مزرعه‌ای نه‌تنها خلاء موجود در دانش بشر را پر می‌کند، بلکه برای کشاورزان و مدیران منابع در مواجهه با محدودیت‌های آبیاری، شوری خاک و کمبود عناصر غذایی، ضرورتی کاربردی و راهبردی دارد که می‌تواند منجر به بهینه‌سازی مصرف منابع، افزایش عملکرد و پایداری نظام‌های کشاورزی شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و تیمارهای تحقیق

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در سطح یک هکتار از اراضی مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد فشافویه، واقع در شهرستان حسن‌آباد (استان تهران)، انجام شد. موقعیت جغرافیایی منطقه  $35^{\circ}17'$  عرض شمالی و  $51^{\circ}40'$  طول شرقی و ارتفاع آن ۱۱۹۱ متر از سطح دریا است. منطقه با حاکمیت توپوگرافی دشتی و شرایط اقلیمی خشک و اصولاً کم باران و تابستان نسبتاً گرم و زمستان سرد که به علت مسطح بودن در معرض بادهای غیرموسمی قرار دارد، واقع شده است. حداکثر دما در تابستان ۴۲ درجه سلسیوس و حداقل آن در زمستان ۴- درجه سلسیوس گزارش شده است. الگوی کشت مرسوم در منطقه گندم و جو پائیز، یونجه و ذرت علوفه‌ای می‌باشد که بسیاری از کشاورزان از این الگو استفاده می‌کنند.

گیاه مورد مطالعه، ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L.*) رقم سینگل کراس ۷۰۴ به‌صورت جوی پشته‌ای در کرت‌های به ابعاد ۳ در ۳ متر با فاصله‌ای به اندازه ۳ متر (ناحیه پیاده‌رو) از هم‌دیگر جدا گشته و کشت در اواسط تیر ماه و برداشت آن در اواخر آبان ماه انجام گردید. بذرها دارای حداقل قوه نامیه ۹۵ درصد و خلوص ۹۸ درصد بوده و روی ردیف‌های کشت ۲۵ سانتی‌متری و در عمق حدود ۵ سانتی‌متری خاک کاشته شدند. فاصله پشته‌ها (ردیف‌ها) از هم ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تیمارهای اصلی آزمایش شامل، چهار سطح آبیاری  $W_0, W_1, W_2, W_3$  که هر یک به‌ترتیب تأمین‌کننده ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه و چهار سطح هدایت الکتریکی آب آبیاری  $(S_0), (S_1), (S_2)$  و  $10 \text{ dS/m}$  ( $S_3$ ) و چهار سطح کودی  $F_0, F_1, F_2, F_3$  که به‌ترتیب ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز تغذیه‌ای گیاه را از لحاظ عناصر غذایی پرمصرف NPK تأمین می‌کردند، اجراء شد. در مجموع تعداد ۱۹۲ واحد آزمایشی (کرت)، اعمال توأمان تیمارهای کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر NPK (تنش‌های هم‌زمان WSF) به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) شدند.

عملیات خاک‌ورزی شامل شخم به عمق حدود ۳۰ سانتی‌متر و دیسک زمین برای خرد کردن کلوخ‌ها در اواخر بهار همان سال انجام گردید. پیش از کاشت بذور، برای تسطح زمین، عملیات لور در زمین اجراء گردید. سطوح آبیاری چهارگانه همواره به‌وسیله دستگاه TDR-150 در همان سطح‌های رطوبتی مورد پژوهش در سامانه طبیعی آب-خاک-گیاه، کنترل و در همان سطح تا برداشت نگه داشته می‌شد. به همین طریق سطوح شوری چهارگانه از طریق اختلاط آب چاه شور منطقه (کلاس  $C_5S_4$  ویل‌کوکس) با آب غیرشور (شرب) تأمین گردید. آب غیرشور در این پژوهش دارای EC برابر  $1/27 \text{ dS/m}$  و  $\text{pH} = 7/7$  بود. تجزیه شیمیایی و تعیین کلاس کیفی آب آبیاری بر اساس روش‌ها و استانداردهای ارائه شده توسط Shainberg & Oster (1978) انجام گرفت. در جدول ۱ برخی از مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی آب چاه

شور مورد استفاده در اختلاط با آب شیرین آورده شده است. با توجه به اینکه آب چاه شور دارای SAR نسبتاً بالا بوده است، احتمال بروز اثرات مرتبط با سدیمی شدن، از جمله تمایل به پراکنده کردن ذرات خاک، در تیمار ۱۰ dS/m قابل طرح می‌باشد. با این حال، نظر به بافت خاک منطقه (لوم تا لوم‌رسی) و همچنین شوری نسبتاً بالای محیط خاک، غلظت الکترولیت در محلول خاک در محدوده‌ای قرار داشته است که می‌تواند تا حدی از بروز پراکنده شدن شدید ذرات خاک جلوگیری نماید، زیرا در غلظت‌های بالاتر الکترولیت، تمایل به هم‌آوری افزایش می‌یابد. بنابراین، در تیمار ۱۰ dS/m احتمال هم‌زمانی تنش اسمزی ناشی از شوری و اثرات سدیمی شدن به صورت بالقوه وجود خواهد داشت.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی نمونه آب چاه شور منطقه.

| Class | TDS<br>(mg/L) | SAR<br>(meq/L) <sup>-0.5</sup> | SSP<br>(%) | Cations and Anions (meq/L) |                  |                  |                               |                 |                               | pH  | EC<br>(dS/m) |                               |
|-------|---------------|--------------------------------|------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----|--------------|-------------------------------|
|       |               |                                |            | Na <sup>+</sup>            | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |     |              | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |
| C5S4  | ۶۴۲۶          | ۱۳/۰۹                          | ۵۹/۹۷      | ۶۰/۸۶                      | ۱۳/۶۸            | ۲۹/۵۷            | ۳۶/۶۷                         | ۶۱/۷۵           | ۵/۷۳                          | nil | ۷/۰۶         | ۱۰/۴۲                         |

SAR، نسبت جذب سدیم، nil، ناچیز، TDS، کل جامدات محلول، SSP، درصد سدیم محلول

برای تمامی تیمارها در طول دوره اولیه رشد (از زمان کاشت تا مرحله ۵ تا ۸ برگی) ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در هر کرت تأمین گردید و هیچ گونه تنشی در این مرحله داده نشد و تنش‌های سه‌گانه در بعد از این مرحله اعمال گردید. تیمارهای شوری همان‌طور که گفته شد بر اساس اختلاط آب‌ها به وسیله روابط زیر، نسبت به تعیین حجم آب‌های شور و غیرشور اقدام گردید و قبل از هر نوبت آبیاری در مخازن پلاستیکی PVC تهیه و با کنترل مجدد هدایت الکتریکی به وسیله EC سنچ پرتابل مورد سنجش دوباره قرار گرفت.

$$EC_f = \frac{EC_w \times V_w + EC_s \times V_s}{V_w + V_s} \quad (1)$$

$$V_t = V_w + V_s \quad (2)$$

در این روابط،  $EC_f$  هدایت الکتریکی نهایی (dS/m)،  $EC_w$  هدایت الکتریکی آب چاه شور (dS/m)،  $EC_s$  هدایت الکتریکی آب شیرین (شرب) (dS/m)،  $V_w$  حجم آب شور چاه (L)،  $V_s$  حجم آب شیرین (شرب) (L)،  $V_t$  حجم آب کل (L) که به هدایت الکتریکی نهایی (سطوح شوری مورد تحقیق) رسیده است، می‌باشد.

برای بررسی خاک زیر کشت، سه نمونه مرکب از اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری برداشت و تجزیه‌های شیمیایی و فیزیکی به شرح جدول ۲ روی آن‌ها انجام گردید. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های استاندارد انجام شد (Sparks, 1996; Dane & Topp, 2002).

