Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

The effect of conservation tillage on soil biological and enzymatic activities and physiological characteristics of corn (*Zea mays L.*) under drought stress conditions

Nezam Karzani[1] | Ehsan Zeidali[2] | Yaser Alizadeh [3]✉| Hamzeh Ali Alizadeh[4] | Ekhlas Amini[5]

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail: n.karzani@ilam.ac.ir
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail: E.zeidali@ilam.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail: y.alizadeh@ilam.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail: H.alizadeh@ilam.ac.ir
5. Ilam Agricultural Jihad Organization, Ilam, Iran. E-mail: amini8620@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 28, 2025

Revised: June. 5, 2025

Accepted: June. 25, 2025

Published online: Aug. 2025

Keywords:
Root Zone Irrigation,
Soil Enzymes,
Plant Biochemical Responses,
Oxidative Stress,
Corn,
Conservation Tillage Systems.

ABSTRACT

To investigate the effect of conservation tillage on soil biological and enzymatic activities and physiological characteristics of maize under drought stress conditions, an experiment was conducted based on a split-plot design in a randomized complete block design with three replications and 15 treatments in 2023 at the Ilam University Research Farm. The main therapies included three tillage levels (no-tillage, minimum tillage, and conventional tillage), and the sub-treatments included five irrigation regimes (100, 75, and 50 percent of field capacity with full irrigation and 75 and 50 percent with PRD local root drought method). The results showed that the highest relative leaf water content (85.62%) was observed in the 100 percent field capacity irrigation treatment. The highest proline accumulation (2.06 µmol/g leaf fresh weight) was observed in the 50 percent irrigation level. Catalase activity reached its maximum value (1.93 absorption change/min/mg protein) in the no-tillage treatment with 50 percent PRD irrigation. Malondialdehyde and ascorbate peroxidase also showed the highest levels at the 50% irrigation. In the section on soil enzymatic activities, alkaline phosphatase was recorded at 430.11 and 417.74 µg/g soil in the tillage treatments with 100 and 75% PRD irrigation, respectively. Acid phosphatase, urease, and microbial respiration also had the highest levels in the tillage treatment with full irrigation. The findings indicate that the combination of tillage system with the PRD technique can be used as an effective solution for drought stress management. These methods enhance plant defense responses and provide more favorable biological conditions for soil.

Cite this article: Karzani, N., ZaidAli, E. E., Alizadeh, Y., Alizadeh, H. A. & Amini, E. (2025). The effect of conservation tillage on soil biological and enzymatic activities and physiological characteristics of corn (Zea mays L.) under drought stress conditions., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (6), 1571-1592. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394078.669931

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394078.669931

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Drought is one of the primary abiotic stresses that has detrimental effects on plants. Furthermore, water scarcity has become a significant challenge in global agricultural production. One way to address this challenge is through optimal water management, which can include methods such as deficit irrigation. Partial Root-zone Drying (PRD) is an advanced deficit irrigation technique where half of the root zone is irrigated at each irrigation event. One of the initial responses of plants to water deficit stress is the production of reactive oxygen species (ROS) such as hydrogen peroxide (H_2O_2), superoxide (O_2^-), and hydroxyl radicals (OH^-). In plant cells, in response to stresses, the activity of enzymatic and non-enzymatic antioxidants increases. Enzymatic antioxidants include catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase. Conservation tillage systems play a significant role in arid and semi-arid regions by increasing agricultural production and maximizing surface water infiltration. Additionally, soil enzymes (acid and alkaline phosphatases, urease) produced by microbes play a key role in biochemical functions, organic matter decomposition, and nutrient cycling.

Materials and methods

This experiment was conducted during the 2023 growing season (1402 in the Iranian calendar) at the research farm of the University of Ilam. The experiment was carried out as a split-plot design within the framework of a randomized complete block design with three replications. The main plots consisted of three tillage levels (no-tillage, minimum tillage, and conventional tillage), and the sub-plots consisted of five irrigation regimes: 100, 75, and 50 percent of soil field capacity with full irrigation, and 75 and 50 percent of soil field capacity with variable PRD. The land was plowed according to the tillage treatments. For conventional tillage, the land was plowed using a moldboard plow to a depth of 25-30 cm (without plant residue), followed by disc harrowing to break up soil clods, land leveling, and furrowing using a furrower for maize cultivation. In minimum tillage, the land was plowed using a chisel plow to a depth of 25-30 cm, leaving 50 percent of the crop residue on the soil surface. In the no-tillage treatment, the land was used for cultivation without plowing and with 100 percent plant residue cover. The size of the sub-plots was 2×2 square meters with four rows spaced 50 cm apart. The distances between blocks, main plots, and sub-plots were 2, 2, and 1 meters, respectively. Maize seeds (I-Star cultivar, FAO group 600) were manually planted on June 10, 2023 (Khordad 1402), with a spacing of 20 cm between plants and at a depth of two centimeters in the planting rows, resulting in a density of 10 plants per square meter. The field was irrigated using drip tape, and the amount of water consumed was measured by a water meter. Until the plants were fully established, all plots were irrigated uniformly, after which the application of different irrigation levels commenced. To measure the relative leaf water content, the method of Sanchez et al. (1998) was used. The method of Bates et al. (1973) was used for extraction and assay of proline. The activity of the ascorbate peroxidase enzyme was determined using the method of Ranieri et al. (2003), and the activity of the catalase enzyme was assessed using the method of Aebi (1984). Malondialdehyde content was measured using the method of Stewart & Beweley (1980). Soil microbial respiration was measured using the method of Anderson (1982), urease activity was determined using the method of Kandeler & Gerber (1988), and acid and alkaline phosphatase activities were measured using the method of Ohlinger (1996). Analysis of variance (ANOVA) of the data was performed using SAS software (ver 9.4), and the comparison of means was conducted using the Least Significant Difference (LSD) test at a 5% significance level. Excel software was used for drawing graphs.

Results and discussion

The results showed that irrigation levels at the 1% probability level significantly affected relative water content. Based on the results of mean comparisons, the highest relative water content (85.62%) was observed at the 100% field capacity irrigation level, while the lowest relative water content was obtained at the 50% conventional and 50% PRD irrigation levels. Furthermore, the effect of different irrigation treatments on proline content was significant at the 1% probability level, with the highest proline accumulation observed at the 50% conventional irrigation level (2.06 µmol per gram fresh weight of leaf). And the highest amount of proline was obtained in the low-tillage method (1.83 micromol/g leaf fresh weight). Based on the results, the effect of irrigation was significant at the 1% probability level, and the interaction between tillage and irrigation on catalase content was significant at the 5% probability level. The highest catalase activity was observed in no-tillage with 50% PRD irrigation (1.93 changes in absorbance per minute per milligram of protein). Additionally, the effect of irrigation on malondialdehyde content was significant at the 1% probability level, with the highest activity observed at the 50% field capacity irrigation level (1.61 nmol per gram fresh weight of leaf). The effect of different irrigation treatments on ascorbate peroxidase activity was also significant at the 1% probability level, and the highest activity was obtained at the 50% conventional irrigation level (1.13

changes in absorbance per minute per milligram of protein). Based on the results, the interaction between tillage and irrigation on alkaline phosphatase, acid phosphatase, urease, and microbial respiration content was significant at the 5% probability level. Mean comparison of alkaline phosphatase enzyme activity under the interaction of tillage and irrigation levels showed that the highest alkaline phosphatase activity was in no-tillage with 100% and 75% PRD irrigation (430.11 and 417.74 µg p-nitrophenyl phosphate per gram of soil, respectively), and the highest acid phosphatase activity was in no-tillage with 100% field capacity irrigation (391.4 µg p-nitrophenyl phosphate per gram of soil). The highest urease enzyme activity was observed in no-tillage with 100% field capacity irrigation (7.89 µg nitrogen per gram of soil in two hours), and the highest microbial respiration was under no-tillage and 100% irrigation conditions (2.11 mg carbon per day).

Conclusion

The results indicate a significant impact of different irrigation and tillage methods on the physiological, biochemical, and biological characteristics of maize plants and soil. The findings showed that reducing the irrigation amount, particularly under drought stress conditions, led to significant changes in indicators related to relative leaf water content, proline accumulation, the activity of antioxidant enzymes such as catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), as well as lipid peroxidation (malondialdehyde, MDA). The Partial Root-zone Drying (PRD) irrigation method, compared to conventional irrigation, demonstrated greater efficiency in maintaining leaf water content and reducing oxidative stress. In the conservation tillage system, the activity of alkaline and acid phosphatase enzymes, urease, and microbial respiration was influenced by irrigation conditions and the type of tillage. The no-tillage system showed better performance in maintaining soil enzymatic activity compared to minimum tillage and conventional tillage. Furthermore, the PRD method was able to mitigate the negative effects of drought stress on soil enzymatic activity.

Author Contributions:

Nezam Karzani: Project Management, Research, Data Collection, Writing, Preparation of the Main Draft, Sources

Ehsan Zeidali: Conceptualization, Supervision, Writing - Review and Editing

Yaser Alizadeh: Conceptualization - Methodology, Software, Validation, Manuscript Editing, Supervision

Hamzeh Ali Alizadeh: Supervision - Methodology

Ekhlas Amini: Illustration, Writing - Review and Editing

Funding was provided by Ilam University.

All authors have read and approved the published version of the article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Acknowledgements:

We would like to sincerely thank Ilam University for the financial and logistical support that significantly contributed during the research project.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۶، شماره ۶ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر فعالیت‌های زیستی و آنزیمی خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت (*Zea mays L.*) در شرایط تنش خشکی

نظام کارزانی[۱]، احسان اله زیدعلی[۲]، یاسر علیزاده [۳]✉، حمزه‌علی علیزاده[۴]، اخلاص امینی[۵]

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام. ایران. رایانامه: n.karzani @ilam.ac.ir

۲. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام. ایران. رایانامه: E.zeidali@ilam.ac.ir

۳.نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران. رایانامه: y.alizadeh@ilam.ac.ir

۴. گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام. ایران. رایانامه: H.alizadeh@ilam.ac.ir

۵. سازمان جهاد کشاورزی ایلام. ایران. رایانامه: amini8620@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۴
تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
آبیاری ناحیه‌ای ریشه،
آنزیم‌های خاک،
پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاهان،
تنش اکسیداتیو،
ذرت،
سیستم‌های زراعی حفاظتی.

چکیده

به‌منظور بررسی اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر فعالیت‌های زیستی و آنزیمی خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت در شرایط تنش خشکی آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ایلام انجام شد. کرت‌های اصلی شامل: سه سطح خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) و کرت‌های فرعی شامل: پنج رژیم آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک بصورت معمولی و ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک بصورت PRD متغیر بود. نتایج نشان داد که میزان رطوبت نسبی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، بالاترین میزان (۸۵/۶۲ درصد)، و بیشترین میزان تجمع پرولین در سطح آبیاری ۵۰ درصد (۲/۰۶ میکرومول بر گرم وزن تر برگ)، و بیشترین میزان پرولین در روش کم‌خاک‌ورزی (۱/۸۳ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) حاصل شد. همچنین بیشترین میزان فعالیت کاتالاز در بی خاک‌ورزی و آبیاری PRD 50 درصد (۱/۹۳ تغییرات جذب در دقیقه در میلی گرم پروتئین)، بیشترین میزان فعالیت مالون دی آلدئید و آسکوربات پراکسیداز در آبیاری ۵۰ درصد (به ترتیب ۱/۶۱ نانو مول بر گرم برگ تر و ۱/۱۳ تغییرات جذب در دقیقه در میلی گرم پروتئین) و بیشترین میزان فسفاتاز قلیایی در بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ و PRD 75 درصد ظرفیت زراعی مزرعه (به ترتیب ۱۱/ ۴۳۰ و ۴۱۷/۷۴ میکروگرم پارانیتروفنیل فسفات در گرم خاک) بیشترین میزان این آنزیم فسفاتاز اسیدی، اوره‌آز و تنفس میکروبی در بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد (به ترتیب ۳۹۱/۴ میکروگرم پارانیتروفنیل فسفات در گرم خاک و ۷/۸۹ میکروگرم نیتروژن بر گرم خاک در دو ساعت و ۲/۱۱میلی گرم کربن در روز) بود. به طور کلی، یافته‌ها نشان دادندکه ترکیب سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی با تکنیک آبیاری PRD می تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت تنش خشکی باشد. این روش‌ها پاسخ‌های دفاعی گیاه را تقویت کرده و شرایط زیستی مطلوب‌تری برای خاک فراهم می‌کند.

