



Integrated Application of Effective Microorganisms and Urea on Physiological, Biochemical, Photosynthetic Pigments Traits of Different Maize Cultivars under Water Deficit Stress Conditions

Kamyab Hosseini¹ | Ali Heidarzadeh² | Ali Sorooshzadeh³

1. Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. E-mail: hosseini.k@modares.ac.ir, ORCID: 0009-0000-4944-6984
2. Corresponding Author, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. E-mail: ali.heidarzadeh@modares.ac.ir, ORCID: 0000-0001-6680-9257
3. Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. E-mail: soroosh@modares.ac.ir, ORCID: 0000-0002-5840-2681

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: May 19, 2025

Received in revised form:

June 18, 2025

Accepted: June 26, 2025

Published online: September

23, 2025

Extended Abstract

Introduction. Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important cereal crops globally, serving as a staple food and a key component in animal feed and biofuel production. However, its productivity is significantly influenced by environmental stresses, especially water deficit. Water scarcity affects the physiological and biochemical functioning of maize, leading to reduced photosynthetic efficiency and ultimately lower yield. In recent years, climate change and irregular rainfall patterns have increased the frequency of drought events, further emphasizing the need for sustainable agricultural practices to enhance crop resilience. Among the various approaches developed to mitigate drought stress in crops, the use of biological agents such as effective microorganisms (EM) has gained attention. EM consists of a mixture of beneficial microorganisms including nitrogen-fixing bacteria, phosphate-solubilizing bacteria, lactic acid bacteria, and yeasts, which improve plant growth by enhancing nutrient availability, root development, and stress resistance. Additionally, nitrogen (N) fertilizer plays a crucial role in plant metabolism, but its excessive use has resulted in serious environmental concerns such as groundwater contamination, eutrophication, and increased greenhouse gas emissions. Thus, the integration of EM with N fertilizer presents a promising strategy to reduce chemical input while maintaining or improving crop performance. This study aimed to evaluate the combined effects of EM and nitrogen fertilizer on photosynthetic pigments and biochemical traits of two maize cultivars under different irrigation regimes. The research specifically investigated how this integration can enhance maize tolerance to water deficit and improve physiological traits contributing to yield.

Materials and Methods. The field experiment was conducted during the growing season of 2023 at the Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. The experimental design was a split-split-plot layout based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main plots included three irrigation regimes based on soil field capacity: 85% (optimal irrigation), 70% (moderate water deficit), and 55% (severe water deficit). The subplots were assigned to three nutritional systems: Nitrogen fertilizer (urea), effective microorganisms (EM), and integrated treatment of EM + nitrogen fertilizer. The sub-subplots included two maize cultivars: S.C. 704, and TWC. 647. During the experiment, data were collected on several physiological and biochemical parameters including carotenoid content, intercellular to ambient CO₂ ratio (Ci/Ca), anthocyanins, total phenolics, proline, and seed yield. Standard laboratory protocols were followed for pigment extraction and biochemical analyses. Statistical analysis was performed using analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using the least significant difference (LSD) test at a 5% significance level.

Results and Discussion. The results demonstrated that both irrigation regime and fertilizer treatment significantly affected the physiological and biochemical traits of maize. Under optimal irrigation (85% field capacity), the integrated application of EM and nitrogen fertilizer resulted in the highest carotenoid content and Ci/Ca ratio, particularly in the S.C. 704 cultivar. This indicates improved photosynthetic activity and gas exchange efficiency due to the synergistic effects of EM and nitrogen. Also, anthocyanin content was significantly increased (by 27%) in both cultivars under optimal irrigation when treated with the integrated EM + nitrogen fertilizer compared to the nitrogen-only control. This suggests enhanced antioxidant capacity under favorable water conditions. Under severe water deficit (55% field capacity), there was a notable increase in total phenolic and proline contents, with S.C. 704 showing a stronger biochemical response than TWC. 647. Phenolics play a critical role in plant defense against oxidative stress, while proline acts as an osmoprotectant, stabilizing proteins and membranes under drought conditions. The highest phenolic content was observed in S.C. 704 under the combined influence of water stress and EM application. Similarly, S.C. 704 accumulated significantly more proline than TWC. 647, confirming its superior drought tolerance. These results highlight the cultivar-dependent responses to stress and indicate the potential of EM in enhancing biochemical defense mechanisms. Seed yield was significantly influenced by the treatments. The highest yield (9,708 kg ha⁻¹) was obtained from the S.C. 704 cultivar under optimal irrigation with the integrated EM and nitrogen treatment. This emphasizes the practical benefit of combining EM with chemical fertilizers to sustain or improve yield under ideal water availability. Overall, S.C. 704 consistently outperformed TWC. 647 in terms of pigment accumulation, stress-related biochemical traits, and yield, suggesting its suitability for cultivation under both optimal and stressful conditions when supported by integrated nutrient management.

Conclusion. The integration of effective microorganisms with nitrogen fertilizer proved to be a beneficial strategy for improving the physiological and biochemical traits, and maize yield under varying irrigation conditions. While the use of nitrogen fertilizer alone supports growth, combining it with EM enhances nutrient uptake, boosts antioxidant production, and strengthens drought resilience, especially in the S.C. 704 cultivar. Under optimal irrigation, the integrated treatment significantly improved carotenoid levels, anthocyanin content, and yield. Under severe water stress, EM application mitigated stress-induced damage by increasing phenolic and proline levels, again more notably in S.C. 704. These findings confirm the role of EM in enhancing maize tolerance to drought while offering an environmentally sustainable approach to reduce chemical fertilizer dependency. Given the global concerns about the environmental impacts of excessive fertilizer use, the combined application of EM and nitrogen represents a promising approach for sustainable maize production. Future studies should explore the long-term effects of this integration on soil health, microbial diversity, and yield stability across different agroecological zones.

Keywords:

Anthocyanin,
effective microorganisms,
grain yield,
photosynthesis,
proline,
total phenols.

Cite this article: Hosseini, K., Heidarzadeh, A., & Sorooshzadeh, A. (2025). Integrated application of effective microorganisms and urea on physiological, biochemical, photosynthetic pigments traits of different maize cultivars under water deficit stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(3), 33-51. Doi: 10.22059/ijfcs.2025.395531.655139.



© The Authors.

DOI: [10.22059/ijfcs.2025.395531.655139](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.395531.655139)

Publisher: University of Tehran Press.



انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

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

بررسی کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر و اوره روی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و رنگیزه‌های فتوسنتزی ارقام مختلف ذرت در شرایط تنش کم آبی

کامیاب حسینی^۱ | علی حیدرزاده^۲ | علی سروش‌زاده^۳

۱. گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: hosseini.k@modares.ac.ir ORCID: 0009-0000-4944-6984
۲. نویسنده مسئول، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: ali.heidarzadeh@modares.ac.ir ORCID: 0000-0001-6680-9257
۳. گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: soroosh@modares.ac.ir ORCID: 0000-0002-5840-2681

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	این تحقیق با هدف بررسی اثرات کاربرد تلفیقی کود زیستی و شیمیایی روی رنگیزه‌های فتوسنتزی و صفات بیوشیمیایی به صورت کرت‌های دوبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری بعد از رسیدن به ۸۵، ۷۰ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان کرت‌های اصلی، سه تیمار کودی (کود اوره، ریزموجودات مؤثر و کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود اوره) به‌عنوان کرت فرعی و دو رقم ذرت (سینگل کراس ۷۰۴ (S.C 704) و تری-وی کراس ۶۴۷ (TWC. 647)) به‌عنوان کرت فرعی بود. نتایج نشان داد که در آبیاری مطلوب و کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود اوره در رقم تری‌وی ۶۴۷ با مقدار ۲۷/۰۰ میکرومول دی‌اکسید کربن در متر مربع در ثانیه بیشترین مقدار سرعت فتوسنتز مشاهده شد. در تیمار آبیاری مطلوب و تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود اوره در رقم سینگل کراس ۷۰۴، کاروتنوئید و نسبت CO_2 بین سلولی به CO_2 محیط بیشترین مقدار بود. همچنین، کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود اوره در رژیم آبیاری مطلوب موجب افزایش ۲۷ درصدی آنتوسیانین در هر دو رقم ذرت نسبت به تیمار کاربرد کود اوره شد. از طرفی، در شرایط تنش کم آبی شدید و کاربرد ریزموجودات مفید بیشترین مقدار سنتز فنل مشاهده شد. همچنین تنش کم آبی شدید منجر به افزایش سنتز محتوای فنل کل و پرولین در هر دو رقم شد. همچنین، نتایج نشان داد بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب از تیمار تلفیقی کود نیتروژن و ریزموجودات مؤثر و رقم سینگل کراس ۷۰۴ (۹۷۰۸ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. در شرایط آبیاری مطلوب تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن در داده‌های مربوط به صفات بیوشیمیایی مطلوب‌ترین نتیجه را به همراه داشتند. در مجموع با بررسی صفات مشاهده شد که تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن منجر به کاهش اثرات مخرب ناشی از تنش کم آبی روی هر دو رقم ذرت می‌شود.
کلیدواژه‌ها: آنتوسیانین، پرولین، ریزموجودات مؤثر، عملکرد دانه، فتوسنتز، فنل کل.	

استناد: حسینی، ک، حیدرزاده، ع، و سروش‌زاده، ع. (۱۴۰۴). بررسی کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر و اوره روی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و رنگیزه‌های فتوسنتزی ارقام مختلف ذرت در شرایط تنش کم آبی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۳)، ۳۳-۵۱.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.395531.655139



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) گیاهی یک‌ساله است و پس از گندم و برنج رتبه سوم سطح زیر کشت جهان را دارا می‌باشد. ذرت یک گیاه تک‌پایه و دارای گل‌آذین نر خوشه‌ای برآمده از راس ساقه و گل‌آذین ماده خوشه‌ای بسیار فشرده است که از راس شاخه‌های ساقه اصلی بالایی سرچشمه می‌گیرد (Hanway et al., 2019). عملکرد علوفه و دانه ذرت بسیار بالاتر از غلات دیگر است؛ از این رو به آن محصول معجزه‌آسا یا پادشاه غلات می‌گویند (Dabija et al., 2021). در دنیا، نزدیک به ۱۱۴۷ میلیون تن ذرت توسط بیش از ۱۷۰ کشور با میانگین بهره‌وری ۵/۷۵ تن در هکتار تولید می‌شود (Anonymous, 2020). در ایران نیز سطح زیر کشت ذرت ۵۰ هزار هکتار و حجم تولیدات ذرت حدود ۳۰۰ هزار تن در هکتار می‌باشد (FAO, 2021).

کمبود آب می‌تواند باعث تضعیف سیستم ریشه گیاه شود. کاهش رطوبت خاک سبب می‌شود که ریشه‌ها برای جذب آب و مواد مغذی دچار مشکل شوند، تنش کم‌آبی منجر به کاهش رشد ریشه، جذب عناصر غذایی و فتوسنتز در گیاهان می‌شود (Hussain et al., 2018). تحقیقات نشان می‌دهد که عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند به شدت کاهش یابد. این کاهش معمولاً در مواقع بحرانی مانند دوران گلدهی و پرشدن دانه‌ها بیشتر است. در واقع، تنش کم‌آبی می‌تواند تنوع عملکرد دانه را در ذرت تحت تأثیر قرار دهد و علاوه بر کاهش کمیت، کیفیت دانه (درصد پروتئین و نشاسته) را نیز کاهش دهد (Shirinpour et al., 2024). زمانی که گیاه تحت تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد، افزایش تولید رادیکال‌های آزاد موجب آسیب به سلول‌ها می‌شود؛ با افزایش تنش، فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها برای مقابله با رادیکال‌های آزاد افزایش می‌یابد. این تغییرات می‌تواند به آسیب‌دیدگی بیشتر بافت‌های گیاهی منجر شود (Zargar et al., 2017). اگرچه مدیریت آب، نوعی اصلاح سنتی و تأییدشده در کاهش تنش خشکی می‌باشد؛ اما با کاهش زیاد منابع آب این رویکردها کمتر مورد پذیرش قرار می‌گیرند. استفاده از میکروارگانیسم‌ها یک فناوری مؤثر در کاهش اثرات تنش کم‌آبی است و به راحتی قابل اجرا می‌باشد (Niu et al., 2018; Zafar-ul-Hye et al., 2018). در شرایط تنش، جذب عناصر توسط ریشه دچار اختلال می‌شود (Rehman et al., 2024) و استفاده از کودهای زیستی در کاهش این اختلال نقش دارد (Elshepiny et al., 2023)؛ علاوه بر این می‌تواند باعث آسیب جدی به محیط زیست شود. بنابراین، ارائه راهکارهای سازگار با محیط زیست برای افزایش رشد و بهره‌وری گیاهان برای کشاورزی پایدار مهم است (Alhammad & Seleiman, 2023). از این رو، اخیراً کودهای زیستی به عنوان مکمل یا جایگزینی برای تغذیه معدنی و طبیعی گیاهان توسعه یافته‌اند (Adeleke et al., 2019).

کودهای زیستی حاوی میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن می‌توانند از طریق فرآیندهای بیولوژیک، عناصر مهم خاک را از شکل غیر قابل دسترس به شکل قابل دسترس تبدیل کنند (Misra et al., 2020). کودهای آلی (مانند بقایای گیاهی) منبع مهمی از مواد مغذی هستند؛ درحالی‌که میکروارگانیسم‌ها برای افزایش چرخه مواد غذایی گیاه و کاهش نیاز به کود شیمیایی یا بهبود جذب آنها مهم می‌باشند (Singh et al., 2020).

تنش کم‌آبی یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که باعث تغییر در صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گیاه می‌شود. این تغییرات به منظور کاهش میزان تبخیر و مصرف آب صورت می‌گیرند، اما در عین حال کاهش آب منجر به آسیب به ساختارهای تیلاکوئیدی در برگ‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با ساخت کلروفیل می‌شود که با کاهش قدرت جذب نور و کاهش فتوسنتز منجر به کاهش تولید قند، مواد غذایی و عملکرد ذرت خواهد شد (Ayub et al., 2021). در اثر تنش کم‌آبی، پارامترهایی مانند رطوبت نسبی، نرخ تبخیر و فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی کاهش می‌یابد؛ این کاهش نشان‌دهنده کاهش کارایی فتوسنتز و متابولیسم گیاه است که رشد و توسعه دانه‌ها را کاهش می‌دهد (Farooq et al., 2011). نیتروژن باعث رشد سریع‌تر گیاه می‌شود که در حالت کم‌آبی ممکن است منجر به استرس بیشتر و کاهش کیفیت دانه‌ها شود و گیاه نمی‌تواند به‌طور کامل از نیتروژن بهره‌برداری کند و بخشی از آن در خاک باقی می‌ماند که سبب آلودگی محیط می‌شود (Yadav et al., 2017).

باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) به‌طور قابل توجهی جذب مواد غذایی برای رشد گیاهان را بهبود می‌بخشند (Kumar et al., 2021). اخیراً ظرفیت میکروارگانیسم‌ها در تقویت رشد و بهره‌وری گیاهان در شرایط تنش غیر زیستی، به عنوان

راهکاری در کشاورزی پایدار مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Abdelkhalik et al., 2023). این باکتری‌ها در شرایط تنش‌زا متابولیت‌های مختلف مرتبط با تنش را آزاد می‌کنند و مقاومت گیاهان را به تنش‌ها افزایش می‌دهند (Chaudhary et al., 2022). در شرایط تنش، استفاده از ریزموجودات مؤثر (Ems^۲) می‌تواند تجمع مولکول‌های آنتی‌اکسیدانی و اسمولیت‌ها را افزایش دهد، ثبات غشای سلولی را حفظ کرده و کارایی مصرف آب را بهبود بخشد (Elbagory., 2023). مفهوم ریزموجودات مؤثر توسط پروفیسور Teruo Higa معرفی شد (Higa et al., 1994). مشخص شده است که کاربرد ریزموجودات مؤثر به‌طور قابل توجهی فعالیت فتوسنتزی گیاه را افزایش می‌دهد (Okorski et al., 2008). ریزموجودات مؤثر از انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌های مفید از جمله باکتری‌های فتوسنتزی، باکتری‌های اسیدلاکتیک، مخمر، اکتینومیسیت‌ها و قارچ‌های تخمیری تشکیل شده‌اند (Talaat, 2015).

کودهای زیستی مانند میکروارگانیسم‌های منوفاگوس و تثبیت‌کننده‌های نیتروژن، باعث تقویت سیستم ریشه و افزایش جذب آب و عناصر مغذی می‌شوند. هنگامی که این کودها با کودهای نیتروژنی ترکیب شوند، گیاه در مقابل کم‌آبی مقاوم‌تر شده و رشد رویشی و سبزینه حفظ می‌شود (Zainuddin et al., 2022). همچنین کودهای زیستی تولید هورمون‌های گیاهی طبیعی مثل ایندول‌اسیداستیک (IAA) و سیتوکینین‌ها را افزایش می‌دهند که باعث بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی و تنظیم مصرف آب می‌شود (Rosa et al., 2023). در صورت استفاده نادرست یا بیش‌ازحد از تلفیق کودهای زیستی و شیمیایی، ممکن است تجمع مواد زائد، کاهش کارایی کودهای زیستی و کاهش عملکرد نهایی اتفاق بیافتد یا در بعضی موارد، عدم تطابق انواع میکروارگانیسم‌ها با نوع خاک و گیاه می‌تواند اثربخشی را کاهش دهد (Yapa et al., 2022).

افزایش بهره‌وری ذرت در مناطقی با عرضه آب محدود برای تامین امنیت غذایی ایران بسیار مهم است. از طرفی، کاربرد ریزموجودات مؤثر به دلیل هم‌راستا بودن با کشاورزی پایدار در شرایط تنش کم‌آبی اهمیت بسزایی دارد. با این حال، اطلاعات چندانی در واکنش ارقام سینگل کراس ۷۰۴ (S.C 704) و تری‌وی کراس ۶۴۷ (TWC.647) ذرت به کاربرد ریزموجودات مؤثر و استفاده تلفیقی آنها با کود شیمیایی در شرایط تنش کم‌آبی وجود ندارد. لذا، در این مطالعه تغییرات صفات بیوشیمیایی دو رقم ذرت سینگل کراس ۷۰۴ و تری‌وی کراس ۶۴۷ تحت سه رژیم آبیاری با کاربرد ریزموجودات مؤثر و تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود شیمیایی بررسی شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به صورت کرت‌های دوبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری بعد از رسیدن به ۸۵ درصد ظرفیت زراعی (آبیاری مطلوب)، آبیاری بعد از رسیدن به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش کم‌آبی متوسط) و آبیاری بعد از رسیدن به ۵۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش کم‌آبی شدید)) به‌عنوان کرت‌های اصلی، ارقام مختلف ذرت در دو سطح (سینگل کراس ۷۰۴ و تری‌وی کراس ۶۴۷) به‌عنوان کرت فرعی و سیستم تغذیه‌ای در سه سطح (کود شیمیایی نیتروژن (از منبع اوره)، ریزموجودات مؤثر و تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن) به‌عنوان کرت فرعی بود. ریزموجودات مؤثر متشکل از قارچ‌های تخمیرکننده (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*)، باکتری‌های گروه لاکتوباسیلوس (*Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*)، باکتری‌های اسیدلاکتیک، باکتری‌های فتوسنتزکننده (*Rhodospseudomonas palustris*, *Rhodobacter sphaeroides*) و مخمر بود. مقدار کاربرد آن به مقدار چهار لیتر در ۱۰۰۰ متر مربع طبق توصیه شرکت سازنده (شرکت امکان‌پذیر پارس) به‌صورت پاشش روی خاک (روی خطوط نوار آبیاری هنگام آبیاری؛ کودآبیاری) اعمال شد. EM مورد استفاده حاوی 1×10^6 CFU تا 1×10^8 CFU بود (Joshi et al., 2019). همچنین مقدار نیتروژن مورد استفاده نیز ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (از منبع کود اوره به مقدار ۲۱۷ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک در دو مرحله هشت‌برگی و قبل از گلدهی) طبق آزمایش خاک مزرعه بود (جدول ۱). آبیاری به‌صورت نوار تیپ انجام شد. میزان رطوبت خاک با استفاده از ^۳TDR اندازه‌گیری و تنش کم‌آبی از مرحله هشت‌برگی آغاز شد.

2. Effective microorganisms

3. Time-Domain Reflectometry

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه اجرای آزمایش.

رس (%)	شن (%)	سیلت (%)	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری	ظرفیت نگهداری	نقطه پژمردگی
درصد	درصد	درصد		g cm^{-3}	درصد حجمی	
۹	۸۱	۱۰	شن لومی	۱/۵۱	۱۶/۵	۸/۵
قدرت نگهداری آب	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی	کربن آلی	نیتروژن کل	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب
%		dS m^{-1}		%	ppm	
۲۶	۷/۵۹	۲/۲۷	۱/۹۹	۰/۱۷	۸۸۳	۶۸۳۴

مراحل آماده‌سازی زمین با اجرای عملیات شخم، دیسک‌زنی برای خردکردن کلوخه‌ها و ازبین‌بردن علف‌های هرز و ماله به منظور تسطیح زمین قبل از کشت انجام شد. تراکم مطلوب برای کشت هر دو رقم ذرت ۱۲ بوته در متر مربع (۵۰ سانتی‌متر بین ردیف و ۱۶ سانتی‌متر روی ردیف) و مساحت هر واحد آزمایشی شش متر مربع، تعداد ردیف چهار و طول ردیف سه متر در نظر گرفته شد.