جدول ۲- برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه.

| عمق خاک (cm) | EC (dS/m) | pH  | CCE (%) | کربن آلی (%) | نیتروژن کل (mg/kg) | فسفر (mg/kg) | پتاسیم (mg/kg) | FC (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) | PWP (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) | کلاس بافت خاک |
|--------------|-----------|-----|---------|--------------|--------------------|--------------|----------------|--|---|---------------|
| ۰-۲۰         | ۸/۷       | ۷/۹ | ۱۴/۲    | ۰/۶۱         | ۶۲۷/۸              | ۵/۷          | ۱۹۷/۳          | ۲۹/۸                                   | ۱۴/۷                                    | لوم           |
| ۲۰-۴۰        | ۸/۰       | ۷/۹ | ۱۲/۴    | ۰/۵۸         | ۵۸۲/۰              | ۵/۴          | ۱۸۱/۴          | ۲۸/۵                                   | ۱۵/۱                                    | لوم           |
| ۴۰-۶۰        | ۸/۴       | ۷/۹ | ۱۳/۱    | ۰/۵۳         | ۵۶۱/۲              | ۵/۰          | ۱۶۸/۰          | ۳۵/۶                                   | ۱۸/۴                                    | لوم رسی       |

PWP: رطوبت نقطه پژمردگی دائم، EC: رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، CCE: کلسیم کربنات معادل

کودهای شیمیایی بر اساس توصیه کودی آزمایشگاه مرجع و با توجه به نتایج تجزیه خاک منطقه به میزان ۳۵۰ کیلوگرم بر هکتار کود اوره، ۱۸۰ کیلوگرم بر هکتار کود سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود سولفات پتاسیم در خاک مصرف شد. کود نیتروژن در سه مرحله به صورت یکنواخت در قبل و بعد از کشت پخش گردید. کلیه تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب و خاک در این پژوهش در آزمایشگاه تخصصی کشاورزی بهین‌آزما انجام شد. در مرحله نخست، کودهای فسفر و پتاسیم و یک سوم کود اوره هم‌زمان با کاشت به صورت نواری به زمین داده شد و بقیه کود اوره در زمان‌های تنک کردن و مرحله ظهور گل‌های تاجی به خاک اضافه گردید. با توجه به تحرک اندک و تثبیت سریع فسفر در خاک‌های قلیایی، تمامی کود فسفر به صورت پایه و در هنگام کاشت بذر در منطقه توسعه ریشه مصرف گردید. طول دوره رشد بین ۱۲۰ تا ۱۳۰ روز در نظر گرفته شد و این طول دوره رشد که زمان‌های کاشت تا برداشت محصول را شامل می‌شد بر اساس گزارش فائو ۵۶ که مراحل رشدی گیاه را به چهار دوره اولیه، توسعه، میانی و پایانی تقسیم می‌کرد، انتخاب شد.

داده‌های پژوهش حاضر شامل مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای (چهار مرحله رشدی ابتدای، توسعه، میانی و پایانی) و عملکرد محصول (تن بر هکتار) به تفکیک ۶۴ سری ترکیبات تیماری کم‌آبی، شوری و سطوح NPK (۴×۴×۴) در سه تکرار بودند که تجزیه واریانس داده‌ها به وسیله نرم‌افزار آماری SAS (Version 5.4) انجام شد. سپس داده‌ها به صورت نمودار و جدول تدوین و به دقت مورد تحلیل و تفسیر قرار گردیدند.

### اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه

در این پژوهش مقدار رطوبت خاک ناحیه ریشه با توجه به رشد و توسعه آن با دستگاه TDR (مدل ۱۵۰ ساخت شرکت Spectrum آمریکا) در پنج عمق ۷/۵، ۱۲، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری به‌طور روزانه به وسیله جفت پروب‌های فولادی ضد زنگ اندازه‌گیری شد (Niknezhad, 2026). برای حذف اثرات حاشیه‌ای، محل برداشت داده‌های رطوبت خاک در اطراف مرکز سطح کرت‌ها به تعداد ۳ نوبت انجام می‌گرفت و میانگین حسابی آن‌ها ملاک سنجش رطوبت حجمی داده‌های رطوبتی بود. در ابتدا و قبل از کاشت بذر، دستگاه TDR به وسیله خاک محل کشت واسنجی گردید. این عمل بر اساس دستورالعمل سازنده دستگاه و با استفاده از روش واسنجی مبتنی بر برازش خطی بین داده‌های قرائت شده به وسیله دستگاه-TDR 150 و رطوبت واقعی خاک در شرایط آزمایشگاهی (آون خشک)، دستگاه به‌طور دقیق واسنجی شده و در طول پژوهش برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به‌طور مداوم و موثق مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که در طول فصل رشد گیاه (تابستان ۱۴۰۱) هیچ‌گونه ریزش جوی در منطقه انجام نشده بود و از طرفی با فرض کوچک بودن کرت‌ها (۹ m<sup>2</sup>) و نبود درز و ترک در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن، این اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت

خاک در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر و تعرق بوده است و بنابراین امکان برآورد مقدار تبخیر و تعرق گیاه، به وسیله رابطه زیر وجود داشت:

$$d_{H_2O} = ET = \sum_{i=1}^n [(\theta_{FC} - \theta_i)/100] \times D_i \times C_{ws} \quad (3)$$

در این رابطه،  $d_{H_2O}$  عمق آب آبیاری مورد نیاز کرت (cm)،  $\theta_{FC}$  رطوبت حجمی ظرفیت مزرع‌ای خاک ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )،  $\theta_i$  رطوبت حجمی لایه  $i$ ام خاک ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )،  $D_i$  عمق ضخامت لایه  $i$ ام خاک (cm) و  $C_{ws}$  ضریب تنش کم‌آبی کرت (مقدار آن با توجه به سطوح تنش کم‌آبی طرح مورد پژوهش 1، 0.8، 0.6 و 0.4) منظور گردید. لازم به ذکر است که با توجه به این که عمق توسعه ریشه در طول فصل رشد متغیر است، محاسبات بیلان رطوبتی بر اساس عمق مؤثر ریشه ( $Z_r$ ) در هر مرحله رشد انجام شد. بدین صورت که در مراحل ابتدایی رشد، محاسبه تا عمق لایه‌های سطحی و با افزایش توسعه ریشه، تا عمق‌های پایین‌تر انجام گردید. بنابراین، مجموع لایه‌های ( $D_i$ ) در رابطه (۳) تابعی از مرحله فنولوژیک گیاه بوده و متناسب با توسعه تدریجی سیستم ریشه در طول فصل رشد تنظیم شد.

### زمان و حجم آب آبیاری

در این پژوهش، مبنای تعیین عمق آب آبیاری، نیاز آبی اقلیمی (ETc) به صورت مستقیم نبود بلکه مدیریت آبیاری بر اساس میزان تخلیه آب قابل‌استفاده خاک در ناحیه ریشه گیاه ذرت انجام شد. بدین صورت که بازه رطوبتی بین ظرفیت مزرع‌ای ( $\theta_{FC}$ ) و نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ ) به عنوان آب قابل‌استفاده کل (TAW) در نظر گرفته شد و سطوح تنش کم‌آبی (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد) بر اساس درصدی از این بازه اعمال گردید. بنابراین، تیمارهای آبیاری بیانگر کسری از آب قابل‌استفاده خاک بوده و مبنای آن کنترل میزان تخلیه رطوبت خاک در منطقه توسعه ریشه بود. زمان آبیاری کرت‌ها با پایش روزانه رطوبت خاک و بر اساس میزان تخلیه آب قابل‌استفاده در ناحیه ریشه تعیین شد.