استناد: کارزانی، نظام؛ زیدعلی، احسان اله؛ علیزاده، یاسر، علیزاده، حمزه علی و امینی، اخلاص (۱۴۰۴). اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر فعالیت‌های زیستی و آنزیمی خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت (Zea mays L.) در شرایط تنش خشکی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۶)، ۱۵۹۲-۱۵۷۱.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394078.669931

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394078.669931

مقدمه

باتوجه به پیامدهای تغییرات آب‌وهوایی، انواع مختلفی از شرایط تنش‌های غیرزیستی به‌شدت بر گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد (Zandalinas *et al*., 2017). خشکی یکی از اصلی‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که اثرات نامطلوبی بر گیاهان دارد. این اثرات شامل بسته‌شدن روزنه‌ها، آسیب‌های متابولیکی و اسمزی، سرکوب رشد سلولی و کاهش فتوسنتز است (Tardieu, *et al*. 2014). کمبود آب به چالش اصلی در تولید محصولات کشاورزی در سطح جهانی بدل شده است (Dodorico, *et al*., 2020). کاهش تورژسانس سلولی در اثر خشکی، عملکرد سلول را تحت تأثیر قرار داده و باعث اختلال در فرآیندهای حیاتی مانند فتوسنتز، فعالیت آنزیمی و جذب مواد مغذی می‌شود (Seleiman, *et al*., 2021 & Guarnizo, *et al*., 2023). یکی از واکنش‌های اولیه گیاهان به تنش کم آبی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS[1]) مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، سوپر اکسید (O_2^-)، و رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^-) است (Gao *et al*., 2020 & Anjum *et al*., 2015). این گونه‌ها می‌توانند به غشاها و مولکول‌های حیاتی مانند رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها آسیب برسانند (Blokhina *et al*., 2003). گیاهان برای مقابله با این آسیب‌ها، فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز) و غیر آنزیمی (اسید اسکوربیک، گلوتاتیون، کاروتنوئیدها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها) را افزایش می‌دهند تا سطح ROS را کنترل کنند (Gill & Tuteja, 2010; AL-Aghabary et al., 2004). آسیب به غشای سلولی یکی از پیامدهای مهم تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن است که با اندازه‌گیری غلظت مالون دی‌آلدئید می‌توان شدت این آسیب را ارزیابی کرد (Bhattacharjee, 2002). همچنین، افزایش پرولین در شرایط خشکی به عنوان یک مکانیسم دفاعی عمل می‌کند که به حفظ ساختار غشای سلولی، تنظیم تعادل اسمزی و محافظت از آنزیم‌ها کمک می‌کند (Tawfik, 2008). محتوای نسبی آب برگ نیز شاخص مهمی برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه است و با فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند رابیسکو ارتباط مثبت دارد (Sanchez-Rodríguez et al., 2010; Castrillo & Trujillo, 1994). پارسا و همکاران (۱۴۰۱) گزارش نمودند که با افزایش سطح تنش خشکی در گیاه نعنا فلفلی میزان آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت. همچنین بذرگر و همکاران (۱۴۰۰) اعلام کردند که با افزایش کم آبیاری و تنش خشکی، محتوای پرولین و فعالیت آنزیم کاتالاز در ذرت افزایش یافت. یکی از راه‌های مواجهه با این چالش، مدیریت بهینه مصرف آب است که می‌تواند شامل روش‌هایی مانند استفاده از کم‌آبیاری باشد (Bazrgar et al., 2023). کم آبیاری یک استراتژی مدیریتی است که به منظور افزایش کارایی مصرف آب طراحی شده است. که در آن مدیریت آب کاربردی کمتر از نیاز آبی گیاه است در این مدیریت به گیاه اجازه تجربه تـنش‌هـای کـم در زمـان‌هـای غیرحساس دوره رشد را می‌دهند، و کمی کاهش عملکرد قابل پذیرش است (Geerts & Raes., 2009). همچنین آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD[2]) یک روش پیشرفته از کم آبیاری است که در آن نیمی از محدوده ریشه آبیاری می‌شود و نیمه دیگر بدون آبیاری باقی می‌ماند. سپس بخشی از سیستم ریشه‌ای که قبلا آبیاری شده بود خشک نگه داشته می‌شود، در حالی که بخش خشک قبلی آبیاری می‌شود (Savic et al., 2008).

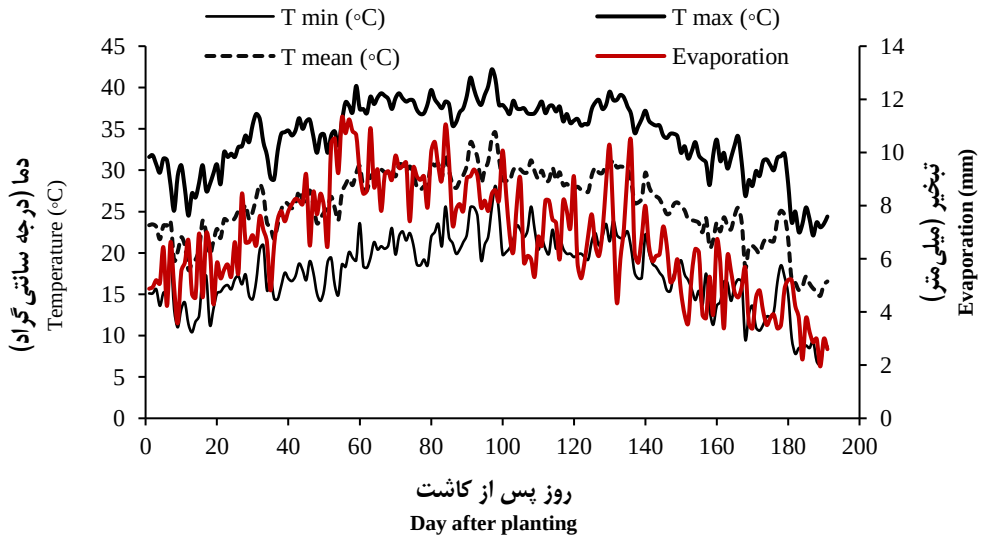
از سوی دیگر، سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مهمی در افزایش تولید محصولات و بهبود نفوذ آب دارند. این سیستم‌ها با حفظ بقایای گیاهی و افزایش مواد آلی خاک، فعالیت میکروبی و فرایندهای بیوشیمیایی خاک را بهبود می‌بخشند که در شرایط خشک معمولاً محدود است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Li *et al*., 2018; Bunemann, 2018). شخم حفاظتی نسبت به شخم معمولی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود داده و ظرفیت نگهداری آب و فعالیت میکروبی خاک را افزایش می دهد (Mathew *et al*., 2012). تنفس میکروبی خاک، فرآیندی است که فعالیت میکروب‌ها و تجزیه مواد آلی را نشان می‌دهد و نقش مهمی در چرخه عناصر غذایی دارد (Luo & Zhou, 2006). آنزیم‌های خاک تولید شده توسط میکروب‌ها، نقش کلیدی در عملکرد بیوشیمیایی، تجزیه مواد آلی و چرخه غذایی ایفا می‌کنند (Waldrop, *et al*., 2004). فسفاتازها با آزادسازی فسفر آلی، در چرخه بیوژئوشیمیایی فسفر مؤثرند و فعالیت آن‌ها شاخصی برای در دسترس بودن فسفر خاک است (جواهری و همکاران، ۱۳۹۳). آنزیم اوره‌آز نیز در تجزیه اوره به دی‌اکسید کربن و آمونیاک، در کاهش نیتروژن خاک از طریق فرایند تبخیر آمونیوم مشارکت می‌کند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱ و Kabiri, *et al*., 2016). میرزاوند و اسدی رحمانی (۱۳۹۹) گزارش نمودند که بیشترین میزان فعالیت اوره‌آز در ذرت و گندم در سیستم بی‌خاک‌ورزی و بیشترین میزان فعالیت فسفاتاز اسیدی در سیستم کم‌خاک‌ورزی و حفظ ۳۰ درصد بقایای گیاهی بوده است. Kabiri, V., *et al*., (2016) اظهار کردند که بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز خاک در روش کم‌خاک‌ورزی حاصل شد که احتمالا نتیجه‌ای از تغییر در اندازه جمعیت و فعالیت میکروبی خاک بود. Martín-Lammerding *et al*., (2015) گزارش کردند که در ارزیابی روش‌های مختلف خاک‌ورزی

1 Reactive oxygen species
2 Partial Rootzone Drying

(بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) در کشت چهار ساله گندم، میزان تنفس خاک اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی در تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم ۶۷ درصد بیشتر شد. هدف از اجرای این آزمایش، ارزیابی تأثیر ترکیبی سطوح مختلف آبیاری و روش‌های خاک‌ورزی بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی ذرت و فعالیت‌های زیستی_آنزیمی خاک و معرفی شرایط بهینه برای تولید ذرت در شرایط محدودیت منابع آبی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۷۴ متر از سطح دریا اجرا شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی شامل: سه سطح خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک ورزی مرسوم) و کرت‌های فرعی شامل: پنج رژیم آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌صورت PRD متغیر بود. در طول فصل رشد مجموع تبخیر پتانسیل ۱۳۰۰ میلی‌متر، میانگین دمای حداقل و حداکثر در طول دوره رشد، به‌ترتیب ۱۷/۷ و ۳۴/۱ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). در جدول ۱ نیز مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه ارائه شده است. مزرعه سال قبل از اجرای آزمایش زیر کشت گندم بود. در بهار سال ۱۴۰۲ اقدام به آماده‌سازی زمین و بر اساس تیمارهای خاک‌ورزی زمین شخم گردید. برای خاک‌ورزی مرسوم با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار تا عمق ۳۰- ۲۵ سانتی‌متری زمین شخم زده شد و سپس با استفاده از دیسک کلوخه‌های سطح مزرعه خرد و زمین تسطیح گردید و با فاروئر اقدام به تهیه جوی و پشته برای کشت ذرت شد. در کم‌خاک‌ورزی زمین با استفاده گاوآهن قلمی تا عمق ۳۰- ۲۵ سانتی‌متری شخم زده شد به‌طوری‌که ۵۰ درصد بقایا در سطح خاک باقی ماند. در تیمار بی‌خاک‌ورزی زمین بدون اعمال شخم و با پوشش ۱۰۰ درصدی بقایای گیاهی برای کشت مورد استفاده قرار گرفت.کود نیتروژن به میزان ۱۰۰ کیلوگرم از منبع اوره در دو نوبت، یک قسمت همزمان با کاشت و باقیمانده به عنوان کود سرک، و فسفر به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل همزمان با کاشت مصرف شد. اندازه کرت‌های فرعی ۲×۲ مترمربع و چهار ردیف به فاصله ۵۰ سانتی‌متر بودند. فاصله بین بلوک‌ها، کرت‌های اصلی و فرعی به ترتیب ۲، ۲ و ۱ متر در نظر گرفته شد. بذور ذرت (رقم ای‌استار گروه فائو ۶۰۰) در ۱۰ خرداد ماه سال ۱۴۰۲ با فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر از همدیگر و در عمق پنج سانتی‌متری در ردیف‌های کاشت با تراکم ۱۰ بوته در مترمربع به‌صورت دستی کشت گردید. در مرحله ۶ –۴ برگی ذرت، جمع آوری علف‌های هرز مزرعه بصورت مکانیکی صورت گرفت و طول دوره رشد گیاه ۱۲۵ روز بود.



شکل ۱- حداقل، حداکثر و متوسط دمای روزانه و میزان تبخیر در طول دوره رشد ذرت در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک)

پتاسیم K (ppm)	فسفر P(ppm)	نیتروژن N (%)	کربن آلی Organic Carbon (%)	بافت خاک Soil Texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	هدایت الکتریکی EC (dS.m-1)	اسیدیته PH
۴۷۱/۰۱	۶/۳۳	۰/۰۷۲	۰/۸۳۸	لومی‌رسی	۲۷/۵	۴۵/۵	۲۷	۰/۱۸۵	۷/۴۱

به‌منظور اعمال صحیح و یکنواخت آبیاری واحدهای آزمایشی، آبیاری مزرعه با استفاده از نوار تیپ انجام شد و میزان آب مصرفی توسط کنتور اندازه‌گیری گردید. تا زمان استقرار کامل گیاهان، همه کرت‌ها به‌میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن اعمال سطوح مختلف آبیاری آغاز شد. در هر مرحله از آبیاری به‌منظور تعیین میزان آب مصرفی، پیش از آبیاری از دستگاه TDR مدل R2V/6 ساخت شرکت Delta -T بر اساس رابطه ۱برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده گردید.

رابطه ۱) $\theta_O=1.087\times\theta_{TDR}- 0.03$

دراین‌رابطه، θ_O رطوبت اندازه‌گیری شده و θ_{TDR} رطوبت قرائت شده با دستگاه TDR است. سپس حجم آب آبیاری برای سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی هر یک از تیمارها از رابطه ۲ محاسبه شد. برای سایر سطوح حجم آب آبیاری از حاصل‌ضرب ضریب تنش آبی در رابطه ۲ محاسبه گردید.

رابطه ۲) $V = (\theta_{FC} - \theta) \times \rho_b \times D_r \times A$

دراین‌رابطه، V حجم آب ورودی بر حسب مترمکعب، θFC درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه، θ درصد رطوبت وزنی قبل از آبیاری، ρb وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، Dr عمق توسعهٔ ریشه بر حسب متر و A مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع است (θFC=۲۴، θ =۱۰، ρb=۱/۳ و Dr=۵۵).

