Vol. 7, No. 1, Spring & Summer, 2026, p. 63-76

Plant Production and Genetics

https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145197.1188

The interaction effects of selenium and zinc on growth and selected biochemical parameters of shallot under drought stress conditions

Saeid Davoodinia[1], Sina Fallah[*1], Mohammad Rafieiolhossaini[1], Ali Abbasi Surki[1]

1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[*]Corresponding Author Email: fallah-s@sku.ac.ir

Abstract

Introduction: Drought stress represents the primary factor that diminishes the yield of crop products. Under such conditions, the application of nutrients like selenium and zinc may enhance the plant's resilience to drought stress by favorably influencing biochemical and physiological processes. To explore this, an experiment was conducted to assess the impact of varying concentrations of selenium and zinc combinations on the morphological, physiological, and production characteristics of Persian shallot (*Allium hirtifolium* Boiss.) under drought stress conditions.

Materials and Methods: This experiment was designed as a factorial in a randomized complete block design with four replications at the Shahrekord University research farm during the 2023-2024 period. The first factor involved levels of drought stress, which included no drought stress (maintaining 85% of field capacity moisture) and drought stress (maintaining 50% of field capacity moisture). The second factor comprised the combinations of selenium and zinc, which included Se1Zn1: control, Se2Zn2: 3 mg/L selenium plus 50 mg/L zinc, Se3Zn3: 6 mg/L selenium plus 100 mg/L zinc, Se4Zn4: 9 mg/L selenium plus 150 mg/L zinc, and Se5Zn5: 12 mg/L selenium plus 200 mg/L zinc, sourced from sodium selenate and zinc sulfate, respectively.

Results: The results from the variance analysis indicated that the effects of drought stress, the combinations of selenium and zinc, and the interaction between drought stress and nutrient combinations on leaf relative moisture content, proline content, malondialdehyde content, leaf fresh weight, and root fresh weight were significant. Additionally, photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids) were significantly influenced by drought stress ($P < 0.01$). The combinations of selenium and zinc had a significant impact on the fresh weight of both the bulb and sister bulb at the 1% probability level, while their interaction was significant at the 5% probability level. Furthermore, the influence of drought stress, along with selenium and zinc combinations, on the selenium content, zinc content, and allicin content of the Persian shallot bulb was also significant at the 1% probability level. In conditions of drought stress, the leaf relative moisture content and proline content increased by 24% and 94%, respectively, in the Se3Zn3 treatment when compared to the control treatment. Across both moisture conditions, malondialdehyde content was observed to decrease in all nutritional treatments. Additionally, leaf fresh weight showed a significant increase in the Se3Zn3 treatment relative to the control, although it decreased at higher concentrations of applied nutrients. The root fresh weight in the Se3Zn3 treatment was comparable to that of the control treatment, but it also decreased at higher nutrient concentrations. A notable increase in bulb fresh weight and sister bulb fresh weight was recorded in the Se3Zn3 treatment compared to the control. Drought stress led to a significant reduction in the content of photosynthetic pigments when compared to non-stressed conditions. Under drought stress, elevated concentrations of selenium and zinc resulted in a decrease in the content of these nutrients as well as the allicin content of the bulb, with reductions of 25%, 20%, and 46% for selenium, zinc, and allicin content, respectively, in comparison to non-stressed conditions.

Conclusion: In this study, the combination of 6 mg/L selenium and 100 mg/L zinc exhibited the most beneficial impact on the morphological and physiological characteristics of Persian shallot. This specific concentration of the nutrient mixture mitigated the effects of drought stress on growth indices by enhancing antioxidant capacity and boosting photosynthetic efficiency, likely increasing the plant's resilience to drought stress through the reinforcement of biochemical mechanisms, ultimately leading to improved production potential and product quality. Furthermore, the synergistic application of selenium and zinc in non-stress conditions also enhanced the potential for tuber yield and the quality of the tubers in terms of selenium content.

Keywords: Bulb, Drought stress tolerance, Proline, Relative water content, Shallot

Received: 10-12-2025 **Accepted**: 24-02-2026

Citation: Davoodinia, S., Fallah, F., Rafieiolhossaini, M., & Abbasi Surki, A. (2026). The interaction effects of selenium and zinc on growth and selected biochemical parameters of shallot under drought stress conditions. *Plant Production and Genetics*, *7*(1),63-76. https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145197.1188

Copyrights:
Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

جلد ۷، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۷۶-۶۳

تولید و ژنتیک گیاهی

https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145197.1188

برهمکنش سلنیوم و روی بر رشد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی موسیر در شرایط تنش خشکی

سعید داودی نیا[۱]، سینا فلاح*[۱]، محمد رفیعی الحسینی[۱]، علی عباسی سورکی[۱]

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: fallah-s@sku.ac.ir

چکیده

مقدمه: تنش خشکی مهمترین عامل کاهش‌دهنده عملکرد محصولات کشاورزی است. در این شرایط تغذیه گیاهی با استفاده از عناصری مانند سلنیوم و روی ممکن است با تأثیر مثبت بر فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی میزان تحمل گیاه به تنش خشکی را بهبود دهند. در این ارتباط، آزمایشی با هدف بررسی اثر غلظت‌های مختلف ترکیب دو عنصر سلنیوم و روی بر خصوصیات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و تولید گیاه موسیر ایرانی (*Allium hirtifolium* Boiss.) در شرایط تنش خشکی اجرا شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. عامل اول، سطوح تنش شامل بدون تنش (با حفظ رطوبت ۸۵ درصد ظرفیت زراعی) و تنش خشکی (با حفظ رطوبت ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و عامل دوم، ترکیب عناصر سلنیوم و روی شامل Se1Zn1: شاهد، Se2Zn2: سه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر روی، Se3Zn3: شش میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی، Se4Zn4: نه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر روی و Se5Zn5: ۱۲ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی به‌ترتیب از منابع سلنات سدیم و سولفات روی بود.

نتایج: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی، ترکیب عناصر سلنیوم و روی و اثر متقابل تنش خشکی وترکیب عناصر بر محتوای رطوبت نسبی آب برگ، محتوای پرولین، محتوای مالون دی‌آلدئید، وزن تر برگ و وزن تر ریشه موسیر ایرانی معنی‌دار شدند. رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها) تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند ($P < ۰/۰۱$). اثر ترکیب عناصر سلنیوم و روی بر وزن تر سوخ و وزن تر سوخ خواهری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آنها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید. همچنین اثرات تنش خشکی و ترکیب سلنیوم و روی بر محتوای سلنیوم، روی و محتوای آلیسین سوخ موسیر ایرانی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. در شرایط تنش خشکی، محتوای رطوبت نسبی آب برگ، محتوای پرولین در تیمار Se3Zn3 در مقایسه با به تیمار شاهد به‌ترتیب ۲۴ و ۹۴ درصد افزایش یافت. در هر دو شرایط رطوبتی، محتوای مالون دی‌آلدئید در همه تیمارهای تغذیه‌ای کاهش یافت. وزن تر برگ نیز در تیمار Se3Zn3 در مقایسه به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری داشت و در غلظت‌های بالاتر کاهش نشان داد. وزن تر ریشه در تیمار Se3Zn3 مشابه شاهد بود و در غلظت بالاتر کاهش یافت. افزایش معنی‌دار وزن تر سوخ و وزن تر سوخ خواهری در تیمار Se3Zn3 نسبت به شاهد مشاهده شد. تنش خشکی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی را نسبت به شرایط بدون تنش به‌شدت به‌طور معنی‌داری کاهش داد. در شرایط تنش خشکی، غلظت‌های بالاتر عناصر سلنیوم و روی محتوای این عناصر و محتوای آلیسین سوخ را کاهش دادند، به‌طوری که محتوای عناصر سلنیوم، روی و محتوای آلیسین سوخ نسبت به‌شرایط بدون تنش به‌ترتیب به‌میزان ۲۵، ۲۰ و ۴۶ درصد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: در این آزمایش، کاربرد شش میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی بیشترین تاثیر مثبت را بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه موسیر داشت. این غلظت از ترکیب عناصر با بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش توان فتوسنتزی میزان اختلال ناشی از تنش خشکی در شاخص‌های رشدی را کاهش داد و احتمالاً با تقویت مکانیسم بیوشیمیایی باعث افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی شد و نهایتا پتانسیل تولید و کیفیت محصول را بهبود بخشید. علاوه‌بر این، کاربرد توأم دو عنصر سلنیوم و روی در شرایط بدون تنش نیز پتانسیل تولید سوخ و کیفیت سوخ‌های تولیدی را از لحاظ محتوای سلنیوم ارتقا داد.