صفات فیزیولوژیک سرعت فتوسنتز، میزان تعرق، غلظت CO_2 بین سلولی و هدایت روزنه‌ای به روش غیر تخریبی در زمان گلدهی با دستگاه اندازه‌گیری تبادل گازی قابل حمل ساخت شرکت Li-Cor اندازه‌گیری شد. همچنین، نمونه‌های برگ تر به منظور اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی تهیه و با نیتروژن مایع فریز شده و در دمای -80°C درجه سانتیگراد نگهداری شدند. رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید به روش Hiscox & Israelstam (1979)، پرولین به روش Bates و همکاران (۱۹۷۳)، فلاونوئیدها و آنتوسیانین به روش Krizek و همکاران (۱۹۹۳) و مقدار فنل به روش Arakawa & Bakhshi (2006) اندازه‌گیری شد.

برای بررسی اثرات اصلی و متقابل تیمارها بر صفات اندازه‌گیری‌شده، پس از اطمینان از نرمال‌بودن باقیمانده داده‌ها، از تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از مدل خطی عمومی (GLM) در نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ بهره‌گیری شد. تفاوت‌های معنی‌دار بین میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (Least Significant Difference = LSD) در سطح احتمال ۰/۰۵ بررسی شد. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل برش‌دهی بر اساس رژیم آبیاری، رقم و یا هر دو انجام شد. اثرات اصلی و متقابل صفات در زیر به‌ترتیب اهمیت آماری آنها مورد بحث قرار گرفت که از برهمکنش‌های بالاترین سطح تا اثرات اصلی تیمارها را شامل می‌شود.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. صفات فیزیولوژیک

۳-۱-۱. سرعت فتوسنتز

نتایج نشان داد اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، سیستم تغذیه‌ای و رقم تأثیر معنی‌داری روی سرعت فتوسنتز در سطح یک درصد داشتند (جدول ۲). در شرایط آبیاری مطلوب بالاترین میزان فتوسنتز در رقم تری‌وی ۶۴۷ از کاربرد ریزموجودات مؤثر و کاربرد تلفیقی ریزموجودات مؤثر با کود نیتروژن به‌ترتیب باعث افزایش ۲۶/۲۱ و ۳۴/۲۳ درصدی نسبت به کاربرد سیستم تغذیه کود نیتروژن شد. (جدول ۳). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴، سیستم تغذیه‌ای تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۳۷/۸۳ درصدی سرعت فتوسنتز نسبت به کاربرد کود نیتروژن مشاهده شد (جدول ۳). نتایج در شرایط تنش کم‌آبی متوسط بدین صورت بود که در رقم تری‌وی ۶۴۷، سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر با تلفیق ریزموجودات مؤثر با کود نیتروژن به‌ترتیب باعث افزایش ۲۴ و ۱۷/۹۸ درصدی سرعت فتوسنتز نسبت به کاربرد کود نیتروژن شدند (جدول ۳). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴، سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۲۹/۶۴ درصدی سرعت فتوسنتز نسبت به شاهد شد (جدول ۳). در شرایط تنش کم‌آبی شدید، سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن بالاترین مقدار را در رقم تری‌وی ۶۴۷ با ۱۸/۶۴ میکرومول دی‌اکسید کربن در متر مربع در ثانیه داشت (جدول ۳). درحالی‌که در همین شرایط آبیاری

بالاترین مقدار برای رقم سینگل کراس ۷۰۴ در سیستم تغذیه‌ای تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن با کاربرد ریزموجودات مؤثر به ترتیب با ۱۹/۲۹ و ۱۹/۸۹ میکرومول دی‌اکسید کربن در متر مربع در ثانیه به‌دست آمد (جدول ۳). در زمان کمبود آب، گیاهان به بستن روزنه‌های خود (استوماتا) اقدام می‌کنند تا از تبخیر آب جلوگیری کنند؛ بسته‌شدن روزنه‌ها به معنی کاهش ورود دی‌اکسید کربن (CO_2) به درون برگ‌ها است که یکی از مواد اولیه اساسی در فرآیند فتوسنتز است. شرایط کمبود آب عمدتاً به دلیل بسته‌شدن روزنه‌ها که انتشار CO_2 را در برگ محدود می‌کند، یا به علت عامل غیر روزنه‌ای مانند اختلال در چرخه روبیسکو باعث سرکوب قابل توجهی در سرعت فتوسنتزی گیاه می‌شود (Demirevska et al., 2010). تنش کم‌آبی موجب می‌شود که فعالیت آنزیم‌های لازم برای فتوسنتز مانند ربیولاز (RuBisCO) کاهش یابد. این آنزیم در تبدیل CO_2 به ترکیبات کربنی در طی چرخه کالوین انجام وظیفه می‌کند؛ کاهش فعالیت این آنزیم به‌طور مستقیم بر نرخ فتوسنتز تأثیر منفی می‌گذارد (Manderscheid et al., 2014). نیتروژن یک درشت‌مغذی مهم مورد نیاز برای همه موجودات است و به‌طور کلی محدودترین ماده مغذی برای گیاهان به‌شمار می‌رود. افزایش کارایی مصرف نیتروژن با تأثیر مثبت در سرعت فتوسنتز، انرژی شیمیایی لازم را به منظور رشد رویشی گیاه در شرایط تنش کم‌آبی فراهم می‌کند (Rosolem et al., 2018). استفاده از تلفیق کودهای زیستی و کود نیتروژن می‌تواند منجر به افزایش سطح کلروفیل در برگ‌ها شود؛ کلروفیل بیشتر به معنای جذب بیشتر نور و در نتیجه افزایش نرخ فتوسنتز است (Susilowati et al., 2024). محققان نشان داده‌اند همزیستی کودهای زیستی با ریشه گیاه ذرت به‌طور قابل توجهی سرعت فتوسنتز را افزایش می‌دهد (Zhu et al., 2012). همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان سرعت فتوسنتز در شرایط تنش کم‌آبی شدید کاهش می‌یابد که با نتایج مطالعه Miri et al. (2024) مطابقت دارد.

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک ذرت تحت تأثیر سیستم تغذیه‌ای، رقم و رژیم‌های آبیاری.

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	سرعت فتوسنتز	هدایت روزنه‌ای	میزان تعرق	نسبت CO_2 بین سلولی به CO_2 محیط
بلوک	۲	۴/۷۹*	۰/۰۰۰۰۰۲۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۴۳۴ ^{ns}
تنش کم‌آبی (S)	۲	۱۲۵/۹۲*	۰/۰۰۰۰۹۴۵*	۰/۰۰۶**	۳۷/۹۲**
خطای a	۴	۰/۳۹	۰/۰۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۲	۲/۹۹
سیستم تغذیه‌ای (N)	۲	۶۹/۲۸*	۰/۰۰۰۰۰۳۹ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۳۲/۹۸**
S×N	۴	۱۵/۹۱*	۰/۰۰۰۰۱۴۴*	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۱۵/۲۲**
خطای b	۱۲	۰/۵۳	۰/۰۰۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۶۴۳
رقم (V)	۱	۲/۱۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱۵*	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۱۵۲ ^{ns}
S×V	۲	۱۲/۱۹*	۰/۰۰۰۰۰۱۷**	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۱/۵۱ ^{ns}
N×V	۲	۱۱/۵۸*	۰/۰۰۰۰۰۱۳۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}	۲/۷۵ ^{ns}
S×N×V	۴	*۸/۲۸	۰/۰۰۰۰۰۲۳*	۰/۰۰۰۰۹ ^{ns}	۵/۷۷*
خطای c	۱۸	۰/۵۲	۰/۰۰۰۰۰۱۹۳	۰/۰۰۰۰۰۳	۱/۸۷
ضریب تغییرات (%)		۳/۴۶	۱۱/۲۱	۳/۶۷	۵/۲۰