سطوح تنش کم‌آبی شامل  $W_0$  (عدم اعمال تنش کم‌آبی)،  $W_1$  (۲۰ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده)،  $W_2$  (۴۰ درصد تخلیه) و  $W_3$  (۶۰ درصد تخلیه) بودند که بر مبنای بازه رطوبتی بین ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) و نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ ) تنظیم گردیدند. رطوبت خاک به صورت حجمی و با استفاده از دستگاه TDR-150 اندازه‌گیری شد. روش کار به این ترتیب بود که، زمان شروع آبیاری در گروه تیماری  $W_0$  (تیمارهای  $W_0S_0$  to  $3F_0$  to  $3$ ) مصرف صفر درصد TAW بود به عبارت دیگر، در کل دوره رشدی این گروه تیماری (کل دوره رشد گیاه)، تنشی از نظر کمیّت آب آبیاری نداشته و فقط تنش کیفیت آب آبیاری  $S_0$  (1.8 dS/m)،  $S_1$  (5.2 dS/m)،  $S_2$  (8.6 dS/m) و  $S_3$  (10 dS/m) و تنش کمبود عناصر NPK با چهار سطح  $F_0$  (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز تغذیه‌ای NPK)،  $F_1$  (تأمین ۸۰ درصد نیاز تغذیه‌ای NPK)،  $F_2$  (تأمین ۶۰ درصد نیاز تغذیه‌ای NPK) و  $F_3$  (تأمین ۴۰ درصد نیاز تغذیه‌ای NPK) اعمال می‌شد. به همین ترتیب در گروه تیماری  $W_1$  (تیمارهای  $W_1S_0$  to  $3F_0$  to  $3$ ) شروع زمان آبیاری اتمام مصرف شدن ۲۰ درصد آب قابل‌استفاده در دوره‌های رشدی توسعه، میانی و پایانی بود و اختلاف بین این گروه‌های ترکیبات تیماری، تنش‌های شوری  $S_0$ ،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  و تنش‌های کودی  $F_0$ ،  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  می‌بود و در گروه تیماری  $W_2$  (تیمارهای  $W_2S_0$  to  $3F_0$  to  $3$ ) شروع زمان آبیاری به پایان رسیدن ۴۰ درصد از آب TAW در کل دوره فصل رشد ذرت بود و باز هم اختلاف بین این تیمارها از نظر تنش شوری و کودی مختلف بود.

در نهایت در گروه تیماری  $W_3$  (تیمارهای  $W_3S_0$  to  $3F_0$  to  $3$ ) شروع زمان آبیاری هر کرت مصرف ۶۰ درصد آب TAW بود و تفاوت بین تیمارها از نظر تنش‌های شوری و کودی بود. بایستی توجه داشت که در تمامی تیمارهای طرح (از  $W_0S_0F_0$  تا  $W_3S_3F_3$ ) در مرحله ابتدایی یا اولیه دوره رشد هیچ‌گونه تنش از بابت شوری و یا آبی کودی به گیاه اعمال نشد. فرض مطرح شده برای این پژوهش برای TAW همان‌طور که پیش‌تر مطرح شد، میزانی از رطوبت بین حد ظرفیت مزرعه‌ای (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) خاک است که با مصرف آب به‌وسیله گیاه و کاهش رطوبت خاک، گیاه وارد فاز تنش کم‌آبی می‌شود. در تکمیل مطلب بالا در خصوص TWA بایستی اضافه شود که اگرچه رطوبت ظرفیت زراعی (FC) به‌صورت دقیق معادل حد بالای آب قابل استفاده فیزیولوژیک گیاه نمی‌باشد، اما در مطالعات مدیریت آبیاری و برآورد آب قابل استفاده خاک، به‌طور متداول به‌عنوان حد بالای بازه آب قابل استفاده (TAW) در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نیز با هدف ایجاد سطوح نسبی تنش کم‌آبی و مقایسه تیمارها، بازه بین  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  مبنای محاسبات قرار گرفت. با توجه به تأثیر هم‌زمان تنش‌های آبی، شوری و کودی تعداد نوبت‌های آبیاری در تیمارهای مختلف فرق داشته و حجم آب آبیاری کرت‌ها (تیمارها) براساس رابطه زیر تعیین گردید.

$$V_{H_2O} = d_{H_2O} \times A \quad (۴)$$

که در آن،  $V_{H_2O}$  حجم آب لازم برای انواع تیمارها که در کرت‌های مختلف هستند ( $m^3$ )،  $d_{H_2O}$  عمق آب آبیاری مورد نیاز ( $m$ )، و  $A$  مساحت کرت ( $m^2$ ) می‌باشد.

برای آبیاری کرت‌ها، آب در بشکه‌های بزرگ PVC به‌وسیله شلنگ و به‌صورت غرقابی و با جریان آرام به کرت‌ها داده شد. آب آبیاری به شکل یکنواخت تا حد ممکن در سطح هر کرت توزیع گردید. به‌دلیل ابعاد کوچک کرت‌ها و دقت بالا در توزیع آب، تلفات توزیع آب و رواناب ناچیز فرض شد و حجم آب آبیاری دقیقاً بر اساس نیاز محاسباتی تأمین گردید. با این وجود برای افزایش اطمینان از جابه‌جایی رطوبت بین کرت‌ها در روزهای اولیه کاشت و هم‌زمان با آبیاری کرت‌ها، فواصل بین آن‌ها (پیاپاده‌روها) آبیاری سنگین انجام شد و بلافاصله روی آن‌ها پلاستیک شفاف کشیده شد. این کار ضمن جلوگیری از تابش نور خورشید به خاک پیاپاده‌روها، مانع مکش و جابه‌جایی رطوبت بین کرت‌ها می‌شود. عمق متوسط توسعه ریشه ذرت ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با پایان رسیدن فصل رشد گیاه و برداشت محصول و حفر گودال در خاک کرت‌ها، بقایای ریشه در اعماق بیشتر از ۶۰ سانتی‌متری مشاهده نگردید.

### محاسبه ضریب تنش تبخیر و تعرق گیاه ذرت ( $K_s$ )

با وجود این‌که از لحاظ نظری گیاه بایستی قادر به استفاده از آب تا نقطه پژمردگی باشد اما جذب آب پیش از این نقطه تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بسته به نوع بافت، تخلخل، توزیع خلل و فرج خاک و شرایط تنشی به وجود آمده برای این سیستم طبیعی ناهمگن چند فازی آب-خاک و گیاه، اغلب گیاهان تا حدود  $\frac{2}{3}$  این بازه رطوبتی بدون هیچ‌گونه تنش کم‌آبی، قادر به جذب آب می‌باشند (Zargar Yaghoubi et al., 2024). بنابراین تحمل تنش‌های محیطی سه‌گانه کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی NPK به‌وسیله گیاهان تابع پتانسیل کل آب و نه مقدار آب خاک (رطوبت) است و در این مورد بافت خاک به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر پتانسیل ماتریک ( $\Psi_m$ ) و اسمزی ( $\Psi_s$ ) خاک تأثیر گذار می‌باشد. (Allen et al., 1988) از  $K_s$  به‌عنوان یک کمیتی که می‌توان آن‌را به‌صورت یک ضریب بدون بُعد (دیمانسون) کاهش تبخیر و تعرق آب قابل استفاده گیاه مطرح کردند که با معادله زیر قابل محاسبه است.

$$K_s = \frac{ET_s}{ET_o} \quad (۵)$$

در این رابطه،  $K_s$  ضریب تنش تبخیر و تعرق،  $ET_s$  و  $ET_0$  به ترتیب تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط تنش و بدون تنش (شاهد) بر حسب mm می‌باشد. ضریب  $K_s$  همواره عددی بین صفر تا یک می‌باشد و هرچه شرایط تنشی شدیدتر گردد این ضریب به عدد صفر نزدیک‌تر خواهد شد. استفاده از  $K_s$  باعث تخمین بهتری از تبخیر و تعرق واقعی و نیاز آبی گیاه تحت تنش خواهد شد (Zargar Yaghoubi et al., 2024).