کلید واژگان: پرولین، تحمل به خشکی، سوخ، محتوی نسبی آب برگ، موسیر ایرانی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

منبع: داودی نیا، فلاح، س.، رفیعی الحسینی، م.، و عباسی سورکی، ع. (۱۴۰۵). برهمکنش سلنیوم و روی بر رشد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی موسیر در شرایط تنش خشکی، *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، ۷ (۱)، ۷۶-۶۳. https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145197.1188

CC BY

مقدمه

گیاهان دارویی از منابع مهم درمان بیماری‌ها در تمام نقاط جهان بوده و جایگاه مهمی در طب سنتی دارند (Rostaei *et al.*, 2024). علاوه‌بر این، به‌دلیل ارزش صنعتی و اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند و تقاضای روزافزون جامعه برای استفاده از این گیاهان باعث بهره‌برداری بی‌رویه از آنها در رویشگاه‌های طبیعی شده است (Fallah *et al.*, 2020). موسیر از جمله گیاهان دارویی و صنعتی در ایران است که غالباً از عرصه‌های طبیعی برداشت می‌شود و پرورش این گیاه در نظام‌های زراعی در راستای تولید محصول و همچنین جلوگیری از کاهش جمعیت طبیعی آن اهمیت زیادی دارد (Sabzevari *et al.*, 2015).

موسیر با نام علمی (*Allium hirtifolium* Boiss.) متعلق به خانواده Amaryllidaceae حاوی ترکیبات مهم گوگردی با خاصیت ضد باکتریایی و آنتی‌بیوتیکی (به نام‌های آلیسین، آلیساتین و کورستین) و دیگر ترکیبات فلاونوئیدی و آنتی اکسیدانی است (Ismail *et al.*, 2012). این خواص، موسیر را به یک کاندیدای مهم برای گنجاندن در رژیم غذایی و کاربردهای درمانی بالقوه، به‌ویژه در مدیریت دیابت و عفونت‌ها، کاهش سطح چربی خون، جلوگیری از تصلب شرایین و کمک به تنظیم فشار خون تبدیل می‌کند (Moguee *et al.*, 2026). گیاه موسیر دارای ساقه زیرزمینی (سوخ) است و در مناطق سرد و نیمه سرد با ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ مترمربع از سطح دریا و در شیب‌های مختلف رشد می‌کند (Sabzevari *et al.*, 2015).

تنش خشکی مهمترین عامل کاهش‌دهنده عملکرد محصولات کشاورزی است (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024; Fallah *et al.*, 2018). این تنش با کاهش سطح برگ، انسداد روزنه‌ها، کاهش فعالیت‌های پروتوپلاسمی و تثبیت گاز کربنیک، کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل سبب تقلیل فرایند فتوسنتز می‌گردد (Yang *et al.*, 2021). یکی از اثرات تخریبی تنش خشکی، بر هم زدن تعادل تغذیه‌ای و کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله عناصر ریزمغذی است که فراهم‌آوری این عناصر می‌تواند وضعیت رشد و تحمل گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشد (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024; Fallah *et al.*, 2018). کودهای ریزمغذی با فعال کردن سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه موجب افزایش مقاومت گیاه در برابر رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شوند (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024).

سلنیوم (Se) بعنوان یک شبه فلز و عنصری غیر ضروری اما مفید در رشد و نمو گیاه و ضروری برای انسان و جانوران شناخته شده است. این عنصر از نظر خواص شیمیایی مشابه گوگرد بوده که در فرایندهای جایگزینی سلول تاثیر می‌گذارد و باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های غیرزیستی و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود (Burmistrov *et al.*, 2025). این عنصر به‌عنوان یک عنصر ریزمغذی در غلظت‌های کم می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی موجب افزایش مقاومت به تنش اکسیداتیو شود که این امر تاثیر مثبتی در کاهش پراکسیداسیون لیپیدها دارد (Kamali-Andani *et al.*, 2025).

روی (Zn) نیز یکی از عناصر کم‌مصرف و ضروری برای رشد و نمو در گیاهان است که نقش مهمی را در متابولیسم گیاه با بهبود فعالیت آنزیم‌های مختلف از جمله هیدروژناز و کربنیک آنیدراز، پایداری عملکرد ریبوزومی و سنتز کروم‌ها بر عهده دارد (Zemanová *et al.*, 2024). علاوه‌بر این، روی می‌تواند به‌طور مستقیم و غیر مستقیم سبب افزایش عملکرد محصولات گردد. این عنصر، برای تولید مثل گیاهان نیز ضروری است و در سنتز پروتئین‌ها و هورمون گیاهی مانند اکسین نقش دارد (Hamzah Saleem *et al.*, 2022). عنصر روی نقش مهمی در افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز دارد و باعث جلوگیری از خسارت‌های اکسیداتیو می‌شود و کمبود آن بر متابولیسم کربوهیدرات و بروز خسارت به ساختار گیاهی و کاهش عملکرد گیاه تاثیر گذار است (El-Shazoly *et al.*, 2025). روی یک عامل برای کاهش تنش در گیاه است و هر عاملی که بر کارایی آن در گیاه تاثیر داشته باشد، رشد و متابولیسم گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Aytak *et al.*, 2015)، با این‌حال، مقادیر بیش از حد این عنصر موجب مسمومیت در گیاه می‌شود و بر جذب سایر عناصر نیز اثر می‌گذارد (Samreen *et al.*, 2017).

در تحقیق Amerian و همکاران (۲۰۱۸) وزن تر بوته، وزن تر برگ، ارتفاع بوته و عملکرد پیاز خوراکی (*Allium cepa* L.) در غلظت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم افزایش یافتند. بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در ترکیب تیماری ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم به‌علاوه ۲۲۴ میلی‌گرم بر لیتر نیتروژن بود که بیانگر تأثیر مثبت برهمکنش این دو عنصر در افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی

است. در مطالعه Gharehbaghli و Sepehri (۲۰۲۲)، کاربرد سلنات سدیم در حضور کلرید سدیم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیوم، وزن خشک ریشه سیر (*Allium sativum* L.) را ۱۴/۳ درصد افزایش داد، همچنین باعث بهبود وزن خشک اندام هوایی گیاه سیر (۸/۷۵ درصد) در مقایسه با تیمار عدم مصرف سلنیوم شد. در بررسی اثر غلظت‌های سلنیوم بر پارامترهای رشد و فیزیولوژیک تره ایرانی (*Allium ampeloprasum* Spp) حداکثر وزن تر پیاز در تیمار شاهد و حداقل آن در غلظت ۲۲ میلی‌گرم بر لیتر سلنیوم مشاهده شد. علاوه‌بر این، محتوای مالون‌دی‌آلدئید بخش هوایی تره ایرانی در تیمار ۲۲ میلی‌گرم بر لیتر افزایش ۱۲۶ درصدی را نسبت به گروه شاهد نشان داد (Karimi & Saiedikhah, 2018). در مطالعه دیگری نشان داده شد که مصرف ۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی توانست نیاز سیر را به این عنصر تامین کند و جذب محتوای روی در سوخ‌های گیاه سیر به‌میزان ۱۰/۱ درصد، موجب افزایش ۳۵ درصدی آلیسین، ۲/۸۱ درصدی تعداد سیرچه و ۲۱/۱ درصدی عملکرد سوخ نسبت شاهد گردید (Zare Pak Ziaberi & Majidian, 2022). علاوه‌بر این، Gholami و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند با مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی در سطح بدون سلنیوم و مصرف ۲۰ گرم در هکتار سلنیت سدیم، عملکرد دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌ترتیب به‌میزان ۱۲/۸ و ۱۴/۴درصد افزایش یافت.