جدول ۲- حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها طی فصل رشد (متر مکعب در هکتار)

تیمارهای آبیاری	سطح آبیاری				
	۵۰ PRD درصد نیاز آبی	۷۵ PRD درصد نیاز آبی	۵۰ درصد نیاز آبی	۷۵ درصد نیاز آبی	۱۰۰ درصد نیاز آبی
میزان آبیاری	۴۴۳۶/۵	۶۶۵۵	۴۴۳۶/۵	۶۶۵۵	۸۸۷۳

محتوی نسبی آب در برگ بلال (RWC)، روز قبل از آبیاری به صورت دیسک‌هایی از برگ بلال بین ساعت هشت تا نه صبح گرفته شده و بلافاصله نمونه‌ها در کلمن حاوی یخ قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل گردید. پس از توزین نمونه (وزن تازه، FW)، به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار داده شده و مجدد وزن (وزن تورژسانس، TW) و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد در آون قرار گرفته و سپس وزن گردید (وزن خشک، DW). میزان آب نسبی برگ با استفاده از رابطه ۳، اندازه گیری شد (Sanchez *et al*., 1998).

رابطه ۳) $RWC = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100$

برای استخراج و سنجش پرولین از روش Bates *et al*., (1973) استفاده شد. برای این منظور ۵۰۰ میلی‌گرم از بافت برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک آبدار ۳ درصد کاملا سائیده شده تا محلول همگن ایجاد شود . دو میلی‌لیتر از محلول حاصل با دو میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال در یک لوله آزمایش مخلوط شدند و به مدت یک ساعت در حمام آب‌گرم (بن ماری) ۱۰۰ درجه قرار گرفتند. به محتویات لوله چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه به شدت به هم زده شد. این عمل موجب دو فاز شدن محتویات لوله می‌شود. پس از مدت ۲۰ دقیقه جذب نوری محلول در ۵۲۰ نانومتر خوانده شد و با استفاده از منحنی استاندارد حاصل از غلظت‌های مختلف پرولین، بر حسب میکرومول پرولین در گرم وزن تر برگ محاسبه شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز از طریق اندازه‌گیری میزان کاهش جذب ناشی از تجزیه سوبسترای پراکسید هیدروژن به روش Aebi (1984) اندازه‌گیری شد. کمپلکس واکنشی شامل بافر فسفات پتاسیم، پراکسید هیدروژن، آب دو بار تقطیر و محلول آنزیمی تهیه شد. یک واحد فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان مقدار آنزیم مورد نیاز برای تجزیه یک میکرومول سوبسترای پراکسید هیدروژن به صورت نور جذبی در طول موج ۲۹۰ نانومتر در یک دقیقه قرائت و با استفاده از ضریب خاموش $۳۶/۶ \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ میزان فعالیت آنزیم محاسبه شد.

میزان مالون‌دی‌آلدئید بر اساس روش Stewart & Beweley (1980) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برگی بعد از هضم توسط ازت مایع

به مدت ۱۰ دقیقه در g ×۱۵۰۰۰ سانتریفوژ گردیدند. کمپلکس واکنشی شامل تری کلرواستیک اسید و تیوباربیتوریک اسید تهیه و پس از انتقال به حمام آب سرد مجدداً سانتریفوژ و جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (Specord 50_UV_Visible شرکت Analityk jena کشور آلمان) اندازه‌گیری شد. میزان مالون‌دی‌آلدئید از اختلاف بین موج‌های جذبی و ضریب خاموشی $mmol^{-1}\ cm^{-1}$ ۱۵۵ به‌دست آمد. برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزار SAS (ver 9.4) و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح ۵٪ انجام شد برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX[1]) به روش Ranieri *et al.*, (2003) سنجیده شد. محیط واکنش حاوی ۶۰۰ میکرولیتر از EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات۵۰ میلی‌مولار (pH= ۷، ۴۰۰ میکرولیتر آسکوربیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار، ۴۰۰ میکرولیتر H2O2 ۳۰ درصد و۵۰ میکرولیتر عصارهٔ آنزیمی بود. سنجش فعالیت آنزیم در طول دو دقیقه با فاصله‌های زمانی بیست ثانیه‌ای ثبت شد . در نتیجهٔ واکنش بین آسکوربیک اسید و H2O2 در حضور آنزیم آسکوربات پراکسیداز، دهیدروآسکوربات تولید می‌شود که در طول موج ۲۹۰ نانومتر خوانده و فعالیت آنزیمی به ازای تغییرات جذب به ازای میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بیان گردید.

برای اندازه گیری صفات مربوط به فعالیت بیولوژیک خاک در مرحله گلدهی ذرت، ۵۰۰ گرم خاک مجاور ریشه از هر کرت فرعی در هر تکرار برداشت گردید. فسفاتاز اسیدی و قلیایی به روش Ohlinger (1996) اندازه‌گیری گردید به همین منظور خاک‌ها در کیسه‌های نایلونی و همراه با کیسه‌های یخ داخل ظرف یونولیتی به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها در آزمایشگاه از الک ۲ میلی مترعبور داده و تا روز آزمایش در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری گردیدند. با استفاده از واکنش آنزیم/ سوبسترا و محصول به‌دست آمده به کمک اسپکتروفتومتر فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی بر حسب میکروگرم پارا نیترو فنل فسفات(pNP[2]) در گرم خاک، اندازه گیری شد.

اندازه‌گیری آنزیم اوره آز با استفاده از روش Kandeler & Gerber (1998) و بر حسب ($\mu g\rho$ NH4 Nml-5dwt 2 h^{-1}) محاسبه شد. در این روش رنگ عصاره در محدوده زرد تا سبز متغیر خواهد بود که با اسپکتروفتومتر با طول موج ۶۹۰ نانومتر قرائت گردید. سپس با استفاده از رابطه ۴ میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز محاسبه شد.

رابطه ۴) $(\mu g\ NH_4 - Nml^{-5}) * V * 10)/dWt * 5$

$\mu gNH_4 - Nml^{-5}$: مقدار قرائت جزب شده توسط اسپکتروفتومتر، ۱۰: فاکتور رقت، ۵: مقدار خاک مورد استفاده، V : حجم کل عصاره (۵۲/۵) و dWt: وزن خاک خشک می‌باشد.

برای اندازه گیری تنفس میکروبی از روش اندرسون (Anderson, 1982) استفاده شد. بدین ترتیب که ۱۰ گرم از خاک هر نمونه توزین کرده و به درون ظروف شیشه‌ای درب دار ویژه‌ای اندازه‌گیری تنفس ریخته شد. سپس لوله آزمایشی حاوی ۱۰ میلی لیتر محلول NaOH ۰/۱ نرمال در درون ظروف قرار داده شد . درب ظرف‌ها بطور محکم بسته شد و نمونه‌ها به مدت ۳ روز در دمای ۲۵ درجه نگهداری شدند. تیتراسیون نمونه‌ها با HCl ۰/۱ نرمال پس از سه روز انجام شد. در پایان مقدار CO2 آزاد شده با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

رابطه ۵) $BR= \frac{2.2\times(Vb-Vs)\times Ws}{W\times t}$

BR تنفس میکروبی پایه (Basal Respiration) به واحد میلی‌گرم CO2-C در گرم خاک در روز، V_b حجم اسید کلریدریک مصرف شده برای نمونه شاهد (ml)، V_s حجم اسید کلریدریک مصرف شده برای نمونه خاک (ml)، Ws وزن اولیه خاک نمونه (گرم)، W وزن خشک خاک (گرم)، t زمان انکوباسیون (روز) و عدد ۲/۲ یک ضریب تبدیل است که بر اساس معادل‌های شیمیایی CO2 و اسید استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیولوژیکی:

محتوای رطوبت نسبی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد محتوای رطوبت نسبی (RWC[3]) در سطح ۱ درصد تحت‌تأثیر سطوح آبیاری معنی‌دار شد. باتوجه‌به نتایج مقایسات میانگین در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، بالاترین میزان رطوبت نسبی (۸۵/۶۲ درصد) و در سطح آبیاری ۵۰ درصد معمولی و ۵۰ درصد PRD پایین‌ترین میزان رطوبت نسبی (به ترتیب ۶۶/۲ درصد و ۷۰/۴۴ درصد) حاصل شد

1 Ascorbate peroxidase
2 p-nitrophenyl phosphate
3 Relative Water Content

(جدول ۳). نکته قابل‌توجه این است که در سطح آبیاری ۵۰ درصد، PRD با ۷۰/۴۴ درصد محتوای نسبی آب برگ، وضعیت بهتری نسبت به تیمار آبیاری ۵۰ درصد معمولی با ۶۶/۲ درصد نشان داده است، هرچند این دو تیمار در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند. آبیاریPRD در سطح ۷۵ درصد رطوبت برگ را تنها ۸/۹ درصد کاهش داده است، درحالی‌که آبیاری معمولی ۷۵ درصد کاهش ۹/۴ درصدی داشت. این نشان‌دهنده کارایی بالاتر PRD در حفظ آب برگ است. این یافته با نتایج پژوهش‌های عزیزپور و همکاران (۱۳۹۶) و Hu *et al.* (2024) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد گیاهانی که در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند، با افزایش مواد اسمزی در بافت‌های خود، فضای بین سلولی و میزان آب در اندام‌ها را به حداقل می‌رسانند. این فرایند باعث می‌شود که آب با نیروی بیشتری از خاک جذب شود، که در نهایت منجر به کاهش رطوبت نسبی برگ در شرایط کم آبیاری می‌شود (عزیزپور و همکاران، ۱۳۹۶). در شرایط خشکی، کاهش پتانسیل آب خاک منجر به کاهش جذب آب توسط گیاه می‌شود و در نتیجه، محتوای آب نسبی برگ‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش محتوای آب نسبی به کاهش هدایت روزنه‌ای می‌انجامد و در نهایت، فتوسنتز گیاه کاهش می‌یابد (Martınez, 2007). همچنین در شرایط خشکی، کاهش آب در بافت‌های گیاهی، رشد را محدود می‌کند و منجر به تغییرات فیزیولوژیکی و متابولیکی می‌شود (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). محتوی نسبی آب (RWC) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی وضعیت آبی گیاه است که به جذب آب توسط ریشه‌ها و تعرق آن از طریق برگ‌ها مرتبط است. در واقع، RWC سطح رطوبت سلول و بافت را نشان می‌دهد که برای سوخت‌وساز فیزیولوژیکی گیاه بسیار مهم است. فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه به محتوای آب آن بستگی دارد و تغییر در RWC به طور مستقیم تمام مراحل فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می دهد (Mofizur Rahman & Hasegawa, 2012).

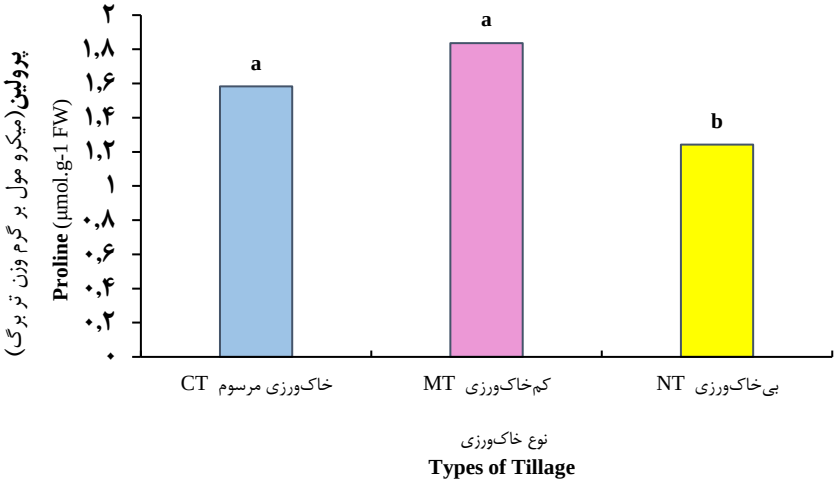
جدول۳: مقایسه میانگین اثرات خاکورزی و سطوح آبیاری بر صفات فیزیولوژیکی ذرت

تیمار آبیاری	رطوبت نسبی (درصد)	پرولین (میکرو مول بر گرم وزن تر برگ)	مالون دی آلدئید (نانو مول بر گرم برگ تر)	آسکوربات پراکسیداز (تغییرات جذب در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین)
آبیاری ۱۰۰٪	a۸۵/۶۲	c۱/۱۹	C۰/۴۲	c۰/۴۱
آبیاری ۷۵ ٪	b۷۷/۵۵	c۱/۲	b۱/۲۱	b۰/۶۲
آبیاری ۵۰ ٪	c۶۶/۲	a۲/۰۶	a۱/۶۱	a۱/۱۳
PRD 75 % آبیاری	b۷۸/۰۲	b۱/۶۴	b۱/۱۸	b۰/۷۲
PRD 50 % آبیاری	c۷۰/۴۴	b۱/۶۵	b۱/۲	b۰/۷۵

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک هستند دارای تفاوت آماری در سطح پنج درصد نمی‌باشند.

