University of Birjand

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6592.2231

Original article

Evaluation of vermicompost and foliar methanol application on antioxidant activity of leaf, compatible osmolytes and some traits of triticale under salinity stress

Kh. Sourazar [1*], R. Seyed Sharifi [2]

1. *Ph.D student, Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Received 17 July 2023; Accepted 10 September 2023

Extended abstract

Introduction

Salinity is a global challenge issue that is drastically reducing agricultural production. More than 800 million hectares of agricultural land suffer from soil salinity. Intense salinity stress may cause accelerated aging enzymatic and metabolic disorders of the plant. Salinity stress leads to plant death by reducing photosynthetic carbon dioxide uptake and electron transport activity, chlorophyll degradation, reactive oxygen species (ROS) accumulation, and membrane damage. Methanol is one of the simplest alcohols, which is oxidized in the form of formaldehyde and carbon dioxide in the plant, and is produced in the form of amino acids (serine and methionine) and carbohydrates in various tissues of three-carbon plants (C3). Plants treated with methanol can increase their net absorption rate. Vermicompost provides a great potential to enhance crop productivity besides protecting soil health and environmental sustainability. Its application also enhances the physico-chemical, as well as the organic properties of the soil. Vermicompost is a solid product of organic residues enriched with earthworms and other micro-faunas that provide a significant source of growth regulator hormones, degrading enzymes (such as chitinase, cellulase, lipase, amylase, and proteases), and some essential vitamins. The aim of this study was the investigation the effects of vermicompost and methanol on the activity of antioxidant enzymes, compatible osmolytes and some traits of triticale under saline conditions.

Materials and methods

An experiment was conducted as factorial based on randomized complete block design with three replications in greenhouse research of Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili during 2022. Experimental factors were included salinity in three levels (no salinity as control, salinity 50 and 100 mM by NaCl), application of vermicompost at two levels (without vermicompost as control and application of vermicompost) and methanol foliar application in three levels (foliar application with water as control, foliar application 15 and 30% volume). "Sanabad" cultivar was used. The seeds were placed in a cold incubator (model IKH.RI90) for 12 days at 2°C for vernalization. The amount of vermicompost used in this experiment was 6 tons per hectare (equivalent to 83.08 $g.pot^{-1}$). In this study, activity of CAT, PPO, POD, soluble sugar, protein, proline, MDA, H_2O_2, EC, RWC and grain yield were investigated. Electrical conductivity (EC) values were measured using an

* Corresponding author: Khadijeh Sourazar; E-Mail: k_sourazar@uma.ac.ir

© 2025, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

electrical-conductivity meter (Mi 180 Bench Meter model). The activity of antioxidant enzymes (CAT, PPO and POD) by the method of Sudhakar (Sudhakar et al., 2001), the total protein content of the flag leaf by the Bradford method (Bradford, 1976), the content of soluble sugars by method of Dubios (Dubios et al., 1956), malondialdehyde content by Stewart and Beweley's method (Stewart and Beweley, 1980), proline content by Bates et al.'s method (Bates et al., 1973) and hydrogen peroxide content was measured by the method of Alexieva et al. (Alexieva et al., 2001) on the flag leaf at the flowering stage (61 BBCH). At plant maturity, five plants of each pot were randomly harvested to measure grain yield per plant. Analysis of variance and mean comparisons were performed using SAS9.4 computer software packages. The main effects and interactions were tested using the least significant difference (LSD) test at 0.05 probability level.

Results and discussion

The results showed that both application of vermicompost and foliar application of 30% volume of methanol under salinity 100 mM increased the activity of peroxidase (73.4%), polyphenol oxidase (89.6%), soluble sugar (20.3%), protein (38%), proline (101.9%) and relative water content (20.6%) in compared to no application of vermicompost and methanol under the same of salinity level. Application of vermicompost decreased MDA and H_2O_2 content (9 and 20% respectively) in compared to no application of vermicompost. Foliar application of 30% volume of methanol decreased MDA and H_2O_2 content (40 and 55% respectively) in compared to no methanol application. Maximum of grain yield was obtained in both application of vermicompost and methanol at 30% volume under no salinity.

Conclusion

Based on the results of this study, it seems that the application of vermicompost and methanol can increase the grain yield of triticale under salinity stress due to improving activity of antioxidant enzymes and compatible osmolytes.

Keywords: Catalase, Grain Yield, Hydrogen Peroxide, Protein, Soluble Sugar

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6592.2231

مقاله پژوهشی

بررسی کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی متانول بر فعالیت آنتی‌اکسیدان برگ، اسمولیت-های سازگار و برخی صفات تریتیکاله تحت تنش شوری

خدیجه صورآذر [1*]، رئوف سیدشریفی [2]

۱. دانشجوی دکتری رشته فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پراکسیدهیدروژن
پروتئین
عملکرد دانه
قند محلول
کاتالاز

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۶/۱۹

چکیده

به‌منظور بررسی تاثیر شوری، ورمی‌کمپوست و متانول بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، اسمولیت‌های سازگار و برخی صفات تریتیکاله، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل سه سطح شوری (عدم اعمال شوری به‌عنوان شاهد، شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار از نمک سدیم‌کلرید)، دو سطح ورمی‌کمپوست (بدون کاربرد به عنوان شاهد و کاربرد ورمی‌کمپوست) و سه سطح متانول (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی متانول) بود. نتایج نشان داد کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار فعالیت آنزیم پراکسیداز (۷۳/۴ درصد)، پلی‌فنل‌اکسیداز (۸۹/۶ درصد)، قند محلول (۲۰/۳ درصد)، پروتئین (۳۸ درصد)، پرولین (۱۰۱/۹ درصد) و محتوای نسبی آب (۲۰/۶ درصد) را نسبت به تیمار عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول درهمین سطح شوری افزایش داد. کاربرد ورمی‌کمپوست محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن را (به‌ترتیب ۹ و ۲۰ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد ورمی‌کمپوست کاهش داد. کاربرد متانول ۳۰ درصد حجمی محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسیدهیدروژن را (به‌ترتیب ۴۰ و ۵۵ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد متانول کاهش داد. بیش‌ترین عملکرد دانه از کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم شوری به‌دست آمد. براساس نتایج این تحقیق، به‌نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول به‌دلیل بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و اسمولیت‌های سازگار می‌تواند موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله تحت تنش شوری شود.

مقدمه

تریتیکاله یا چاودم (*x Triticosecale* Wittmack) گیاه زراعی ساخته دست بشر می‌باشد که از دو رگ‌گیری چاودار (*Secale cereale*) (به‌عنوان والد پدری) و گندم نان (*Triticum aestivum*) (به‌عنوان والد مادری) به‌دست‌آمده و از دامنه سازگاری بیشتری نسبت به هر یک از والدین خود برخوردار است. این گیاه به‌عنوان غذای انسان و طیور، چرای مسقیم، علوفه خشک و تازه استفاده می‌شود (Golebiowska-Paluch and Dyda, 2023). رقم سناباد با خصوصیاتی چون پتانسیل عملکرد بالا، متوسط رس، مقاوم به خوابیدگی و بیماری‌های رایج گندم معرفی و مناسب کاشت در مناطق معتدل و معتدل سرد است. این رقم برای استفاده دو منظوره (علوفه سبز و دانه) مناسب است و در اراضی کم-بازده و فقیر از موفقیت بیشتری نسبت به گندم و جو برخوردار است (Vahabzadeh et al., 2013).

* نگارنده پاسخگو: خدیجه صورآذر. پست الکترونیک: k_sourazar@uma.ac.ir

شوری خاک بیش از ۸۰۰ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان را، تحت تاثیر قرار می‌دهد (Yasin et al., 2018). مناطق متاثر از شوری به‌دلیل تغییرات آب و هوایی و آبیاری با آب بی‌کیفیت، به‌طور مداوم در حال گسترش است (Sahab et al., 2021). شوری بیش از حد در سیستم خاکی برای ساختار خاک و گیاهان مضر بوده و موجب عدم تعادل یونی و تنش اسمزی شده و گیاهان را با تنش خشکی فیزیولوژیکی و کمبود مواد مغذی مواجه می‌کند (Liu et al., 2022). همچنین شوری موجب ایجاد تنفس نوری و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند رادیکال‌های سوپراکسید (O^{2-}) و پراکسیدهیدروژن (H_2O_2) می‌شود که موجب آسیب به غشاها، رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین، لیپید و مسیرهای متابولیک می‌شوند (Naboulsi et al., 2022). بنابراین، برای غلبه بر اثرات تنش شوری، گیاهان به چندین مکانیسم تحمل برای بهبود پارامترهای رشد، جذب مواد مغذی و فعال‌شدن سیستم دفاعی فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدانی نیاز دارند. برای مقابله با آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن، گیاهان استراتژی‌های دفاعی مختلفی را با تولید آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی و آنزیمی ایجاد کرده و بافت‌های گیاهی را در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کنند (Mushtaq et al., 2020).

