



Improving growth and physiological responses of *Nigella sativa* L. using organic fertilizers under varying irrigation regimes

Majid Rajaie^{1*} and Mehdi Khiri²

- 1*. Corresponding author, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran, Email: rajaie.majid@yahoo.com
2. M.Sc. graduated in Soil Science, Islamic Azad University, Darab Branch

Received: October 2024

Revised: May 2025

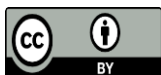
Accepted: May 2025

Abstract

Background and Objective: Drought stress is one of the most critical factors influencing agricultural production, particularly in irrigated farming systems in arid and semi-arid regions of the world. Organic fertilizers can mitigate the detrimental effects of drought stress on medicinal plants. Developing new management strategies is essential to alleviate the negative impacts of drought. Among the most effective approaches to plant nutrition management under drought conditions is the use of organic fertilizers, which significantly contribute to sustainable agriculture advancement and expansion. Therefore, this study aimed to investigate the effects of different organic fertilizers in the cultivation medium of black seed and their influence on physiological traits and seed yield under various irrigation intervals.

Methodology: This experiment was conducted using a completely randomized block design with two factors and three replications. The first factor included four irrigation regimes: 20%, 40%, 60%, and 80% depletion of field capacity moisture. The second factor involved planting beds composed of different organic materials at 5% (w/w) of pot soil, including normal soil (control), normal soil + biochar, normal soil + compost, normal soil + vermicompost, and normal soil + animal manure. Each pot contained six kilograms of soil. Initially, the soil was passed through a 2 mm sieve, and organic fertilizers were manually mixed with the soil in each pot at a rate of 5% by weight. On February 19, black seeds were sown in plastic pots, with fifteen seeds per pot. Two weeks after sowing, at the three-leaf stage, seedlings were thinned to six plants per pot. After planting, all pots were irrigated uniformly. Upon the emergence of black seed plants and at the four- to five-leaf stage, irrigation treatments were applied based on the designated moisture depletion levels (20%, 40%, 60%, and 80%). Measured plant responses included leaf nitrogen, phosphorus, and potassium content; ion leakage; relative water content; malondialdehyde concentration; chlorophyll a and b content; and catalase and peroxidase enzyme activities. Finally, variance analysis was conducted, and means were compared using Duncan's multiple range test.

Results: The findings indicated that increased drought stress led to reduced nitrogen, phosphorus, and potassium content in the leaves. Conversely, the highest concentrations of these nutrients were observed under treatments with normal soil + vermicompost or animal manure. Rising



drought stress also reduced leaf relative water content; specifically, irrigation at 40%, 60%, and 80% moisture depletion led to significant reductions of 7%, 15%, and 32%, respectively, compared to 20% moisture depletion. At 60% depletion, compost, vermicompost, and animal manure treatments significantly reduced ion leakage by 11.8%, 14.5%, and 12.2%, respectively. Under 80% depletion, compost, and vermicompost significantly decreased malondialdehyde levels by 15.2% and 17.8%, respectively, relative to the control. At 20% and 60% depletion, the highest total chlorophyll content was observed in normal soil combined with vermicompost, followed by animal manure and compost. Catalase and peroxidase activities increased progressively with drought severity. At 80% depletion, the dry weight of aerial parts increased by 46% and 56% in the animal manure and vermicompost treatments, respectively, compared to the control. Likewise, grain weight increased by 26% and 32% under these treatments at the same drought level.

Conclusion: The results demonstrated that drought stress adversely affected black seed plants' nutrient concentration and physiological traits. Applying normal soil with vermicompost or animal manure effectively enhanced photosynthetic pigment levels, promoting plant growth. Compared to vermicompost and animal manure, biochar, and compost had a relatively lower impact on improving grain yield. Overall, vermicompost and animal manure are recommended for cultivating black seed under varying humidity conditions.

Keywords: Catalase, Peroxidase, Malondialdehyde, Seed yield, Drought stress.

بهبود رشد و صفات فیزیولوژیک سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) با افزودن کودهای آلی به بستر کاشت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

مجید رجایی^{۱*} و مهدی خیری^۲

*- نویسنده مسئول، دانشیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، شیراز، ایران، پست الکترونیک: rajaie.majid@yahoo.com

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب

تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ اصلاح نهایی: اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: مهر ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر تولیدات کشاورزی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است. کودهای آلی قادر به کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی در گیاهان هستند. مصرف کودهای آلی یکی از مهم‌ترین راهکارها در مدیریت تغذیه گیاهان برای توسعه و گسترش کشاورزی پایدار در شرایط تنش خشکی است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر کودهای مختلف آلی در بستر کشت سیاه‌دانه و تاثیر آنها بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه این گیاه در رژیم‌های مختلف آبیاری بود.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول آزمایش چهار رژیم آبیاری شامل ۲۰ (شاهد)، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت از حد ظرفیت مزرعه بود. فاکتور دوم بسترهای کاشت حاوی مواد آلی مختلف با پنج درصد وزنی خاک گلدان شامل خاک معمولی (شاهد)، خاک معمولی + بیوجار، خاک معمولی + کمپوست، خاک معمولی + ورمی‌کمپوست و خاک معمولی + کود دامی بود. در هر گلدان شش کیلوگرم خاک قرار داده شد. ابتدا خاک مورد استفاده در آزمایش از الک دو میلی‌متری عبور داده و کودهای آلی به مقدار پنج درصد وزنی به طور دستی با خاک هر گلدان مخلوط شد. در تاریخ یک اسفند ماه بذرها در گلدان‌های پلاستیکی کشت شدند. در هر گلدان تعداد ۱۵ بذر سیاه‌دانه کشت گردید. دو هفته پس از کاشت (مرحله سه برگی)، عمل تنک کردن گیاهچه‌ها صورت گرفت و تعداد ۶ بوته در هر گلدان حفظ شد. بعد از کاشت بذرها، تمام گلدان‌ها به طور یکنواخت آبیاری شدند. پس از سبز شدن بوته‌های سیاه‌دانه و در زمان چهار تا پنج برگی، آبیاری براساس ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت انجام شد. پاسخ‌های گیاهی اندازه‌گیری شده شامل غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ، نشی یونی، محتوای نسبی آب برگ، غلظت مالون دی‌آلدئید، کلروفیل a و b برگ و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز بود. در نهایت تجزیه واریانس داده‌ها انجام و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت.

نتایج: نتایج نشان داد که افزایش تنش خشکی سبب کاهش محتوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ شد. از سوی دیگر بیشترین محتوی این عناصر در شرایط خاک معمولی + ورمی‌کمپوست و یا کود دامی مشاهده شد. افزایش تنش خشکی سبب کاهش محتوی نسبی آب برگ شد، به طوری که آبیاری ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۷، ۱۵ و ۳۲ درصد محتوای نسبی آب برگ نسبت به آبیاری ۲۰ درصد تخلیه رطوبت شدند. در رژیم ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، کاربرد کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۱۱/۸، ۱۴/۵ و ۱۲/۲ درصد نشی یونی نسبت به شاهد شدند. در آبیاری ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، تیمار حاوی کمپوست و ورمی‌کمپوست به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۱۵/۲ و ۱۷/۸ درصد مالون‌دی‌آلدئید نسبت به شاهد شدند. در ۲۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، بیشترین محتوای کلروفیل کل در شرایط خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و در سطح پایین‌تر با کاربرد کود دامی و کمپوست بدست آمد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز با افزایش تنش خشکی روند افزایشی را نشان داد. در سطح تنش خشکی ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، وزن خشک اندام هوایی در کود دامی و ورمی‌کمپوست به ترتیب ۴۶ و ۵۶ درصد

افزایش نسبت به شاهد نشان داد. در تنش خشکی ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، وزن دانه در کود دامی و ورمی‌کمپوست به ترتیب افزایش ۲۶ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب تاثیر نامطلوب بر غلظت عناصر غذایی و صفات فیزیولوژیک سیاه‌دانه گردید. استفاده از خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و یا کود دامی در افزایش مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی موثر بود و در نتیجه رشد گیاه را افزایش داد. در مقایسه با ورمی‌کمپوست و کود دامی، بیوجار و کمپوست نیز در سطح پایین‌تر توانستند عملکرد دانه را بهبود دهند. در مجموع کاربرد ورمی‌کمپوست و کود دامی برای کاشت گیاه سیاه‌دانه در شرایط مختلف رطوبت قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کاتالاز، پراکسیداز، مالون دی‌آلدهید، وزن دانه، تنش خشکی.

