University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

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

The Effect of Vermicompost, Humic Acid, and Manure on Yield, Biochemical Characteristics, and Enzymatic Activities in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under Water Deficit Conditions

Sina Fatahi Ghazi[1]| Toraj Mir Mahmoodi[2]| Hamze Hamze[3]✉

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Islamic Azad University, Mahabad Branch, Mahabad, Iran.
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, Islamic Azad University, Mahabad Branch, Mahabad, Iran.
3. Corresponding Author, Sugar beet research center, Agricultural and Natural Resources Research Center of Hamedan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran. Email: h.hamze@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: March 18, 2023
Received in revised form: June 25, 2023
Accepted: June 29, 2023
Published online: December 22, 2023

Keywords:
Antioxidant,
drought stress,
organic fertilizer,
proline,
sugar content.

ABSTRACT

To investigate the effect of organic fertilizers on the quantitative and qualitative characteristics of sugar beet under different moisture conditions, a study was conducted as a split plot experiment based on a randomized complete block design with three replications in Mahabad city in 2021. Irrigation treatments, including irrigation after 60 (normal), 90 (mild stress), and 120 (severe stress) mm evaporation from the class A evaporation pan, and organic fertilizer treatments (control, vermicompost, manure, and humic acid) were placed in main plots and sub-plots, respectively. Severe water stress conditions reduced the content of chlorophyll a (22.82 %) and relative water content (RWC) (24.35 %) and increased the content of proline (47.43%), beta glycine (17.89%), catalase (21.30 %), malondialdehyde (47.95 %) and water use efficiency (WUE) (23.83%) compared to normal irrigation conditions. Also, the application of vermicompost increased the amount of chlorophyll a, RWC, proline, glycine beta, catalase content, and WUE by 29.11, 20.15, 34.83, 14.98, 13.70, and 21.56 percent, respectively, and decreased the content of malondialdehyde about 18.53% in comparison to control. In this study, the highest stomatal conductivity (51.01 $mol.m^{-2}s^{-1}$), chlorophyll b content (16.3 $mg.g^{-1}FW$), carotenoid (4.27 $mg.g^{-1}$ FW), roots yield (78.33 $t.ha^{-1}$) and the lowest content of hydrogen peroxide (0.96 $\mu mol.g^{-1}FW$) allocated to the vermicompost treatment under normal irrigation conditions. Root yield showed a positive and significant correlation with stomatal conductance, chlorophyll b, carotenoid, RWC, and WUE, but a negative and significant correlation with catalase enzyme activity, hydrogen peroxide content, malondialdehyde, and sugar content.

Cite this article: Fatahighazi, S., Mir Mahmoodi, T., & Hamze, H. (2023). The effect of vermicompost, humic acid and manure on yield, biochemical and enzymatic properties of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *54*(4), 61-78. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.356803.654991.

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2023.356803.654991

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

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

اثر ورمی‌کمپوست، هیومیک‌اسید و کود دامی بر عملکرد، خصوصیات بیوشیمیایی و فعالیت‌های آنزیمی در چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) تحت شرایط کم‌آبی

سینا فتاحی قاضی[۱]، تورج میرمحمودی[۲]، حمزه حمزه[۳]✉

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، مهاباد، ایران.

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، مهاباد، ایران.

۳. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران. رایانامه: h.hamze@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:
آنتی‌اکسیدان،
پرولین،
تنش خشکی،
عیار قند،
کود آلی.

چکیده

به‌منظور بررسی اثر کودهای آلی بر خصوصیات کمی و کیفی چغندر قند تحت شرایط مختلف رطوبتی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰ در شهرستان مهاباد اجرا شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری بعد از ۶۰ (بدون تنش)، ۹۰ (تنش ملایم) و ۱۲۰ (تنش شدید) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و تیمارهای کود آلی (شاهد، ورمی‌کمپوست، کود دامی و هیومیک‌اسید) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. شرایط تنش شدید کم‌آبی در مقایسه با شرایط آبیاری بدون تنش محتوی کلروفیل a (۲۲/۸۲ درصد) و محتوی نسبی آب برگ (۲۴/۳۵ درصد) را کاهش و محتوی پرولین (۴۷/۴۳ درصد)، بتاگلایسین (۱۷/۸۹ درصد)، کاتالاز (۲۱/۳۰ درصد)، مالون‌دی‌آلدهید (۴۷/۹۵ درصد) و کارایی مصرف آب (۲۳/۸۳ درصد) را افزایش داد. ورمی‌کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد مقدار کلروفیل a، محتوی نسبی آب برگ، پرولین، گلایسین بتا، کاتالاز و کارایی مصرف آب را به‌ترتیب ۲۹/۱۱، ۲۰/۱۵، ۳۴/۸۳، ۱۴/۹۸، ۱۳/۷۰، و ۲۱/۵۶ درصد افزایش و محتوی مالون‌دی‌آلدهید را ۱۸/۵۳ درصد کاهش داد. بالاترین ضریب هدایت روزنه‌ای (۵۱/۰۱ مول بر متر مربع بر ثانیه)، محتوی کلروفیل b (۱۶/۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، کارتنوئید (۴/۲۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، عملکرد ریشه (۷۸/۳۳ تن در هکتار) و کمترین محتوی پراکسید هیدروژن (۰/۹۶ میکرومول برگرم وزن تر) به تیمار ورمی‌کمپوست تحت شرایط آبیاری نرمال اختصاص داشت. عملکرد ریشه با هدایت روزنه‌ای، محتوی کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ، و کارایی مصرف آب همبستگی مثبت و معنی‌دار و با مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز، محتوی پراکسید هیدروژن، محتوی مالون‌دی‌آلدهید و عیار قند همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد.

استناد: فتاحی قاضی، س.، میرمحمودی، ت.، و حمزه، ح. (۱۴۰۲). اثر ورمی‌کمپوست، هیومیک‌اسید و کود دامی بر عملکرد، خصوصیات بیوشیمیایی و آنزیمی چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) تحت شرایط کم‌آبی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴(۴)، ۶۱-۷۸. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.356803.654991

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

۱. مقدمه

چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات مهم ریشه‌ای و منبع اصلی شکر در مناطقی با آب و هوای معتدل است. در سال ۲۰۱۹ سطح زیر کشت چغندر قند ۴/۶۰ میلیون هکتار و مقدار تولید ریشه این محصول۲۷۸/۵۰ میلیون تن برآورد شد. در ایران سطح زیر کشت و مقدار تولید این محصول نیز به‌ترتیب برابر ۷۸/۹۹ هزار هکتار و ۵/۲۹ میلیون تن بود (FAO, 2021).

چغندر قند یکی از مهم‌ترین محصولات صنعتی است. تحت تأثیر کم‌آبی، عملکرد این محصول از نظر کمی و کیفی کاهش می‌یابد. این محصول منحصراً در صنعت قند استفاده می‌شود (Akyüz & Ersus, 2021). چغندر در مقایسه با غلات تحمل بهتری نسبت‌به کمبود آب نشان می‌دهد (Wisniewska *et al*., 2019). خشکی در چغندر به‌طور کلی باعث تغییرات مورفوفیزیولوژیکی مختلف مانند تاخیر در رشد، پژمردگی برگ‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز و تعرق، کاهش محتوای نسبی آب و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها می‌شود. کاهش بیوماس ریشه، آسیب غشاء از طریق پراکسیداسیون لیپیدی، تجمع املاح سازگار، کاهش عملکرد قند سفید از دیگر اثرات مضر تنش کم‌آبی در چغندر قند است (Islam *et al*., 2021; Skorupa *et al*., 2019). در چغندر، کاهش عملکرد پس از کم‌آبی ممکن است به‌دلیل تغییر در محتوی نسبی آب برگ و پتانسیل آب در برگ‌ها (Chołuj *et al*., 2004)، رشد محدود برگ و جذب CO_2 باشد (Bloch *et al*., 2006). بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش محتوی نسبی آب برگ که در مراحل اولیه تنش خشکی رخ می‌دهد، منجر به اختلال فتوسنتزی و کاهش عملکرد در چغندر قند می‌شود (Mehrandish *et al*., 2012). کاهش خصوصیات کمی و کیفی در ارقام چغندر قند در اثر تنش کم‌آبی در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Islam *et al*., 2021; Ebmeyera *et al*., 2021; Taleghani *et al*., 2022).

ورمی‌کمپوست یک کود آلی محرک رشد گیاه است که غنی از اسیدهیومیک است که می‌تواند شاخص‌های عملکرد رشد گیاه را بهبود بخشد (Vidal *et al*., 2020). ورمی‌کمپوست حاوی آنزیم‌ها و محرک‌های رشد طبیعی است که همراه‌با مواد مغذی و اسیدهیومیک باعث رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Ievinsh *et al*., 2020). مطالعات متعددی در رابطه با تأثیر کاربرد ورمی‌کمپوست بر رشد و نمو محصولات مختلف انجام شده است (Maji *et al*., 2017). گزارش شده است که مواد مغذی ورمی‌کمپوست نسبت‌به مواد آلی مشتق‌شده از گیاه بالاتر بوده و مقادیر زیادی از این مواد مغذی به اشکالی تبدیل شده‌اند که به‌راحتی توسط گیاهان قابل جذب هستند (Mahmud *et al*., 2018). از طرف دیگر، ورمی‌کمپوست دارای فعالیت میکروبی و آنزیمی بالایی است و حاوی مقادیر زیادی تنظیم‌کننده رشد گیاه است (Pierre-Louis *et al*., 2021). استفاده مداوم و کافی از این ماده همراه‌با مدیریت صحیح می‌تواند ذخیره کربن آلی را افزایش داده و آب را در خاک حفظ کند. علاوه‌براین، با بهبود خواص فیزیکی ورمی‌کمپوست، می‌تواند تأثیر مفیدی بر رشد و عملکرد گونه‌های گیاهی داشته باشد (Liu *et al*., 2019). اثر مثبت ورمی‌کمپوست بر بهبود خصوصیات کمی و کیفی چغندر قند در مطالعات قبلی اشاره شده است (EL-Gizawy *et al*., 2014; Mageed *et al*., 2019; Ghaffari *et al*., 2022).