در کشت پاییزه موسیر غالبا پس از فصل زمستان محدودیت‌های انجام آبیاری وجود دارد و این موضوع می‌تواند گیاه را در معرض تنش خشکی قرار دهد. عناصری مانند سلنیوم و روی می‌توانند در تحمل گیاه به تنش خشکی نقش مفیدی داشته باشند و این موضوع در آزمایش‌های دیگر مشخص شده است. اما، در خصوص کاربرد توأم این دو عنصر مفید تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با گیاه موسیر منتشر نشده است. از این رو، مطالعه حاضر با هدف بررسی برهمکنش سلنیوم و روی بر رشد و عملکرد گیاه موسیر تحت شرایط تنش خشکی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر در شرایط نیمه طبیعی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد (۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی، ۴۹ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰۷۰ متر از سطح دریا) در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا گردید. عامل اول، سطوح تنش شامل بدون تنش (با حفظ رطوبت ۸۵ درصد ظرفیت زراعی) و تنش خشکی (با حفظ رطوبت ۵۰ درصد از ظرفیت زراعی مزرعه) و عامل دوم، ترکیب عناصر سلنیوم و روی شامل Se1Zn1: شاهد، Se2Zn2: سه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر روی، Se: ۶ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی، Se4Zn4: نه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۵۰ میلی-گرم در لیتر روی و Se5Zn5: ۱۲ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی بود.

ابتدا سوخ‌های مناسب از شرکت تخصصی گیاهان دارویی چویلان تهیه گردید. سوخ‌های سالم، هم اندازه و یکنواخت انتخاب و با قارچکش پروپیکونازول ضدعفونی شدند، سپس در گلدان‌های زهکش‌دار (با ارتفاع و قطر ۳۰ سانتی‌متر) ۱۲ کیلوگرم خاک زراعی حاصلخیز با بافت لومی و شنی، مخلوط با کود اوره (به‌میزان ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و کود گاوی کاملا پوسیده (۱۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) ریخته شد. گلدان‌ها در جوی‌های عمیقی قرار گرفت و اطراف آنها با خاک پوشانده شد، به‌طوری که سطح گلدان‌ها حدود پنج سانتی‌متر بالاتر از سطح خاک پیرامون بود. اوایل مهرماه ۱۴۰۲، در هر گلدان یک سوخ موسیر در عمق پنج سانتی‌متری کشت و بلافاصله آبیاری انجام گردید و تا زمان شروع تنش خشکی، آبیاری مطابق نیاز گیاه ادامه یافت.

در اواسط فروردین ماه ۱۴۰۳، در مرحله‌ای که برگ‌های جوان توسعه یافته بود بر اساس تیمارها، محلول‌پاشی اول انجام شد. سپس در اوایل اردیبهشت ماه، محلول‌پاشی دوم تکرار گردید. در هر بار محلول (آب به‌علاوه سلنیوم و روی) روی برگ‌های گیاه موسیر در بعد از ظهر تا هنگام خیس شدن کامل برگ‌ها اسپری گردید. گیاهان تیمار شاهد با آب مقطر اسپری شدند.

تنش خشکی روی نیمی از گلدان‌ها در نیمه دوم اردیبهشت‌ماه شروع و تا پایان دوره رشد (اوایل تیرماه ۱۴۰۳) ادامه یافت. نحوه اعمال تنش خشکی بر اساس تعیین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک قبل از شروع آزمایش بود و حجم آب قابل استفاده در هر گلدان به‌میزان

چهار لیتر تعیین گردید که ۵۰ و ۸۰ درصد آن به‌ترتیب به‌عنوان سطح تنش خشکی و بدون تنش در نظر گرفته شد.

پس از نمونه‌برداری از برگ بوته‌ها، مقدار کلروفیل از روش Lichtenthaler و Buschmann (۲۰۰۱)، محتوای نسبی آب برگ از روش Martinez و همکاران (۲۰۰۷)، محتوای پرولین از روش Bates (۱۹۷۳)، پراکسیداسیون لیپید غشاء برگ از روش Heath و Packer (۱۹۶۸)، محتوای سلنیوم و روی از روش Juana و همکاران (۱۹۹۴) و محتوای آلیسین سوخ هم از روش Arzanlou و Bohlooli (۲۰۱۰) طبق پروتکل‌های مربوطه اندازه‌گیری و محاسبه شدند.

در اوایل تیرماه ۱۴۰۳ سوخ‌ها از خاک خارج و سپس وزن تر اندام‌ها از جمله برگ، ریشه و سوخ توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ (ABJ 220-4NM) اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) انجام گردید. نمودارها با نرم افزار Excel ترسیم گردید.