کاربرد ترکیبات الکلی از جمله استراتژی‌هایی است که غلظت دی‌اکسیدکربن را در گیاهان افزایش می‌دهد. متانول از ساده‌ترین الکل‌ها است که به‌صورت فرمالدهید و دی-اکسیدکربن در گیاه اکسید می‌شود و به‌صورت اسیدهای آمینه (سرین و متیونین) و کربوهیدرات در بافت‌های مختلف گیاهان سه کربنه (C_3) تولید می‌شود. نام قدیم متانول، الکل چوب بود که نشان‌دهنده منشأ گیاهی این ماده می‌باشد (Dorokhov et al., 2018). تا سال‌های اخیر، متانول ساطع‌شده از گیاهان به‌عنوان یک محصول جانبی بیوشیمیایی تلقی می‌شد، با این‌حال، تحقیقات گذشته نقش آن را به‌عنوان یک مولکول سیگنال در ارتباط گیاه و محیط پیرامون نشان داده است. گیاهان تیمار شده با متانول می‌توانند سرعت جذب خالص خود را افزایش دهند. در زمان ایجاد تنش در گیاهان، ژن‌های القایی متانول در گیاه فعال شده و موجب مقاومت گیاه در برابر عوامل زیستی و غیرزیستی می‌گردد (Dorokhov et al., 2018). در تنش-های شدید، گیاه مواد فتوستنزی خود را بیشتر برای سنتز ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی مانند پرولین، گلایسین بتائین و ترکیبات قندی مثل ساکاروز، فروکتوز و فروکتان مصرف می‌کند تا بتواند پتانسیل آب سلولی را کاهش دهد (Aliyar et al., 2021). کاربرد متانول در گیاهان C_3 می‌تواند بخشی از تلفات کربن فتوسنتزی را جبران کند، بنابراین کارایی فتوسنتز را افزایش می‌دهد (Behrouzyar and Yarnia, 2016). محلول‌پاشی متانول موجب تسریع تولید قندها و اسیدهای آمینه و افزایش تولید ماده خشک، فتوسنتز برگ و عملکرد دانه می‌شود (Valizadeh-Kamran et al., 2019). در واقع، محلول‌پاشی متانول موجب جذب متانول توسط گیاهان می‌شود که در مرحله بعدی متانول در سلول‌های گیاهی به CO_2 تبدیل می‌شود و میل ترکیبی بیشتر رابیسکو با مولکول‌های CO_2 نسبت به O_2 موجب افزایش فتوسنتز و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود (Saneinejad et al., 2019). محلول‌پاشی متانول روی اندام هوایی لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata*) موجب کاهش نشت یونی و افزایش اسیدهای آمینه (پرولین و قندهای محلول) در شرایط تنش شد (Saneinejad et al., 2019). همچنین در پژوهشی، محلول‌پاشی بوته‌های نخود فرنگی (*Cicer arietinum*) با متانول در غلظت‌های مختلف موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز)، پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید و افزایش محتوای پروتئین، پرولین و قندهای محلول در بافت گیاه شد (Hossinzadeh et al., 2015).

ورمی‌کمپوست نیز از دیگر ترکیبات قابل استفاده برای محدودکردن اثرات منفی ناشی از تنش شوری است که با حفاظت از خاک، افزایش بهره‌وری محصول را فراهم می‌کند. ورمی‌کمپوست یک محصول جامد از بقایای آلی غنی‌شده با کرم‌های‌خاکی و سایر ریز جانداران است که منبع قابل توجهی از هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد، آنزیم‌های تجزیه‌کننده (مانند کیتیناز، سلولاز، لیپاز، آمیلاز و پروتئازها) و برخی ویتامین‌های ضروری را فراهم می‌کند. ورمی‌کمپوست خواص فیزیکی، شیمیایی و خواص آلی خاک را افزایش می‌دهد. کرم‌های خاکی به ترشح آنزیم‌های ضروری (از جمله نیترات ردوکتاز) در سوبسترا کمک می‌کنند. این موجودات همچنین در تجزیه بقایای آلی با کاهش نسبت کربن به نیتروژن و افزایش دسترسی ریز جانداران به واکنش با مجموع میکروب-های تجزیه‌کننده سلولولیتیک برای تجزیه کامل بقایای آلی همکاری می‌کنند. کرم‌های‌خاکی ورمی‌کمپوست را از طریق

هوموس تولید می‌کنند که فضولات باکتریایی روده آن‌ها است (Ahmad et al., 2022). کاربرد ورمی‌کمپوست موجب افزایش محتوای قند محلول، پرولین، کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز تریتیکاله (Mohammadi Kale Sarlou et al., 2022) و سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) (Ezzat et al., 2019) در شرایط تنش شوری شد. کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط شوری موجب بهبود قابل توجهی در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز گیاه ذرت (*Zea mays*) شد (Alamer et al., 2022).

گسترش روز افزون شوری و اهمیت محلول‌پاشی متانول و ورمی‌کمپوست در تعدیل و کاهش بخشی از آثار مخرب ناشی از تنش شوری و بررسی‌های محدود انجام‌شده (Valizadeh-Kamran et al., 2019; Vojodi Mehrabani., 2019) در این راستا، موجب شد تا اثر این عوامل بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، اسمولیت‌های سازگار و برخی صفات تریتیکاله در شرایط شوری مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل سه سطح شوری (عدم اعمال شوری به‌عنوان شاهد، شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار از نمک کلرید سدیم)، دو سطح ورمی‌کمپوست (کاربرد خاکی و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست) و سه سطح متانول (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی متانول) بود. برای تهیه محلول متانول، به هر کدام از محلول‌ها دو گرم در لیتر گلایسین اضافه شد (Narimani and Seyed Sharifi, 2023). پس از پرکردن گلدان‌هایی با قطر ۴۲ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری با خاک به میزان ۱۴ کیلوگرم، ۵۶ عدد بذر رقم سناباد که در دمای ۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ روز در دستگاه کُلد انکوباتور (مدل IKH.RI90) ورنالیزه شده بود، کشت شد. تراکم مطلوب و توصیه‌شده برای این رقم ۴۰۰ بذر در مترمربع (۵۶ عدد بذر در گلدان) بود (Mohammadi Kale Sarlou et al., 2022). اولین آبیاری پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی مطابق با نیاز گیاه زراعی و شرایط محیطی گلخانه انجام شد. میزان ورمی‌کمپوست اضافه‌شده به خاک در هنگام کاشت ۶ تن در هکتار (۸۳/۰۸ گرم در گلدان) بود که از شرکت گیلدا تهیه و مشخصات فیزیکوشیمیایی آن در جدول ۱ و نتایج حاصل از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در گلدان‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه ورمی‌کمپوست

Table 1. Results of vermicompost analysis

مشخصه Characteristic		اسیدیته pH	منگنز Mn	آهن Fe	مس Cu	روی Zn	کادمیوم Cd	هدایت الکتریکی EC
			----------mg.kg^{-1}----------					dS m^{-1}
Amount	مقادیر	7.64	275	5000	20	110	1	1.12
Characteristic	**مشخصه**	**ماده آلی O.M**	**کربن آلی O.C**	**نیتروژن N**	**فسفر P**	**پتاسیم K**	**کلسیم Ca**	**منیزیم Mg**
			----------%----------					
Amount	مقادیر	32.9	1.55	0.4	0.4	2.73	0.95	0.95

جدول ۲. خصوصیات فیزیکو شیمیایی خاک

Table 2. Soil physico-chemical characteristics

ویژگی Characteristic		روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	کربن آلی O. C	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	آهک $CaCO_3$	بافت Texture	pH
		---------mg.kg^{-1}---------			----------%----------							
Amount	مقادیر	1.8	212	8.29	0.06	0.62	35	42	23	14.4	Loamy	7.8

برای اعمال هر کدام از سطوح شوری، مقدار نمک موردنیاز با کمک نرم‌افزار Salt cale محاسبه شد. در این نرم‌افزار به استناد هدایت الکتریکی خاک و درصد عصاره اشباع، مقدار نمک مورد نیاز برای هر کیلوگرم خاک گلدان

محاسبه شد و به هر گلدان همراه آب آبیاری اضافه شد. محلول‌پاشی با متانول در دو نوبت در مرحله ساقه‌دهی (۳۰ BBCH) با فاصله زمانی یک هفته بین ساعت ۸ تا ۱۰ صبح اعمال شد (Narimani and Seyed Sharifi, 2023). گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۵ تا ۱۶ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) نگهداری شدند. در طول اجرای آزمایش کود خاصی به گلدان‌ها اضافه نشد. هدایت الکتریکی برگ پرچم در دوره آبستنی (۴۳ BBCH) پس از پاکسازی گرد و غبار روی برگ‌ها با دستمال مرطوب، نمونه‌های برگی به ابعاد یکسان برش و در فالکون‌های حاوی ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار تقطیر غوطه‌ور شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگه‌داری شد. سپس، میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها با دستگاه ECمتر (مدل Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری و عدد حاصل از هدایت الکتریکی محلول شاهد کسر شد. محتوای نسبی آب برگ در مرحله آبستنی گیاه (۴۳ BBCH) از برگ پرچم سالم تعیین شد، به‌طوری‌که پس از جداکردن برگ از بوته، نمونه‌های برگی بلافاصله درون یخ قرار گرفت و پس از انتقال به آزمایشگاه، وزن تر آن‌ها با ترازو به دقت اندازه‌گیری و در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار تقطیر غوطه‌ور شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگه‌داری شد و وزن آماس‌یافته برگ‌ها، پس از حذف آب اضافی ارزیابی و سپس در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت بر اساس رابطه زیر محتوای نسبی آب برگ محاسبه شد (Kostopoulou et al., 2010).

$$RWC\ (\%) = (Wf - Wd) / (Ws - Wd) \times 100 \quad [۱]$$

RWC: درصد محتوای نسبی آب ، Wf: وزن تر برگ، Wd: وزن خشک برگ و Ws: وزن آماس‌یافته یا به حالت تورم برگ است.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پلی‌فنل‌اکسیداز و پراکسیداز) با روش سودهکار و همکاران (Sudhakar et al., 2001)، محتوای پروتئین کل برگ پرچم با روش برادفورد (Bradford, 1976)، محتوای قندهای محلول از روش دابوس و همکاران (Dubios et al., 1956)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید به روش استوارت و بولی (Stewart and Beweley, 1980)، محتوای پرولین با روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973) و محتوای پراکسیدهیدروژن به روش الکسیو و همکاران (Alexieva et al., 2001) بر روی برگ پرچم در مرحله گلدهی (۶۱ BBCH) اندازه‌گیری شد.

در زمان رسیدگی پنج بوته از هر گلدان برداشت و سپس میانگین عملکرد دانه بوته‌های برداشت شده به‌عنوان عملکرد تک‌بوته در تجزیه داده‌ها استفاده شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹,۴ انجام شد. میانگین داده‌ها با آزمون LSD در سطح پنج درصد مقایسه شد.