### تحلیل آماری داده‌ها

مقادیر ضرایب  $K_s$  تمامی تیمارهای مورد مطالعه با توجه به مقادیر تبخیر و تعرق ذرت در تمامی کرت‌ها با استفاده از رابطه ۵ محاسبه گردید. سپس با کمک نرم‌افزار SPSS، داده‌های اندازه‌گیری شده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و تجزیه واریانس ضریب  $K_s$  در کرت‌های مختلف مورد مطالعه با توجه به مدل آماری چند عاملی زیر انجام گردید.

$$Y_{ijkl} = \mu + R_i + X_j + X_k + X_l + X_j \times X_k + X_j \times X_l + X_k \times X_l + X_j \times X_k \times X_l + e_{ijkl} \quad (6)$$

که در این مدل،  $Y_{ijkl}$ : مقدار هر مشاهده،  $\mu$ : میانگین صفت مورد مطالعه،  $X_j$ : اثر اصلی تیمارهای تنشی آبی،  $X_k$ : اثر اصلی تیمارهای تنشی شوری،  $X_l$ : اثر اصلی تیمارهای تنشی کودی،  $X_k \times X_j$ : اثر متقابل تیمارهای آبی و شوری،  $X_l \times X_j$ : اثر متقابل تیمارهای آبی و کودی،  $X_l \times X_k$ : اثر متقابل تیمارهای شوری و کودی،  $X_j \times X_k \times X_l$ : اثر متقابل تیمارهای آبی، شوری و کودی است و با توجه به این‌که در هر آزمایش و اندازه‌گیری همواره عدم قطعیت و خطا وجود دارد،  $e_{ijkl}$ : اثر خطاهای آزمایش در تعیین صفت مورد مطالعه در طرح می‌باشد و چون طرح پایه به صورت بلوک‌های کاملاً تصادفی اجراء شده است، یک عامل به نام بلوک یا ردیف ( $R_i$ ) اضافه به مدل آماری شده است. با به‌کارگیری داده‌های برداشت شده از طرح، مقادیر ضریب  $K_s$  در شرایط متفاوت تنش‌های آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی از طریق رابطه ۷ قابل پیش‌بینی خواهد بود. در این رابطه، صرفاً تأثیر تنش‌های سه‌گانه مطرح شده در مقادیر  $K_s$  در نظر گرفته شده و از سایر عوامل مؤثر بر ضریب تنش تبخیر و تعرق صرف نظر شده است.

$$K_s = f(ET_s/ET_0, EC_s/EC_0, F_s/F_0, C_0) \quad (7)$$

در این رابطه  $K_s$ : ضریب تنش تبخیر و تعرق ذرت،  $ET_s/ET_0$ : نسبت تبخیر و تعرق در کرت‌های تنش داده شده از نظر تنش کم‌آبی ( $ET_s$ ) به تبخیر و تعرق در کرت‌های فاقد تنش کم‌آبی ( $ET_0$ ) است،  $EC_s/EC_0$ : نسبت مقادیر هدایت الکتریکی آب آبیاری ( $EC_s$ ) به هدایت الکتریکی قابل‌تحمل برای ذرت ( $EC_0$ )،  $F_s/F_0$ : نسبت مقادیر کودهای داده شده به زمین ( $F_s$ ) به حاصلخیزی کامل آن ( $F_0$ ) و  $C_0$ : ضریب ثابت سایر عوامل مؤثر بر ضریب  $K_s$  است. در رابطه فوق، برای یافتن بهترین توابع برازش شده بین متغیرهای وابسته و مستقل برای پیش‌بینی  $K_s$  از توابع معرف نمایی، توانی، چند جمله‌ای و لگاریتمی و پیش‌نهادی نرم‌افزار استفاده شده است. شکل کلی این توابع به ترتیب در روابط ۸ تا ۱۱ آورده شده است و از نرم‌افزار SPSS ضرایب این توابع برآورد شده و برای تعیین اثر معناداری آنها از آماره فیشر ( $F$ ) استفاده شده است.

$$K_s = A_0(X_1)^{A1} \times (X_2)^{A2} \times (X_3)^{A3} \quad (8) \text{ توانی}$$

$$K_s = A_0(X_1)^{A1} \times (X_2)^{A2} \times (X_3)^{A3} \times e^{(A4X_1 + A5X_2 + A6X_3)} \quad (9) \text{ نمایی}$$

$$K_s = A_0 + A_1 \ln X_1 + A_2 \ln X_2 + A_3 \ln X_3 \quad (10) \text{ لگاریتمی}$$

$$K_s = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_1^2 + A_3 X_2 + A_4 X_2^2 + A_5 X_3 + A_6 X_3^2 + A_7 X_1 X_2 X_3 \quad (11) \text{ درجه دوم}$$

در این توابع Ks به عنوان یک متغیر وابسته بدون بُعد و  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  به ترتیب متغیرهای مستقل بدون بعد  $\frac{ECs}{EC_0}$ ،  $\frac{ETs}{ET_0}$  و  $\frac{Fs}{F_0}$  و  $A_0$ ،  $A_1$  تا  $A_7$  ضرایب ثابت معادلات می باشند. با داشتن داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده ضریب تبخیر و تعرق (Ks) و استفاده از آماره‌های مربوط به تحلیل مدل‌های تجربی و نظری که امروزه ملاک سنجش انواع مدل‌های متداول در علوم خاک و آب در کارهای پژوهشی است، اعتبار توابع مورد ارزیابی قرار گرفته و تابع بهینه معرفی می‌گردد. معادلات مربوط به آماره‌های فوق که شامل حداکثر خطا، میانگین ریشه دوم خطا، ضریب تبیین، کارایی مدل و ضریب جرمی باقیمانده می‌باشد به ترتیب در روابط ۱۲ تا ۱۶ آورده شده است.

$$ME = \max|P_i - O_i| \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

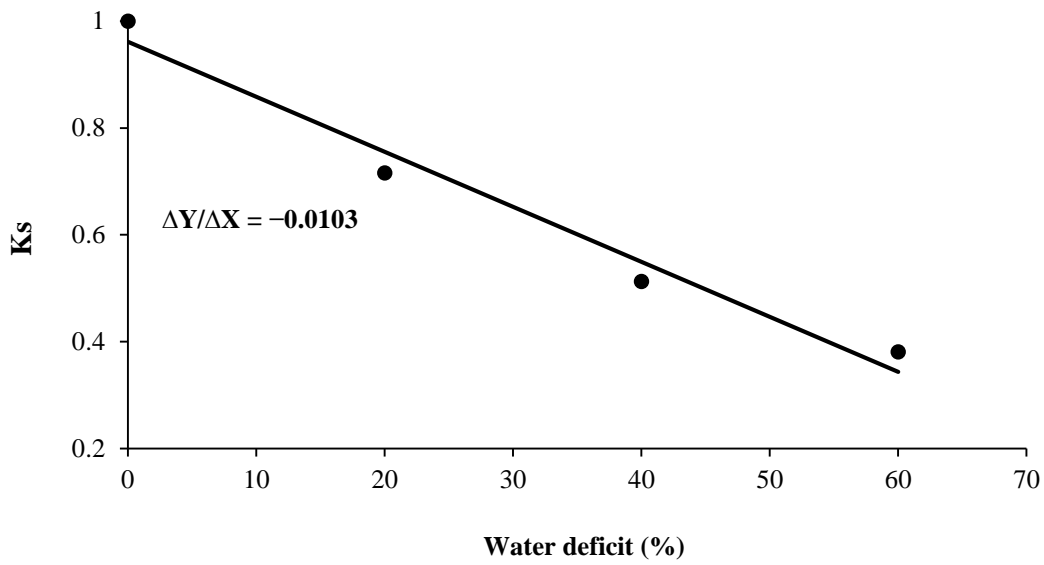
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

هر مدلی که مقدار RMSE، ME و CRM آن به صفر نزدیک‌تر بود و یا مقدار  $r^2$  و EF آن به یک نزدیک‌تر باشد به عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود. حرف O و P به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) و داده‌های پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌ها هستند.