پرولین: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف آبیاری و خاک‌ورزی بر میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. باتوجه‌به نتایج مقایسات میانگین بیشترین تجمع پرولین به‌عنوان یک اسیدآمینه سازگارکننده در شرایط تنش، در سطح آبیاری ۵۰ درصد معمولی (۲/۰۶ میکرو مول بر گرم وزن تر برگ) و کمترین میزان فعالیت آن در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (به ترتیب ۱/۱۹ و ۱/۲ میکرو مول بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد (جدول ۳). جالب‌توجه است که تیمارهای PRD (۷۵ و ۵۰ درصد) مقادیر پرولین کمتری (به ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۶۵ میکرو مول بر گرم وزن تر برگ) نسبت به تیمار ۵۰ درصد معمولی داشته‌اند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تنش کمتر وارد شده به گیاه در روش PRD در مقایسه با آبیاری یکنواخت با همان مقدار آب باشد. مطالعه Hu *et al, (2024)* روی پنبه نشان می‌دهد PRD با کاهش هدایت روزنه‌ای و افزایش هدایت مزوفیل، تعادل آب را بهبود می‌بخشد. این مکانیسم احتمالاً دلیل کاهش تجمع پرولین در PRD (نسبت به آبیاری معمولی) است. سیادت و همکاران (۱۳۹۴) و Anjum *et al.* (2016) گزارش نمودند که با افزایش تنش خشکی میزان پرولین برگ ذرت افزایش یافت. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که گیاهان انواع مختلفی از اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین را به‌عنوان مکانیزم سازگاری برای تحمل خشکی انباشته می‌کنند (Ashraf, & Foolad, 2007). افزایش محتوی پرولین در شرایط تنش موجب حفاظت از سیستم فتوسنتزی (Verbruggen, & Hermans, 2008)، غشای سلولی، پایداری پروتئین‌ها و آنزیم‌های سیتوپلاسمی، کنترل گونه‌های فعال اکسیژن و حذف رادیکال‌های آزاد می‌گردد (Liang *et al*., 2013) و به‌عنوان موادی برای بازسازی ترکیب‌های ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرند (La, *et al*., 2019). در میان مکانیسم‌های سلولی مختلفی که در مواجهه با تنش وجود دارند، تجمع کربنات سازگارکننده مانند پرولین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اسیدآمینه با خنثی بودن و حلالیت بالای آن در آب، می‌تواند در شرایط تنش تا ۸۰ درصد از اسیدآمینه‌های سلول را تشکیل دهد (ولدیانی و همکاران، ۱۳۸۴). پرولین با تامین

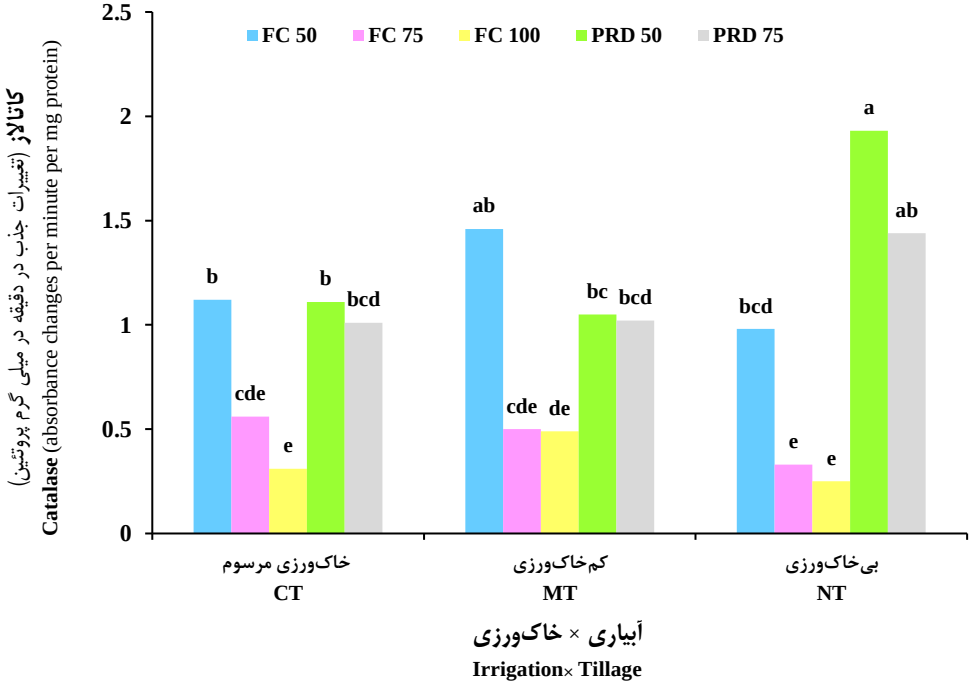
نیتروژن و کربن برای گیاهان در شرایط تنش شدید، نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان در برابر این تنش‌ها ایفا می‌کند (Amini *et al.*, 2015). همچنین مقایسه میانگین میزان پرولین تحت تاثیر سطوح خاک‌ورزی نشان داد که بیشترین تجمع پرولین در کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم (به ترتیب ۱/۸۳ و ۱/۵۸ میکرو مول بر گرم وزن تر برگ) و کمترین میزان آن در بی‌خاک‌ورزی (۱/۲۴ میکرو مول بر گرم وزن تر برگ) بود (شکل ۲). پاپایی و همکاران (۱۴۰۳) گزارش نمودند که بیشترین میزان پرولین در ماشک علوفه‌ای در روش کم‌خاک‌ورزی حاصل شد. تجمع بالاتر پرولین در کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم ممکن است نشان‌دهنده تنش خشکی بیشتر در این سیستم‌ها باشد و در مقابل بی‌خاک‌ورزی با حفظ ساختار طبیعی خاک، تنش را کاهش داده و بنابراین نیاز به تجمع پرولین کمتر شده است.



شکل ۲- مقایسه میانگین روش خاک‌ورزی بر پرولین

کاتالاز: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل خاک‌ورزی و آبیاری بر محتوای کاتالاز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده اما خاک‌ورزی فاقد اثر معنی‌دار بر این صفت بود. مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تاثیر اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری نشان داد که با افزایش تنش خشکی و کاهش خاک‌ورزی میزان فعالیت این آنزیم به طور معنی‌داری افزایش یافته است. بیشترین میزان فعالیت کاتالاز در شرایط بی‌خاک‌ورزی و آبیاری PRD ۵۰ درصد (۱/۹۳ تغییرات جذب در دقیقه در میلی گرم پروتئین) و کمترین میزان فعالیت آن در شرایط بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب (۰/۲۵ و ۰/۳۳ تغییرات جذب در دقیقه در میلی گرم پروتئین) و در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (۰/۳۱ تغییرات جذب در دقیقه در میلی گرم پروتئین) حاصل شد (شکل ۳). بررسی مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم کاتالاز در تمامی روش‌های خاک‌ورزی با کاهش میزان آبیاری افزایش یافته است. در شرایط خاک‌ورزی مرسوم، کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد موجب افزایش ۲۶۱ درصدی فعالیت کاتالاز (از ۰/۳۱ به ۱/۱۲) شده است (شکل ۳). در شرایط کم‌خاک‌ورزی، این افزایش ۱۹۸ درصد (از ۰/۴۹ به ۱/۴۶) و در شرایط بی‌خاک‌ورزی ۲۹۲ درصد (از ۰/۲۵ به ۰/۹۸) بوده است. بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۵۰ درصد PRD (۱/۹۳) مشاهده شد. بالاتر بودن فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی و به‌خصوص در تیمار آبیاری PRD نشان دهنده پاسخ سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه به تنش آبی است. به نظر می‌رسد که افزایش قابل توجه فعالیت کاتالاز در شرایط آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD) نسبت به آبیاری معمولی در سیستم بی‌خاک‌ورزی بدلیل مکانیسم منحصر به فرد آبیاری PRD باشد که در این روش، بخشی از ریشه در معرض خشکی قرار گرفته در حالی‌که بخش دیگر آبیاری می‌شود. این وضعیت منجر به تولید سیگنال‌های شیمیایی و هیدرولیکی در ریشه و انتقال آنها به اندام‌های هوایی می‌شود (Iqbal et al, 2021, Christmann et al, 2007). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در شرایط PRD، سطح تولید هورمون ABA در ریشه‌هایی که در بخش خشک قرار دارند، افزایش می‌یابد و سپس این هورمون به برگ‌ها منتقل می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۴۰۲). در شرایط آبیاری PRD، سیگنال‌های ناشی از تنش به‌صورت متناوب و مداوم تولید می‌شوند که می‌تواند منجر به فعال‌سازی قوی‌تر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی شود. همچنین گیاه به طور متناوب در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرد که می‌تواند اثر پرایمینگ (آماده‌سازی) ایجاد کند. این پدیده باعث می‌شود گیاه در مواجهه بعدی با تنش، پاسخ سریع‌تر و قوی‌تری داشته باشد. تحقیقات حاکی از آن است که تنش خشکی منجر به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود و به منظور خنثی کردن این ترکیبات مضر، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز افزایش می‌یابد (Al-Mokadem, *et al.*, 2023؛ داریوش‌کریمی و همکاران، ۱۴۰۰). محمدی و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند که میزان آنزیم کاتالاز در سیستم

بی‌خاک‌ورزی بیشتر از سایر سیستم‌های خاک‌ورزی بوده است هر چند با سیستم کم‌خاک‌ورزی اختلاف معنی داری نداشته است. در سیستم بی‌خاک‌ورزی، ساختار خاک و محتوای ماده آلی بهتر حفظ می‌شود که می‌تواند ظرفیت نگهداری آب و دسترسی به مواد مغذی را بهبود بخشد. این شرایط می‌تواند به گیاه اجازه دهد تا پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی قوی‌تری در شرایط تنش داشته باشد. ترکیب سیستم بی‌خاک‌ورزی با تکنیک PRD ممکن است شرایط بهینه‌ای برای فعال‌سازی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی فراهم کند. کاتالاز یک آنزیم آنتی اکسیدانی مهم است و افزایش فعالیت آن باعث مقاومت در برابر استرس می‌شود (Bazrgar *et al*., 2023). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهان در شرایط تنش خشکی یک سازگاری مهم است که به کاهش پراکسید هیدروژن تولید شده در پراکسی زوم‌ها کمک می‌کند. این کار با تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن انجام می‌شود و از بروز آسیب به سلول و بافت جلوگیری می‌کند (Gao *et al*., 2020 & Gill and Tuteja., 2010).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر محتوای کاتالاز

مالون‌دی‌آلدئید: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوی مالون‌دی‌آلدئید معنی‌دار بود. باتوجه‌به مقایسات میانگین، بیشترین میزان فعالیت آن در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (۱/۶۱ نانو مول بر گرم برگ تر) و کمترین میزان فعالیت در آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (۰/۴۲ نانو مول بر گرم برگ تر) بود (جدول ۳). مالون‌دی‌آلدئید (MDA[1]) به‌عنوان شاخصی برای پراکسیداسیون لیپیدی و آسیب اکسیداتیو سلولی، الگویی مشابه با پرولین نشان داده است. با کاهش میزان آبیاری، افزایش قابل‌توجهی در میزان MDA مشاهده شده است. آبیاری ۷۵ درصد معمولی موجب افزایش ۱۸۸/۱۰ درصد میزان MDA (از ۰/۴۲ به ۱/۲۱ نانو مول بر گرم برگ تر) نسبت به آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) شده است. این افزایش در تیمار آبیاری ۵۰ درصد معمولی به ۲۸۳/۳۳ درصد (از ۰/۴۲ به ۱/۶۱) رسیده است. درحالی‌که تیمارهای PRD (۷۵ و ۵۰ درصد) مقادیر کمتری (۱/۱۸ و ۱/۲ نانو مول بر گرم) نشان داده‌اند. همچنین مقایسه بین تیمارهای آبیاری معمولی و PRD در سطوح یکسان آب نشان می‌دهد که در سطح ۵۰ درصد، تیمار PRD میزان MDA کمتری نسبت به آبیاری معمولی (۱/۲ در مقابل ۱/۶۱) داشته است. این نتیجه نشان می‌دهد که آبیاری به روش PRD با همان میزان آب مصرفی، تنش اکسیداتیو کمتری را به گیاه وارد می‌کند. رضایی و همکاران (۱۴۰۲) و صادقی پور (۱۳۹۷) گزارش نمودند که با افزایش تنش خشکی در ماش میزان MDA افزایش یافت. مالون‌دی‌آلدئید یک محصول حاصل از پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع در فسفولیپیدها است و به‌عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی آسیب ناشی از رادیکال‌های آزاد به غشای سلولی در شرایط استرس اکسیداتیو شناخته می‌شود (Bhardwaj, & Yadav, 2012). بنابراین MDA به‌عنوان یک معرف برای بررسی میزان صدمات غشاء در شرایط تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Jaleel *et al*., 2007). البته پراکسیداسیون لیپید در کلروپلاست و میتوکندری هم صورت می گیرد (Elstner, 1991). پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی در نتیجه فعالیت ROS یکی از مهم‌ترین اثرات منفی تنش خشکی است

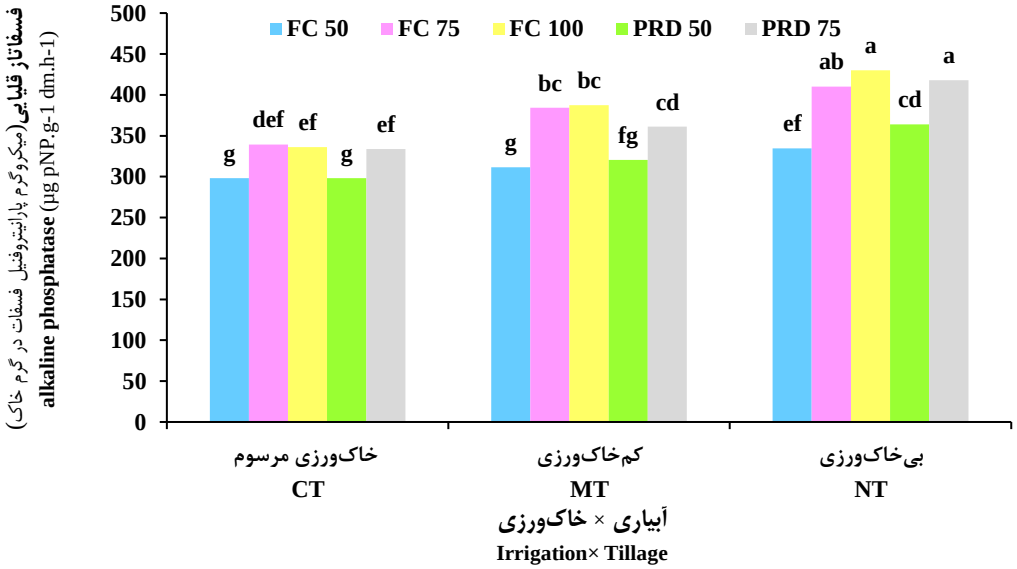
1 Malondialdehyde

(Upadhyaya & Panda, 2004).

