University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9937.2395

Original article

The effect of zeolite application and drought stress on some quantitative and qualitative traits of tomato

Masoumeh Amani[1], Vahid Pozesh[2*], Hossein Afshari[3]

1. *M.Sc. Graduate of Herbal products, Department of Horticultural Sciences, Agriculture Faculty, Islamic Azad University, Damghan, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Plant Sciences, Biology Faculty, Damghan University, Damghan, Iran*
3. *Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Agriculture Faculty, Islamic Azad University, Damghan, Iran*

Received 6 September 2025; Revised 26 October 2025; Accepted 27 October 2025

Extended abstract

Introduction

In recent years, tomato production and the area under tomato cultivation have increased both globally and in Iran. However, the decline in water resources worldwide, particularly in Iran, and the excessive use of chemical fertilizers highlight the need to identify appropriate solutions, including the selection of a suitable growing medium. In this regard, incorporating zeolite into soil may positively affect plant growth through its ability to absorb and retain water and mineral nutrients. The most important characteristic of zeolite is its cation exchange capacity (100–300 meq·100 g^{-1}). This exchange primarily involves ammonium and potassium ions in the surrounding environment, and the negative charge of the zeolite structure is balanced by cations. Therefore, owing to its cation exchange capacity, zeolite can retain nutrients, particularly ammonium and potassium ions, within its structural channels and gradually release them for plant uptake. Consequently, zeolite application can improve the effectiveness and increase the efficiency of chemical fertilizers. In addition, zeolite can supply plant roots with nutrients such as nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and other mineral elements. To this end, this study investigated the effects of zeolite application on the physiological and morphological characteristics of tomato plants under different irrigation treatmentsd.

Materials and methods

A factorial experiment was conducted using a randomized complete block design (RCBD) with 15 treatment combinations and four replications. This experiment was conducted in the research greenhouse of Damghan Azad University. The treatments consisted of five zeolite application levels: control (no zeolite application; Z1), 25% (Z2), 50% (Z3), 75% (Z4), and 100% (Z5; The entire pot was filled with zeolite), combined with three irrigation levels corresponding to 100% (I1), 75% (I2), and 50% (I3) of the plants' water requirements. At the end of the experiment, root and shoot dry weights, fruit weight, and the contents of nitrogen, potassium, calcium, iron, and proline were determined. The collected data were analyzed using SAS software, and means were compared using Duncan's multiple range test at the 5% significance level.

Results and discussion

The results showed that the simple effects of zeolite application and irrigation treatments were significant for the studied traits. However, the interaction between zeolite application and drought stress had a significant effect on shoot dry weight, fruit weight, and proline content. The present study showed that the morphological and physiological characteristics of tomato plants responded differently to changes in irrigation levels and zeolite application. Considering the ability of zeolite to absorb and retain nutrients and increase soil moisture, the 25% zeolite treatment resulted in the highest shoot dry weight.

* Corresponding author: Vahid Pozesh; E-Mail: poozesh@du.ac.ir

© 2027, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Similarly, the 25% zeolite treatment had the greatest effect on fruit yield under different irrigation treatments. The highest fruit weight and shoot dry weight were obtained under the W1Z2 treatment (100% irrigation and 25% zeolite). The highest levels of the measured elements were observed in the 25% and 50% zeolite treatments. Meanwhile, plants with higher potassium content appeared to be better adapted to drought stress conditions.

Conclusion

The present study showed that the application of 25% zeolite under 100% irrigation increased tomato yield by approximately 30%. In addition, the combination of 25% zeolite application and 75% irrigation (mild drought stress) resulted in a higher yield than the control treatment under non-stress conditions. Therefore, the application of 25% zeolite to the soil may improve plant tolerance to drought stress and contribute to improved irrigation efficiency. This finding is particularly important in areas prone to intermittent drought, where zeolite application may improve plants' ability to cope with water shortages.

Keywords: Dry weight, Mineral elements, Proline, Water requirement

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9937.2395

مقاله پژوهشی

اثر کاربرد زئولیت و تنش خشکی بر برخی صفات کمی و کیفی گوجه‌فرنگی

معصومه امانی[1]، وحید پوزش[2*]، حسین افشاری[3]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد تولیدات گیاهی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی دامغان، دامغان
۲. دانشیار، گروه علوم گیاهی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان
۳. مرتبه علمی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی دامغان، دامغان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پرولین
عناصر معدنی
وزن خشک
نیاز آبی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر مصرف زئولیت طبیعی و تنش خشکی بر عملکرد کمی و کیفی گیاه گوجه‌فرنگی، پژوهشی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در منطقه دامغان انجام شد. در این آزمایش مقادیر مختلف زئولیت در پنج سطح (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) و تیمار آبیاری در سه سطح (شامل: ۱۰۰٪ نیاز آبی (بدون تنش)، ۷۵ ٪ نیاز آبی (تنش ملایم) و ۵۰ ٪ نیاز آبی (تنش شدید)) از مرحله گلدهی تا پایان میوه‌دهی اعمال شد. در این آزمایش صفات وزن خشک ریشه و اندام هوایی، وزن میوه، غلظت عناصر غذایی شامل نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، آهن و همچنین مقدار پرولین مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که اثر ساده زئولیت و تیمارهای مختلف آبی بر روی صفت‌های وزن خشک ریشه و بخش هوایی، وزن خشک میوه، مقدار پرولین و عناصر ازت، پتاسیم، کلسیم، آهن معنی‌دار بود. اما اثر متقابل زئولیت × تنش خشکی بر روی وزن خشک اندام هوایی، وزن میوه و میزان پرولین معنی‌دار بودند. نتایج نشان داد که تیمار ۲۵ درصد زئولیت همراه با تیمار آبی ۱۰۰ درصد بیشترین افزایش وزن میوه گوجه‌فرنگی را به همراه داشت. همچنین اثر متقابل ۲۵ درصد زئولیت و تنش خشکی ۷۵ درصد (تنش ملایم) عملکرد بیشتری را نسبت به تیمار شاهد در شرایط بدون تنش داشت. به نظر می‌رسد کاربرد ۲۵ درصد زئولیت در خاک نه‌تنها موجب بهبود تحمل گیاه گوجه‌فرنگی به شرایط خشکی می‌شود، بلکه با افزایش راندمان آبیاری، بهره‌وری تولید نیز ارتقا می‌یابد.

مقدمه

در سال‌های اخیر همگام با افزایش تولید جهانی گوجه‌فرنگی، میزان تولید و سطح زیر کشت این محصول در ایران نیز افزایش یافت. در این میان تنش خشکی که یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی به شمار می‌آید که می‌تواند رشد و نمو گیاهان را به طور چشمگیری تحت‌تأثیر قرار دهد. تنش خشکی در نتیجه کمبود منابع آبی ایجاد می‌شود و موجب بروز تغییرات مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاهان می‌گردد که هدف این تغییرات حداکثر سازگاری گیاه با شرایط کم‌آبی است. کاهش منابع آبی و پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی، اثرات خشکسالی بر بخش کشاورزی را تشدید می‌کنند (Hoseini and Arzani, 2023). بخش قابل‌توجهی از زیست‌توده از آب تشکیل شده است؛ عنصری که نقشی حیاتی در فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف ایفا می‌کند و برای متابولیسم، رشد و نمو گیاهان ضروری است. ازاین‌رو، فصل خشک می‌تواند بحرانی‌ترین و تنش‌زاترین دوره برای رشد گیاهان باشد، به‌ویژه در مناطقی که مستعد خشکسالی هستند (Diatta et al., 2020). این مسئله در گذشته منجر به بروز قحطی‌های گسترده شده است و همچنان یکی از بزرگ‌ترین تهدیدها برای امنیت غذایی جهانی در آینده به شمار می‌رود (Seleiman et al., 2021)؛ بنابراین، باتوجه‌به کاهش منابع آب در سطح جهان، به‌ویژه در ایران، و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، یافتن راهکارهایی برای بهبود شرایط کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این راهکارها، انتخاب بستر کشت مناسب است که در این

* نگارنده پاسخگو: ، وحید پوزش. پست الکترونیک: poozesh@du.ac.ir

زمینه، ترکیب زئولیت با خاک به دلیل توانایی آن در جذب و نگهداری آب و مواد معدنی، می‌تواند تأثیر مثبتی بر رشد گیاهان داشته باشد. زئولیت‌های طبیعی تجاری موجود عمدتاً از نوع کلینوپتیلولایت[1] هستند که از نظر شیمیایی شامل گروهی از آلومینوسیلیکات‌های هیدراته متبلور با خلل و فرج‌های ریز بوده که حاوی کاتیون‌های قابل تعادلی از گروه فلزات قلیایی و قلیایی خاکی یعنی (Na^+، K^+، Mg^{2+} و Ca^{2+}) هستند. این کاتیون‌ها به طور برگشت‌پذیر آب را جذب و آزاد می‌کنند که در دوران کمبود رطوبت آن را به‌صورت طولانی‌مدت در خود نگه داشته و به‌تدریج در اختیار ریشه گیاهان قرار می‌دهد (Grifasi et al., 2024; Rodríguez-Iznaga et al., 2022).