مقدمه

تنش خشکی یکی از چالش‌های مهم بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که تولید محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Seleiman *et al.*, 2021). در شرایط تنش خشکی کارکرد طبیعی گیاهان با مشکل روبرو می‌شود (Cal *et al.*, 2019). تنش خشکی باعث کاهش رشد رویشی گیاهان دارویی می‌شود و در مرحله گلدهی هم می‌تواند بازده گیاهان دارویی و معطر را کاهش دهد (Abd El-Gawad *et al.*, 2021). گیاهان تحت تنش خشکی، ظرفیت آبی و تورگر کمتری در سلول دارند که سبب افزایش سطح املاح در سیتوزول و ماتریکس خارج سلولی می‌شود؛ نتیجه این رویداد کاهش بزرگ شدن سلول و مهار رشد گیاه است (El Nahhas *et al.*, 2021). گزارش شده است که تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های اخیر از دلایل کمبود آب در سراسر جهان هستند که بر فیزیولوژی، مورفولوژی، بیوشیمی و بهره‌وری گیاه تأثیر منفی گذاشته است (Anderson *et al.*, 2020). بقاء، تولید و توزیع گیاهان به دلیل خشکسالی محدود می‌شود، زیرا خشکی رشد و نمو گیاه را سرکوب می‌کند و متوسط عملکرد را در بیشتر محصولات کاهش می‌دهد (Zarrinabadi *et al.*, 2019). توسعه رویکردهای مدیریتی جدید برای کاهش اثرهای نامطلوب تنش خشکی ضروریست. یکی از این رویکردها، کاشت گونه‌های گیاهی دارویی و معطر است که ارزش اقتصادی بالایی دارند و اجزای ضروری و متابولیت‌های ثانویه آنها در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابند (Kumar *et al.*, 2022).

گیاهان دارویی و معطر به دلیل افزایش تقاضا در بازارهای داخلی و بین‌المللی از اهمیت اقتصادی قابل توجهی برخوردارند. سیاه‌دانه با نام علمی *Nigella sativa* L. یک گیاه دارویی یکساله از خانواده Ranunculaceae است (Bayati *et al.*, 2020). این گیاه به‌طور گسترده در سوریه، مصر، عربستان سعودی، ایران، پاکستان، هند و ترکیه برای تولید روغن و دانه کشت می‌شود (Bashir *et al.*, 2021). همچنین از سیاه‌دانه به‌طور گسترده‌ای به عنوان چاشنی روی نان و ترشی استفاده می‌شود و دارای ترکیب‌های مهمی مانند متاربین، نیج‌لین، گلیکوزیدها، آنتراکینون‌ها، ساپونین‌ها، ملانتین، روغن، پروتئین‌ها، گلوکز و رزین‌های موسیلاژی است که برای ارتقای سلامت انسان مفید هستند (Amin & Hosseinzadeh, 2016). بذر سیاه‌دانه یک عامل ضدباکتری، ضدالتهاب و ضدتومور قوی است که دامنه وسیعی از بیماری‌ها و اختلالات را کاهش می‌دهد (Karimi *et al.*, 2019).

کودهای با منشأ طبیعی جایگاه مهمی در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش مصرف کودهای شیمیایی دارند (Barea *et al.*, 2005). کودهای آلی با آزاد کردن عناصر غذایی در خاک و با تولید تنظیم‌کننده‌های رشد باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی می‌گردند (Sturz & Christie, 2003). مصرف کودهای آلی، مهمترین راهکار در مدیریت تغذیه گیاهان برای توسعه و گسترش کشاورزی پایدار است (Bauma *et al.*, 2015). ورمی‌کمپوست از جمله کودهای آلی است که ترکیبی بسیار

مواد و روش‌ها

کاشت گلدانی سیاه‌دانه در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرستان داراب در فضای باز، در زمان معمول رشد گیاه در شرایط طبیعی و در محلی با عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۷۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و ارتفاع حدود ۱۵۱۷ متر از سطح دریا در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شد. براساس طبقه‌بندی آمبرژه، شهرستان داراب جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌گردد که در زمستان دارای آب و هوای نسبتاً سرد توأم با بارندگی و در تابستان، هوایی گرم و خشک دارد. این آزمایش به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول آزمایش شامل چهار رژیم آبیاری شامل ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت از حد ظرفیت زراعی و فاکتور دوم بسترهای کاشت حاوی مواد آلی مختلف با ۵ درصد وزنی خاک گلدان شامل خاک معمولی (شاهد)، خاک معمولی + بیوجار، خاک معمولی + کمپوست، خاک معمولی + ورمی‌کمپوست و خاک معمولی + کود دامی بود. در هر گلدان شش کیلوگرم خاک قرار داده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده (جدول ۱) و کودهای آلی قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری گردید (جدول ۲).

فعال از بقایای گیاهی، کود حیوانی، آنزیم‌ها، ترکیب‌های هیومیکی، کرم خاکی و میکروارگانیسم‌های مفید می‌باشد و رشد و عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشد (Singh *et al.*, 2020). گزارش شده است که استفاده از ورمی‌کمپوست با افزایش جذب عناصر غذایی و فتوسنتز سبب بهبود رشد گیاه دارویی گل گاوزبان می‌شود (Ahmadabadi *et al.*, 2012). در سال‌های اخیر استفاده از بیوجار برای اصلاح کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک مورد توجه قرار گرفته است (Rezaei *et al.*, 2022). محققان گزارش کردند که ورمی‌کمپوست و بیوجار سبب بهبود وضعیت تهویه خاک و افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌شوند (Cao *et al.*, 2021).

استفاده از کودهای آلی برای بهبود رشد و عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی اهمیت به‌سزایی دارد. با وجود انجام تحقیقات فراوان در مورد تأثیرات مفید کاربرد کودهای آلی در رشد گیاهان دارویی، تاکنون مطالعات کمی در مورد مقایسه این ترکیب‌ها از جمله بیوجار، کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی در گیاه سیاه‌دانه در شرایط مختلف رطوبت انجام شده است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر کودهای مختلف آلی در بستر کشت سیاه‌دانه و تأثیر آنها بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه این گیاه در رژیم‌های مختلف آبیاری بود.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Chemical and physical characteristics of the soil used in the experiment

| Texture | EC (dS.m ⁻¹) | pH | Cu Fe Zn Mn K P | | | | | N (%) | O.C. (%) | |
|------------|-----------------------------|-----|------------------------|-----|------|-----|-----|----------|-------------|------|
| | | | (mg.kg ⁻¹) | | | | | | | |
| Clay-loamy | 1.08 | 7.4 | 0.45 | 6.2 | 0.56 | 3.2 | 112 | 7.2 | 0.1 | 0.39 |

بیوجار کلزا از شرکت بیوجار کوهبنان تهیه شد. در تاریخ یک اسفندماه بذرها در گلدان‌های پلاستیکی با ارتفاع ۲۵ و قطر ۱۵ سانتی‌متر در عمق یک سانتی‌متری کشت شدند. در هر گلدان تعداد ۱۵ بذر سیاه‌دانه توده محلی کشت گردید.