ترکیبات زیستی مانند اسیدهیومیک به‌عنوان یکی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی در نظر گرفته می‌شود که باعث افزایش فنل کل، فلاونوئید کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای مواد مغذی در برگ می‌شود (Bayat *et al*., 2021). بهبود تحمل گیاهان چغندر قند به تنش خشکی بااستفاده‌از عصاره اسیدهیومیک ممکن است به‌دلیل تعادل کینون‌های موجود در عصاره باشد که می‌تواند به‌طور مثبت سطح گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را تعدیل کند (Monda *et al*., 2021). علاوه‌براین، استفاده از مواد هومین غشای سلولی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد که منجر به انتقال مواد معدنی، ارتقاء فتوسنتز، تغییر فعالیت آنزیمی، حل‌شدن عناصر و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود (Bagheri, 2010; Rady *et al*., 2016). در مطالعه‌ای مشاهده شد که کاربرد ۳۶ لیتر در هکتار اسید-هیومیک به‌طور قابل توجهی باعث افزایش وزن تر ریشه گیاه، شاخص سطح برگ، محتوای پتاسیم، درصد قند ناخالص و عملکرد ریشه و قند شد. اثر مطلوب کاربرد اسیدهیومیک بر ابعاد ریشه، محتوای پتاسیم، محتوای آلفاآمین، درصد ساکارز و عملکرد ریشه و قند به اثبات رسیده است (Mohamed *et al*., 2017). در تحقیقی دیگر گزارش شد که هومیستار (۱۲ درصد اسیدهیومیک) به خاک اعمال‌شده باعث بهبود عملکرد چغندر قند و در نتیجه افزایش عملکرد قند شد. گزارش شده است که افزایش سطح هومات پتاسیم به‌طور قابل توجهی باعث افزایش محتوای پتاسیم، طول ریشه، وزن تر ریشه گیاه، عملکرد ریشه و قند چغندر قند شد، درحالی‌که محتوای سدیم و آلفاآمین تحت تیمار مذکور کاهش یافت (Abd El–Haleim, 2020).

استفاده از کودهای دامی علاوه‌بر افزایش ماده آلی خاک، باعث افزایش فعالیت ریزجانداران شده و بدین‌ترتیب ساختمان خاک بهبود می‌یابد. بسیاری از پژوهشگران اعتقاد دارند که کودهای دامی با افزایش مواد آلی و هوموس خاک موجب افزایش درصد خلل و فرج و اسفنجی‌شدن خاک و در نهایت کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک می‌شوند. این عوامل نیز به‌نوبه خود موجب رشد و گسترش بیشتر ریشه گیاهان در خاک شده و جذب آب و عناصر غذایی در گیاه بهبود پیدا می‌کند (FAO, 2014). باتوجه‌به اینکه اکثر خاک‌های زراعی کشور از نظر ماده آلی فقیر هستند استفاده از مواد آلی راهکاری مؤثر در جهت افزایش عملکرد محصول و کشاورزی پایدار می‌باشد (Honarvar *et al*., 2012). مصرف کودهای آلی حیوانی بخش اعظم نیتروژن مورد نیاز گیاه را در طول دوره رشد ناشی از تجزیه اوره، ترکیبات آمینی و پروتئین‌های حیوانی و گیاهی تأمین می‌کند. گزارش شده است که عملکرد ریشه با مصرف ۵۰ تن در هکتار کود دامی ۳۱/۹۸ درصد نسبت‌به شاهد افزایش یافت. همچنین محققان گزارش کردند که مصرف کود دامی سبب افزایش عملکرد شکر خالص می‌شود؛ به‌طوری‌که حداکثر عملکرد شکر (۱۰/۴۸ تن در هکتار) در تیمار ۵۰ تن در هکتار و کمترین میزان آن (۸/۴۱ تن در هکتار) در تیمار شاهد ثبت شد (Doulati *et al.*, 2018).

باتوجه‌به اهمیت اقتصادی محصول چغندر قند در استان آذربایجان غربی به‌خصوص شهرستان مهاباد و همچنین مشکلات کم‌آبی در این منطقه، یافتن راهکاری برای بهبود و حفظ عملکرد اقتصادی این محصول ضروری است؛ بنابراین شناخت مکانیسم-های درگیر در افزایش تحمل به کم‌آبی و همچنین راهکارهای بهبود مقاومت به تنش کم‌آبی در این محصول ضروری است. اخیراً توجه به کودهای آلی به‌عنوان راهکاری برای بهبود عملکرد اقتصادی در محصولات مختلف مورد توجه قرار گرفته است؛ ولی تحقیقات در محصول چغندر قند به‌ندرت صورت گرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف اثر ورمی‌کمپوست، هیومیک‌اسید و کود دامی بر عملکرد، خصوصیات بیوشیمیایی و آنزیمی محصول چغندر قند تحت شرایط مختلف آبیاری طراحی و اجرا شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی مهاباد (با طول جغرافیایی °۴۵ و ′۴۳ و عرض جغرافیایی °۳۶ و ′۱ و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۱ اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. خصوصیات آب و هوایی اجرای آزمایش در شکل ۱ درج شده است. تیمارهای آبیاری در سه سطح شامل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A (به‌ترتیب آبیاری نرمال، تنش ملایم و تنش شدید کم‌آبی) به کرت اصلی و تیمارهای مختلف کود آلی شامل ورمی‌کمپوست، کود دامی، محلول‌پاشی اسیدهیومیک و تیمار شاهد به کرت‌های فرعی اختصاص یافت. باتوجه‌به این‌که چغندر قند در ابتدای مراحل رشد به کمبود آب حساس و همچنین جوانه‌زنی آن با مشکل مواجه است. از مرحله جوانه‌زنی تا استقرار کامل گیاه (مرحله هشت‌برگی)، آبیاری به میزان کافی (هر هفته یک‌بار) انجام شد. آبیاری با کمک سیستم تحت فشار و بااستفاده‌از شیلنگ و کنتور انجام شد. حجم آب استفاده‌شده در تیمارهای آبیاری پس از ۶۰،۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر به‌ترتیب ۹۵۰۰، ۷۲۰۰ و ۵۴۰۰ متر مکعب در هکتار بود.

در این آزمایش رابطه‌های ۱ تا ۴ بااستفاده‌از داده‌های مربوطبه تشت تبخیر کلاس A به‌منظور برآورد مقدار نیاز آبی استفاده شد:

$$ET0 = KP \times ETpan \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$ETc = KC \times ET0 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{ETc}}{\boldsymbol{E\alpha}} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$V = \frac{\boldsymbol{I}}{\boldsymbol{1000}} * \boldsymbol{A} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن‌ها، ET0= تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع، KP= ضریب تشتک که باتوجه‌به اطلاعات به‌دست‌آمده از اداره هواشناسی شهرستان مهاباد برابر ۰/۸۷۵ بود. ETpan= مقدار تبخیر از تشتک تبخیر بر حسب میلی‌متر، ETc= تبخیر و تعرق گیاهی، KC= ضریب گیاهی که برای چغندر قند که در مراحل آغازین، رشد، میانی و پایانی به‌ترتیب ۰/۷۱، ۰/۸۲، ۱/۱۳ و ۱/۰۵ در نظر

گرفته شد. Eα= راندمان آبیاری که باتوجه‌به این‌که روش آبیاری قطره‌ای بود، راندمان آبیاری برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد. I= عمق آب آبیاری (بر حسب میلی‌متر)، V= حجم آب آبیاری مورد نیاز (بر حسب متر مکعب)، A= سطح آزمایش (بر حسب متر مربع).

در مراحل آغازین رشد تا مرحله استقرار کامل گیاه، مقدار آب آبیاری مورد نیاز همه تیمارها یکسان در نظر گرفته شد که در طی پنج نوبت آبیاری با دور آبیاری هفت روز انجام شد. پس از استقرار کامل گیاه در مزرعه و اعمال تیمارهای آبیاری، در هر مرحله آبیاری مقدار آب مورد نیاز برای هر کدام از تیمارها محاسبه شد و مقدار آب مصرفی، بااستفاده‌از کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. آب آبیاری مورد استفاده دارای pH=۷/۵۲، EC=۰/۸۹ و (mg/l) TDS=۰/۶۰۶ بود.

در پاییز جهت تهیه بستر کاشت، نسبت‌به انجام شخم عمیق اقدام شد. عملیات آماده‌سازی زمین در بهار شامل اجرای شخم سطحی، دیسک، تسطیح، خط‌کشی و تهیه ردیف‌های کاشت (با استفاده از شیپر) بود. توزیع کودهای مورد نیاز براساس نتایج تجزیه خاک انجام گرفت (جدول ۱). بر این اساس ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره طی سه مرحله کاشت، دو تا چهاربرگی و شش تا هشت‌برگی به مزرعه افزوده شد. علاوه‌براین به‌ترتیب ۱۳۵ و ۱۱۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم نیز هم‌زمان با شخم پاییزه به مزرعه داده شد. کود دامی پوسیده (۵۰ تن در هکتار قبل از کاشت)، ورمی‌کمپوست (سه تن در هکتار) (جدول ۲) با خاک مخلوط خواهد شد، اسیدهیومیک (اسیدهیومیک ۸۰ درصد با نام تجاری هیومکس) به نسبت چهار کیلوگرم در هکتار به‌صورت محلول‌پاشی در سه مرحله شامل مرحله چهاربرگی، هشت‌برگی (پس از وجین) و ۱۶ برگی (پس از دومین مرحله خاک‌دهی) در تیمارهای آزمایشی اعمال شد. در هر کرت چهار ردیف کاشت به طول پنج متر و فاصله ردیف‌های کاشت و فاصله بوته روی ردیف به‌ترتیب ۵۰ و ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این مطالعه از بذر چغندر قند رقم داخلی شکوفا (رقم تک‌جوانه‌ای مقاوم به رایزومانیا و نماتد) استفاده شد که از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی تهیه شده بود. کاشت در ۲۵ فروردین و برداشت در اول آبان انجام شد.

برای اندازه‌گیری صفات، در اواخر دوره رشد و قبل از برداشت محصول، از برگ‌های چهارم و پنجم هر تیمار آزمایشی، تعداد چهار تا پنج برگ به‌منظور تعیین خصوصیات بیوشیمیایی گیاه نمونه‌برداری شد. نمونه‌های تهیه‌شده از هر تیمار، بلافاصله در داخل فویل آلومینیوم پیچیده شده و پس از درج شماره نمونه، در داخل ازت مایع (دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد) قرار گرفت تا منجمد شوند. سپس نمونه‌های منجمدشده به داخل فریزر با دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد منتقل شد.

غلظت کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید با استفاده از روش Lichtenthaler & Buschmann (2001) اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت روزنه‌ای از دستگاه پرومتر مدل SC-1 شرکت دِکاگون (Decagon) استفاده شد. این اندازه‌گیری در زمان بسته‌شدن کانوپی و در نیمه روز صورت گرفت (Rezaei *et al*., 2014).