مهم‌ترین ویژگی زئولیت ظرفیت تبادل کاتیونی آن است (۳۰۰-۱۰۰ میلی اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم زئولیت). این تبادل به طور عمده با آمونیوم و پتاسیم محیط انجام می‌گیرد و بار منفی ساختار با کاتیون‌های محیط خنثی می‌گردد (Guida et al., 2020). علاوه بر ظرفیت تبادل کاتیونی، زئولیت قدرت مکانیکی بالا در برابر سایش و خردشدگی دارد، همچنین به دلیل ساختمان کریستالی سه‌بعدی محکم زئولیت‌ها، مقدار آب زیادی را در خود نگه می‌دارند و باعث کاهش و صرفه‌جویی بسیار زیاد در مصرف آب می‌شود که درعین‌حال به‌اندازه کافی نرم هستند که با خردشدن به‌اندازه دلخواه در بیاید. علاوه بر این که باعث ایجاد سمیت نمی‌شوند و در محیط‌زیست ایجاد آلودگی نمی‌کنند، و از طرف دیگر کانی طبیعی و ارزان قیمتی است که در برابر تغییرات pH ساختار خود را حفظ می‌کند (Mancinelli and Martucci, 2025).

بنابراین، به دلیل ویژگی تبادل کاتیونی، زئولیت می‌تواند عناصر غذایی به‌ویژه آمونیوم و پتاسیم را به‌صورت مخزنی در کانال‌های ساختاری خود نگه داشته و به‌تدریج در اختیار گیاه قرار دهند؛ بنابراین، کاربرد زئولیت در کشاورزی باعث بهبود تأثیر و افزایش کارایی کودهای شیمیایی می‌شود. از طرف دیگر، مصرف زئولیت باعث فراهمی مواد ارزشمندی از قبیل نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سایر عناصر معدنی برای ریشه گیاه می‌شود. همچنین بیان شده است که زئولیت طبیعی به دلیل خاصیت تامپونی خود باعث تنظیم pH خاک و در نتیجه بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود.

همچنین گزارش شد که زئولیت می‌تواند میزان محصولات را در زمین‌های اسیدی افزایش داده و میزان جذب عناصر سنگین و زیان‌آور توسط گیاه، در خاک‌های آلوده را کاهش دهد (Szatanik-Kloc et al., 2021). در پژوهش حاضر باتوجه‌به اهمیت گیاه گوجه‌فرنگی در سبد تغذیه‌ای انسان ازیک‌طرف و کاهش منابع آبی در سطح جهان و به‌ویژه ایران و افزایش بی‌رویه مصرف کودهای شیمیایی از طرف دیگر، ضرورت مطالعه و بررسی تأثیر زئولیت بر کارایی مصرف آب و مواد مغذی گیاه گوجه‌فرنگی احساس گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۴۰۲ در گلخانه پژوهشی دانشگاه آزاد شهرستان دامغان انجام شد. تیمارها عبارت بودند از ۵ سطح زئولیت شامل شاهد (بدون کاربرد زئولیت، گلدان کامل با خاک پر شده بود)، ۲۵ درصد زئولیت، ۵۰ درصد زئولیت، ۷۵ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد زئولیت (کل گلدان با زئولیت پر شده بود) و در ۳ سطح آبیاری شامل ۱۰۰ درصد، ۷۵ درصد و ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه بودند. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار موردمطالعه قرار گرفت. تیمارهای مختلف آبیاری طی مرحله گلدهی تا پایان میوه‌دهی مورد آزمون اعمال شدند. زئولیت مورداستفاده از نوع کلینوپتیلولایت با اندازه ذرات آن ۱/۷-۰/۵ میلی‌متر بود. نیاز آبی گیاه با تعیین میزان تبخیر روزانه و با استفاده از تشتک تبخیر اندازه‌گیری شد. بر اساس ضریب تشتک تبخیر و ضریب گیاهی، حجم آب مصرفی موردنیاز تعیین گردید و سپس با اعمال ضرایب مربوط به سطوح آبی، مقدار آب موردنیاز برای هر گلدان مشخص شد. کود مصرفی بر اساس نتایج آزمایش خاک (جدول ۱) و باتوجه‌به نیاز گیاه در هر مرحله رشدی همراه آب آبیاری و به نسبت مربوطه برای گیاه گوجه‌فرنگی داده شد. بذرهای گوجه‌فرنگی (رقم گرین استار) پس از ضدعفونی، در اوایل مهرماه در خاک سبک استریل شده کاشته شدند. در نیمه‌ی آبان‌ماه، نشاهای گیاه گوجه‌فرنگی به گلدان‌های پلاستیکی مشکی رنگ (با ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر دهانه ۲۷ سانتی‌متر) منتقل شدند. در هر واحد گلدان، سه عدد نشا کشت گردید.

آبیاری گلدان‌ها به طور مرتب و یک روز در میان از زمان انتقال نشا تا پایان آذرماه و پیش از شروع مرحله گلدهی انجام

[1] Clinoptilolite

شد. پس از این مرحله میزان آب موردنیاز بر اساس تنش در نظر گرفته شده به گلدان‌های مربوطه افزوده شد. تغذیه گیاهان با محلول غذایی اپستین (Farzaneh et al., 2010) به طور یکسان انجام گرفت. محلول غذایی اپستین یکی از فرمول‌های استاندارد مورداستفاده در مطالعات فیزیولوژی گیاهی است که با هدف تأمین عناصر ضروری برای رشد گیاهان طراحی شده است. میانگین دمای روزانه و شبانه گلخانه در طول دوره آزمایش به ترتیب ۲ ± ۲۵ و ۲ ± ۱۷ درجه سانتیگراد بود. همچنین میزان رطوبت نسبی گلخانه ۸۵-۷۰ درصد و شدت نور بین ۱۶۰۰۰-۱۴۰۰۰ لوکس متغیر بود.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورداستفاده در این آزمایش

Table 1. Some physicochemical characteristics of the soil used in this experiment

اسیدیته Acidity	شوری EC	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphorus	پتاس Potash	بر Boron	ماسه Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک soil texture
	$dS\ m^{-1}$	%	ppm			%			
7.7	6.1	0.08	7.90	0.587	1.80	35	43	22	لوم رسی clay loam

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، pH، میزان نمک‌های محلول در خاک (EC)، و غلظت عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و بر) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین اسیدیته از دستگاه‌های pH متر استفاده شد. برای اندازه‌گیری شوری خاک، هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه EC متر کالیبره شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد (Richards, 1954). در پایان آزمایش بوته‌ها جهت اندازه‌گیری و سنجش صفت‌های موردنظر برداشت شدند. وزن خشک ریشه و اندام هوایی و وزن میوه با ترازوی دیجیتال سنجیده شدند. برای هضم نمونه‌های گیاهی از روش هضم مرطوب در لوله‌های مخصوص با ترکیب اسیدسولفوریک، اسید سالیسیلیک و آب‌اکسیژنه استفاده شد (Emami, 1996). همچنین غلظت ۴ عنصر نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و آهن سنجیده شد. بدین منظور ازت گیاه به روش کجلدال تعیین گردید (WPCF, 1989). برای اندازه‌گیری عناصر کلسیم و آهن از دستگاه جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrometer) مدل Perkin Elmer-3110 و برای اندازه‌گیری غلظت پتاسیم دستگاه نشر شعله‌ای (Flame Photometer) مدل Corning-410 مورداستفاده قرار گرفت (Gulati and Jaiwal, 1993). به‌منظور استخراج اسیدآمینه آزاد پرولین از بافت‌های برگ (در مرحله زایشی) از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) و با استفاده از معرف ناین هیدرین استفاده شد. داده‌های گردآوری شده توسط نرم‌افزار SAS مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

