

Original article

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

Khadijeh Sourazar^{1*}, Raouf Seyed Sharifi²

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; Revised 30 August 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, H₂O₂, EC, RWC and grain yield were investigated. Electrical conductivity (EC) values were measured using an 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

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

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

بررسی کاربرد ورمی کمپوست و محلول پاشی متانول بر فعالیت آنٹی اکسیدان برگ، اسمولیت-های سازگار و برخی صفات تربیتکاله تحت تنش شوری

خدیجه صورآذر^{۱*}، رئوف سیدشریفی^۲

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	چکیده
واژه‌های کلیدی: پراکسید هیدروژن پروتئین عملکرد دانه قند محلول کاتالاز	به منظور بررسی تأثیر شوری، ورمی کمپوست و متانول بر فعالیت آنزیم‌های آنٹی اکسیدان، اسمولیت‌های سازگار و برخی صفات تربیتکاله، آزمایشی به صورت 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 به عنوان شاهد، شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار از نمک سدیم کلرید)، دو سطح ورمی کمپوست (بدون کاربرد به عنوان شاهد و کاربرد ورمی کمپوست) و سه سطح متانول (محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی متانول) بود. نتایج نشان داد کاربرد همزمان ورمی کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در سطح شوری ۱۰۰ میلی مولار فعالیت آنزیم پراکسیداز (۷۳/۴ درصد)، پلی فنل اکسیداز (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 ورمی کمپوست و متانول در همین سطح شوری افزایش داد. کاربرد ورمی کمپوست محتوای مالون دی آلدید و پراکسید هیدروژن را (به ترتیب ۹ و ۲۰ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد ورمی کمپوست کاهش داد. کاربرد متانول ۳۰ درصد حجمی محتوای مالون دی آلدید و پراکسید هیدروژن را (به ترتیب ۴۰ و ۵۵ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد متانول کاهش داد. بیشترین عملکرد دانه از کاربرد همزمان ورمی کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم شوری به دست آمد. براساس نتایج این تحقیق، به نظر می‌رسد کاربرد ورمی کمپوست و متانول به دلیل بهبود فعالیت آنزیم‌های آنٹی اکسیدانی و اسمولیت‌های سازگار می‌تواند موجب افزایش عملکرد دانه تربیتکاله تحت تنش شوری شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹ تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۴ ۱۵-۳۳ (۱): ۱۸	

مقدمه

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).

شوری خاک بیش از ۸۰۰ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان را، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yasin et al., 2018). مناطق متأثر از شوری به دلیل تغییرات آب و هوایی و آبیاری با آب بی کیفیت، به طور مداوم در حال گسترش است (Sahab et al., 2021). شوری بیش از حد در سیستم خاکی برای ساختار خاک و گیاهان مضر

تربیتکاله یا چاودم (*Triticosecale* Wittmack) گیاه زراعی ساخته دست بشر می‌باشد که از دو رگ گیری چاودار (*Secale cereale*) (به عنوان والد پدری) و گندم نان (*Triticum aestivum*) (به عنوان والد مادری) به دست آمده و از دامنه سازگاری بیشتری نسبت به هر یک از والدین خود برخوردار است. این گیاه به عنوان غذای انسان و طیور، چرای مسقیم، علوفه خشک و تازه استفاده می‌شود (Golebiowska-Paluch and Dyda, 2023). رقم سناباد با خصوصیتی چون پتانسیل عملکرد بالا، متوسط رس، مقاوم به خوابیدگی و بیماری‌های رایج گندم معرفی و مناسب کاشت

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 (پرویلین 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، پرویلین 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 کرم‌های خاکی 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 میکروب‌های تجزیه‌کننده سلولولیتیک برای تجزیه کامل بقایای آلی همکاری می‌کنند. کرم‌های خاکی ورمی‌کمپوست را از طریق هوموس تولید می‌کنند که فضولات باکتریایی روده آن‌ها است (Ahmad et al., 2022). کاربرد ورمی‌کمپوست موجب افزایش محتوای قند محلول، پرویلین، 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