نتایج و بحث

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی (کاتالاز (CAT)، پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) و پراکسیداز (POD)):

مطابق با نتایج جدول تجزیه واریانس اثر سطوح شوری، ورمی‌کمپوست، متانول و برهم‌کنش سه جانبه آن‌ها بر فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با این‌حال، تنها شوری و متانول بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح یک‌درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). با افزایش محتوای شوری، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز تشدید یافت. طوری‌که در مقایسه با ترکیب تیماری ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال تنش و تیمار شاهد (عدم کاربرد تنش، ورمی-کمپوست و متانول)، فعالیت آنزیم پراکسیداز را به‌ترتیب ۶۷ تا ۱۶۵ درصد و فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز را به‌ترتیب ۷۵ تا ۲۲۸ درصد افزایش داد. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در اثر تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار به‌ترتیب ۴۸ و ۲۲/۵ درصد نسبت به سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار و عدم شوری (شاهد) افزایش داشت (جدول ۴). همچنین کاربرد متانول ۳۰ درصد حجمی در مقایسه با متانول ۱۵ درصد حجمی ۶/۵ درصد و در مقایسه با عدم کاربرد متانول حدود ۳۲ درصد، فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد. البته بین سطوح متانول ۳۰ و ۱۵ درصد حجمی تفاوت آماری معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند POD، CAT و PPO کارایی سیستم دفاعی گیاه را افزایش داده و قادرند مقادیر اکسیژن فعال را در سلول‌های گیاهی کنترل کنند. در اغلب گیاهان کاربرد ورمی‌کمپوست با تحریک ژن‌های آنتی-اکسیدانی موجب افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی می‌شود. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلف از جمله CAT و PPO قادرند H_2O_2 تولید شده را حذف و اثرات مخرب ROS را کاهش دهند (Lahbouki et al., 2022).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر ورمی‌کمپوست و متانول بر صفات بیوشیمیایی برگ پرچم گیاه تریتیکاله تحت تنش شوری.

Table 3. Analysis of variance (mean square) the effects of vermicompost and methanol on the biochemical traits of flag leaf of triticale under salinity stress.

منابع تغییر S. O. V	درجه آزادی df	پروتئین Protein	پراکسیداز POD	کاتالاز CAT	پلی‌فنل‌اکسیداز PPO	قندهای محلول Soluble sugars
تکرار Replication	2	6.76**	263.34**	187.19^{ns}	17.73*	16.27^{ns}
شوری Salinity (S)	2	46.28**	4537.93**	3086.22**	1966.74**	585.13**
ورمی‌کمپوست Vermicompost (V)	1	8.51**	805.96**	183.08^{ns}	437.82**	1454.01**
متانول Methanol (M)	2	26.32**	2540.32**	1562.24**	1487.26**	518.90**
S×V	2	0.80^{ns}	11.71^{ns}	221.00^{ns}	12.70*	202.56*
S×M	4	0.32^{ns}	114.29**	140.00^{ns}	54.82**	37.97^{ns}
V×M	2	0.006^{ns}	3.89^{ns}	10.58^{ns}	**22.49	248.19**
S×V×M	4	1.39**	67.02**	41.32^{ns}	31.50**	135.80**
خطا Error	34	0.34	11.19	77.54	3.42	16.35
ضریب تغییرات (%) CV%		*4.65*	*5.83*	*13.12*	*4.40*	*4.18*

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

منابع تغییر S. O. V	درجه آزادی df	پرولین Proline	پراکسیدهیدروژن H_2O_2	مالون دی‌آلدهید MDA	محتوای نسبی آب RWC	هدایت الکتریکی EC	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	0.76*	0.00067*	0.0006*	50.73^{ns}	124.44**	0.002^{ns}
شوری Salinity (S)	2	21.61**	0.0059**	0.0044**	748.25**	66.00**	19.17**
ورمی‌کمپوست Vermicompost (V)	1	24.91**	0.00066*	0.00075*	154.13*	28.69**	3.14**
متانول Methanol (M)	2	24.14**	0.0011**	0.0043**	307.14**	49.42**	12.69**
S×V	2	2.26**	0.000066^{ns}	0.00004^{ns}	93.04*	5.65^{ns}	0.456**
S×M	4	4.06**	0.00016^{ns}	0.00028^{ns}	22.45^{ns}	2.69^{ns}	6.76**
V×M	2	1.70**	0.000090^{ns}	0.00005^{ns}	72.73^{ns}	0.49^{ns}	0.112**
S×V×M	4	2.64**	0.000055^{ns}	0.000078^{ns}	129.72**	10.41**	0.152**
خطا Error	34	0.16	0.00014	0.00018	19.60	2.10	0.005
ضریب تغییرات (%) CV%		*10.53*	*13.62*	*14.56*	*5.64*	*5.29*	*5.72*

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and ** are non-significant, significant at p≤0.05 and p≤0.01, respectively.

Relative water content (RWC); Electrical conductivity (EC); Catalase (CAT), Peroxidase (POD), Polyphenol Oxidase (PPO); Hydrogen peroxide (H2O2) and Malondialdehyde content (MDA).

محققان در پژوهشی مشابه اظهار داشتند کاربرد ورمی-کمپوست در شرایط شوری موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز گیاه تریتیکاله شد و آنزیم کاتالاز با اثر مستقیم بر پراکسید هیدروژن، موجب کاهش اثر سمی تنش شوری شد (Mohammadi Kale Sarlou et al., 2022). نتایج بررسی‌های عزت و همکاران (Ezzat et al., 2019) نشان داد که ورمی‌کمپوست، فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) را که مسئول تولید ترکیبات فنلی است و در مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی نقش دارد، افزایش داد. در پژوهشی گزارش شد فعالیت آنزیم‌های POD و CAT در شرایط تنش افزایش یافت و با کاربرد متانول اثر تنش‌های القا شده از قبیل

پراکسید هیدروژن و سوپراکسید هیدروژن بر گیاه در اثر کاهش انجام تنفس نوری کاهش یافت، در واقع آنزیم روبیسکو با اکسیداسیون ریبولوز ۱ و ۵ بیس فسفات موجب افزایش تنفس نوری در گیاه می‌شود و متانول با متابولیزه‌شدن سریع به دی‌اکسیدکربن و با افزایش دی‌اکسیدکربن (CO_2) منجر به افزایش کربوکسیلاسیون و کاهش اکسیژناسیون در گیاه می‌شود (Hossinzadeh et al., 2015). به‌نظر می‌رسد این افزایش در فعالیت POD و CAT (جدول ۴ و جدول ۵) با کاهش تجمع ROS همراه بود، که نشان می‌دهد متانول ممکن است به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان برای محافظت از گیاه در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش شوری عمل کند. علاوه براین، محققان دریافتند تیمارکردن گیاهان با متانول بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز مواد محافظت‌کننده اسمزی، مانند پرولین و گلیسین بتائین را افزایش می‌دهد، که ممکن است به اثرات محافظتی متانول نیز کمک کند (Naghdi Badi et al., 2017). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی به‌دلیل کاربردهای محلول‌پاشی متانول ممکن است نشان‌دهنده کاهش تنش اکسیداتیو و از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن توسط آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باشد. پیشگیری از آسیب‌های اکسیداتیو وارد شده به سلول‌های گیاهی به-عنوان یکی از مکانیسم‌های تحمل تنش مطرح شده است و میزان این پیشگیری با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی مرتبط است.

آنزیم کاتالاز از سلول‌ها در برابر پراکسیدهیدروژن محافظت می‌کند و نقش مهمی در مقاومت در برابر استرس اکسیداتیو دارد (Khalilzadeh et al., 2020). به‌نظر می-رسد بخشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در کاربرد ورمی‌کمپوست ناشی از وجود مقادیر بالایی از آهن موجود در این کود آلی (جدول ۱) باشد ضمن آنکه متانول از طریق جذب آهن، که یک گروه پروتزی از هموپروتئین‌ها مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز است، می‌تواند در تخریب گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان نقش داشته باشد (Keles and Oncel, 2004).

جدول ۴. مقایسه میانگین تاثیر ورمی‌کمپوست و متانول بر صفات بیوشیمیایی برگ پرچم تریتیکاله تحت تنش شوری.

Table 4. Means comparison of effects of vermicompost and methanol on the biochemical traits flag leaf of triticale under salinity stress.

تیمار Treatments	پروتئین Protein	پراکسیداز POD	پلی‌فنل‌اکسیداز PPO	قندهای محلول Soluble sugars
	%	--------OD µg protein/min--------		mg.g^{-1} FW
S_1×V_1×M_1	12.28^{fg}	35.37^{l}	22.58^{n}	65.37^{g}
S_1×V_1×M_2	14.63^{abc}	39.11^{jkl}	31.44^{l}	91.04^{e}
S_1×V_1×M_3	15.19^{a}	45.77^{hi}	36.99^{ijk}	93.27^{de}
S_1×V_2×M_1	14.07^{bcd}	38.28^{kl}	28.98^{lm}	99.26^{bcd}
S_1×V_2×M_2	14.82^{ab}	43.8^{hij}	34.52^{k}	99.07^{bcd}
S_1×V_2×M_3	15.57^{a}	56.67^{g}	42.38^{g}	101.41^{bc}
S_2×V_1×M_1	10.96^{hi}	36.26^{kl}	27.90^{m}	83.38^{f}
S_2×V_1×M_2	11.44^{gh}	47.96^{h}	38.18^{ij}	98.62^{bcd}
S_2×V_1×M_3	13.32^{de}	67.64^{ef}	46.52^{ef}	99.74^{bcd}
S_2×V_2×M_1	10.40^{ij}	41.79^{ijk}	35.64^{jk}	98.82^{bcd}
S_2×V_2×M_2	12.75^{ef}	62.91^{f}	42.03^{gh}	97.76^{bcd}
S_2×V_2×M_3	13.69^{cde}	69.88^{de}	48.47^{de}	95.15^{cde}
S_3×V_1×M_1	9.65^{j}	54.11^{g}	39.04^{hi}	94.36^{de}
S_3×V_1×M_2	10.96^{hi}	74.48^{cd}	50.92^{cd}	97.91^{bcd}
S_3×V_1×M_3	11.62^{gh}	80.84^{b}	58.72^{b}	99.51^{bcd}
S_3×V_2×M_1	10.87^{hi}	66.32^{ef}	43.90^{fg}	101.87^{b}
S_3×V_2×M_2	11.72^{gh}	77.48^{bc}	53.62^{c}	109.73^{a}
S_3×V_2×M_3	13.32^{de}	93.87^{a}	74.02^{a}	113.53^{a}
LSD	*0.97*	*5.55*	*3.07*	*6.71*

