

Research Article

Vol. 40, No. 3, Fall 2026, p. 523-536

The Effect of Micronutrient Elements and NPK-Containing Fertilizers on Some Physiological Traits, Quality, and Fruit Yield of Tomato (*Solanum lycopersicum*) under Salinity Stress

A. Tobeh^{1*}, A. Tobeh¹

1- Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding author's Email: Aydintobeh11@gmail.com)

Received: 18 September 2025

Revised: 07 December 2025

Accepted: 10 December 2025

Available Online: 10 December 2025

How to cite this article:

Tobeh, A., & Tobeh, A. (2026). The effect of micronutrient elements and NPK-containing fertilizers on some physiological traits, quality, and fruit yield of tomato (*Solanum lycopersicum*) under salinity stress. *Journal of Horticultural Science*, 40(3), 523-536. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95481.1463>

Introduction

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most widely grown vegetable crops in the world and is of high nutritional and economic importance. However, tomato production is severely constrained by abiotic stresses, particularly salinity, which reduces water uptake, disrupts ionic balance, damages chlorophyll, and induces oxidative stress. Nutrient management has emerged as a promising approach. Nitrogen, phosphorus, and potassium are fundamental for growth and osmotic adjustment, while micronutrients such as iron, zinc, manganese, and boron act as cofactors for enzymes, participate in antioxidant defense, and contribute to reproductive success. This research aimed to investigate the effects of NPK and micronutrient fertilization, both individually and in combination, on tomato yield, quality, and physiological parameters under varying salinity levels, with the ultimate goal of providing sustainable solutions for tomato production in salt-affected areas.

Materials and Methods

The experiment was carried out in 2024 at the greenhouse of Mohaghegh Ardabili University, Iran. The experimental design was factorial, based on a randomized complete block with three replications. Treatments included four salinity levels (0, 2, 4, and 8 dS.m⁻¹) imposed by adding NaCl to irrigation water, and four fertilizer treatments: control (no fertilizer), NPK (200 kg N, 150 kg P, and 150 kg K.ha⁻¹), micronutrients (Zn, Fe, Mn, and B applied as foliar spray), and combined NPK + micronutrients (half NPK dose plus foliar micronutrients). NPK was applied partly as basal and partly as top dressing, while micronutrients were sprayed twice during vegetative growth and once after fruit setting. The measured traits included yield components (fruit number, average fruit weight, total yield per plant), physiological parameters (chlorophyll index by SPAD, proline content, electrolyte leakage), and biochemical traits (fruit lycopene and the activity of antioxidant enzymes catalase and peroxidase). Data were analyzed by ANOVA using SAS and SPSS, and mean comparisons were conducted with Duncan's multiple range test at the 5% level.

Results and Discussion

Salinity stress markedly reduced tomato performance. Yield per plant declined from 3.5 kg in the control to



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95481.1463>

1.6 kg under 8 dS.m⁻¹, representing a 54% reduction. Similarly, fruit number decreased from 28.5 to 16.8 and average fruit weight from 125.3 g to 94.8 g. These reductions were accompanied by decreases in chlorophyll index and lycopene content, confirming the negative impact of salinity on both growth and quality. Proline content and electrolyte leakage, indicators of stress, increased significantly with higher salinity. Fertilizer treatments substantially alleviated these effects. The combined NPK + micronutrient treatment consistently produced the best results. Under this treatment, yield reached 3.25 kg per plant, almost restoring yield levels under non-saline conditions. Lycopene content, which dropped to 7.6 mg.kg⁻¹ in the unfertilized control at 8 dS.m⁻¹, increased to 15.2 mg.kg⁻¹ with combined fertilization under non-saline conditions. Similarly, chlorophyll index (SPAD) was maintained at 39.5 in the combined treatment compared with 28.3 in stressed, unfertilized plants. Physiological responses also confirmed the benefits of fertilization. Proline accumulation, which reached 8.9 μmol.g⁻¹ fresh weight in stressed unfertilized plants, was significantly reduced in fertilized ones, reflecting less need for osmotic adjustment. Electrolyte leakage was minimized under combined fertilization, suggesting better membrane stability. Antioxidant defense was strongly enhanced: catalase activity reached 30.5 units.mg⁻¹ protein in plants treated with NPK + micronutrients, compared with 15.2 in the control. Peroxidase activity increased to 9 units.mg⁻¹ protein compared with only 6.5 in the control. These results confirm that micronutrients such as Fe, Mn, and Zn act as cofactors, improving enzyme activity and enabling plants to neutralize reactive oxygen species more efficiently. Overall, the findings show that while salinity causes severe reductions in yield and fruit quality, integrated nutrient management substantially mitigates these negative effects. The superiority of the combined treatment compared to either NPK or micronutrients alone highlights the importance of balanced nutrition. It also shows that micronutrients can reduce the reliance on high chemical fertilizer inputs, thus aligning with sustainable agriculture practices. These results are consistent with previous reports on the role of balanced fertilization in enhancing salt tolerance by improving chlorophyll biosynthesis, antioxidant defense, and osmotic regulation.

Conclusion

The findings confirm that the combined application of NPK and micronutrients effectively mitigates the adverse effects of salinity on tomato growth and yield by improving chlorophyll biosynthesis, lycopene accumulation, and antioxidant enzyme activity while reducing stress indicators such as proline and electrolyte leakage. This integrated fertilization strategy enhances yield stability, fruit quality, and plant resilience, offering a sustainable solution for tomato production in saline environments. Furthermore, it reduces dependence on high chemical fertilizer inputs, supporting environmentally friendly practices and long-term agricultural sustainability.

Keywords: Catalase, Chlorophyll index, Lycopene, Peroxidase, Proline

اثر عناصر ریزمغذی و کودهای حاوی NPK روی برخی صفات فیزیولوژیکی، کیفیت و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) تحت تنش شوری

آیدین توبه^{۱*} - احمد توبه^{۱ID}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

چکیده

تنش شوری یکی از موانع اصلی تولید گوجه‌فرنگی است. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر تغذیه تلفیقی با کودهای NPK و ریزمغذی‌ها بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی، عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) تحت تنش شوری، در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید و شامل چهار سطح شوری (شاهد، دو، چهار و هشت دسی‌زیمنس بر متر) و چهار تیمار کودی (شاهد، NPK، ریزمغذی و ترکیب NPK + ریزمغذی) بود. نتایج نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش معنی‌دار تعداد میوه در بوته، وزن متوسط میوه، شاخص سبزیگی، محتوای لیکوپن و عملکرد گردید، به‌طوری که عملکرد میوه در هر بوته در تیمار هشت دسی‌زیمنس بر متر شوری نسبت به شاهد ۵۴ درصد کاهش یافت. در مقابل، کاربرد تیمارهای کودی و به‌ویژه ترکیب NPK + ریزمغذی، اثرات منفی شوری را تا حد زیادی جبران کرد و موجب افزایش چشمگیر صفات مورد بررسی گردید؛ به‌گونه‌ای که بیشترین تعداد میوه (۲۶/۸ عدد)، میانگین وزن میوه (۱۲۳/۵ گرم) و عملکرد بوته (۳/۲۵ کیلوگرم) در این تیمار به دست آمد. همچنین این تیمار بالاترین شاخص سبزیگی (۳۹/۵) و محتوای لیکوپن (۱۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را ایجاد کرد. از نظر شاخص‌های فیزیولوژیکی نیز استفاده هم‌زمان NPK و ریزمغذی‌ها موجب کاهش پرولین و نشت الکترولیت و در عین حال افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (۳۰/۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) و پراکسیداز (نُه واحد بر میلی‌گرم پروتئین) شد که نشان‌دهنده تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه و افزایش مقاومت به شوری است. بنابراین، یافته‌ها بیانگر آن است که تغذیه متعادل با کودهای ماکرو و ریزمغذی، یک راهکار مدیریتی پایدار برای افزایش مقاومت و بهبود عملکرد گوجه‌فرنگی در خاک‌های شور محسوب می‌شود. این رویکرد می‌تواند ضمن کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، به توسعه کشاورزی پایدار کمک کند.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، پرولین، شاخص سبزیگی، کاتالاز، لیکوپن