وزن خشک ریشه و اندام هوایی

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمار آبیاری بر روی وزن خشک ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). آبیاری معمول با میانگین ۶/۲۸ گرم نسبت به تنش شدید (۵۰ درصد) با میانگین ۵/۶۰ گرم برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۴). نشان داده شد که با افزایش سطوح تنش خشکی وزن تر و خشک ریشه گیاه نوروزک (*Salvia leriifolia*) به طور معنی‌داری کاسته می‌شود (Tarahomi et al., 2010). نسرین و همکاران (Nasrin et al., 2020) نشان دادند که با افزایش تنش خشکی وزن خشک و تر ریشه برنج (*Oryza sativa*) کاهش می‌یابد. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت بر وزن خشک ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار وزن خشک ریشه مربوط به تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد زئولیت (به ترتیب با میانگین ۶/۶۵ و ۷/۰۰ گرم) بود (جدول ۳). نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش با گزارش فرهمند و همکاران (Farahmand et al., 2007) و احمدی آذر و همکاران (Ahmadi Azar et al., 2015) مطابقت دارد. در آزمایشی نشان داده شد که عملکرد و راندمان گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum*) در برابر

نسخه پیش از انتشار

تیمارهای مختلف تنش خشکی با کاربرد زئولیت بهبود یافت (Mahmoud et al., 2023).

جدول۲. تجزیه واریانس تاثیر تیمار کود زئولیت و رژیم آبیاری بر صفات مختلف گیاه گوجه‌فرنگی

Table 2. Variance analysis of the effect of zeolite fertilizer treatment and irrigation regime on different traits of tomato plants

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن میوه Fruit weight	نیتروژن N	پتاسیم K	کلسیم Ca	آهن Fe	پرولین Proline
تکرار Repetition	3	1.46^{**}	12.32^{**}	4.26^{ns}	0.007^{ns}	0.325^{ns}	0.077^{ns}	316.42^{ns}	0.096^{ns}
زئولیت Zeolite (Z)	4	8.48^{**}	745.8^{**}	332.7^{**}	0.635^{**}	1.43^{**}	1.51^{**}	7072.20^{**}	1.75^{**}
آبیاری Irrigation (I)	2	2.33^{**}	641.4^{**}	402.4^{**}	0.540^{**}	1.46^{**}	0.658^{**}	26054.9^{**}	6.71^{**}
زئولیت× آبیاری Z × I	8	0.269^{ns}	60.23^{**}	52.7^{**}	0.053^{ns}	0.064^{ns}	0.067^{ns}	137.4^{ns}	0.872^{**}
خطا Error	2	0.283	1.58	1.93	0.031	0.133	0.091	151.2	0.125
ضریب تغییرات CV %		*8.9*	*7*	*22.5*	*7.3*	*12*	*9.8*	*7.6*	*21.5*

ns: بدون اثر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns: no significant effect, * and ** are significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین تیمارهای زئولیت بر صفات مختلف گوجه‌فرنگی

Table 3. The results of comparison of the average of zeolite treatments on different attributes of tomato

تیمار Treatment	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن میوه Fruit weight	نیتروژن N	پتاسیم K	کلسیم Ca	آهن Fe	پرولین Proline
	---------- g ----------			----------%----------			mg kg^{-1}	µmol g^{-1}
Z1	5.78^{b}	19.63^{b}	6.90^{b}	2.36^{b}	2.81^{c}	2.68^{cd}	178.3^{a}	1.77^{a}
Z2	6.65^{a}	28.75^{a}	^{a} 14.6	2.68^{a}	2.95^{b}	3.00^{bc}	186.1^{a}	1.17^{c}
Z3	7.00^{a}	20.26^{b}	5.71^{c}	^{a} 2.61	^{a} 3.55	^{a} 3.62	166.3^{b}	1.35^{c}
Z4	5.22^{c}	^{c} 10.60	2.28^{d}	2.21^{bc}	^{b} 3.22	^{b} 3.14	135.6^{c}	1.81^{b}
Z5	5.14^{c}	9.55^{d}	1.34^{d}	2.17^{c}	2.69^{bc}	2.68^{d}	133.4^{c}	2.12^{a}

Z1: Zeolite1 (شاهد: بدون کاربرد زئولیت)، Z2: Zeolite2 (۲۵ درصد زئولیت)، Z3: Zeolite3 (۵۰ درصد زئولیت)، Z4: Zeolite4 (۷۵ درصد زئولیت)، Z5: Zeolite5 (۱۰۰ درصد زئولیت). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ با آزمون دانکن است.

Z1: Zeolite1 (Control: no zeolite used), Z2: Zeolite2 (25% zeolite), Z3: Zeolite3 (50% zeolite), Z4: Zeolite4 (75% zeolite), Z5: Zeolite5 (100% zeolite).Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level with Duncan's test.

به نظر می‌رسد در تیمارهای حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد زئولیت، به دلیل سبک‌تر شدن بستر کشت و در نتیجه افزایش تبخیر و کاهش نگهداشت آب، گیاه برای جذب آب بیشتر، ریشه‌های بلندتری تولید کرده است، بااین‌حال ریشه‌ها گسترش عرضی نشان ندادند. ولی در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد زئولیت، ریشه‌ها تا حدودی هم از نظر طولی و هم عرضی گسترش‌یافته و به نظر می‌رسد احتمالا بدین دلیل بیشترین میزان وزن خشک را به خود اختصاص می‌دهد.

محمود و همکاران (Mahmoud et al., 2023) در مطالعه‌ای بیان کردند که رشد رویشی گیاهان در بسترهایی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر و قابلیت نگهداری مواد غذایی بیشتر بوده که در نهایت می‌تواند باعث افزایش وزن خشک گیاهان گردد. با افزودن زئولیت به خاک، این سوپر جاذب مانند یک مخزن ذخیره آب عمل کرده و طی دوره خشکی، مدت حفظ رطوبت در خاک را افزایش می‌دهد و ترشدن و پخش‌شدن مجدد آب

در ناحیه ریزوسفر ریشه پس از آبیاری به‌سرعت افزایش می‌یابد (Mahmoud et al., 2023).

نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمار آبیاری بر وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند (جدول ۲)، به‌طوری‌که با افزایش تنش خشکی، وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت (جدول ۴). بیشترین مقدار وزن خشک مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و کمترین مقدار وزن خشک مربوط به تیمار ۵۰ درصد تنش آبی بود. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت بر وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). به طوری که بیشترین مقدار وزن خشک بخش هوایی مربوط به تیمار ۲۵ درصد زئولیت و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰درصد زئولیت بود (جدول۳).

جدول۴. نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مختلف آبیاری بر صفت‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی

Table 4. The results of the comparison of the average of different treatments of irrigation on different traits of tomato plants

تیمار Treatment	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن میوه Fruit weight	نیتروژن N	پتاسیم K	کلسیم Ca	آهن Fe	پرولین Proline
	g			%			mg kg^{-1}	µmol g^{-1}
I1	6.65^{a}	23.3^{a}	10.57^{a}	2.56^{a}	2.78^{c}	2.90^{b}	197.4^{a}	1.14^{c}
I2	6.00^{b}	18.1^{b}	6.36^{b}	2.44^{a}	3.04^{b}	3.02^{b}	157.2^{b}	1.51^{b}
I3	5.60^{b}	11.9^{c}	1.60^{c}	2.23^{b}	3.32^{a}	3.26^{a}	125.3^{c}	2.28^{a}

Irrigation1:I1 (۱۰۰ درصد آبیاری)، Irrigation2:I2 (۷۵ درصد آبیاری)، Irrigation3:I3 (۵۰ درصد آبیاری). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ با آزمون دانکن است.

I1: Irrigation1 (100% irrigation), I2: Irrigation2 (75% irrigation), I3: Irrigation3 (50% irrigation). Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level with Duncan's test.