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

تیمار **Treatments**	پرولین **Proline**	محتوای نسبی آب **RWC**	هدایت الکتریکی **EC**	عملکرد دانه **Grain yield**
	µg.g^{-1} FW	%	dS. m^{-1}	g per plant
S_1×V_1×M_1	0.75^{k}	71.85^{ghi}	29.60^{bc}	0.55^{ghi}
S_1×V_1×M_2	3.07^{gh}	82.69^{b-e}	25.13^{f-i}	1.47^{d}
S_1×V_1×M_3	1.61^{j}	89.26^{ab}	24.38^{ghi}	4.16^{b}
S_1×V_2×M_1	2.62^{hi}	87.77^{abc}	26.66^{d-g}	1.35^{de}
S_1×V_2×M_2	3.93^{ef}	88.55^{abc}	23.03^{i}	1.78^{c}
S_1×V_2×M_3	3.89^{f}	90.83^{a}	23.59^{hi}	5.44^{a}
S_2×V_1×M_1	2.51^{hi}	76.49^{e-h}	27.86^{cde}	0.46^{i}
S_2×V_1×M_2	4.94^{cd}	78.12^{d-g}	28.16^{b-e}	0.65^{g}
S_2×V_1×M_3	4.60^{de}	81.85^{c-f}	27.06^{def}	0.91^{f}
S_2×V_2×M_1	2.43^{hi}	68.46^{ij}	30.56^{b}	0.81^{f}
S_2×V_2×M_2	5.21^{cd}	79.91^{def}	26.20^{efg}	1.33^{e}
S_2×V_2×M_3	6.05^{b}	84.20^{a-d}	25.80^{e-h}	1.35^{de}
S_3×V_1×M_1	3.52^{fg}	62.16^{j}	33.13^{a}	0.15^{j}
S_3×V_1×M_2	2.31^{i}	76.67^{e-h}	29.03^{bcd}	0.50^{hi}
S_3×V_1×M_3	5.56^{bc}	72.54^{ghi}	28.86^{bcd}	0.60^{gh}
S_3×V_2×M_1	3.68^{fg}	77.90^{d-g}	27.96^{cde}	0.26^{j}
S_3×V_2×M_2	6.17^{b}	69.43^{hij}	28.80^{bcd}	0.60^{gh}
S_3×V_2×M_3	7.11^{a}	74.98^{f-i}	27.50^{c-f}	0.88^{f}
LSD	*0.68*	*7.34*	*2.40*	*0.12*

S_1، S_2 و S_3 به‌ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار. V_1 و V_2 به‌ترتیب بدون و با کاربرد ورمی‌کمپوست.
M_1، M_2 و M_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی متانول ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی.
میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

S_1, S_2 and S_3 are no salinity, 50 and100 mM salinity. V_1 and V_2 are without and with application of vermicompost. M_1, M_2 and M_3 are no foliar application and foliar application 15 and 30 volume of methanol. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.
Relative water content (RWC); Electrical conductivity (EC); Peroxidase (POD), Polyphenol Oxidase (PPO)

هدایت الکتریکی (EC)

نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از تاثیر معنی‌دار سطوح شوری، ورمی‌کمپوست، متانول و ترکیب تیماری آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر هدایت الکتریکی برگ پرچم تریتیکاله در زمان آبستنی بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها کم‌ترین هدایت الکتریکی (۲۳/۰۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در ترکیب تیماری ورمی-کمپوست و متانول ۱۵ درصدحجمی در شرایط عدم اعمال تنش به‌دست آمد. در واقع این ترکیب تیماری هدایت الکتریکی برگ را در مرحله آبستنی حدود ۲۹ درصد نسبت به ترکیب تیماری شاهد (عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در شرایط عدم اعمال تنش) و ۴۴ درصد نسبت به ترکیب تیماری عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار کاهش داد (جدول ۴). تنش شوری با ایجاد رادیکال‌های آزاد و تولید گونه‌های فعال اکسیژن در داخل سلول، موجب کاهش پایداری غشا و نشت مواد سیتوپلاسمی از آن شده و افزایش نسبت هدایت الکتریکی را به دنبال دارد ولی توانایی هر چه بیشتر در خنثی‌سازی رادیکال‌های اکسیژن و حفظ پایداری غشاهای سلولی، موجب حفظ و تداوم فعالیت‌های حیاتی سلول و در نهایت تولید مواد فتوسنتزی بیشتر خواهد شد (Aliyar et al., 2021). به بیان دیگر، محلول‌پاشی متانول با از بین‌بردن رادیکال‌های آزاد، می‌تواند آسیب وارد شده به ساختار سلول‌های گیاهی توسط فرآیندهای اکسیداتیو را کاهش دهد. علاوه بر آن، با کاهش

آسیب به غشا، نشت غشا نیز کاهش و گیاهان در برابر آسیب منفی ناشی از شوری زیاد حفظ می‌شوند. متانول همچنین با تاثیر بر تعادل سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی در گیاهان، تنش اکسیداتیو ناشی از سدیم‌کلرید را بهبود و موجب مقاومت بهتر گیاه در برابر تنش شوری می‌شود (Redondo-Gómez et al., 2022). همچنین به‌نظر می‌رسد محلول-پاشی متانول با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز (جدول ۴) اثرات ناشی از شوری را درگیاهان با کاهش میزان ROS تولید شده کاهش می‌دهد (Hassanpouraghdam et al., 2022). احتمالا ورمی‌کمپوست با دارا بودن هورمون‌های گیاهی از جمله جیبرلین‌ها و همچنین مقادیر زیادی مواد معدنی مانند کلسیم، در شرایط شوری می‌تواند نشت الکترولیت‌ها را کاهش داده و موجب پایداری غشاهای سلول‌های برگ شود (Aliyar et al., 2021). نتایج تحقیق کیانی و همکاران (Kiani et al., 2021) اثر مفید ورمی‌کمپوست در شرایط تنش شوری را با کاهش ROS و آسیب غشایی گیاه گندم نشان داد.

محتوای نسبی آب برگ پرچم (RWC)

نتایج جدول تجزیه واریانس نشانگر معنی‌داری اثر شوری، ورمی‌کمپوست، متانول و اثر ترکیب تیماری این سه عامل بر محتوای نسبی آب برگ پرچم تریتیکاله در زمان آبستنی بود (جدول ۳). کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال تنش از بیش‌ترین (۹۰/۸ درصد) و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در شرایط شوری ۱۰۰ میلی‌مولار از کم‌ترین (۶۲/۱ درصد) محتوای نسبی آب برخوردار بودند. به بیان دیگر کاربرد توام ورمی-کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم تنش در مقایسه با تیمار شاهد (عدم کاربرد تنش، ورمی‌کمپوست و متانول) (۲۶/۳ درصد) و در مقایسه با بالاترین سطح شوری (۱۰۰ میلی‌مولار) در شرایط عدم استفاده از ورمی‌کمپوست و متانول، ۴۶ درصد محتوای نسبی آب را افزایش داد (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد سنتز پرولین در بسیاری از گیاهان تحت تنش، یک پاسخ فیزیولوژیکی رایج است که انرژی لازم را برای رشد و بقای گیاه تامین نموده و گیاهان را از تخریب غشاها و نشت الکترولیت‌ها محافظت می‌کند. همچنین، پتانسیل آب برگ را با محافظت از غشای سلولی در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش بهبود می‌بخشد (Alshiekheid et al., 2023). متانول یک ترکیب فرار است که موقع محلول‌پاشی روی برگ به سرعت تبخیر می‌شود و نمک‌های اضافی را از دیواره‌های سلولی گیاه خارج می‌کند، بدون اینکه نیازی به فرآیند آبرسانی اساسی باشد (Dorokhov et al., 2018) و این امر ناشی از ساختار آبدوست و قطبی مولکول است که موجب جذب و حل سریع نمک‌ها می‌شود. با این کار می‌تواند با کاهش تنش ناشی از شوری، محیط مساعدتری را برای گیاه ایجاد کند. متانول علاوه بر حذف املاح، با عمل به‌عنوان یک محافظ اسمزی به گیاهان کمک می‌کند تا یکپارچگی غشای خود را حفظ کنند. این‌کار را با جذب نمک‌های محلول و جلوگیری از ورود آن‌ها به سلول‌های گیاه، موجب حفظ یکپارچگی ساختارهای غشایی سلولی و بهبود محتوای نسبی آب گیاه می‌شود (Hassanpouraghdam et al., 2022). کاربرد ورمی‌کمپوست نیز به‌طور قابل توجهی محتوای نسبی آب و پایداری غشای گیاهان را در شرایط تنش شوری بهبود می بخشد و به‌نظر می‌رسد علت می‌تواند با بهبود کیفیت خاک، ایجاد یک بافر اسید آلی در برابر نمک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک مرتبط باشد (Beyk-Khormizi et al., 2022).

