University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

The Effect of Zinc Nanosulfate and Sulfur Fertilizer on the Essential Oil and Phytochemical Characteristics of Black Seed (*Nigella sativa*) under Drought Stress

Ali Habib Makki Allesani[1] | Mohammad Mirzaei Heydari[2]✉

1. International Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. Email: ali.h.m9@utq.edu.iq
2. Corresponding Author, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. Email: mirzaeiheydari@khuisf.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: October 26, 2024
Received in revised form: December 27, 2024
Accepted: December 29, 2024
Published online: June 22, 2025

Keywords:
Black seed,
essential oil,
nanomaterials,
sulfur fertilizer,
zinc sulfate.

ABSTRACT

This research was to investigate the zinc nanosulfate and sulfur fertilizer on the essential oil and phytochemical characteristics of *Nigella sativa* under drought stress in 2023 at the Khatunabad Agricultural Research Station, Isfahan. The research was conducted in a randomized complete block design with three replications and three factors in the form of split factorial. The first factor included drought stress in three levels without stress, 75% and 50% of the field capacity. The second factor was sulfur fertilizer at three levels (zero, 150, and 300 $kgha^{-1}$ and the third factor was zinc nanosulfate at three levels including zero, two, and four per thousand. The results showed that a large amount of zinc absorbed (0.082%) was obtained in the triple interaction among the condition of without drought stress, application of 150 $kgha^{-1}$ of sulfur fertilizer and four per thousand zinc sulfate, which was 32% more than 50% of field capacity and no zinc sulfate or sulfur fertilizer. The highest amount of essential oil in the treatment of 300 $kgha^{-1}$ sulfur fertilizer and drought stress of 50% of the field capacity was obtained as 0.31%. This increase in yield can lead to the improvement of yield components such as the weight of one thousand seeds, the number of reproductive organs, and seed number in the reproductive organ, which lead to the increase of seed yield. Also, in this treatment, the amount of thymol increased as the most important quality indicator of this plant.

Cite this article: Habib Makki Allesani, A., & Mirzaei Heydari, M. (2025). The effect of zinc nanosulfate and sulfur fertilizer on the essential oil and phytochemical characteristics of black seed (*Nigella sativa*) under drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *56*(2), 61-76. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.384342.655106.

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2024.384342.655106

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

اثر نانوسولفات روی و کود گوگرد بر اسانس و صفات فیتوشیمیایی سیاهدانه (*Nigella sativa*) تحت تنش خشکی

علی حبیب مکی آل ثانی[۱]، محمد میرزایی حیدری[۲]✉

۱. دانشکده بین‌الملل کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: ali.h.m9@utq.edu.iq

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: mirzaeiheydari@khuisf.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
اسانس،
سولفات روی،
سیاهدانه،
کود گوگرد،
نانومواد.

چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر نانوسولفات روی و کود گوگرد بر اسانس و صفات فیتوشیمیایی سیاهدانه (*Nigella sativa*) تحت تنش خشکی در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خاتون-آباد اصفهان انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و سه فاکتور به صورت اسپلیت‌فاکتوریل اجرا شد. عامل اول شامل تنش خشکی در سه سطح بدون تنش، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه بود. عامل دوم کود گوگرد در سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار و عامل سوم نانوسولفات روی در سه سطح شامل غلظت صفر، دو و چهار در هزار بود. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار روی جذب‌شده توسط گیاه به مقدار ۰/۰۸۲ درصد در تیمار اثر متقابل سه‌گانه بین حالت عدم اعمال تنش خشکی، مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و چهار در هزار سولفات روی حاصل شد که ۳۲ درصد بیشتر از حالت اعمال تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف هر یک از کودهای سولفات روی یا کود گوگرد بود. بیشترین مقدار اسانس به مقدار ۰/۳۱ درصد در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد. این افزایش عملکرد می‌تواند ناشی از بهبود اجزای عملکرد مانند وزن هزار دانه، تعداد اندام زایشی و تعداد دانه در اندام زایشی باشد که افزایش عملکرد دانه را در پی داشته است. همچنین در تیمار فوق مقدار تیمول به عنوان مهمترین شاخص کیفی این گیاه افزایش یافت.

استناد: حبیب مکی آل ثانی، ع.، و میرزایی حیدری، م. (۱۴۰۴). اثر نانوسولفات روی و کود گوگرد بر اسانس و صفات فیتوشیمیایی سیاهدانه (*Nigella sativa*) تحت تنش خشکی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۲)، ۶۱-۷۶. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.384342.655106

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

۱. مقدمه

گیاهان دارویی، برای هزاران سال مهمترین بخش از شیوه‌های پزشکی سنتی بوده (Ashkiani *et al.*, 2021) و هنوز هم بخش قابل توجهی از پزشکی مدرن را در درمان و پیشگیری از بیماری‌ها تشکیل می‌دهند (Ye *et al.*, 2018). حدود ۷۰ درصد از جمعیت جهان گیاهان دارویی را به دلیل کم‌هزینه‌بودن، دسترسی آسان، عوارض جانبی کمتر و خواص دارویی مختلف مورد مصرف قرار می‌دهند (Rezapour *et al.*, 2021). امروزه اهمیت گیاهان دارویی و طب سنتی و شناساندن نقش حیاتی آنها در پیشبرد اهداف ملی و جهانی برای تحقق سلامت و نشاط جامعه، خودکفایی دارویی، ایجاد اشتغال، توسعه اقتصادی، امنیت غذایی و حفظ ذخایر ژنتیکی و حضور فعال در بازارهای جهانی برکسی پوشیده نیست. گیاهان دارویی و عملکرد متابولیت‌های ثانویه آنها همانند سایر گیاهان زراعی، تحت تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های ژنتیکی، بوم‌شناختی، فیزیولوژیکی، محیطی و مدیریتی هستند (Safari & Mirzaei Heydari, 2018; Farhoudi & Modhej, 2018).

سیاه‌دانه، یا «سُنیز» گیاهی یک‌ساله، گلدار و بومی اروپای شرقی و کشورهای بلغارستان، قبرس، رومانی و غرب آسیا و کشورهای ایران، ترکیه و عراق است اما امروزه در مناطق دیگری از اروپا و آسیا نیز می‌روید (Asgharzadeh & Edalateyan Kharazi, 2023). گیاه سیاهدانه دولپه، علفی و متعلق به خانواده آلاله بوده که نام علمی آن (*Nigella sativa* L.) می‌باشد. قسمت‌های مورد استفاده در سیاه‌دانه، دانه و روغن فرار آن می‌باشد. برای دانه این گیاه خواصی مانند شیرآوری، ضد نفخ، مسهل، ضد انگل، ضد باکتری، ضد صرع، ضد ویروس و کاهنده قند خون را ذکر نموده‌اند. تاثیر عسل سیاه‌دانه در پزشکی سنتی برای زیادکردن شیر به اثبات رسیده است (Farhoudi & Modhej, 2018). در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، سطح زیر کشت سیاهدانه در ایران حدود ۱۸۰۰ هکتار بوده است که خراسان رضوی و زنجان به‌عنوان دو منطقه مهم برای کشت این گیاه شناخته می‌شوند؛ میانگین تولید این گیاه ۱۱۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (Asgharzadeh *et al.*, 2023).

تنش کم‌آبی یکی از عوامل محدودکنندهٔ رشد این گیاه است. نتایج پژوهش‌های مختلف بیانگر کاهش رشد (MirzaeiHeydari & Bagheri, 2022) و عملکرد دانه تحت تأثیر تنش کمبود آب می‌باشد. تنش خشکی توسط عوامل محدودکننده روزنه‌ای و غیر روزنه‌ای فتوسنتز را کاهش می‌دهد. از عوامل محدودکننده غیر روزنه‌ای می‌توان به کاهش و یا توقف سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها اشاره کرد (Bahamin *et al.*, 2021). عملکرد متابولیت‌های ثانویه و اسانس گیاهان دارویی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل بوم‌شناختی، ژنتیکی، فیزیولوژیکی، مدیریتی و محیطی قرار می‌گیرند. تنش‌های غیر زیستی، عملکرد محصولات راکاهش می‌دهند. آسیب گیاهان مناطق تحت تنش خشکی در شرایطی که گیاه با کمبود عناصر تغذیه‌ای مواجه باشد شدیدتر است (Baethgen & Alley, 2015).