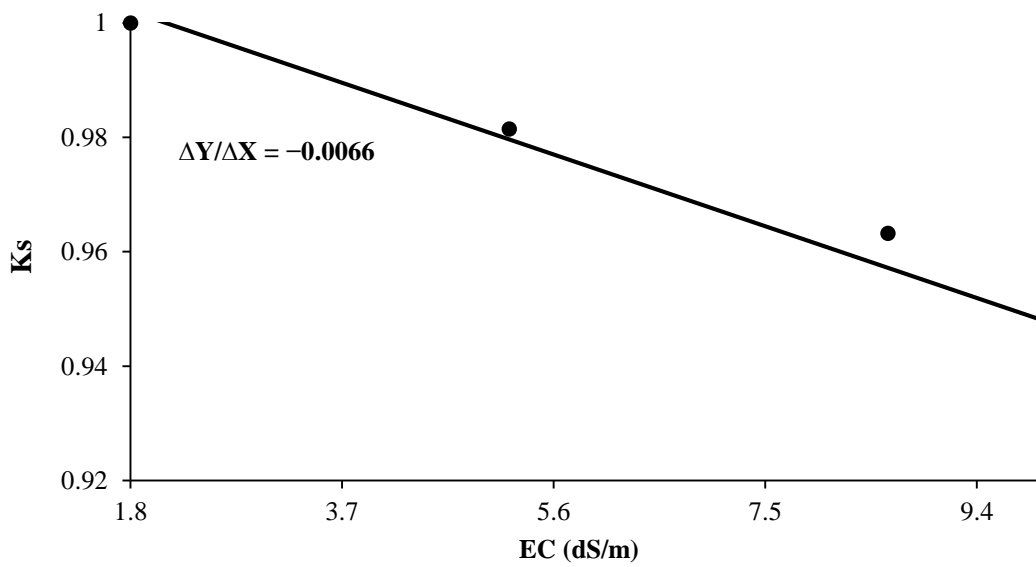
## نتایج و بحث

### تأثیر تنش‌های محیطی بر ضریب Ks

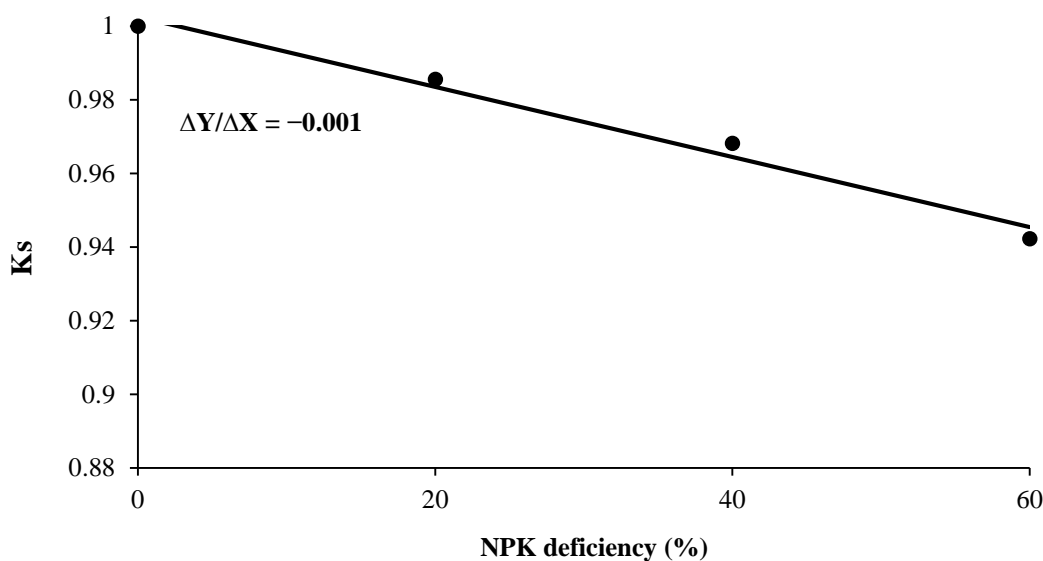
برای تعیین تأثیرپذیری انواع تنش‌های محیطی غیرزنده سه‌گانه آبی، شوری و کودی بر Ks اقدام به محاسبه تبخیر و تعرق در شرایط تنش و بدون تنش (شاهد) گردید. نتایج نشان داد که نوع و شدت تنش‌های وارده بر Ks متفاوت می‌باشد به طوری که بیشترین نوع تنش که در کاهش ضریب تبخیر و تعرق مؤثر می‌باشد، تنش کم‌آبی است و تنش کم‌آبی با ۵۶ درصد افزایش نسبت به تنش شوری، رتبه اول را در کاهش ضریب تبخیر و تعرق دارد و کمترین عامل مؤثر بر شیب کاهش Ks مربوط به تنش کودی می‌باشد. در شکل‌های ۱ تا ۳ حساسیت ضریب تبخیر و تعرق نسبت به تنش‌های آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی به تفکیک نوع تنش اعمال شده بر گیاه آورده شده است.



شکل ۱- تأثیر تنش کم‌آبی بر ضریب  $K_s$ .

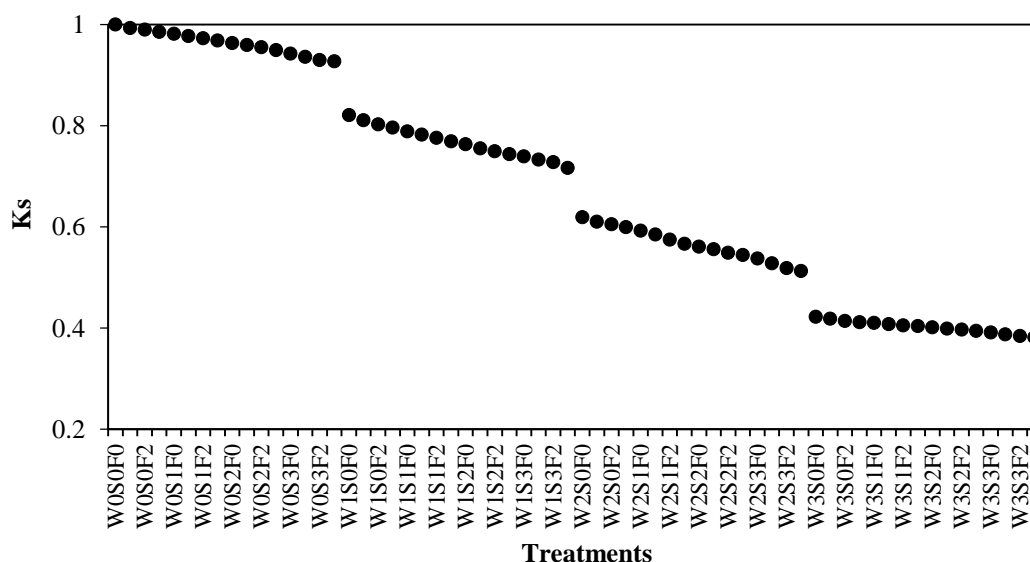


شکل ۲- تأثیر تنش شوری بر ضریب  $K_s$ .



شکل ۳- تأثیر تنش کمبود NPK بر ضریب  $K_s$ .

نتایج پژوهش نشان داد که تنش‌های توأمان سه‌گانه باعث کاهش  $K_s$  نسبت به تیمار شاهد شد به طوری که میانگین  $K_s$  از تیمار  $W_0S_0F_0$  (شاهد) تا  $W_3S_3F_3$  یک کاهش ۶۲ درصدی داشت که مؤید کاهش جذب آب به وسیله گیاه و اثر افزایش فشار اسمزی خاک بر کاهش تبخیر و تعرق گیاهی بود. در شکل ۴، مقدار متوسط  $K_s$  حاصل از سه تکرار انواع تیمارهای مورد مطالعه در این پژوهش (۶۴ تیمار) به صورت شماتیک آورده شده است.



شکل ۴- مقادیر  $K_s$  محاسبه شده در تمامی کرت‌های مورد مطالعه.