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^{2-}) و پراکسید هیدروژن (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 الکلی‌ها است که به‌صورت فرمالدهید و دی‌اکسیدکربن 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، الکلی 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 این حال، 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 تنش‌های شدید، گیاه مواد فتوسنتزی خود را بیشتر برای سنتز ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی مانند پرویلین، گلیسین 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 (Behrouzfar and Yarnia, 2016). محلول‌پاشی متانول موجب تسریع تولید قندها و

نمک کلرید سدیم)، دو سطح ورمی کمپوست (کاربرد خاکی و عدم کاربرد ورمی کمپوست) و سه سطح متانول (محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی متانول) بود. برای تهیه محلول متانول، به هر کدام از محلول ها دو گرم در لیتر گلاسیسین اضافه شد (Narimani and Seyed Sharifi, 2023). پس از پر کردن گلدان هایی با قطر ۴۲ و ارتفاع ۴۰ سانتی متری با خاک به میزان ۱۴ کیلوگرم، ۵۶ عدد بذر رقم سناباد که در دمای ۲ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ روز در دستگاه گلد انکوباتور (مدل IKH.RI90) ورنالیزه شده بود، کشت شد. تراکم مطلوب و توصیه شده 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 آبیاری های بعدی مطابق با نیاز گیاه زراعی و شرایط محیطی گلخانه انجام شد. میزان ورمی کمپوست اضافه شده 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 گلدان ها در جدول ۲ آورده شده است.

ورمی کمپوست در شرایط شوری موجب بهبود قابل توجهی در فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز گیاه ذرت (*Zea mays*) شد (Alamer et al., 2022).

گسترش روز افزون شوری و اهمیت محلول پاشی متانول و ورمی کمپوست در تعدیل و کاهش بخشی از آثار مخرب ناشی از تنش شوری و بررسی های محدود انجام شده (Valizadeh-Kamran et al., 2019; Vojodi Mehrabani, 2019) در این راستا، موجب شد تا اثر این عوامل بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، اسمولیت های سازگار و برخی صفات تربیت کاله در شرایط شوری مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های 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 به عنوان شاهد، شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار از

Table 1. Results of vermicompost analysis

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

Table 2. Soil physico-chemical characteristics

ویژگی	روی	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	کربن آلی	شن	سیلت	رس	آهک	بافت	pH
Characteristic	Zn	K	P	N	O. C	Sand	Silt	Clay	CaCO ₃	Texture	
	-----mg.kg ⁻¹ -----			-----%							
Amount مقادیر	1.8	212	8.29	0.06	0.62	35	42	23	14.4	Loamy	7.8

محلول پاشی با متانول در دو نوبت در مرحله ساقه دهی (۳۰ BBCH) با فاصله زمانی یک هفته بین ساعت ۸ تا ۱۰ صبح اعمال شد (Narimani and Seyed Sharifi, 2023). گلدان ها در شرایط گلخانه ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد با طول دوره روشنایی ۱۵ تا ۱۶ ساعت (با استفاده

برای اعمال هر کدام از سطوح شوری، مقدار نمک مورد نیاز با کمک نرم افزار Salt cale محاسبه شد. در این نرم افزار 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.

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 این حال، 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. طوری که 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 به ترتیب ۶۷ تا ۱۶۵ درصد و فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز را به ترتیب ۷۵ تا ۲۲۸ درصد افزایش داد. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در اثر تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار به ترتیب 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).

محققان در پژوهشی مشابه اظهار داشتند کاربرد ورمی-کمپوست در شرایط شوری موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز گیاه تربیتکاله شد و آنزیم کاتالاز با اثر مستقیم بر پراکسید هیدروژن، موجب

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 (BBCH ۴۳) پس از پاکسازی گرد و غبار روی برگ‌ها با دستمال مرطوب، نمونه‌های برگی به ابعاد یکسان برش و در فالكون‌های 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 EC متر (مدل Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری و عدد حاصل از هدایت الکتریکی محلول شاهد کسر شد. محتوای نسبی آب برگ در مرحله آبستنی گیاه (BBCH ۴۳) از برگ پرچم سالم تعیین شد، به طوری که پس از جدا کردن 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 آماس یافته 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).

$$RWC (\%) = (W_f - W_d) / (W_s - W_d) \times 100 \quad [1]$$
 RWC: درصد محتوای نسبی آب، W_f : وزن تر برگ، W_d : وزن خشک برگ و W_s : وزن آماس یافته 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 پراکسید هیدروژن به روش الکسیو و همکاران (Alexieva et al., 2001) بر روی برگ پرچم در مرحله گلدهی (BBCH ۶۱) اندازه‌گیری شد.