^{ns}، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

۲-۱-۳. هدایت روزنه‌ای

اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، سیستم تغذیه‌ای و رقم تأثیر معنی‌داری روی هدایت روزنه‌ای در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۲). نتایج نشان داد در شرایط آبیاری مطلوب بالاترین میزان هدایت روزنه‌ای در رقم تری‌وی ۶۴۷ از سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با ۰/۱۸ مول آب در متر مربع در ثانیه به‌دست آمد (جدول ۴). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ سیستم تغذیه‌ای تلفیقی ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن با ریزموجودات مؤثر با افزایش ۱۶ درصدی هدایت روزنه‌ای نسبت به شاهد در یک گروه آماری قرار گرفت (جدول ۴). ولی در شرایط تنش کم‌آبی متوسط بدین صورت بود که در سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با ۰/۱۶ مول آب در متر مربع در ثانیه در رقم تری‌وی ۶۴۷ بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای به‌دست آمد (جدول ۴). در همین شرایط آبیاری

در رقم سینگل کراس ۷۰۴ اختلاف معنی‌داری بین سیستم‌های تغذیه‌ای مشاهده نشد (جدول ۴). در شرایط تنش کم‌آبی شدید، در رقم تری‌وی ۶۴۷ سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۱۰ درصدی هدایت روزنه‌ای نسبت به شاهد شد (جدول ۴)؛ درحالی‌که در همین شرایط آبیاری اختلاف آماری معنی‌داری بین سطوح سیستم‌های تغذیه‌ای برای رقم سینگل کراس ۷۰۴ مشاهده نشد (جدول ۴).

جدول ۳. اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، تغذیه و ارقام ذرت روی سرعت فتوسنتز (میکرومول دی‌اکسید کربن بر متر مربع بر ثانیه).

ارقام ذرت		سیستم تغذیه	رژیم‌های آبیاری
سینگل کراس ۷۰۴	تری‌وی ۶۴۷		
۱۹/۱۰ ^c	۲۰/۱۰ ^b	کود نیتروژن	نیروی مطلوب
۲۱/۷۵ ^b	۲۵/۳۷ ^a	ریزموجودات مؤثر	
۲۶/۳۳ ^a	۲۷/۰۰ ^a	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	
۱۸/۳۵ ^c	۱۹/۳۵ ^b	کود نیتروژن	تنش کم‌آبی
۲۱/۵۸ ^b	۲۴/۰۷ ^a	ریزموجودات مؤثر	
۲۳/۷۹ ^a	۲۲/۸۳ ^a	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	
۱۷/۳۵ ^b	۱۸/۶۴ ^a	کود نیتروژن	تنش شدید
۱۹/۲۹ ^a	۱۶/۱۱ ^b	ریزموجودات مؤثر	
۱۹/۸۹ ^a	۱۷/۴۱ ^b	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	

برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری و رقم انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

کمبود رطوبت خاک با طیف وسیعی از متغیرهای عملکرد گیاه مرتبط است. کمبود آب تا یک سطح معین ممکن است به دلیل کاهش تبخیر خاک که متناسب با کل مصرف آب است، کارایی مصرف انرژی و تعرق را افزایش دهد. با این حال، تنش کم‌آبی شدید ممکن است WUE^4 را به دلیل تجمع ماده خشک کمتر کاهش دهد که منجر به بسته‌شدن اجباری روزنه می‌شود. CO_2 که از طریق روزنه‌ها وارد برگ‌ها می‌شود با بسته‌شدن روزنه محدود شده و در نتیجه هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد (Ullah et al., 2019). با مقایسه نتایج با مطالعه Rezaei Rad et al. (2015) دریافتیم که هر چه مقدار آبیاری کاهش یابد و به اصطلاح گیاه وارد تنش کم‌آبی شود مقدار هدایت روزنه‌ای نیز کاهش می‌یابد. نیتروژن به عنوان یک عنصر کلیدی در ساختار پروتئین‌ها و کلروفیل عمل می‌کند و در افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش میزان هدایت روزنه‌ای نقش کلیدی ایفا می‌کند (Samadi et al., 2024).

۳-۱-۳. میزان تعرق

اثر اصلی رژیم‌های آبیاری در سطح احتمال یک درصد روی میزان تعرق برگ گیاه ذرت اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲). بیشترین مقدار میزان تعرق (۳۴۱۷ میلی‌مول آب در متر مربع در ثانیه) مربوط به تیمار آبیاری مطلوب بود (جدول ۵). حرکت آب از خاک به داخل ریشه و سپس از ریشه به برگ در اثر اختلاف پتانسیل بین خاک و برگ است (Chavarria et al., 2012). با خارج‌شدن آب از خاک، رطوبت کاهش یافته و پتانسیل کل آن کاهش می‌یابد. در این وضعیت ضریب هدایت مؤئینگی خاک که با درصد رطوبت رابطه مستقیم دارد کاهش یافته و در نتیجه مقاومت خاک افزایش پیدا می‌کند؛ کاهش پتانسیل آب در خاک و افزایش مقاومت خاک باعث می‌شود که آب کمتری داخل گیاه شده و با کم‌شدن آماس سلول‌ها، پتانسیل آب برگ نیز کاهش یابد. با کاهش پتانسیل آب در برگ سرانجام روزنه‌ها بسته شده و مقاومت در برابر خروج آب در برگ افزایش و سرعت تعرق کاهش پیدا می‌کند؛ چون گاز کربنیک نیز از همان مسیر وارد گیاه می‌شود. این عمل باعث کاهش ورود آن نیز شده و مقدار فتوسنتز که در واقع کمیت و کیفیت محصول است کاهش می‌یابد (Krammer & Boyer, 1995).

جدول ۴. اثر سه گانه رژیم های آبیاری، تغذیه و ارقام ذرت روی هدایت روزنه ای (مول آب در متر مربع در ثانیه).

رژیم های آبیاری	سیستم تغذیه	ارقام ذرت	
		تری وی ۶۴۷	سینگل کراس ۷۰۴
نیترژن مطلوب	کود نیترژن	۰/۰۱۸ ^a	۰/۰۱۲ ^b
	ریز موجودات مؤثر	۰/۰۱۶ ^b	۰/۰۱۴ ^a
	تلفیق ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن	۰/۰۱۵ ^b	۰/۰۱۴ ^a
نیترژن متوسط	کود نیترژن	۰/۰۱۶ ^a	۰/۰۱۰ ^a
	ریز موجودات مؤثر	۰/۰۱۳ ^b	۰/۰۱۰ ^a
	تلفیق ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن	۰/۰۱۳ ^b	۰/۰۱۱ ^a
نیترژن کم	کود نیترژن	۰/۰۰۹ ^b	۰/۰۰۹ ^a
	ریز موجودات مؤثر	۰/۰۰۹ ^b	۰/۰۰۸ ^a
	تلفیق ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن	۰/۰۱۰ ^a	۰/۰۰۷ ^a

برش دهی بر اساس رژیم های آبیاری و رقم انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار می باشد.