نتایج و بحث

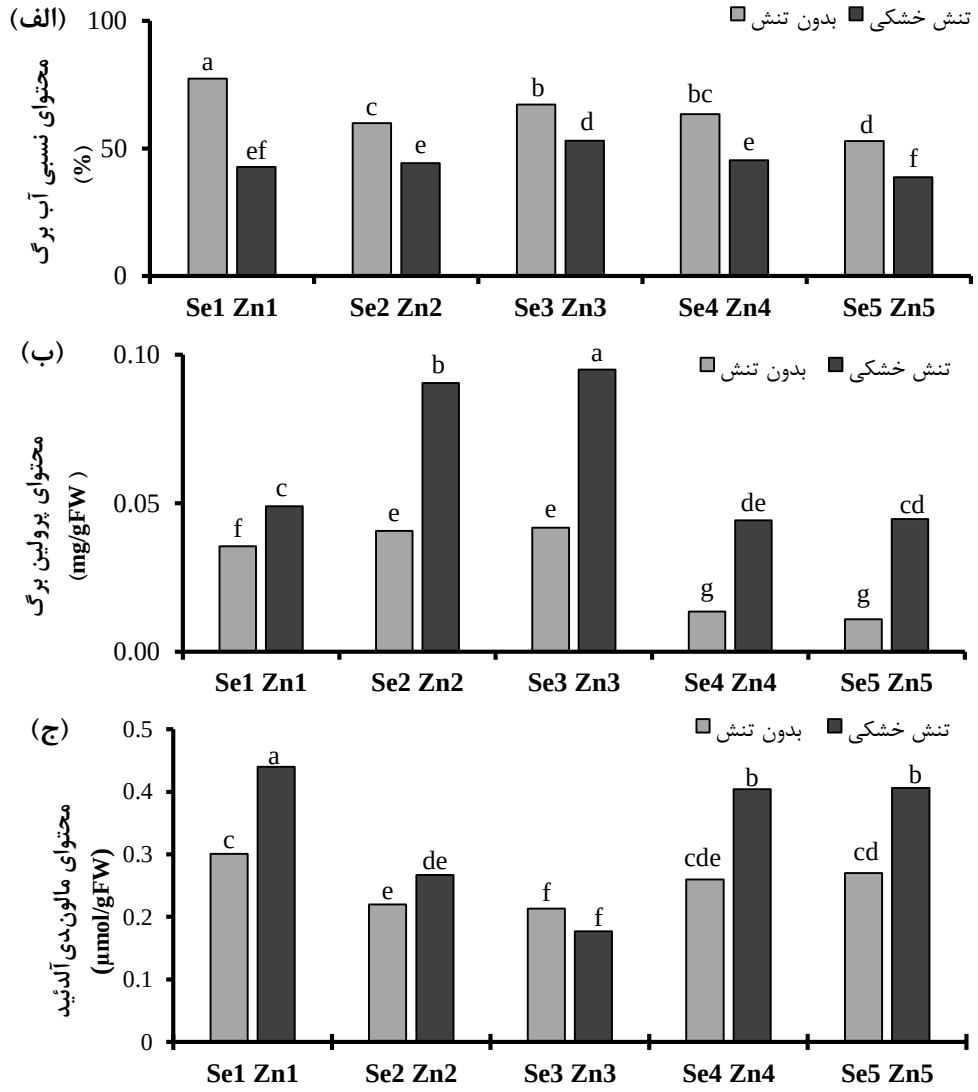
محتوای نسبی آب برگ

اثرات اصلی و متقابل خشکی و ترکیب عناصر بر محتوای رطوبت نسبی آب برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). در شرایط تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ در تیمار Se3Zn3، ۵۳ درصد به‌دست آمد که در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری بالاتر بود. سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند. در شرایط بدون تنش، محتوای نسبی آب برگ همه ترکیبات کودی کمتر از شاهد بود (شکل ۱ الف). افزایش میزان رطوبت نسبی آب برگ گیاهان محلول‌پاشی شده با عناصر سلنیوم و روی در شرایط تنش احتمالا به‌دلیل افزایش میزان جذب آب و حفظ رطوبت تعادلی اندام‌های گیاه است. علاوه‌بر این، نقش این عناصر در تنظیم پتانسیل اسمزی و باز و بسته شدن روزنه‌ها، میزان تعرق، اتلاف آب و نشت یونی نیز می‌تواند به حفظ رطوبت نسبی کمک نماید (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024; Rady *et al.*, 2019). افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی ناشی از کاربرد این عناصر نیز ممکن است موجب کاهش فعالیت رادیکال‌های آزاد اکسیژن و حفظ ساختار غشاء سلول‌ها شود (Kamali-Andani *et al.*, 2025; Shirvani-Naghani *et al.*, 2024). این نتایج با نتایج پژوهش‌های Singh و همکاران (۲۰۱۴) در گیاه سیر و Shekari و همکاران (۲۰۱۵) در گیاه فلفل تند (*Capsicum annuum* L.) در ارتباط با افزایش رطوبت نسبی اندام‌ها و کاهش نشت یونی غشاء در نتیجه مصرف سلنیوم و روی مطابقت دارد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس تاثیر تنش خشکی و غلظت‌های مختلف سلنیوم و روی بر برخی صفات فیزیولوژیک در موسیر ایرانی

منابع تغییر	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ	محتوای پرولین	محتوای مالون‌دی‌آلدئید	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها
تکرار	۳	۲۴/۸^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۱۰^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۷*
تنش خشکی (DS)	۱	۳۷۲۷**	۰/۰۱**	۰/۷۵**	۰/۹۰**	۰/۵۰**	۰/۸۰**
سلنیوم + روی (SeZn)	۴	۲۴۹**	۰/۰۳**	۰/۲۱**	۰/۱۶^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۰/۰۶*
(SeZn) × DS	۴	۱۹۱**	۰/۰۰۳**	۰/۰۳**	۰/۰۳^{ns}	۰/۱^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}
خطا	۲۷	۱۲/۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۶/۵	۲۱/۵	۱۷/۷	۱۳/۷	۱۳/۹	۱۱/۹

ns، * و ** به‌ترتیب بیان‌گر عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.



شکل ۱- تأثیر برهمکنش تنش خشکی و ترکیب سلنیوم و روی بر محتوای نسبی آب برگ (الف)، پرولین (ب) و مالون دی‌آلدئید (ج) در گیاه موسیر. Se1، Se2، Se3،Se4 و Se5 به‌ترتیب ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌گرم سلنیوم در لیتر؛ Zn1، Zn2، Zn3، Zn4 و Zn5 به‌ترتیب ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم روی در لیتر. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند.

محتوای پرولین

تاثیر تنش خشکی و سطوح ترکیبی سلنیوم و روی، همچنین اثرات متقابل آنها بر محتوای پرولین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). در شرایط تنش خشکی، محتوای پرولین در تیمارهای Se3Zn3 و Se2Zn2 به‌ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۰۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود که در مقایسه با تیمار شاهد (۰/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌ترتیب ۱۰۰ و ۸۰ درصد افزایش نشان داد. در شرایط بدون تنش، افزایش غلظت عناصر مصرفی تا تیمار Se3Zn3سطح پرولین را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد و پس از آن محتوای پرولین را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (شکل ۱ ب). محتوای پرولین در پاسخ به تنش محیطی افزایش پیدا می‌کند و در این آزمایش، غلظت‌های متوسط ترکیب سلنیوم و روی توانسته به افزایش سطح پرولین کمک نماید اما در غلظت‌های بالاتر، این مسأله اتفاق نمی‌افتد و حتی در شرایط بدون تنش، محتوای پرولین را کاهش می‌دهد. ممکن است در غلظت بالاتر این عناصر تا حدودی در گیاه سمیت ایجاد شده و اثرات مثبت ناشی از آنها را خنثی نماید. این نتایج با گزارش Singh و همکاران (۲۰۱۴) در بهبود محتوای پرولین، ترکیبات محلول برگ و پروتئین سنتتازها در گیاه سیر تحت اثر مصرف سلنیوم و

روی در شرایط تنش‌ها هم‌خوانی دارند. پرولین علاوه‌بر نقش خود بعنوان اسمولیت در تنظیم اسمزی، در ثبات بخشیدن به ساختارهای سلولی و پاکروبی رادیکال‌های آزاد اکسیژن و حفاظت از دستگاه فتوسنتزی نقش موثری دارد (Avendaño *et al.*, 2025)، همچنین این اسیدآمینه منبع مهم از نیتروژن، کربن و انرژی است که در شرایط تنش و به‌ویژه در طی دوره بهبودی بعد از تنش ضرورت دارند. با تنظیم وضعیت آب گیاه و افزایش فعالیت ترکیبات آنزیمی و غیرآنزیمی به‌ویژه اسیدهای‌آمینه تحت تاثیر خواص آنتی‌اکسیدانی سلنیوم و روی (Kamali-Andani *et al.*, 2025; Shirvani-Naghani *et al.*, 2024)، از تخریب پروتئین‌ها و پراکسیداسیون غشاء هم جلوگیری می‌شود و با افزایش محتوای ترکیبات آلی و محلول در برگ و تولید اسیمیلات‌ها به سازوکارهای دفاعی گیاه موسیر در شرایط تنش کمک می‌شود (Samreen *et al.*, 2017). مقایسه نتایج آزمایش حاضر با دیگر مطالعات نشان می‌دهد که نقش روی در افزایش محتوای پرولین گیاه موسیر در شرایط تنش خشکی بیشتر از سلنیوم است (Davoodinia *et al.*, 2025a, b).