محتوای قندهای محلول

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان‌دهنده معنی‌داری سطوح شوری، ورمی‌کمپوست، متانول و ترکیب تیماری این سه عامل بر محتوای قندهای محلول برگ پرچم تریتیکاله در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). با افزایش تنش شوری، محتوای قندهای محلول نیز افزایش یافت طوری‌که تیمار تلفیقی ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار از حداکثر محتوای قند محلول (۱۱۳/۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) برخوردار بود (جدول ۴). کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در بالاترین سطح شوری (۱۰۰ میلی‌مولار) محتوای قندهای محلول را ۲۰/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد کاربرد ورمی-کمپوست و متانول در همان سطح شوری افزایش داد (جدول ۴). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان موجب می‌شود یک سپر دفاعی در برابر آسیب اکسیداتیو ایجاد شود. هرچند سطوح تنش بالاتر و طولانی‌مدت، کارایی آنتی‌اکسیدان‌ها را کاهش می‌دهد. زیرا تولید ROS از تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پیشی می‌گیرد و همین امر در شرایط شوری نیز اتفاق می‌افتد که تولید بیش از حد ROS برای کربوهیدرات‌ها، لیپیدها و پروتئین سمی است (Tammam

et al., 2022). متانول یک حلال آلی است که نقش مهمی در افزایش قندهای محلول در گیاهان تحت تنش شوری دارد. این کار با تثبیت اجزای دیواره سلولی، افزایش تجمع قندها و کمک به جذب آب در گیاهان تحت تنش شوری انجام می‌شود (Dorokhov et al., 2018). نقش متانول در بهبود محتوای قند محلول گیاهان تحت تنش شوری عمدتاً به ویژگی‌های مهار رادیکال‌های آزاد توسط متانول بستگی دارد. از طرفی، متانول به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی با خنثی‌کردن رادیکال هیدروکسیل و رادیکال سوپراکسید می‌تواند تنش اکسیداتیو ایجاد شده بواسطه شوری را کاهش دهد. همچنین متانول با کاهش فعالیت میتوکندری‌ها که مسئول متابولیسم قندها هستند، موجب تجمع قندها شده (Naghdi Badi et al., 2017) و با سنتز دو مولکول سرین در گیاهان تحت تیمار، موجب افزایش گلوکز، فروکتوز و دو برابر شدن ساکارز و در نهایت افزایش عملکرد و میزان قند می‌گردد (Ramirez et al., 2006). متانول سرعت فتوسنتز خالص و غلظت CO_2 بین سلولی را افزایش داده و رشد و نمو گیاهان را با تاثیر بر حمل و نقل درون سلولی ماکرومولکول‌ها، کنترل می‌کند (Dorokhov et al., 2018). متانول توسط اکسیداز الکل به فرمالدهید و اسید فرمیک متابولیزه می‌شود که بیشتر به سرین، متیونین، پورین و تیمیدیلات تبدیل می‌شوند و CO_2 تولید شده از اکسیداسیون متانول در چرخه کالوین-بنسون برای متابولیسم گلوکز استفاده می‌شود (Dorokhov et al., 2018). از طرفی ورمی‌کمپوست منبع مهمی از موادآلی برای خاک است که به بهبود حفظ آب، و در دسترس بودن موادمغذی کمک‌کرده و با کاهش مقدار برخی از سموم و افزایش فعالیت برخی میکروارگانیسم‌های مفید در خاک می‌تواند در بهبود دسترسی به قند محلول در گیاهان تحت تنش شوری، نقش موثری داشته باشد (Tammam et al., 2023). گزارش شده است افزایش دسترسی به مواد آلی در خاک، همان‌طور که در هنگام استفاده از ورمی‌کمپوست انجام می‌شود، می‌تواند جذب آب و موادمغذی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در ریشه گیاهان تحت تنش شوری بهبود بخشد. این افزایش جذب مواد مغذی منجر به افزایش تولید انرژی و سنتز قند در سلول‌های گیاهی می‌شود که در نهایت مقادیر قندهای محلول در بافت‌های گیاه به حد زیادی افزایش می‌یابد (Makkar et al., 2023). علاوه بر این، ورمی‌کمپوست می‌تواند مقاومت گیاهان به تنش شوری را بهبود بخشد. در واقع ورمی‌کمپوست تجمع مانیتول و ترهالوز را افزایش می‌دهد که می‌تواند با حفظ تعادل اسمزی در سلول‌ها و سهولت دسترسی به آب در ریشه‌های گیاهان حتی در غلظت‌های بالای نمک، به‌عنوان یک محافظ اسمزی عمل کند (Ghassemi-Golezani and Abdoli, 2022). در پژوهشی کاربرد ورمی‌کمپوست و محرک‌های زیستی گیاهی موجب افزایش سطوح قندهای محلول، ترکیبات فنلی و پروتئین کل در اندام هوایی شد. این تیمارها فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را نیز افزایش دادند (Darakeh et al., 2022).

محتوای مالون‌دی‌آلدهید (MDA)

اثر شوری، ورمی‌کمپوست و متانول در سطح احتمال یک درصد بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم معنی‌دار بود (جدول ۳). محتوای مالون‌دی‌آلدهید در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، متانول ۳۰ درصد حجمی و کاربرد ورمی‌کمپوست به‌ترتیب برابر با ۰/۱۰۵، ۰/۰۷۷ و ۰/۰۸۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ بود، لذا شوری ۱۰۰ میلی‌مولار حدود ۴۰ درصد محتوای مالون‌دی‌آلدهید را در مقایسه با عدم تنش شوری، افزایش داد و محلول‌پاشی ۳۰ درصد حجمی متانول حدود ۴۰ درصد و کاربرد ورمی‌کمپوست ۹ درصد محتوای MDA را نسبت به سطح شاهد فاکتورهای مورد بررسی کاهش داد (جدول ۵). در واقع، حداکثر محتوای مالون‌دی‌آلدهید به همان ترکیبات تیماری تعلق داشت که میزان هدایت الکتریکی حداکثر بود (جدول ۴). افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید به‌واسطه وجود تنش اکسیداتیو یک واکنش رایج به تنش‌های محیطی است و زیادی محتوای مالون‌دی‌آلدهید، پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای سلولی و ناپایداری اندامک‌های سلولی را نشان می‌دهد (Yousefi et al., 2022; Alamer et al., 2022).

با توجه به اینکه ورمی‌کمپوست دارای برخی عناصر درشت و ریز مغذی ضروری، اسیدهای هیومیک و فولویک، همچنین اسیدهای آمینه آزاد است که رشد گیاه و مکانیسم‌های دفاعی طبیعی آن را در هر شرایطی تحریک می‌کند (Beyk-Khormizi et al., 2022)، از این‌رو کاربرد خاکی ورمی‌کمپوست نقش کلیدی در حفظ سطوح کاهش‌یافته مالون‌دی‌آلدهید (MDA) در گیاهان دارد. نتایج تحقیق سرخی (Sorkhi, 2021) بیانگر کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدهید در اثر کاربرد ورمی‌کمپوست در گیاه گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) بود و اظهار داشت که وجود

باکتری‌های مفید مانند آزوسپیریلوم، باسیلوس، تریکودرما و سودوموناس در ورمی‌کمپوست می‌تواند با تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاهان، پروفایل‌های آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را توسعه داده،/ در نتیجه تجمع MDA را در گیاه کاهش دهد.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر اصلی سطوح شوری، ورمی‌کمپوست و متانول بر پراکسیدهیدروژن، مالون‌دی‌الدهید و کاتالاز برگ پرچم تریتیکاله.

Table 5. Mean comparison of the main effect of salinity, vermicompost and methanol levels on hydrogen peroxide, malondialdehyde and catalase in triticale flag leaves.

تیمار Treatments		پراکسیدهیدروژن H_2O_2	مالون‌دی‌آلدهید MDA	کاتالاز CAT
		----------µmol.g FW^{-1}----------		OD µg protein/min
سطوح شوری Salinity Levels	S_1	0.019^{c}	0.075^{b}	54.59^{c}
	S^2	0.040^{b}	0.096^{a}	66.02^{b}
	S_3	0.056 ^{a}	0.105^{a}	80.71^{a}
	LSD	*0.008*	*0.009*	*5.96*
سطوح متانول Methanol Levels	M_1	0.045^{a}	0.108^{a}	56.67^{b}
	M_2	0.040^{a}	0.092^{b}	70.08^{a}
	M_3	0.029^{b}	0.077^{c}	74.57^{a}
	LSD	*0.008*	*0.009*	*5.96*
ورمی‌کمپوست vermicompost	V_1	0.042^{a}	0.096^{a}	-
	V_2	0.035^{b}	0.088^{b}	-
	LSD	*0.006*	*0.007*	-

S_1، S_2 و S_3 به‌ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار. V_1 و V_2 به‌ترتیب بدون و با کاربرد ورمی‌کمپوست؛ M_1، M_2 و M_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی متانول ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

S_1, S_2 and S_3 are no salinity, 50 and100 mM salinity. V_1 and V_2 are without and with application of vermicompost. M_1, M_2 and M_3 are no foliar application and foliar application 15 and 30 volume of methanol.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

Hydrogen peroxide (H_2O_2); Malondialdehyde content (MDA) and Catalase (CAT).

محتوای پراکسیدهیدروژن (H_2O_2)

براساس جدول تجزیه واریانس اثر سطوح شوری و متانول در سطح احتمال یک درصد و اثر ورمی‌کمپوست در سطح پنج درصد بر محتوای پراکسید هیدروژن معنی‌دار شد (جدول ۳). به‌نظر می‌رسد محتوای پراکسید هیدروژن با مقدار تنش رابطه مستقیم دارد طوری‌که با افزایش تنش شوری، میزان H_2O_2 افزایش یافت و در اثر کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول، از میزان آن کاسته شد. میزان پراکسید هیدروژن در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی به‌ترتیب برابر با ۰/۰۵۶، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۲۹ میکرومول بر گرم وزن تر برگ بود (جدول ۵). شوری موجب تولید بیش از حد ROS مانند پراکسید هیدروژن، سوپر اکسید و اکسیژن منفرد می‌شود که موجب واکنش‌های فیتوتوکسیک مانند پراکسیداسیون لیپیدی می‌شود (Alamer et al., 2022). پراکسید هیدروژن محصول متابولیسم سلول‌ها است و به مقدار زیاد در کلروپلاست، میتوکندری و پراکسی‌زوم‌ها تولید می‌شود. در گیاهان، افزایش تجمع پراکسید هیدروژن ضمن آسیب اکسیداتیو، منجر به مرگ سلولی می‌شود (Alamer et al., 2022). به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی با کاهش سرعت تولید، حذف آن از سلول، یا انتقال آن به مولکول‌های گلیسرول به‌منظور ذخیره ایمن در سلول، در برابر تجمع H_2O_2 عمل می‌کند. به این ترتیب میزان H_2O_2 درون سلول در حد مطلوب نگه داشته می‌شود و گیاه حتی در شرایط تنش‌زا نیز می‌تواند به‌طور طبیعی رشد و نمو کنند. علاوه بر این، محلول‌پاشی متانول می‌تواند به محافظت از سلول در برابر آسیب‌های ناشی از عوامل غیرزیستی کمک‌کرده (Vojodi Mehrabani, 2019) و به القای فعالیت آنتی-اکسیدانی مانند دهیدروآسکوربات ردوکتاز، پراکسیداز و گلوتاردوکسین و افزایش فعالیت POD و کاهش سریع تجمع H_2O_2 در برگ‌ها کمک کند (Zhao et al., 2014). احتمالا ورمی‌کمپوست نیز می‌تواند H_2O_2 را در گیاهان با اتصال به ROS و کاهش دسترسی آن‌ها کاهش دهد و علت این امر

به افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید و انواع آنزیم‌ها، اسیدهای هیومیک و ویتامین‌هایی که سلامت گیاه را ارتقا می‌دهند، نسبت داده شده است (Ashour et al., 2023). در این راستا الحربی و همکاران (Alharbi et al., 2023) اظهار داشتند ورمی‌کمپوست حاوی انواع میکروارگانیسم‌های مفید، مانند اکتینومیست‌ها و قارچ‌ها است که توانایی جذب و تجزیه مولکول‌های H_2O_2 را دارند که در ماتریکس سلولی گیاه تجمع یافته و این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند گونه‌های فعال اکسیژن مانند رادیکال‌های آزاد را که برای گیاهان مضر هستند، از بین ببرند.