نتایج نشان داد که اثر متقابل زئولیت و تنش آبی بر مقدار وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱٪ معنی‌دار است (جدول۲)؛ به‌طوری‌که بالاترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در تیمار ۲۵ درصد زئولیت و ۱۰۰ آبیاری و کمترین مقدار در تیمار۱۰۰ درصد زئولیت با تنش خشکی۵۰ درصد (تنش شدید) به دست آمد (جدول ۵). نتایج حاضر با گزارش‌های سمسارزاده و همکاران (Samsarzadeh et al., 2022) مطابقت نشان داد. به نظر می‌رسد با کاربرد تیمار زئولیت در تیمارهای مختلف آبی تغییرات وزن خشک اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد کمتر می‌شود (Mahmoud et al., 2023).

قلی‌زاده و همکاران (Gholizadeh et al., 2007) در آزمایشی بر روی گیاه دارویی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica*) نشان داد که اثر متقابل زئولیت و تنش آبی بر مقدار وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار است و بیان کردند که مقدار وزن تر و خشک در تیمارهای تحت کاربرد زئولیت به حداکثر مقدار خود رسید که می‌تواند به دلیل ذخیره‌شدن آب و عناصر غذایی در کانال‌های زئولیت و همچنین جلوگیری از آبشویی این عناصر باشد (Gholizadeh et al., 2007). نتایج یک مطالعه نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، وزن خشک اندام هوایی گیاه توت روباه (*Sanguisorba minor*) در تیمارهای مختلف حاوی زئولیت کاهش معنی‌داری یافت که بیانگر تأثیر متقابل زئولیت و تنش آبی بر رشد گیاه است (Zamani et al., 2025).

کم‌آبی می‌تواند تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گوناگونی در گیاهان ایجاد نماید و از طریق توقف توسعه یاخته‌ها و کاهش فشار آماس بر روی وزن خشک گیاهان تأثیر بگذارد، لذا سبب کاهش انتقال مواد غذایی از خاک به سمت گیاه می‌شود (Keshavars et al., 2012). مطالعات نشان داده‌اند که کاهش وزن گیاه تحت‌تاثیر تنش خشکی عمدتا ناشی از افت پتانسیل اسمزی یاخته‌ها، کاهش طول یاخته و محدودشدن تقسیم یاخته‌ای در ناحیه ساقه است. بااین‌حال، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که زئولیت، به دلیل ظرفیت بالای نگهداشت آب، قادر است آثار منفی ناشی از تنش خشکی را تعدیل کرده و موجب بهبود رشد گیاه شود (Seleiman et al., 2021). همچنین بررسی‌ها نشان داده است که از ویژگی‌های زئولیت کمک به باز ماندن بیشتر روزنه‌ها و به دنبال آن تثبیت بیشتر دی‌اکسیدکربن بوده که در نهایت می‌تواند مانع کاهش شدید وزن خشک در گیاه گردد (Li et al., 2014). در آزمایشی نشان داده شد که تیمار زئولیت تنش آبی را کاهش می‌دهد و عملکرد دانه و زیست‌توده برنج را بهبود می‌بخشد (Li et al., 2022).

نسخه پیش از انتشار

نیتروژن

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر تیمار آبیاری بر میزان نیتروژن در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که تنها در تیمار آبی ۵۰ درصد آب مورد نیاز گیاه، درصد نیتروژن به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش یافت (جدول ۴). گزارش داده شد که کاهش ارتفاع بوته نخود در شرایط تنش می‌تواند به دلیل کاهش نیتروژن در دسترس باشد (Nezami et al., 2005). اثر ساده زئولیت بر مقدار نیتروژن گیاه گوجه‌فرنگی در سطح ۱٪ معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار نیتروژن به ترتیب با میانگین‌های ۲/۶۸ و ۲/۶۱ درصد مربوط به تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد زئولیت بود. همچنین کمترین میزان نیتروژن در تیمار ۱۰۰ درصد زئولیت با میانگین ۲/۱۷ درصد دیده شد (جدول۳). به نظر می‌رسد که در تیمار ۱۰۰ درصد زئولیت باتوجه‌به ازدست‌دادن آب بیشتر باعث آبشویی نیتروژن از بستر کشت می‌شود (Zheng et al., 2019).

جدول۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل زئولیت × آبیاری بر صفات موردمطالعه در گیاه گوجه‌فرنگی

Table 5. Comparing the average interaction effects of zeolite × irrigation on the properties studied in tomato plants

تیمار آبیاری Irrigation treatment	تیمار زئولیت Zeolite treatment	پرولین Proline	وزن میوه Fruit weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight
		µmol g^{-1}	----------g----------	
I1	Z1	0.43^{d}	16.22^{b}	25.50^{b}
	Z2	0.82^{c}	20.95^{a}	35.20^{a}
	Z3	0.93^{c}	9.85^{c}	30.42^{c}
	Z4	1.31^{b}	4.33^{d}	14.25^{d}
	Z5	2.22^{a}	1.50^{e}	11.02^{e}
I2	Z1	1.98^{a}	4.50^{b}	19.75^{b}
	Z2	1.13^{c}	17.15^{a}	30.02^{a}
	Z3	1.15^{c}	5.10^{b}	22.05^{b}
	Z4	1.66^{b}	2.52^{c}	9.25^{c}
	Z5	1.67^{b}	2.52^{c}	9.26^{c}
I3	Z1	2.92^{a}	0.00^{c}	8.75^{c}
	Z2	1.50^{c}	5.82^{a}	21.02^{a}
	Z3	1.98^{d}	2.20^{b}	13.25^{b}
	Z4	2.47^{b}	0.00^{c}	8.45^{c}
	Z5	2.48^{b}	0.00^{c}	8.40^{c}

Z1: Zeolite1 (شاهد: بدون کاربرد زئولیت)، Z2: Zeolite2 (۲۵ درصد زئولیت)، Z3: Zeolite3 (۵۰ درصد زئولیت)، Z4: Zeolite4 (۷۵ درصد زئولیت)، Z5: Zeolite5 (۱۰۰ درصد زئولیت). I1: Irrigation1 (۱۰۰ درصد آبیاری)، I2: Irrigation2(۷۵ درصد آبیاری)، I3: Irrigation3 (۵۰ درصد آبیاری). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ با آزمون دانکن است.

Z1: Zeolite1 (Control: no zeolite used), Z2: Zeolite2 (25% zeolite), Z3: Zeolite3 (50% zeolite), Z4: Zeolite4 (75% zeolite), Z5: Zeolite5 (100% zeolite). I1: Irrigation1 (100% irrigation), I2: Irrigation2 (75% irrigation), I3: Irrigation3 (50% irrigation). Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level with Duncan's test.

گزارش شده است که در نتیجه مصرف زئولیت ظرفیت نگهداری آب و آمونیوم بالا می‌رود و افزون بر فراهمی عناصری مانند نیتروژن و پتاسیم در نگهداری و در اختیار گذاشتن کاتیون‌های دیگر مؤثر است (Yılmaz et al., 2014). نیتروژن از عناصر غذایی کلیدی برای گیاهان به شمار می‌رود که کمبود آن پس از کربن، هیدروژن و اکسیژن، می‌تواند فرایندهایی چون فتوسنتز، تنظیم فیتوهورمون‌ها، تغییرات پروتئومی و رشد و نمو گیاه را با محدودیت مواجه سازد. نیتروژن با پیوند ارگانیک برای ساخت تمام اسیدهای آمینه، آمین‌ها، اوریدها، پپتیدها و پروتئین‌ها در گیاهان استفاده می‌شود (Wang et al., 2024). سطح نیتروژن عامل مهمی است که بر عملکرد و کیفیت گیاهان تأثیر می‌گذارد. بیشتر واکنش‌های گیاه به کمبود نیتروژن بر روی فرایند فتوسنتزی متمرکز است. نیتروژن در ساخت اسیدهای آمینه و کلروفیل نقش دارد که می‌تواند با تاثیر بر فتوسنتز و جذب مواد معدنی بر رشد و نمو گیاهان اثرگذار باشد (Xu et al., 2012). در

نسخه پیش از انتشار

مطالعه‌ای نشان داده شد که کمبود نیتروژن منجر به تجزیه پروتئین‌های کلروپلاست گندم، پراکسی‌زوم‌ها و سیتوزول می‌شود (Sakuraba, 2022). در مطالعه دیگر، بیان شد که تنش خشکی رشد گیاه را از طریق کاهش جذب، انتقال و توزیع نیتروژن می‌تواند تحت‌تأثیر قرار دهد (Rouphael et al., 2012).