میزان پرولین موجود در برگ (برگ‌های جوان کاملا" بازشده و در مرحله بسته‌شدن کانوپی) براساس واکنش با معرف نین‌هیدرین و اسپکتروفتومتری تعیین شد (Bates *et al*., 1973). در این آزمایش، محتوی کاتالاز، سوپر اکسیددیسموتاز، مالون-دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن به‌ترتیب توسط روش‌های توصیه‌شده توسط Bowler *et al*. (1992)، Britton *et al*. (1955) و Rao & Sresty (2000) اندازه‌گیری شدند. در نهایت مقدار آب نسبی برگ از رابطه ۵ محاسبه شد.

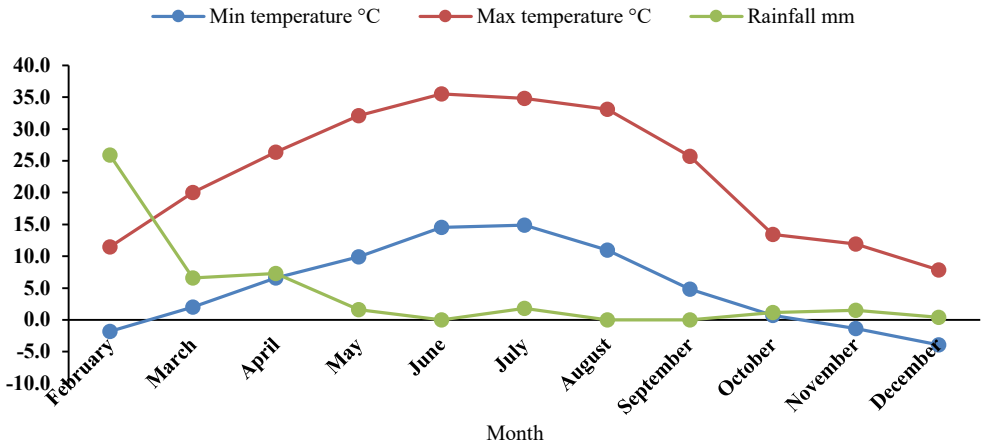
$$RWC = \frac{FW-DW}{TW-DW} \times 100$$ رابطه ۵

FW= وزن‌تر، DW= وزن خشک (بعد از قرارگیری نمونه برگ‌ها در آون ۷۵ درجه سانتی‌گراد و حصول وزن ثابت) و TW= وزن آماس (بعد از غوطه‌ورشدن نمونه برگ‌ها در داخل آب مقطر در زمان معین).

در هنگام برداشت پس از حذف حاشیه‌ها تعداد ریشه‌های هر کرت برداشت، شمارش و توزین شد و پس از شستشو، توسط دستگاه اتوماتیک خمیر ریشه (پالپ) تهیه و پس از انجماد، در آزمایشگاه تکنولوژی قند موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند کرج تجزیه کیفی نمونه‌ها انجام شد. جهت اندازه‌گیری درصد قند برای هر نمونه مقدار ۲۰ گرم خمیر ریشه‌های برداشت‌شده با ۱۷۷ میلی‌لیتر سواستات سرب (مخلوطی از سه قسمت استات سرب و یک قسمت اکسید سرب) در همزن ریخته و به‌مدت سه دقیقه مخلوط شدند که پس از منتقل‌کردن مخلوط حاصل به قیف صافی، شربت زلالی حاصل شد. شربت به‌دست‌آمده جهت تجزیه در دستگاه بتالیزر مورد استفاده قرار گرفت. پلاریمتر برمبنای میزان انحراف نور پلاریزه، میزان قند موجود در هر نمونه را نشان داد

که به‌عنوان درصد قند کل یا ناخالص (CUMSA, 2009) برای هر کرت ثبت شد. کارایی مصرف آب (WUE)[1] با تقسیم عملکرد ریشه (کیلوگرم در هکتار) بر مقدار آب مورد استفاده (متر مکعب) برآورد شد (Ghaffar *et al*., 2022).

تجزیه و تحلیل داده‌ها پس از بررسی و تأیید برقراری فرض‌های تجزیه واریانس انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام و مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.



شکل ۱. میزان بارندگی (mm)، دمای (°C) حداقل و حداکثر ثبت‌شده در محل اجرای آزمایش در سال ۱۴۰۱.

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

Parameters	Sp %	EC (ds/m)	F.C 1/3 A+	W.P	B.D	pH	T. N. V%	O.C%	N%	P (ppm)	K (ppm)	Sand %	Silt %	Clay %	Soil texture
Value	43	1.36	27.3	12.3	1.4	8.09	4.75	1.3	0.13	14.62	444	16	54	28	Silt clay loam

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کودهای آلی مورد استفاده.

Parameters	EC (ds/m)	pH	N (%	P (ppm)	K (ppm)	کربن آلی (٪)
Vermicompost	4.19	8.06	56	43	53	8.10
Manure	3.80	8.2	42	32	17	16.00

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳–۱. ضریب هدایت روزنه‌ای

نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر سطوح آبیاری ($p<۰/۰۵$)، کود آلی ($p<۰/۰۱$) و اثر متقابل دو تیمار ($p<۰/۰۱$) بر ضریب هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۳). در بررسی حاضر تحت شرایط آبیاری نرمال بین تیمارهای کود آلی از نظر ضریب هدایت روزنه‌ای اختلاف معنی‌دار دیده نشد. تحت شرایط تنش ملایم نیز تنها کاربرد هیومیک‌اسید توانست مقدار این صفت را در مقایسه با تیمار شاهد مربوطه به‌صورت معنی‌داری افزایش دهد. تحت شرایط تنش شدید کاربرد هر سه تیمار کودی ضریب هدایت روزنه‌ای را به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط آبیاری نرمال (با متوسط ۵۴/۶۳ مول بر متر مربع بر ثانیه) بالاترین و عدم کاربرد کودهای آلی تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی (با متوسط ۴۰/۵۲ مول بر

1. Water use efficiency

متر مربع بر ثانیه) کمترین ضریب هدایت روزنه‌ای را به خود اختصاص دادند. کودهای آلی به‌خصوص ورمی‌کمپوست موجب گسترش ریشه و دسترسی بهتر به منابع آبی شده و از این طریق موجب کاهش آبسیزیک‌اسید و افزایش هدایت روزنه‌ای شده است. در گیاهان تحت تنش، تجمع اسیدآبسیزیک در برگ‌ها تحریک می‌شود که باعث عدم تعادل یونی شده و یون پتاسیم (K^+) از سلول‌های نگهبان نشت و فشار تورگر سلول‌های نگهبان کم می‌شود. در نهایت با کاهش محتوای آب نسبی برگ، بسته‌شدن روزنه شدت می‌گیرد (جدول ۶). گزارش شده است که تنش خشکی شدید ضریب هدایت روزنه‌ای در برگ چغندر قند را به‌صورت چشمگیری کاهش می‌دهد (Fugate *et al*., 2018). محققان در تحقیقی روی گندم مشاهده کردند که کاربرد اسیدهیومیک و اسیدآمینه ضریب هدایت روزنه‌ای در محصول گندم را به‌صورت معنی‌داری افزایش داد (Eskandari Torbaghan & Fazeli Kakhki, 2021).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر آبیاری و کودهای آلی بر صفات فیزیولوژیکی مورد مطالعه چغندر قند.

S.O.V.	Df	Stomatal conductance	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Relative water content	Proline	Beta glycine
Replication	2	399.47**	1.72^{ns}	0.0037^{ns}	0.17^{ns}	317.03^{ns}	0.003^{ns}	479.69^{ns}
Irrigation (I)	2	116.19*	16.17**	1.186*	6.44**	1023.83*	0.073*	3760.53**
Ea	4	9.955	0.68	0.150	0.25	135.00	0.009	119.11
Organic Fertilizer (OF)	3	82.56**	7.81**	1.80**	0.93**	324.19*	0.043**	1431.81*
I×OF	6	75.01**	0.80	0.34*	0.45*	35.78^{ns}	0.007^{ns}	352.53^{ns}
Eb	18	18.255	1.42	0.10	0.15	70.39	0.007	351.56
Coefficient of variation %		8.62	13.14	17.23	12.03	17.45	22.64	9.53

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

۳-۲. رنگدانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح آبیاری بر محتوی کلروفیل a و کارتنوئید ($p<۰/۰۱$) و کلروفیل b ($p<۰/۰۵$) معنی‌دار بود. بین تیمارهای کود آلی از لحاظ محتوی هر سه رنگدانه اختلاف معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) دیده شد. اثر متقابل دو تیمار نیز بر محتوی کلروفیل b و کارتنوئید ($p<۰/۰۵$) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که شرایط تنش ملایم و تنش شدید کم‌آبی محتوای کلروفیل a را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به‌ترتیب ۱۳/۱۴ و ۲۲/۸۲ درصد کاهش دادند. در بین تیمارهای کود آلی نیز کاربرد ورمی‌کمپوست، کود دامی و هیومیک‌اسید محتوای کلروفیل a را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۲۹/۱۱، ۱۹/۸۴ و ۱۵/۹۲ درصد افزایش دادند (جدول ۳).

نتایج نشان داد که محتوی کلروفیل b و کارتنوئید در واکنش به تنش کم‌آبی کاهش یافت. کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی و کاربرد هیومیک‌اسید تحت شرایط تنش ملایم آبیاری، محتوی کلروفیلb و کارتنوئید را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. بالاترین محتوی کلروفیل b (۳/۱۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کارتنوئید (۴/۲۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) به تیمار ورمی‌کمپوست تحت شرایط آبیاری نرمال و کمترین محتوی کلروفیل b به تیمار کود دامی تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی و کمترین محتوی کارتنوئید به تیمار کود دامی تحت تیمار تنش شدید کم‌آبی اختصاص داشت (جدول ۶).

محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی شاخصی برای میزان مقاومت گیاه به تنش کم‌آبی است. کاهش محتوای کلروفیل ناشی از تنش کم‌آبی به عدم تعادل در رادیکال‌های اکسیژن مانند H_2O_2 در سلول‌ها و فعالیت چندین آنزیم مربوط می‌شود. در واقع، رادیکال‌های آزاد باعث آسیب به غشای تیلاکوئید و پراکسیداسیون آن می‌شوند (Youssef *et al*., 2019) که در نهایت منجر به تخریب ساختار کلروفیل می‌شوند (Salehi *et al*., 2016). بنابراین استفاده از تیمار ورمی‌کمپوست با عرضه نیتروژن اضافی برای گیاه تأثیر مثبتی بر میزان کلروفیل به‌ویژه در شرایط کمبود عناصر غذایی دارد (Salehi *et al*., 2016).