در زمان رسیدگی پنج بوته از هر گلدان برداشت و سپس میانگین عملکرد دانه بوته‌های برداشت شده به عنوان عملکرد تک‌بوته در تجزیه داده‌ها استفاده شد. تجزیه داده‌ها با استفاده

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر ورمی کمپوست 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.

S. O. V	منابع تغییر	درجه آزادی df	پروتئین Protein	پراکسیداز POD	کاتالاز CAT	پلی فنل اکسیداز PPO	قندهای محلول Soluble sugars
Replication	تکرار	2	6.76**	263.34**	187.19 ^{ns}	17.73*	16.27 ^{ns}
Salinity (S)	شوری	2	46.28**	4537.93**	3086.22**	1966.74**	585.13**
Vermicompost (V)	ورمی کمپوست	1	8.51**	805.96**	183.08 ^{ns}	437.82**	1454.01**
Methanol (M)	متانول	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**
Error	خطا	34	0.34	11.19	77.54	3.42	16.35
CV%	ضریب تغییرات (%)		4.65	5.83	13.12	4.40	4.18

Table 3. Continued

جدول ۳. ادامه

S. O. V	منابع تغییر	درجه آزادی df	پروترین Proline	پراکسید هیدروژن H ₂ O ₂	مالون دی آلدید MDA	محتوای نسبی آب RWC	هدایت الکتریکی EC	عملکرد دانه Grain yield
Replication	تکرار	2	0.76*	0.00067*	0.0006*	50.73 ^{ns}	124.44**	0.002 ^{ns}
Salinity (S)	شوری	2	21.61**	0.0059**	0.0044**	748.25**	66.00**	19.17**
Vermicompost (V)	ورمی کمپوست	1	24.91**	0.00066*	0.00075*	154.13*	28.69**	3.14**
Methanol (M)	متانول	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**
Error	خطا	34	0.16	0.00014	0.00018	19.60	2.10	0.005
CV%	ضریب تغییرات (%)		10.53	13.62	14.56	5.64	5.29	5.72

ns, * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.Relative water content (RWC); Electrical conductivity (EC); Catalase (CAT), Peroxidase (POD), Polyphenol Oxidase (PPO); Hydrogen peroxide (H₂O₂) and Malondialdehyde content (MDA).

غیرزیستی نقش دارد، افزایش داد. در پژوهشی گزارش شد فعالیت آنزیم های POD و CAT در شرایط تنش افزایش یافت و با کاربرد متانول اثر تنش های القا شده از قبیل پراکسید هیدروژن و سوپراکسید هیدروژن بر گیاه در اثر کاهش انجام تنفس نوری کاهش یافت، در واقع آنزیم روبیسکو

کاهش اثر سمی تنش شوری شد (Mohammadi Kale, Sarlou et al., 2022). نتایج بررسی های عزت و همکاران (Ezzat et al., 2019) نشان داد که ورمی کمپوست، فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز (PPO) را که مسئول تولید ترکیبات فنلی است و در مکانیسم های دفاعی گیاهان در برابر تنش های

با اکسیداسیون ریبولوز ۱ و ۵ بیس فسفات موجب افزایش تنفس نوری در گیاه می‌شود و متانول با متابولیزه شدن سریع به دی‌اکسیدکربن و با افزایش دی‌اکسیدکربن (CO_2) منجر به افزایش کربوکسیلاسیون و کاهش اکسیژناسیون در گیاه می‌شود (Hossinzadeh et al., 2015). به نظر 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 به عنوان یک آنتی‌اکسیدان برای محافظت از گیاه در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش شوری عمل کند. علاوه بر این، محققان دریافته‌اند تیمار کردن 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 به دلیل 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 پراکسید هیدروژن محافظت می‌کند و نقش مهمی در مقاومت در برابر استرس اکسیداتیو دارد (Khalilzadeh et al., 2020). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی 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).