جدول ۵. اثر اصلی رژیم های آبیاری روی میزان تعرق.

رژیم های آبیاری	میزان تعرق (میلی مول آب در متر مربع در ثانیه)
آبیاری مطلوب	۳۴۱۷ ^a
تنش کم آبی متوسط	۲۴۴۲ ^b
تنش کم آبی شدید	۲۰۵۱ ^b

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار می باشد.

۴-۱-۳. نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط

اثر سه گانه تنش کم آبی، سیستم تغذیه ای و رقم تأثیر معنی داری روی نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط در سطح پنج درصد داشت (جدول ۲). نتایج نشان داد در شرایط آبیاری مطلوب، در رقم تری وی ۶۴۷، کاربرد ریز موجودات مؤثر و تلفیق ریز موجودات مؤثر با کود نیترژن باعث افزایش ۴۸/۰۱ و ۶۹/۹۰ درصدی نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط نسبت به کاربرد کود نیترژن شد (جدول ۶). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ بالاترین مقدار نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط در کود نیترژن و تلفیق ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن به ترتیب با ۱۳/۱۶ و ۱۳/۲۶ مشاهده شد (جدول ۶). نتایج در شرایط تنش کم آبی متوسط بدین صورت بود که در رقم تری وی ۶۴۷ کاربرد ریز موجودات مؤثر باعث افزایش ۱۷/۸۷ درصدی نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط نسبت به کاربرد کود نیترژن شد (جدول ۶). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴، بالاترین نتیجه مربوط به سیستم تغذیه ای تلفیق ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن (۸/۳۸) بود (جدول ۶). در شرایط تنش کم آبی شدید، در سیستم تغذیه ای ریز موجودات مؤثر و کود نیترژن بیشترین مقدار در رقم تری وی ۶۴۷ (۵/۳۶) مشاهده شد (جدول ۶). در حالی که در همین شرایط آبیاری، مطلوب ترین سیستم تغذیه برای رقم سینگل کراس ۷۰۴، کاربرد ریز موجودات مؤثر با افزایش ۷۵/۷۳ درصدی نسبت به کاربرد کود نیترژن بود (جدول ۶).

انتخاب ارقام مقاوم به خشکی ممکن است راندمان فتوسنتزی را افزایش دهد (Hetherington & Woodward., 2003). گیاهان C₄ مانند ذرت با کارایی بیشتری از CO₂ استفاده می کنند و در شدت نور زیاد و مقدار آب کافی و شرایط تغذیه مناسب قادرند CO₂ اطراف را به صفر تا ۱۰ پی پی ام کاهش دهند که این نقطه جبران است؛ در حالی که در گیاهان C₃، CO₂ برابر ۵۰ الی ۱۵۰ پی پی ام است (Bhagwat, 2005). نقطه جبرانی پایین نشان دهنده کارایی زیاد فتوسنتز و بالا بودن نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط است که در گیاهانی مانند ذرت نشان داده شده است (Lal & Edward, 1996). در شرایط تنش کم آبی، نسبت CO₂ بین سلولی به CO₂ محیط به طور معمول تحت تأثیر تغییرات در رفتار گیاهان نسبت به وضعیت آب موجود در خاک و فرایندهای فتوسنتز و تنفس قرار می گیرد (Gupta et al., 2020). به طور کلی، در شرایط تنش کم آبی، گیاهان ممکن است دهانه های (استومات ها) خود

را ببینند تا از اتلاف آب جلوگیری کنند که این امر منجر به کاهش جذب CO_2 از محیط و در نتیجه کاهش نسبت CO_2 بین سلولی به CO_2 محیط می‌شود (Wang et al., 2022).

جدول ۶. اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، تغذیه و ارقام ذرت روی نسبت CO_2 بین سلولی به CO_2 محیط (ci/ca).

رژیم‌های آبیاری	سیستم تغذیه	ارقام ذرت	سینگل کراس ۷۰۴
آبیاری مطلوب	کود نیتروژن	تری‌وی ۶۴۷	۱۳/۱۶ ^a
	ریزموجودات مؤثر		۱۲/۰۱ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن		۱۳/۲۶ ^a
تغذیه متوسط	کود نیتروژن	۶/۷۷ ^b	۶/۳۹ ^b
	ریزموجودات مؤثر	۷/۹۸ ^a	۵/۷۳ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۷/۱ ^b	۸/۳۸ ^a
تغذیه شدید	کود نیتروژن	۴/۴۶ ^b	۳/۳۸ ^c
	ریزموجودات مؤثر	۳/۲۴ ^c	۵/۹۴ ^a
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۵/۳۶ ^a	۴/۴۲ ^b

برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری و رقم انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

۲-۳. رنگیزه‌های فتوسنتزی

۲-۳-۱. کلروفیل a و b و کل و کاروتنوئید

اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، سیستم تغذیه‌ای و رقم تأثیر معنی‌داری روی کلروفیل a و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۷). نتایج نشان داد در شرایط آبیاری مطلوب در رقم تری‌وی ۶۴۷ سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر باعث افزایش ۲۷ درصدی میزان کلروفیل a نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۸). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ بالاترین مقدار کلروفیل a در سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن به‌ترتیب با ۰/۲۶۹ و ۰/۳۶۰ و ۰/۲۸۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۸). در شرایط تنش کم‌آبی متوسط در سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با تلفیق کود نیتروژن و ریزموجودات مؤثر به‌ترتیب با ۰/۲۷۲ و ۰/۲۶۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ در رقم تری‌وی ۶۴۷ بیشترین مقدار کلروفیل a به‌دست آمد (جدول ۸). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ سیستم‌های تغذیه‌ای کود نیتروژن و کاربرد ریزموجودات مؤثر با مقادیر ۰/۲۹۰ و ۰/۲۷۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ بیشترین مقدار کلروفیل a مشاهده شد (جدول ۸). در شرایط تنش کم‌آبی شدید سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۱۳/۸۳ درصدی کلروفیل a نسبت به کاربرد کود نیتروژن در رقم تری‌وی ۶۴۷ شد (جدول ۸). همچنین در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴، سیستم تغذیه‌ای تلفیقی باعث افزایش ۵/۳۸ درصدی کلروفیل a نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۸). نتایج نشان داد در شرایط آبیاری مطلوب در رقم تری‌وی ۶۴۷ سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر باعث افزایش ۹۴/۲۵ درصدی میزان کاروتنوئید نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۸). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ بالاترین مقدار کاروتنوئید در سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با ۲۰/۸۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۸). در شرایط تنش کم‌آبی متوسط در سیستم تغذیه‌ای تلفیق کود نیتروژن و ریزموجودات مؤثر با ۱۸/۵۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ در رقم تری‌وی ۶۴۷ بیشترین مقدار کاروتنوئید به‌دست آمد (جدول ۸). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ در سیستم‌های تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن بیشترین مقدار کاروتنوئید با ۱۹/۷۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۸). در شرایط تنش کم‌آبی شدید، سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۳۹/۲۲ درصدی مقدار کاروتنوئید نسبت به کاربرد کود نیتروژن در رقم تری‌وی ۶۴۷ مشاهده شد (جدول ۸). همچنین در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴، سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۲۹/۲۹ درصدی نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۸). اثر اصلی رژیم‌های آبیاری در سطح احتمال پنج درصد روی میزان کلروفیل کل برگ گیاه ذرت اثر معنی‌داری داشت (جدول ۸).