ابتدا خاک مورد استفاده در آزمایش را از الک دو میلی‌متری عبور داده و کودهای آلی به مقدار ۵ درصد وزنی به‌طور دستی با خاک هر گلدان مخلوط شد. کود دامی، کمپوست و ورمی‌کمپوست از شرکت کیمیا کمپوست پارس و

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی کودهای آلی استفاده شده در آزمایش

Table 2. Chemical characteristics of the organic fertilizers used in the experiment

| Organic fertilizer | N (%) | P (mg.kg ⁻¹) | K (mg.kg ⁻¹) | EC (dS.m ⁻¹) | pH |
|--------------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| Animal manure | 1.22 | 0.50 | 1.01 | 4.2 | 7.8 |
| Vermicompost | 1.31 | 0.82 | 1.30 | 3.6 | 7.4 |
| Compost | 0.20 | 0.26 | 0.20 | 1.3 | 6.2 |
| Biochar | 0.16 | 0.11 | 0.16 | 2.8 | 7.8 |

شد (Weatherly, 1950).

با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون، میزان کلروفیل a, b و کلروفیل کل به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (Arnon, 1949). جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد.

برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز ۰/۱ گرم، نمونه منجمد برگ در ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیتته ۶/۸ عصاره‌گیری گردید. همگن‌های حاصل با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفوژ شده و از بخش شناور رویی برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده گردید. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیتته ۶/۸ و ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی می‌باشد، در نهایت جذب محلول در طول موج ۲۴۰ نانومتر (Cakmak & Horst, 1991) و با اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 قرائت گردید. برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، دو میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیتته ۶/۸ و ۰/۵ میلی‌لیتر گایاکول ۲۸ میلی‌مولار و ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۵ میلی‌مولار اضافه گردید و جذب محلول در طول موج ۴۷۰ نانومتر (Ghanati et al., 2002) با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 قرائت شد.

در پایان دوره رشد ارتفاع گیاه اندازه‌گیری شد. طول شش بوته در هر گلدان در مرحله گلدهی، از سطح زمین تا انتهای ساقه اصلی اندازه‌گیری گردید و بعد میانگین آنها به عنوان

دو هفته پس از کاشت (مرحله سه برگی)، عمل تنک کردن گیاهچه‌ها انجام شد و تعداد شش بوته در هر گلدان حفظ شد. بعد از کاشت بذرها، تمام گلدان‌ها به‌طور یکنواخت آبیاری شدند. پس از سبز شدن بوته‌های سیاه‌دانه و در زمان چهار تا پنج برگی، آبیاری براساس ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت از حد ظرفیت مزرعه انجام شد. رطوبت حد ظرفیت مزرعه در آزمایشگاه و با استفاده از صفحات فشاری در فشار یک سوم اتمسفر تعیین شد. در طول مدت آزمایش گلدان‌ها هر سه روز یکبار به روش وزنی و تا مقادیر تخلیه شده از حد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند.

اندازه‌گیری نیتروژن برگ پس از هضم نمونه گیاهی براساس تیتراسیون بعد از تقطیر توسط دستگاه کج‌لدال مدل V40 ساخت کشور آلمان اندازه‌گیری شد (Lang, 1958). فسفر به روش رنگ‌سنجی با استفاده از رنگ زرد وانادات مولیبدات در طول موج ۴۷۰ نانومتر و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Vis 2100 از شرکت UNICO ساخت کشور آمریکا) اندازه‌گیری شد (Jones et al., 1991). پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر مدل G۶۲۰ ساخت کشور انگلیس قرائت گردید. در نهایت غلظت پتاسیم در ماده خشک گیاهی برحسب درصد گزارش گردید (Jones et al., 1991).

برای تعیین نشت یونی، برگ‌های کامل جوان و شاداب از هر تیمار در اوایل صبح و قبل از طلوع آفتاب انتخاب شد. نشت یونی با استفاده از روش (Sairam et al., 2009) و اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید به عنوان فراورده نهایی پراکسیداسیون غشا با روش (Heath & Packer, 1968) اندازه‌گیری شد. همچنین محتوای نسبی آب برگ‌ها محاسبه

ارتفاع بوته برای هر گلدان در نظر گرفته شد.

برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، ابتدا اندام هوایی از ریشه جدا شد و پس از شستشوی نمونه‌ها با آب مقطر، در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۴۸ ساعت خشک و توسط ترازوی دیجیتالی توزین گردید. در پایان دوره رشد، میزان بذر تولیدی در هر گلدان جداسازی و وزن گردید.

تجزیه واریانس داده‌ها برای صفات مختلف با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید.

نتایج

نیترژن، فسفر و پتاسیم برگ

اثر تنش خشکی و کودهای آلی بر نیترژن، فسفر و پتاسیم برگ معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش عوامل آزمایشی فقط محتوای نیترژن و فسفر برگ را تحت تأثیر قرار داد (جدول

۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که افزایش تنش خشکی سبب کاهش محتوای نیترژن برگ شد، به طوری که کمترین نیترژن برگ در تیمار ۸۰ درصد تخلیه رطوبت مشاهده شد (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد که در فواصل آبیاری ۲۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، محتوای نیترژن برگ در تیمار خاک معمولی + ورمی‌کمپوست یا کود دامی نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری نشان داد. در ۴۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، بیشترین محتوای نیترژن برگ در اختلاط خاک معمولی + ورمی‌کمپوست مشاهده شد (جدول ۴).

در تمامی رژیم‌های رطوبت، تلفیق خاک با مواد آلی سبب افزایش محتوای فسفر برگ شد که در بیشتر موارد تأثیر ورمی‌کمپوست و کود دامی بیشتر بود (جدول ۴).

افزایش تنش خشکی سبب کاهش محتوای پتاسیم برگ شد، به طوری که آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت سبب کاهش معنی‌دار پتاسیم برگ گردید (جدول ۵). از سوی دیگر، استفاده از خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و یا کود دامی سبب افزایش معنی‌دار پتاسیم برگ شد (جدول ۶).

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر آبیاری و کود آلی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک سیاه‌دانه

Table 3. ANOVA of irrigation and organic fertilizer effects on some growth and physiological characteristics of *Nigella sativa*

| S.O.V. | d.f. | Leaf nitrogen | Leaf phosphorus | Leaf potassium | Ion leakage | Malondialdehyde | Relative water content | Chlorophyll a | Chlorophyll b | Total chlorophyll a+b |
|------------------------|------|---------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------|------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|
| Irrigation regime (I) | 3 | 1.82** | 0.003** | 0.389** | 3856** | 22.8** | 1625.5** | 1.28** | 0.089** | 2.03** |
| Organic fertilizer (O) | 4 | 0.876** | 0.002 ^{ns} | 0.040** | 104.0* | 2.4* | 105.4** | 379.0** | 0.082** | 0.785** |
| I × O | 12 | 0.117** | 0.0001** | 0.005 ^{ns} | 15.7* | 0.987* | 5.5 ^{ns} | 0.020* | 0.002 ^{ns} | 0.029* |
| Experimental error | 40 | 0.064 | 0.00005 | 0.007 | 11.5 | 0.898 | 22.9 | 0.015 | 0.008 | 0.020 |
| C.V. (%) | — | 12.4 | 9.3 | 7.5 | 8.3 | 10.0 | 7.4 | 9.1 | 10.4 | 10.5 |

ادامه جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر آبیاری و کود آلی ...