تأخیر در تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی با کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند با بهبود راندمان آب و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان مرتبط باشد که منجر به جلوگیری از آسیب به ساختارهای سلولی و پروتئین‌ها با کاهش تولید ROS می‌شود (Kiran, 2019; Mamnabi *et al*., 2020). گزارش شده است که با تشدید تنش کم‌آبی محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی در

چغندر قند کاسته شد، اما کاربرد ورمی‌کمپوست محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی را تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی افزایش داد (Ghaffari *et al*., 2022). گزارش شده است که مواد هیومیک با کاهش pH خاک و بهبود پارامترهای رشد، توانایی خاک را برای حفظ مواد مغذی افزایش می‌دهند و از این طریق موجب بهبودی تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدان‌ها، تحریک فعالیت میکروبی مفید و بهبود بهره‌وری ریشه می‌شوند (Bayat *et al*., 2021). نقش مثبت هیومیک‌اسید در افزایش محتوی رنگدانه های چغندر قند در مطالعات دیگر نیز به اثبات رسیده است (Makhlouf *et al*., 2022). نتایج ضرایب همبستگی بین صفات نشان داد که همبستگی محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید با ضریب هدایت روزنه‌ای مثبت و معنی‌دار بود. همچنین همبستگی کلروفیل a با کلروفیل b و همبستگی محتوی کارتنوئید با محتوی کلروفیل a و کلروفیل b مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۷).

۳-۳. محتوی نسبی آب برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اختلاف بین سطوح آبیاری و تیمارهای کودی از لحاظ آماری بر محتوی آب نسبی برگ معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود (جدول ۳). شرایط آبیاری نرمال و تنش شدید کم‌آبی به‌ترتیب با متوسط ۷۴/۸۶ و ۵۶/۶۳ درصد بالاترین و پایین‌ترین محتوی آب نسبی برگ را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). در بین تیمارهای کودی کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید به‌ترتیب با متوسط ۷۰/۵۳ و ۷۱/۹۲ درصد بالاترین و تیمار شاهد با متوسط ۵۸/۷۰۱ درصد کمترین محتوی نسبی آب برگ را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

جدول ٤. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر آبیاری و کودهای آلی بر خصوصیات بیوشیمیایی، آنزیمی و کارایی مصرف آب چغندر قند.

S.O.V.	df	Catalase	Superoxide dismutase	Hydrogen peroxide	Malondialdehyde	Water use efficiency	Sugar content	Root yield
Replication	2	16.46^{ns}	6650^{ns}	0.04^{ns}	1.37^{ns}	0.11^{ns}	1.01^{ns}	4.77^{ns}
Irrigation (I)	2	698.04**	521881**	15.85**	333.90**	9.91**	10.24^{ns}	1254.34**
Ea	4	12.02	16088	0.88	20.69	1.26	2.96	34.53
Organic Fertilizer (OF)	3	193.43**	109935**	5.94**	84.39**	5.80**	2.96*	212.13**
I×OF	6	34.94^{ns}	43105*	2.21**	10.85ns	0.72^{ns}	12.14**	65.69*
Eb	18	28.66	16111	0.43	15.00	0.36	2.91	27.21
Coefficient of variation %		6.75	12.18	18.71	14.18	7.37	9.85	8.83

^{ns}،* و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

محتوی نسبی آب برگ نشانگری برای تخمین وضعیت آب برگ‌ها است؛ کاهش این صفت در شرایط تنش کم‌آبی منجر به تغییراتی در غشای سلولی و در نتیجه افزایش نشت الکترولیت در سلول‌ها می‌شود (Nazarideljou & Heidari, 2014). گزارش شده که تنش کم‌آبی اثر منفی بر محتوی آب نسبی چغندر قند داشته و آن را کاهش می‌دهد (Arjeh *et al*., 2021).

محققان نشان دادند کاربرد ورمی‌کمپوست به‌طور قابل توجهی محتوی نسبی آب برگ را در چغندر قند افزایش داد. در واقع کودهای زیستی با تأمین کود نیتروژن و افزایش کارایی آن باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شوند (Zeighami Nejad *et al*., 2020). گزارش شده است که کاربرد ورمی‌کمپوست محتوی نسبی آب برگ در چغندر قند را تحت شرایط تنش کادمیوم در خاک شور افزایش داد (El-Mageed *et al*., 2019). همچنین اسیدهای هیومیک به‌دلیل عملکرد بالقوه خود برای ظرفیت نگهداری آب در خاک، تضمین آب کافی در ناحیه ریشه گیاهان برای مدت طولانی‌تر، افزایش پتانسیل گیاهان برای جذب آب بیشتر، موجب افزایش محتوی نسبی آب برگ شده و آسیب کمبود آب را کاهش می‌دهند (Cordeiro *et al*., 2011). اثر مثبت هیومیک‌اسید بر بهبود محتوی نسبی آب برگ تحت شرایط تنش کم‌آبی در تحقیقات محققان دیگر نیز گزارش شده است (Ghaffar *et al*., 2022). در این بررسی همبستگی محتوی نسبی آب برگ با ضریب هدایت روزنه‌ای و رنگدانه‌های فتوسنتزی مثبت و معنی‌دار بود. تغییرات همسو بین رنگدانه‌های فتوسنتزی و ضریب هدایت روزنه‌ای نشان‌دهنده این واقعیت است که حفظ فتوسنتز را می‌توان به حفظ رسانایی روزنه نسبت داد (جدول ۷).

۳-۴. محتوی پرولین

نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر سطوح آبیاری ($p<۰/۰۵$) و تیمارهای کود ($p<۰/۰۱$) بر محتوی کلروفیل برگ معنی‌دار بود (جدول ۳). در این تحقیق کم‌آبی محتوی پرولین را افزایش داد. به‌طوری‌که سطح تنش شدید کم‌آبی محتوی پرولین را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به‌میزان ۴۳/۴۷ درصد افزایش داد (جدول ۵). پرولین به تنظیم اسمزی در طول تنش و حفظ ساختمان اولیه ماکرومولکول‌ها و غشاها در طول افزایش دهیدراسیون کمک می‌کند. پرولین در کنار تنظیم اسمزی وظایف دیگری همچون حفاظت از غشای پلاسمایی و زدودن رادیکال‌های هیدروکسیل و اکسیژن فعال نیز دارد (Sun *et al*., 2013). عامل تجمع پرولین در برگ در اثر تنش خشکی را به افزایش غلظت پرولین در شیره سلولی گیاهان و انتقال آن به برگ‌ها مربوط دانستند. کاهش مصرف پرولین نیز در چنین شرایطی از دلایل تجمع آن در گیاه است؛ به‌طوری‌که توقف در اکسایش پرولین در پتانسیل‌های آب پایین اتفاق می‌افتد (Huguet- Robert *et al*., 2003). افزایش محتوی پرولین برگ تحت شرایط تنش کم‌آبی در چغندر قند در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Islam *et al*., 2021).

در بین تیمارهای کودی کاربرد هیومیک‌اسید و ورمی‌کمپوست علاوه بر اینکه بالاترین محتوی پرولین برگ را به خود اختصاص دادند مقدار صفت مذکور را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۴۸/۷۰ و ۳۴/۸۳ درصد افزایش دادند (جدول ۵). هیومیک‌اسید از طریق افزایش جذب آب توسط گیاه باعث تنظیم اسمزی در سلول‌های گیاه شده، در نتیجه می‌تواند پیامدهای تنش را به حداقل برساند (Azevedo & Lea, 2011). گزارش شده است که هیومیک‌اسید در شرایط تنش خشکی نقش افزایش‌دهنده در فرآیند تنظیم اسمزی به‌واسطه افزایش میزان پرولین دارد (Khorasaninejad *et al*., 2018). در تحقیقی روی چغندر قند تنش کم‌آبی و محلول پاشی اسیدسالیسیلیک بر محتوی پرولین برگ در این محصول افزود (Abhari *et al*., 2022). افزایش محتوی پرولین در برگ چغندر قند تحت تیمار کود آلی در مطالعات دیگر نیز به اثبات رسیده است (Shaban *et al*., 2014). در این بررسی، همبستگی محتوی پرولین با محتوی کلروفیل a منفی و معنی‌دار بود (جدول ۷) که نشان‌دهنده این است که با کاهش محتوی کلروفیل بر محتوی پرولین افزوده می‌شود. کاهش میزان کلروفیل می‌تواند تحت شرایط تنش کم‌آبی به‌علت تغییر مسیر متابولیسم نیتروژن به سمت ساخت ترکیباتی مانند پرولین باشد که در تنظیم اسمزی به‌کار می‌رود (Lawlor, 2002).

۳-۵. بتاگلایسین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر سطوح آبیاری و کود آلی بر محتوی گلایسین بتا معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) بود (جدول ۳). نتایج نشان داد شرایط تنش شدید کم‌آبی محتوی گلایسین بتا را در مقایسه با شرایط تنش ملایم و شرایط آبیاری نرمال به‌ترتیب ۱۷/۸۹ و ۱۴/۶۶ درصد افزایش داد (جدول ۵). محققان دیگری نشان دادند که قندهای محلول نقش حیاتی در تنظیم اسمزی گیاهان دارند (Zhou & Yu, 2009). تجمع قندهای محلول در گیاهان تحت شرایط تنش کم‌آبی با مکانیسم‌های مختلفی که بر تشکیل و انتقال این ترکیبات در برگ تأثیر می‌گذارد تنظیم می‌شود (Arabzadeh, 2012). بر این اساس، در چغندر، افزایش سطوح املاح سازگار، از جمله گلیسین بتائین و پرولین، در هنگام تنش خشکی موجب حفظ فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای خواهد شد (Hoffmann *et al*., 2010). تحت تنش آب، تجمع مواد محافظت‌کننده اسمزی پتانسیل اسمزی را در سلول‌های چغندر قند کاهش می‌دهد و جریان آب به داخل گیاه را تسهیل می‌کند (Wisniewska *et al*., 2019)

افزایش محتوی قندهای محلول در اثر تنش کم‌آبی در چغندر قند در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Ghaffari *et al*., 2022). در بررسی حاضر دو تیمار ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید علاوه‌بر اینکه بالاترین محتوی بتاگلایسین را به خود اختصاص دادند، مقدار این صفت را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۴/۹۸ و ۹/۱۴ درصد افزایش دادند (جدول ۵). مشخص شده است که افزایش محتوای قندهای محلول ارتباط تنگاتنگی با محتوای نسبی آب برگ دارد و باعث افزایش تحمل گیاه به شرایط خشکی می‌شود (Zeighami Nejad *et al*., 2020). علاوه‌بر این، محتوای قندهای محلول بالاتر در برگ چغندر قند تیمار شده با ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید، ممکن است به‌دلیل افزایش پتانسیل آب و سطح برگ و همچنین کاهش فعالیت اکسیداسیون نوری کلروفیل باشد (Salehi *et al*., 2016). نتایج نشان داد همبستگی بین گلایسین بتا و محتوی پرولین مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۵).