مقدمه

اهمیت گوجه‌فرنگی در سبد محصولات کشاورزی ایران است. با این حال، تولید این محصول با چالش‌های متعددی روبه‌رو است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تنش شوری است. شوری خاک و آب به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده رشد گیاهان، تأثیرات منفی قابل توجهی بر عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی دارد. افزایش شوری در خاک‌های کشاورزی به‌دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های شور، آبیاری نامناسب و تغییرات اقلیمی، به یک مشکل جهانی تبدیل شده است (Panahandeh et al., 2024). تنش شوری با ایجاد اختلال در تعادل یونی، سمیت ناشی از تجمع یون‌های سدیم و کلر و کاهش پتانسیل آب خاک باعث ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Mirabi et al., 2024). این شرایط منجر به کاهش فتوسنتز، اختلال در متابولیسم گیاه و در نهایت کاهش عملکرد و کیفیت میوه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در جهان است که به‌دلیل ارزش غذایی بالا، غنی بودن از ویتامین‌ها مانند ویتامین C و A، آنتی‌اکسیدان‌ها مانند لیکوپن و ترکیبات فنولی، نقش مهمی در تغذیه انسان و صنایع غذایی ایفا می‌کند (FAO, 2021). سطح زیرکشت گوجه‌فرنگی در ایران در سال‌های اخیر به‌طور متوسط حدود ۸۰ هزار تا ۱۶۰ هزار هکتار بوده است (Mellat Broker, 2024). این سطح زیرکشت بالا نشان‌دهنده

۱- گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: Aydintobeh11@gmail.com
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95481.1463>

می‌شود (Latifikhah et al., 2019). در چنین شرایطی، استفاده از کودهای شیمیایی و عناصر ریزمغذی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش اثرات منفی شوری و بهبود رشد گیاهان مورد توجه قرار گیرد. نیتروژن به‌عنوان یک عنصر ضروری برای سنتز پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و کلروفیل، نقش مهمی در افزایش رشد رویشی و زایشی گیاهان دارد. با این حال، مصرف بیش از حد نیتروژن می‌تواند حساسیت گیاه به تنش شوری را افزایش دهد (Ashraf et al., 2018). فسفر نیز با نقش خود در انتقال انرژی و سنتز ATP، به بهبود رشد ریشه و جذب بهتر آب و مواد مغذی در شرایط شوری کمک می‌کند (Liu et al., 2024). پتاسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در تنظیم فشار اسمزی، فعال‌سازی آنزیم‌ها و بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌تواند اثرات منفی شوری را کاهش دهد (Minazadeh et al., 2018). مطالعه‌ای نشان داد که افزایش پتاسیم در محلول غذایی، آسیب‌های ناشی از آبیاری با آب شور بر رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (El-Mogy et al., 2018).

عناصر ریزمغذی مانند آهن، روی، منگنز و بور نیز در شرایط تنش شوری اهمیت ویژه‌ای دارند. آهن به‌عنوان یک کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های دخیل در فرآیندهای اکسیداسیون و احیا، نقش مهمی در کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری ایفا می‌کند (Kaviani & Negahdar, 2021). روی نیز با نقش خود در سنتز پروتئین‌ها و تنظیم فعالیت آنزیم‌ها، می‌تواند به بهبود مقاومت گیاه به تنش شوری کمک کند (Weisany et al., 2014). منگنز یکی از عناصر ریزمغذی ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود که در فرآیندهای متابولیکی مختلفی از جمله فتوسنتز، تنفس و سنتز پروتئین‌ها نقش دارد. منگنز به‌عنوان یک کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های کلیدی مانند سوپراکسید دیسموتاز عمل می‌کند که در کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از تنش شوری مؤثر است (Gul et al., 2019). بور نیز یکی از عناصر ریزمغذی ضروری برای رشد و توسعه گیاهان است که نقش مهمی در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان ایفا می‌کند. بور به‌عنوان یک عنصر ضروری برای تشکیل دیواره سلولی، تقسیم سلولی، متابولیسم کربوهیدرات‌ها، انتقال قندها و سنتز پروتئین‌ها شناخته شده است (Marschner, 2012). این عنصر همچنین در حفظ یکپارچگی غشای سلولی و تنظیم فعالیت آنزیم‌ها نقش دارد. کمبود بور می‌تواند منجر به اختلال در رشد ریشه، کاهش رشد رویشی و زایشی، و در نهایت کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی شود (Shireen et al., 2018). در تحقیقی مشخص شد که پاشش نانوذرات مس موجب افزایش رشد و شاخص‌های فیزیولوژیک گوجه‌فرنگی در شرایط شوری می‌شود (Perez-Labrada et al., 2019).

نتایج آزمایشی نشان داد که محلول‌پاشی روی به‌شکل نانوذرات تا حدودی آسیب‌های ناشی از شوری را کاهش می‌دهد (Rasouli et al., 2019).

با وجود آنکه پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر جداگانه کودهای ماکرو و میکرو بر کاهش اثرات شوری پرداخته‌اند، اما کمتر تحقیقی به ارزیابی اثر تلفیقی این عناصر با هدف بهینه‌سازی تغذیه و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی پرداخته است. شکاف اصلی در این زمینه، عدم وجود یک راهکار مدیریتی یکپارچه است که بتواند هم‌زمان مقاومت به شوری را افزایش داده و در راستای کشاورزی پایدار، مصرف کودهای نیتروژنه و فسفات را کاهش دهد. بنابراین، این پژوهش با هدف اصلی بررسی تأثیر کاربرد جداگانه و تلفیقی عناصر ریزمغذی و کودهای NPK بر شاخص‌های فیزیولوژیکی، کیفیت و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری طراحی شد.

اهداف جزئی پژوهش نیز شامل موارد زیر است:

- ۱- ارزیابی کارایی ترکیب کودی در تعدیل اثرات منفی شوری
- ۲- شناسایی بهترین تیمار برای بهبود عملکرد و محتوای لیکوپن میوه
- ۳- بررسی این موضوع که آیا تغذیه با ریزمغذی‌ها می‌تواند نیاز گیاه به کودهای شیمیایی NPK را کاهش دهد یا خیر.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۲ به‌منظور بررسی اثرات مواد ریزمغذی و کود NPK روی گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. دمای روزانه گلخانه بین ۲۴ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد و دمای شبانه بین ۱۶ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد حفظ گردید. رطوبت نسبی در محدوده ۶۰ تا ۷۰ درصد تنظیم شد. طول دوره روشنایی حدود ۱۵ ساعت و دوره تاریکی ۹ ساعت بود. بذره‌های گوجه‌فرنگی رقم 'سنت‌پیر' ابتدا به‌منظور پیشگیری از آلودگی‌های قارچی با محلول سدیم هیپوکلریت دو درصد به‌مدت دو دقیقه ضدعفونی و سپس با آب مقطر شسته شد. بذرها ابتدا در سینی نشاء ۱۰۴ حجره‌ای (هر حجره با حجم تقریبی ۴۰ سی‌سی) حاوی بستر پیت‌ماس و پرلیت (به نسبت ۲:۱) کشت شدند. پس از رسیدن گیاهچه‌ها به مرحله ۳-۴ برگ، به گلدان‌های پلاستیکی با حجم ۱۰ لیتر منتقل گردید. بستر گلدان‌ها از خاک زراعی (با بافت لوم رسی)، پرلیت و شن با نسبت (۱:۱:۱) تهیه گردید. زهکش مناسب در کف گلدان‌ها در نظر گرفته شد. برای کاهش خطر بیماری‌های خاک‌زاد، مخلوط خاک به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس بخاردهی (استریل حرارتی) شد. همچنین گلدان‌ها پیش از استفاده با محلول سدیم هیپوکلریت یک درصد شسته و ضدعفونی

استخراج شود. سپس محلول به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد تا مواد جامد جدا شوند. برای این منظور از دستگاه سانتریفیوژ (Eppendorf, Germany) 5414R استفاده گردید. برای انجام واکنش رنگ سازی، دو میلی لیتر از محلول استخراج شده با دو میلی لیتر محلول نین هیدرین (تهیه شده از حل کردن یک گرم نین هیدرین در ۲۵ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال و ۱۵ میلی لیتر آب مقطر) و دو میلی لیتر اسید استیک گلاسیال خالص مخلوط گردید. مخلوط به مدت یک ساعت در حمام آب گرم (۱۰۰ درجه سانتی گراد) قرار داده شد. پس از سرد شدن، چهار میلی لیتر بنزن به مخلوط اضافه گردید و به آرامی تکان داده شد تا لایه بنزن جدا گردد. جذب لایه بنزن در طول موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (SmartSpec Plus (Bio-Rad, USA) اندازه گیری شد. غلظت پرولین با استفاده از منحنی استاندارد پرولین محاسبه گردید. محتوای پرولین براساس معادله ۱ محاسبه و بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر گزارش گردید.