آسکوربات پراکسیداز: اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین میزان فعالیت آن در سطح آبیاری ۵۰ درصد معمولی (۱/۱۳ تغییرات جذب در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) و کمترین میزان فعالیت آن در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (۰/۴۱ تغییرات جذب در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) به دست آمد (جدول ۳). آسکوربات پراکسیداز یکی از آنزیم‌های مهم سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی است. با کاهش میزان آبیاری، فعالیت این آنزیم افزایش‌یافته است. آبیاری ۷۵ درصد معمولی موجب افزایش ۵۱/۲۲ درصد فعالیت APX (از ۰/۴۱ به ۰/۶۲) نسبت به آبیاری کامل (۱۰۰ درصد) شده است. این افزایش در تیمار آبیاری ۵۰ درصد معمولی به ۱۷۵/۶۱ درصد (از ۰/۴۱ به ۱/۱۳) رسیده است. مقایسه بین تیمارهای آبیاری معمولی و PRDدر سطوح یکسان آب نشان داد که در سطح ۵۰ درصد، تیمار PRD، آسکوربات پراکسیداز فعالیت کمتری (۳۳/۶۳ درصد کاهش) نسبت به آبیاری معمولی (۰/۷۵ در مقابل ۱/۱۳) داشته است. این نتیجه همانند نتایج MDA، تأیید نمود که تیمار PRD تنش اکسیداتیو کمتری را به گیاه وارد می‌کند. داریوش‌کریمی و همکاران (۱۴۰۰) در گیاه ذرت و Khosrowshahi, *et al.* (2020) در گیاه روغنی گلرنگ گزارش نمودند که با افزایش سطح تنش خشکی میزان آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت. از دیدگاه محققان، آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌عنوان یک آنزیم آنتی‌اکسیدانی عمل می‌کند که در احیای رادیکال‌های آزاد، به‌ویژه پراکسید هیدروژن، نقش مهمی دارد. این آنزیم می تواند خسارت‌های ناشی از تنش اکسیداتیو را به حداقل ممکن برساند (کافی و همکاران، ۱۳۹۷).

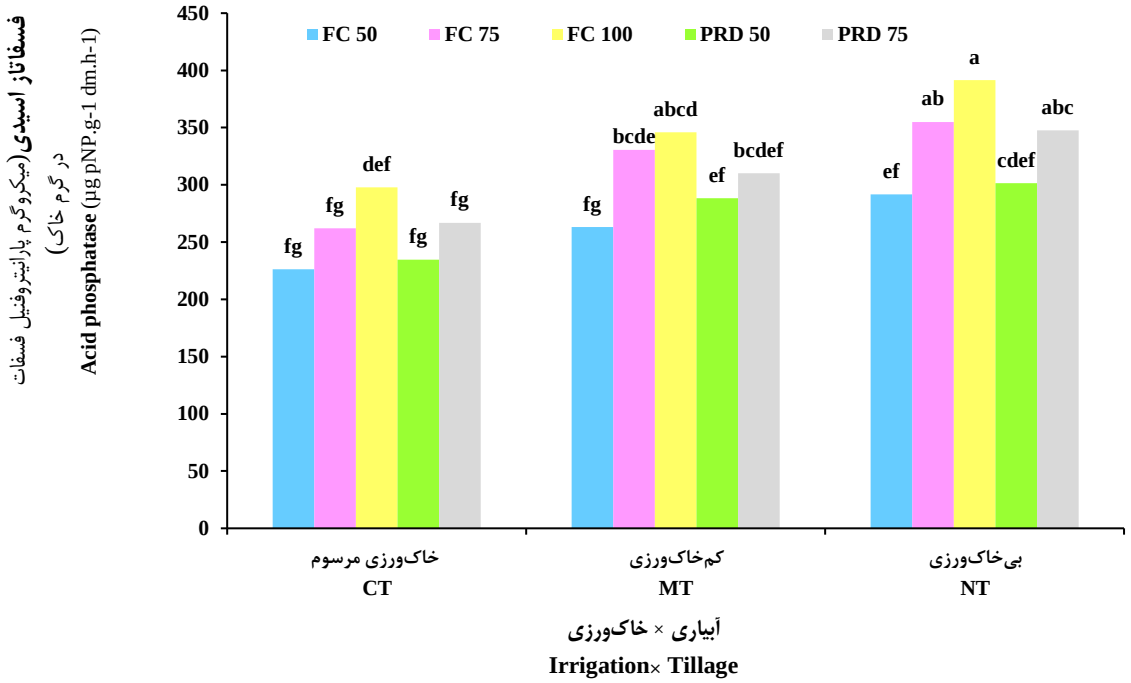
خصوصیات زیستی و آنزیمی خاک:

فسفاتاز قلیایی: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری در سطح احتمال ۱ درصد و اثر خاک‌ورزی نیز در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل خاک‌ورزی و آبیاری بر محتوای فسفاتاز قلیایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی تحت‌تأثیر اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین میزان فسفاتاز قلیایی در بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ و PRD ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (به ترتیب ۱۱/ ۴۳۰ و ۴۱۷/۷۴ میکروگرم پارا نیترو فنیل فسفات در گرم خاک) و کمترین میزان آن در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری ۵۰ درصد معمولی و PRD ۵۰ درصد (به ترتیب ۲۹۸/۱۷ و ۲۹۸/۲۲ میکروگرم پارا نیترو فنیل فسفات در گرم خاک) و همچنین در شرایط کم‌خاک‌ورزی آبیاری ۵۰ درصد معمولی (۳۱۱/۵۳ میکروگرم پارا نیترو فنیل فسفات در گرم خاک) بود (شکل ۴). این نتایج با گزارش میرزاوند و اسدی رحمانی (۱۳۹۹) که اظهار نمودند بیشترین میزان فعالیت فسفاتاز قلیایی در گندم و ذرت در سیستم بی‌خاک‌ورزی و حفظ ۳۰ درصد بقایای گیاهی بوده است و همچنین نتایج مطالعات حسینی و همکاران (۱۴۰۳) مبنی بر بیشترین فعالیت فسفاتاز قلیایی در تیمار آبی ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، مطابقت دارد. به‌طورکلی، سیستم بی‌خاک‌ورزی نسبت به کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم فعالیت فسفاتاز قلیایی بالاتری را نشان می‌دهد. کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد در سیستم خاک‌ورزی مرسوم باعث کاهش ۱۱/۳ درصد و در سیستم بی‌خاک‌ورزی حدود ۲۲/۲۵ درصدی در فعالیت فسفاتاز قلیایی شد. درحالی‌که در روش PRD این کاهش به ۱۵/۴۲ درصد رسیده است که نشان‌دهنده تأثیر کمتر تنش در روش آبیاری PRD است. در خاک‌ورزی مرسوم و در سطح آبیاری ۷۵ درصد معمولی فسفاتاز قلیایی ۰/۹۲ درصد افزایش داشت که در مقایسه با آبیاری ۱۰۰ درصد تفاوت معنی‌داری نداشت. تنش ملایم آبی ممکن است ترکیب جامعه میکروبی خاک را به نفع گونه‌هایی تغییر دهد که در شرایط محدودیت آب، فعالیت بیشتری داشته و مقادیر بالاتری از آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی تولید می‌کنند همچنین گیاهان در پاسخ به کمبود ملایم آب ممکن است الگوی ترشحات ریشه‌ای خود را تغییر دهند. این ترشحات می‌تواند شامل آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی باشد که برای افزایش جذب فسفر از خاک در شرایط تنش ملایم ترشح می‌شوند (Santos-Medellín *et al*, 2017). این افزایش تنها در فسفاتاز قلیایی در شرایط خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شده، درحالی که سایر آنزیم‌ها (فسفاتاز اسیدی، اوره‌آز) و تنفس میکروبی در همین شرایط کاهش یافته‌اند. این نشان‌دهنده حساسیت متفاوت آنزیم‌های مختلف خاک به تنش آبی است. همچنین فسفاتاز قلیایی در شرایط آبیاری ۷۵ درصد و کم‌خاک‌ورزی ۰/۸۲ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۴/۶۳ درصد نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد کاهش یافت. اما با کاهش سطح آبیاری به ۵۰ درصد، فسفاتاز قلیایی در خاک‌ورزی مرسوم ۱۱/۲۹ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۱۹/۵۸ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲۲/۲۵ درصد کاهش یافت و در آبیاری PRD میزان کاهش فعالیت آنزیم کمتر بود. در آبیاری ۷۵ درصد PRD و خاک‌ورزی مرسوم فسفاتاز قلیایی ۰/۷۴ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۶/۸۱ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲/۸۸ درصد کاهش یافت. در سطح آبیاری ۵۰ درصد PRD فسفاتاز قلیایی در خاک‌ورزی مرسوم ۱۱/۲۷ درصد، در کم خاک‌ورزی ۱۷/۳۱ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۱۵/۴۲ درصد کاهش یافت. همچنین یافته‌های Jin, *et al.* (2009) نشان می‌دهد که خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش فعالیت آنزیمی خاک می‌گردد.



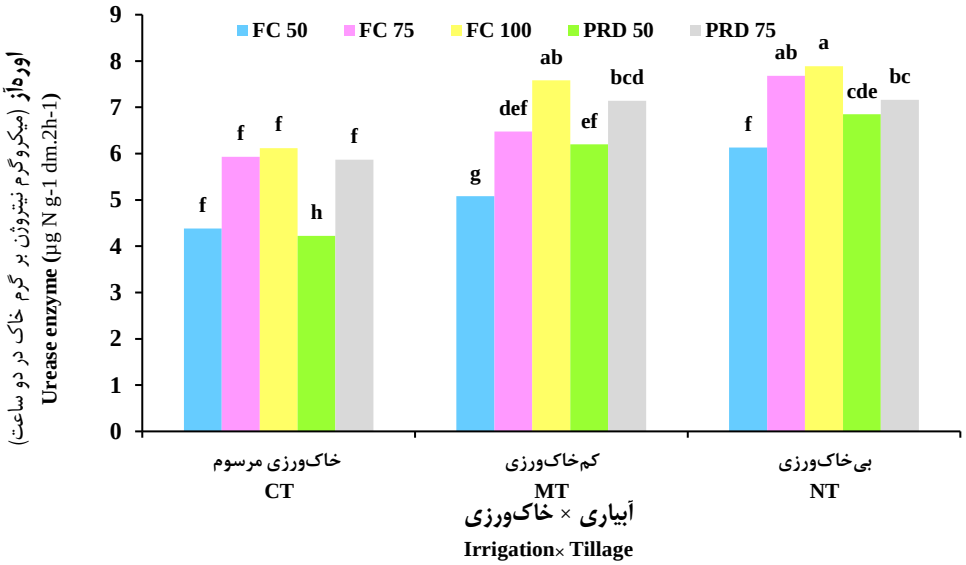
شکل ٤- مقایسه میانگین برهمکنش خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر فسفاتاز قلیایی

فسفاتاز اسیدی: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح آبیاری و خاک‌ورزی در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل خاک‌ورزی و آبیاری بر محتوای فسفاتاز اسیدی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی تحت تاثیر اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین میزان این آنزیم در بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (۳۹۱/۴ میکروگرم پارانیتروفنیل فسفات در گرم خاک) و کمترین میزان آن در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری ۵۰ درصد PRD و ۷۵ درصد معمولی و ۷۵ درصد PRD ظرفیت زراعی مزرعه و در شرایط کم‌خاک‌ورزی و آبیاری ۵۰ درصد معمولی (به ترتیب ۲۲۶/۲، ۲۳۴/۶، ۲۶۲/۱، ۲۶۶/۹ و ۲۶۳/۱ میکروگرم پارانیتروفنیل فسفات در گرم خاک) بود (شکل ۵). کاهش آبیاری به ۷۵ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش نسبی فعالیت آنزیم فسفاتاز شد و در خاک‌ورزی مرسوم ۱۲/۰۲ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۴/۴۰ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۹/۳۳ درصد کاهش یافت همچنین فسفاتاز اسیدی در آبیاری ۵۰ درصد معمولی و در خاک‌ورزی مرسوم ۲۴/۰۷ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۲۳/۹۲ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲۵/۵۰ درصد کاهش یافت. استفاده از روش آبیاری PRD در سطح ۷۵ درصد نتایج متفاوتی نسبت به آبیاری معمولی ۷۵ درصد نشان داد و فسفاتاز اسیدی در خاک‌ورزی مرسوم ۱۰/۴۱ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۱۰/۲۹ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۱۱/۱۷ درصد کاهش یافت در حالی‌که در PRD ۵۰ درصد، کاهش فعالیت این آنزیم در خاک‌ورزی مرسوم ۲۱/۲۵، در کم‌خاک‌ورزی ۱۶/۶۶ و در بی‌خاک‌ورزی ۲۲/۹۹ بود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش Omidi, *et al.* (2008) و محمدی و همکاران (۱۳۹۱) که اظهار داشتند فعالیت فسفاتاز اسیدی در سیستم بدون خاک‌ورزی نسبت به سایر سیستم‌های خاک‌ورزی افزایش معنی‌داری داشته است و همچنین نتایج مطالعات حسینی و همکاران (۱۴۰۳) مبنی بر بیشترین فعالیت فسفاتاز اسیدی در تیمار آبی ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، مطابقت دارد. دسترسی بیشتر میکروبیوم به آب به دلیل کاهش تبخیر در سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی، یکی از عوامل کلیدی در افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک است. همچنین، خاک‌ورزی با تخریب زیستگاه‌های اکولوژیک میکروبی، منجر به کاهش فعالیت و تعداد این جوامع می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).