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 تربیتکاله در زمان آبستنی بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها کم‌ترین هدایت الکتریکی ($23/03$)

میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در ترکیب تیماری ورمی-کمپوست و متانول ۱۵ درصدحجمی در شرایط عدم اعمال تنش به دست 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 بین بردن 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 سدیم کلرید را بهبود و موجب مقاومت بهتر گیاه در برابر تنش شوری می‌شود (Redondo-Gómez et al., 2022). همچنین به نظر می‌رسد محلول-پاشی متانول با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز (جدول ۴) اثرات ناشی از شوری را در گیاهان با کاهش میزان ROS تولید شده کاهش می‌دهد (Hassanpouraghdam et al., 2022). احتمالاً 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 تربیتکاله 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 توأم 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). به نظر 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. این کار 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 می‌بخشد و به نظر 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 تربیتکاله در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). با افزایش تنش شوری، محتوای قندهای محلول نیز افزایش یافت طوری که 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 خنثی کردن 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 CO₂ 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

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، ورمی-کمپوست می‌تواند مقاومت گیاهان به تنش شوری را بهبود بخشد. در واقع ورمی-کمپوست 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). پژوهشی کاربرد ورمی-کمپوست 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).

الکل به فرمالدهید و اسید فرمیک متابولیزه می‌شود که بیشتر به سرین، متیونین، پورین و تیمیدیلات تبدیل می‌شوند و CO₂ تولید شده از اکسیداسیون متانول در چرخه کالوین-بنسون برای متابولیسم گلوکز استفاده می‌شود (Dorokhov et al., 2018). از طرفی ورمی-کمپوست منبع مهمی از مواد آلی برای خاک است که به بهبود حفظ آب، و در دسترس بودن مواد مغذی کمک کرده 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 ورمی-کمپوست انجام می‌شود، می‌تواند جذب آب و مواد مغذی 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

جدول ۴. مقایسه میانگین تاثیر ورمی-کمپوست 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 -----OD µg protein/min-----	پلی‌فنل اکسیداز PPO	قندهای محلول Soluble sugars 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	پروترین Proline μg.g ⁻¹ FW	محتوای نسبی آب RWC %	هدایت الکتریکی EC dS. m ⁻¹	عملکرد دانه Grain yield 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

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار. V₁ و V₂ به ترتیب بدون و با کاربرد ورمی کمپوست. M₁, M₂ و M₃ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی متانول ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی.

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 50 and 100 mM salinity. V₁ and V₂ are without and with application of vermicompost. M₁, M₂ and M₃ 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)

محتوای مالون دی آلدئید (MDA)

الکتریکی حداکثر بود (جدول ۴). افزایش محتوای مالون دی-

آلدئید به واسطه وجود تنش اکسیداتیو یک واکنش رایج به تنش های محیطی است و زیادی محتوای مالون دی آلدئید، پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای سلولی و ناپایداری اندامک های سلولی را نشان می دهد (Yousefi et al., 2022; Alamer et al., 2022).

با توجه به اینکه ورمی کمپوست دارای برخی عناصر درشت و ریز مغذی ضروری، اسیدهای هیومیک و فولویک، همچنین اسیدهای آمینه آزاد است که رشد گیاه و مکانیسم های دفاعی طبیعی آن را در هر شرایطی تحریک می کند (Beyk-Khormizi et al., 2022)، از این رو کاربرد خاکی ورمی کمپوست نقش کلیدی در حفظ سطوح کاهش یافته مالون دی آلدئید (MDA) در گیاهان دارد. نتایج تحقیق

اثر شوری، ورمی کمپوست و متانول در سطح احتمال یک درصد بر محتوای مالون دی آلدئید برگ پرچم معنی دار بود (جدول ۳). محتوای مالون دی آلدئید در شوری ۱۰۰ میلی-مولار، متانول ۳۰ درصد حجمی و کاربرد ورمی کمپوست به ترتیب برابر با ۰/۱۰۵، ۰/۰۷۷ و ۰/۰۸۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ بود، لذا شوری ۱۰۰ میلی مولار حدود ۴۰ درصد محتوای مالون دی آلدئید را در مقایسه با عدم تنش شوری، افزایش داد و محلول پاشی ۳۰ درصد حجمی متانول حدود ۴۰ درصد و کاربرد ورمی کمپوست ۹ درصد محتوای MDA را نسبت به سطح شاهد فاکتورهای مورد بررسی کاهش داد (جدول ۵). در واقع، حداکثر محتوای مالون دی آلدئید به همان ترکیبات تیماری تعلق داشت که میزان هدایت

سودوموناس در ورمی‌کمپوست می‌تواند با تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاهان، پروفایل‌های آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را توسعه داده، در نتیجه تجمع MDA را در گیاه کاهش دهد.