پتاسیم

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمار آبیاری بر میزان پتاسیم در سطح ۱٪ معنی‌دار است (جدول ۲). تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی با میانگین ۲/۲۸ درصد، کمترین و تیمار آبی ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه با میانگین ۳/۲۱ درصد بیشترین میزان پتاسیم را نشان داد (جدول ۴). همچنین نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت هم بر میزان پتاسیم در سطح ۱٪ معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین مقدار پتاسیم مربوط به تیمار ۵۰ درصد زئولیت با میانگین ۳/۵۵ درصد بود (جدول ۳). پتاسیم (K) یکی از عناصر مهم در متابولیسم گیاه و از فراوان‌ترین کاتیون‌های معدنی است و برای تضمین رشد بهینه گیاه مهم است. پتاسیم فعال‌کننده ده‌ها آنزیم مهم مانند سنتز پروتئین، انتقال قند، متابولیسم N و C و فتوسنتز است. همچنین نقش مهمی در شکل‌گیری عملکرد و بهبود کیفیت دارد (Rawat et al., 2022). پتاسیم همچنین برای رشد یاخته‌ای بسیار مهم است که فرایند مهمی برای عملکرد و نمو گیاهان است. این عنصر چندین آنزیم مؤثر در سوخت‌وساز کربوهیدرات‌ها را فعال می‌نماید و بنابراین کاهش پتاسیم بر روی فعالیت‌های فتوسنتزی می‌تواند تأثیرگذار باشد (Wang et al., 2015).

عنصر پتاسیم در سازوکار کنترل روزنه‌ای گیاهان نقش داشته و لذا تأثیر مهمی در تنظیم فعالیت‌های اسمزی گیاهان تحت شرایط تنش خشکی دارد (Hasanuzzaman et al., 2018). به نظر می‌رسد گیاهانی با مقدار پتاسیم بالاتر، دارای سازگاری بهتری در شرایط تنش خشکی هستند. می‌توان بیان نمود که ژنوتیپ‌های گیاهی مقاوم به خشکی در زمان بروز تنش مقدار درصد پتاسیم اندام‌های هوایی آنها افزایش می‌یابد. در آزمایشی نشان داده شد که با افزایش سطوح تنش خشکی به طور معنی‌داری مقدار پتاسیم در بخش هوایی گیاه نوروزک افزایش می‌یابد که این امر به دلیل نقش این عنصر در تنظیم اسمزی است (Tarahomi et al., 2010).

به‌طورکلی با کاهش آب گیاه فعالیت‌های فتوسنتزی کاهش یافته و نهایتا از میزان محصول به نحو چشمگیری کاسته خواهد شد. بااین‌وجود مقادیر مناسب پتاسیم می‌تواند از این امر ناخواسته جلوگیری نماید؛ زیرا پتاسیم کافی در گیاه سبب ایجاد تعادل در پتانسیل آب گیاه شده و مقدار ساخت ترکیبات آلی افزایش می‌یابد (Hasanuzzaman et al., 2018)؛ بنابراین، این امر سبب می‌گردد تا وزن تر و خشک گیاهانی با پتاسیم کافی نسبت به گیاهانی که دچار کمبود پتاسیم هستند، حتی در شرایط تنش آبی نیز افزون‌تر باشد. همچنین زئولیت از جذب بیش از حد پتاسیم توسط برنج و تخلیه پتاسیم خاک تحت شرایط آبیاری متناوب جلوگیری کرد (Li et al., 2022). در مطالعه‌ای نشان داده شد که زئولیت کلینوپتیلولایت روی خصوصیات خاک مؤثر است به‌طوری‌که باعث افزایش سطح pH و قابلیت تبادل پتاسیم می‌شود (Palanivell et al., 2021).

کلسیم

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد اثر ساده تیمار آبیاری بر میزان کلسیم در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که تیمار آبی ۱۰۰٪ نیاز آبی با میانگین ۲/۹۰ درصد، کمترین و تیمار آبی ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه با میانگین ۳/۲۶ درصد، بیشترین میزان کلسیم را داشت. تنها در تیمار آبی ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه اختلاف معنی‌دار با شاهد ایجاد شد (جدول ۴). کلسیم یک عنصر ضروری است، بااین‌حال، هنوز نقش آن به‌درستی شناخته نشده است. باوجود غلظت بالای کلسیم در گیاهان (mM)، اما نیاز آنها در سطح یک ریزمغذی (µM) است. کمبود کلسیم می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در گیاهان گردد از جمله: رشد ضعیف ریشه، نکروز و پیچ‌خوردگی برگ‌ها، ترک‌خوردن پوست میوه (Jing et al., 2024). بررسی‌های اخیر نشان داده است که یون کلسیم در کنترل بازده مصرف آب از طریق بستن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی نقش داشته است و می‌تواند انتقال مواد فتوسنتزی به نقاط مختلف گیاه و انباشت آن را تنظیم نماید. امروزه هیچ‌کس این ادعا را که کلسیم تنظیم‌کننده حیاتی رشد و نمو در گیاهان است را زیر سؤال نمی‌برد. این یون در فرایندهای بسیاری شرکت می‌کند و تقریباً تمام جنبه‌های رشد گیاه را در بر می‌گیرد (Wdowiak et al., 2024). مطالعه‌های زیادی بر روی غلظت عناصری مانند کلسیم نشان داده است که با افزایش شدت تنش خشکی

نسخه پیش از انتشار

میزان غلظت این عنصرها می‌تواند افزایش یابد (Bai et al., 2022).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت هم بر مقدار کلسیم در سطح ۱٪ معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین مقدار کلسیم مربوط به تیمار ۵۰ درصد زئولیت با میانگین ۳/۶۲ درصد به دست آمد (جدول ۳). زئولیت‌های طبیعی باتوجه‌به قابلیت تبادل کاتیونی بالا باعث افزایش جذب عناصر ماکرو مثل کلسیم می‌شوند (Pérez-Botella et al., 2022). زئولیت‌ها تکتوسیلیکات‌های ثانویه‌ای هستند که در طی دگرسانی هیدروترمال بازالت تولید می‌شوند. مواد معدنی به‌عنوان مخزن اصلی کلسیم عمل می‌کنند که به‌راحتی با کلسیم آب‌های زیرزمینی اطراف مبادله می‌شود (Nelson et al., 2021).

آهن

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمار آبیاری بر میزان آهن گیاه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). آبیاری معمول با میانگین ۱۹۷/۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تنش شدید (۵۰ درصد) با میانگین ۱۲۵/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). سازوکارهای غلظت و انتقال عناصر غذایی در گیاهان، مانند جریان توده‌ای، انتشار و یا غلظت و انتقال به‌وسیله پدیده اسمز همگی تابعی از مقدار رطوبت موجود در خاک و ریشه است و در صورت کاهش رطوبت، شدت و مقدار غلظت عناصر غذایی می‌تواند دستخوش تغییروتحول بشود. گزارش‌های مختلف نشان می‌دهد که سطوح مختلف آبیاری می‌تواند بر غلظت عناصری همچون آهن و منگنز تأثیرهای مختلفی داشته باشد، بااین‌حال تنش خشکی عمدتا سبب کاهش غلظت آهن در بافت‌های گیاهی می‌شود و بالاترین مقدار عنصر آهن در تیمارهای بالای آبی (تا ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه گزارش شده است) به دست آمده است (Sheykhi Sanandaji et al., 2024).

نتایج نشان داد که اثر ساده زئولیت بر مقدار آهن در سطح ۱٪ معنی‌دار بود که بیشترین میزان آهن مربوط به تیمار ۲۵ و صفر درصد زئولیت به ترتیب با میانگین ۱۸۶/۱ و۱۷۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در این میان کمترین میزان آهن مربوط به دو تیمار ۷۵ و ۱۰۰ درصد زئولیت (به ترتیب با میانگین ۱۳۵/۶ و۱۳۳/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به دست آمد (جدول ۳). در آزمایشی که بر روی گیاه گل جعفری (*Tagetes erecta*) انجام دادند بیان شد که استفاده از کود طبیعی زئولیت در بستر کشت می‌تواند باعث افزایش میزان فتوسنتز، بهبود کارایی استفاده از آب و فزونی میزان غلظت و تراکم کلروفیل بشود (Nazari et al., 2007). در آزمایش حاضر هم باتوجه‌به نقش موثر و مناسب کود زئولیت در افزایش جذب عناصر میکرو و ماکرو، مقدار جذب آهن در گیاه موردمطالعه در حضور تیمار حداقلی زئولیت نسبت به شاهد بیشتر بود. زئولیت‌ها می‌توانند کاتیون‌های مختلف از جمله آهن، مس و کروم را جذب یا مبادله کنند. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد که پنج نوع زئولیت طبیعی و کانی بنتونیت توانایی جذب و آزادسازی عناصر روی و آهن دارند، به نظر می‌رسد زئولیت‌های طبیعی تمایل بیشتری به نگه‌داری این ریزمغذی‌ها دارند (Mondal et al., 2021).