نتایج تجزیه واریانس اثرات تنش‌های توأمان سه‌گانه برای بررسی سه صفت مورد مطالعه، شامل  $K_s$ ، عملکرد تر و تبخیر و تعرق کل، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثرات تنش‌های توأمان سه‌گانه کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر غذایی NPK بر Ks، عملکرد تر و تبخیر و تعرق کل ذرت.

| منبع تغییرات         | درجه آزادی | میانگین مربعات        |                         |
|----------------------|------------|-----------------------|-------------------------|
|                      |            | عملکرد تر             | ET کل                   |
| بلوک                 | ۲          | ۰/۰۲۳ <sup>ns</sup>   | ۱/۹۰۷ <sup>ns</sup>     |
| تنش کم‌آبی (Ws)      | ۳          | ۲/۸۶ <sup>**</sup>    | ۱۳۹۱۴۳۸/۵ <sup>**</sup> |
| تنش شوری (Ss)        | ۳          | ۰/۰۳۵ <sup>**</sup>   | ۱۶۹۴۶/۴ <sup>**</sup>   |
| تنش کمبود عناصر (Fs) | ۳          | ۰/۰۰۲ <sup>**</sup>   | ۱۱۸۰/۳ <sup>**</sup>    |
| Ws × Ss              | ۹          | ۹/۴۴ <sup>**</sup>    | ۶۵۳/۴ <sup>**</sup>     |
| Ws × Fs              | ۹          | ۰/۶۰ <sup>**</sup>    | ۴۴/۴ <sup>**</sup>      |
| Ss × Fs              | ۹          | ۰/۰۰۰۰۷ <sup>ns</sup> | ۳/۳۸ <sup>ns</sup>      |
| Ws × Ws × Fs         | ۲۷         | ۰/۰۰۰۰۶ <sup>ns</sup> | ۳/۲۸ <sup>*</sup>       |
| خطا                  | -          | ۱/۸۵                  | ۲/۰۶                    |
| ضریب تغییرات (CV)    | -          | ۰/۳۲                  | ۰/۳۱                    |

در تحلیل جدول ۳ بایستی توجه داشت که اگر چنانچه برهم‌کنش دو فاکتور اثر معناداری نداشته باشد، این بدین معنا است که اثر یکی از فاکتورها بر متغیر وابسته، مستقل از سطح فاکتور دیگر است ولی اگر چنانچه برهم‌کنش دو فاکتور اثر معناداری داشته باشد، این موضوع نشان دهنده این است که اثر یکی از فاکتورها بر متغیر وابسته، بستگی به سطح دیگری دارد. به عبارتی، تأثیر یک فاکتور بر متغیر وابسته، بر اساس سطح فاکتور دیگر، تغییر می‌کند. بنابراین، در مورد معناداری برهم‌کنش Ws×Ss می‌توان گفت که تأثیر شوری بر ضریب تنش تبخیر و تعرق (Ks) در سطوح مختلف تنش کم‌آبی متفاوت است. به عبارت دیگر، میزان کاهش Ks ناشی از شوری در شرایط آبیاری مختلف به‌طور ثابت نیست. این نشان می‌دهد که گیاه در شرایط تنش کم‌آبی، بیشتر نسبت به تنش شوری حساسیت نشان می‌دهد، چرا که در شرایط کم‌آبی، گیاه از طریق مکانیسم‌های سازگاری فیزیولوژیکی (بسته شدن روزنه‌ها، کاهش سطح برگ و...) واکنش متفاوتی به شوری نشان می‌دهد. بنابراین، اثر هم‌زمان تنش کم‌آبی و شوری بر تبخیر و تعرق گیاه، جمع ساده‌ای از اثرات تکی آن‌ها نیست، بلکه این دو عامل به‌صورت تعاملی و با هم عمل می‌کنند.

در مورد معناداری برهم‌کنش Ws×Fs می‌توان اظهار کرد که تأثیر مصرف کودها بر ضریب Ks، بسته به سطح تنش کم‌آبی متفاوت است. در شرایط تنش کم‌آبی کمتر، کاربرد کود و یا تغذیه گیاهی می‌تواند تأثیر چشمگیری بر بهبود تبخیر و تعرق و عملکرد فیزیولوژیک گیاه داشته باشد، اما در شرایط تنش کم‌آبی شدید، تأثیر مثبت کودها کاهش می‌یابد چرا که در شرایط کم‌آبی شدید، توان گیاه در جذب و استفاده از مواد غذایی محدود می‌شود. این یافته به مدیریت تغذیه گیاه کمک می‌کند، چرا که نشان می‌دهد در شرایط کم‌آبی، افزودن کود می‌تواند اثر کمتری بر بهبود تبخیر و تعرق داشته باشد و باید به‌صورت هم‌زمان با مدیریت آبیاری بررسی گردد.

در مورد عدم معناداری برهم‌کنش Ss×Fs بایستی گفت که تأثیر مصرف کودها بر Ks، در سطوح مختلف شوری به‌صورت مشابه است. به عبارت دیگر، اثر شوری بر Ks مستقل از تغذیه گیاه است. این یافته اهمیت مدیریتی دارد، زیرا نشان می‌دهد که حتی در خاک‌های شور، می‌توان برنامه تغذیه‌ای را در شرایط مشابه این پژوهش به‌صورت مستقل از

شوری تنظیم کرد و نیازی به تغییر اساسی در برنامه کودی صرفاً به دلیل شوری خاک نیست. این موضوع می‌تواند به مدیریت هم‌زمان شوری آب آبیاری و تغذیه گیاه کمک کند و هزینه‌های کودی را بهینه نماید. اما در صورتی که برهم کنش سه فاکتور اثر معناداری نداشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر ترکیبی این سه فاکتور بر متغیر وابسته قابل توجه نیست و بایستی اثرات این سه فاکتور را به صورت جداگانه و یا به صورت دو به دو بررسی کرد. به عبارت دیگر، بررسی اثرات اصلی هر فاکتور (تک فاکتور) و برهم‌کنش‌های دوگانه برای تفسیر نتایج کفایت می‌کند. این نوع روش تحلیل مشخص می‌کند که چگونه فاکتورها با یکدیگر تعامل دارند و چه نوع ترکیباتی از فاکتورها می‌توانند به نتایج متفاوتی منجر شوند. بنابراین، عدم معناداری برهم‌کنش این سه عامل تنش‌زا مشخص می‌کند که تنش کم‌آبی به‌عنوان محدودکننده اصلی رشد و نمو گیاه، اثرات اولیه بر جذب مواد غذایی و تحمل به شوری دارد و شوری و تغذیه تحت تأثیر وضعیت آبیاری عمل می‌کنند، اما تعامل آن‌ها با هم (یعنی اینکه شوری و کود با هم چگونه اثر می‌گذارند) تحت تأثیر تنش کم‌آبی نیست، یعنی سازوکار تأثیر شوری و کود بر گیاه نسبتاً مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند. بنابراین، وقتی دو عامل (شوری و تغذیه گیاه) به‌طور مستقل عمل می‌کنند و هر دو تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار دارند، نیازی به برهم‌کنش سه‌گانه برای تفسیر رفتار گیاه نمی‌باشد.

#### مدل‌سازی توابع تجربی Ks در شرایط تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمبود NPK

داده‌های حاصل از محاسبه Ks در شرایط تنش‌ی توأمان سه‌گانه آبی، شوری و کمبود NPK نشان داد که اثر توأمان (هم‌زمان) این عوامل بر کاهش ضریب تبخیر و تعرق گیاه مؤثر بود. از این جهت سعی گردید بین کاهش درصد تنش‌های مذکور تا سرحد ایده‌آل رشد گیاه و ضریب تنش تبخیر و تعرق ذرت (Ks) رابطه‌ای برآزش داده شود. در این تحقیق، سه نوع مدل ریاضی (Type 1,2&3) پس از اینکه ضرایبشان واسنجی شد و با روش‌های سعی و خطای کلاسیک به خوبی واسنجی قطعی صورت گرفت، استخراج گردید. با توجه به این‌که این مدل‌ها به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه وابستگی زیادی دارند، اما نسبت به سایر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده می‌شوند.

$$K_s = 1 - 9.448E - 3 \times W_s - 1.3E - 4 \times S_s - 2.75E - 4 \times F_s \quad (17)$$

$$K_s = 1 - 1.1E - 2 \times W_s - 7.48E - 5 \times S_s + 2.06E - 5 \times W_s^2 - 1.4E - 7 \times S_s^2 - 3.4535E - 4 \times F_s + 9.15E - 9 \times W_s \times S_s \times F_s \quad (18)$$

$$K_s = e^{2.3E-2+4.1E-2 \times \ln(W_s)+3E-3 \times \ln(S_s)-1.7E-2 \times W_s-2.43E-4 \times S_s-4.28E-4 \times F_s} \quad (19)$$