Continued Table 3. ANOVA of irrigation and organic fertilizer effects ...

| S.O.V. | d.f. | Catalase | Peroxidase | Plant height | Shoot dry weight | Root dry weight | Seed weight |
|------------------------|------|----------|------------|--------------------|------------------|---------------------|-------------|
| Irrigation regime (I) | 3 | 0.275** | 3.043** | 139.4** | 154.5** | 16.2** | 0.506** |
| Organic fertilizer (O) | 4 | 0.019** | 0.173** | 54.0** | 41.4** | 0.645** | 0.373** |
| I × O | 12 | 0.002* | 0.025* | 1.05 ^{ns} | 10.5** | 0.204 ^{ns} | 0.110* |
| Experimental error | 40 | 0.001 | 0.015 | 3.70 | 2.50 | 0.206 | 0.032 |
| C.V. (%) | — | 10.0 | 9.7 | 9.6 | 8.7 | 11.2 | 13.7 |

^{ns}, *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری × کود آلی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک سیاه‌دانه

Table 4. Means comparison of irrigation × organic fertilizer interaction on some growth and physiological characteristics of *Nigella sativa*

| Irrigation regime | Organic fertilizer | Leaf nitrogen (%) | Leaf phosphorus (%) | Ion leakage (%) | Malondialdehyde ($\mu\text{mol g}^{-1}$ leaf fresh weight) | Chlorophyll a (mg g^{-1} leaf fresh weight) | Total chlorophyll (mg g^{-1} leaf fresh weight) |
|------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---|---|---|
| 20% moisture depletion | control | 2.01 ^{b-e} | 0.221 ^{fg} | 28.1 ^{gh} | 8.2 ^{fg} | 2.54 ^{c-g} | 3.36 ^{d-g} |
| | soil + biochar | 2.09 ^{abc} | 0.240 ^{b-e} | 25.4 ^h | 8.1 ^{fg} | 2.57 ^{c-f} | 3.46 ^{cde} |
| | soil + compost | 2.06 ^{c-f} | 0.244 ^{a-d} | 25.1 ^h | 8.0 ^{fg} | 2.63 ^{b-e} | 3.61 ^{bcd} |
| | soil + vermicompost | 2.72 ^a | 0.255 ^a | 24.9 ^h | 7.9 ^g | 2.91 ^a | 4.00 ^a |
| | soil + animal manure | 2.61 ^{ab} | 0.253 ^{ab} | 25.3 ^h | 8.0 ^{fg} | 2.84 ^a | 3.78 ^{ab} |
| 40% moisture depletion | control | 1.93 ^{c-g} | 0.217 ^{fgh} | 33.9 ^g | 9.3 ^{c-g} | 2.38 ^{fg} | 3.20 ^{efg} |
| | soil + biochar | 2.05 ^{c-f} | 0.238 ^{cde} | 30.4 ^{gh} | 8.8 ^{d-g} | 2.43 ^{efg} | 3.29 ^{efg} |
| | soil + compost | 2.13 ^{b-e} | 0.235 ^{de} | 28.0 ^{gh} | 8.7 ^{d-g} | 2.48 ^{c-g} | 3.37 ^{d-g} |
| | soil + vermicompost | 2.67 ^a | 0.250 ^{abc} | 27.7 ^{gh} | 8.5 ^{efg} | 2.72 ^{abc} | 3.71 ^{bc} |
| | soil + animal manure | 2.54 ^{ab} | 0.250 ^{abc} | 27.6 ^{gh} | 8.7 ^{d-g} | 2.68 ^{bcd} | 3.61 ^{bcd} |
| 60% moisture depletion | control | 1.64 ^{fgh} | 0.203 ^{ji} | 51.8 ^{de} | 11.2 ^{ab} | 2.38 ^{fg} | 3.11 ^g |
| | soil + biochar | 1.73 ^{e-h} | 0.208 ^{g-j} | 47.0 ^{ef} | 10.2 ^{a-e} | 2.45 ^{d-g} | 3.28 ^{efg} |
| | soil + compost | 1.77 ^{d-h} | 0.206 ^{hij} | 45.7 ^{ef} | 9.8 ^{b-f} | 2.49 ^{c-g} | 3.39 ^{d-g} |
| | soil + vermicompost | 2.25 ^{a-d} | 0.245 ^{a-d} | 44.3 ^f | 9.5 ^{b-g} | 2.67 ^{b-e} | 3.62 ^{bcd} |
| | soil + animal manure | 2.18 ^{a-d} | 0.235 ^{de} | 45.3 ^{ef} | 10.4 ^{a-d} | 2.56 ^{c-f} | 3.43 ^{c-f} |
| 80% moisture depletion | control | 1.38 ^h | 0.201 ^j | 68.0 ^a | 11.8 ^a | 1.67 ⁱ | 2.3 ⁱ |
| | soil + biochar | 1.42 ^h | 0.205 ^{hij} | 62.4 ^{ab} | 10.9 ^{abc} | 1.83 ^{hi} | 2.56 ^h |
| | soil + compost | 1.54 ^{gh} | 0.208 ^{g-j} | 56.6 ^{bcd} | 10.0 ^{a-e} | 1.97 ^h | 2.72 ^h |
| | soil + vermicompost | 1.82 ^{c-h} | 0.229 ^{ef} | 54.5 ^{cd} | 9.7 ^{b-g} | 2.31 ^g | 3.19 ^{efg} |
| | soil + animal manure | 1.82 ^{c-h} | 0.216 ^{f-i} | 59.5 ^{bc} | 10.9 ^{abc} | 2.32 ^g | 3.15 ^{fg} |

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری × کود آلی ...

Continued Table 4. Means comparison of irrigation × organic fertilizer interaction ...

| Irrigation regime | Organic fertilizer | Catalase ($\mu\text{mol mg protein}^{-1} \text{min}^{-1}$) | Peroxidase ($\mu\text{mol mg protein}^{-1} \text{min}^{-1}$) | Shoot dry weight (g pot ⁻¹) | Seed weight (mg pot ⁻¹) |
|------------------------|----------------------|--|--|---|-------------------------------------|
| 20% moisture depletion | control | 0.24 ^{ij} | 0.80 ^{ij} | 20.2 ^{bcd} | 1.25 ^{cde} |
| | soil + biochar | 0.23 ^{ij} | 0.73 ^j | 22.1 ^{abc} | 1.43 ^{bc} |
| | soil + compost | 0.21 ^j | 0.66 ^j | 22.3 ^{ab} | 1.41 ^{bcd} |
| | soil + vermicompost | 0.21 ^j | 0.66 ^j | 23.6 ^a | 1.79 ^a |
| | soil + animal manure | 0.21 ^j | 0.67 ^j | 23.6 ^a | 1.70 ^{ab} |
| 40% moisture depletion | control | 0.42 ^{ef} | 1.34 ^{ef} | 18.8 ^{fg} | 1.07 ^{def} |
| | soil + biochar | 0.33 ^{gh} | 1.10 ^{gh} | 17.8 ^{def} | 1.37 ^{bcd} |
| | soil + compost | 0.34 ^{gh} | 1.13 ^{fgh} | 17.8 ^{def} | 1.38 ^{bcd} |
| | soil + vermicompost | 0.29 ^{hi} | 0.96 ^{hi} | 20.6 ^{bcd} | 1.49 ^{abc} |
| | soil + animal manure | 0.29 ^{hi} | 0.98 ^{hi} | 19.1 ^{de} | 1.47 ^{abc} |
| 60% moisture depletion | control | 0.51 ^{bcd} | 1.66 ^{bcd} | 14.3 ^g | 1.00 ^{ef} |
| | soil + biochar | 0.47 ^{cde} | 1.50 ^{de} | 16.4 ^{efg} | 1.29 ^{cde} |
| | soil + compost | 0.44 ^{def} | 1.46 ^{de} | 17.0 ^{efg} | 1.32 ^{cde} |
| | soil + vermicompost | 0.39 ^{fg} | 1.23 ^{fg} | 19.3 ^{cde} | 1.42 ^{bc} |
| | soil + animal manure | 0.40 ^{fg} | 1.62 ^{bcd} | 18.7 ^{def} | 1.42 ^{bcd} |
| 80% moisture depletion | control | 0.59 ^a | 1.93 ^a | 11.0 ^h | 0.96 ^f |
| | soil + biochar | 0.56 ^{ab} | 1.83 ^{ab} | 14.6 ^g | 1.03 ^{ef} |
| | soil + compost | 0.54 ^{abc} | 1.76 ^{abc} | 14.6 ^g | 1.01 ^{ef} |
| | soil + vermicompost | 0.48 ^{cde} | 1.54 ^{cde} | 17.2 ^{efg} | 1.27 ^{cde} |
| | soil + animal manure | 0.48 ^{cde} | 1.57 ^{cd} | 16.1 ^{fg} | 1.21 ^{cde} |