محتوای پرولین

شوری، ورمی‌کمپوست، متانول و اثر سه‌گانه آن‌ها بر میزان محتوای پرولین برگ پرچم تریتیکاله در دوره گلدهی معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد حداقل و حداکثر محتوای پرولین (به‌ترتیب ۰/۷۵ و ۷/۱۱ میکروگرم برگرم وزن تر) مربوط به تیمار تلفیقی عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در شرایط عدم اعمال شوری و تیمار تلفیقی ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار می‌باشد (جدول ۴). تیمار تلفیقی ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال تنش نسبت به تیمار تلفیقی عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در بالاترین سطح شوری (۱۰۰ میلی‌مولار) و تیمار شاهد (عدم کاربرد هر سه عامل) ۱۰/۵ تا ۴۱۸/۶ درصدی محتوای پرولین برگ‌های تریتیکاله را افزایش داد (جدول ۴). پرولین از آنتی‌اکسیدان‌های مهم در سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاهان هستند. با بسیاری از گونه‌های فعال اکسیژن مانند H_2O_2، $O_2^{\bullet-}$، OH^- و هیدروپراکسیدازهای مایع واکنش می‌دهد. همچنین پرولین سنتز شده در شرایط تنش اکسیداتیو ناشی از شوری، در سایر فعالیت‌های بیولوژیکی گیاه از جمله فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، کوفاکتور آنزیمی و به‌عنوان یک دهنده/گیرنده در انتقال الکترون در غشای پلاسمایی یا کلروپلاست مشارکت دارد (Ezzat et al., 2019). لذا، پرولین نقش مهمی در محافظت از سلول‌های گیاهی در برابر آسیب‌های ناشی از تنش اسمزی، که جزء اصلی تنش شوری است، ایفا می‌کند. متانول در بهبود میزان پرولین که یک اسیدآمینه غیر ضروری تحت تنش شوری است، نقش دارد. اسیدهای آمینه تحت تنش شوری دو هدف مشخص را انجام می‌دهند: اولین مورد استفاده به‌عنوان یک محافظ اسمزی است که شامل افزایش اسمولاریته فضاهای داخل سلولی می‌شود که به جلوگیری از تورم و در نهایت ترکیدن محتویات سلول به‌دلیل هجوم آب به داخل سلول کمک می‌کند. دومی به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی استفاده می‌شود (Singh et al., 2022). پرولین این نقش را در متابولیسم سلولی ایفا می‌کند و اجازه می‌دهد میزان آبی که در طول دوره‌های محدودیت آب یا تنش اسمزی به سلول وارد شده تنظیم شود (Kiani et al., 2021). در پژوهشی در اثر کاربرد متانول محتوای پرولین برگ سیاه دانه (*Nigella Sativa*) در شرایط تنش به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. محققین در این راستا اظهار داشتند متانول با تولید یک محیط اسیدی و افزایش فعالیت ۵-کربوکسیلات سنتتاز، محتوای پرولین در برگ‌ها را افزایش می‌دهد (Soltanieh et al., 2023). متانول محلول‌پاشی شده بر روی برگ توسط آنزیم متانول اکسیداز و با از دست دادن دو یون هیدروژن ($2H^+$) تبدیل به فرمات (متانوئیک اسید) می‌شود. فرمات در مرحله بعد توسط آنزیم فرمات دهیدروژناز تبدیل به CO_2 و H^+ می‌شود (Nonomura et al., 1992). متانول با کمک به تثبیت مولکول‌های پرولین در سلول‌های گیاهی موجب کاهش اثرات تنش شوری بر سلول‌ها شده و این اثر تثبیت‌کننده متانول در طیف وسیعی از گیاهان از جمله برنج، ذرت، گندم و آرابیدوپسیس تالیانا (*Arabidopsis thaliana*) اثبات شده است. متانول در تعدیل اثرات منفی تنش اسمزی روی گیاهان پررنگ‌تر از سایر ترکیبات است و با حفظ پایداری اسیدآمینه پرولین، موجب افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش شوری می‌شود (Valizadeh-Kamran et al., 2019).

هنگامی که گیاهان در معرض تنش شوری قرار می‌گیرند، هورمون‌هایی مانند اسید آبسیزیک (ABA) ترشح می‌کنند که منجر به کاهش سنتز پرولین به‌عنوان یک اسیدآمینه ضروری می‌شود. این عدم تعادل بین پرولین و ABA در گیاهان می‌تواند وضعیت تعادل اکسیداتیو آن‌ها را تغییر و منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدی شود. لذا استفاده از ورمی‌کمپوست در گیاهان به حفظ سطوح نرمال پرولین و ABA کمک می‌کند. این را می‌توان به وجود ریزمغذی‌هایی مانند روی، آهن، مس، منگنز و منیزیم در ورمی‌کمپوست نسبت داد (Beyk-Khormizi et al., 2022) که در نهایت موجب افزایش توانایی گیاهان به تحمل تنش شوری می‌شود (Tammam et al., 2022; Rehman et al., 2023).

محتوای پروتئین

اثر سه‌جانبه شوری، ورمی‌کمپوست و متانول بر محتوای پروتئین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال شوری از بیش‌ترین محتوای پروتئین برگی (۱۵/۵۷ درصد) برخوردار بود. همین‌طور کاربرد ورمی-کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در همان شرایط شوری افزایش ۳۸ درصدی محتوای پروتئین برگی را نشان داد (جدول ۴). شوری می‌تواند به‌دلیل عدم تعادل اسمزی سنتز پروتئین گیاهی را محدود کند، اما ورمی-کمپوست حاوی سطوح بالاتری از عناصر درشت و ریز مغذی است (جدول ۱) که با فراهم‌کردن مواد آلی اضافی به خاک، ظرفیت بافری بیشتری در برابر تنش شوری ایجاد می‌کند و موجب بهبود سلامت گیاه و سنتز پروتئین بیشتر حتی در شرایط تنش‌زا می‌شود (Tammam et al., 2022). همچنین اسیدهای هیومیک و فولویک موجود در ورمی‌کمپوست به-دلیل کاهش جذب یون‌های سدیم از خاک موجب کاهش میزان سدیم در بافت گیاهی شده و مقاومت گیاه را به تنش شوری بالا می‌برد. بنابراین، محتوای غذایی بالای ورمی-کمپوست ممکن است موجب سنتز پروتئین‌های دخیل در تنش اسمزی و دفاع آنتی‌اکسیدانی شود. این افزایش سنتز پروتئین‌های محافظ ممکن است به تعدیل اثرات تنش شوری و بهبود محتوای پروتئین‌ها کمک کند (Phooi et al., 2022). ورمی‌کمپوست با کاهش غلظت الکترولیت‌ها در برگ گیاه گوجه‌فرنگی موجب افزایش محتوای پروتئین و اسیدآمینه پرولین شد که نشان‌دهنده کارایی ورمی‌کمپوست در تعدیل اثرات مضر تنش شوری بر گیاهان است (Bziouech et al., 2022).

به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی متانول نیز با افزایش باکتری-های متیلوتروفیک موجب افزایش تولید هورمون اکسین و سیتوکینین در گیاه می‌شود که این هورمون‌ها در افزایش پروتئین‌سازی در گیاهان نقش بسزایی دارند (Ivanova et al., 2001)، بنابراین متانول با تحریک سنتز مداوم پروتئین محلول در برگ‌ها، موجب تاخیر در پیری برگ و افزایش فتوسنتز و عملکرد می‌شود (Soltanieh et al., 2023).

عملکرد دانه

جدول تجزیه واریانس نشانگر اثر معنی‌دار شوری، ورمی-کمپوست، متانول و برهم‌کنش توأم هر سه عامل بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). به‌نظر می-رسد کاهش عملکرد گیاه با افزایش سطح تنش با عدم توانایی گیاه در دریافت مواد غذایی و آب و حتی عقیمی تعدادی از بوته‌ها مرتبط باشد، اما با کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول به-دلیل فراهمی بهتر عناصر غذایی و در نتیجه بهبود فرایند فتوسنتزی، عملکرد دانه افزایش یافت. بیش‌ترین عملکرد دانه در کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال تنش و کم‌ترین آن در شرایط عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول در بالاترین سطح شوری (۱۰۰ میلی‌مولار) حاصل شد (جدول ۴). اثر مفید ورمی-کمپوست بر ویژگی‌های رشد و عملکرد ممکن است با بهبود شرایط خاکی و ظرفیت نگهداری آب در خاک، و تامین مطلوب گیاه با آب و مواد مغذی مرتبط باشد که به نوبه خود با افزایش تولید زیست توده گیاهی، در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه می‌گردد (Joshi et al., 2015). بخشی از کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش شوری می‌تواند ناشی از اثر شوری در افزایش هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی-آلدهید و کاهش محتوای نسبی آب مرتبط باشد (جدول ۴) که با کاهش پایداری غشای سلولی و آسیب به دیواره سلولی در ارتباط است. در این راستا آلشیخید و همکاران (Alshiekheid et al., 2023) دلیل کاهش عملکرد دانه برنج در شرایط تنش شوری را به کاهش پایداری غشای سلولی، آسیب دیواره سلولی، تخریب سیتوپلاسمی، پلاسمولیز، آسیب شبکه آندوپلاسمی، تجمع مالات، سیترات و اینوزیتول در برگ و افزایش غلظت پرولین نسبت دادند که در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود. ولی به‌نظر می‌رسد بخشی از بهبود عملکرد دانه در کاربرد ورمی‌کمپوست ناشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول) (جدول ۴) و کاهش محتوای پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید (جدول ۵) باشد که در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد (Mohammadi Kale Sarlou et al., 2022). همچنین ورمی‌کمپوست با افزایش سنتز پرولین به گیاهان کمک می‌کند با تنش شوری مقابله کنند و بقا و بهره-وری گیاه را افزایش و به بهبود عملکرد در شرایط شوری

کمک می‌کند (Tammam et al., 2022; Rehman et al., 2023).