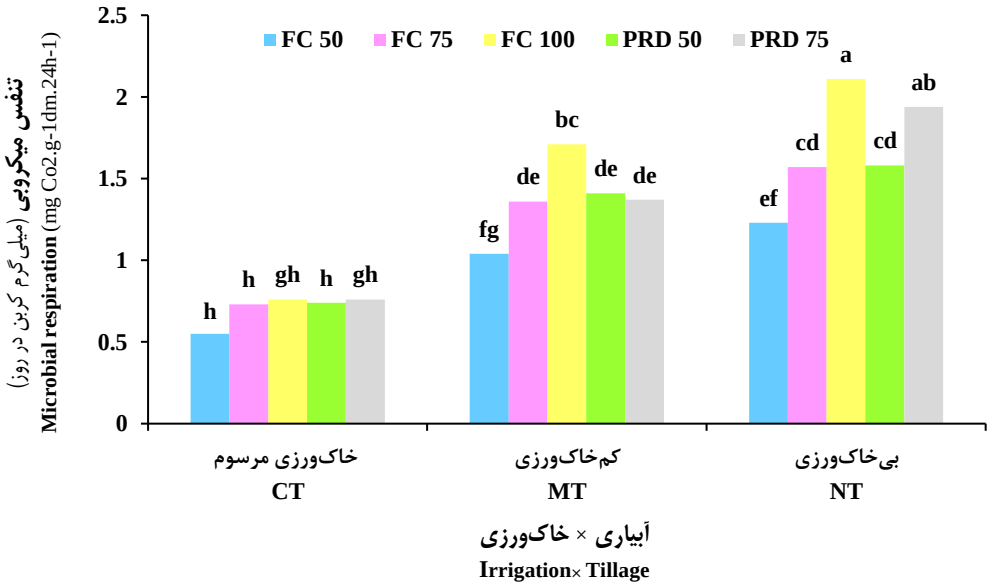
شکل ٥- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر فسفاتاز اسیدی

اوره‌آز: باتوجه‌به نتایج اثر خاک‌ورزی و آبیاری در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل خاک‌ورزی و آبیاری بر محتوای اوره‌آز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک تحت‌تأثیر اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین میزان این آنزیم در بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه (۷/۸۹ میکروگرم نیتروژن بر گرم خاک در دو ساعت) و کمترین میزان آن در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری PRD ۵۰ درصد (۴/۲۲ میکروگرم نیتروژن بر گرم خاک در دو ساعت) بود (شکل ۶). میزان فعالیت اوره‌آز با کاهش آبیاری به ۷۵ درصد ظرفیت زراعی در خاک‌ورزی مرسوم ۳/۱۰ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۱۴/۵۱ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲/۶۶ درصد و در سطح آبیاری ۵۰ درصد معمولی در خاک‌ورزی مرسوم ۲۸/۴۳ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۳۲/۹۸ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲۲/۳۱ درصد کاهش یافت. در روش آبیاری PRD در سطح ۷۵ درصد و خاک‌ورزی مرسوم ۴/۰۸ درصد، در کم خاک‌ورزی ۵/۸۰ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۹/۲۵ درصد و در سطح آبیاری ۵۰ درصد PRD و خاک‌ورزی مرسوم ۳۱/۰۵ درصد، در کم‌خاک ورزی ۱۸/۲۱ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۱۳/۱۸ درصد کاهش در پی داشت. فعالیت اوره‌آز در سیستم بی‌خاک‌ورزی با استفاده از روش PRD در سطح ۵۰ درصد آبیاری، نسبت به روش آبیاری معمولی (۲۲/۳۱ درصد) بهبود قابل‌توجهی نشان داد. پژوهشگران اعلام نمودند که کاهش عملیات خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم منجر به افزایش فعالیت آنزیم اوره‌آز در خاک شد (میرزاوند و اسدی رحمانی، ۱۳۹۹). همچنین محمدی و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند که میزان آنزیم اوره‌آز در سیستم بی‌خاک‌ورزی بیشتر از سایر سیستم‌های خاک‌ورزی بوده است؛ ولی با سیستم کم‌خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری نداشته است. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که یکی از دلایل افزایش فعالیت میکروبی خاک و بهبود فعالیت‌های آنزیمی در خاک‌ورزی حفاظتی، کاهش فشردگی خاک و افزایش ماده آلی آن است. این موضوع احتمالاً به دلیل کاهش به‌هم‌خوردگی خاک و اکسیداسیون کمتر ماده آلی است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ افشاری و همکاران، ۱۳۹۶). Zheng *et al.* (2018) نشان دادند که استفاده از بقایای گیاهی در خاک منجر به افزایش پایداری و استقرار جامعه میکروبی و بهبود فعالیت‌های آنزیمی خاک، مانند آنزیم‌های فسفاتاز و اوره‌آز می‌شود. اطلس وردی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش نمودند که بیشترین میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک در ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ذرت بوده است.



شکل ٦- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر اوره‌آز

تنفس میکروبی: تنفس میکروبی خاک تحت تاثیر روش‌های خاک‌ورزی و همچنین سطوح آبیاری در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد و همچنین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. بر اساس نتایج در شرایط بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد بیشترین میزان (۲/۱۱ میلی‌گرم کربن در روز) و در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری ۵۰ درصد معمولی کمترین میزان (۵۵/. میلی گرم کربن در روز) بود و پس از آن در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری ۷۵ درصد معمولی به میزان ۷۳/. میلی‌گرم کربن در روز و در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و آبیاری PRD ۵۰ درصد ۰/۷۴ میلی‌گرم کربن در روز به دست آمد که هر سه میزان ذکر شده در یک گروه آماری قرار داشتند (شکل ۷). با کاهش آبیاری به ۷۵ درصد، تنفس میکروبی در سیستم خاک‌ورزی مرسوم ۳/۹۵ درصد در کم‌خاک‌ورزی ۲۰/۴۷ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲۵/۵۹ درصد و در سطح آبیاری ۵۰ درصد معمولی و در سیستم خاک‌ورزی مرسوم ۲۷/۶۳ درصد، در کم خاک‌ورزی ۳۹/۱۸ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۴۱/۷۱ درصد کاهش‌یافته است. در روش آبیاری PRD در سطح ۷۵ درصد و در سیستم خاک ورزی مرسوم تنفس میکروبی بدون تغییر، در کم‌خاک‌ورزی ۱۹/۸۸ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۸/۰۶ درصد و در سطح آبیاری ۵۰ درصد PRD و در سیستم خاک‌ورزی مرسوم ۲/۶۳ درصد، در کم‌خاک‌ورزی ۱۷/۵۴ درصد و در بی‌خاک‌ورزی ۲۵/۱۲ درصد کاهش در پی داشت. به نظر می‌رسد باتوجه‌به افزوده‌شدن بقایای گیاهی با پوشش ۱۰۰ درصدی در عامل بی‌خاک‌ورزی سطح کربن آلی، تنفس خاک و کیفیت زیستی خاک افزایش‌یافته است؛ ولی از بقایای گیاهی برای پوشش عامل خاک‌ورزی مرسوم استفاده نشد که در نتیجه آن فعالیت‌های میکروبی کاهش‌یافته است. کاهش فشردگی خاک توسط Li *et al.* (2002) به‌عنوان یکی از دلایل افزایش فعالیت میکروبی خاک گزارش شده است، زیرا کاهش فشردگی خاک باعث افزایش رشد ریشه و ترشحات آن می‌گردد و به تحریک فعالیت ریز جانداران خاک منجر می شود. Liang *et al.* (2005) نشان دادند که استفاده از کود آلی (مانند کاه و کلش و کود سبز) در اطراف یا خارج از ریزوسفر، باعث افزایش سرعت تنفس در توده خاک ریزوسفر شده و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز و دهیدروژناز را بهبود بخشیده است. همچنین، جذب عناصر غذایی توسط گیاه جو افزایش یافته و تأثیر قابل توجهی بر فعالیت میکروبی و آنزیمی داشته است. تنفس میکروبی خاک به‌طور بنیادی یک فرآیند سلولی است که شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی می‌شود. این فرآیند نه تنها نشان‌دهنده وضعیت و فعالیت میکروب‌های خاک است، بلکه روند تجزیه مواد آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی از عناصر غذایی خاک را نیز نشان می‌دهد (Luo, & Zhou, 2006). تنش خشکی می‌تواند مستقیماً از طریق افزایش تنش اسمزی بر روی سلول‌های میکروبی و ریشه موجب مرگ سلول‌ها و در نتیجه کاهش فعالیت میکروبی و آنزیمی شود (Turner, *et al.*, 2003). همچنین تنش خشکی به‌صورت غیرمستقیم با کاهش فتوسنتز گیاه، منجر به کاهش تخصیص کربن جذب شده به ریشه و ترشحات ریشه شده و در نتیجه فعالیت‌های میکروبی در خاک را کاهش می‌دهد (Staszel, *et al.*, 2022).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر تنفس میکروبی

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه روش‌های مختلف آبیاری و خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه ذرت و زیستی خاک است. نتایج نشان داد که کاهش میزان آبیاری به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، موجب تغییرات قابل‌توجهی در شاخص‌های مرتبط با رطوبت نسبی برگ، تجمع پرولین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز (CAT) و آسکوربات پراکسیداز (APX)، و همچنین پراکسیداسیون لیپیدی (مالون‌دی‌آلدئید MDA) شد. روش آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD) در مقایسه با آبیاری معمولی، کارایی بیشتری در حفظ رطوبت برگ و کاهش تنش اکسیداتیو نشان داد. در سیستم خاک‌ورزی حفاظتی، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی، اوره‌آز و تنفس میکروبی تحت‌تأثیر شرایط آبیاری و نوع خاک‌ورزی قرار گرفت. سیستم بی‌خاک‌ورزی نسبت به کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم عملکرد بهتری در حفظ فعالیت آنزیمی خاک داشت. همچنین، روش PRD توانست اثرات منفی تنش خشکی بر فعالیت آنزیمی خاک را کاهش دهد. بر اساس نتایج، ترکیب سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی با تکنیک آبیاری ناحیه‌ای ریشه (PRD) به‌عنوان برترین روش برای مدیریت تنش خشکی در کشت ذرت عمل کرده است. در مقابل، تیمارهای مبتنی بر خاک‌ورزی مرسوم همراه با آبیاری معمولی (بدون PRD) کمترین کارایی را نشان دادند.