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر آبیاری بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک سیاه‌دانه

Table 5. Means comparison of irrigation effects on some growth and physiological characteristics of *Nigella sativa*

| Irrigation regime | Leaf potassium (%) | Relative water content (%) | Chlorophyll <i>b</i> (mg g ⁻¹ leaf fresh weight) | Plant height (cm) | Root dry weight (g pot ⁻¹) |
|------------------------|--------------------|----------------------------|---|-------------------|--|
| 20% moisture depletion | 1.33 ^a | 74.9 ^a | 0.945 ^a | 23.1 ^a | 6.35 ^b |
| 40% moisture depletion | 1.28 ^a | 69.6 ^b | 0.897 ^{ab} | 21.3 ^b | 7.53 ^a |
| 60% moisture depletion | 1.08 ^b | 63.3 ^c | 0.856 ^b | 19.1 ^c | 6.20 ^b |
| 80% moisture depletion | 0.99 ^c | 50.8 ^d | 0.763 ^c | 16.0 ^d | 4.98 ^c |

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر کود آلی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک سیاه‌دانه

Table 6. Means comparison of organic fertilizer effects on some growth and physiological characteristics of *Nigella sativa*

| Organic fertilizer | Leaf potassium (%) | Relative water content (%) | Chlorophyll <i>b</i> (mg g ⁻¹ leaf fresh weight) | Plant height (cm) | Root dry weight (g pot ⁻¹) |
|----------------------|--------------------|----------------------------|---|-------------------|--|
| control | 1.09 ^c | 59.9 ^b | 0.751 ^c | 17.0 ^c | 5.94 ^b |
| soil + biochar | 1.15 ^{bc} | 64.8 ^a | 0.829 ^b | 18.8 ^b | 6.29 ^{ab} |
| soil + compost | 1.15 ^{bc} | 65.8 ^a | 0.880 ^b | 19.6 ^b | 6.22 ^{ab} |
| soil + vermicompost | 1.24 ^a | 68.0 ^a | 0.975 ^a | 22.4 ^a | 6.59 ^a |
| soil + animal manure | 1.21 ^{ab} | 64.6 ^a | 0.891 ^b | 21.5 ^a | 6.30 ^{ab} |

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

مختلف کودهای آلی نداشت. در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، کمپوست و ورمی‌کمپوست به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۱۲/۵ و ۱۵/۲ درصد مالون‌دی‌آلدئید نسبت به شاهد شدند. همچنین در آبیاری ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، کمپوست و ورمی‌کمپوست به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۱۵/۲ و ۱۷/۸ درصد مالون‌دی‌آلدئید نسبت به شاهد شدند (جدول ۴).

افزایش تنش خشکی سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ شد، به طوری که آبیاری ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۷، ۱۵ و ۳۲ درصد محتوای نسبی آب برگ نسبت به ۲۰ درصد تخلیه رطوبت گردید (جدول ۵). از سوی دیگر، استفاده از خاک معمولی در تلفیق با کودهای مختلف آلی سبب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ نسبت به خاک معمولی به تنهایی شد که البته تیمارهای کودی اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند (جدول ۶).

محتوای کلروفیل *a*، *b* و کلروفیل کل برگ

اثر تنش خشکی و کودهای آلی روی محتوای کلروفیل *a*،

نشت یونی، مالون‌دی‌آلدئید و محتوای نسبی آب برگ اثر تنش خشکی و کودهای آلی روی نشت یونی، مالون‌دی‌آلدئید و محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش عوامل آزمایشی فقط نشت یونی و مالون‌دی‌آلدئید را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارها نشان داد که در ۲۰ درصد تخلیه رطوبت، اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف کودهای آلی از لحاظ نشت یونی مشاهده نشد (جدول ۴). در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، سطوح مختلف کودهای آلی سبب کاهش معنی‌دار نشت یونی نسبت به شاهد شد. در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی به ترتیب سبب کاهش معنی‌دار ۱۱/۸، ۱۴/۵ و ۱۲/۲ درصد نشت یونی نسبت به شاهد شدند. روند مشابهی در ۸۰ درصد تخلیه رطوبت مشاهده شد و کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی سبب کاهش معنی‌دار نشت یونی نسبت به شاهد شدند (جدول ۴).

افزایش تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار غلظت مالون‌دی‌آلدئید گردید (جدول ۴). در ۲۰ و ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، مالون‌دی‌آلدئید اختلاف معنی‌داری بین سطوح

خشکی روند افزایشی را نشان داد، به طوری که بیشترین فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی کاتالاز در تیمار ۸۰ درصد تخلیه رطوبت مشاهده شد (جدول ۴). از سوی دیگر، در سطح آبیاری ۲۰ درصد تخلیه رطوبت، کودهای آلی کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی سبب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز شدند. در سطح تنش خشکی ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، کمترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تلفیق خاک معمولی با کود دامی و ورمی‌کمپوست به میزان ۰/۲۹ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین بدست آمد (جدول ۴). در سطح تنش خشکی ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، فعالیت آنزیم کاتالاز در تلفیق خاک معمولی با کود دامی و ورمی‌کمپوست به ترتیب کاهش ۲۱ و ۲۳ درصد نسبت به شاهد نشان داد. در سطح تنش خشکی ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، ورمی‌کمپوست و کود دامی و پس از آن کمپوست و بیوجار سبب کاهش معنی‌دار فعالیت کاتالاز نسبت به خاک معمولی به تنهایی شدند (جدول ۴).

فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز با افزایش تنش خشکی روند افزایشی را نشان داد (جدول ۴). از سوی دیگر، در سطح آبیاری ۲۰ درصد تخلیه رطوبت، تمامی کودهای آلی سبب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به خاک معمولی به تنهایی شدند. در سطوح ۴۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در تلفیق خاک معمولی با ورمی‌کمپوست بدست آمد (جدول ۴). در سطح تنش خشکی ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، فعالیت آنزیم پراکسیداز در تلفیق خاک معمولی با کود دامی و ورمی‌کمپوست به ترتیب کاهش ۱۹ و ۲۰ درصد نسبت به شاهد نشان دادند.

ارتفاع بوته

اثر تنش خشکی و کودهای آلی بر ارتفاع بوته سیاه‌دانه معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش این دو تیمار، اثر معنی‌داری بر ارتفاع بوته نداشت (جدول ۳). بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری ۲۰ درصد تخلیه رطوبت مشاهده شد و افزایش تنش خشکی، سبب کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته شد (جدول ۵).

b و کلروفیل کل برگ معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش عوامل آزمایشی فقط محتوای کلروفیل a و b را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۳). در ۲۰ درصد تخلیه رطوبت، ورمی‌کمپوست و کود دامی سبب افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل a نسبت به خاک معمولی به تنهایی شدند (جدول ۴). در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، تمامی مواد آلی سبب افزایش محتوای کلروفیل a نسبت به خاک معمولی به تنهایی شدند که فقط تفاوت کمپوست با خاک معمولی به تنهایی معنی‌دار نبود. در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، محتوای کلروفیل a فقط در تیمار خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست نسبت به خاک معمولی افزایش معنی‌دار ۱۲ درصدی نشان داد. همچنین در ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، ورمی‌کمپوست و کود دامی به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ۳۸ و ۳۹ درصد محتوای کلروفیل a نسبت به شاهد شدند (جدول ۴).

کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل b در آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت نسبت به آبیاری ۲۰ درصد تخلیه رطوبت مشاهده شد (جدول ۵). از سوی دیگر، استفاده از خاک معمولی در تلفیق با تمامی کودهای آلی سبب افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل b شد (جدول ۶).

در ۲۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، بیشترین محتوای کلروفیل کل در شرایط خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و در سطح پایین‌تر با کاربرد کود دامی و کمپوست بدست آمد (جدول ۴). در فواصل آبیاری ۴۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، محتوای کلروفیل کل در تیمار خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و یا کود دامی نسبت به خاک معمولی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۴).

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز تحت تأثیر تنش خشکی و کودهای آلی و برهم‌کنش عوامل آزمایشی قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه برهم‌کنش تیمارها نشان داد که صرف‌نظر از تیمارهای مختلف کودهای آلی، فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی کاتالاز با بالا رفتن سطح تنش

بدست آمد (جدول ۴). در سطح ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، وزن دانه در تلفیق خاک معمولی با کود دامی و ورمی کمپوست به ترتیب افزایش ۲۶ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد نشان داد (جدول ۴).

بحث

با افزایش تنش خشکی وزن خشک اندام هوایی و ریشه، ارتفاع گیاه، وزن بذر در هر گلدان و غلظت نیتروژن، پتاسیم و فسفر گیاه کاهش یافت. تنش خشکی از طریق کاهش انتقال عناصر از خاک به درون ریشه و آوندهای گیاه، محتوای عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار می دهد (Dotaniya & Meena, 2015). همچنین کاهش میزان تعرق در شرایط تنش خشکی، سبب کاهش جذب عناصر غذایی و کارایی استفاده از آنها می گردد (Farooq et al., 2009). گزارش شده است که در شرایط آبیاری بهینه زمانی که ظرفیت آب خاک بالا است، انتقال عناصر غذایی به اندام های هوایی بیشتر است (Attarzadeh et al., 2019). از سوی دیگر، ورمی کمپوست سبب فراهمی بیشتر عناصر غذایی و جلوگیری از هدرروی عناصر خاک می شود (Nigussie et al., 2016). استفاده از کودهای آلی مانند کمپوست و بیوجار به دلیل حفظ رطوبت خاک، شرایط لازم برای جذب آب را فراهم نموده و جذب عناصر غذایی را در شرایط تنش خشکی بهبود می بخشد (Kader et al., 2019). همچنین کودهای آلی از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک سبب افزایش جذب عناصر توسط گیاه می شوند (Erdal & Ekinici, 2020). گزارش شده است که کودهای آلی و زیستی با سازوکارهای مختلفی مانند سیگنال دهی هورمونی و بیان ژن های کلیدی برای آنزیم های درگیر در جذب و متابولیسم عناصر غذایی، سبب جذب کارآمد عناصر غذایی می گردند (Mitra et al., 2023).

تنش خشکی از طریق ایجاد تنش اکسیداتیو سبب افزایش تولید و تجمع رادیکال های آزاد فعال می شود که اکسید شدن پروتئین ها و لیپیدها را بدنبال دارد (García-Caparrós et al., 2019). تخریب غشاء سلولی سبب افزایش نشت یونی و

بیشترین ارتفاع بوته در خاک معمولی در تلفیق با ورمی کمپوست و یا کود دامی و در سطح پایین تر در تلفیق خاک معمولی با کمپوست و یا بیوجار مشاهده گردید (جدول ۶).

وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و وزن دانه اثر تنش خشکی و کودهای آلی بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و وزن دانه معنی دار بود، اما برهم کنش عوامل آزمایشی فقط وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۳). وزن خشک اندام هوایی با افزایش تنش خشکی افزایش یافت (جدول ۴). در سطوح ۲۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، ورمی کمپوست و کود دامی سبب افزایش معنی دار وزن خشک اندام هوایی نسبت به خاک معمولی شدند. در سطح تنش خشکی ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تلفیق خاک معمولی با ورمی کمپوست به میزان ۲۰/۶ گرم در گلدان بدست آمد (جدول ۷). در سطح ۸۰ درصد تخلیه رطوبت، وزن خشک اندام هوایی در تلفیق خاک معمولی با کود دامی و ورمی کمپوست به ترتیب افزایش ۴۶ و ۵۶ درصد نسبت به شاهد نشان دادند (جدول ۴).

با افزایش تنش خشکی در تیمار آبیاری ۴۰ درصد تخلیه رطوبت، وزن خشک ریشه ابتدا روند افزایشی و پس از آن در تیمار ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت روند کاهشی نشان داد، به طوری که آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت سبب کاهش معنی دار وزن خشک ریشه گردید (جدول ۵). از سوی دیگر، فقط استفاده از خاک معمولی در تلفیق با ورمی کمپوست سبب افزایش معنی دار وزن خشک ریشه نسبت به خاک معمولی شد (جدول ۶).

در سطوح ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، کودهای آلی مختلف سبب افزایش معنی دار وزن دانه نسبت به خاک معمولی شدند. در سطح تنش خشکی ۶۰ درصد تخلیه رطوبت، بیشترین وزن دانه در تلفیق خاک معمولی با ورمی کمپوست و کود دامی به میزان ۱/۴۲ گرم در گلدان

گیاهان با تنظیم واکنش‌های اکسیداتیو و القای دفاع آنتی‌اکسیدانی به تنش‌های محیطی پاسخ می‌دهند (Garcia-Caparrós *et al.*, 2021). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش‌های محیطی مانند خشکی تولید می‌شوند (Zhang *et al.*, 2021). ارتباط بسیار زیادی بین تحمل به تنش خشکی با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی وجود دارد (Kosara *et al.*, 2015). از سوی دیگر، استفاده از کودهای آلی سبب تغییر در املاح سازگار و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Shahkoliaie *et al.*, 2020). محققان گزارش کردند که کودهای آلی با جذب عناصر غذایی سبب پایداری غشای پلاسمایی گیاهان و تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شوند (Attarzadeh *et al.*, 2019).

وقوع تنش به‌ویژه در مراحل مختلف رویشی باعث تسریع پیری، کاهش رشد و در نهایت کاهش ارتفاع بوته می‌شود (Farooq *et al.*, 2012). از سوی دیگر، در این مطالعه کودهای آلی تا حدودی توانستند در بهبود ارتفاع بوته نقش ایفا نمایند. استفاده از ترکیب‌های کودهای آلی به‌ویژه ورمی‌کمپوست و کود دامی سبب افزایش انتقال مواد پرورده از برگ‌ها و منجر به افزایش عملکرد و رشد می‌گردد و ارتفاع بوته را افزایش می‌دهد (Sheteiwy *et al.*, 2021).

تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری از طریق کوتاه کردن دوره زایشی و کاهش فتوسنتز سبب کاهش دوره رشد گیاه می‌شوند (Farooq *et al.*, 2009). بنابراین تنش به‌ویژه در مراحل مختلف رویشی باعث کاهش رشد و ارتفاع بوته می‌شود (Ali *et al.*, 2022). از سوی دیگر، محققان بیان کردند که کودهای آلی با بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی سبب افزایش عملکرد دانه گیاهان در شرایط کمبود آب می‌شوند (Guo *et al.*, 2021). کود ورمی‌کمپوست حاوی عناصر غذایی قابل استفاده فراوانی بوده که موجب تغذیه مستقیم گیاهان شده و سبب افزایش رشد می‌گردد (Rathore & Kumar, 2021). به هر حال، وجود مواد محرک رشد و عناصر غذایی در ورمی‌کمپوست و کود دامی، رشد گیاه و عملکرد را به شکل مناسبی افزایش می‌دهد.