تنش خشکی یکی از رایج‌ترین تهدیدات محیطی برای رشد و بهره‌وری گیاهان در اکوسیستم است. تنش شدید خشکی منجر به پژمردگی و ریزش کل برگ‌ها می‌شود و بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف مانند جوانه‌زنی، حرکت روزنه‌ها و فعالیت فتوسنتزی تأثیر منفی می‌گذارد (Mirzaei Heydari, 2021). علاوه بر این، خشکی باعث تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) از جمله سوپراکسید، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال هیدروکسیل (OH) می‌شود که می‌تواند باعث آسیب اکسیداتیو به اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها و لیپیدها شود (Bettaieb *et al.*, 2012). در واقع، گیاهان از طیف وسیعی از تنش‌های محیطی رنج می‌برند و لازم است که واکنش گیاهان به‌صورت همزمان یا متوالی در معرض خشکی و تنش‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرد (Candan *et al.*, 2018). نتایج یک مطالعه نشان داده است که ترکیب خشکی با گرما در مقایسه با تنش خشکی اعمال‌شده به تنهایی، باعث آسیب شدیدتری شده است (Rezapour *et al.*, 2021). برخی عوامل نظیر عناصر غذایی و کوددهی بر تغییر وضعیت گیاه در حالت تنش خشکی موثر هستند (Abbasi *et al.*, 2022; Heydari *et al.*, 2019) که کودهای نیتروژن و گوگرد، روی و فسفر از آن جمله می‌باشند؛ وسعت زیادی از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌دلیل آهکی‌بودن دچار کمبود عناصر ریزمغذی، به‌ویژه روی هستند (Bahamin *et al.*, 2019). در صورتی‌که میزان روی خاک کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد یا غلظت آن در گیاه ذرت از ۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمتر باشد، گیاه دچار کمبود روی می‌شود (Mirzaei Heydari & Mishkhaszadeh, 2023).

روی به‌عنوان کوفاکتور در آنزیم‌های متعددی نظیر آنزیم کربونیک‌آنیدراز، سوپراکسیددیسموتاز و بیوسنتز پروتئین‌ها (Mirzaei Heydari, 2013)، کربوهیدرات‌ها و ... ایفای نقش می‌کند. برآیند عملکردی موارد فوق بر عملکرد کمی و کیفی محصول تاثیر خواهد داشت. از طرفی، روی به‌عنوان کوفاکتور در ساختار آنزیم Cu/Zn-SOD عمل می‌کند (Cohen *et al.*, 2021). این آنزیم نقش موثری در جمع‌آوری انواع اکسیژن فعال و کاهش میزان صدمات وارد شده به ساختار بیومولکول‌ها و سلول دارد. کمبود روی قابل دسترس گیاه می‌تواند باعث تشدید کاهش عملکرد در زمان وقوع تنش خشکی شود. همچنین عنصر روی در بسیاری از آنزیم های مرتبط با تنش، به‌عنوان کوفاکتور عمل می‌کند (Dimkpa *et al.*, 2019). با در نظر گرفتن این فرآیندها وزن خشک برگ نیز در اثر کمبود روی کاهش می‌یابد. محلول‌پاشی روی به صورت نانوذرات (Bbaei *et al.*, 2018) نسبت به اکسید معمولی تأثیر بیشتری بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه ماش داشت (Mirzaei *et al.*, 2018).

خواص گوگرد در کشاورزی زیاد است؛ گوگرد نقش بسیار مهمی در حاصلخیزشدن خاک مزرعه کشاورزی، کاهش اسیدیته خاک، بالابردن مصرف کودها در خاک، افزایش دسترسی گیاهان به مواد غذایی و ریزمغذی‌ها دارد. در بیشتر مناطق ایران خاک مزارع به صورت آهکی بوده و مواد آلی خاک نیز کم می‌باشد؛ به همین دلیل، خاک اکثر مزارع دارای تنش خشکی است که می‌توان برای رفع مشکلات و حاصلخیزی خاک از کود گوگردی استفاده کرد (Fathi & Tari, 2016). اخیراً، مطالعه‌ای نشان داد که پیش‌تیمار با گوگرد از نهال‌های ارزن دم‌روباهی در برابر آسیب ناشی از تنش خشکی محافظت می‌کند (Lotfi *et al.*, 2021). از روشهای جدید افزایش تحمل به تنش در گیاهان استفاده از کودهای حاوی عناصر ریزمغذی و همچنین کود گوگرد است که نقش مهمی در تأمین عناصر غذایی گیاهان مانند روی تحت شرایط تنش خشکی دارد؛ لذا پژوهش اخیر از این منظر دارای نوآوری است و نقش گوگرد و نانوسولفات روی در تحمل به خشکی و افزایش اسانس و بهبود صفات فیتوشیمیایی سیاهدانه را بررسی می‌کند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان) واقع در منطقه خاتون‌آباد اصفهان با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی اجرا شد. ارتفاع مزرعه از سطح دریا ۱۵۵۵ متر و طبق تقسیم‌بندی کوپن دارای اقلیم خشک و بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نیمه‌سرد می‌باشد. متوسط بارندگی و درجه حرارت سالیانه به‌ترتیب ۱۲۱ میلی‌متر و ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد است. تأمین آب ایستگاه از دو طریق آب کانال دریافتی از رودخانه زاینده‌رود و چاه‌های آب زیرزمینی است. قبل از اجرای آزمایش از خاک نمونه‌برداری شد (جدول ۱).

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	روی	گوگرد	نیتروژن کل	کربن آلی	هدایت الکتریکی	اسیدیته	بافت	عمق
(پی پی ام)				(درصد)		(دسی‌زیمنس بر متر)	-	-	(سانتی‌متر)
۱۳۰	۸/۸	۱/۲	۵۲۱	۰/۰۴۱	۰/۸۰	۰/۸۸	۷/۰	لومی	۳۰-۰

پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و سه فاکتور به صورت اسپلیت‌فاکتوریل (به‌دلیل اجرای تنش خشکی در کرت‌های اصلی و اعمال کود گوگرد و نانوسولفات روی در کرت‌های فرعی و اهمیت یکسان آنها) اجرا شد. عامل اول شامل تنش خشکی در سه سطح بدون تنش، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه بود. عامل دوم کود گوگرد در سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (Amani Machiani *et al.*, 2023) و عامل سوم نانوسولفات روی در سه سطح شامل غلظت صفر، دو و چهار در هزار (Dimkpa *et al.*, 2019) بود. فاصله بین کرت‌ها نیم متر، بین کرت‌های اصلی دو متر و بین تکرارها سه متر در نظر گرفته شد. در این بررسی منبع کود گوگرد، سولفور تولیدی شرکت صنایع شیمیایی کارون و همچنین منبع کود روی نیز نانوسولفات روی تولیدی شرکت گرومان مشهد بود.