آهن یک عنصر مغذی معدنی ضروری برای رشد و نمو گیاهان و یک عنصر لازم برای همه جانداران است، زیرا در طیف گسترده‌ای از فرایندهای متابولیک شرکت می‌کند. اگرچه آهن یک عنصر نسبتا فراوان در خاک است، محتوای آهن محلول به میزان قابل‌توجهی ضعیف است و بنابراین حلالیت ضعیف کارایی آن را دچار اختلال می‌کند (Colombo et al., 2014). در واقع، یک‌سوم از مناطق زیر کشت در جهان از خاک‌های آهکی تشکیل شده است که علت اصلی کمبود آهن است و کمبود آهن در حدود ۴۰ درصد از خاک‌ها رخ می‌دهد (Bhat et al., 2024). کمبود آهن باعث ایجاد اختلالات متابولیکی مختلف و در نتیجه ناهنجاری‌های مورفولوژی و ساختار کلروپلاست، کاهش محتوای کلروفیل و سرعت فتوسنتز و کاهش توانایی تنفسی گیاهان می‌شود که به‌شدت عملکرد و کیفیت گیاه را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، کمبود آهن یک مشکل رایج است که بر عملکرد محصولات زراعی تاثیر می‌گذارد (Colombo et al., 2014).

پرولین

نتایج حاصل از آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمار آبیاری بر میزان پرولین گیاه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش خشکی شدید (۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه) با میانگین ۲/۲۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ نسبت به آبیاری معمولی (۱۰۰ درصد آب موردنیاز گیاه) با میانگین ۱/۱۴ میکرومول بر گرم وزن تر برگ، برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۴). پرولین یکی از مهم‌ترین اسیدآمینه‌هایی است که تحت‌تاثیر تنش خشکی در گیاهان انباشته می‌شوند. در

نسخه پیش از انتشار

شرایط تنش، بسیاری از گونه‌های گیاهی پرولین را به‌عنوان یک واکنش سازگاری به شرایط نامطلوب انباشته می‌کنند. به‌طورکلی اعتقاد بر این است که افزایش محتوای پرولین به دنبال آسیب‌های ناشی از تنش برای یاخته‌های گیاهی مفید است (Renzetti et al., 2025). بااین‌حال، از اوایل دهه ۸۰ میلادی، گروه‌های پژوهشی مختلف مقدار قابل‌توجهی پرولین را در اندام‌های تولیدمثلی گونه‌های مختلف گیاهی یافتند که این احتمال را افزایش می‌دهد که انباشتگی این اسیدآمینه در شرایط فیزیولوژیکی بدون تنش برای اهداف رشدی نیز رخ دهد. می‌توان گفت که احتمالا مهم‌ترین نقش پرولین محافظت از آنزیم‌ها در برابر دهیدراسیون است (Hossain et al., 2014). پرولین به‌عنوان یک ماده محلول سبب تنظیم فشار اسمزی و کاهش ازدست‌دادن آب از یاخته و نگهداری آماس می‌شود؛ بنابراین پرولین در همه اندام‌های گیاه در طی تنش خشکی انباشته و سریع‌ترین انباشت را در برگ‌ها دارد (Wang et al., 2022). در بررسی‌های انجام شده بر روی فلفل (*Capsicum annuum*) نشا داده شد که میزان پرولین در شرایط تنش در برگ‌ها و به‌خصوص در میوه‌ها افزایش یافته است (Fiasconaro et al., 2019). در مطالعه‌ای اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی میزان پرولین گیاه انار (*Punica granatum*) رقم رباب مورد بررسی قرار گرفت. پژوهشگران با اعمال تیمارهای مختلف آبیاری مشاهده کردند که با کاهش میزان آب، محتوای پرولین در برگ‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت (Bonyanpour and Shahrokhnia, 2024).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت هم بر مقدار پرولین گیاه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان پرولین با میانگین ۲/۱۲ میکرومول بر گرم وزن تر برگ مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد زئولیت و کمترین میزان پرولین در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد زئولیت (به ترتیب با میانگین ۱/۱۷ و ۱/۳۵ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) به دست آمد (جدول ۳). نتایج آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر متقابل زئولیت و تنش خشکی بر میزان پرولین در سطح ۱٪ معنی‌دار است (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان می‌دهد که در تیمار شاهد در آبیاری معمول با میانگین ۰/۴۳ میکرومول بر گرم وزن تر برگ کمترین میزان پرولین به دست آمد (جدول ۵)، درحالی‌که در تنش ملایم و شدید خشکی (به ترتیب ۷۵ و ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه) بیشترین میزان پرولین مربوط به تیمار بدون زئولیت بود و در تیمار ۲۵ درصد زئولیت به علت ذخیره‌سازی رطوبت در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه در مقایسه با آبیاری معمول (۱۰۰ درصد آب موردنیاز گیاه) میزان پرولین تغییر معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

افزودن زئولیت به خاک، یکی از راهکارهای امکان‌پذیر برای کاهش میزان پرولین و کاستن اثرات کمبود آب بر تولید گیاهان زراعی است (Shahsavari et al., 2014). در مطالعه‌ای بر روی گیاه تاج‌خروس (*Amaranthus hypochondriacus*) هم نشان داده شد که تیمار زئولیت توانست با افزایش محتوای کلروفیل، کاروتنوییدها، پروتئین، و همچنین مدیریت فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی و با کاهش پرولین پیامدهای نامطلوب تنش کمبود آب را تعدیل کرده و زیست‌توده تاج‌خروس را بهبود ببخشد (Karami et al., 2020).

وزن میوه

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثر ساده آبیاری بر وزن میوه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). وزن میوه در آبیاری معمول با میانگین ۱۰/۵۷ گرم نسبت به تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری) با میانگین ۱/۶۰ گرم برتری چشمگیری نشان داد (جدول ۴). کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی به عدم دسترسی گیاهان به آب آبیاری نسبت داده می‌شود که در نتیجه‌ی آن افزایش رقابت بین گیاهان برای آب و کاهش در تعداد گل و میوه در گیاه اتفاق می‌افتد که همبستگی مثبتی با عملکرد دارند (Dietz et al., 2021). نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده زئولیت بر وزن میوه‌ها در سطح ۱٪ معنی‌دار است (جدول ۲). بیشترین میزان وزن میوه در تیمار ۲۵ درصد (با میانگین ۱۴/۶۰ گرم) به دست آمد، درحالی‌که کمترین میزان وزن میوه مربوط به تیمارهای ۷۵ و ۱۰۰ درصد زئولیت (به. ترتیب با میانگین ۲/۲۸ و ۱/۳۴ گرم) بود (جدول ۳). همچنین نتایج نشان داد که اثر متقابل زئولیت و آبیاری بر صفت وزن میوه معنی‌دار است (جدول ۲). مقایسه میانگین صفات نشان می‌دهد که وزن میوه بین تیمارهای آبی در مواردی که زئولیت مصرف شده بود اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵).