مالون‌دی‌آلدهید به‌ویژه در شرایط خشکی می‌شود (Attarzadeh *et al.*, 2019). مالون‌دی‌آلدهید محصول نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی و یکی از مهمترین علائم بروز خسارت در غشاء می‌باشد (Davey *et al.*, 2005). از سوی دیگر، استفاده از ترکیب‌های کودهای آلی سبب افزایش نفوذ و ظرفیت نگهداری آب در خاک شده و تا حدودی از عوارض تنش خشکی می‌کاهد (Rahma *et al.*, 2019). کودهای آلی محیطی مناسب را برای رشد گیاه فراهم می‌کنند و آب قابل دسترس بیشتری را در اختیار گیاه قرار می‌دهند و سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شوند. ورمی‌کمپوست علاوه بر کمک به ظرفیت نگهداری آب در خاک سبب افزایش رشد و گسترش ریشه شده و منجر به بهبود جذب آب توسط گیاه می‌شود (Demir, 2019).

با افزایش شدت تنش خشکی از میزان محتوای کلروفیل برگ گیاه سیاه‌دانه کاسته شد. در واقع حمله رادیکال‌های آزاد ناشی از تنش اکسیدکننده عاملی برای کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی بیان شده است (Khorasaninejad *et al.*, 2018). کاهش مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه سیاه‌دانه در شرایط تنش نیز خود نتیجه فراهم نبودن عوامل لازم برای سنتز کلروفیل و تخریب ساختمان آن می‌باشد (Kabiri *et al.*, 2014). از سوی دیگر، مصرف کود دامی و ورمی‌کمپوست به دلیل بهبود جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن سبب سنتز بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی شده است (Hosseinzadeh *et al.*, 2018). بنابراین با توجه به نقش کلیدی عناصری مانند نیتروژن در ساختمان کلروفیل، به‌نظر می‌رسد تأمین این عنصر از دلایل اصلی افزایش کلروفیل برگ در این پژوهش باشد. میزان تجمع کلروفیل در بافت‌های سبز گیاهی از مهمترین صفات فیزیولوژیک است که رابطه مستقیم با میزان فتوسنتز و ماده خشک گیاهی دارد و میزان آن در شرایط تنش به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های اکسیداز و کلروفیل‌از به‌شدت کاهش می‌یابد (Baghbani-Arani *et al.*, 2017). البته نتایج مشابهی برای بهبود کلروفیل کل و افزایش در تولیدات فتوسنتزی با استفاده از کودهای آلی در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Shah *et al.*, 2023).

شاخص‌های رشد مؤثر هستند. علاوه بر کاربرد کود ورمی‌کمپوست و دامی که سبب افزایش وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه در سیاه‌دانه شدند، تیمار بیوجار و کمپوست در سطح پایین‌تر توانستند عملکرد دانه را در برخی موارد بهبود دهند. در مجموع، کاربرد کود ورمی‌کمپوست و دامی برای کاشت سیاه‌دانه در شرایط مختلف رطوبت قابل توصیه می‌باشد.

تنش خشکی سبب تأثیر نامطلوبی بر غلظت عناصر غذایی و صفات فیزیولوژیک سیاه‌دانه گردید و سبب کاهش رشد و وزن دانه شد. استفاده از خاک معمولی در تلفیق با ورمی‌کمپوست و یا کود دامی در افزایش مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی مؤثر بود و رشد گیاه را افزایش داد. به نظر می‌رسد در شرایط تنش خشکی، کاربرد کودهای آلی با افزایش محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت یونی در بهبود

References

- Abd El-Gawad, H.G., Mukherjee, S., Farag, R., Abd Elbar, O.H., Hikal, M., Abou El-Yazied, A., Abd Elhady, S.A., Helal, N., ElKelish, A. and El Nahhas, N., 2021. Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA)-induced signaling events and field performance associated with mitigation of drought stress in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Signaling & Behavior*, 16: 1853384. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1853384>
- Ahmadabadi, Z., Ghajar Sepanlou, M. and Bahmanyar, M.A., 2012. Effect of vermicompost application on the amount of micro elements in soil and the content in the medicinal plant of Borage. *Journal of Crops Improvement*, 13: 1-12. <https://doi.org/10.1001.1.83372008.1390.13.2.1.7>
- Ali, A.Y.A., Ibrahim, M.E.H., Zhou, G., Zhu, G., Elsidig, A.M.I., Suliman, M.S.E., Elradi, S.B.M. and Salah, E.G.I., 2022. Interactive impacts of soil salinity and jasmonic acid and humic acid on growth parameters, forage yield and photosynthesis parameters of sorghum plants. *South African Journal of Botany*, 146: 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.027>
- Amin, B. and Hosseinzadeh, H., 2016. Black cumin (*Nigella sativa*) and its active constituent, thymoquinone: an overview on the analgesic and anti-inflammatory effects. *Planta Medica*, 82: 8-16. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1557838>
- Anderson, R., Bayer, P.E. and Edwards, D., 2020. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56: 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>
- Arnon, D. E., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (*Beta vulgaris*). *Plant Physiology*, 24: 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Dehnavi, M.M. and Salehi, A., 2019. Growth and nutrient content of *Echinacea purpurea* as affected by the combination of phosphorus with arbuscular mycorrhizal fungus and *Pseudomonas fluorescens* bacterium under different irrigation regimes. *Journal of Environmental Management*, 231: 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.040>
- Baghbani-Arani, A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mashhadi-Akbar-Boojar, M. and Mokhtassi-Bidgoli, A., 2017. Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fluorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under deficit water stress. *Industrial Crops and Products*, 109: 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.049>
- Barea, J. M., Pozo, M. J., Azcon, R. and Azcon-Aguilar, C., 2005. Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 56: 1761-1778. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri197>
- Bashir, O., Jan, N., Gani, G., Naik, H., Hussain, S.Z., Reshi, M. and Amin, T., 2021. Food applications of *Nigella sativa* seeds. Black cumin (*Nigella sativa*) seeds: Chemistry, Technology, Functionality, and Applications, 191-207. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48798-0>
- Bauma, C., El-Tohamy, W. and Gruda, N., 2015. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Scientia Horticulturae*, 187: 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>
- Bayati, P., Karimmojeni, H. and Razmjoo, J., 2020. Changes in essential oil yield and fatty acid contents in black cumin (*Nigella sativa* L.) genotypes in response to drought stress. *Industrial Crops and Products*, 155: 112764. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112764>
- Cakmak, I. and Horst, J.H., 1991. Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum*, 83:463- 468.