زمین محل آزمایش در بهار شخم و سپس دیسک زده شد. ابعاد هر کرت فرعی ۵×۳ متر مربع، شامل شش ردیف کاشت به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر بود. فاصله روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بین کرت‌های فرعی نیم متر و برای کرت‌های اصلی یک متر در نظر گرفته شد. قبل از کاشت بذور، با توجه به نتایج تجزیه شیمیایی خاک در صورت نیاز کودهای فسفاته و پتاس به صورت یکسان در سطح مزرعه پخش شد. کاشت در اسفندماه به صورت دستی انجام شد. آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای (نشتی) انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذور، انجام شد. گیاهان تا مرحله شش‌برگی به‌طور منظم و یکنواخت آبیاری شدند. ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم از طریق محاسبه پتانسیل ماتریک توسط تانسیومتر فلزی انجام شد. در این تحقیق برای تعیین ظرفیت زراعی و حجم آب مورد نیاز گیاه در هر دور آبیاری از روش کمبود رطوبت خاک (روش وزنی) نسبت به FC (θ -Fc) استفاده شد. با در نظر گرفتن ضریب گیاهی (Kc)، میزان تبخیر و تعرق بالقوه، مشخص و بر اساس تخلیه رطوبتی و طبق تیمارهای مذکور تا رسیدن رطوبت خاک به حد FC، میزان آب مورد نیاز محاسبه و حجم آب مورد نیاز هر کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. عمق موثر ریشه ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. چگالی ظاهری خاک ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. در ابتدای کار و پس از خروج آب اضافی از گلدان دارای منفذ وزن گل اشباع محاسبه شد. سپس وزن خاک خشک‌شده در آون محاسبه و از تفاضل آن‌ها میزان ظرفیت زراعی خاک محاسبه شد. در نهایت مقدار آن به مزرعه تعمیم داده شد و بر اساس آن تیمار عدم تنش کم‌آبیاری، ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبتی خاک محاسبه شد. عمق آب در هر آبیاری (I) بر حسب سانتی‌متر و بر اساس معادله ۱ محاسبه شد:

$$dn = RAW = (\theta_{fc} - \theta_{PWP}) * \rho_b * Z * MAD$$ معادله ۱

RAW= کل آب قابل تخلیه (میلی‌متر)
Z= عمق موثر ریشه (متر)
θ = رطوبت خاک قبل از آبیاری
ρ_b = وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (واحد گرم بر سانتی‌متر مکعب)
θ_{fc}= رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه
θ_{PWP}= رطوبت وزنی قبل از آبیاری کرت‌ها
MAD= تخلیه مجاز رطوبتی که در این تحقیق ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

به‌وسیله رابطه ۲ حجم آب آبیاری مورد نیاز هر کرت برآورد شد:

$$V = I \times A \times 100$$ معادله ۲

V= حجم آب آبیاری استفاده‌شده در هر کرت (لیتر)
A= مساحت هر کرت (متر مربع)
I=ارتفاع آب آبیاری (میلی‌متر)

در دفعات بعدی آبیاری و پس از جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها، عمق خالص برای آبیاری بر حسب رطوبت کاهش‌یافته خاک در محیط ریشه گیاه (اندازه‌گیری‌شده با دستگاه رطوبت‌سنج T.D.R) تعیین شد. در زمان اعمال تیمارها با اندازه‌گیری کمبود رطوبتی خاک در منطقه ریشه، ارتفاع خالص آب مورد نیاز تعیین و با توجه به مساحت هر کرت برای تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی منظور شد.

در مرحله رسیدگی، نمونه‌برداری از هر کرت بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای انجام و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد. سطحی معادل دو متر مربع از نیمه میانی کرت، برداشت شده و پس از خشک‌شدن، میزان عملکرد هر کرت محاسبه شد. جهت تعیین عملکرد بیولوژیک (کل ماده خشک اندام‌های بالای سطح خاک) در مرحله رسیدگی، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از خشک‌شدن در آون تهویه‌دار با درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، وزن آنها محاسبه شد. صفات فیزیولوژیکی مانند میزان کلروفیل آ و ب، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در مرحله گلدهی اندازه‌گیری شد. برای تعیین میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ از روش آرنون (Arnon, 1975) استفاده شد.

ابتدا آزمون بارتلت توسط نرم‌افزار SAS انجام و سپس تجزیه واریانس داده‌ها، انجام شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن برهمکنش، برش‌دهی انجام و میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری مقایسه شدند. نمودارها نیز با کمک نرم‌افزار اکسل رسم شدند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تنش خشکی، اثر اصلی کود گوگرد و اثر اصلی سولفات روی بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر برخی صفات.

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	عملکرد تر بوته	عملکرد خشک بوته	اسانس
تکرار	2	2.44 *	142.4 ns	219.9**	0.003ns
تنش خشکی	2	262.9 **	2680.7 **	268.3**	0.019**
خطای اصلی	4	0.16	126.9	9.4	0.001
کود گوگرد	2	79.1 **	4618.3 **	386.0**	0.032**
تنش خشکیx کود گوگرد	4	3.80 ns	221.7 ns	7.9 ns	0.012**
سولفات روی	2	77.5 **	7523.2 **	81.0 **	0.038**
تنش خشکیx سولفات روی	4	1.85 ns	336.3 ns	13.5 ns	0.002*
کود گوگردx سولفات روی	4	1.20 ns	1654.3 *	20.5 *	0.008*
تنش خشکیx کود گوگردx سولفات روی	8	0.48 ns	357.6 ns	7.6 ns	0.0001ns
خطای آزمایش	48	1.05	271.0	4.3	0.001
ضریب تغییرات	-	12.1	10.3	12.5	14.7

*،** و ns:به‌ترتیب بیانگر اختلاف آماری معنی‌دار در سطح پنج درصد، یک درصد و عدم اختلاف آماری معنی‌دار توسط آزمون دانکن می‌باشد.

یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر اصلی تنش خشکی بر ارتفاع بوته نشان داد که در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی این شاخص به مقدار ۲۶/۸ سانتی‌متر حاصل شد که ۲۶ درصد نسبت به تیمار عدم تنش خشکی کاهش داشت. اختلاف آماری بین هر سه سطح تنش خشکی نیز معنی‌دار بود (جدول ۳). در مورد اثر کود گوگرد بر ارتفاع بوته، با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار ارتفاع ۳۱/۸ سانتی‌متر به‌دست آمد که ۱۷ درصد بیشتر از عدم مصرف کود گوگرد بود و اختلاف آماری بین آنها معنی‌دار بود؛ اما اختلاف آماری بین ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج در خصوص اثر کود سولفات روی بر ارتفاع بوته نشان داد که با مصرف چهار در هزار این کود، شاخص فوق به مقدار ۳۱/۷ سانتی‌متر رسید که ۱۱ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف سولفات روی بود و در دسته‌های آماری جداگانه‌ای قرار گرفت. همچنین اختلاف بین چهار و دو در هزار مصرف سولفات روی از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۳).

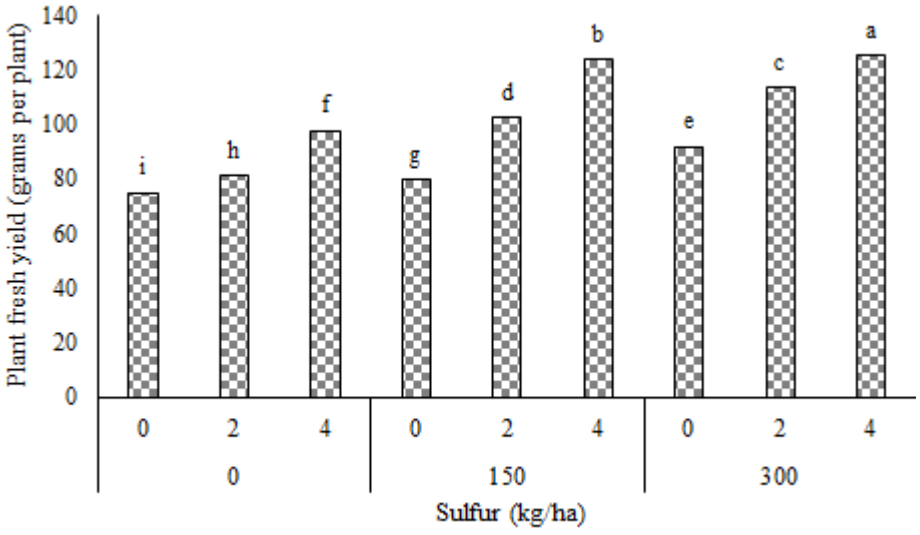
جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آزمایشی بر برخی صفات.