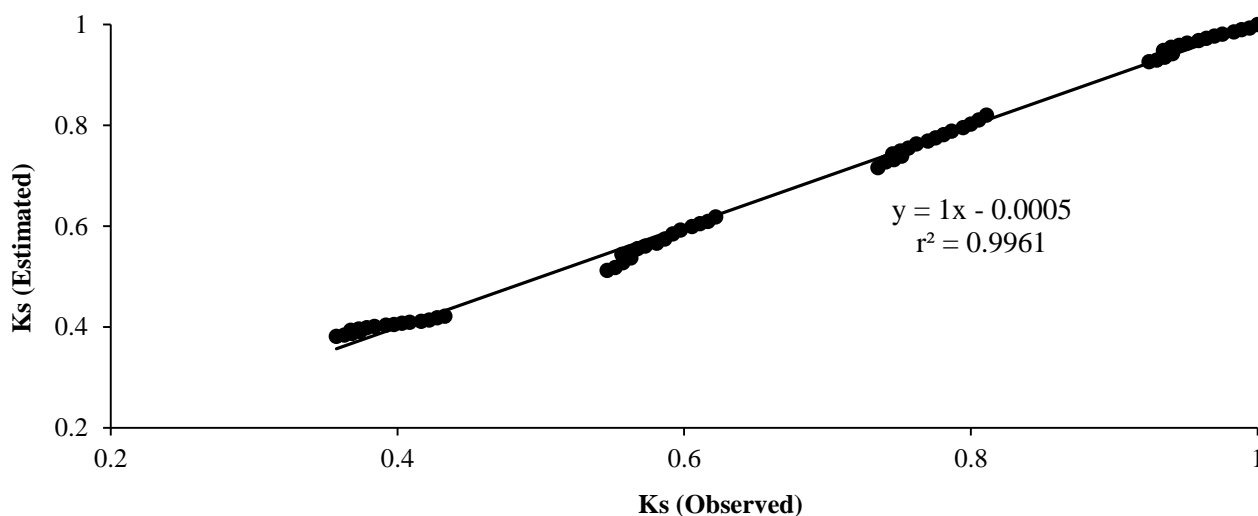
در این روابط، Ks ضریب تنش تبخیر و تعرق گیاه، Ws (٪) میزان درصد تنش کم‌آبی اعمال شده به گیاه، Ss (٪) میزان درصد شوری آب آبیاری که بالاتر از ۱/۸ dS/m می‌باشد، Fs (٪) میزان درصد تنش کمبود NPK از میزان مطلوب آن برای گیاه ذرت، e (تقریباً برابر ۲/۷۱۸۲) عدد اولیر، Ln لگاریتم طبیعی در پایه e و E پایه عدد صحیح ۱۰ می‌باشد که به توان عدد جلوی آن آمده است (نماد علمی) مثلاً 4 - 2.43E برابر ۴ × ۱۰<sup>-۲</sup> می‌باشد. در ادامه با استفاده از معادلات تعیین شده، ابتدا مقادیر Ks برای هر کرت آزمایشی تخمین زده شد، سپس مقادیر تخمینی و واقعی Ks از طریق روابط ۱۲ تا ۱۶، نسبت به مقایسه سه مدل پرداخته شد. هر مدلی که مقدار RMSE، ME و CRM آن به صفر نزدیک‌تر و یا EF و I<sup>2</sup> آن به یک نزدیک‌تر باشد، به عنوان مدل قابل قبول‌تری (مدل بهینه) انتخاب می‌گردد. در جدول ۴ پارامترهای آماری تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی سه مدل در برآورد Ks با یکدیگر مقایسه و نسبت به رتبه‌بندی آن‌ها اقدام گردید.

جدول ۴- پارامترهای ارزیابی آماری جهت اعتبار سه معادله برآوردی برای Ks.

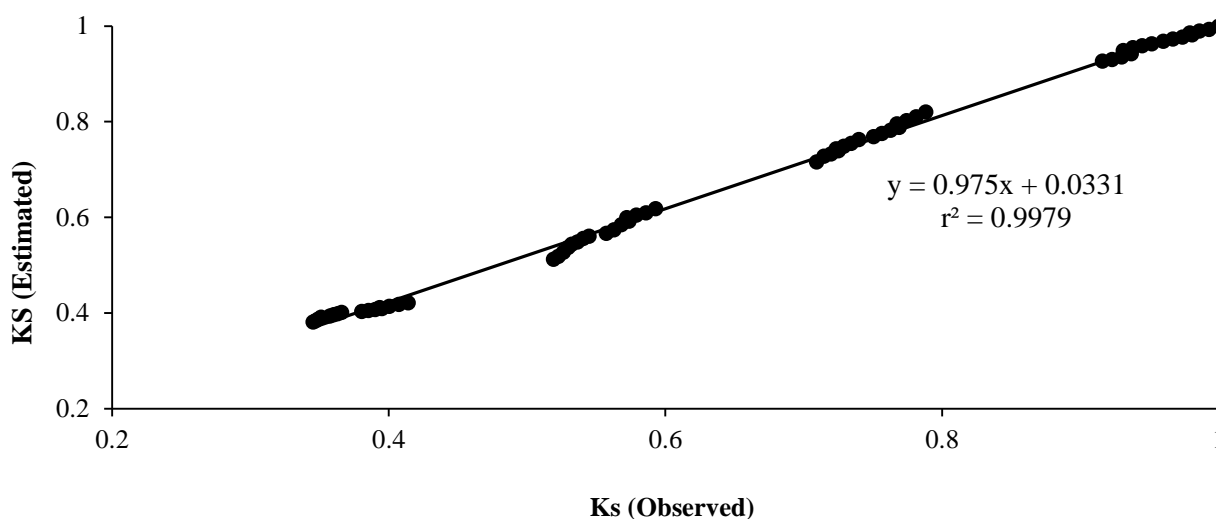
| CRM                       | EF                       | r <sup>2</sup>         | RMSE                     | ME                        | Equation |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------|
| ( <sup>۱</sup> )-/۰.۰۰۶۷۳ | ( <sup>۲</sup> )/۰.۹۹۶۱۴ | ( <sup>۲</sup> )/۰.۹۹۶ | ( <sup>۲</sup> )/۰.۱۳۲۲۷ | * ( <sup>۲</sup> )/۰.۳۳۷۷ | Type # 1 |
| ( <sup>۳</sup> )/۰.۲۴۷۱۶  | ( <sup>۳</sup> )/۰.۹۹۱۱۴ | ( <sup>۱</sup> )/۰.۹۹۸ | ( <sup>۳</sup> )/۰.۲۰۰۴۹ | ( <sup>۳</sup> )/۰.۳۹۸۹   | Type # 2 |
| ( <sup>۲</sup> )-/۰.۰۰۴۹۹ | ( <sup>۱</sup> )/۰.۹۹۷۳۵ | ( <sup>۱</sup> )/۰.۹۹۸ | ( <sup>۱</sup> )/۰.۱۰۹۶۲ | ( <sup>۱</sup> )/۰.۲۳۳۳   | Type # 3 |

\* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده رتبه‌بندی معادلات بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده می‌باشد.