(۱) وزن نمونه / حجم نهایی $\times$ غلظت پرولین = محتوای پرولین
برای سنجش نشت الکترولیت برگ ها از معادله ۲ استفاده گردید (Noormohammadi et al., 2021):

$$EL = (L1/L2) \times 100 \quad (2)$$

که در آن، EL: نشت الکترولیت، L1: هدایت الکتریکی نمونه ها بعد از ۲۴ ساعت قرار گرفتن در آب مقطر و L2: هدایت الکتریکی نمونه ها در مرحله دوم بعد از قرار گرفتن به مدت ۱۷ دقیقه در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی گراد می باشد. اندازه گیری هدایت الکتریکی به وسیله هدایت سنج EC متر (inolab Cond 7310 WTW, Germany) انجام گرفت.

برای اندازه گیری میزان لیکوپن در میوه گوجه فرنگی، از روش طیف سنجی UV-Vis استفاده شد. ابتدا نمونه های گوجه فرنگی سالم و رسیده انتخاب گردید و به دقت شسته و خشک شدند. سپس بخشی از بافت میوه جدا شده و به صورت همگن خرد گردید. برای استخراج لیکوپن، چهار گرم از نمونه همگن شده وزن شد و به یک ظرف شیشه ای منتقل گردید. سپس به نمونه، ۲۰ میلی لیتر هگزان اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه با همزن هم زده شد تا لیکوپن به طور کامل استخراج شود. پس از آن، این محلول به مدت ۱۰ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت تا فازهای جامد و مایع از هم جدا گردد. فاز شفاف بالایی که حاوی لیکوپن است، با استفاده از پیپت به کووت دستگاه طیف سنج منتقل شد. جذب نور این محلول در طول موج ۴۷۲ نانومتر اندازه گیری گردید (Kakubari et al., 2020).

شدند. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار انجام گردید. عامل اول سطوح شوری (شاهد، دو، چهار و هشت دسی زیمنس بر متر) بود. عامل دوم کود دارای چهار سطح که عبارتند از شاهد، کود کامل NPK (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و پتاسیم)، کود ریزمغذی (عنصر روی با غلظت دو گرم در لیتر و عناصر آهن، منگنز و بور با غلظت یک گرم در لیتر) و استفاده هم زمان مواد ریزمغذی و کود NPK (عنصر روی با غلظت دو گرم در لیتر، عناصر آهن، منگنز و بور با غلظت یک گرم در لیتر، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۷۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و پتاسیم) بود. به عبارتی به ازای هر گلدان در تیمار کود کامل ۷/۴ گرم نیتروژن خالص (۴۷/۷ گرم کلسیم نیترات) و ۵/۵۵ گرم فسفر خالص (۲۷/۸ گرم سوپرفسفات تریپل) و ۵/۵۵ گرم پتاسیم خالص (۱۲/۴ گرم پتاسیم سولفات) استفاده شد. همچنین در تیمار ترکیبی، نصف این مقادیر استفاده شد. NPK ۵۰ درصد به صورت کود پایه و ۵۰ درصد به صورت سرک در مرحله رشد رویشی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مواد ریزمغذی دو بار در مرحله رشد رویشی و یک بار در مرحله پس از تشکیل میوه گیاه محلول پاشی شد. برای تأمین آهن از کود آهن کلاته با عامل EDDHA با نام تجاری سکوسترین، برای تأمین روی از سولفات روی، برای تأمین منگنز از سولفات منگنز و برای تأمین بور از اسید بوریک استفاده گردید. تنش شوری از طریق افزودن نمک سدیم کلرید به آب آبیاری و رساندن هدایت الکتریکی به سطوح مورد نظر پس از استقرار کامل نشاها در چند مرحله (برای جلوگیری از شوک ناگهانی به گیاه) اعمال شد.

اندازه گیری صفات

برای اندازه گیری صفات عملکردی، از مرحله آغاز رسیدگی میوه ها تا پایان باردهی بوته هر سه روز یک بار برداشت میوه ها انجام شد. برای اندازه گیری شاخص سبزیگی (SPAD) از هر بوته سه برگ کاملاً سالم و باز انتخاب گردید. این شاخص بر روی هر برگ در سه نقطه (یک نقطه نزدیک رگ برگ میانی و دو نقطه در حاشیه برگ) اندازه گیری گردید و سپس میانگین این سه عدد به عنوان SPAD آن برگ ثبت شد. اندازه گیری ها در مرحله رشد رویشی فعال و در ساعات ۱۰-۱۲ روز با استفاده از دستگاه کلروفیل متر مدل SPAD-502 (Konica Minolta, Japan) انجام گردید. برای اندازه گیری محتوای پرولین در برگ های گوجه فرنگی، از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) استفاده شد. این اندازه گیری و آزمایش ها در آزمایشگاه دانشگاه محقق اردبیلی انجام گردید. ابتدا حدود نیم گرم از برگ های تازه گوجه فرنگی به قطعات کوچک خرد شده و در ۱۰ میلی لیتر اتانول ۹۶ درصد به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری گردید تا پرولین

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری
Table 1- Physicochemical properties of the soil used in the experiment at a depth of 0 to 30 cm

بافت Texture	پتاسیم قابل جذب Available potassium (ppm)	فسفر قابل جذب Available phosphorus (ppm)	ماده آلی Organic matter (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	اسیدیته خاک pH	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شن Sand (%)
لومی رسی Clay loam	155	12	1.3	0.08	7.3	32	38	30

NPK و مواد ریزمغذی با میزان ۲۶/۸ عدد و کمترین میزان مربوط به تیمار کودی شاهد با میزان ۲۰/۲ عدد بود. همچنین در بین سطوح شوری، بیشترین (۲۸/۵) و کمترین (۱۶/۸) تعداد میوه به ترتیب مربوط به سطح شاهد و شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر بود. اثر متقابل کود و سطوح شوری بر صفت تعداد میوه در بوته معنی‌دار نبود. همان‌طور که مشاهده شد، کاربرد توأم کودهای ماکرو و میکرو بیشترین تعداد میوه در بوته را به دنبال داشت. از دلایل مهم آن می‌توان به افزایش شاخص سبزی‌نگی و بهبود فتوسنتز در این تیمار، کاهش نشت الکترولیت و پرولین که نشان‌دهنده کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ سلامت سلولی است، و همچنین تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و پراکسیداز) که از ریزش گل و میوه جلوگیری می‌کنند، اشاره کرد. به‌علاوه، نقش مستقیم عناصری مانند پتاسیم در تنظیم اسمز و عناصر ریزمغذی مانند روی و بور در بهبود کیفیت گرده و فرآیند لقاح، به‌طور مستقیم موجب افزایش تعداد میوه شد (Schmidt et al., 2016). عناصر ریزمغذی همچنین از ریزش گل و میوه جلوگیری می‌کنند (Nateghi et al., 2015). نیتروژن موجب افزایش تولید کلروفیل و فتوسنتز می‌شود که منجر به رشد بهتر گیاه و همچنین با رشد بیشتر گیاه موجب جذب آب بیشتر و مقاومت در برابر شوری و افزایش تعداد میوه‌ها می‌شود (Hawkesford et al., 2012). پتاسیم و فسفر نیز با افزایش رشد ریشه و برگ‌ها منجر به افزایش تعداد میوه می‌شوند (Moallaye Mazraei et al., 2024).