همچنین اثرات متقابل زئولیت و تنش خشکی بر روی عملکرد (وزن میوه) نشان می‌دهد که با کاربرد ۲۵ درصد زئولیت در خاک مقاومت به خشکی در گیاه زیاد می‌شود، به‌طوری‌که تیمار ۲۵ درصد زئولیت در مواجه با سطح دوم

نسخه پیش از انتشار

تنش (۷۵ درصد آب موردنیاز گیاه) عملکردی تقریبا مشابه در مقایسه با تیمار شاهد در شرایط آبیاری معمول داشت. افزایش وزن میوه در گیاه را می‌توان به اثر زئولیت روی افزایش میزان کلروفیل نسبت داد، زیرا با درنظرگرفتن تاثیر بسیار مهم کلروفیل در فرایند فتوسنتز و نهایتا عملکرد گیاه، می‌توان انتظار داشت که در اثر وجود زئولیت وزن میوه افزایش یابد (Mosa et al., 2025). همچنین می‌توان افزایش وزن را به افزایش جذب و کاهش مقدار آبشویی عناصر در اثر وجود زئولیت نسبت داد. در آزمایشی بر روی گیاه گوجه‌فرنگی، عملکرد و تولید محصول تحت‌تاثیر محلول‌پاشی برگ با زئولیت تا ۳۵ درصد بهبود داده شد (Conversa et al., 2024). گزارش شده است که اصلاح خاک با کودهای زئولیت باعث افزایش عملکرد محصول برای جو (*Hordeum vulgare*)، ذرت (*Zea mays*)، برنج (*Oryza sativa*)، سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*)، گندم (*Triticum aestivum*)، توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa*) و آفتاب‌گردان (*Helianthus annuus*) شد (Choo et al., 2020). برای ارزیابی رشد گیاه، وزن گیاه یک شاخص مهم و رایج است. وزن میوه تحت‌تاثیر فاکتورهای درونی و بیرونی مانند ژنوتیپ، و عوامل محیطی است. همچنین، می‌توان بیان نمود که نوع تیمار کودی می‌تواند بر کیفیت میوه‌ها و تنوع آنها تأثیر بگذارد

نتیجه‌گیری نهایی

مطالعه حاضر نشان داد که ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه گوجه‌فرنگی به تغییرات آبیاری و کود زئولیت واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهد. باتوجه‌به توانایی کود زئولیت در جذب و نگه‌داری عناصر غذایی و افزایش رطوبت خاک، تیمار ۲۵ درصد زئولیت توانست بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی را به خود اختصاص دهد. همچنین تیمار ۲۵ درصد زئولیت در تیمارهای مختلف آبی بیشترین تأثیر را بر عملکرد میوه نشان داد. بالاترین مقدار وزن میوه و وزن خشک اندام هوایی با کاربرد آبیاری نرمال و زئولیت ۲۵ درصد به دست آمد. در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد زئولیت عناصر مورد سنجش در بیشترین مقدار خود بودند. در این میان به نظر می‌رسد گیاهانی با مقدار پتاسیم بالاتر، دارای سازگاری بهتری در شرایط تنش خشکی هستند. به‌هرحال مطالعه حاضر نشان داد تیمار ۲۵ درصد زئولیت همراه با تیمار آبی ۱۰۰ درصد عملکرد گوجه‌فرنگی را تا حدود ۳۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین اثر متقابل ۲۵ درصد زئولیت و تنش خشکی ۷۵ درصد (تنش ملایم) عملکرد بیشتری را نسبت به تیمار شاهد در شرایط بدون تنش داشت؛ بنابراین کاربرد ۲۵ درصد زئولیت در خاک می‌تواند تحمل به خشکی گیاه را افزایش داده که در نهایت راندمان آبیاری افزایش می‌یابد. این موضوع به‌ویژه در مناطقی که در معرض خشکسالی‌های متناوب هستند دارای اهمیت است که می‌تواند توان گیاه را در مقابله با کمبود آب افزایش دهد.

سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد دامغان، به‌خاطر حمایت مالی از این پژوهش، قدردانی می‌شود.

منابع

Ahmadi Azar, F., Hassanlou, T., Imani, A. Faizi Asl, V., 2015. Drought stress and application of mineral zeolite on the growth and some physiological parameters of *Malva sylvestris*. Plant Research Journal (Iranian Biology Journal). 28, 459-474. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1394.28.3.1.0

Bai, R., Bai, C., Han, X., Liu, Y., Yong, J.W.H., 2022. The significance of calcium-sensing receptor in sustaining photosynthesis and ameliorating stress responses in plants. Frontiers in Plant Science. 13, 1019505. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019505

Bates, L.S., Waldern, R.P., Teare, E.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207. http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060

Bhat, M.A., Mishra, A.K., Shah, S.N., Bhat, M.A., Jan, S., Rahman, S., Baek, K.H., Jan, A.T., 2024. Soil and mineral nutrients in plant health: A prospective study of iron and phosphorus in the growth and development of plants. Current Issues in Molecular Biology.

نسخه پیش از انتشار

46, 5194-5222. https://doi.org/10.3390/cimb46060312

Bonyanpour, A., Shahrokhnia, M.A., 2024. Effect of different irrigation regimes on leaf proline content, antioxidant enzymes activity and fruit quantitative and qualitative characteristics of ‚Rabbab' pomegranate. Iranian Journal of Horticultural Science. 55, 349-363. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/ijhs.2024.367820.2131

Choo, L.N.L.K., Ahmed, O.H., Talib, S.A.A., Ghani, M.Z.A. Sekot, S., 2020. Clinoptilolite zeolite on tropical peat soils nutrient, growth, fruit quality, and yield of *Carica papaya* L. cv. Sekaki. Agronomy. 10, 1320. https://doi.org/10.3390/agronomy10091320

Colombo, C., Palumbo, G., He, J.Z., Pinton, R., Cesco, S., 2014. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. Journal of Soils and Sediments. 14, 538–548. https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z

Conversa, G., Pacifico, S., La Rotonda, P., Lazzizera, C., Bonasia, A., Elia, A., 2024. Foliar application of natural zeolites affects the growth and productivity of processing tomato. European Journal of Agronomy, 154, 127100. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127100

Diatta, A.A., Fike, J.H., Battaglia, M.L., Galbraith, J.M., Baig, M.B., 2020. Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: A review. Arabian Journal of Geosciences. 13, 595. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2

Dietz, K.J., Zörb, C., Geilfus, C.M., 2021. Drought and crop yield. Plant Biology. 23(6), 881-893. https://doi.org/10.1111/plb.13304

Emami, A., 1996. leaf analysis methods (first volume). Journal of Soil and Water Research Institute. 2, 65-74. [In Persian].

Farahmand, H., Nazari, F., Khoshkhovi, M., 2007. The use of different amounts of natural zeolite and ethylene on the production of Shiraz Narcissus flowers. Proceedings of the 5th Congress of Horticultural Sciences of Iran, Shiraz University, Shiraz, Iran. [In Persian].

Farzaneh, N., Golchin, A. Hashemi Majd, K., 2010. The effect of nitrogen and boron on the growth, yield and concentration of some nutrient elements of tomato. Science and Technology of Greenhouse Culture. 2, 19-28. [In Persian]. https://doi.org/20.1001.1.20089082.1389.1.2.1.7

Fiasconaro, M.L., Lovato, M.E., Antolín, M.C., Clementi, L.A., Torres, N., Gervasio, S. Martín, C.A., 2019. Role of proline accumulation on fruit quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown with a K-rich compost under drought conditions. Scientia Horticulturae. 249, 280-288. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.002

Gholizadeh, A., Esfaghani, M., Azizi, M., 2007. The study on the effect of different levels of zeolit and water stress on charactristics and quality of moldavian balm. Natural Resources. 19(3), 96-102. [In Persian].

Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., Piumetti, M., 2024. Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. Environmental Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5

Guida, S., Potter, C., Jefferson, B., Soares, A., 2020. Preparation and evaluation of zeolites for ammonium removal from municipal wastewater through ion exchange process. cientific Reports. 10, 12426. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69348-6

Gulati, A., Jaiwal, P.K., 1993. Comarative salt responses of callus cultures of *Vigna radiate* L. wilczek to various osmotic and ionic stresses. Journal of Plant Physiology. 141, 120-124. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80862-X

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., Moumita, Fujita, M., 2018. Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. Agronomy. 8, 31. https://doi.org/10.3390/agronomy8030031

Hoseini, M., Arzani, A., 2023. Epigenetic adaptation to drought and salinity in crop plants. Journal of Plant Molecular Breeding. 11, 1–16. https://www.jpmb-gabit.ir/article_710573.html

Hossain, M.A., Hoque, M.A., Burrit, D.J., Fujita, M., 2014. Proline pro-tects plants against abiotic oxidative stress: Biochemical and molecular mechanisms. In: Ahmad, P. (ed.), Oxidative damage to plants: Antioxidant Networks and Signaling. Academic Press, San Diego, USA, pp. 477-522.

https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00016-2

Jing, T., Li J, He, Y., Shankar, A., Saxena, A., Tiwari, A., Maturi, K.C., Solanki, M.K., Singh, V., Eissa, M.A., Ding, Z., Xie, J., Awasthi, M.K., 2024. Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions - A comprehensive review. Plant Physiology and Biochemistry. 210, 108602. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108602

Karami, S., Hadi, H., Tajbaksh, M. Modarres-Sanavy, A.M., 2020. Effect of zeolite on nitrogen use efficiency and physiological and biomass Traits of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) under water-deficit stress conditions. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 20, 1427–1441. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00223-z

Keshavars, L., Farahbakhsh, H. Golkar, P., 2012. The effects of drought stress and super absorbent polymer on morphphysiological traits of pear millet (*Pennisetum glaucum*). International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 3(1), 148-154.