سرخ‌سی (Sorkhi, 2021) بیانگر کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدهید در اثر کاربرد ورمی‌کمپوست در گیاه گل‌گاوزبان (*Borago officinalis*) بود و اظهار داشت که وجود باکتری‌های مفید مانند آزوسپیریلوم، باسیلوس، تریکودرما و

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر اصلی سطوح شوری، ورمی‌کمپوست و متانول بر پراکسید هیدروژن، مالون‌دی‌آلدهید و کاتالاز برگ پرچم تربتیکاله.

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	پراکسید هیدروژن H ₂ O 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
	S ₂	0.040 ^b	0.096 ^a
	S ₃	0.056 ^a	0.105 ^a
	LSD	0.008	0.009
سطوح متانول Methanol Levels	M ₁	0.045 ^a	0.108 ^a
	M ₂	0.040 ^a	0.092 ^b
	M ₃	0.029 ^b	0.077 ^c
	LSD	0.008	0.009
ورمی‌کمپوست vermicompost	V ₁	0.042 ^a	0.096 ^a
	V ₂	0.035 ^b	0.088 ^b
	LSD	0.006	0.007

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار. V₁ و V₂ به ترتیب بدون و با کاربرد ورمی‌کمپوست؛ M₁, M₂ و M₃ به ترتیب 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.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 50 and 100 mM salinity. V₁ and V₂ are without and with application of vermicompost. M₁, M₂ and M₃ 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 (H₂O₂); Malondialdehyde content (MDA) and Catalase (CAT).

محتوای پراکسید هیدروژن (H₂O₂)

بر اساس 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). به نظر می‌رسد محتوای پراکسید هیدروژن با مقدار تنش رابطه مستقیم دارد طوری که با افزایش تنش شوری، میزان H₂O₂ 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 به ترتیب 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). به نظر می‌رسد محلول‌پاشی با کاهش سرعت تولید، حذف آن از سلول، یا انتقال آن به مولکول‌های گلیسرول به منظور ذخیره ایمن در سلول، در برابر تجمع H₂O₂ عمل می‌کند. به این ترتیب میزان H₂O₂ 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 کمک کرده (Vojodi Mehrabani, 2019) و به القای فعالیت آنتی-اکسیدانی مانند دهیدروآسکوربات ردوکتاز، پراکسیداز و گلوکاتردوکسین و افزایش فعالیت POD و کاهش سریع تجمع H₂O₂ در برگ‌ها کمک کند (Zhao et al., 2014). احتمالاً

است، نقش دارد. اسیدهای آمینه تحت تنش شوری دو هدف مشخص را انجام می دهند: اولین مورد استفاده به عنوان یک محافظ اسمزی است که شامل افزایش اسمولاریته فضاهای داخل سلولی می شود که به جلوگیری از تورم و در نهایت ترکیدن محتویات سلول به دلیل هجوم آب به داخل سلول کمک می کند. دومی به عنوان تنظیم کننده اسمزی استفاده می شود (Singh et al., 2022). پرولین این نقش را در متابولیسم سلولی ایفا می کند و اجازه می دهد میزان آبی که در طول دوره های 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 به طور معنی دار افزایش یافت. محققین در این راستا اظهار داشتند متانول با تولید یک محیط اسیدی و افزایش فعالیت ۵-کربوکسیلات سنتتاز، محتوای پرولین در برگ ها را افزایش می دهد (Soltanieh et al., 2023). متانول محلول پاشی شده بر روی برگ توسط آنزیم متانول اکسیداز و با از دست دادن دو یون هیدروژن ($2H^+$) تبدیل به فرمات (متانوئیک اسید) می شود. فرمات در مرحله بعد توسط آنزیم فرمات دهیدروژناز تبدیل به CO_2 و H^+ می شود (Nonomura et al., 1992). متانول با کمک به تثبیت مولکول های پرولین در سلول های گیاهی موجب کاهش اثرات تنش شوری بر سلول ها شده و این اثر تثبیت کننده 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 پررنگ تر از سایر ترکیبات است و با حفظ پایداری اسید آمینه پرولین، موجب افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش شوری می شود (Valizadeh-Kamran et al., 2019). هنگامی که گیاهان در معرض تنش شوری قرار می گیرند، هورمون هایی مانند اسید آبسزیک (ABA) ترشح می کنند که منجر به کاهش سنتر پرولین به عنوان یک اسید آمینه ضروری می شود. این عدم تعادل بین پرولین و ABA در گیاهان می تواند وضعیت تعادل اکسیداتیو آن ها را تغییر و منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدی شود. لذا استفاده از ورمی کمپوست در گیاهان به حفظ سطوح نرمال پرولین و ABA کمک می کند. این را می توان به وجود ریزمغذی هایی مانند روی، آهن، مس، منگنز و منیزیم در ورمی کمپوست نسبت داد (Beyk-Khormizi et al., 2022) که در نهایت