از طرفی افزایش غلظت متانول در بافت‌های گیاهی بر بازده تبدیل کربن و نیز مسیرهای متابولیکی اثرگذار بوده (Atarodi Asl and Khalilvand Behrouzyar, 2020) و تاثیر این محلول‌پاشی متانول به‌خصوص در گیاهان سه کربنه بواسطه کاربرد متانول به‌عنوان یک منبع کربنی، به افزایش ظرفیت فتوسنتزی آن‌ها منجر می‌شود (Mirakhori et al., 2009). زیرا متانول به‌عنوان یک منبع کربن به آسانی از طریق لیپیدهای موجود در غشا عبور و به سرعت وارد بافت-های گیاهی می‌شود و با تاثیر بر متابولیسم کربنی گیاه، رشد و عملکرد گیاهان را افزایش می‌دهد (Soltanieh et al., 2023). در این راستا برخی پژوهش‌گران علت افزایش عملکرد دانه برنج در اثر محلول‌پاشی بوته‌ها با متانول را، به وجود باکتری‌های متیلوتروفیک در بافت‌های گیاه (برگ‌ها) نسبت دادند، زیرا گونه‌های باکتریایی جنس متیلوباکتریوم (Mehtylobatrerium) می‌توانند به مصرف مقداری متانول روی برگ‌ها و القای رشد گیاه از طریق تولید اکسین و سیتوکینین برای رشد و عملکرد بهتر گیاهان کمک کنند (Abbasian et al., 2016).

همبستگی بین صفات

ارزیابی ضریب همبستگی ساده (پیرسون) نشانگر ارتباط مثبت و منفی بین صفات بررسی‌شده است. نتایج نشان داد عملکرد دانه با میزان پروتئین برگ (r= ۰/۷۱) و محتوای نسبی آب برگ (r = ۰/۶۳) همبستگی مثبت معنی‌دار و با میزان پراکسیدهیدروژن (r=-۰/۷۱) و هدایت الکتریکی (r=-۰/۴۹) همبستگی منفی معنی‌داری داشت. طوری که در هر ترکیب تیماری که میزان پراکسید هیدروژن و هدایت الکتریکی بالا بود در آن ترکیبات تیماری عملکرد دانه حداقل بود. بین پروتئین و محتوای نسبی آب (r= ۰/۷۹) همبستگی مثبت معنی‌دار و پروتئین با پراکسیدهیدروژن (r=-۰/۷۷) و هدایت الکتریکی (r=-۰/۵۳) همبستگی منفی معنی‌دار وجود دارد. قند محلول بالاترین همبستگی مثبت را با میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (r=۰/۶۹) نشان داد (جدول ۶).

جدول ۶. ضریب همبستگی ساده بین صفات مورد مطالعه

Table 6. Simple correlation coefficient amoung studied traits

		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	پروتئین **Protein**	0.71**	-0.53**	0.79**	-0.07	-0.77**	0.01	0.05	-0.08	-0.20	-0.15	1
2	پراکسیداز **POD**	-0.16	0.03	-0.18	0.69**	0.36**	0.71**	0.59**	0.94**	0.81**	1	
3	کاتالاز **CAT**	0.19	0.08	-0.28*	0.62**	-0.33*	0.65**	0.51**	0.82**	1		
4	پلی‌فنل‌اکسیداز **PPO**	-0.09	0.05	-0.18	0.72**	0.31*	0.76**	0.69**	1			
5	قندهای محلول **Soluble sugars**	0.07	-0.8	0.05	0.56**	0.11	0.68**	1				
6	پرولین **Proline**	-0.13	-0.00	-0.08	0.58**	0.17	1					
7	پراکسیدهیدروژن **H_2O_2**	-0.71**	0.38**	-0.72**	0.24	1						
8	مالون دی‌آلدهید **MDA**	-0.05	0.13	-0.17	1							
9	محتوای نسبی آب **RWC**	0.63**	-0.63	1								
10	هدایت الکتریکی **EC**	-0.49**	1									
11	عملکرد دانه **Grain yield**	1										

* و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and ** are non-significant, significant at p≤0.05 and p≤0.01, respectively.

Relative water content (RWC); Electrical conductivity (EC); Catalase (CAT), Peroxidase (POD), Polyphenol Oxidase (PPO); Hydrogen peroxide (H2O2) and Malondialdehyde content (MDA)

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد شوری با ایجاد اختلال در سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدان از جمله فعالیت آنزیم‌ها، پرولین، پروتئین کل، قندهای محلول، تخریب دیواره سلولی و افزایش نشت الکترولیت‌ها، موجب افزایش پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید شده و عملکرد دانه را کاهش داد. اما کاربرد ورمی‌کمپوست و متانول با ایجاد شرایط رشدی مناسب برای گیاه، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ، بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل آکسیداز)، محتوای اسمولیت سازگار (پرولین و قندهای محلول) و در نهایت عملکرد دانه شد. به استناد این نتایج به‌نظر می‌رسد متانول و ورمی‌کمپوست می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای تعدیل بخشی از کاهش عملکرد تریتیکاله در شرایط شوری استفاده شود.

منابع

Abbasian, A., Mirshekari, B., Safarzade Vishekaei, M.N., Rashidi, V., Aminpanah, H., 2016. Effects of the foliar application of methanol on the yield and growth of rice (*Oryza sativa* cv. Shiroudi). Ciencia e investigación agrarian. 43, 17-24. https://doi.org/10.4067/S0718-16202016000100002

Ahmad, A., Aslam, Z., Hussain, S., Bibi, A., Khaliq, A., Javed, T., Hussain, S., Alotaibi, S.S., Kalaji, H.M., Telesinski, A., Boonthai Iwai, C., Kumar, U., 2022. Rice straw vermicompost enriched with cellulolytic microbes ameliorate the negative effect of drought in wheat through modulating the morpho-physiological attributes. Frontiers in Environmental Science. 10, 902999. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.902999

Alamer, K.H., Perveen, S., Khaliq, A., Zia Ul Haq, M., Ibrahim, M.U., Ijaz, B., 2022. Mitigation of salinity stress in maize seedlings by the application of vermicompost and sorghum water extracts. Plants. 11, 2548. https://doi.org/10.3390/plants11192548

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., Karanov, E., 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. Plant, Cell and Environment. 24, 1337-1344. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x

Alharbi, K., Hafez, E.M., Omara, A.E. D., Osman, H.S., 2023. Mitigating osmotic stress and enhancing developmental productivity processes in cotton through integrative use of vermicompost and cyanobacteria. Plants. 12, 1872. https://doi.org/10.3390/plants12091872

Aliyar, S., Aliasgharzad, N., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., Ostan, S., 2021. The effect of vermicompost application on growth and water relationships of Quinoa plant under salinity stress conditions. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 31, 131-147. [In Persian with English summary].

Alshiekheid, M.A., Dwiningsih, Y., Alkahtani, J., 2023. Analysis of morphological, physiological, and biochemical traits of salt stress tolerance in Asian rice cultivars at different stages. Preprints.org, 1-19. https://doi.org/10.20944/preprints202303.0251.v1

Ashour, H.A., Heider, S.M., Soliman, M.M., 2023. Morphological and physiological responses of Calliandra haematocephala to water salinity stress and vermicompost. Ornamental Horticulture. 29, 150-162. https://doi.org/10.1590/2447-536X.v29i2.2555

Atarodi Asl, E., Khalilvand Behrouzyar, E., 2020. Effect of methanol and salicylic acid foliar application on some of physiological traits of winter wheat under limited irrigation. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 815-827. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2199.1549

Bates, L.S., Waldren, R.A., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Behrouzyar, E.K., Yarnia, M., 2016. Effects of methanol foliar application on nutrient content and RWC of sugar beet under water deficit stress. Bangladesh Journal of Botany. 45, 1069-1074.

Beyk-Khormizi, A., Hosseini Sarghein, S., Sarafraz-Ardakani, M.R., Moshtaghioun, S.M., Mousavi-Kouhi, S.M., Ganjeali, A., 2022. Ameliorating effect of vermicompost on *Foeniculum vulgare* under saline condition. Journal of Plant Nutrition.46, 1601-1615.

https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2092513

Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry. 72, 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Bziouech, S.A., Dhen, N., Helaoui, S., Ammar, I.B., Dridi, B.A. M., 2022. Effect of vermicompost soil additive on growth performance, physiological and biochemical responses of tomato plants (S*olanum lycopersicum* L. var. Firenze) to salt stress. Emirates Journal of Food and Agriculture. 34, 316-328. https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i4.2844

Darakeh, S.A.S.S., Weisany, W., Tahir, N.A.R., Schenk, P.M., 2022. Physiological and biochemical responses of black cumin to vermicompost and plant biostimulants: Arbuscular mycorrhizal and plant growth-promoting rhizobacteria. Industrial Crops and Products. 188, 115557. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115557

Dorokhov, Y.L., Sheshukova, E.V., Komarova, T.V., 2018. Methanol in plant life. Frontiers in Plant Science. 9, 1-16. https://doi.org/10.15835/nsb13210949

Dubios, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Roberts, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry. 28, 350-356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017

Ezzat, A.S., Badway, A.S., Abdelkader, A.E., 2019. Sequenced vermicompost, glycine betaine, proline treatments elevate salinity tolerance in potatoes. Middle East Journal of Agriculture Research. 8, 126-138.