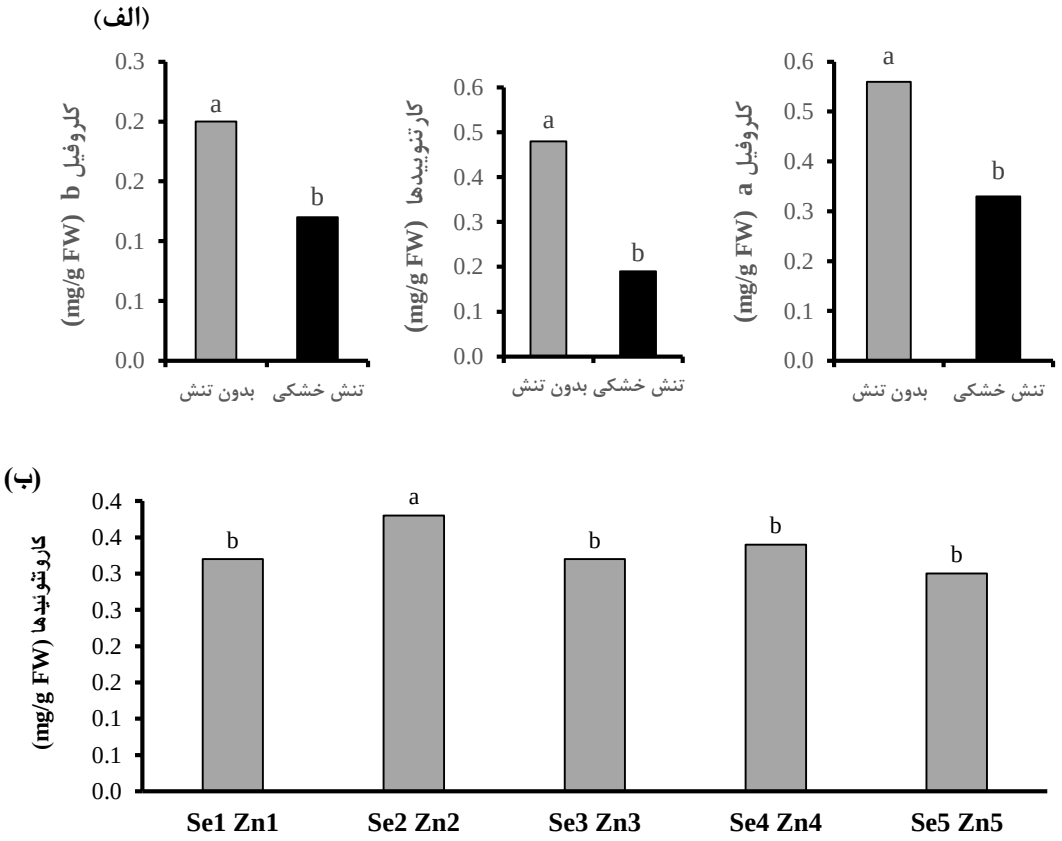
محتوای مالون‌دی‌آلدئید

محتوای مالون‌دی‌آلدئید موسیر تحت تأثیر اثرات اصلی و متقابل تنش خشکی و ترکیب سلنیوم و روی قرار گرفت (جدول ۱). در شرایط تنش خشکی مقدار مالون‌دی‌آلدئید در گیاهان محلول‌پاشی شده با ترکیب سلنیوم و روی به‌طور معنی‌داری کمتر از شاهد بود. در شرایط تنش خشکی، کمترین مقدار مالون‌دی‌آلدئید در تیمار Se3Zn3 با ۰/۱۸ میکرومول بر گرم وزن تر مشاهده شد که حدود ۵۹ درصد کمتر از شاهد بود. در شرایط بدون تنش هم روند تغییرات محتوای مالون‌دی‌آلدئید تا غلظت‌های Se2Zn2 و Se3Zn3 مشابه شرایط تنش خشکی بود ولی در غلظت‌های بیشتر عناصر، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد مشاهده نشد (شکل ۱ ج). مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد به‌طورکلی مقدار مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی افزایش پیدا کرده‌است و کاربرد هم‌زمان روی و سلنیوم در غلظت‌های دوم و سوم توانسته مقدار آن را تا حدود زیادی کاهش دهد. کاهش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی به‌ویژه تحت تیمار Se3Zn3 می‌تواند بیان‌گر تاثیرگذاری مفید این سطح از ترکیب عناصر برای کاهش اثرات تنش اکسیداتیو باشد. افزایش تنظیم‌کننده‌های اسمزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، همچنین کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشائی ناشی از کم شدن تولید انواع گونه‌های اکسیژن فعال و پیشگیری از تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن با افزایش مقاومت دیواره سلولی (Samreen *et al.*, 2017) از جمله دلایل کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای ذکر شده می‌باشد. این نتایج با گزارشات Rady و همکاران (۲۰۱۹) در گیاه گندم، Motallebifard و Bayat (۲۰۱۹) و Singh و همکاران (۲۰۱۴) در گیاه سیر هم‌خوانی دارد.

رنگدانه‌های فتوسنتزی

اثر خشکی بر رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌ترتیب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). در شرایط بدون تنش، محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها به‌ترتیب ۰/۵۶، ۰/۲۰ و ۰/۴۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود و تنش خشکی مقادیر این رنگدانه‌ها را به‌ترتیب به میزان ۴۱، ۴۰ و ۶۰ درصد کاهش داد (شکل ۲).

تحت تاثیر ترکیبات سلنیوم و روی بیشترین میزان کاروتنوئیدها در تیمار Se2Zn2 (۰/۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد که در مقایسه با شاهد (۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) افزایش ۱۶ درصدی را نشان داد. سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند (شکل ۲ ب). تنش خشکی علاوه‌بر کاهش بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی با تولید رادیکال‌های آزاد سطوح رنگدانه‌ها را در گیاه کاهش می‌دهد (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024; Rajabi *et al.*, 2019) که در نتایج آزمایش حاضر نیز این مشاهده گردید. کاروتنوئیدها علاوه‌بر نقش آنتی‌اکسیدانی به جذب نور در گیاه کمک می‌نمایند. به نظر می‌رسد در این آزمایش، غلظت پایین سلنیوم و روی به تحریک کاروتنوئیدها و افزایش جذب نور کمک کرده است (Rajabi *et al.*, 2019). از آن‌جا که در دیگر مطالعات نشان داده شده است که سلنیوم میزان کاروتنوئیدها را کاهش می‌دهد (Shokri *et al.*, 2025)، ممکن است دلیل افزایش سلنیوم در آزمایش حاضر غالبا توسط غلظت پایین عنصر روی باشد.



شکل ۲- اثر تنش خشکی (الف) و ترکیب سلنیوم و روی بر رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاه موسیر (ب). Se1، Se2، Se3،Se4 و Se5 به‌ترتیب ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌گرم سلنیوم در لیتر؛ Zn1، Zn2، Zn3، Zn4 و Zn5 به‌ترتیب ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم روی در لیتر. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند.

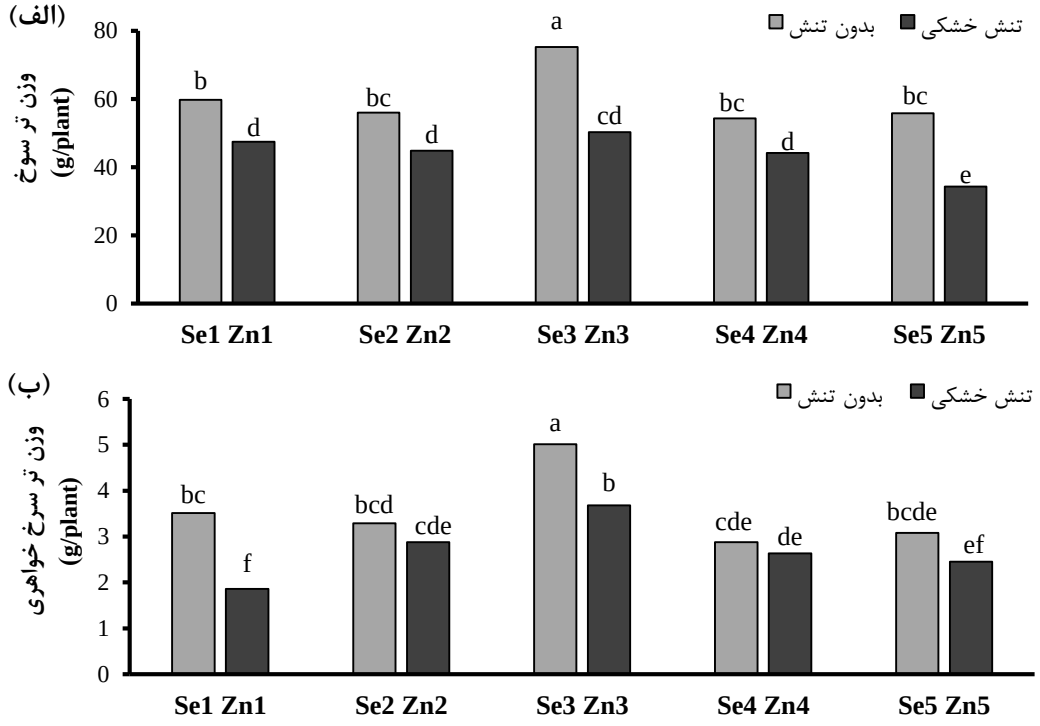
وزن تر برگ

تغییرات وزن تر برگ تحت تاثیر اثرات اصلی و متقابل تنش خشکی و سطوح سلنیوم و روی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۲). در شرایط تنش خشکی، وزن تر برگ در تیمار Se3Zn3 با ۲۳/۹ گرم نسبت به شاهد (۱۷/۸ گرم) حدود ۳۴ درصد بالاترین افزایش را نشان داد و در سایر ترکیبات اختلاف معنی‌داری با شاهد مشاهده نشد. در شرایط بدون تنش، وزن تر برگ در تیمار Se3Zn3 نیز دارای افزایش معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد بود (۱۰ درصد) (شکل ۳ الف). شرایط تنش خشکی وزن تر برگ را کاهش داد ولی در ترکیب سلنیوم و روی در تیمار Se3Zn3 توانست تا حدودی این خسارت را در شرایط تنش جبران کند.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تاثیر تنش خشکی و غلظت‌های مختلف سلنیوم و روی بر صفات مورفولوژیکی، محتوای روی، سلنیوم و آلیسین در موسیر ایرانی