میانگین وزن میوه

طبق تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ مشاهده شد که اثرات اصلی شوری و کود در سطح احتمال یک درصد بر صفت میانگین وزن میوه معنی‌دار بود. براساس جدول مقایسه میانگین (جدول ۲)، در بین تیمارهای کودی بیشترین وزن میوه مربوط به استفاده هم‌زمان NPK و مواد ریزمغذی با میزان ۱۲۳/۵ گرم و کمترین میزان مربوط به تیمار کودی شاهد با میزان ۱۰۵/۴ گرم بود. همچنین در بین سطوح شوری، بیشترین (۱۲۵/۳ گرم) و کمترین (۹۴/۸ گرم) وزن

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، ابتدا یک گرم از نمونه بافت گوجه‌فرنگی در پنج میلی‌لیتر بافر فسفات سرد با اسیدیته ۷ و غلظت ۵۰ میلی‌مولار همگن شد. سپس محلول همگن‌شده به مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت تا مواد جامد جدا شوند. فاز مایع شفاف به‌عنوان منبع آنزیم کاتالاز استفاده گردید. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم، ۵۰ میکرولیتر از مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از محلول پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار در بافر فسفات) اضافه شد. کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت گردید. فعالیت کاتالاز براساس میزان کاهش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی پراکسید هیدروژن (۰/۰۴۳ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه شد (Hadwan, 2018).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز، ۵۰ میکرولیتر از فاز مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات، گایاکول (۲۰ میلی‌مولار) و پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار) اضافه شد. افزایش جذب نور در طول موج ۴۷۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت می‌شود. فعالیت پراکسیداز براساس میزان افزایش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی تتراگایاکول (۲۶/۶ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه گردید (Singh et al., 2017).

برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزارهای SAS نسخه ۹/۴ و SPSS نسخه ۲۴ استفاده شد. همچنین برای رسم نمودارها و ثبت اطلاعات از نرم‌افزارهای WORD و EXCEL استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چنددامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تعداد میوه در بوته

براساس تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ مشاهده شد که اثرات اصلی شوری و کود در سطح احتمال یک درصد بر تعداد میوه در بوته معنی‌دار بود. جدول مقایسه میانگین (جدول ۲) نشان می‌دهد که در بین تیمارهای کودی، بیشترین تعداد میوه مربوط به استفاده هم‌زمان

بود. اثر متقابل کود و سطوح شوری بر میانگین عملکرد بوته معنی‌دار نبود. کودهای ماکرو و میکرو با افزایش تعداد میوه در بوته و همچنین میانگین وزن میوه موجب افزایش عملکرد بوته شدند. نیترژن موجب بهبود رشد رویشی و افزایش سطح برگ می‌شود که منجر به افزایش فتوسنتز و افزایش عملکرد می‌شود (Nouri et al., 2015). پتاسیم با حفظ تعادل آبی گیاه موجب افزایش مقاومت آن در برابر تنش‌ها می‌شود که موجب بهبود عملکرد خواهد شد (Wang et al., 2013). عنصر روی با افزایش تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین به توسعه ریشه و افزایش عملکرد کمک می‌کند (Mohammad Nejad Ganji et al., 2024). در مجموع مشاهده شد که استفاده توأم از مواد ریزمغذی و کود کامل NPK بهترین نتایج را در پی داشت. با توجه به این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که کودهای ریزمغذی می‌توانند قسمتی از نیازهای گیاه را برطرف کنند و نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش دهند. در واقع می‌توان با کاربرد مواد ریزمغذی، استفاده از کودهای شیمیایی که برای محیط زیست و طبیعت مضر و در طبیعت ماندگار هستند را کاهش داد. کاربرد ریزمغذی آهن موجب افزایش میزان عناصر غذایی در برگ و ریشه گیاه شده و از این طریق موجب افزایش عملکرد می‌گردد (Jafari et al., 2024).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

مطابق تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ مشاهده شد که اثرات اصلی شوری و کود در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت پراکسیداز معنی‌دار بود. طبق جدول مقایسه میانگین (جدول ۲)، در بین تیمارهای کودی، بیشترین فعالیت پراکسیداز مربوط به استفاده توأم NPK و مواد ریزمغذی با میزان ۵ واحد بر میلی گرم پروتئین و کم‌ترین میزان مربوط به تیمار کودی شاهد با میزان ۶/۵ واحد بر میلی گرم پروتئین بود. در بین سطوح شوری نیز بیشترین (۹/۸ واحد بر میلی گرم پروتئین) و کمترین (۵/۷ واحد بر میلی گرم پروتئین) فعالیت پراکسیداز به ترتیب مربوط به سطح چهار دسی‌زیمنس بر متر و سطح شاهد کودی بود. اثر متقابل کود و سطوح شوری بر صفت فعالیت پراکسیداز معنی‌دار نبود. استفاده از کود NPK می‌تواند به بهبود رشد گیاه و افزایش مقاومت به شوری کمک کند (Hafez et al., 2019). عناصر ریزمغذی از جمله روی در سنتز پروتئین‌ها و تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش دارد و می‌تواند مقاومت گیاهان به شوری را افزایش دهد (Weisany et al., 2014). پراکسیدازها گروه دیگری از آنزیم‌های مهم برای حذف H_2O_2 هستند و در فرآیندهای مختلفی از جمله لیگنین‌سازی و پاسخ به تنش نقش دارند (Shigeto & Tsutsumi, 2016). الگوی پاسخ پراکسیداز در این تحقیق نشان می‌دهد که این آنزیم نیز در سطوح متوسط

میوه به ترتیب مربوط به سطح شاهد و شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر بود. اثر متقابل کود و سطوح شوری بر صفت میانگین وزن میوه معنی‌دار نبود. شوری با کاهش محتوای کلروفیل و بستن روزنه‌ها، میزان فتوسنتز خالص را کاهش می‌دهد و در نتیجه، مواد فتوسنتزی کمتری برای پُر شدن میوه‌ها و افزایش وزن آن‌ها در دسترس قرار می‌گیرد. بهبود معنی‌دار در وزن میوه تحت تأثیر کودهای ماکرو و میکرو را می‌توان با تقویت هماهنگ چندین سازوکار فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی توجیه نمود. افزایش شاخص سبزی‌نگی برگ‌ها تحت این تیمار، حاکی از بهبود ساخت کلروفیل و کارایی فتوسنتز است که منجر به تولید بیشتر مواد آلی (کربوهیدرات‌ها) می‌گردد، این مواد به عنوان اسکلت اصلی و منبع انرژی برای پُر شدن میوه و افزایش وزن آن ضروری هستند. کاهش معنادار نشت الکترولیت و پرولین نشان‌دهنده حفظ بهتر یکپارچگی غشاهای سلولی و کاهش تنش اکسیداتیو است که در شرایط شوری، از هدررفت مواد سلولی و انرژی جلوگیری کرده و منابع را به سمت رشد میوه هدایت می‌کند. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز، با خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، از آسیب به ماکرومولکول‌های مهم (مانند پروتئین‌ها و لیپیدها) در طول دوره رشد میوه جلوگیری نموده و شرایط بهینه متابولیسم را برای انباشت مواد در میوه فراهم می‌آورد. همچنین نقش مستقیم عناصر غذایی به ویژه پتاسیم در تنظیم فشار تورگر و انتقال فعال قندها و سایر مواد محلول به درون میوه، و همچنین نقش فسفر در تأمین انرژی برای فرآیندهای سنتزی، به طور مستقیم در افزایش وزن نهایی میوه مؤثر بودند (Ahmad et al., 2018). همچنین ریزمغذی‌هایی مانند بور در تشکیل دیواره سلولی و انتقال قندها، و منگنز به عنوان کوفاکتور در آنزیم‌های کلیدی چرخه کالوین، بر کارایی فتوسنتز و انتقال مواد به میوه تأثیر گذاشتند (Shireen et al., 2018; Schmidt et al., 2016). همچنین فسفر در تولید ATP نقش دارد که باعث بهبود متابولیسم گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (Plaxton & Tran, 2011).