۳-۶. فعالیت آنزیم کاتالاز

در این مطالعه اختلاف بین تیمارهای آبیاری ($p<۰/۰۱$) و کود آلی ($p<۰/۰۱$) از لحاظ تاثیر بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۷). نتایج نشان داد که تیمار تنش ملایم و تنش شدید کم‌آبی مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به‌ترتیب ۱۱/۰۶ و ۲۱/۳۰ درصد افزایش داد (جدول ۵). محققان دریافتند که در ارقام مختلف چغندر قند، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز در شرایط تنش کم‌آبی به‌صورت چشمگیری افزایش یافت (Islam *et al.*, 2021). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تنش کم‌آبی نشان‌دهنده افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است. این آنزیم‌ها برای سم‌زدایی ROS تولیدشده تحت تنش‌های زنده و غیر زنده عمل می‌کنند (Zeighami Nejad *et al*., 2020). محققان نشان داده‌اند که افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ارتباط نزدیکی با تنش خشکی دارد (Zeighami Nejad *et al*., 2020; Ahanger *et al.*, 2021). آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز نقش مهمی در ازبین‌بردن پراکسید هیدروژن دارند و این ماده را به H_2O و O_2 کاتالیز می‌کنند و اثرات مخرب ROS را کاهش می‌دهند (Sorkhi, 2021).

در بین تیمارهای کود آلی کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید توانست مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۳/۷۰ و ۱۱/۳۵ درصد افزایش دهند (جدول ۵). اختلاف بین تیمار کود دامی با تیمار شاهد از لحاظ مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار نبود. در تحقیقی روی چغندر قند کاربرد ورمی‌کمپوست توانست مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش دهد (Ghaffari *et al*., 2022). بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در تیمار کاربرد ورمی‌کمپوست ممکن است به‌واسطه بهبود مقدار جذب عنصر کلسیم در این تیمارها باشد که در فعال‌شدن این آنزیم‌ها نقش دارد (Kiran, 2019). علاوه‌براین، در دسترس‌بودن برخی یون‌ها مانند روی، آهن، منگنز و مس در ورمی‌کمپوست ممکن است دلیلی برای افزایش فعالیت آنزیم‌ها باشد؛ چون یکی از ترکیبات آنزیمی مانند کاتالاز عنصر آهن است (Ahanger *et al*., 2021). مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز با پرولین و گلایسین بتا همبستگی مثبت و معنی‌دار و با محتوی کلروفیل a همبستگی منفی و معنی‌دار دارد (جدول ۵).

۳-۷. مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای آبیاری و کود آلی ($p<۰/۰۱$) و همچنین اثر متقابل دو تیمار ($p<۰/۰۵$) بر مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۴). تنش کم‌آبی و تیمارهای کودی به‌خصوص ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید اثر هم‌افزایی در افزایش مقدار فعالیت سوپراکسیددیسموتاز داشتند. در این بررسی بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز به‌ترتیب با متوسط ۱۵۰۰/۱ و ۱۳۷۲/۳ واحد استاندارد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه به تیمار کودی ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی اختصاص داشت. کمترین مقدار فعالیت این آنزیم نیز با متوسط ۷۳۴/۰ واحد استاندارد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در تیمار شاهد کودی و تحت شرایط آبیاری نرمال تولید شد (جدول ۶). افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی در اثر کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط تنش کم‌آبی در مطالعات دیگر نیز به اثبات رسیده است (Kiran, 2019; Mamnabi *et al*., 2020; Ahanger *et al*., 2021) که همسو با نتایج تحقیق حاضر است. در این مطالعه ترکیب تنش کم‌آبی و اسیدهیومیک مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی را افزایش داد. اثر هم‌افزایی کاربرد هیومیک‌اسید نسبت‌به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که مواد هیومیک، آنتی‌اکسیدان‌های قدرتمندی هستند که دارای خواص مهار ROS هستند (Avvakumova *et al*., 2011). علاوه‌براین، مشخص شده است که استفاده از اسیدهای هیومیک و فولویک اثرات نامطلوب خشکی را با افزایش فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ‌ها کاهش می‌دهد (Bayat *et al*., 2021). در آزمایشی دیگر روی چغندر قند مشخص شد که کاربرد هیومیک‌اسید تحت شرایط تنش کم‌آبی مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز و سوپراکسیددیسموتاز) را افزایش داد (Makhlouf *et al*., 2022). بین مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز و محتوی پرولین، گلایسین بتا و مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز همبستگی مثبت و معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۷).

۳-۸. پراکسید هیدروژن

نتایج تحقیق حاضر نشان داد اثر سطوح آبیاری ($p<۰/۰۵$) و اثر متقابل آبیاری با کود آلی ($p<۰/۰۱$) بر محتوای پراکسید هیدروژن برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین ترکیبات تیماری نشان داد با تشدید تنش کم‌آبی بر محتوی پراکسید هیدروژن

افزوده شد، اما کاربرد کودهای آلی توانست از محتوی این ترکیب بکاهد. به‌طوری‌که تحت شرایط آبیاری نرمال و کاربرد کود دامی، تحت شرایط تنش ملایم و کاربرد اسیدهیومیک، و تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی و کاربرد هر سه کود از مقدار پراکسید هیدروژن در مقایسه با تیمار شاهد مربوطه کاسته شد. شایان ذکر است که در این تحقیق تیمار شاهد کودی تحت شرایط تنش شدید (۶/۴۶ میکرومول برگرم وزن تر) بالاترین و تیمار کاربرد کود دامی تحت شرایط آبیاری نرمال (۰/۹۶میکرمول برگرم بر وزن تر) کمترین محتوی پراکسید هیدروژن را به خود اختصاص دادند (جدول ۶). یکی از اولین نشانه‌های تنش اکسیداتیو تجمع گونه‌های فعال اکسیژن ازجمله پراکسید هیدروژن است؛ گیاهان جهت پاک‌سازی این ترکیبات سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی خود را فعال می‌کنند (Ghassemi *et al*., 2018). همچنین در تحقیق حاضر کاربرد کودهای آلی با بهبود شرایط محیطی و همچنین افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش تولید و پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن به‌خصوص پراکسید هیدروژن شده‌اند (Mamnabi *et al*., 2020). در این تحقیق همبستگی محتوی پراکسید هیدروژن با محتوی کارتنوئید و محتوی نسبی آب برگ منفی و معنی‌دار بود (جدول ۷). وجود چنین ارتباطی بیانگر این واقعیت است که با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن، مقدار تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌ویژه کارتنوئید افزایش می‌یابد (Ghaffar *et al*., 2022). کاهش سنتز کمپلکس اصلی رنگدانه کلروفیل، تشدید فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز، تولید ترکیبات فنلی، افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و آسیب‌رساندن به غشاء کلروپلاست و اختلال در جذب نیتروژن از خاک به‌عنوان مهمترین عوامل کاهنده غلظت کلروفیل در تنش‌های شدید شناخته شده‌اند (Tambussi et al., 2000).

۳-۹. مالون‌دی‌آلدهید

نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر سطوح آبیاری و کود آلی بر محتوی مالون‌دی‌آلدهید برگ معنی‌دار (p<۰/۰۱) بود (جدول ۴). در این بررسی تنش ملایم و تنش شدید آبیاری، محتوی مالون‌دی‌آلدهید را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به‌ترتیب ۳۲/۷۶ و ۴۷/۹۵ درصد افزایش دادند (جدول ۵). مالون‌دی‌آلدهید یک شاخص کلیدی برای برآورد آسیب استرس اکسیداتیو به غشای سلولی است. تنش خشکی به غشای سلولی برگ آسیب می‌رساند (Liang *et al*., 2019) که با افزایش محتوای مالون‌دی-آلدهید و کاهش شاخص پایداری غشا مرتبط است. افزایش پراکسیداسیون لیپیدی با تشدید تنش کم‌آبی با تولید ROS از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال‌های سوپراکسید (O^{-2}) مرتبط است (Ghassemi *et al*., 2018). افزایش محتوی مالون‌دی‌آلدهید در اثر تنش کم‌آبی در چغندر قند در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Ghaffari *et al*., 2022).

در بین تیمارهای کود آلی تیمار ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید محتوی مالون‌دی‌آلدهید را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۸/۵۵ و ۲۲/۰۵ درصد کاهش دادند (جدول ۵). در تحقیقی روی چغندر قند کاربرد ورمی‌کمپوست به‌صورت معنی‌داری محتوی پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد (Ghaffari *et al*., 2022). کاهش محتوی مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است که بیانگر این واقعیت است که کاربرد ورمی‌کمپوست با بهبود خصوصیات آنتی‌اکسیدانی، مقاومت گیاه را در برابر تنش کم‌آبی بهبود می‌بخشد (Mamnabi *et al*., 2020). همچنین هیومیک‌اسید به‌دلیل اثری که بر سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی دارد می‌تواند باعث کاهش آسیب به غشاهای سلولی و درنتیجه کاهش تجمع مالون‌دی‌آلدهید در گیاهان شود (García *et al*., 2016). همبستگی بین مالون‌دی‌آلدهید با محتوی کلروفیل b، کارتنوئید و محتوی نسبی برگ منفی و معنی‌دار بود. محتوی مالون‌دی‌آلدهید با محتوی پراکسید هیدروژن همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان داد (جدول ۷). وجود این ارتباط بیانگر این واقعیت است که با افزایش محتوی پراکسید هیدروژن بر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء سلولی ترکیباتی مانند کلروفیل b، کارتنوئید افزوده شده و مقدار مالون‌دی‌آلدهید افزایش می‌یابد. گزارش شده است که گونه‌های فعال اکسیژن که در اثر تنش اسمزی تولید می‌شوند آسیب جدی به اجزای مختلف سلولی به‌ویژه غشاهای زیستی از جمله غشاهای تیلاکوئیدی در پروتوپلاست‌ها وارد می‌کنند (Stoeva *et al*., 2003).