تیمار	سطح	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	عملکرد تر بوته (گرم در بوته)	عملکرد خشک بوته (گرم در بوته)	کلروفیل آ (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل ب (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)
تنش (درصد ظرفیت زراعی)	50	26.8 c	90.0 c	27.12 c	6.00 c	5.67 c
	75	31.6 b	97.7 b	30.31 b	6.25 b	6.41 b
	100	34.6 a	109.7 a	33.43 a	8.25 a	7.31 a
کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار)	0	28.5 b	84.8 c	26.01 c	6.38 b	5.83 c
	150	30.7 ab	102.3 b	31.82 b	7.23 ab	6.48 b
	300	31.8 a	110.3 a	33.12 a	7.67 a	7.07 a
سولفات روی (در هزار)	0	28.4 b	82.3 c	28.53 c	6.68 c	5.93 b
	2	30.9 ab	99.4 b	30.42 b	6.98 b	6.67ab
	4	31.7 a	115.7 a	32.02 a	7.62 a	6.78 a

حروف مشترک در هر گروه تیماری بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار آن صفت در سطح احتمال پنج درصد توسط آزمون دانکن است.

۲-۳. عملکرد تر بوته

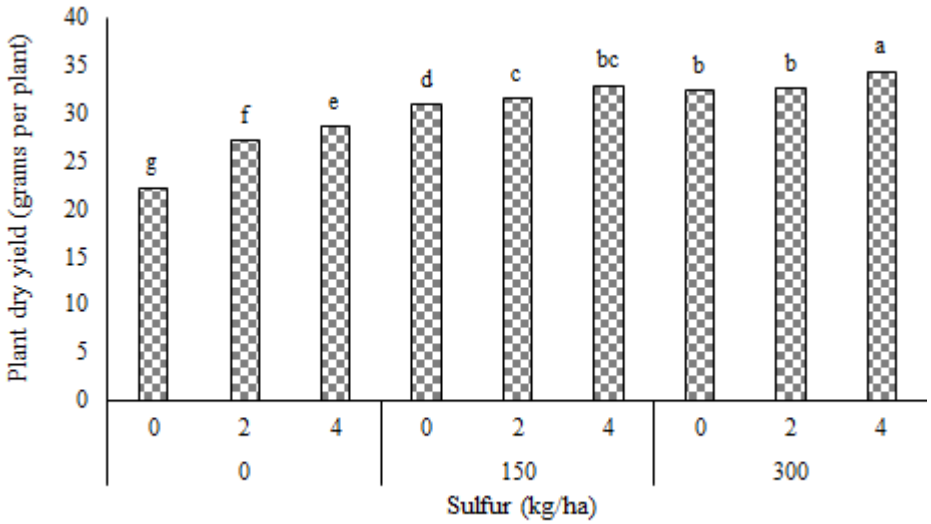
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تنش خشکی، کود گوگرد، سولفات روی و اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر عملکرد تر بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر اصلی تنش خشکی بر عملکرد تر بوته نشان داد که در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی این شاخص به مقدار ۹۰/۰ گرم در بوته حاصل شد که ۲۸ درصد نسبت به تیمار عدم تنش خشکی کاهش داشت. اختلاف آماری بین هر سه سطح تنش خشکی نیز معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر عملکرد تر بوته نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۱۱۸ درصد گرم در بوته در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و مصرف چهار در هزار سولفات روی حاصل شد که ۹۴ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف هر یک از این کودها بود و این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف سولفات روی، همواره کود گوگرد نیز موجب افزایش مقدار این شاخص شد (شکل ۱).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) و سولفات روی (در هزار) بر عملکرد تر بوته.

۳-۳. عملکرد خشک بوته

اثر اصلی تنش خشکی، کود گوگرد، سولفات روی و اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر عملکرد خشک بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر اصلی تنش خشکی بر عملکرد خشک بوته نشان داد که در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، این شاخص به مقدار ۲۷/۱۲ گرم در بوته رسید که ۳۰ درصد نسبت به تیمار عدم تنش خشکی کاهش داشت. اختلاف آماری بین هر سه سطح تنش خشکی نیز معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر عملکرد خشک بوته نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۲۷/۷ درصد در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و مصرف چهار در هزار سولفات روی حاصل شد که ۸۷ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف هر یک از این کودها بود و این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف سولفات روی، همواره کود گوگرد نیز موجب افزایش مقدار این شاخص شد. روند تغییرات ماده خشک همانند عملکرد تر بود (شکل ۲).

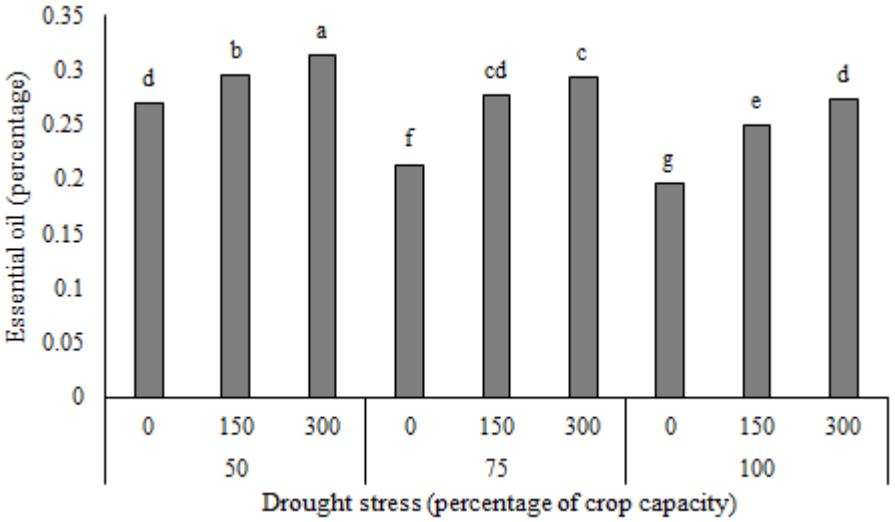


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) و سولفات روی (در هزار) بر عملکرد خشک بوته.

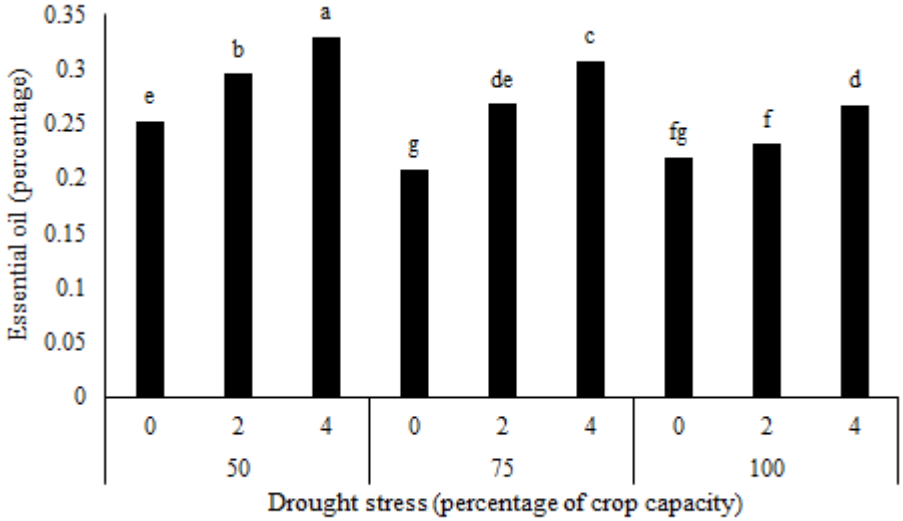
۳-۴. اسانس

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تنش خشکی، کود گوگرد، سولفات روی، اثرات متقابل کود گوگرد و سولفات روی، کود گوگرد و تنش خشکی و کود، تنش خشکی و سولفات روی بر درصد اسانس معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و تنش خشکی بر مقدار اسانس بوته نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۰/۳۱ در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی درصد رسید که ۴۳ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف کود و عدم اعمال تنش خشکی بود که این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف تنش خشکی، همواره افزایش مقدار مصرف کود گوگرد موجب افزایش مقدار این شاخص شد. با افزایش شدت اعمال تنش خشکی، مقدار اسانس بوته افزایش یافت (شکل ۳). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل سولفات روی و تنش خشکی بر مقدار اسانس بوته نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۰/۳۲ درصد در تیمار مصرف چهار در هزار سولفات روی و تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد که ۳۶ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف کود و عدم اعمال تنش خشکی بود که این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف تنش خشکی، همواره افزایش مقدار مصرف سولفات روی موجب افزایش مقدار این شاخص شد. با افزایش شدت اعمال تنش خشکی، مقدار اسانس بوته افزایش یافت (شکل ۴). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر مقدار اسانس بوته نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۰/۰۲۸ درصد در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و مصرف چهار در هزار سولفات روی حاصل شد که ۳۵

درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف هر یک از این کودها بود و این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف سولفات روی، همواره کود گوگرد نیز موجب افزایش مقدار این شاخص شد (شکل ۵).