عملکرد بوته

مطابق تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ مشاهده شد که اثرات اصلی شوری و کود در سطح احتمال یک درصد بر صفت عملکرد بوته معنی‌دار بود. طبق جدول مقایسه میانگین (جدول ۲)، در بین تیمارهای کودی، بیشترین عملکرد بوته مربوط به استفاده توأم NPK و مواد ریزمغذی با میزان ۳/۲۵ کیلوگرم و کم‌ترین میزان مربوط به تیمار کودی شاهد با میزان ۲/۳ کیلوگرم بود. در بین سطوح شوری نیز بیشترین (۳/۵ کیلوگرم) و کمترین (۱/۶ کیلوگرم) عملکرد بوته به ترتیب مربوط به سطح شاهد و شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر

شوری برای خنثی کردن ROS فعال می‌شود. کاهش فعالیت آن در شدیدترین سطح شوری می‌تواند مشابه با سازوکار کاتالاز باشد. تحقیقات جدید، بر نقش محوری پراکسیدازها در تحمل به تنش تأکید دارند. بهبود فعالیت پراکسیداز توسط کودها، به‌ویژه NPK + ریزمغذی، به‌دلیل تأمین عناصری مانند مس و آهن است که به‌عنوان کوفاکتور برای بسیاری از ایزوآنزیم‌های پراکسیداز عمل می‌کنند (Hänsch & Mendel, 2009). این افزایش فعالیت آنزیمی به گیاه کمک می‌کند تا بهتر با تنش اکسیداتیو کنار بیاید.

پرولین

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، اثر اصلی و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر پرولین برگ معنی‌دار بود. براساس مقایسه میانگین اثر متقابل (جدول ۳) مشخص شد که بیشترین پرولین مربوط به اثر متقابل سطح شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر و سطح کودی شاهد با میزان ۸/۹ میکرومول بر گرم و کم‌ترین پرولین مربوط به اثر متقابل سطح شوری شاهد و استفاده توأم NPK و مواد ریزمغذی با میزان ۴/۵ میکرومول بر گرم بود. با افزایش سطوح شوری و در سطح شاهد کودی، میزان پرولین افزایش می‌یابد. زیرا در این حالت‌ها، تنش افزایش پیدا کرده و میزان پرولین با افزایش سطح تنش افزایش پیدا می‌کند. گیاهانی که تحت تنش قرار گرفته و تغذیه مناسبی دریافت نکرده‌اند، تحت تنش شدیدتری هستند. در نتیجه، برای مقابله با این تنش، سازوکار دفاعی خود (تولید پرولین) را تا حد اکثر ممکن فعال می‌کنند. شوری باعث افزایش تجمع پرولین در گیاهان می‌شود، زیرا پرولین به‌عنوان یک اسمولیت محافظتی عمل می‌کند و به گیاه کمک می‌کند تا با شرایط تنش شوری مقابله کند. وقتی گیاه مقدار کافی از مواد مغذی دریافت کند، تنش تغذیه‌ای کاهش یافته و دیگر نیازی به تولید پرولین به‌عنوان یک سازوکار دفاعی نیست (Seifi et al., 2023). نتایج همین پژوهش نشان داد که تیمار ترکیبی کود کامل NPK و ریزمغذی‌ها، حتی در شدیدترین سطح شوری (هشت دسی‌زیمنس بر متر) توانست نشأت الکترولیت را به‌طور معناداری بهتر از سایر تیمارها مهار کند، که همین امر منجر به نیاز کمتر به تولید پرولین و برتری گیاه در برابر تنش شوری شده است. این برتری را می‌توان حاصل هم‌افزایی چندین سازوکار کلیدی دانست. نخست، پتاسیم و کلسیم موجود در تیمار کودی، با رقابت بر سر جایگاه‌های جذبی و تشکیل پیوندهای مستحکم، یکپارچگی فیزیکی غشای سلولی را در برابر هجوم یون‌های سدیم حفظ کردند (Isayenkov & Maathuis, 2019). ریزمغذی‌هایی مانند آهن، منگنز و روی به‌عنوان کوفاکتورهای اختصاصی، زنجیره کامل آنزیم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و

پراکسیداز) را به‌طور هماهنگ فعال نمودند و از آسیب اکسیداتیو به لیپیدهای غشا جلوگیری کردند. تأمین هم‌زمان پتاسیم به‌عنوان یک اسمولیت کم‌هزینه، نیاز گیاه به سنتز پرولین پرهزینه را کاهش داد و انرژی و مواد ذخیره‌شده را به سمت فرآیندهای ترمیم و نگهداری غشا هدایت کرد (Ziaehre et al., 2023). همچنین نیتروژن و روی، مواد اولیه و تنظیم‌کننده سنتز پروتئین‌های جدید مورد نیاز برای جایگزینی پروتئین‌های آسیب‌دیده غشا را فراهم آوردند. بنابراین، این تیمار ترکیبی با ایجاد یک سیستم دفاعی یکپارچه متشکل از استحکام‌بخشی فیزیکی، حفاظت آنتی‌اکسیدانی کامل، صرفه‌جویی در انرژی و توان ترمیمی موفق شد که در شرایط تنش شدید، سلامت غشای سلولی را به‌طور مؤثری حفظ نماید. در چنین شرایطی، گیاه به‌جای صرف انرژی برای تولید پرولین، از این انرژی برای رشد و توسعه خود استفاده کرده و عملکرد گیاه افزایش پیدا می‌کند (Ahanger & Agarwal, 2017).

لیکوپن میوه

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) مشاهده شد که اثر اصلی کود و سطوح شوری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر لیکوپن میوه معنی‌دار بودند. طبق جدول مقایسه میانگین اثر متقابل کود و سطوح شوری (جدول ۳)، بیشترین لیکوپن میوه مربوط به اثر متقابل سطح شاهد شوری با استفاده توأم کود ریزمغذی و NPK با میزان ۱۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کم‌ترین میزان مربوط به اثر متقابل سطح هشت دسی‌زیمنس بر متر شوری و سطح شاهد کود با میزان ۷/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در این پژوهش مشاهده شد که مصرف توأم کودهای ریزمغذی و کود NPK هم باعث افزایش لیکوپن میوه می‌شود و هم نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی NPK را کاهش می‌دهد. لیکوپن یک کاروتنوئید مهم است که به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی در گوجه‌فرنگی عمل می‌کند و نقش مهمی در بهبود کیفیت تغذیه‌ای و سلامت انسان دارد. آهن به‌عنوان یک کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های دخیل در سنتز کاروتنوئیدها از جمله لیکوپن عمل می‌کند. کمبود آهن می‌تواند منجر به کاهش سنتز لیکوپن و سایر کاروتنوئیدها شود (Rahman et al., 2023). روی در سنتز پروتئین‌ها و تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز کاروتنوئیدها نقش دارد. کمبود روی می‌تواند منجر به کاهش تولید لیکوپن شود، درحالی‌که استفاده از کودهای حاوی روی می‌تواند غلظت لیکوپن را در میوه‌ها افزایش دهد (Mallick et al., 2021). شوری باعث افزایش تولید رادیکال‌های آزاد در گیاهان می‌شود که می‌تواند به ساختارهای سلولی آسیب برساند و سنتز لیکوپن را کاهش دهد (Gul et al., 2019). عناصر

غذایی مانند پتاسیم در فعال کردن آنزیم‌های کلیدی مسیر بیوسنتز کاروتنوئیدها نقش دارند. همچنین از آنجایی که لیکوپن خود یک آنتی‌اکسیدان است، با بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی توسط کودها، احتمال تجزیه لیکوپن نیز کاهش می‌یابد. بنابراین، تغذیه مناسب نه تنها بیوسنتز لیکوپن را تحریک می‌کند، بلکه از تخریب آن نیز جلوگیری می‌نماید (Juarez et al., 2017).