- <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x>
- Cal, A.J., Sanciangco, M., Rebolledo, M.C., Luquet, D., Torres, R.O., McNally, K.L. and Henry, A., 2019. Leaf morphology, rather than plant water status, underlies genetic variation of rice leaf rolling under drought. *Plant, cell and Environment*, 1-37. <https://doi.org/10.1111/pce.13514>
 - Cao, Y., Tian, Y., Wu, Q., Li, J. and Zhu, H., 2021. Vermicomposting of livestock manure as affected by carbon-rich additives (straw, biochar and nanocarbon): a comprehensive evaluation of earthworm performance, microbial activities, metabolic functions and vermicompost quality. *Bioresource Technology*, 320: 124404. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124404>
 - Davey, M., Stals, E., Panis, B., Keulemans, J. and Swennen, R., 2005. High-throughput determination of malondialdehyde in plant tissues. *Analytical Biochemistry*, 347: 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.09.041>
 - Demir, Z., 2019. Effects of vermicompost on soil physicochemical properties and lettuce (*Lactuca sativa* Var. Crispa) yield in greenhouse under different soil water regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50: 2151-2168. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1654508>
 - Dotaniya, M.L. and Meena, V.D., 2015. Rhizosphere effect on nutrient availability in soil and its uptake by plants: a review. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 85: 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0297-0>
 - El Nahhas, N., AlKahtani, M.D., Abdelaal, K.A., Al Husnain, L., AlGwaiz, H.I., Hafez, Y.M., Attia, K.A., El-Esawi, M.A., Ibrahim, M.F. and Elkelish, A., 2021. Biochar and jasmonic acid application attenuate antioxidative systems and improve growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166: 807-817. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.033>
 - Erdal, İ. and Ekinçi, K., 2020. Effects of composts and vermicomposts obtained from forced aerated and mechanically turned composting method on growth, mineral nutrition, and nutrient uptake of wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 43: 1343-1355. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727506>
 - Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A. and Siddique, K., 2012. Drought stress in plants: an overview. *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features*, 1-33. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
 - Farooq, M., Wahid, A. and Lee, D.J., 2009. Exogenously applied polyamines increase drought tolerance of rice by improving leaf water status, photosynthesis and membrane properties. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31: 937-945. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0307-2>
 - Garcia-Caparrós, P., De Filippis, L., Gul, A., Hasanuzzaman, M., Ozturk, M., Altay, V. and Lao, M.T., 2021. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. *The Botanical Review*, 87: 421-466. <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09231-1>
 - García-Caparrós, P., Mirza, H. and María Teresa, L., 2019. Oxidative stress and antioxidant defense in plants under salinity, reactive oxygen, nitrogen, and sulfur species in plants: Production, Metabolism, Signaling and Defense Mechanisms, 291-309. <https://doi.org/10.1002/9781119468677.ch12>
 - Ghanati, F., Morita, A. and Yokota, H., 2002. Induction of suberin and increase of lignin content by excess boron in tobacco cell. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48: 357-364. <https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409212>
 - Guo, J., Fan, J., Zhang, F., Yan, S., Wu, Y., Zheng, J. and Xiang, Y., 2021. Growth, grain yield, water and nitrogen use efficiency of rainfed maize in response to straw mulching and urea blended with slow-release nitrogen fertilizer: A two-year field study. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1912323>
 - Heath, R.L. and Packer, L., 1968. Photo peroxidation in isolated chloroplasts kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Biochemistry and Biophysics*, 125: 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
 - Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H. and Ismaili, A., 2018. Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer. *Journal of Integrative Agriculture*, 17: 2426-2437. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61874-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61874-4)
 - Jones, J.R., Wolf, J.B. and Mckee, H.A., 1991. *Plant analysis: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. Micro and Macro publishing Inc. Athens, Georgia, 213p. <https://doi.org/10.5555/19921969819>
 - Kabiri, R., Farahbakhsh, H. and Nasibi, F., 2014. Effect of drought stress on physiological and biochemical characteristics of *Nigella sativa* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 30: 600-610. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2014.9841>
 - Kader, M.A., Singha, A., Begum, M.A., Jewel, A., Khan, F.H. and Khan, N.I., 2019. Mulching as water-

- saving technique in dryland agriculture. Bulletin of the National Research Centre, 43, 1-6. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0186-7>
- Karimi, Z., Alizadeh, A.M., Dolatabadi, J.E.N. and Dehghan, P., 2019. *Nigella sativa* and its derivatives as food toxicity protectant agents. Advanced Pharmaceutical Bulletin, 9, 22. <https://doi.org/10.15171/apb.2019.004>
 - Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A. and Hemmati, K., 2018. The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. Scientia Horticulturae, 239: 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.015>
 - Kosara, F., Akrama, N.A. and Ashraf, M., 2015. Exogenously-applied 5-aminolevulinic acid modulates some key physiological characteristics and antioxidative defense system in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under water stress. South African Journal of Botany, 96: 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.10.015>
 - Kumar, R., Swapnil, P., Meena, M., Selpair, S. and Yadav, B.G., 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Approaches to alleviate abiotic stresses for enhancement of growth and development of medicinal plants. Sustainability, 14, 15514. <https://doi.org/10.3390/su142315514>
 - Lang, C.A., 1958. Simple micro determination of kjeldahl nitrogen in biological materials. Analytical Chemistry, 30: 1692-1694. <https://doi.org/10.1021/ac60142a038>
 - Mitra, D., Nayeri, F.D., Sansinenea, E., Ortiz, A., Bhatta, B.B., Adeyemi, N.O., Janeeshma, E., Tawfeeq Al-Ani, L.K., Sharma, S.B. and Boutaj, H., 2023. Unraveling arbuscular mycorrhizal fungi interaction in rice for plant growth development and enhancing phosphorus use efficiency through recent development of regulatory genes. Journal of Plant Nutrition, 46: 3184-3220. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2191638>.
 - Nigussie, A., Kuyper, T.W., Bruun, S., and de Neergaard, A., 2016. Vermicomposting as a technology for reducing nitrogen losses and greenhouse gas emissions from small-scale composting. Journal of Cleaner Production, 139: 429-439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.058>
 - Rahma, A.E., Warrington, D.N. and Lei, T., 2019. Efficiency of wheat straw mulching in reducing soil and water losses from three typical soils of the Loess Plateau, China. International Soil and Water Conservation Research, 7, 335-345. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.003>
 - Rathore, S. and Kumar, R., 2021. Vermicompost fertilization and pinching improve the growth, yield, and quality of super food (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the western Himalaya. Acta Physiologiae Plantarum, 43: 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03184-z>
 - Rezaei, B., Amirnejad, A. and Ghobadi, M., 2022. Interactive effects of Pb (NO₃)₂, biochar and salicylic acid on growth characteristics of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). Water and Soil, 36: 67-79. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.72977.1101>
 - Sairam, R.K., Dharmar, K., Chinnusamy, V. and Meena, R.C., 2009. Water logging-induced increase in sugar mobilization, fermentation, and related gene expression in the roots of mug bean (*Vigna radiata*). Journal of Plant Physiology, 6: 602-616. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.09.005>
 - Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L., 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants, 10: 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
 - Shah, M.N., Wright, D.L., Hussain, S., Koutroubas, S.D., Seepaul, R., George, S., Ali, S., Naveed, M., Khan, M. and Altaf, M.T., 2023. Organic fertilizer sources improve the yield and quality attributes of maize (*Zea mays* L.) hybrids by improving soil properties and nutrient uptake under drought stress. Journal of King Saud University-Science, 35: 102570. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102570>
 - Shahkoloaie, S.S., Baranimotlagh, M., Dordipour, E. and Khormali, F., 2020. Effects of inorganic and organic amendments on physiological parameters and antioxidant enzymes activities in *Zea mays* L. from a cadmium-contaminated calcareous soil. South African Journal of Botany, 128: 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.10.007>
 - Sheteiwy, M.S., Shao, H., Qi, W., Daly, P., Sharma, A., Shaghaleh, H., Hamoud, Y.A., El-Esawi, M.A., Pan, R. and Wan, Q., 2021. Seed priming and foliar application with jasmonic acid enhance salinity stress tolerance of soybean (*Glycine max* L.) seedlings. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101: 2027-2041. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10822>
 - Singh, A., Kumar, V., Verma, S., Majumdar, M. and Sarkar, S., 2020. Significance of vermicompost on crop and soil productivity: A review. International Journal of Chemical Studies, 8: 1529-1534. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5u.10517>
 - Sturz, A.V. and Christie, B.R., 2003. Beneficial microbial Allelopathies in the root zone: The management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. Soil and Tillage Research, 72: 107-123.

- [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00082-5)
- Weatherly, P. E., 1950. Studies in water relation on cotton plants, the field measurement of water deficit in leaves. *New Phytologist*, 49: 81- 87. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x>
 - Zarrinabadi, I.G., Razmjoo, J., Mashhadi, A.A. and Boroomand, A., 2019. Physiological response and productivity of pot marigold (*Calendula officinalis*) genotypes under water deficit. *Industrial Crops and Products*, 139, 111488. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111488>
 - Zhang, A., Liu, M., Gu, W., Chen, Z., Gu, Y., Pei, L. and Tian, R., 2021. Effect of drought on photosynthesis, total antioxidant capacity, bioactive component accumulation, and the transcriptome of *Atractylodes lancea*. *BMC Plant Biology*, 21: 293. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03048-9>