۷). بیشترین مقدار کلروفیل کل در رژیم آبیاری مطلوب با مقدار 0.373 میلی گرم در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۹). استفاده از کودهای زیستی و انتخاب ارقام مناسب راه‌حل‌های ساده‌ای برای کاهش شرایط تنش مانند کمبود آب است. تنش کم‌آبی فتوسنتز و محتوای کلروفیل برگ را کاهش می‌دهد (Bismillah Khan et al., 2003). Farnia & Khodabandehloo (2015) گزارش دادند که کودهای زیستی محتوای کلروفیل برگ‌های ذرت را در شرایط آبیاری مطلوب به میزان زیادی افزایش می‌دهد ولی در شرایط خشکی، این کود چندان نمی‌تواند محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ‌های ذرت را بهبود ببخشد. اثر متقابل رژیم آبیاری و کود زیستی بر میزان کلروفیل a برگ معنی‌دار بود و نتایج نشان داد که تنش متوسط و شدید آب باعث کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل برگ می‌شود. استفاده از کودهای زیستی، کلروفیل a را در شرایط تنش کم‌آبی متوسط افزایش داد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که تنش کم‌آبی طولانی‌مدت می‌تواند منجر به آسیب ساختاری برگ‌ها و غشای تیلاکوئید شود، در نتیجه میزان کلروفیل کل برگ کاهش می‌یابد (Song et al., 2019). اثر تنش کم‌آبی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (مانند کلروفیل‌ها، کاروتنوئیدها و زانتوفیل‌ها) معمولاً منجر به کاهش میزان کلروفیل‌ها، تغییر در ترکیب کاروتنوئیدها و کاهش کارایی فتوسنتز می‌شود. این تغییرات به دلیل استرس اکسیداتیو، اختلال در سنتز رنگیزه‌ها و تخریب ساختارهای سلولی ناشی از کم‌آبی است؛ تنش کم‌آبی باعث کاهش سنتز و تجزیه کلروفیل‌ها می‌شود که منجر به کاهش توانایی گیاه در جذب نور و انجام فتوسنتز می‌گردد و در نهایت کم‌آبی می‌تواند غشاهای تیلاکوئید را تخریب و عملکرد رنگیزه‌ها را مختل کند (Gul et al., 2022).

۳-۳. صفات بیوشیمیایی

۳-۳-۱. آنتوسیانین

اثر برهمکنش رژیم‌های آبیاری و سیستم‌های تغذیه تأثیر معنی‌داری روی آنتوسیانین برگ ذرت در سطح یک درصد گذاشت (جدول ۱۰). بیشترین مقدار آنتوسیانین در شرایط آبیاری مطلوب به مقدار 0.054 میکرومول در گرم وزن تر برگ در استفاده از سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن مشاهده شد (جدول ۱۱). همچنین بیشترین مقدار آنتوسیانین در شرایط تنش کم‌آبی متوسط به مقدار 0.054^1 میکرومول در گرم وزن تر برگ در استفاده از سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن به‌دست آمد (جدول ۱۱). در انتها در شرایط تنش کم‌آبی شدید در سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن با مقدار 0.05 میکرومول در گرم وزن تر برگ بیشترین مقدار آنتوسیانین مشاهده شد (جدول ۱۱).

جدول ۷. تجزیه واریانس رنگیزه‌های فتوسنتزی ذرت تحت تأثیر سیستم تغذیه، رقم و رژیم‌های آبیاری.

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
کاروتنوئید	کلروفیل کل	کلروفیل b	کلروفیل a		
$7/0.352^{ns}$	$0/0.306^{ns}$	$0/0.03^{ns}$	$0/0.18^{ns}$	۲	بلوک
$48/46^{**}$	$0/0.58^{**}$	$0/0.01^{ns}$	$0/0.39^{**}$	۲	تنش کم‌آبی (S)
$4/4$	$0/0.59$	$0/0.005$	$0/0.36$	۴	خطای a
$12/9^{**}$	$0/0.06^{ns}$	$0/0.01^{ns}$	$0/0.67^{ns}$	۲	تغذیه (N)
$17/0.9^{**}$	$0/0.06^{ns}$	$0/0.009^{ns}$	$0/0.05^{ns}$	۴	S×N
$7/2$	$0/0.17$	$0/0.01$	$0/0.06$	۱۲	خطای b
$6/9^{ns}$	$0/0.09^{ns}$	$0/0.0008^{ns}$	$0/0.02^{ns}$	۱	رقم (V)
$7/19^*$	$0/0.01^{ns}$	$0/0.003^{ns}$	$0/0.01^{ns}$	۲	S×V
$7/83^{ns}$	$0/0.02^{ns}$	$0/0.004^{ns}$	$0/0.03^{ns}$	۲	N×V
$10/89^*$	$0/0.09^{ns}$	$0/0.01^{ns}$	$0/0.12^*$	۴	S×N×V
$2/75$	$0/0.11$	$0/0.01$	$0/0.16$	۱۸	خطای c
$10/3$	$27/5$	$27/5$	$22/8$		ضریب تغییرات (%)

^{ns}، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

آنتوسیانین‌ها می‌توانند به‌عنوان یک فیلتر نوری عمل کرده و از سلول‌های گیاهی در برابر اثرات مخرب اشعه UV محافظت کنند (Karunarathne et al., 2019). همچنین در شرایط تنش مانند دماهای پایین، کم‌آبی، شوری و آسیب‌های مکانیکی با کاهش

تولید رادیکال‌های آزاد، گیاه را از تنش اکسیداتیو محافظت می‌کنند (Medina-Lozano et al., 2024). استفاده از کودهای آلی و زیستی می‌تواند از طریق تأمین مواد مورد نیاز، تجمع آنتوسیانین‌ها را افزایش دهد (Enaro et al., 2021). تنش کم‌آبی می‌تواند موجب تغییر در سطح هورمون‌های گیاهی مانند آبسزیک‌اسید (ABA) شود که تأثیر چشم‌گیری روی متابولیسم آنتوسیانین دارد. از طرفی، ABA می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مربوط به سنتز آنتوسیانین را تحت تأثیر قرار دهد و در شرایط تنش کم‌آبی استفاده از کود نیتروژن با افزایش محتوی ABA منجر به افزایش آنتوسیانین برگ گیاه ذرت می‌شود (Yüzbaşıoğlu et al., 2017).

جدول ۸. اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، تغذیه و ارقام ذرت روی کلروفیل a (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) و کاروتنوئید (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ).