به‌کارگیری تیمار بی‌خاک‌ورزی و آبیاری ناحیه‌ای ریشه می‌تواند به عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر برای مقابله با تنش خشکی در کشت ذرت مورد استفاده قرار گیرد (Topcu et al., 2007). این رویکرد نه تنها موجب بهبود پاسخ‌های دفاعی و فیزیولوژیکی گیاه و افزایش تجمع پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Wang et al., 2017)، بلکه شرایط زیستی و فعالیت‌های آنزیمی خاک را نیز ارتقاء می‌بخشد (Wang et al., 2008) و در نتیجه پایداری و بهره‌وری سیستم زراعی را افزایش می‌دهد. استفاده از این نتایج در برنامه‌های مدیریت مزرعه به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند منجر به حفظ منابع آب (Sharma et al., 2014)، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش پایداری تولید محصولات کشاورزی گردد (بوگری و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین این یافته‌ها برای محققان و کارشناسان کشاورزی در طراحی و توسعه سیستم‌های زراعی پایدار و سازگار با تغییرات اقلیمی اهمیت دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع:

اطلس رودی، امیر، کاظمینی، سید عبدالرضا، بحرانی، محمدجعفر و سپهری، مژگان (۱۴۰۲). تأثیر برهم‌کنش کودهای شیمیایی و زیستی و کم آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت شیرین (*Zea mays L. Var saccharata*) و برخی شاخص‌های فعالیت بیولوژیکی خاک. *بوم شناسی کشاورزی*، ۱۵(۴)، ۷۲۳-۷۳۸. Doi:10.22067/AGRY.2022.73850.1082

افشاری، میترا، رمضان‌پور، محمود، ضیاییان، عبدالحسین، موسوی فضل، سید محمدهادی و ذبیحی، حمیدرضا (۱۳۹۶). بررسی اثر کاربرد کود شیمیایی و مواد آلی بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی در برخی از خاک‌های کشور. *زیست شناسی خاک*, ۵(۲), ۱۷۵-۱۸۳.
Doi: 10.22092/sbj.2018.115699

بذرگر، گلناز، نبوی کلات، سید محسن، خاوری خراسانی، سعید، قاسمی، محسن و کلیدری، علیرضا (۱۴۰۰). اثر تنش کم آبیاری و تراکم گیاه بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان، اسمولیت‌های سازگار، محتوای نسبی آب و عملکرد ذرت بچه (رقم پشن). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۶)، ۱۳۷۰-۱۳۸۱. Doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.12.2

بوگری، عیسی، آسودار، محمد امین، مرزبان، افشین و کاظمی، نواب (۱۳۹۹). بررسی کارایی مصرف آب، بهره‌وری انرژی، اقتصادی و عملکرد سیستم‌های مختلف کشت گندم- ذرت در شمال خوزستان. *دانش کشاورزی وتولید پایدار*، ۳۰(۴), ۲۹۵-۳۱۰. doi: 10.22034/saps.2020.12318

پاپایی، اردشیر، رفیعی، مسعود، خورگامی، علی و طالشی کاظم، (۱۴۰۳). اثر خاکورزی و سالیسیلیک اسید بر برخی از خصوصیات بیوشیمیایی دو رقم ماشک علوفه‌ای در شرایط دیم، مجله فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۳۱ ، شماره ۹۵ ، صفحه: ۱۶۱-۱۷۷، https://Doi.org/10.22034/13.59.161

پارسا، مهدی، کمائی، رضا و یوسفی، بهناز (۱۴۰۱). تاثیر کودهای زیستی و شیمیایی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فعالیت چند آنزیم آنتی‌اکسیدانتی گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) در شرایط تنش کم‌آبی. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)(علمی), ۳۵(۴), ۶۵۷-۶۷۳. Doi: 20.1001.1.23832592.1401.35.4.12.2

جواهری، تکتم، لکزیان، امیر، خراسانی، رضا و طاهری، پریسا (۱۳۹۳). بررسی فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی جدایه‌های مختلف قارچ‌های خاکزی در حضور ترکیبات آلی فسفره (اسید فیتیک و گلیسرو فسفات سدیم). *زیست‌شناسی خاک*، ۲(۱), ۱-۱۱. : Doi 10.22092/sbj.2014.100086

حسینی، سید سجاد، رجالی، فرهاد و کشاورز، پیمان (۱۴۰۳). تاثیر برخی کودهای زیستی بر خصوصیات فیزیولوژیک برگ پرچم گندم و فعالیت‌های آنزیمی ریزوسفر در سطوح مختلف آبیاری. *زیست شناسی خاک*، ۱۲(۱)، ۶۵-۸۸. Doi: 10.22092/sbj.2024.365435.263

حسینی، مریم سادات، حق نیا، غلامحسین، لکزیان، امیر و امامی، حجت (۱۳۹۱). تأثیر کوتاه مدت مدیریت پسماند گیاه جو بر فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتاز قلیایی در خاک. *آب و خاک*, جلد ۲۶ ، شماره ۳. Doi: 10.22067/jsw.v0i0.14877

حیدری، نرگس، پور یوسف، مجید و توکلی، افشین (۱۳۹۳). تاثیر تنش خشکی بر فتوسنتز، پارامترهای وابسته به آن و محتوای نسبی آب گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum L.*) مجله پژوهش‌های گیاهی (*مجله زیست شناسی ایران*) (علمی), ۲۷(۵), ۸۲۹-۸۳۹. Doi: 27507

داریوش‌کریمی، نوشین، مجدم، مانی، لک، شهرام، پاینده، خوشناز و شکوه فر، علیرضا (۱۴۰۰). اثر کاربرد سوپر جاذب و محلول‌پاشی آهن و روی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد ذرت دانه‌ای (*Zea mays L.*) (S.C.704) تحت رژیم‌های آبیاری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۴(۲), ۳۸۷-۴۰۲. Doi: 10.22077/escs.2020.2589.1736

رضایی، نسرین، علیزاده، حمزه علی، علی‌زاده، یاسر و زید علی، احسان اله (۱۴۰۲). بررسی اثر کم آبیاری (DI) و آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD) بر بهره‌وری آب و خصوصیات فتوسنتزی گیاه ماش (*Vigna radiate L.*) نشریه *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷ (۴)، ۶۲۴-۶۱۱.
Doi: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.2.2

سیادت سیدعطا اله، کرملاچعب، عزیز، منجزی، حسین، فتحی، قدرت اله و حمدی، حسن (۱۳۹۴). اثر فیلترکیک بر صفات مرفوفیزیولوژیکی و عملکرد ذرت شیرین تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل. نشریه *تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*. ۵ (۱۵):۹۳-۱۰۳.
https://Doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.93

صادقی پور، امید (۱۳۹۷). بررسی نقش اکسید نیتریک در تحمل به خشکی ماش (*Vigna radiata L.*). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*. شماره ۵۱ دوره ۱۳ ص۱۷-۲۹. Doi: 20.1001.1.76712423.1397.13.51.2.9

صادقی، سعیده، کیانی، فرشاد، اسدی، محمد اسماعیل، کامکار، بهنام و ابراهیمی، سهیلا (۱۳۹۸). بررسی اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر فعالیت بیولوژیکی و آنزیمی خاک. مجله *مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۹(۲), ۱۵۱-۱۶۴. Doi: 10.22069/ejsms.2019.15917.1850

عزیزپور، سهراب، شاهنظری، علی، ضیا تبار احمدی، میر خالق و کار اندیش، فاطمه (۱۳۹۶). ارزیابی اثر هم‌زمان کم‌آبیاری بخشی ریشه و افزودن ورمی‌کمپوست بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۷۰۴. مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، ۲۴(۵), ۱۹۵-۲۰۹.
Doi:10 jwsc.2017.12981.2761/2069.

کافی، محمد، برزویی، اعظم، صالحی، معصومه، کمندی، علی، معصومی، علی و نباتی، جعفر (۱۳۹۷). فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. جلد ۱۴، *انتشارات جهاد دانشگاهی* (دانشگاه فردوسی مشهد)، مشهد.

محمدی، خسرو، حیدری، غلامرضا، جواهری، محسن، و آقاعلیخانی، مجید (۱۳۹۱). تأثیر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و کوددهی بر توده زنده میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک در زراعت آفتاب‌گردان. آب‌وخاک (*علوم و صنایع کشاورزی*)، ۲۶(۱)، ۱۰۴-۱۱۳. Doi:

10.22067/jsw.v0i0.13634.
میرزاوند، جهانبخش و اسدی رحمانی، هادی (۱۳۹۹). اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و اوره‌آز در یک خاک‌آهکی. *زیست‌شناسی خاک*، ۸ (۱)، ۱۵-۲۴. Doi: 10.22092/sbj.2020.121869

REFERENCES

Aebi H. (1984). Catalase in vitro. Methods in enzymology, 105, 121–126. https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05016-3

Afshari, M., Ramezanpour, M., Ziaeian, A. H., Mousavifazl, H. and Zabihi, H. R. (2018). Studying the effect of chemical fertilizer and organic matter application on the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes in some soils of the country. *Soil Biology*, 5(2), 175-183. (In Persian). **doi: 10.22092/sbj.2018.115699**

Al-aghabary, K., Zhujun, Z and Qinhua, S. (2004) Influence of Silicon Supply on Chlorophyll Content, Chlorophyll Fluorescence, and Antioxidative Enzyme Activities in Tomato Plants under Salt Stress. Journal of *Plant Nutrition*, 27, 2101-2115. http://dx.doi.org/10.1081/PLN-200034641

Al-Mokadem, A. Z., Sheta, M. H., Mancy, A. G., Hussein, H. A., Kenawy, S. K. M., Sofy, A. R., Abu-Shahba, M. S., Mahdy, H. M., Sofy, M. R., Al Bakry, A. F., & Agha, M. S. (2023). Synergistic Effects of Kaolin and Silicon Nanoparticles for Ameliorating Deficit Irrigation Stress in Maize Plants by Upregulating Antioxidant Defense Systems. Plants (Basel, Switzerland), 12(11), 2221. https://doi.org/10.3390/plants12112221

Amini, S., Ghobadi, C. and Yamchi, A. (2015). Proline accumulation and osmotic stress: an overview of P5CS gene in plants. *Journal of Plant Molecular Breeding*, 3(2): 44-55. doi: 10.22058/jpmb.2015.17022

Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In: Page A.L. and Mille R.H. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, pp. 831-871.

Anjum, S. A., Tanveer, M., Ashraf, U., Hussain, S., Shahzad, B., Khan, I., & Wang, L. (2016). Effect of progressive drought stress on growth, leaf gas exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 17132-17141. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6894-8

Anjum, S. A., Tanveer, M., Hussain, S., Bao, M., Wang, L., Khan, I., Ullah, E., Tung, S. A., Samad, R. A., & Shahzad, B. (2015). Cadmium toxicity in Maize (*Zea mays L.*): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. *Environmental science and pollution research international*, 22(21), 17022–17030. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4882-z

Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Atlasroody, A., Kazemeini, S. A., Bahrani, M. J., & Sepehri, M. (2023). Interaction Effect of Chemical and Bio-Fertilizers and Deficit Irrigation on Yield and Yield Components of Sweet Corn (*Zea mays L. Var saccharata*) and Some Soil Biological Activity Indices. Journal Of Agroecology, 15(4), 723-738. (In Persian). doi: 10.22067/agry.2022.73850.1082

Azizpour, S., Shahnazari, A., Ziatabar Ahmadi, M., and Karandish, F. (2017). Evaluation of simultaneous effect of partial root zone drying and vermicompost on some physiological characteristics of maize (*Zea mays L.*) SC704. Journal of *Water and Soil Conservation*, 24(5), 195-209. (In Persian). **doi: 10.22069/jwsc.2017.12981.2761**

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

Bazrgar, G., Nabavi Kalat, S. M., Khavari Khorasani, S., Ghasemi, M. and kelidari, A., (2022). Effect of Deficit Irrigation Stress and Plant Density on Antioxidant Enzymes Activity, Compatible Osmolytes, Relative Water Content and Yield of Baby Corn (Pashan Cultivar). Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 15(6), 1370-1381. (In Persian). doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.12.2

Bazrgar, G., Nabavi Kalat, S. M., Khavari Khorasani, S., Ghasemi, M., & Kelidari, A. (2023). Effect of deficit irrigation on physiological, biochemical, and yield characteristics in three baby corn cultivars (Zea mays L.). Heliyon, 9(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15477

Bhardwaj, J., & Yadav, S. K. (2012). Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in a drought-tolerant and a sensitive variety of horsegram (Macrotyloma uniflorum) under drought stress. American Journal of *Plant Physiology*, 7(1), 17-29. DOI: 10.3923/ajpp.2012.17.29

Bhattacharjee, Soumen. (2002). Salt stress induced cytosolute accumulation, antioxidant response and membrane deterioration in three rice cultivars during germination.. *Seed Science and Technology*. 30.