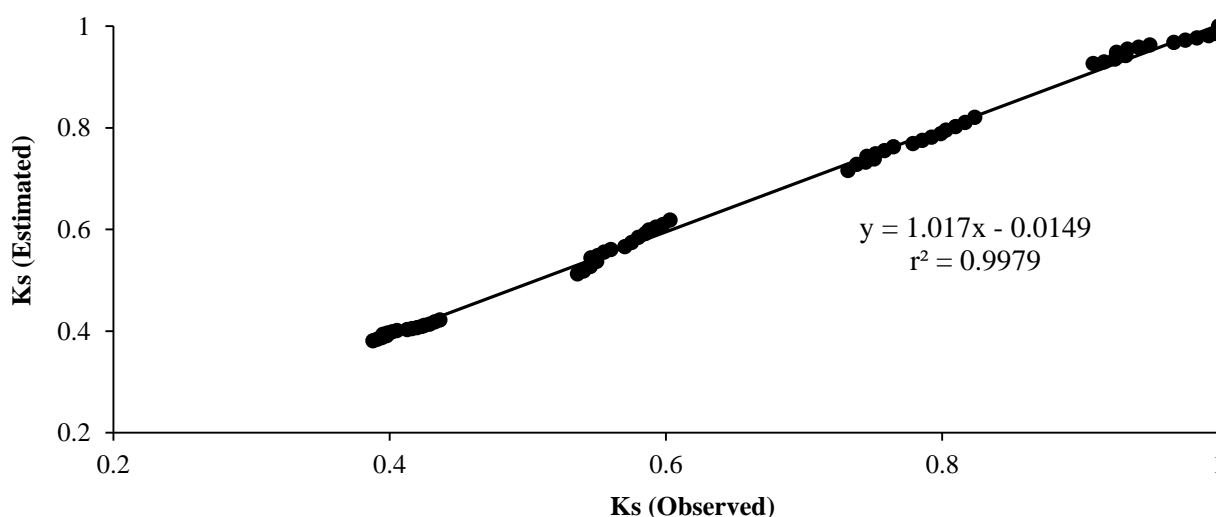
در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ دقت و صحت مدل‌های خطی چندگانه (معادله ۱۷)، چندجمله‌ای درجه دوم با اثر متقابل (معادله ۱۸) و نمایی-لگاریمی چندگانه (معادله ۱۹) در پیشگویی مقدار ضریب تنش تبخیر و تعرق (Ks). همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب تبیین هر سه معادله حدود یک است که نشان می‌دهد این مدل‌ها در پیشگویی مقدار ضریب تنش تبخیر و تعرق (Ks) دقت عالی دارند. همچنین، شیب خط هر رگرسیون در هر سه معادله حدود یک و عرض مبدا نزدیک صفر است که نشان‌گر تأیید صحت پیش‌بینی هر سه مدل می‌باشد. از این رو با استفاده از مدل بهینه، می‌توان تخمین مناسب‌تری برای Ks ذرت در شرایط تنش‌های توأمان سه‌گانه آبی، شوری و کمبود NPK داشت.



شکل ۵- تعیین دقت و صحت مدل خطی چندگانه (معادله ۱۷) در پیشگویی مقدار ضریب تنش (Ks).



شکل ۶- تعیین دقت و صحت مدل چندجمله‌ای درجه دوم با اثر متقابل (معادله ۱۸) در پیشگویی مقدار ضریب تنش (Ks).



شکل ۷- تعیین دقت و صحت مدل نمایی-لگاریمی چندگانه (معادله ۱۹) در پیشگویی مقدار ضریب تنش (Ks).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر تنش‌های آبی، شوری و کمبود NPK بر ضریب Ks ذرت علوفه‌ای، به‌عنوان یک محصول استراتژیک کشور، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این تنش‌ها با کاهش پتانسیل جذب آب و عناصر غذایی، منجر به کاهش تبخیر و تعرق و محدودیت در دسترسی به آب و عناصر غذایی پرمصرف شدند و در نتیجه Ks کاهش یافت. تنش کم‌آبی با ۵۶ درصد افزایش نسبت به تنش شوری، بیشترین تأثیر را بر کاهش Ks داشت. با استفاده از مدل‌های ریاضی-آماري، سه مدل برای پیش‌بینی Ks ایجاد شد که مدل نمایی (Type #3) بهترین برازش را داشت. نتایج نشان داد که تخمین دقیق Ks در شرایط تنش‌های مختلف، امکان محاسبه دقیق تبخیر و تعرق گیاه (ET) را فراهم می‌کند و باعث کاهش مصرف بی‌رویه آب و کود، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی می‌شود.

## شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

## منابع مورد استفاده

### References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Azizian, A., & Sepaskhah, A. R. (2014). Maize response to different water, salinity and nitrogen levels: Agronomic behavior. *International Journal of Plant Production*, 8(1), 107–130. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00147-3>
- Bresler, E., & Hoffman, G. J. (1986). Irrigation management for soil salinity control: Theories and tests. *Soil Science Society of America Journal*, 50(6), 1552–1560. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000060034x>
- Dane, J. H., & Topp, G. C. (2002). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA-CSSA-SSSA Publisher, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4>
- Hanson, B., Grattan, S. R., & Fulton, A. (1999). *Agricultural salinity and drainage*. University of California, Davis, USA.
- Hemmati, R., Maghsoudi, K., & Emam, Y. (2014). Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in a semi-arid region of North Fars. *Journal of Crop Production and Processing*, 4(11), 67–75. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/20.1001.1.22518517.1393.4.11.6.0>
- Lacerda, C. D., Ferreira, J. F., Liu, X., & Suarez, D. L. (2016). Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(3), 192–202. <https://doi.org/10.1111/jac.12145>
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), 115–134.
- Mohammadi Bahmadi, M., & Armin, M. (2017). Effect of drought stress on yield and yield components of different corn cultivars under delayed cropping conditions. *Applied Research in Plant Ecophysiology*, 4(1), 17–34. (In Persian with English abstract)
- Moles, T. M., Pompeiano, A., Reyes, T. H., Scartazza, A., & Guglielminetti, L. (2016). The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.008>
- Munns, R. (2011). Plant adaptations to salt and water stress: Differences and commonalities. *Advances in Botanical Research*, 57, 1–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387692-8.00001-1>
- Niknezhad, D. (2026). Possibility of measuring the water content of saline coarse-textured soils using the time domain reflectometry (TDR) method with a coated contact sensor. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 43–60. <https://doi.org/10.22034/sps.2026.71015.1030>
- Oster, J. D. (1994). Irrigation with poor quality water. *Agricultural Water Management*, 25(3), 271–297. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0378-3774(94)90064-7)
- Ramezani-Moghaddam, J., Hosseini, Y., Nikpour, M., & Abdoli, A. (2018). Evaluation of the effect of irrigation water salinity and drought stress on yield and yield components of cherry tomato. *Journal of Water and Soil*, 32(3), 489–500. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i3.70395>
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The use of saline waters for crop production*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

- Rudnick, D. R., Irmak, S., Djaman, K., & Sharma, V. (2017). Impact of irrigation and nitrogen fertilizer rate on soil water trends and maize evapotranspiration during the vegetative and reproductive periods. *Agricultural Water Management*, 191, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.007>
- Saeidi, R. (2024). Effect of planting date on the rate of corn evapotranspiration components under salinity stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 175–189. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85046.1350>
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Kaviani, A., & Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modify Ks and readily available water coefficients in maize (case study: Qazvin region). *Irrigation Science*, 39(3), 299–313. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00711-1>
- Saeidi, R., & Sotoudehnia, A. (2021). Yield response to corn evapotranspiration, under the influence of water stress at different growth stages in Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 611–620. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.314850.668822>
- Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., Homae, M., Kaveh, F., & Parsinejad, M. (2016). Determination of basil yield reduction threshold and evaluation of water uptake models under combined water and salinity stress. *Journal of Water and Soil*, 30(1), 30–40. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.35583>
- Shalhevet, J. (1994). Using water of marginal quality for crop production: Major issues. *Agricultural Water Management*, 25(3), 233–269. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(94)90063-9)
- Sparks, D. L. (Ed.). (1996). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
- Van Genuchten, M.T., & Hoffman, G.J. (1984). Analysis of crop production. pp. 258–271. In: *Soil Salinity under Irrigation*. Springer-Verlag.
- Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L., Guangyu, J., & Lianhao, L. (2016). Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(2), 63–73. <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1683>
- Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashavnd, A., Esfandiari, M., & Ramezani Etedali, H. (2023). Evaluating the effect of combined water and salinity stresses in estimating the fodder maize biological yield through periodic evaporation and transpiration. *Journal of Water and Soil*, 36(6), 677–693. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77735.1183>
- Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Esfandiari, M., & Ramezani Etedali, H. (2024). The effects of drought and salinity on KS and RAW managerial coefficients in the efficient water management in maize farms. *Applied Water Science*, 14(8), 177. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02229-9>