ورمی کمپوست نیز می تواند H_2O_2 را در گیاهان با اتصال به ROS و کاهش دسترسی آن ها کاهش دهد و علت این امر به افزایش فعالیت میکروارگانیزم های مفید و انواع آنزیم ها، اسیدهای هیومیک و ویتامین هایی که سلامت گیاه را ارتقا می دهند، نسبت داده شده است (Ashour et al., 2023). در این راستا الحربی و همکاران (Alharbi et al., 2023) اظهار داشتند ورمی کمپوست حاوی انواع میکروارگانیزم های مفید، مانند اکتینومیسیت ها و قارچ ها است که توانایی جذب و تجزیه مولکول های H_2O_2 را دارند که در ماتریکس سلولی گیاه تجمع یافته و این میکروارگانیزم ها می توانند گونه های فعال اکسیژن مانند رادیکال های آزاد را که برای گیاهان مضر هستند، از بین ببرند.

محتوای پرولین

شوری، ورمی کمپوست، متانول و اثر سه گانه آن ها بر میزان محتوای پرولین برگ پرچم تریتیکاله در دوره گلدهی معنی دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین ها نشان می دهد حداقل و حداکثر محتوای پرولین (به ترتیب ۰/۷۵ و ۷/۱۱ میکروگرم برگرم وزن تر) مربوط به تیمار تلفیقی عدم کاربرد ورمی کمپوست و متانول در شرایط عدم اعمال شوری و تیمار تلفیقی ورمی کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در سطح شوری ۱۰۰ میلی مولار می باشد (جدول ۴). تیمار تلفیقی ورمی کمپوست و متانول ۳۰ درصد حجمی در شرایط عدم اعمال تنش نسبت به تیمار تلفیقی عدم کاربرد ورمی کمپوست و متانول در بالاترین سطح شوری (۱۰۰ میلی مولار) و تیمار شاهد (عدم کاربرد هر سه عامل) ۱۰/۵ تا ۴۱۸/۶ درصدی محتوای پرولین برگ های تریتیکاله را افزایش داد (جدول ۴). پرولین از آنٹی اکسیدان های مهم در سیستم دفاع آنٹی اکسیدانی گیاهان هستند. با بسیاری از گونه های فعال اکسیژن مانند H_2O_2 ، $O_2^{\cdot -}$ و $OH^{\cdot -}$ و هیدروپراکسیدازهای مایع واکنش می دهد. همچنین پرولین سنتز شده در شرایط تنش اکسیداتیو ناشی از شوری، در سایر فعالیت های بیولوژیکی گیاه از جمله فعالیت های آنٹی اکسیدانی، کوفاکتور آنزیمی و به عنوان یک دهنده گیرنده در انتقال الکترون در غشای پلاسمایی یا کلروپلاست مشارکت دارد (Ezzat et al., 2019). لذا، پرولین نقش مهمی در محافظت از سلول های گیاهی در برابر آسیب های ناشی از تنش اسمزی، که جزء اصلی تنش شوری است، ایفا می کند. متانول در بهبود میزان پرولین که یک اسید آمینه غیر ضروری تحت تنش شوری