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن تر برگ	وزن تر ریشه	وزن تر سوخ	وزن تر سوخ خواهری	محتوای سلنیوم	محتوای روی	محتوای آلیسین
تکرار	۳	۳۶/۶ ns	۱/۵ns	۹۰*	۲/۹**	۰/۰۰۴*	۱۴ns	۰/۷*
تنش خشکی (DS)	۱	۳۹۱**	۱۳۳**	۲۵۶۰**	۷/۳**	۰/۰۱**	۸۵۸**	۱۲**
سلنیوم + روی (SeZn)	۴	۱۲۸**	۱۹/۸**	۳۵۱**	۴**	۰/۰۲**	۱۳۵**	۰/۸**
(SeZn) × DS	۴	۱۷ **	۷/۳**	۹۱*	۰/۷*	۰/۰۰۱ns	۴ns	۰/۰۱ns
خطا	۲۷	۱/۶	۰/۷	۲۲	۰/۲	۰/۰۰۱	۱۳/۵	۰/۰۸
ضریب تغییرات (٪)		۵/۹	۱۷/۹	۸/۹	۱۶/۱	۱۰/۶	۸/۹	۱۵/۴

ns،* و ** به‌ترتیب بیان‌گر عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.



شکل ۴- تأثیر برهمکنش تنش خشکی و ترکیب سلنیوم و روی بر وزن تر وزن سوخ (الف) و وزن تر سوخ‌های خواهری (ب) در گیاه موسیر Se1، Se2، Se3،Se4 و Se5 به‌ترتیب ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌گرم سلنیوم در لیتر؛ Zn1، Zn2، Zn3، Zn4 و Zn5 به‌ترتیب ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم روی در لیتر می‌باشند. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند.

وزن تر سوخ خواهری تحت اثرات اصلی خشکی و سطوح عناصر در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آنها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). در شرایط تنش و عدم تنش خشکی، افزایش غلظت کاربرد سلنیوم و روی تا غلظت Se3Zn3، وزن تر سوخ خواهری را به‌طور معنی‌داری نسبت‌به شاهد افزایش داد. تحت هر دو شرایط رطوبتی، اثر غلظت‌های بالاتر سلنیوم و روی بر افزایش وزن سوخ خواهری کاهش یافت به‌طوری که در شرایط تنش در غلظت Se5Zn5 و در شرایط عدم تنش، در هر دو غلظت بالاتر از Se3Zn3 تفاوت معنی‌داری با شاهد ایجاد نگردید. در شرایط عدم تنش و تنش خشکی، بیشترین وزن سوخ خواهری در تیمار Se3Zn3 به‌ترتیب با ۵ و ۳/۷ گرم در بوته

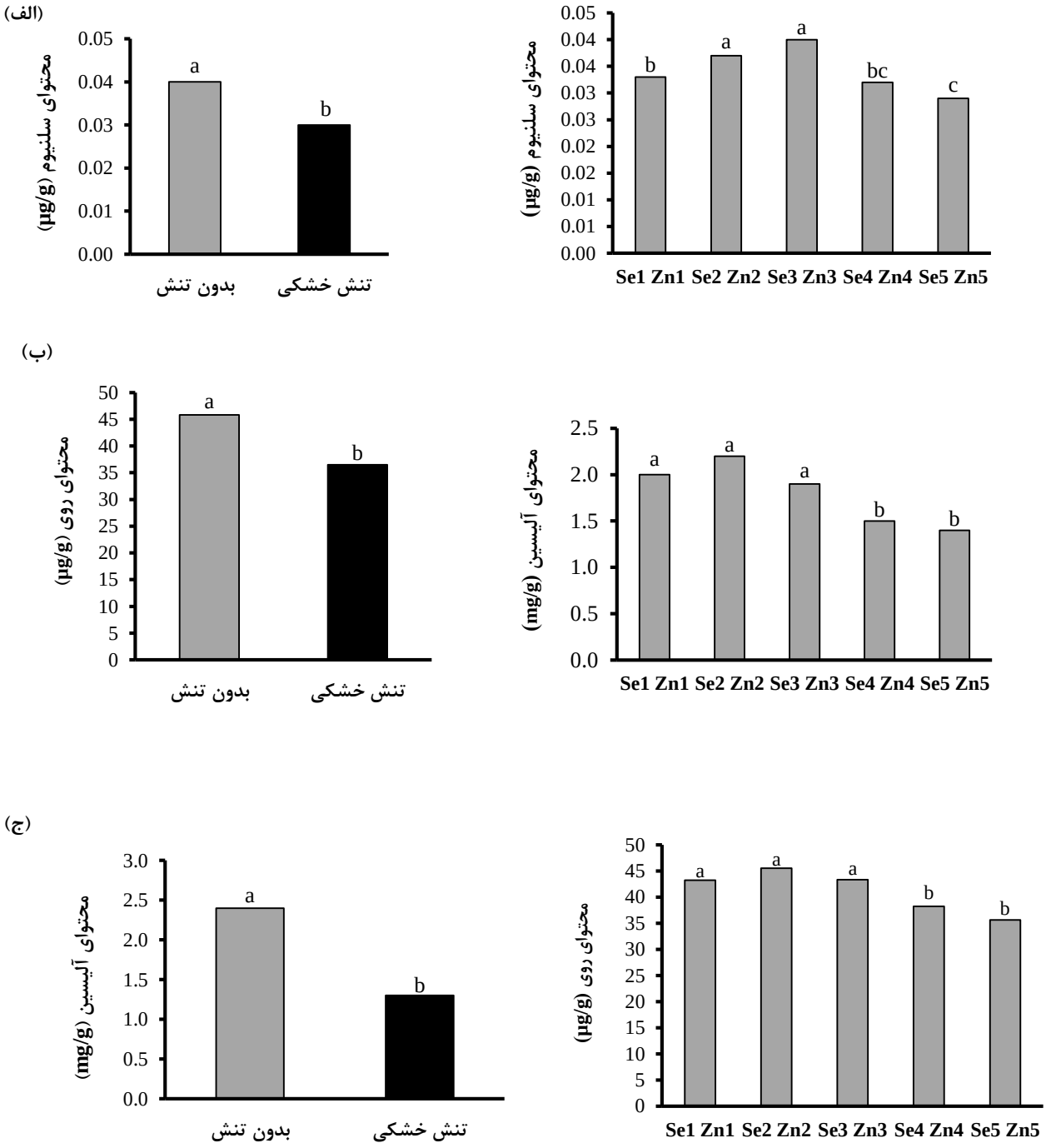
حاصل شد (شکل ۴ ب). Amerian و همکاران (۲۰۱۸) در گیاه پیاز خوراکی به نتایجی همسو دست یافتند. در آزمایش حاضر، رشد سوخ در شرایط تنش خشکی در غلظت‌های متوسط از ترکیب عناصر سلنیوم و روی بهبود قابل توجهی نشان داده است که ممکن است نتیجه افزایش توان فتوسنتزی گیاه و تخصیص بیشتر اسیمیلات‌های اندام ذخیره‌ای (سوخ‌ها) باشد. علاوه‌بر این تحریک بیشتر وزن سوخ‌های خواهری بوسیله سلنیوم و روی را می‌توان در راستای بقای گیاه در شرایط تنش به‌وسیله سلنیوم و روی تلقی نمود. Gholami و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند با مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی در سطح بدون سلنیوم و مصرف ۲۰ گرم در هکتار سلنیت سدیم، عملکرد دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌ترتیب ۱۲/۸ و ۱۴/۴درصد افزایش یافت.