شاخص سبزی‌نگی (SPAD)

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، اثر اصلی کود و سطوح شوری و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر میزان کلروفیل معنی‌دار بود. براساس جدول مقایسه میانگین اثر متقابل کود و سطوح شوری (جدول ۳)، بیشترین کلروفیل مربوط به اثر متقابل سطح شاهد شوری با استفاده توأم کود ریزمغذی و NPK (۳۹/۵) و کم‌ترین میزان مربوط به اثر متقابل سطح هشت دسی‌زیمنس بر متر شوری و سطح شاهد کود (۲۸/۳) بود. مواد ریزمغذی مانند آهن نقش کلیدی در سنتز کلروفیل دارند. کمبود آهن

منجر به کاهش کلروفیل و بروز زردی برگ‌ها می‌شود (Izadi & Rezaei Nejad, 2020). بور در انتقال قندها و تشکیل دیواره سلولی نقش دارد و کمبود آن می‌تواند به کاهش تولید کلروفیل و اختلال رشد گیاه منجر شود (Ahmed et al., 2014). عناصر غذایی مانند نیتروژن، جزء اصلی کلروفیل، منیزیم هسته مرکزی مولکول کلروفیل و ریزمغذی‌هایی مانند آهن و منگنز در سنتز کلروفیل نقش دارند (Marschner, 2012). در شرایط شوری که معمولاً موجب کلروز و زردی برگ می‌شود، این ترکیب هماهنگ از عناصر، یک شبکه ایمنی چندلایه ایجاد می‌کند، هم مواد خام (نیتروژن و منیزیم) را می‌رساند، هم ابزارهای ساخت (آنزیم‌های حاوی آهن و منگنز) را فعال نگه می‌دارد و هم از محصول نهایی (کلروفیل و کلروپلاست) در برابر تنش محافظت می‌کند. بنابراین، گیاه می‌تواند کارخانه فتوسنتزی خود را حتی تحت تنش شدید شوری فعال نگه دارد که این امر به‌طور مستقیم بر تولید ماده خشک، پُر شدن میوه و در نهایت افزایش عملکرد تأثیر می‌گذارد.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر عناصر ریزمغذی و کودهای حاوی NPK روی برخی صفات فیزیولوژیکی، کیفیت و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) رقم 'سنت پیر' تحت تنش شوری

Table 2- ANOVA for the effects of micronutrients and NPK fertilizers on some physiological traits, fruit quality, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. 'Saint-Pierre' under salinity stress.

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares								
		نشت الکترولیت Electrolyte leakage	پراکسیداز POX	کاتالاز CAT	پرولین Proline	SPAD	لیکوپن میوه Fruit lycopene	عملکرد بوته Plant yield	وزن میوه Fruit weight	تعداد میوه در بوته Number of fruits per plant
تکرار Replication	2	0.39 ^{ns}	0.16 ^{ns}	3.212 ^{ns}	0.4 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.22 ^{ns}	4.16 ^{ns}	6.225 ^{ns}
تنش شوری Salinity stress (a)	3	106.8 ^{**}	6.8 ^{**}	150.1 ^{**}	15.1 ^{**}	40.15 ^{**}	8.44 ^{**}	5.1 ^{**}	106.81 ^{**}	81.773 ^{**}
کود Fertilizer (b)	3	50.251 ^{**}	5.2 ^{**}	11.25 ^{**}	10.25 ^{**}	28.58 ^{**}	6.25 ^{**}	2.92 ^{**}	50.25 ^{**}	32.92 ^{**}
a × b	9	6.69 ^{**}	0.35 ^{ns}	10.023 ^{**}	0.69 ^{**}	1.13 ^{**}	0.46 [*]	0.35 ^{ns}	6.69 ^{ns}	5.02 ^{ns}
خطای آزمایش Error	30	0.28	0.24	1.18	0.27	0.4	0.22	0.2	4.08	4.15
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	6.2	5.6	8.5	9.2	7.02	6.61	6.77	7.32	8.87

ns: غیرمعنی‌دار، * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: non-significant, * and **: significant at 5 and 1 percent of probability levels, respectively

نشت الکترولیت

تنش اکسیداتیو و آسیب به غشای سلولی می‌شود که می‌تواند نشت الکترولیت را افزایش دهد (Safdar et al., 2019). مواد ریزمغذی به‌عنوان کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی عمل می‌کنند که به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو به غشای سلولی کمک می‌کنند (Weisany et al., 2014).

فعالیت آنزیم کاتالاز

براساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر اصلی کود و سطوح شوری و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود. با توجه به جدول مقایسه میانگین اثر متقابل کود و سطوح شوری (جدول ۳)، بیشترین فعالیت کاتالاز مربوط به اثر متقابل سطح چهار دسی‌زیمنس بر متر شوری با استفاده توأم کود ریزمغذی و NPK با میزان ۳۰/۵ واحد بر میلی گرم پروتئین و کم‌ترین میزان مربوط به اثر متقابل سطح شاهد شوری و سطح شاهد کود با میزان ۱۵/۲ واحد بر میلی گرم پروتئین بود.

براساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، اثر اصلی کود و سطوح شوری و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر نشت الکترولیت معنی‌دار بود. طبق جدول مقایسه میانگین اثر متقابل کود و سطوح شوری (جدول ۳)، کم‌ترین نشت الکترولیت مربوط به اثر متقابل سطح شاهد شوری با استفاده توأم کود ریزمغذی و NPK با میزان ۱۱/۵ درصد و بیشترین میزان مربوط به اثر متقابل سطح هشت دسی‌زیمنس بر متر شوری و سطح شاهد کود با میزان ۲۶/۷ درصد بود. نشت الکترولیت^۱ نشان‌دهنده آسیب به غشای سلولی گیاهان است و معمولاً به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی سلامت سلول‌های گیاهی تحت تنش‌های محیطی مانند شوری استفاده می‌شود (Toupchi Khosrowshahi et al., 2019). در این پژوهش مشاهده شد که استفاده از کودهای ریزمغذی و NPK می‌تواند نشت الکترولیت را کاهش دهد و به حفظ یکپارچگی غشای سلولی کمک کند. شوری خاک و آب یکی از عوامل مهم تنش‌زا برای گیاهان است که می‌تواند منجر به افزایش نشت الکترولیت شود. شوری باعث ایجاد

جدول ۳- اثر اصلی سطوح شوری و تیمارهای کودی روی برخی از صفات فیزیولوژیکی و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) رقم 'سنت پیر'

Table 3- The effect of salinity levels and fertilizer treatments on some physiological traits and yield of tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. 'Saint-Pierre'

تیمارهای آزمایشی Treatments	پراکسیداز POX (u.mg ⁻¹)	عملکرد بوته Plant yield (kg)	وزن میوه Fruit weight (g)	تعداد میوه در بوته Number of fruits per plant
شوری Salinity (dS.m ⁻¹)				
شاهد Control	5.7 ^{d*}	3.5 ^a	125.3 ^a	28.5 ^a
2	8.2 ^b	2.85 ^b	115.7 ^b	24.3 ^b
4	9.8 ^a	2.2 ^c	105.2 ^c	20.1 ^c
8	6.9 ^c	1.6 ^d	94.8 ^d	16.8 ^d
کود Fertilizer				
شاهد Control	6.5 ^c	2.3 ^c	105.4 ^c	20.2 ^c
ریزمغذی Micronutrients	7.8 ^b	2.8 ^b	112.3 ^b	23.4 ^b
NPK	8.7 ^a	3.1 ^a	120.6 ^a	25.6 ^a
ریزمغذی + NPK Micronutrients + NPK	9 ^a	3.25 ^a	123.5 ^a	26.8 ^a

* در هر ستون هر بخش میانگین‌های با حروف مشترک، براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* In each column and section, means with common letters are not significantly different at the 5% of probability level based on Duncan's multiple range test.