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 می‌رسد 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 به‌دلیل 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-آلدئید 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 آلشیکید 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، سترات 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 پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید (جدول ۵) باشد که در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه تربیتکاله شد (Mohammadi Kale Sarlou et al., 2022). همچنین ورمی‌کمپوست با افزایش سنتر پرولین به گیاهان کمک می‌کند با تنش شوری مقابله کنند و بقا و بهره‌وری گیاه را افزایش و به بهبود عملکرد در شرایط شوری

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 سنتر پروتئین گیاهی را محدود کند، اما ورمی-کمپوست حاوی سطوح بالاتری از عناصر درشت و ریز مغذی است (جدول ۱) که با فراهم کردن مواد آلی اضافی به خاک، ظرفیت بافری بیشتری در برابر تنش شوری ایجاد می‌کند و موجب بهبود سلامت گیاه و سنتر پروتئین بیشتر حتی در شرایط تنش‌زا می‌شود (Tammam et al., 2022). همچنین اسیدهای هیومیک و فولویک موجود در ورمی‌کمپوست به‌دلیل 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 سنتر پروتئین‌های دخیل در تنش اسمزی و دفاع آنتی‌اکسیدانی شود. این افزایش سنتر 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 اسیدآمینو 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 سنتر مداوم پروتئین محلول در برگ‌ها، موجب تاخیر در پیری برگ و افزایش فتوسنتز و عملکرد می‌شود (Soltanieh et al., 2023).

روی برگ ها 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 بررسی شده است. نتایج نشان داد عملکرد دانه با میزان پروتئین برگ ($r = 0.71$) و محتوای نسبی آب برگ ($r = 0.63$) همبستگی مثبت معنی دار و با میزان پراکسید هیدروژن ($r = -0.71$) و هدایت الکتریکی ($r = -0.49$) همبستگی منفی معنی داری 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 ($r = 0.79$) همبستگی مثبت معنی دار و پروتئین با پراکسید هیدروژن ($r = -0.72$) و هدایت الکتریکی ($r = -0.53$) همبستگی منفی معنی دار وجود دارد. قند محلول بالاترین همبستگی مثبت را با میزان فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز ($r = 0.69$) نشان داد (جدول ۶).

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

از طرفی افزایش غلظت متانول در بافت های گیاهی بر بازده تبدیل کربن و نیز مسیرهای متابولیکی اثرگذار بوده (Atarodi Asl and Khalilvand Behrouzvar, 2020) و تاثیر این محلول پاشی متانول به خصوص در گیاهان سه کربنه بواسطه کاربرد متانول به عنوان یک منبع کربنی، به افزایش ظرفیت فتوسنتزی آن ها منجر می شود (Mirakhori et al., 2009). زیرا متانول به عنوان یک منبع کربن به آسانی از طریق لیپیدهای موجود در غشا عبور و به سرعت وارد بافت های گیاهی می شود و با تاثیر بر متابولیسم کربنی گیاه، رشد و عملکرد گیاهان را افزایش می دهد (Soltanieh et al., 2023). در این راستا برخی پژوهشگران علت افزایش عملکرد دانه برنج در اثر محلول پاشی بوته ها با متانول را، به وجود باکتری های متیلوتروفیک در بافت های گیاه (برگ ها) نسبت دادند، زیرا گونه های باکتریایی جنس متیلوباکتریوم (Mehtylobatreriium) می توانند به مصرف مقداری متانول

جدول ۶. ضریب همبستگی ساده بین صفات مورد مطالعه

	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 پلی فنل اکسیداز 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 پراکسید هیدروژن H ₂ O ₂	-0.71**	0.38**	-0.72**	0.24	1						
8 مالون دی آلدئید 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 معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, 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، پروتئین کل، قندهای محلول، تخریب دیواره سلولی و افزایش نشت الکترولیت‌ها، موجب افزایش پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدید 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 به نظر می‌رسد متانول و ورمی‌کمپوست می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای تعدیل بخشی از کاهش عملکرد تریپتیکاله 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 agraria*. 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 Behrouzfar, 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>
- Behrouzfar, 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., Moshtaghoun, 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](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 (*Solanum 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, KNO₃, 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 Tropical 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., Sinhar, 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](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 tritcale 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>