محتوای سلنیوم، روی و آلیسین سوخ

اثر تنش خشکی و غلظت‌های ترکیبی سلنیوم و روی بر محتوای سلنیوم، روی و آلیسین در سوخ موسیر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل آنها معنی‌دار نگردید (جدول ۲). در شرایط تنش خشکی، محتوای روی، سلنیوم و آلیسین سوخ نسبت‌به شرایط بدون تنش به‌طور معنی‌داری به ۲۰، ۲۵ و ۴۶ درصد کاهش یافت (شکل ۵). با افزایش غلظت‌های کاربرد ترکیب عناصر سلنیوم و روی محتوای سلنیوم در سوخ تا سطح Se3Zn3 در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت و سپس در تیمار Se5Zn5 به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۵ الف). به لحاظ محتوای روی، افزایش غلظت عناصر سلنیوم و روی تا سطح Se3Zn3 در مقایسه با شاهد تغییر معنی‌داری ایجاد نکرد ولی افزایش بیشتر غلظت کاربرد این عناصر به‌طور معنی‌داری محتوای روی را در مقایسه با شاهد کاهش داد (شکل ۵ ب).

روند تغییرات محتوای آلیسین سوخ تحت تأثیر ترکیب عناصر سلنیوم و روی مشابه محتوای روی بود. به‌عبارت دیگر، افزایش غلظت این دو عنصر پس از تیمار Se3Zn3، مقدار آلیسین را به‌طور معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۵ ج).

کاهش محتوای عناصر و آلیسین در سوخ می‌تواند ناشی از اثرات مخرب تنش بر فرایندهای فیزیولوژیکی درون گیاه و در نتیجه، جذب و تجمع عناصر و متابولیت‌های گیاه باشد (Woo *et al.*, 2024; Shirvani-Naghani *et al.*, 2024). بررسی نتایج اثرات کاربرد جداگانه سلنیوم و روی نشان داد نقش عنصر روی در افزایش مقدار آلیسین سوخ نسبت‌به سلنیوم بیشتر است (Davoodinia *et al.*, 2025a,). در مطالعات قبلی مشخص شده است تامین مطلوب رطوبت و سازگاری هورمونی بدون ایجاد مانع در سنتز ترکیبات مفید مانند آلیسین و سایر متابولیت‌های ارگانوسولفور را که ارزش غذایی و دارویی سیر را تعیین می‌کنند، بهبود می‌دهد (Woo *et al.*, 2024). محلول‌پاشی سلنیوم نیز با افزایش کربوهیدرات‌ها، فلاونوئیدها، سلنیوم و آلیسین، ارزش غذایی را سیر را بهبود می‌بخشد (Shokri *et al.*, 2025). همچنین مصرف سولفات روی بهترین نتیجه در بهبود صفات کمی و کیفی گیاه سیر نشان داد (Razaq *et al.*, 2019). نتایج پژوهش Hajiboland و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که در تیمار سلنیوم و روی (۱/۵ درصد)، عملکرد دانه و محتوای روغن در کلزا (*Brassica napus* L.) در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۲۳ و شش درصد افزایش یافت. در مطالعات قبلی نشان داده شده است که کاربرد سولفات روی به میزان ۲۰ کیلوگرم در هکتار، محتوای روی و آلیسین سوخ-های گیاه سیر را به‌ترتیب ۱۰ و ۳۵ درصد افزایش داد (Zare Pak Ziaberi & Majidian, 2022).



شکل ۵- اثر تنش خشکی و ترکیب سلنیوم و روی بر محتوای

سلنیوم (الف)، روی (ب) و آلیسین سوخ (ج) در گیاه موسیر

Se1، Se2، Se4،Se3 و Se5 به‌ترتیب ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌گرم سلنیوم در لیتر؛ Zn1، Zn2، Zn3، Zn4 و Zn5 به‌ترتیب،۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم روی در لیتر می‌باشند. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند.

نتیجه‌گیری کلی

در این آزمایش، کاربرد شش میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌علاوه ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی بیشترین تاثیر مثبت بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه موسیر داشت که با بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و توان فتوسنتزی از اختلال زیاد در شاخص‌های رشدی ممانعت نمود و با تقویت مکانیسم بیوشیمیایی تحمل این گیاه را به تنش خشکی افزایش داد و نهایتا موجب بهبود پتانسیل تولید و کیفیت محصول در شرایط تنش خشکی گردید. علاوه‌بر این، کاربرد توأم دو عنصر سلنیوم و روی در شرایط بدون تنش نیز پتانسیل تولید سوخ و کیفیت سوخ‌های تولیدی را از لحاظ محتوای سلنیوم ارتقا داد. در مجموع، محلول‌پاشی سلنیوم و روی به‌ترتیب به مقدار ۶ و۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای افزایش تولید موسیر و همچنین حفظ کیفیت سوخ به‌ویژه محتوای سلنیوم پس از تأیید نتایج در آزمایش‌های مزرعه‌ای توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه شهرکرد و پارک علم و فناوری استان چهارمحال و بختیاری برای اجرای این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

منابع

Amerian, M., Dashti, F., & Delshad, M. (2018). Effects of different levels selenium and nitrogen on some growth and biochemical characteristics of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Journal of Plant Production Research*, *25*, 119-135. https://doi.org/10.22069/jopp.2018.12032.2101. (In Persian).

Arzanlou, M., & Bohlooli, S. (2010). Introducing of green garlic plant as a new source of allicin. *Food Chemistry*, *6*, 12-15. https://doi.org/0.1016/j.foodchem.2009.10.009

Alvan, H. A., Jabbarzadeh, Z., Fard, J. R., & Noruzi, P. (2025). Selenium foliar application alleviates salinity stress in sweet william (*Dianthus barbatus* L.) by enhancing growth and reducing oxidative damage. *Scientific Repor*ts. *15*, 5570. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89463-6

Avendaño, V. A., Sampedro-Guerrero, J., Gómez-Cadenas, A., & Clausell-Terol, C. (2025). Modern approaches to enhancing abiotic stress tolerance using phytoprotectants: A focus on encapsulated proline. Journal of Plant Physiology, *315*, 154602. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2025.154602

Aytak, Z., Gulmezoglu, N., Sirel, Z., & Tolay, I. (2015). The effect of zinc on yield, yield components and micronutrient concentrations in the seeds of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). Network of Bitany, *Horticulture and Agrology*, *42*, 202-208. https://doi.org/10.15835/nbha4219405

Bates, L. (1973). Rapid determination of free Prolin for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207.