جدول ۴- اثر متقابل سطوح شوری × تیمارهای کودی بر برخی صفات فیزیولوژیکی و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) رقم 'سنت پیر'

Table 4- The interaction effect of salinity levels × fertilizer treatments on some physiological traits and fruit quality of tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. 'Saint-Pierre'

سطوح شوری Salinity (dS.m ⁻¹)	تیمارهای کودی Fertilizer treatments	نشست الکترولیت Electrolyte leakage (%)	پرولین Proline (μmol.g ⁻¹)	کاتالاز CAT (u.mg ⁻¹)	SPAD	لیکوپن Lycopene (mg.kg ⁻¹)
شاهد Control	شاهد Control	15.3 ^{ijkl*}	5.3 ^{ijkl}	15.2 ^m	35.2 ^{cde}	12.5 ^d
	ریزمغذی Micronutrients	14.1 ^{kl}	5.1 ^{kl}	16.5 ^{lm}	37.1 ^b	13.6 ^{bc}
	NPK	12.8 ^{lm}	4.8 ^{lm}	17.8 ^{kl}	38.7 ^a	14.8 ^{ab}
	ریزمغذی + NPK Micronutrients + NPK	11.5 ^m	4.5 ^m	19.4 ^{ij}	39.5 ^a	15.2 ^a
2	شاهد Control	18.2 ^{ghi}	6.2 ^h	20.8 ^{ghi}	32.5 ^{hi}	10.8 ^f
	ریزمغذی Micronutrients	17.5 ^{hij}	5.9 ^{hi}	22.1 ^{efg}	34.2 ^{efg}	11.5 ^{ef}
	NPK	16.7 ^{ij}	5.7 ^{ij}	23.4 ^e	35.8 ^{bcd}	12.3 ^{de}
	ریزمغذی + NPK Micronutrients + NPK	15.9 ^{ijk}	5.4 ^{ijk}	25.6 ^{cd}	36.4 ^{bc}	13.1 ^{cd}
4	شاهد Control	22.4 ^{cde}	7.5 ^{de}	25.2 ^d	30.1 ^k	9.2 ^{hi}
	ریزمغذی Micronutrients	21.3 ^{def}	7.1 ^{ef}	27.1 ^c	31.7 ^j	9.8 ^{gh}
	NPK	20.1 ^{efg}	6.8 ^{fg}	28.7 ^b	33.4 ^{fgh}	10.7 ^f
	ریزمغذی + NPK Micronutrients + NPK	19.8 ^{fgh}	6.3 ^{gh}	30.5 ^a	34.6 ^{def}	11.4 ^{ef}
8	شاهد Control	26.7 ^a	8.9 ^a	18.3 ^{jk}	28.3 ^l	7.6 ⁱ
	ریزمغذی Micronutrients	25.5 ^{ab}	8.5 ^{ab}	20.2 ^{hi}	29.8 ^{kl}	8.3 ^{ij}
	NPK	24.3 ^{abc}	8.1 ^{bc}	21.7 ^{fgh}	31.2 ⁱ	9.1 ^h
	ریزمغذی + NPK Micronutrients + NPK	23.1 ^{bcd}	7.7 ^{cd}	23.1 ^{ef}	32.7 ^{ghi}	10.2 ^g

* در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک، براساس آزمون چندامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* In each column, means with common letters are not significantly different at the 5% of probability level based on Duncan's multiple range test.

شد که استفاده از مواد ریزمغذی و کودهای NPK می‌تواند اثر منفی تنش‌های شوری بر روی گیاه را کاهش دهد. افزایش اولیه فعالیت کاتالاز در سطوح متوسط شوری، پاسخ طبیعی گیاه برای مقابله با افزایش تولید H_2O_2 ناشی از شوری است. کاهش فعالیت آن در سطح شدید شوری ناشی از مهار سنتز پروتئین، آسیب مستقیم به ساختار آنزیم و از پا در آمدن سیستم دفاعی گیاه است. این الگوی افزایش و سپس کاهش، در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت تنش‌های شدید در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Mansour & Hassan, 2022).

آهن به‌عنوان یک کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله کاتالاز عمل می‌کند. کمبود آهن می‌تواند منجر به کاهش فعالیت کاتالاز و افزایش تجمع پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی شود (Al-Temimi et al., 2020). پتاسیم به‌ویژه در تنظیم فشار اسمزی و کاهش تنش اکسیداتیو نقش دارد و می‌تواند فعالیت کاتالاز را افزایش دهد (Altaey & Majid, 2018). منگنز در فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز نقش دارد. استفاده از کودهای حاوی منگنز می‌تواند فعالیت کاتالاز را افزایش دهد و به گیاهان کمک کند تا با تنش‌های اکسیداتیو مقابله کنند (Gul et al., 2019). در این پژوهش مشاهده

نتیجه گیری

کاربرد هم‌زمان عناصر پرمصرف و کم‌مصرف موجب تقویت و یکپارچه‌سازی دو عملکرد کلیدی گیاه در برابر شوری شد: پایداری غشای سلولی و کارایی دستگاه فتوسنتزی. در گام نخست، تأمین هماهنگ پتاسیم، کلسیم و ریزمغذی‌ها، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را به‌طور کامل فعال نمود که نتیجه آن، کاهش آسیب اکسیداتیو به غشای سلولی بود. این امر منجر به کاهش نشت الکترولیت و کاهش نیاز به تجمع پرولین (به‌عنوان پاسخ پُرهنزیه به تنش) گردید و انرژی و منابع ذخیره‌شده گیاه حفظ شد. در گام دوم، با تأمین نیتروژن، منیزیم و ریزمغذی‌های کوفاکتور (آهن، منگنز)، چرخه سنتز و حفاظت از کلروفیل به‌صورت کارآمدی تداوم یافت که در شاخص سبزیگی بالا متجلی گشت. تداوم فتوسنتز، مواد آلی لازم برای رشد و تقسیم سلولی را فراهم آورد. حاصل این دو فرآیند هم‌زمان (حفظ تمامیت سلولی و تداوم فتوسنتز) به‌صورت مستقیم در صفات عملکردی گیاه با

افزایش تعداد میوه در بوته، افزایش وزن میوه (ناشی از ذخیره‌سازی بهتر مواد فتوسنتزی) و در نهایت افزایش کمی و کیفی عملکرد (با افزایش محتوای لیکوپن و عملکرد کل بوته) ظهور کرد. بنابراین، بهبود در صفات عملکردی، در حقیقت خروجی نهایی یک فرآیند بهبودیافته در سطح سلولی و متابولیکی است که با تغذیه متعادل و هماهنگ امکان‌پذیر شده است. این رویکرد تغذیه‌ای متعادل می‌تواند ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی، به‌عنوان یک راهبرد پایدار برای تولید پایدار گوجه‌فرنگی در مناطق شور توصیه شود. این یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از ریزمغذی‌ها نه تنها بخشی از نیاز گیاه به کودهای شیمیایی را برطرف می‌کند، بلکه می‌تواند مصرف این کودها را کاهش داده و در جهت کشاورزی پایدار و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی مؤثر باشد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، کاربرد این تیمار ترکیبی در شرایط واقعی مزرعه‌ای و بر بستر خاک‌های شور طبیعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

- Ahanger, M. A., & Agarwal, R. M. (2017). Potassium up-regulates antioxidant metabolism and alleviates growth inhibition under water and osmotic stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Protoplasma*, 254(4), 1471-1486. <https://doi.org/10.1007/s00709-016-1037-0>
- Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., & Alam, P. (2018). Exogenous application of nitric oxide modulates osmolyte metabolism, antioxidants, and expression of salt transport genes in tomato under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 127, 404-412. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1132-x>
- Ahmed, N., Abid, M., Rashid, A., Abou-Shanab, R., & Ahmad, F. (2014). Influence of boron nutrition on membrane leakage, chlorophyll content and gas exchange characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 37(14), 2302-2315. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.912325>
- Altaey, D. K., & Majid, Z. Z. (2018). The activity of antioxidant enzymes and NPK contents as affected by water quality, kinetin, bio and organic fertilization in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 49(3). <https://doi.org/10.36103/ijas.v49i3.123>
- Al-Temimi, A., Al-Ghrai, S., Al-Ghrai, F., & Razaq, I. (2020). Effect of potassium and micronutrient fertilization on the activity of catalase and yield of wheat grown in saline conditions. *DYSONA-Applied Science*, 1(3), 81-87. <https://doi.org/10.30493/das.2020.239977>
- Ashraf, M., Shahzad, S. M., Imtiaz, M., Rizwan, M. S., Arif, M. S., & Kausar, R. (2018). Nitrogen nutrition and adaptation of glycophytes to saline environment: A review. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(9), 1181-1206. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1419571>
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- El-Mogy, M. M., Garchery, C., & Stevens, R. (2018). Irrigation with salt water affects growth, yield, fruit quality, and nutrient content in tomato. *HortScience*, 53(7), 1007-1014. <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1473482>
- FAO. (2021). The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gul, H., Arif, M., Husna, Y. K., & Sayyed, A. (2019). Effect of boron, manganese and iron on growth, biochemical constituents and ionic composition of cowpea grown under salinity. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 9(3), 1-12.
- Hadwan, M. H. (2018). Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC Biochemistry*, 19, 7. <https://doi.org/10.1186/s12858-018-0097-5>
- Hafez, E. M., Alsohim, A. S., Farig, M., Omara, A. E. D., Rashwan, E., & Kamara, M. M. (2019). Synergistic effect of biochar and plant growth promoting rhizobacteria on alleviation of water deficit in rice plants under salt-affected soil. *Agronomy*, 9(12), 847. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120847>