279-287.
Blokhina, O., Virolainen, E., & Fagerstedt, K. V. (2003). Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Annals of botany*, 91 Spec No(2), 179–194. https://doi.org/10.1093/aob/mcf118
Bougari, E. , Asoodar, M. A. , Marzban, A. and Kazemi, N. (2020). Investigating Water Use Efficiency, Energy Productivity, Economic and Yield under Different Wheat-Maize Cropping System in the North of Khuzestan Province. JOURNAL OF Agricultural Science And Sustainable Production, 30(4), 295-310. (In Persian). doi: 10.22034/saps.2020.12318
Bunemann, E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer, R.E., Deyn, de G., Goede, de R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Madera, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, van J.W. and Brussaard, L. (2018). Soil quality-A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120:105-125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
Castrillo, M., & Trujillo, I. (1994). Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase activity and chlorophyll and protein contents in two cultivars of French bean plants under water stress and rewatering. *Photosynthtica Journal*. 30: 175-181.
Christmann, A., Weiler, E. W., Steudle, E., & Grill, E. (2007). A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. The Plant Journal, 52(1), 167-174. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03219.x
Dariush Karimi, N. , Mojaddam, M. , Lack, S. , Payandeh, K. and Shokuhfar, A. (2021). The effect of superabsorbent and iron and zinc foliar application on antioxidant enzyme activity and yield of maize (S.C. 704) (*Zea mays L.*) under irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(2), 387-402. (In Persian). doi: 10.22077/escs.2020.2589.1736
Dodorico P, Chiarelli D D, Rosa L, Bini A, Rulli M C. 2020. The global value of water in agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117, 21985-21993.
Elstner, E. F. I. O. B. (1991). Mechanisms of oxygen activation in different compartments of plant cells. Active Oxygen/Oxidative Stress and Plant Metabolism, 6, 13-26.
Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology, and secondary metabolites of two Adonis species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, 259, 108795. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795
Geerts, S and Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96.9: 1275-1284
Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry*: PPB, 48(12), 909–930. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016
Guarnizo AL, Navarro-Ródenas A, Calvo-Polanco M, Marqués-Gálvez JE, Morte A (2023). A mycorrhizal helper bacterium alleviates drought stress in mycorrhizal Helianthemum almeriense plants by regulating water relations and plant hormones. Environmental and Experimental Botany, 207, 105228. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105228
Heidari, N., Pouryousef, M., And Tavakoli, A., (2015). Effects Of Drought Stress On Photosynthesis, Its Parameters, And Relative Water Content Of Anise (*Pimpinella Anisum L.*). *Journal Of Plant Research* (Iranian Journal Of Biology), 27(5), 829-839. (In Persian). **Doi: 27507**
Hosseini, M. S. , Haghnia, G. h. , Lakzian, A. and Emami, H. (2012). Short-term Effects of Barley Residue Management on Urease and Alkaline Phosphatase Activities. *Water and Soil*, 26(3). (In Persian). **doi: 10.22067/jsw.v0i0.14877**
Hosseini, S. S. , Rejali, F. and Keshavarz, P. (2024). Effect of Some Biofertilizers on the Physiological Characteristics of Wheat Flag Leaves and Rhizosphere Enzyme Activities at Different Irrigation Levels. *Journal of Soil Biology*, 12(1), 65-88. (In Persian). doi: 10.22092/sbj.2024.365435.263
Hu, W., Loka, D. A., Yang, Y., Wu, Z., Wang, J., Liu, L., Wang, S., & Zhou, Z. (2024). Partial root-zone drying irrigation improves intrinsic water-use efficiency and maintains high photosynthesis by uncoupling stomatal and mesophyll conductance in cotton leaves. *Plant, cell & environment*, 47(8), 3147–3165. https://doi.org/10.1111/pce.14932
Iqbal, R., Raza, M. A. S., Rashid, M. A., Toleikiene, M., Ayaz, M., Mustafa, F., Ahmed, M.Z., Hyder, S., Ur Rahman, M.H., Ahmad, S., Aslam.,M.U., & Haider, I. (2021). Partial Root Zone Drying Irrigation Improves Water Use Efficiency but Compromise the Yield and Quality of Cotton Crop. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52(13), 1558–1573. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892720
Jaleel, C. A., Gopi, R., Sankar, B., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Sridharan, R., & Panneerselvam, R.

(2007). Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in Catharanthus roseus seedlings under salt stress. South African *Journal of Botany*, 73(2), 190-195. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2006.11.001

Javaheri, T. , Lakzian, A. , Khorasani, R. and Taheri, P. (2014). Investigation of the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes of various isolates of soil fungi in the presence of organic phosphorus compounds (phytic acid and sodium glycerophosphate). *Journal of Sol Biology*, 2(1), 1-11. (In Persian). **doi: 10.22092/sbj.2014.100086**

Jin K., Sleutel S., Buchan D., De Neve S., Cai D.X., Gabriels D., and Jin J.Y. (2009). Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 104: 115-120. **https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.004**

Kabiri, V., Raiesi, F., & Ghazavi, M. A. (2016). Tillage effects on soil microbial biomass, SOM mineralization, and enzyme activity in a semi-arid Calcixerepts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 73-84. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.022

Kafi, M., Borzoi, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A. and Nabati, J. (2018). Physiology of environmental stresses in plants. Volume 14, Jihad Daneshgahi Publications (Ferdowsi University of Mashhad), Mashhad. (In Persian).

Kandeler, E., & Gerber, H. (1988). Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and fertility of Soils*, 6, 68-72. https://doi.org/10.1007/BF00257924

Khosrowshahi, Z. T., Ghassemi-Golezani, K., Salehi-Lisar, S. Y., and Motafakkerazad, R. (2020) Changes in antioxidants and leaf pigments of safflower (Carthamus tinctorius L.) affected by exogenous spermine under water deficit. *Biologia Futura* 71: 313 -321. https://doi.org/10.1007/s42977-020-00039-z

La, V. H., Lee, B. R., Tabibul Islam, M. D., Park, S. H., Jung, H., Bae, D.W and Kim, T. H. (2019). Characterization of salicylic acid-mediated modulation of the drought stress responses: Reactive oxygen species, proline, and redox state in Brassica napus. *Environmental and Experimental Botany*. 157: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.013

Li, C.H., Ma, B.L. and Zhang, T.Q. (2002). Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (*Zea mays L.*) planted in large pots under field exposure. *Canadian Journal of Soil Science* 82(2): 147-154. https://doi.org/10.4141/S01-026

Li, Y., Chang, S.X., Tiand, L. and Zhang, Q. (2018). Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*. 121. 50-58. DOI:10.1016/j.soilbio.2018.02.024.

Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S. K., & Becker, D. F. (2013). Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & redox signaling*, *19*(9), 998-1011. https://doi.org/10.1089/ars.2012.5074

Liang, Y., Si, J., Nikolic, M., Peng, Y., Chen, W., & Jiang, Y. (2005). Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and biochemistry*, 37(6), 1185-1195. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.017

Luo, Y. and Zhou, X. (2006). Soil respiration and the Environment. *Academic press*, 328 pp. DOI:10.1016/j.agrformet.2007.01.008

Martınez J.P., Silva H., Ledent J.F., and Pinto M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *European Journal of Agronomy*, 26: 30- 38. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.003

Martín-Lammerding, D., Navas, M., del Mar Albarrán, M., Tenorio, J. L., & Walter, I. (2015). LONG term management systems under semiarid conditions: Influence on labile organic matter, β-glucosidase activity and microbial efficiency. Applied Soil Ecology, 96, 296-305. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.021

Mathew, R., Feng, Y., Githinji, L., Ankumah, R., and Balkcom, K. (2012). Impact of no-tillage and conventional tillage systems on soil microbial communities. J. Appl. *Environ. Soil Science*. https://doi.org/10.1155/2012/548620

Mirzavand, J. and Asadi-Rahmani, H. (2020). Effect of Different Tillage Practices on Phosphatase and Urease Activities in a Calcareous Soil. *Journal of Sol Biology*, 8(1), 15-24. (In Persian). doi: 10.22092/sbj.2020.121869

Mohammadi, K., Heidari, G. R., Javaheri, M. and Aghaalikhani, M. (2012). The effect of different tillage and fertilization systems on microbial biomass and soil enzymatic activity in sunflower cultivation. *Water and Soil* (Agricultural Sciences and Industries), 26(1), 104-113. (In Persian). doi: 10.22067/jsw.v0i0.13634

Mofizur Rahman, I., and Hasegawa, H. (2012). Water stress (1st ed.). Intech Publisher.

Ohlinger, R., (1996). Acid and alkaline phosphomonoesterase activity with the substrate p-nitrophenyl phosphate. In: Schinner, F., Kandeler, E., Ohlinger, R., Margesin, R. (Eds) Methods in soil biology, Springer-Verlag Berlin, 210-214.

Omidi, H., Tahmasebi, Z., Torabi, H., & Miransari, M. (2008). Soil Enzymatic Activities And Available P And Zn As Affected By Tillage Practices, Canola (Brassica Napus L.) Cultivars And Planting Dates. *European Journal Of Soil Biology*, 44, 443-450. Doi: 10.1016/J.Ejsobi.2008.05.002

Papaei, A., Rafiei, M., Khorgami A., and Taleshi K., (2024). The effect of tillage and salicylic acid on some biochemical characteristics of two forage vetch cultivars under rainfed conditions, Journal of Plant Process and Function, Volume 31, Issue 95, Pages: 161-177. (In Persian). https://doi.org/10.22034/13.59.161

parsa, M., Kamaei, R., and yousefi, B. (2022). Effect of chemical and biological fertilizers on the physiological characteristics and activity of some antioxidant enzymes of peppermint (Mentha piperita) under drought stress conditions. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 35(4), 657-673. (In Persian).Doi: 20.1001.1.23832592.1401.35.4.12.2

Ranieri, A., Castagna, J., Pacini, B., Baldan, A. & Mensuali Sodi, Soldatini, G. F., (2003). Early production and scavenging of hydrogen peroxide in the apoplast of sunflower plants exposed to ozone. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2529-2540. https://doi.org/10.1093/jxb/erg270

Rezae, N. , Alizadeh, H. A. , Alizade, Y. and Zeidali, E. (2023). Effects of deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on water productivity and photosynthetic characteristics of mungbean (Vigna radiate L.). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(4), 611-624. (In Persian). Doi: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.2.2

Sadeghi, S., Kiani, F., Asadi, M.E., Kamkar, B., & Ebrahimi, S. (2019). Effect Of Different Tillage Systems On The Biological And Enzymatic Activity Of Soil. *Electronic Journal Of Soil Management And Sustainable Production*, 9(2), 151-164. (In Persian). Sid. https://sid.ir/paper/209772/en

Sadeghipour, O. (2018). Investigation the role of nitric oxide on drought tolerance of mung bean (*Vigna radiata L.*). *Journal of Plant Environmental Physiology*. Issue 51, Volume 13, pp. 17-29. (In Persian). doi: 20.1001.1.76712423.1397.13.51.2.9

Sanchez, F. J., Manzanares, M., de Andres, E. F., Tenorio, J. L., & Ayerbe, L. (1998). Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field crops research*, 59(3), 225-235. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00125-7

Sanchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M., Cervilla, L. M., Blasco, B., Rios, J. J., Rosales, M. A., Romero L. & Ruiz, J. M. (2010). Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plants. *Plant science*, 178(1), 30-40. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.10.001

Sharma P, Singh G, and Singh RP. (2014). Conservation tillage, optimal water and organic nutrient supply enhance soil microbial activities during wheat (Triticum aestivum L.) cultivation. Brazilian Journal of Microbiologe. 42: 531-542.

Santos-Medellín C, Edwards J, Liechty Z, Nguyen B, Sundaresan V., (2017). Drought Stress Results in a Compartment-Specific Restructuring of the Rice Root-Associated Microbiomes. mBio8:10.1128/mbio.00764-17. https://doi.org/10.1128/mbio.00764-17

Savic.S , Stikic.R , Vucelic Radovic.B , Bogicevic.B , Jovanovic.Z and Sukalovic.V H-T. (2008). Comparative effects of regulated deficit irrigation(RDI) and partial root-zone drying(PRD) on growth and cell wall peroxidase activity in tomato fruits, *Scientia Horticulturae* 117,15-20.

Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants* (Basel, Switzerland), 10(2), 259. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Siadat, S. A., Karmollachaab, A., Monjezi, H., Fathi, G., & Hamdi, H. (2015). Effect of Filter Cake on Morphophysiological and Yield of Sweet Corn Under Late Season Drought Stress Condition [Research]. *Journal of Crop Production and Processing*, 5(15), 93-103. (In Persian). https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.93

Staszel, K., Lasota, J., Błońska, E., (2022). Effect of drought on root exudates from Quercus petraea and enzymatic activity of soil. *Scientific Reports* 12, 7635. doi:10.1038/s41598022 11754 z

Stewart, R. R., & Bewley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant physiology*, 65(2), 245–248. https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245

Tardieu, F., Parent, B., Caldeira, C.F. and Welcker, C. (2014) Genetic and physiological controls of growth under water deficit. *Plant Physiol*. 164,1628–1635. https://doi.org/10.1104/pp.113.233353

Tawfik, K. M. (2008). Effect of water stress in addition to potassium application on mungbean. *Australian Journal Basic Apply Science*.2: 42-52.

Topcu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Cetin, M., Yazici, A., and Bacon, M.A. (2007). Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. Europ. J. Agron. 26: 64-70. DOI:10.1016/j.eja.2006.08.004

Turner, B.L., Driessen, J.P., Haygarth, P.M., Mckelvie, I.D., (2003). Potential contribution of lysed bacterial cells to pho sphorus solubilisation in two rewetted Australian pasture soils. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 187 189.

Upadhyaya, H., & Panda, S. K. (2004). Responses of Camellia sinensis to drought and rehydration. *Biologia plantarum*, 48, 597-600. https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000047158.53482.37

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008). Proline accumulation in plants: a review. Amino Acids, 35(4), 753-759.

https://doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6

Waldrop, M.P., Zak, D.R., Sinsabaugh, R.L., Gallo, M. and Lauber, C. 2004. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity. *Ecological Applications* 14: 1172–1177. https://doi.org/10.1890/03-5120

Wang, H., Yang, Z., Yu, Y., Chen, S., He, Z., Wang, Y., Jiang, L., Wang, G., Yang, C., Liu, B., Zhang, Z., (2017). Drought enhances nitrogen uptake and assimilation in maize roots. Agronomy Journal. 109, 39-46.

Wang, J., Kang, S., Li, F., Zhang, F., Li, Z., Zhang, J., (2008). Effects of partial root-zone irrigation on soil microorganism

and maize growth. Plant Soil. 302, 45-52.

Zandalinas, S. I., Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2017). Modulation of Antioxidant Defense System Is Associated with Combined Drought and Heat Stress Tolerance in Citrus. *Frontiers in plant science*, 8, 953. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00953

Zheng, W., Zhao, Z., Gong, Q., Zhai, B. and Li, Z. (2018). Responses of fungal–bacterial community and network to organic inputs vary among different spatial habitats in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 125:54-63. Doi: 10.1016/j.soilbio.2018.06.029