۳-۱۰. عیار قند

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر کود آلی (p<۰/۰۵) و اثر متقابل دو تیمار (p<۰/۰۱) بر عیار قند معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج نشان داد بالاترین عیار قند با متوسط ۱۹/۹۵ درصد برای تیمار کود دامی و تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی ثبت شد.

کمترین عیار قند نیز با متوسط ۱۳/۰۳ درصد در تیمار کاربرد اسیدهیومیک تحت شرایط آبیاری نرمال مشاهده شد (جدول ۶). کم‌آبی‌در چغندر قند موجب کاهش وزن تر ریشه می‌شود؛ اما درصد قند ریشه به‌واسطه پسابیدگی ریشه افزایش می‌یابد. کاهش وزن تر ریشه به‌دلیل پسابیدگی در برگ‌ها و ریشه‌ها رخ می‌دهد؛ اما تولید شکر به‌ندرت تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرد حتی اگر تنها ۷۰ درصد از مقدار آب مورد نیاز گیاه در اختیار چغندر قند قرار بگیرد (Al-Jbawi & Abbas, 2013). در مطالعاتی جداگانه گزارش شد که تنش کم‌آبی، عیار قند را در چغندر قند افزایش داد؛ اما کاربرد سوپرجاذب (Khalili & Hamze, 2019) و میکوریزا (Khalili & Hamze, 2021) عیار قند را کاهش دادند. افزایش محتوای قند تحت کاربرد کودهای دامی به‌دلیل نقش کودهای زیستی در بهبود رشد و تجمع ماده خشک و در نتیجه افزایش محتوای ساکارز و کاهش پارامترهای ناخالصی در ریشه است (Alotaibi *et al*., 2021; El–Hassanin *et al*., 2016; El-Gizawy *et al*., 2014).

۳–۱۱. عملکرد ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر آبیاری و کود زیستی ($p<۰/۰۱$) و اثر متقابل دو تیمار ($p<۰/۰۵$) بر عملکرد ریشه معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسات میانگین نشان داد اگرچه با تشدید تنش کم‌آبی از عملکرد ریشه کاسته شد؛ اما کاربرد ورمی‌کمپوست و اسیدهیومیک در هر سه شرایط رطوبتی موجب افزایش عملکرد ریشه در مقایسه با تیمار شاهد مربوطه شد. در این بررسی کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط نرمال رطوبتی با متوسط ۷۸/۳۳ تن در هکتار بالاترین عملکرد ریشه را تولید کرد؛ درحالی‌که اختلاف بین تیمار مذکور و کاربرد هیومیک‌اسید تحت شرایط آبیاری نرمال معنی‌دار نبود. در این بررسی کمترین عملکرد ریشه با متوسط ۴۲/۷۰ تن در هکتار به تیمار شاهد تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی اختصاص داشت (جدول ۶). اثر منفی تنش کم‌آبی بر کاهش عملکرد ریشه چغندر قند در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (Islam *et al*., 2021; Ebmeyera *et al*., 2021; Taleghani *et al*., 2022).

در مطالعه حاضر، تیمار ورمی‌کمپوست باعث افزایش عملکرد ریشه و خصوصیات کیفی ریشه چغندر قند شد که همسو با نتایج سایر محققان است (El-Gizawy *et al*., 2014; Pibars *et al*., 2018; Ghaffari *et al*., 2022). اثر مثبت ورمی‌کمپوست می‌تواند عناصر ریزمغذی و میکروارگانیسم‌های مفید و دیگر ترکیبات فعال زیستی در ورمی‌کمپوست باشد (El-Gizawy *et al*., 2014). بهبود رشد و عملکرد گیاهان در اثر کاربرد ورمی‌کمپوست را به سه دلیل محتوی بالاتر آب و عناصر غذایی و حضور میکروارگانیسم-های مفید نسبت داده‌اند (Usmani *et al*., 2019). گزارش شده است که افزایش کاربرد کمپوست از صفر به پنج تن در هکتار عملکرد ریشه و عملکرد قند را به‌ترتیب ۱۶/۴ و ۲۷/۸ درصد افزایش داد (El-Mageed *et al*., 2019). مشاهده شده است که افزودن اسیدهای هیومیک به خاک به‌میزان ۳۰ لیتر در هکتار افزایش قابل ملاحظه‌ای را در پارامتر عملکرد چغندر قند ثبت کرد (Bayat *et al*., 2021) در تحقیقی دیگر بیان شد که کاربرد ۱۰ لیتر در هکتار اسیدهیومیک عملکرد قند و ریشه را به‌صورت معنی‌داری افزایش داد (Alotaibi *et al*., 2021). گزارش شده است تیمار اسیدهیومیک به‌طور قابل توجهی باعث افزایش عملکرد قند و ریشه، درصد پتاسیم و شکر سفید شد (Ibrahim *et al*., 2019).

بنابراین کودهای آلی مانند ورمی‌کمپوست و اسیدهیومیک به‌دلیل کاهش اثرات مضر کودهای شیمیایی بر محیط زیست و همچنین تامین نیازهای غذایی گیاه و افزایش رشد و عملکرد گیاه در شرایط آبیاری بهینه و تنش می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی باشند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد ورمی‌کمپوست و اسیدهیومیک باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در چغندر قند در شرایط نرمال و تنش خشکی می‌شود که منجر به افزایش عملکرد و کیفیت چغندر قند می‌شود. در این مطالعه عملکرد ریشه با هدایت روزنه‌ای، محتوی کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ و مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز همبستگی مثبت و معنی‌دار و با محتوی پراکسید هیدروژن، مالون‌دی‌آلدهید و عیار قند همبستگی منفی و معنی داری را نشان داد (جدول ۷). می‌توان اظهار داشت تحت شرایط تنش کمبود آب، با افزایش مقدار پراکسید هیدروژن مقدار پراکسیداسیون چربی‌های غشاء سلولی افزایش یافته، تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی تسریع شده، ضریب هدایت روزنه‌ای و محتوی نسبی آب برگ کاهش یافته و در نتیجه از عملکرد ریشه کاسته خواهد شد. با این وجود، کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید با بهبود خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و آنزیمی اثر تنش کم‌آبی را بر عملکرد دانه تعدیل می‌کند.

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آبیاری و کودهای آلی بر صفات مورد مطالعه چغندر قند.

Treatments		Chlorophyll a (mg g^{-1} FW)	Relative water content (%)	Proline (mg g^{-1} FW)	Beta glycine (mmol g^{-1} FW)	Catalase (U/mg^{-1} protein min)	Malondialdehyde (nmol g^{-1} FW^{-1})	Water use efficiency (Kg/m^3)
Irrigation	Irrigation after 60 mm evaporation (Normal)	10.12^{a}	74.86^{a}	0.312^{b}	184.00^{b}	71.57^{c}	21.52^{b}	7.39^{b}
	Irrigation after 90 mm evaporation (Mild stress)	8.79^{b}	68.31^{ab}	0.368^{ab}	189.17^{b}	79.49^{b}	28.57^{a}	7.86^{b}
	Irrigation after 120 mm evaporation (Severe stress)	7.81^{c}	56.63^{b}	0.460^{a}	216.92^{a}	86.82^{a}	31.84^{a}	9.15^{a}
Organic fertilizers	Control	7.66^{b}	58.70^{b}	0.310^{c}	184.56^{b}	73.82^{c}	31.37^{a}	7.05^{c}
	Vermicompost	9.89^{a}	70.53^{a}	0.418^{ab}	212.22^{a}	83.94^{a}	25.55^{b}	8.57^{ab}
	Manure	9.18^{a}	65.24^{ab}	0.340^{bc}	188.56^{b}	77.20^{bc}	27.87^{ab}	8.04^{b}
	Humic acid	8.88^{a}	71.92^{a}	0.461^{a}	201.44^{ab}	82.20^{ab}	24.45^{b}	8.87^{a}

میانگین‌های دارای حرف (حروف) مشابه در هر ستون، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

۳-۱۲. کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر آبیاری وکود آلی بر کارایی مصرف آب معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) بود (جدول ۴). بالاترین کارایی مصرف آب (۹/۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب) به تیمار آبیاری تنش شدید اختصاص داشت. کمترین کارایی مصرف آب نیز (۷/۳۹ کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمار آبیاری نرمال مشاهده شد (جدول ۵). کارایی مصرف آب با کاهش آب قابل دسترس در چغندر قند افزایش می‌یابد (Topak *et al*., 2016; El-Sayed *et al*., 2018; Tamara *et al*., 2017). کاهش رطوبت موجود در خاک منجر به کاهش هدایت روزنه‌ها می‌شود. با این حال، مشخص نیست که آیا این نتیجه مکانیسم محافظت از گیاه بوده است یا یک استراتژی حفاظت از آب گیاه (Ober *et al*., 2005). جذب فتوسنتزی خالص به دنبال همان الگوی هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود WUE در نتیجه بسته‌شدن روزنه‌ها است (Tamara *et al*., 2017). انتظار می‌رود که بسته‌شدن روزنه‌ها ناشی از تنش خشکی، تعرق گیاه را کاهش داده و از این رو کارایی مصرف آب را افزایش دهد.

در بین تیمارهای کود آلی، تیمار کودی اسیدهیومیک (۸/۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب) بالاترین کارایی مصرف آب را به خود اختصاص داد. اختلاف بین تیمار یاد شده با تیمار کودی ورمی‌کمپوست معنی‌دار نبود. کمترین کارایی مصرف آب (۷/۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب) برای تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۵). محققان در مطالعه‌ای روی گندم اظهار داشتند کاربرد اسیدهیومیک کارایی مصرف آب را بهبود داد (Pourmorad *et al*., 2018). به نظر می‌رسد که اسیدهیومیک از طریق اثرات هورمونی و بهبود رشد ریشه (Samavat & Malakuti, 2005) موجب افزایش در جذب آب توسط ریشه و افزایش عملکرد ریشه و در نهایت افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. بر اساس نتایج جدول ضرایب همبستگی، کارایی مصرف آب با محتوی نسبی آب برگ، پرولین، گلایسین بتا، مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد ریشه همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان داد (جدول ۷).