Li, Y., Xia, G., Wu, Q., Chen, W., Lin, W., Zhang, Z., Chen, Y., Chen, T., Siddique, K.H.M. Chi, D., 2022. Zeolite increases grain yield and potassium balance in paddy fields. Geoderma. 405, 115397. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115397

Li, X., He, J.Z., Hughes, J.M., Liu, Y.R., Zheng, Y.M., 2014. Effects of super-absorbent polymers on a soil–wheat (*Triticum aestivum* L.) system in the field. Applied Soil Ecology. 73, 58-63. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.005

Mancinelli, M., Martucci, A., 2025. Exploring the potential of zeolites for sustainable environmental applications. Sustainable Chemistry. 6, 9. https://doi.org/10.3390/suschem6010009

Mahmoud, A.W.M., Rashad, H.M., Esmail, S.E.A., Alsamadany, H., Abdeldaym, E.A., 2023. Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles—A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. Plants. 12, 2838. https://doi.org/10.3390/plants12152838

Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., Bandyopadhyay, P.K., Maitra, S., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Hossain, A., 2021. Zeolites enhance soil health, crop productivity and environmental safety. Agronomy. 11, 448. https://doi.org/10.3390/agronomy11030448

Mosa, W. F. A., Almutairi, K. F., Górnik, K., Sas-Paszt, L., 2025. Influence of zeolite, kaolin, and chitosan on the growth and productivity of strawberry. BioResources. 20(1), 1771–1793. https://doi.org/10.15376/biores.20.1.1771-1793

Nasrin, S., Saha, S., Begum, H.H., Samad, R., 2020. Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice: (*Oryza sativa* L. var. BRRI dhan-24). Dhaka University Journal of Biological Sciences, 29, 117-123. https://doi.org/10.3329/dujbs.v29i1.46537

Nazari, F., Khoshkhovi, M., Eshghi. S., 2007. The effects of natural zeolite on the physiological characteristics of parsley. Proceedings of the 5th Congress of Horticultural Sciences of Iran, Shiraz University, Shiraz, Iran. [In Persian].

Nelson, C.J., Jacobson, A.D., Kitch, G.D. Weisenberger, T.B., 2021. Large calcium isotope fractionations by zeolite minerals from Iceland. Communications Earth & Environment. 2, 206. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00274-9

Nezami, A., Hoseyni, S. H., Masoumi, A., Kafi, M., 2005. Effects of drought stress on morphological traits in chickpea (*Cicer arientinum* L.) genotypes in greenhouse. Iranian Journal of Field Crops Research, 3(2), 277–290. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/gsc.v3i2.1311

Palanivell, P., Ahmed, O.H., Omar, L., Majid, N.M.A. 2021. Nitrogen, phosphorus, and potassium adsorption and desorption improvement and soil buffering capacity using clinoptilolite zeolite. Agronomy. 11, 379. https://doi.org/10.3390/agronomy11020379

Pérez-Botella, E., Valencia, S., Rey, F., 2022. Zeolites in adsorption processes: State of the art and future prospects. Chemical Reviews. 122, 17647–17695. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140

Rawat, J., Pandey, N., Saxena, J., 2022. Role of potassium in plant photosynthesis, transport, growth and yield. In: Iqbal, N., Umar, S. (Eds.), Role of Potassium in Abiotic Stress. Springer,

Singapore, pp. 1-14. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4461-0_1

Renzetti, M., Funck, D., Trovato, M., 2025. Proline and ROS: A unified mechanism in plant development and stress response?. Plants. 14, 2. https://doi.org/10.3390/plants14010002

Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agriculture Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, pp. 7-53. https://doi.org/10.1097/00010694-195408000-00012

Rodríguez-Iznaga, I., Shelyapina, M.G., Petranovskii, V., 2022. Ion exchange in natural clinoptilolite: Aspects related to its structure and applications. Minerals. 12, 1628. https://doi.org/10.3390/min12121628

Rouphael, Y., Cardarelli, M., Schwarz, D., Franken, P., Colla, G., 2012. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: Aroca, R. (eds) Plant Responses to Drought Stress. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 171–195. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_7S

Sakuraba, Y., 2022. Molecular basis of nitrogen starvation-induced leaf senescence. Frontiers in Plant Science 13, 1013304. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1013304

Samsarzadeh, M., Seifzadeh, S., Darvishi Zeidabadi, D., Zakrin, H.R., Hadidi Masuleh, A., Yousefi, M., 2022. The effect of zeolite on some physiological traits and performance of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under water stress conditions. Proceedings of the 3rd Conference on the Position of Strategic Products in Food Security and Sustainable Agriculture, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Iran. [In Persian].

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., Battaglia M.L., 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants (Basel). 10, 259. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Shahsavari, N., Jais, H.M. and Shirani Rad, A.H., 2014. Effect of zeolite and zinc on the biochemical characteristics of canola upon drought stress. Sains Malaysiana. 43, 1549–1555.

Sheykhi Sanandaji, D., Heidari, Gh.R., Fathi, P., Sharifi, Z. Khodaverdiloo, H., 2024. Investigating the effect of different levels of irrigation and vermicomposting on yield and element concentration of quinoa seed (*Chenopodium quinoa* Willd.). Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences. 17, 229-242. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2023.5683.2166

Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A., Józefaciuk, G., 2021. Effect of low zeolite doses on plants and soil physicochemical properties. Materials. 14, 2617. https://doi.org/10.3390/ma14102617

Tarahomi, G., Lahouti, M., Abbasi, F., 2010. Effects of drought stress on soluble sugars, chlorophyll content, and potassium levels in aerial parts of *Salvia leriifolia* Benth. Plasma and Biomarkers Journal. 3(2), 1-7. [In Persian].

Wang, Q., Li, S., Li, J., Huang, D., 2024. The utilization and roles of nitrogen in plants. Forests. 15, 1191. https://doi.org/10.3390/f15071191

Wang, Z., Yang, Y., Yadav, V., Zhao, W., He, Y., Zhang, X., Wei, C., 2022. Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit. Horticultural Plant Journal. 8, 615-626. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.06.009

Wang, X.G., Zhao, X.H., Jiang, C.J., Li, C.H., Cong, S., Wu, D., Chen, Y.Q., Yu, H.Q., Wang, C.Y., 2015. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photoprotection mechanisms in soybean (*Glycine max* L.) Merr.). Journal of Integrative Agriculture. 14, 856-863. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60848-0

Wdowiak, A., Podgórska, A., Szal, B., 2024. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. Acta Physiologiae Plantarum. 46, 108. https://doi.org/10.1007/s11738-024-03733-w

WPCF, APHP, AWWA. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th Edition. American Public Health Association, Washington, DC, USA. Method 4500-NH_2-B, pp. 4-115.

Xu, G., Fan, X., Miller, A.J., 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. Annual Review of Plant Biology. 63, 153-82. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532

Yılmaz, E., Sönmez, İ. Demir, H., 2014. Effects of zeolite on seedling quality and nutrient

contents of cucumber plant (*Cucumis sativus* L. cv. Mostar F1) grown in different mixtures of growing media. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 45, 2767–2777. https://doi.org/10.1080/00103624.2014.950425

Zamani, Z., Tamartash, R., Ghajar Sepanlu, M., Jafarian Jelodar, Z., 2025. Effect of zeolite in reducing drought stress on Sanguisorba minor plant. Environmental Stresses in Crop Sciences. 18, 501-513. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2025.7526.2282

Zheng, C., Zhang, Z., Wu, Y., Mwiya, R., 2019. Response of vertical migration and leaching of nitrogen in percolation water of paddy fields under water-saving irrigation and straw return conditions. Water. 11, 868. https://doi.org/10.3390/w11040868

نسخه پیش از انتشار