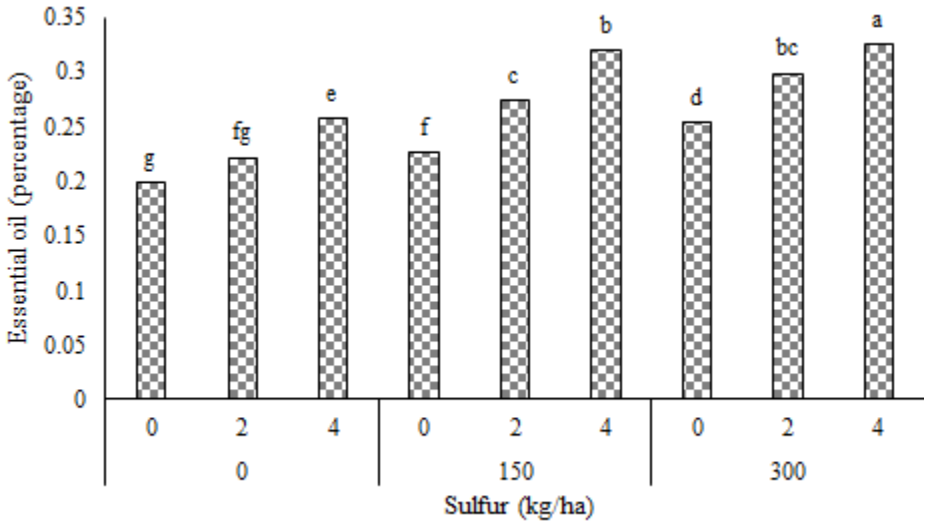
شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) و کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) بر مقدار اسانس.



شکل ٤. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) سولفات روی (در هزار) بر مقدار اسانس.

۳-۵. تیمول

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کود گوگرد، اثر اصلی سولفات روی و اثر متقابل کود کود گوگرد و سولفات روی بر مقدار تیمول اسانس معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و سولفات روی بر مقدار تیمول اسانس نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۱۲/۰۸ درصد اسانس در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و مصرف چهار در هزار سولفات روی حاصل شد که ۲۸ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف هر یک از این کودها بود و این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف سولفات روی، همواره کود گوگرد نیز موجب افزایش مقدار این شاخص شد (شکل ۶).



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) و سولفات روی (در هزار) بر مقدار اسانس.

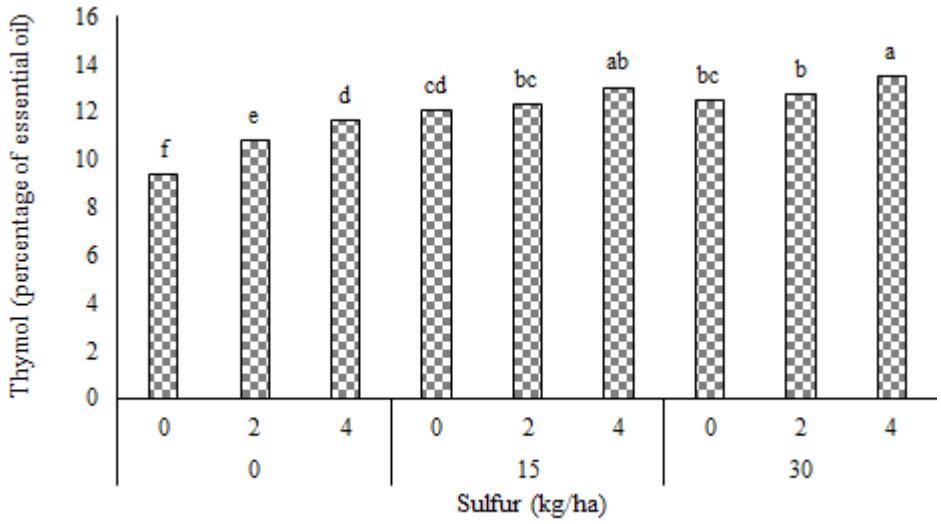
جدول ٤. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر برخی صفات.

منابع تغییرات	درجه آزادی	تیمول	کلروفیل آ	کلروفیل ب	کاتالاز
تکرار	2	7.87ns	2.87ns	0.06ns	18.33ns
تنش خشکی	2	0.55ns	78.2**	48.2**	9.25ns
خطای اصلی	4	0.04	10.82	3.65	11.60
کود گوگرد	2	39.67**	11.4**	10.4**	0.65**
تنش خشکی* کود گوگرد	4	1.49ns	0.07ns	1.14ns	0.76**
سولفات روی	2	13.69**	6.34**	5.71**	0.72**
تنش خشکی* سولفات روی	4	1.22ns	0.43ns	0.27ns	0.18ns
کود گوگرد* سولفات روی	4	1.57*	0.15ns	1.52ns	0.13ns
تنش خشکی* کود گوگرد* سولفات روی	8	1.00ns	0.06ns	0.07ns	0.06ns
خطای آزمایش	48	0.23	0.40	1.69	0.15
ضریب تغییرات	-	8.6	16.4	11.9	12.4

*،** و ^{ns}: به‌ترتیب بیانگر اختلاف آماری معنی‌دار در سطح پنج درصد، یک درصد و عدم اختلاف آماری معنی‌دار توسط آزمون دانکن می‌باشند.

۳-۶. کلروفیل آ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تنش خشکی، کود گوگرد و سولفات روی بر کلروفیل آ معنی‌دار بود (جدول ۴). یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر اصلی تنش خشکی بر کلروفیل آ نشان داد که در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی این شاخص به مقدار ۶/۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر حاصل شد که ۳۱ درصد نسبت به تیمار عدم تنش خشکی کاهش داشت. اختلاف آماری بین هر سه سطح تنش خشکی نیز معنی‌دار بود (جدول ۳). با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود گوگرد در هکتار، کلروفیل آ به میزان ۷/۶۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که ۲۳ درصد بیشتر از عدم مصرف کود گوگرد بود و اختلاف آماری بین آنها معنی‌دار بود؛ اما اختلاف آماری بین ۳۰ و ۱۵ کیلوگرم در هکتار از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج در خصوص اثر کود سولفات روی بر کلروفیل آ نشان داد که با مصرف چهار در هزار این کود، شاخص فوق به مقدار ۷/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که ۲۴ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف سولفات روی بود و در دسته‌های آماری جداگانه‌ای قرار گرفتند. همچنین اختلاف بین چهار در هزار و دو در هزار مصرف سولفات روی از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۳).



شکل ٦. مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) و سولفات روی (در هزار) بر مقدار تیمول اسانس.

۳-۷. کلروفیل ب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تنش خشکی، کود گوگرد و سولفات روی بر کلروفیل ب معنی‌دار بود (جدول ۴). یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر اصلی تنش خشکی بر کلروفیل ب نشان داد که در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی این شاخص به مقدار ۵/۶۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که ۲۷ درصد نسبت به تیمار عدم تنش خشکی کاهش داشت. اختلاف آماری بین هر سه سطح تنش خشکی نیز معنی‌دار بود (جدول ۳). با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود گوگرد در هکتار کلروفیل ب به میزان ۷/۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که ۱۸ درصد بیشتر از عدم مصرف کود گوگرد بود و اختلاف آماری بین آنها معنی‌دار بود. اختلاف آماری بین ۳۰ و ۱۵ کیلوگرم در هکتار نیز از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج در خصوص اثر کود سولفات روی بر کلروفیل ب نشان داد که با مصرف چهار در هزار این کود، شاخص فوق به مقدار ۶/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که ۱۹ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف سولفات روی بود و در دسته‌های آماری جداگانه‌ای قرار گرفتند. همچنین اختلاف بین چهار در هزار و دو در هزار مصرف سولفات روی از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳).