Ghassemi-Golezani, K., Abdoli, S., 2022. Physiological and biochemical responses of medicinal plants to salt stress. In Environmental Challenges and Medicinal Plants: Sustainable Production Solutions under Adverse Conditions. Springer International Publishing. 153-181p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92050-0_6

Golebiowska-Paluch, G., Dyda, M., 2023. The genome regions associated with abiotic and biotic stress tolerance, as well as other important breeding traits in triticale. Plants. 12, 619. https://doi.org/10.3390/plants12030619

Hassanpouraghdam, M.B., Mehrabani, L.V., Rahvar, M.R., Khoshmaram, L., Soltanbeigi, A., 2022. Mollifying salt depression on Anethum graveolens L. by the foliar prescription of Nano-Zn, KNO_3, Methanol, and Graphene Oxide. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 22, 2000-2012. [In Persian with English summary].

Hossinzadeh, S.R., Salimi, A., Ganjeali, A., Ahmadpour, R., 2015. Effects of foliar application of methanol on biochemical characteristics and antioxidant enzyme activity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. Iranian Journal of Plant Physiology and Biochemistry. 1, 17-30. [In Persian with English summary].

Ivanova, E.G., Dornina, N.V and Trotsenko, Y.A., 2001. Aerobic methylobacteria are capable of synthesizing auxins. Journal of Microbiology. 70, 392-397. https://doi.org/10.1023/A:1010469708107

Joshi, R., Singh, J., Vig, A.P., 2015. Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: effect on growth, yield and quality of plants. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 14, 137-159. https://doi.org/10.1007/s11157-014-9347-1

Keles, Y., Öncel, I., 2004. Growth and solute composition in two wheat species experiencing combined influence of stress conditions. Russian Journal of Plant Physiology. 51, 203-209. https://doi.org/10.1023/B:RUPP.0000019215.20500.6e

Khalilzadeh, R., Seyd Sharifi, R., Pirzad, A., 2020. Mitigation of drought stress in pot marigold (*Calendula officinalis*) plant by foliar application of methanol. Journal of Plant Physiology and Breeding. 10, 71-84. [In Persian with English summary].

Kiani, R., Arzani, A., Mirmohammady Maibody, S.A.M., 2021. Polyphenols, flavonoids, and antioxidant activity involved in salt tolerance in wheat, *Aegilops cylindrica* and their amphidiploids. Frontiers in plant science. 12, 646221. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646221

Kostopoulou, P., Barbayiannis, N., Noitsakis, B., 2010. Water relations of yellow sweetclover under the synergy of drought and selenium addition. Plant and Soil. 330, 65-71. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0176-x

Lahbouki, S., Anli, M., El Gabardi, S., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Boutasknit, A.,

Ati-Rahou, Y., Outzaourhit, A., Wahbi, S., Douira, A., Meddich, A., 2022. Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost supplementation on growth, phenolic content and antioxidant activity of prickly pear cactus (*Opuntia ficus*-indica). Plant Biosystems-An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology. 156, 882-892. https://doi.org/10.1080/11263504.2021.1947408

Liu, Y., Cao, X., Yue, L., Wang, C., Tao, M., Wang, Z., Xing, B., 2022. Foliar-applied cerium oxide nanomaterials improve maize yield under salinity stress: Reactive oxygen species homeostasis and rhizobacteria regulation. Environmental Pollution. 299P, 118900. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118900

Makkar, C., Singh, J., Parkash, C., Singh, S., Vig, A. P., Dhaliwal, S.S., 2023. Vermicompost acts as bio-modulator for plants under stress and non-stress conditions. Environment, Development and Sustainability. 25, 2006-2057. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02132-w

Mirakhori, M., Paknejad, F., Moradi, M., Ardakani, M.R., Zahedi, H., Nazeri, P., 2009. Effect of drought stress and methanol on yield and yield components of *Soybean Max* L. American Journal of Biochemistry and Biotechnology. 5, 162-169. [In Persian with English summary].

Mohammadi Kalesar Lou, S., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., 2022. Effects of flavobacterim, vermicompost and humic acid on antioxidant enzymes activity and some biochemical traits of triticale under soil salinity conditions. Journal of Crop Production. 15, 183-202. [In Persian with English summary].

Mushtaq, Z., Faizan, S., Gulzar, B., 2020. Salt stress, its impacts on plants and the strategies plants are employing against it: A review. Journal of Applied Biology and Biotechnology. 8, 81-91. https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80315

Naboulsi, I., Ben Mrid, R., Ennoury, A., Zouaoui, Z., Nhiri, M., Ben Bakrim, W., Yasri, A., Aboulmouhajir, A., 2022. Crataegus oxyacantha extract as a biostimulant to enhance tolerance to salinity in tomato plants. Plants. 11, 1283. https://doi.org/10.3390/plants11101283

Naghdi Badi, H.A., Tolyat Abulhassani, S.M., Nazari, M., Mehrafarin, A., 2017. Phytochemical Response of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) to Application of Methanol Biostimulant and Iron Nano-chelate. Journal of Medicinal Plants. 16, 91-106. [In Persian with English summary].

Narimani, H., Seyed Sharifi, R., 2023. Effect of mycorrhiza and methanol on grain filling components, dry matter remobilization and yield of barley under soil salinity conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 16, 383-401. [In Persian with English summary].

Nonomura, A.M., Benson, A.A., 1992. The path of carbon in photosynthesis: improved crop yields with methanol. Proceedings of the National Academy of Sciences. 89, 9794-9798. https://doi.org/10.1073/pnas.89.20.9794

Phooi, C.L., Azman, E.A., Ismail, R., 2022. Do it yourself: Humic acid. Pertanika Journal of Tropicle Agricultural Science. 45, 547-564. https://doi.org/10.47836/pjtas.45.3.01

Ramirez, I.F., Dorta, V., Espinoza, E., Jimenez, A., Mercado, H., 2006. Effects of foliar and root applications of methanol on the growth of Arabidopsis, tobacco and tomato plants. Journal of Plant Growth Regulation. 25, 30- 44. https://doi.org/10.1007/s00344-005-0027-9

Redondo-Gómez, S., Romano-Rodríguez, E., Mesa-Marín, J., Sola-Elías, C., Mateos-Naranjo, E., 2022. Consortia of plant-growth-promoting rhizobacteria isolated from halophytes improve the response of Swiss chard to soil salinization. Agronomy. 12, 468. https://doi.org/10.3390/agronomy11081609

Rehman, S.U., De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., Fanizzi, F.P., 2023. Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. Agronomy. 13, 1134.

Sahab, S., Suhani, I., Srivastava, V., Chauhan, P.S., Singh, R.P., Prasad, V., 2021. Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: Current status and management strategies. Science of the Total Environment. 764, 144164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144164

Saneinejad, A.A., Tohidi, M., Habibi Khaniani, B., Sadeghi, M., Khoramian, M., 2019. The effect of methanol foliar application on some physiological traits of cowpea bean (*Vigna unguiculata* L.) under drought stress

conditions. Journal of Agronomy and Plant Breeding. 15, 45-61 [In Persian with English summary].

Singh, P., Kumar, V., Sharma, J., Saini, S., Sharma, P., Kumar, S., Sinhmar, Y., Kumar, D., Sharma, A., 2022. Silicon supplementation alleviates the salinity stress in wheat plants by enhancing the plant water status, photosynthetic pigments, proline content and antioxidant enzyme activities. Plants. 11, 2525. https://doi.org/10.3390/plants11192525

Soltanieh, M., Talei, D., Nejatkhah, P., 2023. Performance reaction and biochemical properties of black cumin under the influence of different regimes of nitrogen, methanol and deought stress. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 71, 15-33.

Sorkhi, F., 2021. Effect of vermicompost fertilizer on antioxidant enzymes and chlorophyll contents in Borago officinalis under salinity stress. Iranian Journal of Plant Physiology. 11, 3589-3598. [In Persian with English summary].

Stewart, R.R., Bewley, J.D., 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology. 65, 245-248. https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245

Sudhakar, C., Lakshmi, A., Giridarakumar, S., 2001. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. Plant Science. 161, 613-619. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00450-2

Tammam, A.A., Shehata, M.R.A.M., Pessarakli, M., El-Aggan, W.H., 2022. Vermicompost and its role in alleviation of salt tress in plants–II. Impact of vermicompost on the physiological responses of salt-stressed plants. Journal of Plant Nutrition. 45, 1-21. https://doi.org/10.1007/s11738-022-03481-9

Vahabzadeh, M., Ghodsi, M., Vahabzadeh, M., Nazeri, M., Khodarahmi, M., Ghasemi, M., Kohkan, S.A. Tajalli, H., 2013. Sanabad, A new triticale cultivar suitable for temperate and cold-temperate regions of Iran. Research Achievements for Field and Horticulture Crops. 2, 143-153 [In Persian with English summary].

Valizadeh-Kamran, R., Vojodi Mehrabani, L., Pessarakli, M., 2019. Effects of foliar application of methanol on some physiological characteristics of *Lavandula stoechas* L. under NaCl salinity conditions. Journal of Plant Nutrition. 42, 261-268. https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554677

Vojodi Mehrabani, L., 2019. The effects of methanol and ethanol foliar application under salinity stress on some physiological characteristics of *Pelargonium graveolens* L. Journal of Plant Physiology and Breeding. 9, 63-73.

Yasin, N.A., Akram, W., Khan, W.U., Ahmad, S.R., Ahmad, A., Ali, A., 2018. Halotolerant plant-growth promoting rhizobacteria modulate gene expression and osmolyte production to improve salinity tolerance and growth in *Capsicum annum* L. Environmental Science and Pollution Research, 25, 23236-23250. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2381-8

Yousefi, K., Jamei, R., Darvishzadeh, R., 2022. Study of some physiological and biochemical parameters of Okra plant (*Abelmoschus esculentus* L.) under salt stress in the presence of chitosan nanoparticles. Iranian Journal of Plant Biology. 14, 17-38. [In Persian with English summary].

Zhao, Y., Zeng, Z.D., Qi, C.J., Yu, X.S., Guo, C.L., Chen, Q., Chen, L.M., 2014. Deciphering the molecular responses to methanol-enhanced photosynthesis and stomatal conductance in broad bean. Acta Physiologiae Plantarum. 36, 2883-2896. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1658-x