Burmistrov, D. E., Shumeyko, S.A., Semenova, N. A., Dorokhov, A. S., & Gudkov, S.V. (2025). Selenium nanoparticles (Se NPs) as agents for agriculture crops with multiple activity: A Review. *Agronomy*, *15*, 1591. https://doi.org/10.3390/agronomy15071591

Dang, K., Tian, H., Bai, J., Fu, P., Cui, J., Ji, D., Shao, X., Geng, Y., Zhang, Q., & Guo L. (2025). Ameliorating effect of zinc on water transport in rice plants under saline-sodic stress. *Frontier in Plant Science*. *16*, 1616333. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1616333

Davoodinia, S., Fallah, S., Rafieiolhossaini, M., & Abbasi Surky, A. (2025a). The effect of zinc sulfate on growth, physiological and biochemical properties of persian shallot (*Allium hirtifolium* Boiss.) under drought stress and zinc deficiency in soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. (In Persian). https://doi.org/10.22069/ejsms.2026.23090.2170

Davoodinia, S., Fallah, S., Rafieiolhossaini, M., Abbasi Surki, A., Roshandel, P. (2025b). The effect of selenium on growth changes, physiological and biochemical characteristics of Iranian shallot (*Allium hirtifolium* Boiss.) under drought stress conditions. *Plant Process and Function*. (In Persian). https://doi.org/10.22034/14.69.41

El-Shazoly, R. M., Othman, A. A., Zaheer, M. S., Al-Hossainy, A. F., & Abdel-Wahab, D. A. (2025). Zinc oxide seed priming enhances drought tolerance in wheat seedlings by improving antioxidant activity and osmoprotection. *Scientific Reports*, *15*, 3863. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86824-z

Fallah, S., Malekzadeh, S., & Pessarakli, M. (2018). Seed priming improves seedling emergence and reduces oxidative stress in Nigella sativa under soil moisture stress. *Journal of Plant Nutrition*, *41*(1), 29–40. https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381719

Fallah, S., Mouguee, S., Rostaei, M., Adavi, Z., & Lorigooini, Z. (2020). Chemical compositions and antioxidant activity of essential oil of wild and cultivated Dracocephalum kotschyi grown in different ecosystems: A comparative study. *Industrial Crops and Products*, *143*, 111885. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111885

Gharehbaghli, N., & Sepehri, A. (2022). The effect of selenium and hydrogen sulfide on growth and nutrient uptake of garlic (*Allium sativum* L.) seedlings under the influence of lead and salinity stress. *Journal of Plant Research* (Iranian Journal of Biology), *35*(3), 579-591. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.23832592.1401.35.3.6.4

Gholami, M., Sajedi, N., & Gomarian, M. (2012). Response of agronomic traits of durum wheat to the use of superabsorbent polymer for zinc and selenium. *New Findings in Agriculture*, *7*, 137-147. (In Persian).

Hajiboland, R., Keyvanfar, N., Joudmand, A., Rezaee, H., & Yousefnejad, M. (2015). Effect of selenium treatment on drought tolerance of canola plants. *Journal of Plant Research*, *27*(4), 557-568. (In Persian).

Hamzah Saleem, M., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontier in Plant Science*, *7*, *13*, 1033092. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092

Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplast. Kinetics and stoichionetry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*,189-198.

Ismail, S., Jalilian, F. A., Talebpour, A. H., Zargar, M., Shameli, K., Sekawi, Z., & Jahanshiri, F. (2012). Chemical composition and antibacterial and cytotoxic activities of (*Allium hirtifolium* Boiss.) *Biomed Research Intternational*, *2013*, 696835. https://doi.org/10.1155/2013/696835

Juana, P., Miguel, N., Herminia, L. & Maria, C. L. (1994). Determination of selenium levels in vegetables and fruits by hydride generation atomic absorption spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *42*, 2848-2851.

Kamali-Andani, N., Fallah, S., & Peralta-Videa, J. R. (2025). Selenium nano bio-enrichment of mung bean (*Vigna*

radiata L.): Impacts on physiological characteristics and seed quality at the greenhouse and semi-natural conditions. *Plant Nano Biology*, *13*, 100163. https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100163

Karimi, N., & Saiedikhah, Z. (2018). Effect of selenium on growth and some physiological parameters of Allium iranicum Wendelbo. and *Allium ampeloprasum* L. .*Plant Process and Function*, *7*, 183-198 . https://doi.org/20.1001.1.23222727.1397.7.24.1.6

Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids extraction, isolation and purification. Current Protocols in Food Analytical Chemistry (CPFA), (Supplement 1), (John Wiley, New York). Unit F4.2.1-F4.2.6.

Martinez, J.P., Silva, H., Ledent, J.F., & Pinto, M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal Agronomy*, *26*, 30-38.

Moguee, S., Fallah, S., Pokhrel, L. R., & Adavi, Z. (2026). Bulb-priming followed by foliar magnetite nanoparticle applications improve growth, bulb yield, antioxidant activities, and iron fortification in shallot in semi-arid regions. *Plants*. *15*(2), 279. https://doi.org/10.3390/plants15020279

Motallebifard, R., & Bayat, F. (2019). Zinc and manganese nutrients influence on yield and some qualitative attributes of Hamedan white garlic. *Applied Soil Research*, *7*, 123-134. (In Persian).

Rady, M. M., Kuşvuran, A., Alharby, H. F. Alzahrani, Y., & Kuşvuran, S. (2019). Pretreatment with proline or an organic bio-stimulant induces salt tolerance in wheat plants by improving antioxidant redox state and enzymatic activities and reducing the oxidative stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*, 449–462 https://doi.org/10.1007/s00344-018-9860-5

Rajabi, A., Ehsanzadeh, P., Razmjoo, J. (2019). Partial relief of drought-stressed fennel (Foeniculum vulgare Mill.) in response to foliar-applied zinc. *Pedosphere*, *29*, 752-763. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60438-7

Rostaei, M., Fallah, S., Carrubba, A., & Lorigooini, Z. (2024). Organic manures enhance biomass and improve content, chemical compounds of essential oil and antioxidant capacity of medicinal plants: A review. *Heliyon*, *10*, e3669 3. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36693

Razaq, T., Madiha, U., Najeebullah, M., & Riaz, M. (2019). Effect of zinc and boron on the growth and yield of gulabi variety of garlic (*Allium sativum* L.) under agro-climatic condition of Peshawar. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, *14*(1), 11-15.

Sabzevari, S., Kafi, M., Bannayan Aval, M., & Khazaie, H. R. (2015). Investigation of thermal requirement, growth and yield characteristics of two species of Persian shallot (*Allium altissimum* and *A. hertifulium*) in different density, bulb weight and flowering stem removing. *Journal of Agroecology*, *6*(4), 836-847. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jag.v6i4.53650

Samreen, T., Shah, H. U., Ullah, S., & Javid, M. (2017). Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mung beans plant (*Vigna radiata*). *Arabian Journal of Chemistry*, *7*, 145-152.https://doi.org/10.1016/j.arabic.2013.07.005

Shekari, L., Kamelmanesh, M. M., Mozafarian, M., & Sadeghi, F. (2015). Beneficial effects of selenium on some morphological and physiological trait of hot pepper (*Capsicum anuum*). *Journal of Horticulture Science*, *29*, 594-600. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v29i4.32110

Shirvani-Naghani, S., Fallah, S., Pokhrel, L. R., & Rostamnejadi, A. (2024). Drought stress mitigation and improved yield in Glycine max through foliar application of zinc oxide nanoparticles. *Scientific Reports*, *14*(1), 27898. https://doi.org/10.1038/s41598-024-78504-1

Singh, S., Ram, M., & Yadav, N. (2014). Effect of phosphorus and zinc application on the growth and yield of geranium (*Pelarconum Graveolens* L.) intercropped with garlic (*Allium Sativum* L.). *Indian Journal of Agricultural Research*, *48*, 1-8. https://doi.org/10.5958/j.0976-058X.48.1.001

Sorkhi, M., Zare Mehrjerdi, M., Karimi, S., & Tavallali, V. (2025). Foliar application of selenium improves drought tolerance and quality of *Allium sativum* L. *South African Journal of Botany*, *185*, 224-234. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.08.004

Woo, U. J., Moon, Y. H., Sim, H. S., Lee, T. Y., & Shin, H. R. (2024). Changes in biochemical metabolites and growth of garlic by evapotranspiration-based irrigation regime. *Annals of Agricultural Sciences*, *69*, 100378 .https://doi.org/10.1016/j.aoas.2025.02.002

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. Horticulturae, *7*, 50. https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050

Zare Pak Ziaberi, S. S., & Majidian, M. (2022). Effects of zinc, boron, and sulfur on quantitative and qualitative characteristic of Allium sativum L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *38*, 592-607. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.358786.3174

Zemanová, V., Pavlíková, D., Novák, M., & Hnilička, F. (2024). The dual role of zinc in spinach metabolism: Beneficial × toxic. *Plants*, 13, 3363. https://doi.org/10.3390/plants132333