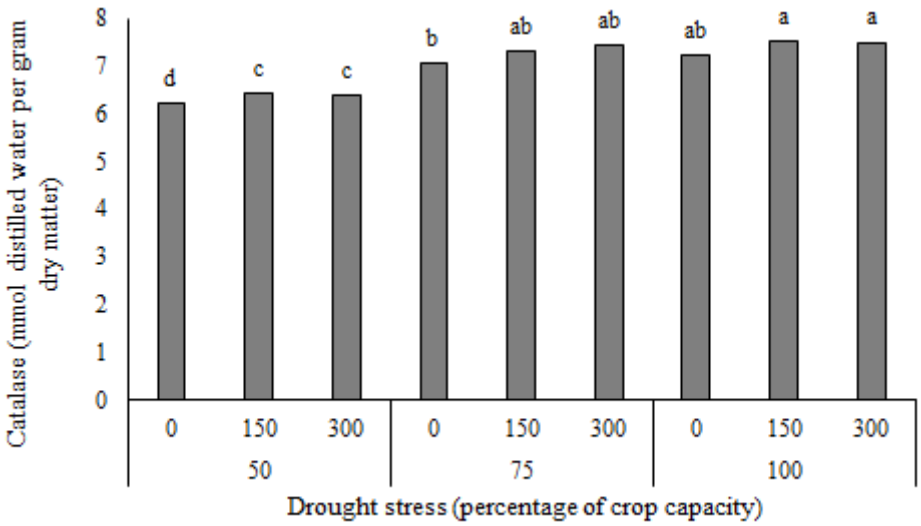
۳-۸. فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کود گوگرد، سولفات روی و اثر متقابل کود گوگرد و تنش خشکی بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج تحقیق در مورد مقایسه میانگین اثر متقابل کود گوگرد و تنش خشکی بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد که بیشترین مقدار این صفت به مقدار ۶/۷۸ میلی‌مول آب مقطر در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین در تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد و عدم اعمال تنش خشکی حاصل شد که ۲۱ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف کود و تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بود که این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین در تمامی سطوح مصرف تنش خشکی، همواره افزایش مقدار مصرف کود گوگرد موجب افزایش مقدار این شاخص شد (شکل ۷).

۳-۹. بحث

تنش خشکی می‌تواند تأثیرات منفی بسیاری بر رشد و توسعه گیاهان داشته باشد که یکی از این تأثیرات، کاهش تعداد برگ‌ها می‌باشد. این کاهش تعداد برگ‌ها می‌تواند منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی، کاهش تراکم غده‌های گیاهی، اختلال در تبادل گازها و همچنین کاهش عملکرد نهایی گیاه شود (Semida *et al.*, 2021).کود گوگرد و نانوسولفات روی می‌توانند باعث افزایش جذب عناصر غذایی از خاک توسط گیاه شوند. این عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند که برای رشد و توسعه گیاهان ضروری هستند. با افزایش جذب این عناصر، گیاهان قادر به رشد سریع‌تر و افزایش ارتفاع بوته خود می‌شوند

(Rafique, 2023). استفاده از کود گوگرد و نانوسولفات روی می‌تواند باعث افزایش مقاومت گیاهان در برابر استرس‌های محیطی مانند خشکی، نمکی، ورمی‌کم‌شدن و آلودگی هوا شود. با افزایش مقاومت گیاهان، آن‌ها قادر به رشد بهتر و افزایش ارتفاع بوته خود می‌شوند. به‌طور کلی، استفاده از کود گوگرد و نانوسولفات روی می‌تواند منجر به بهبود رشد و توسعه گیاهان، افزایش ارتفاع بوته و افزایش عملکرد محصول شود (Ma, 2017).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) وکود گوگرد (کیلوگرم در هکتار) بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز.

محققان علت اختلاف عملکرد بین تیمارهای مختلف آبی را به کاهش پتانسیل فشاری، هدایت روزنه‌ای و میزان نسبی آب برگ در حالت تنش آبی نسبت می‌دهند که سبب افت شدت رشد برگ‌ها و ریشه به علت توسعه و انبساط کمتر سلول‌ها می‌شود. احتمالا در اوایل فصل رشد، ازت باعث افزایش تعداد، اندازه و ماده خشک برگ و دمبرگ و در اواخر فصل سبب افزایش ماده خشک غده در واحد سطح می‌شود (Kim & Lee, 2023). کاربرد کود روی موجب افزایش عملکرد ساقه و برگ و وزن خشک گیاه شده است که می‌تواند علت‌های مختلفی داشته باشد که از آن جمله می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین در حضور عنصر روی، افزایش غلظت کلروفیل، افزایش فعالیت فسفو اینول‌پیروات‌کربوکسیلاز و ریبولوز بی‌فسفات‌کربوکسیلاز، کاهش تجمع سدیم در بافت‌های گیاهی و افزایش کارایی جذب نیتروژن و فسفر در حضور عنصر روی اشاره کرد (Khatibi *et al.*, 2022).

علت افزایش وزن خشک با مصرف کود روی را می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین در حضور عنصر روی نسبت داد. پژوهشگران گزارش کردند که مصرف کود روی به‌طور معنی‌داری تولید ماده خشک گیاهی را در ذرت افزایش داده است (Rezapour *et al.*, 2021). روی به عنوان جزء ساختمانی بعضی از آنزیم‌ها بوده و در فعالیت‌های آنزیمی گوناگون شرکت دارد و با کاهش واکنش اسیدی خاک قابلیت جذب بیشتری پیدا می‌کند. بهبود شاخص‌های رشدی گیاه با کاربرد انواع کود معدنی در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است. افزودن مستقیم عناصر غذایی به خاک، افزایش دسترسی و حفظ عناصر غذایی از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و تأثیر مثبت بر میکروارگانیسم خاک از جمله دلایل تأثیر مثبت تغذیه معدنی می‌باشد (Kaur *et al.*, 2019). محققان نشان دادند که تغذیه معدنی با افزایش محتوای عناصر در خاک، این امکان را به گیاهان می‌دهد که نسبت اندام هوایی از جمله تعداد ساقه فرعی به ریشه را افزایش داده و با این فعالیت سطح فعال فتوسنتزی را افزایش دهند (Hafeez *et al.*, 2017). بنابراین گیاه قادر است با بهبود فراهمی عناصر غذایی بیوماس خود را افزایش دهد. در حالی‌که در گیاه شاهد به دلیل پایین‌تر بودن محتوای عناصر غذایی، گیاه بیشتر به توسعه ریشه پرداخته و تولید اندام هوایی کاهش می‌یابد. سیتوکینین‌ها، گروهی از هورمون‌های گیاهی هستند که نقش مهمی در رشد و توسعه گیاهان دارند. این هورمون‌ها به عنوان تنظیم‌کننده‌های رشد در گیاهان عمل می‌کنند و تأثیرات متعددی بر رشد، تقسیم سلولی، تشکیل میوه و مثلثات

گیاهان دارند. سیتوکینین‌ها در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان مانند تقسیم سلولی، تشکیل مثلثات، تشکیل برگ، ریشه و میوه، تنظیم رشد و توسعه شاخه‌ها، تنظیم تولید کلروفیل و تنظیم توزیع مواد غذایی در گیاهان نقش دارند. سیتوکینین‌ها یکی از انواع اصلی هورمون‌های گیاهی هستند که در تنظیم رشد و توسعه گیاهان و تشکیل اجزای مختلف گیاهان مانند کپسول‌ها و میوه‌ها نقش دارند. استفاده از کودهای گوگردی و نانوسولفات روی می‌تواند تولید و تنظیم سیتوکینین‌ها را بهبود بخشیده و در نتیجه، عملکرد محصول را افزایش دهد (Hafeez *et al.*, 2021).