13. Hänsch, R., & Mendel, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>
14. Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 135-189. Academic Press.
15. Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. M. (2019). Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>
16. Izadi, Z., & Rezaei Nejad, A. (2020). Effect of different iron concentrations and staircase regime on some morphological, biochemical and flowering characteristics of *Calendula officinalis*. *Journal of Horticultural Science*, 34(2), 349-360. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i2.82363>
17. Jafari, A., Rasoli, F., Behtash, F., Mosavi, S. B. M., Ferdowsi Qebchaq, P., & Asadi, M. (2024). Evaluation of different concentrations of Fe and Zn in nutrient solution on yield, biochemical, and nutrient content of spinach in soilless conditions. *Journal of Vegetables Sciences*, 8(15), 183-200. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.2010676.1316>
18. Juarez-Maldonado, A., de-Alba-Romenus, K., Morales-Díaz, A. B., & Benavides-Mendoza, A. (2017). Macro-nutrient uptake dynamics in greenhouse tomato crop. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1908-1919. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1270310>
19. Kakubari, S., Sakaida, K., Asano, M., Aramaki, Y., Ito, H., & Yasui, A. (2020). Determination of lycopene concentration in fresh tomatoes by spectrophotometry: A collaborative study. *Journal of AOAC International*, 103(6), 1619-1624. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsaa050>
20. Kaviani, B., & Negahdar, N. (2021). Effect of nano-iron chelate and cycocel on growth parameters of poinsettia. *Journal of Horticultural Sciences*, 38(2), 281–301. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.72172.1086>
21. Latifikhah, E., Eshghi, S., Gharaghani, A., Tafazoli, E., & Razaghi, F. (2019). Effect of foliar application of Brassinosteroids on growth, yield and fruit quality of two strawberry cultivars under salt stress in soilless culture. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 50(3), 697-707. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.262213.1480>
22. Liu, T., Dong, X., Guo, K., Wang, J., Liu, X., & Sun, H. (2024). Effects of fertilizer types and application levels on phosphorus availability of saline soils and crops: A meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 35(13), 4068-4080. <https://doi.org/10.1002/ldr.5205>
23. Mallick, S., Das, R. C., Zakir, H. M., & Alam, M. S. (2021). Effect of zinc and boron application on lycopene and nutritional qualities of tomato. *Journal of Scientific Research and Reports*, 27, 27-36. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2021/v27i330367>
24. Mansour, M. M. F., & Hassan, F. A. S. (2022). How salt stress-responsive proteins regulate plant adaptation to saline conditions. *Plant Molecular Biology*, 108(3), 175–224. <https://doi.org/10.1007/s11103-021-01232-x>
25. Marschner, H. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. pp. xv, 651. England: Academic Press, London.
26. Mellat Broker. (2024). Tomato cultivated area in Iran year-by-year summary (Analytical Report). <https://www.mellatbroker.ir/upload/files/reports/1709117082651.pdf>
27. Minazadeh, R., Karimi, R., & Mohammadparast, B. (2018). The effect of foliar nutrition of potassium sulfate on morpho-physiological indices of grapevine under salinity stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, 10(3), 83-106. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.111936.1105>
28. Mirabi, E., Seifi, E., & Hokmabadi, H. (2024). Effects of salinity on antioxidant enzymes and some morphophysiological traits of two interspecies hybrid pistachio rootstocks. *Journal of Plant Production Research*, 31(1), 213-229. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2023.21976.3097>
29. Moallaye Mazraei, S., Khaleghi, E., & Enayatizamir, N. (2024). Evaluation of the effect of plant growth-promoting bacteria and potassium nitrate on the growth characteristics and gas exchange of lime (*Citrus aurantifolia*) under drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 32(3), 135–161. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2024.22647.3167>
30. Mohammad Nejad Ganji, S. M., Zarei, H., Khoshhal Sarmast, M., & Akbarpour, V. (2024). Evaluation of the combined use of auxin and nutrients for root stimulation in stem cuttings of *Ligustrum lucidum*. *Journal of Plant Production Research*, 31(2), 1-22. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/JOPP.2023.20769.2980>
31. Nateghi, S., Pirzad, A., & Darvishzadeh, R. (2015). Effect of Fe and Zn micro nutrients on yield and yield components of *Pimpinella anisum* L. *Journal of Horticultural Science*, 29(1), 37-46. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.48438>
32. Noormohammadi, Z., Ismailpour, B., Azarmi, R., Shiekhalipour, M., Chamani, E., & Shahbazi Yajlo, R. (2021). Effect of melatonin treatment on growth and physiological and biochemical characteristics of *Stevia rebaudiana* berton under salt stress conditions. *Journal of Vegetables Sciences*, 5(9), 1-15. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2021.534020.1170>

33. Nouri, M., Dashti, F., & Bayat, F. (2015). Changes in vegetative growth indices and yield of garlic (*Allium sativum* L.) in different sources and levels of nitrogen fertilizer. *Journal of Vegetables Sciences*, 1(1), 21-32. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2015.15357>
34. Panahandeh, J., Zare Far, M. S., Motallebi-Azar, A., Zare Nahandi, F., & Amani, M. (2024). Investigating the effect of salicylic acid on reduce salinity stress in tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 37(4), 931-948. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2023.79421.1206>
35. Perez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*, 8(6), 151. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>.
36. Plaxton, W. C., & Tran, H. T. (2011). Metabolic adaptations of phosphate-starved plants. *Plant Physiology*, 156(3), 1006-1015. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175281>
37. Rahman, A., Harker, T., Lewis, W., & Islam, K. R. (2023). Nano and chelated iron fertilization influences marketable yield, phytochemical properties, and antioxidant capacity of tomatoes. *Plos One*, 18(11), e0294033. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294033>
38. Rasouli, F., Abedini, F., & Fakhreghazi, S. H. (2019). The effect of zinc oxide nanoparticles on the physiological characteristics in pepper (*Capsicum annum* L.) under salinity stress. *Journal of Crop Production and Processing*, 9(2), 125-139. <https://doi.org/10.29252/jcpp.9.2.125>
39. Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., & Sarwar, M. I. (2019). A review: Impact of salinity on plant growth. *Natural Sciences*, 17(1), 34-40. <https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>
40. Schmidt, S. B., Jensen, P. E., & Husted, S. (2016). Manganese deficiency in plants: The impact on photosystem II. *Trends in Plant Science*, 21(7), 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03.001>
41. Seifi, A., Ahmadi, A., & Poustini, K. (2023). The effect of thiamine and pyridoxine on yield and some physiological wheat traits under drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(1), 11-25. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.328186.654884>
42. Shigeto, J., & Tsutsumi, Y. (2016). Diverse functions and reactions of class III peroxidases. *New Phytologist*, 209(4), 1395-1402. <https://doi.org/10.1111/nph.13738>
43. Shireen, F., Nawaz, M. A., Chen, C., Zhang, Q., Zheng, Z., Sohail, H., & Bie, Z. (2018). Boron: Functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(7), 1856. <https://doi.org/10.3390/ijms19071856>
44. Singh, S., Tripathi, D. K., Singh, S., Sharma, S., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Vaculík, M. (2017). Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.005>
45. Toupchi Khosrowshahi, Z., Salehi-Lisar, S. Y., Ghassemi-Golezani, K., & Motafakkerazad, R. (2019). Effect of polyamines on antioxidative responses of safflower (*Carthamus tinctorius*) under drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 26(2), 157-171. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2019.14942.2337>
46. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370-7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
47. Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A., & Badakhshan, H. (2014). Effects of zinc application on growth, absorption and distribution of mineral nutrients under salinity stress in soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 37(14), 2255-2269. (In Persian). <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920386>
48. Ziachehre, M., Tobeh, A., Hassanpanah, D., & Farzaneh, S. (2023). Influence of planting date and foliar application of antifreeze compounds on some morpho-physiological traits of potato cultivars in Ardabil region. *Journal of Vegetables Sciences*, 7(14), 136-159. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2022.1971753.1245>