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید محتوی کلروفیل a، محتوی نسبی آب برگ، پرولین، بتاگلایسین، کاتالاز و کارایی مصرف آب را افزایش و محتوی مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد. همچنین، کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید ضریب هدایت روزنه‌ای، محتوی کلروفیل b، کارتنوئید و عملکرد ریشه را تحت شرایط تنش کم‌آبی افزایش و محتوی پراکسید هیدروژن را کاهش دادند. بنابراین می‌توان اظهار داشت کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید با بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش متابولیت‌های سازگار (پرولین و بتاگلایسین) و کارایی مصرف آب قادرند تحمل به تنش کم‌آبی را در چغندر قند افزایش دهند.

جدول ٦. مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری و کودهای آلی بر صفات مورد مطالعه چغندر قند.

Irrigation	Organic fertilizer	Stomatal conductance (mol. $m^{-2}s^{-1}$)	Chlorophyll b (mg g FW^{-1})	Carotenoid (mg g FW^{-1})	Superoxide dismutase (U/mg protein)	Hydrogen Peroxide (µmol /g FW	Root yield (ton ha^{-1})	Sugar content (%)
Irrigation after 60 mm evaporation (Normal)	Control	51.01^{abc}	1.54^{def}	3.41^{bcd}	734.0^{e}	2.84^{de}	61.74^{cd}	15.72^{b-e}
	Vermicompost	54.63^{a}	3.16^{a}	4.27^{a}	935.4^{b-e}	2.59^{e}	78.33^{a}	15.71^{b-e}
	Manure	50.40^{abc}	1.90^{b-e}	3.78^{abc}	934.5^{b-e}	0.96^{f}	67.92^{bc}	17.86^{abc}
	Humic acid	53.18^{ab}	2.26^{b}	4.47^{a}	1096.1^{bc}	2.70^{de}	73.07^{ab}	13.03^{e}
Irrigation after 90 mm evaporation (Mild stress)	Control	49.24^{bc}	1.61^{c-f}	2.91^{def}	972.9^{bcd}	4.88^{b}	48.53^{fg}	15.45^{b-e}
	Vermicompost	50.70^{abc}	2.13^{bc}	3.43^{bcd}	915.1^{cde}	3.81^{bcd}	57.48^{de}	16.59^{bc}
	Manure	48.58^{c}	1.79^{b-f}	3.16^{cde}	784.0^{de}	3.67^{b-e}	54.52^{def}	13.70^{de}
	Humic acid	53.47^{ab}	1.99^{bcd}	3.94^{ab}	1001.2^{bc}	2.73^{de}	65.92^{bc}	16.22^{bcd}
Irrigation after 120 mm evaporation (Severe stress)	Control	40.52^{d}	1.39^{ef}	2.49^{efg}	1123.2^{bc}	6.46^{a}	42.70^{g}	18.24^{ab}
	Vermicompost	48.82^{c}	2.30^{b}	3.09^{cde}	1500.1^{a}	3.18^{cde}	53.55^{def}	15.26^{cde}
	Manure	47.00^{c}	1.32^{f}	2.34^{fg}	1135.7^{b}	4.17^{bc}	48.59^{fg}	19.95^{a}
	Humic acid	46.93^{c}	1.33^{ef}	2.16^{g}	1372.3^{a}	4.32^{bc}	52.84^{ef}	15.09^{cde}

-

میانگین‌های دارای حرف (حروف) مشابه در هر ستون، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۷. ضرایب همبستگی بین صفات مورد مطالعه چغندر قند تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودهای آلی.

	Stomatal conductance	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Relative water content	Proline	Beta glycine	Catalase	Superoxide dismutase	Hydrogen peroxide	Malon dialdehyde	Su co
l a	0.50**	1										
l b	0.46**	0.52**	1									
d	0.41*	0.45**	0.74**	1								
ontent	0.32*	0.42*	0.54**	0.69**	1							
	-0.28^{ns}	-0.34*	-0.04^{ns}	-0.18^{ns}	-0.09^{ns}	1						
e	-0.15^{ns}	-0.18^{ns}	0.08^{ns}	-0.20^{ns}	-0.19^{ns}	0.62**	1					
	-0.25^{ns}	-0.35**	0.04^{ns}	-0.29^{ns}	-0.14^{ns}	0.65**	0.56**	1				
mutase	-0.07^{ns}	-0.14^{ns}	0.01^{ns}	-0.25^{ns}	-0.18^{ns}	0.59**	0.63**	0.66**	1			
oxide	-0.17^{ns}	-0.07^{ns}	-0.30^{ns}	-0.50**	-0.42**	-0.01^{ns}	0.17^{ns}	0.27^{ns}	0.25^{ns}	1		
e	-0.16^{ns}	-0.26^{ns}	-0.47**	0.68**	-0.56**	0.15^{ns}	0.14^{ns}	0.38*	0.18^{ns}	0.58**	1	
nt	-0.17^{ns}	-0.27^{ns}	0.05^{ns}	0.15^{ns}	0.25^{ns}	0.09^{ns}	0.03^{ns}	0.05^{ns}	0.07^{ns}	0.08^{ns}	0.05^{ns}	
l	0.40*	0.19^{ns}	0.63**	0.72**	0.57**	-0.21^{ns}	0.26^{ns}	0.35*	-0.31ns	-0.69**	-0.67**	-0
iency	0.25^{ns}	-0.26^{ns}	0.14^{ns}	0.21^{ns}	0.35*	0.37*	0.36*	0.36*	0.16^{ns}	-0.19^{ns}	-0.20^{ns}	0.

معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

۵. منابع

Abd El–Haleim, M.S. (2020). Effect of irrigation intervals and potassium humate on sugar beet productivity. *International Journal of Plant Production, 11*, 1239–1243.

Abhari, A., Seydabadi, M., & Kermani, M. (2022). Study of increasing physiological tolerance of sugar beet to drought stress with salicylic acid consumption. *Crop Science Research in Arid Regions*. 10.22034/csrar.2023.356848.1268. (In Persian).

Ahanger, M.A., Qi, M., Huang, Z., Xu, X., Begum, N., Qin, C., Zhang, C., Ahmad, N., Mustafa, N.S., Ashraf, M., & Zhang, L. (2021). Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *216*, 112195.

Akyüz, A., & Ersus, S. (2021). Optimization of enzyme assisted extraction of protein from the sugar beet (*Beta vulgaris* L.) leaves for alternative plant protein concentrate production. *Food Chemistry, 335*, 127673.

AL-Jbawi, E., & Abbas, F. (2013). The effect of length during drought stress on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and quality. *Persian Gulf Crop Protection*, *2*(1), 35- 43.

Alotaibi, F., Bamagoos, A.A., Ismaeil, F.M., Zhang, W., & Abou-Elwafa, S.F. (2021) Application of beet sugar byproducts improves sugar beet biofortification in saline soils and reduces sugar losses in beet sugar processing. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 30303–30311.

Arabzadeh, N. (2012). The effect of drought stress on soluble carbohydrates (sugars) in two species of *Haloxylon persicum* and *Haloxylon aphyllum*. *Asian Journal of Plant Sciences*, *11*, 44–51.

Arjeh, J., Pirzad, A.R., Tajbakhsh, M., & Mohammadzadeh, S. (2021). Improving the water use efficiency of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) by vermicompost and phytoprotectants. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *32*(2), 1-18. (in Persian).

Avvakumova, N.P., Gerchikov, A.Y., Khairullina, V.R., & Zhdanova, A.V. (2011). Antioxidant properties of humic substances isolated from peloids. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, *45*, 192–193.

Azevedo, R.A., & Lea, P.J. (2011). Research on abiotic and biotic stress—what next? *Annals of Applied Biology, 159*(3), 317–319.

Bagheri, S.M.M. (2010). Infuence of humic products on soil health and potato production. *Potato Research*, *53*, 341–349.

Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.O. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207.

Bayat, H., Shafe, F., Aminifard, M.H., & Daghighi, S. (2021). Comparative effcts of humic and fulvic acids as biostimulants on growth, antioxidant activity and nutrient content of yarrow (*Achillea millefolium* L.). *Scientia Horticulturae*, *279*, 109912.

Bloch, D., Hoffman, C.M., & Märländer, B. (2006). Solute accumulation as a cause for quality losses in sugar beet submitted to continuous and temporary drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *192*, 17–24.

Bowler, C., Slooten, L., Vandenbranden, S., De Rycke, R., Botterman, J., Sybesma, C., Van Montagu, M., & Inzé, D. (1991). Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by oxygen radicals in transgenic plants. *The EMBO Journal*, *10*, 1723- 32.

Britton, C., & Mehley, A. (1995). Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology*, *2*, 764-75.

Chołuj, D., Karwowska, R., Jasińska, M., & Haber, G. (2004). Growth and dry matter partitioning in sugar beet plants (*Beta vulgaris* L.) under moderate drought. *Plant, Soil and Environment*, *50*, 265–272.

Cordeiro, F.C., Santa-Catarina, C., Silveira, V., & Souza, S.R. (2011). Humic acid effect on catalase activity and the generation of reactive oxygen species in corn (*Zea mays*). *Journal of BioScience and Biotechnology*, *75*, 70–74.

CUMSA. (2009). International commission for uniform methods of sugar analysis, methods book. Berlin, Bartens.

Doulati, B., Rahimi, A., & Heydarzade, S. (2018). The effect of manure on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivar laetitia. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *8*(1),143-157. (In Persian).

Ebmeyera, H., Fiedler-Wiechersb, K., & Hoffmann, C.M. (2021). Drought tolerance of sugar beet – evaluation of genotypic differences in yield potential and yield stability under varying environmental conditions. *European Journal of Agronomy*, *125*, 126-139.

El-Hassanin, A.S., Samak, M.R., Moustafa, S.N., Khalifa, A.M., & Ibrahim, I.M. (2016) Effect of foliar application with humic acid substances under nitrogen fertilization levels on quality and yields of sugar beet plant. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *5*, 668–680.

El-Mageed, T.A.A., El-Sherif, A.M.A., El-Mageed, S.A.A., & Abdou, N.M. (2019). A novel compost alleviate drought stress for sugar beet production grown in Cd-contaminated saline soil. *Agricultural Water Management*, *226*, 105831-105848.

El-Sayed, A.M., Mahmoud, A.H., Taha, I.B., & Eman, I.R.E. (2018). Tolerance of some sugar beet varieties to water stress. *Agricultural Water Management*, *201*, 144-151.