در شرایط تنش خشکی، گیاهان تغییرات فیزیولوژیکی متعددی را تجربه می‌کنند. به منظور مقابله با این تنش، گیاهان به تنظیم متابولیسم‌های خود پرداخته و به تولید مواد دارویی و عطری یا اسانس‌ها اقدام می‌کنند. این اسانس‌ها می‌توانند به عنوان مکمل‌های محافظتی در برابر تنش‌های محیطی، به‌خصوص تنش خشکی، عمل کنند. تنش خشکی می‌تواند به تغییرات در ترکیب اسانس‌ها منجر شود. در شرایط تنش، گیاهان ممکن است به سمت تولید ترکیبات خاصی از اسانس‌ها هدایت شوند که خواص ضد استرس و محافظتی بیشتری دارند. این تغییرات ممکن است منجر به افزایش ارزش کاربردی اسانس‌ها شود (Fathi *et al.*, 2017). عناصر معدنی نقش کلیدی در عملکرد بیوشیمیایی گیاهان دارند. این عناصر از جمله آهن، روی، منگنز، مس و سلنیوم به‌عنوان عناصر کم‌مقدار ضروری به شمار می‌روند. مطالعات نشان داده‌اند که تأمین مناسب این عناصر معدنی در شرایط تنش خشکی، می‌تواند به افزایش مقدار اسانس‌ها در گیاهان کمک کند. تغذیه معدنی می‌تواند تنظیم‌کننده‌های متعددی در مسیرهای متابولیکی گیاهان ایجاد کند (Rezapour *et al.*, 2021). این تنظیم‌کننده‌ها می‌توانند تولید اسانس‌ها را تشدید کرده و بهبود دهند. عناصر معدنی مانند گوگرد می‌توانند بر رشد و توسعه ریشه‌ها تأثیر بگذارند. تقویت ریشه‌ها توسط تغذیه معدنی می‌تواند به افزایش مقدار اسانس منجر شود (Dimkpa *et al.*, 2017).

در شرایط تنش خشکی، گیاهان ممکن است به روش‌های مختلفی واکنش نشان دهند که می‌تواند شامل افزایش تولید اسانس‌ها باشد. این افزایش می‌تواند به چندین دلیل باشد؛ در شرایط تنش خشکی، گیاهان برای مقابله با این وضعیت ممکن است اسانس‌هایی تولید کنند که به عنوان مکانیسم‌های دفاعی عمل کنند. این اسانس‌ها می‌توانند به کاهش تبخیر آب و حفاظت از بافت‌های گیاهی کمک کنند. تنش‌ها (از جمله خشکی) می‌توانند تولید متابولیت‌های ثانویه را در گیاهان افزایش دهند (Fathi *et al.*, 2017). این متابولیت‌ها که شامل اسانس‌ها نیز می‌شوند، ممکن است نقش‌هایی در جذب گرده‌افشان‌ها و دفع آفات و بیماری‌ها داشته باشند. در شرایط تنش، تولید هورمون‌هایی مانند اکسین، سیتوکینین و اسیدآبسیزیک تغییر می‌کند و این تغییرات می‌توانند به افزایش تولید اسانس‌ها کمک کنند. بنابراین، افزایش تولید اسانس‌ها در شرایط تنش خشکی ممکن است به عنوان یک استراتژی تطبیقی برای بقا و سازگاری گیاهان با شرایط نامساعد محیطی عمل کند (Kaur *et al.*, 2019).

محققان بیان کردند که تنش خشکی با افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه موجب افزایش مقدار اسانس علف لیمو تحت شرایط تنش شده است (Candan *et al.*, 2018). اسانس‌ها اغلب ترکیب‌هایی ترپنوئیدی هستند که واحدهای سازنده آن‌ها مانند ایزوپنتنیل-پیروفسفات و دیمتیل‌آلیل‌پیروفسفات نیاز مبرم به NADPH و AATP دارند و حضور عناصری مانند نیتروژن، منیزیم، آهن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های اخیر ضروری است. کود گوگرد حاوی عناصر غذایی می‌باشد و با در دسترس قرار گرفتن عناصر غذایی در طول دوره رشدی گیاه منجر به افزایش غدد ترشح‌کننده اسانس گیاه می‌شود که در نهایت منجر به افزایش ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس شده است (Ashkiani *et al.*, 2020). نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در این کود، درصد و عملکرد اسانس را در گیاهان دارویی افزایش می‌دهند، زیرا این عناصر در توسعه و تقسیم سلول‌های جدید حاوی اسانس و بیوسنتز اسانس و مواد مؤثره گیاهان دارویی نقش مهمی ایفاء می‌کنند (Bettaieb *et al.*, 2012).

یکی از روش‌های ارزیابی و پیش‌بینی تحمل گیاهان زراعی به تنش خشکی، مطالعه میزان تغییراتی است که در سنتز کلروفیل (a+b) برگ در اثرکمبود آب اتفاق می‌افتد. کاهش سنتز کلروفیل آ از واکنش‌های عمومی گیاهان نسبت به کمبود آب می‌باشد. میزان کلروفیل در گیاه زنده یکی از عوامل مهم برای فتوسنتز به شمار می‌آید. در این بین بسته به شدت، مدت و مرحله تأثیر خشکی مقادیر کلروفیل در گیاهان متفاوت است (Semida *et al.*, 2021). در واقع، کاهش کلروفیل آ بر اثر تنش خشکی مربوط به افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن در سلول است، زیرا این رادیکال‌ها سبب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه این رنگیزه می‌شوند

(Abbasi *et al.*, 2022). استفاده از کودهای گوگردی و نانو روی به دلیل ویژگی‌های خاص این کودها و تأثیر مثبت آن‌ها بر رشد و توسعه گیاهان می‌تواند به افزایش وزن هزار دانه گیاهان زراعی کمک کند. علت افزایش وزن هزار دانه با استفاده از کودهای گوگردی و نانو روی، افزایش تولید کلروفیل در گیاهان است؛ کلروفیل نقش مهمی در فرایند فتوسنتز دارد و افزایش مقدار آن می‌تواند به تولید انرژی بیشتر و رشد بهتر گیاهان منجر شود (Ma *et al.*, 2017).

محققان بیان کردند که در اثر کمبود عنصر روی در گیاه، غلظت کلروفیل برگ کاهش یافته و با کاهش میزان کلروفیل در برگ، میزان فتوسنتز و به تبع آن سطح برگ تولیدی کاسته می‌شود (Candan *et al.*, 2018)؛ با در نظر گرفتن این فرآیندها وزن خشک برگ نیز در اثر کمبود روی کاهش می‌یابد. محققان گزارش کردند محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف مانند آهن و روی در شرایط تنش خشکی، عملکرد آفتابگردان را با بهبود بازده فتوشیمیایی و غلظت سبزینه، افزایش می‌دهد (Hafeez *et al.*, 2017).

کود گوگرد و نانوسولفات روی می‌توانند به بهبود فعالیت آنزیم‌های مختلف در گیاهان منجر شوند. این آنزیم‌ها نقش مهمی در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان دارند و با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، گیاهان قادر به رشد بهتر و افزایش ارتفاع بوته خود می‌شوند (Hafeez *et al.*, 2021). نانو روی می‌تواند به بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاهان کمک کند که این موضوع به تغذیه مناسب گیاهان و در نتیجه افزایش تعداد دانه در کپسول یا نیام منجر می‌شود. با توجه به این عوامل، استفاده از نانو روی در گیاهان زراعی می‌تواند بهبود فعالیت آنزیم‌ها، افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش مقاومت گیاهان و در نتیجه افزایش تعداد دانه در کپسول یا نیام را فراهم کند (Jeshni *et al.*, 2017). نانو روی و کود گوگرد می‌توانند بهبود فعالیت آنزیم‌های مختلف در گیاهان را تسهیل کنند. این افزایش در فعالیت آنزیم‌ها می‌تواند بهبود فرآیندهای متعددی از جمله تقسیم سلولی در گیاهان را تسهیل کند. نانو روی و کود گوگرد دارای خواص ضد اکسیدانی هستند که به جلوگیری از خسارت‌های اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی کمک می‌کنند؛ این تأثیرات می‌توانند به حفظ سلامت سلول‌ها و تقویت فعالیت آن‌ها در تقسیم سلولی بیانجامند (Babaei *et al.*, 2018).

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که کود گوگرد و نانوسولفات روی با غلظت چهار در هزار به صورت مصرف جداگانه و به‌خصوص در حالت مصرف همزمان منجر به افزایش عملکرد ماده خشک و تر سیاهدانه شدند. این افزایش عملکرد می‌تواند ناشی از بهبود اجزای عملکرد نظیر افزایش وزن خشک برگ و ساقه باشد. همچنین در تیمار فوق مقدار تیمول به عنوان مهمترین شاخص کیفی این گیاه افزایش یافت که این افزایش مقدار اسانس و ترکیبات آن احتمالا به دلیل دو عنصر روی و گوگرد است.

۵. منابع

Abbasi, M., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., & Rostaminya, M. (2022). Interaction of mycorrhizal coexistence and foliar application of iron and zinc on some quantitative and qualitative characteristics of mung bean under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *15*(2), 407-426.

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A., & Alizadeh, K. (2023). Improvement in essential oil quantity and quality of thyme (*Thymus vulgaris* L.) by integrative application of chitosan nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi under water stress conditions. *Plants*, *12*(7), 1422.

Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, *24*, 1-15.

Asgharzadeh, A., & Edalateyan Kharazi, M. (2023). Effects of water stress as well as the effect of putrescine, spermidine and salicylic acid on biomass yield and oil content nigella (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *4*(8), 12-24.

Ashkiani, A., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A.H., Valadabadi, A.E.K., & Hadidi Masouleh, E. (2020). Effects of foliar zinc application on yield and oil quality of rapeseed genotypes under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *43*(11), 1594-1603.

Babaei, R., Mirzaei Heydari, M., & Bazgir, M. (2018). Study the impact of various levels of phosphate fertilizer and plant growth promoting bacteria on availability of some of nutrients and wheat yield indices. *Journal of Plant Ecophysiology*, *10*(34), 109-120.

Baethgen, W., & Alley, M. (2015). Optimizing soil and fertilizer nitrogen use by intensively managed winter wheat. II. Critical levels and optimum rates of nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, *81*(1), 120-125.

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Behashti, S. (2021). Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and nutrient efficiency indices in maize under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 14*, 675-690.

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Behashti, S. (2019). Effect of biological and chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus on quantitative and qualitative productivity of maize under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 12*, 123-139.

Bettaieb, I., Knioua, S., Hamrouni, I., Limam, F., & Marzouk, B. (2012). Effect of drought on the biochemical composition and antioxidant activities of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds. *Industrial Crops and Products, 36*, 238-245.

Candan, N., Cakmak, I.E.K., & Ozturk, L. (2018). Zinc-biofortified seeds improved seedling growth under zinc deficiency and drought stress in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 181*(3), 388-395.

Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C., Fritschi, F.B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum,171*, 66–76.

Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L.E.K., & White, J.C. (2019). Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Science of the Total Environment, 688*, 926-934.

Fathi, A., & Tari, D.B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences, 10*(1), 1-6.

Fathi, A., Kardoni, F., Bahamin, S., Khalil Tahmasebi, B., & Naseri, R. (2017). Investigation of management strategy of the consolidated system of organic and biological inputs on growth and yield characteristics in corn cultivation. *Applied Research of Plant Ecophysiology*, *4*(1), 137-156.

Hafeez, M.B., Ramzan, Y., Khan, S., Ibrar, D., Bashir, S., Zahra, N., ..., & Diao, Z.H. (2021). Application of zinc and iron-based fertilizers improves the growth attributes, productivity, and grain quality of two wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. *Frontiers in Nutrition, 1036*.

Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K.H., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) merr. under drought stress. *Pakistan Journal of Botany, 49*, 7-13.

Heydari, M.M., Maleki, A., Brook, R., & Jones, D.L. (2009). Efficiency of phosphorus solubilising bacteria and phosphorus chemical fertilizer on yield and yield components of wheat cultivar (Chamran). *Aspects of Applied Biology, 98*, 189-193.

Heydari, M.M., Brook, R.M., & Jones, D.L. (2019). The role of phosphorus sources on root diameter, root length and root dry matter of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Nutrition, 42*(1), 1-15.

Islam, M.S., Ali, M.T., Hasan, M.K., Wais, A.H., Hafeez, A.G., & Chowdhury, M.K. (2019). Response of sulphur and zinc on the growth and yield traits of sesame (*Sesamum indicum* L.) at old Himalayan piedmont plain soil. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, *3*(1), 98-115.

Jeshni, M.G., Mousavinik, M., Khammari, I., & Rahimi, M. (2017). The changes of yield and essential oil components of German chamomile (*Matricaria recutita* L.) under application of phosphorus and zinc fertilizers and drought stress conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 16*(1), 60-65.

Kaur, G., & Asthir, B. (2017). Molecular responses to drought stress in plants. *Plant Biology, 61*, 201–209.

Khatibi, A., Omrani, S., Omrani, A., Shojaei, S.H., Mousavi, S.M.N., Illés, Á., ..., & Nagy, J. (2022). Response of maize hybrids in drought-stress using drought tolerance indices. *Water*, *14*(7), 1012.

Kim, K.H., & Lee, B.M. (2023). Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. *Plants*, *12*(20), 3548.

Lotfi, B., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., Rostaminiya, M., & Babaei, F. (2021). The effect of different tillage systems, nitrogen fertilizer and mycorrhiza on mung bean (*Vigna radiata*) production and energy indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *52*(4), 416-428.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., & Guo, T. (2017). Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 860.

Mirzaei Heidari, M., & Mishkhaszadeh, K. (2023). Evaluating the effects of mycorrhizal fungi on growth and yield of winter chickpea (*Cicer arietinum* L.) under conditions of supplemental irrigation. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *18*(3), 18-31.

Mirzaei Heydari, M. (2021). Investigation the effect of mycorrhizal fungus and supplementary irrigation on growth, yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in two seasons of autumn and spring cultivation in climatic conditions of Ilam province. *Crop Physiology Journal*, *13*(50), 23-45.

Mirzaei Heydari, M. (2013). The role of bio-inoculants on phosphorous relations of barley. PhD Thesis, Bangor University, Wales, United Kingdom, 193 pp.

Mirzaei Heydari, M., & Babaei, Z. (2022). Evaluating the effect of potential of plant growth promoting bacteria as inoculated in soil and different rates of phosphorous fertilizer on growth and yield of autumn wheat. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(10), 2247-2259.

Mirzaei, A., Naseri, R., Torab Miri, S.M., Soleymani Fard, A., & Fathi, A. (2018). Reaspose of yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars to the application of plant growth promoting rhizohbacteria and nitrogen chemical fertilizer under rainfed conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, *11*(44(4)), 775-790.

Rafique, S. (2023). Physiological and biochemical responses in maize under drought stress. In *Maize Improvement: Current Advances in Yield, Quality, and Stress Tolerance under Changing Climatic Scenarios* (pp. 117-136). Cham: Springer International Publishing.

Rezapour, A., Heydari, M., Glovi, M., & Ramroudi, M. (2021). The effect of drought stress and different amounts of sulfur fertilizer on yield and components of seed yield and osmotic regulators in the medicinal plant *Nigella* sativa (L.). *Iranian Medicinal and Aromatic Plants Research, 27*(3), 384-396.

Semida, W.M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G.F., Abd El-Mageed, T.A., Abd El-Mageed, S.A., Rady, M.M., & Ali, E.F. (2021). Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, *10*(2), 421.

Ye, J., Wang, S., Deng, X., Yin, L., Xiong, B., & Wang, X. (2016). Melatonin increased maize (*Zea mays* L.) seedling drought tolerance by alleviating drought-induced photosynthetic inhibition and oxidative damage. *Acta Physiologiae Plantarum, 38*(2), p. 48.