Eskandari Torbaghan, M., & Fazeli Kakhki, S.F. (2021). An investigation of the effect of fertilizer enhancers on some yield components of wheat yield in the last irrigation cut in the field conditions. *Plant Process and Function*, *10*(45), 89-106. (In Persian).

FAO. (2021). *Crops Production and Area Harvested*. 2019, 2021, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Fugate, K.K., Lafta, M.A., Eide, G.D., Li, G.L., Lulai, E.C.N., Olson, L.L., Deckard, F.L., Khan, M.F.R., & Finger, F.L. (2018). Methyl jasmonate alleviates drought stress in young sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Journal of Agronomy and Crop Science, 24*(6), 566-576.

García, A.C., Olaetxea, M., Santos, L.A., Mora, V., Baigorri, R., Fuentes, M., & Garcia-Mina, J.M. (2016). Involvement of hormone-and ROS-signaling pathways in the beneficial action of humic substances on plants growing under normal and stressing conditions. *BioMed Research International, 216*, 1-13.

Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Nadeem, M., Cheema, M., & Razmjoo, J. (2022). Biochemical and yield response of sugar beet to drought stress and foliar application of vermicompost tea. *Plant Stress, 5*, 1-8.

Ghassemi, S., Farhangi-Abriz, S., Faegi-Analou, R., Ghorbanpour, M., & Lajayer, B.A. (2018). Monitoring cell energy, physiological functions and grain yield in field grown mung bean exposed to exogenously applied polyamines under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *18*, 1108–1125.

Gizawy, E., Shalaby, G., & Mahmoud, E. (2014). Effects of tea plant compost and mineral nitrogen levels on yield and quality of sugar beet crop. *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, *45*, 1181–1194.

Hoffmann, C.M. (2006). Sucrose accumulation in sugar beet under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *196*(4), 243-252.

Honarvar, M., Ashtari, A.K., & Karimi, K. (2012). Estimation of sugar losses at production in molasses sugar industries, based on technological qualities of sugar beet. *Journal of Food Technology & Nutrition Sciences, 9*, 31-38. (in Persian).

Huguet-Robert, V., Sulpice, R., Lefort, C., Maerskalck, V., Emery, N., & Larcher, F.R. (2003). The suppression of osmoinduced stresse response of *Brassica napus* L. var. *oleifera* leaf discs by polyunsaturated fatty acids and methyljasmonate. *Plant Science*, *164*, 119-127.

Ibrahim, F.R., El–Maghraby, S.S., Kandil, E.E., & Ibrahim, N.Y. (2019). Productivity and quality of sugar beet in relation to humic acid and boron fertilization under nubaria conditions. *Alexandria Science Exchange Journal*, *40*(115), 126.-139.

Ievinsh, G. (2020). Review on physiological effects of vermicomposts on plants. In *Biology of composts*; Meghvansi, M.K., Varma, A. Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 63–86.

Islam, M.D., Kim, J.W., Begum, K., Taher Sohel, A., & Lim, Y.S. (2021). Physiological and biochemical changes in sugar beet seedlings to confer stress adaptability under drought condition. *Plants*, *9*, 1-27.

Khalili, M., & Hamzeh, H. (2019). Effect of super-adsorbent and irrigation levels on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Journal of Crop Ecophysiology*, *51*(13), 395-412. (In Persian).

Khalili, M., & Hamzeh, H. (2021). Effect of different soil amendment treatments on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *31*(1), 171-192. (In Persian).

Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A., & 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

Kiran, S. (2019). Effects of vermicompost on some morphological, physiological and biochemical parameters of lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) under drought stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *47*(2), 352–358.

Lawlor, D.W. (2002) Limitation to photosynthesis water–stressed leaves: Stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*, *89*, 671–885.

Liang, D., Ni, Z., Xia, H., Xie, Y., Lv, X., Wang, J., Lin, L., Deng, Q., & Luo, X. (2019). Exogenous melatonin promotes biomass accumulation and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae*, *246*, 34–43.

Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, *8*, 52-63.

Liu, M., Wang, C., Wang, F., & Xie, Y. (2019). Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil. *Applied Soil Ecology*, *142*, 147–154.

Mahmud, M., Abdullah, R., & Yaacob, J.S. (2018). Effect of vermicompost amendment on nutritional status of sandy loam soil, growth performance, and yield of pineapple (*Ananas comosus* var. MD2) under field conditions. *Agronomy*, *8*, 183.

Maji, D., Misra, P., Singh, S., & Kalra, A. (2017). Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum*. *Applied Soil Ecology*, *110*, 97–108.

Makhlouf, B.S.I., Khalil Soha, R.A., & Saudy, H.S. (2022). Efficacy of humic acids and chitosan for enhancing yield and sugar quality of sugar beet under moderate and severe drought. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*, 1676–1691.

Mamnabi, S., Nasrollahzadeh, S., Ghassemi-Golezani, K., & Raei, Y. (2020). Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*, 797–804.

Mehrandish, M., Moeini, M.J., & Armin, M. (2012). Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) response to potassium application under full and deficit irrigation. *European Journal of Experimental Biology*, *2*, 2113–2119.

Mohamed, H.Y., Bassiony, N.A., & Mashhour, A.M.A. (2017). Response of some sugar beet varieties to defcit irrigation and humic acid in a newly reclaimed soil. *Journal of Biological Chemistry and Environmental Sciences*, *12*, 537–562.

Monda, H., McKenna, A.M., Fountain, R., & Lamar, R.T. (2021). Bioactivity of humic acids extracted from shale ore: Molecular characterization and structure–activity relationship with tomato plant yield under nutritional stress. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 1–17.

Nazarideljou, M.J., & Heidari, Z. (2014). Effects of vermicompost on growth parameters, water use efficiency and quality of zinnia bedding plants (*Zinnia elegance* 'Dreamland Red') under different irrigation regimes. *International Journal of Horticultural Science*, *1*(2), 141–150.

Ober, E.S., Bloa, M.L., Clark, C.J.A., Royal, A., Jaggard, K.W., & Pidgeon, J.D. (2005). Evaluation of physiological traits as indirect selection criteria for drought tolerance in sugar beet. *Field Crops Research*, *91*, 231-249.

Pibars, S.K., Mansour, H.A., & Gaballah, M.S. (2018). Effect of water regime and compost tea on growth characters of sugar beet under different irrigation system. *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, *4*(2), 321–325.

Pierre-Louis, R.C., Kader, M., Desai, N.M., & John, E.H. (2021). Potentiality of vermicomposting in the South Pacific Island countries: A review. *Agriculture*, *11*, 876.

Pourmorad, M., Malakouti, M., & Tehrani, M.M. (2018). Study on the effect of humic acid and fulvic acid on the wheat yield and water use efficiency under drought stress. *Journal of Water and Soil*, *32*(5), 977-985. (In Persian).

Rady, M.M., Abd El-Mageed, T.A., & AbdurrahmanMahdi, H.A.A.H. (2016). Humic acid application improves field performance of cotton (*Gossypium barbadense* L.) under saline conditions. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *26*, 487–493.

Rezaei, J., Bannayan Awal, M., Nezami, A., Mehrvar, M., & Mahmoudi, B. (2014). Physiological response of sugar beet to viral diseases of *Rhizomania*. *Iranian Plant Protection Research, 28*(1), 138-146. (In Persian).

Salehi, A., Tasdighi, H., & Gholamhoseini, M. (2016). Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, *6*(10), 886–891.

Samavat, S., & Malakuti, M. (2005). Important use of organic acid (humic and fulvic) for increase quantity and quality agriculture productions. *Water and Soil Researchers Technical, 463*, 1-13. (In Persian).

Skorupa, M., Golebiewski, M., Kurnik, K., Niedojadlo, J., Kesy, J., Klamkowski, K., Wojcik, K., Treder, W., Tretyn, A., & Tyburski, J. (2019). Salt stress vs. salt shock-the case of sugar beet and its halophytic ancestor. *BMC Plant Biology*, *19*, 57-00.

Sorkhi, F. (2021). Effect of vermicompost fertilizer on antioxidant enzymes and chlorophyll contents of *Borago officinalis* under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *11*(2), 3589–3598. (In Persian).

Stoeva, N., & Bineva, T.Z. (2003) Oxidative changes and photosynthesis in oat plants grow in as contaminated soil. *Plant Physiology*, *29*, 87 -95.

Taleghani, D., Rajabi, A., Hemayati, S.S., & Saremirad, A. (2022).Improvement and selection for drought-tolerant sugar beet (*Beta vulgaris* L.) pollinator lines. *Results in Engineering*, *13*, 20-38.

Tamara, F.J.F., Jennifer, S.B., Sacha, J.M., & Debbie, L.S. (2017). Assessing water uptake in sugar beet (*Beta vulgaris*) under different watering regimes. *Agricultural Water Management*, *144*, 61-67.

Tambussi, E.A., Bartoli, C.G., Bettran, J., Guiamet, J.J., & Araus, J.C. (2000) Oxidative damage to thylakoids proteins in water stressed leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology, 108*, 398-404.

Topak, R., Acar, B., Uyanöz, R., & Ceyhan, E. (2016). Performance of partial root-zone drip irrigation for sugar beet production in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, *176*, 180-190.

Vidal, A., Lenhart, T., Dignac, M.F., Biron, P., Höschen, C., Barthod, J., Vedere, C., Vaury, V., Bariac, T., & Rumpel, C. (2020). Promoting plant growth and carbon transfer to soil with organic amendments produced with mineral additives. *Geoderma*, *374*, 114454.

Wisniewska, A., Andryka-Dudek, P., Czerwinski, M., & Choluj, D. (2019). Fodder beet is a reservoir of drought tolerance alleles for sugar beet breeding. *Plant Physiology and Biochemistry*, *145*, 120–131

Youssef, A.M., Hasanin, M.S., Abd El-Aziz, M.E., & Darwesh, O.M. (2019). Green, economic, and partially biodegradable wood plastic composites via enzymatic surface modification of lignocellulosic fibers. *Heliyon, 5*, e01332.

Zeighami Nejad, K., Ghasemi, M., Shamili, M., & Damizadeh, G.R. (2020). Effect of mycorrhiza and vermicompost on drought tolerance of lime seedlings (*Citrus aurantifolia* cv. Mexican lime). *International Journal of Fruit Science*, *20*(3), 646–657.

Zhou, Q., & Yu, B.J. (2009). Accumulation of inorganic and organic osmolytes and their role in osmotic adjustment in NaCl-stressed vetiver grass seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, *56*, 678–685.