رژیم‌های آبیاری	سیستم تغذیه	کاروتنوئید		کلروفیل a	
		تری‌وی ۶۴۷	سینگل کراس ۷۰۴	تری‌وی ۶۴۷	سینگل کراس ۷۰۴
کود نیتروژن	کود نیتروژن	۰/۲۰۹ ^b	۰/۳۶۰ ^a	۱۵/۰۶ ^b	۲۰/۸۳ ^a
	ریزموجودات مؤثر	۰/۴۰۶ ^a	۰/۲۲۱ ^b	۱۹/۱۳ ^a	۱۶/۸۷ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۲۸۷ ^b	۰/۲۸۵ ^a	۱۴/۸۸ ^b	۱۷/۷۶ ^b
کود نیتروژن	کود نیتروژن	۰/۲۷۲ ^a	۰/۳۹۰ ^a	۱۳/۰۳ ^c	۱۵/۹۳ ^b
	ریزموجودات مؤثر	۰/۲۱۷ ^b	۰/۲۷۹ ^a	۱۵/۶۹ ^b	۱۶/۷۶ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۲۶۹ ^a	۰/۲۳۴ ^b	۱۸/۵۹ ^a	۱۹/۷۷ ^a
کود نیتروژن	کود نیتروژن	۰/۱۸۱ ^b	۰/۱۵۷ ^b	۱۴/۸۲ ^b	۱۳/۵۶ ^b
	ریزموجودات مؤثر	۰/۲۲۷ ^a	۰/۱۸۹ ^b	۱۲/۷ ^c	۱۳/۴۳ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۲۵۲ ^a	۰/۲۰۳ ^a	۱۶/۸۷ ^a	۱۴/۲۹ ^a

برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری و رقم انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۹. اثر اصلی رژیم‌های آبیاری روی کلروفیل کل.

رژیم‌های آبیاری	کلروفیل کل (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)
آبیاری مطلوب	۰/۳۷۳ ^a
تنش کم‌آبی متوسط	۰/۳۳۱ ^a
تنش کم‌آبی شدید	۰/۱۸۵ ^b

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

۲-۳-۳. فنل کل

اثر برهمکنش رژیم‌های آبیاری و سیستم‌های تغذیه در سطح احتمال پنج درصد و اثر برهمکنش رقم و سیستم تغذیه در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری روی فنل برگ ذرت گذاشت (جدول ۱۰). بیشترین مقدار فنل کل در شرایط آبیاری مطلوب به مقدار ۱/۷۲ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر برگ در استفاده از سیستم تغذیه‌ای کود نیتروژن مشاهده شد (جدول ۱۱). همچنین بیشترین مقدار فنل کل در شرایط تنش کم‌آبی متوسط در سیستم‌های تغذیه‌ای کود نیتروژن با تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن به‌ترتیب به میزان ۲/۰۱ و ۲/۰۴ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر برگ به‌دست آمد (جدول ۱۱). در انتها در شرایط تنش کم‌آبی شدید در سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر با مقدار ۳/۰۳ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر برگ بیشترین مقدار فنل کل مشاهده شد (جدول ۱۱). در رقم تری‌وی ۶۴۷ در تنش کم‌آبی شدید بیشترین مقدار فنل کل (۶/۸ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر برگ) مشاهده شد (جدول ۱۲). از طرفی، در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نیز بیشترین مقدار فنل کل در شرایط تنش کم‌آبی شدید به مقدار ۷/۲۴ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۱۲).

افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در شرایط تنش اکسیداتیو را می‌توان به این دلیل نسبت داد که حداکثر فعالیت فیزیولوژیک و تعامل بین کودهای زیستی و شیمیایی و گیاه در ریشه‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین بیان شده است که تمام ترکیبات ضد رادیکال، به

عنوان مثال، فنل‌ها، فلاونوئید و پرولین در گیاهان تحت تنش افزایش می‌یابد (Shirzad et al., 2024). افزایش ترکیبات فنلی با افزایش تنش کمبود آب در این آزمایش با نتایج سایر تحقیقات مطابقت دارد (افشاری و نادری، ۱۴۰۲). ترکیبات فنلی به عنوان یک پاسخ مقاومتی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تولید گونه‌های فعال شناخته شده است. در همین راستا گزارش‌های قبلی نشان داد که همبستگی مثبتی بین فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی و فنل کل وجود دارد (Neffati et al., 2010). با توجه به کشت تابستانه ذرت کمبود آب همراه با شدت نور بالا، بسته‌شدن روزنه‌ها را به دنبال خواهد داشت که در نتیجه کاهش جذب دی‌اکسید کربن اتفاق می‌افتد و مصرف NADPH_2 در تثبیت دی‌اکسید کربن از طریق چرخه کالوین کاهش می‌یابد. این امر باعث تجمع بیش از حد NADPH_2 می‌شود. در نتیجه آن، همه پروسه‌های متابولیک به سمت سنتز ترکیبات کاهش NADPH_2 نظیر ایزوپروپونوئیدها، فنل‌ها یا آلکالوئیدها سوق داده می‌شوند (Selmar & Klein Wachter, 2013). افزایش فنل در اثر کاربرد کودهای زیستی، ناشی از افزایش بیان ژن‌های مسئول بیوسنتز ترکیبات فنلی است (Dear & Aronoff, 1965). اختلاف محتوای فنل کل در ارقام مختلف ذرت نیز با نتایج تحقیق صالحی و همکاران (۱۴۰۲) همخوانی دارد.

جدول ۱۰. تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی و عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر سیستم تغذیه، رقم و رژیم‌های آبیاری.

منابع تغییرات	درجه آزادی	آنتوسیانین	فنل کل	فلاوونوئید کل	پرولین	عملکرد دانه
بلوک	۲	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱۴ ^{ns}	۷/۰۳ ^{**}	۰/۰۷ ^{ns}	۱۳۲۷۶۳ ^{ns}
تنش کم‌آبی (S)	۲	۰/۰۲ [*]	۶/۸۸ ^{**}	۰/۰۲۶ ^{ns}	۱۰۷ ^{**}	۱۳۰۹۱۴۰۹۲ ^{**}
خطای a	۴	۰/۰۲۱	۶/۸۶	۴/۴۸	۰/۳۸۷	۹۸۲۸۳
تغذیه (N)	۲	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۱۲۸ ^{ns}	۴/۴ ^{ns}	۴/۳۹ ^{**}	۴۳۰۲۹۹۷ ^{**}
S×N	۴	۰/۰۲ ^{**}	۰/۴۸۴ [*]	۱۲/۹ [*]	۱/۹۷۵ ^{ns}	۲۴۵۲۱۸۷ ^{**}
خطای b	۱۲	۰/۰۰۲۹	۰/۴۹	۱۷/۰۹	۱/۴۳	۲۴۰۶۷۱
رقم (V)	۱	۰/۰۰۷۳ ^{ns}	۰/۱۳۴ ^{**}	۷/۲۶ ^{ns}	۰/۴۵۶ ^{ns}	۳۵۷۳۷۸ [*]
S×V	۲	۰/۰۰۲۳ ^{ns}	۱/۷۱ ^{**}	۶/۹ ^{ns}	۱/۷۲ [*]	۴۵۱۱۰۴ [*]
N×V	۲	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۳۳۴ ^{ns}	۱۹/۲۷ [*]	۰/۵۱۱ ^{ns}	۶۱۰۹ ^{ns}
S×N×V	۴	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۷/۸۳ [*]	۰/۷۳۸ ^{ns}	۱۳۶۶۹۷۵ [*]
خطای c	۱۸	۰/۰۰۳	۰/۳۷۲	۱/۸۹	۰/۲۹۷	۷۹۳۳۱
ضریب تغییرات (%)		۱۱/۶۵	۱۵/۲۴	۱۴/۷۱	۱۲/۵	۳/۹۷

^{ns}، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

جدول ۱۱. اثر دوگانه رژیم‌های آبیاری و سیستم تغذیه روی آنتوسیانین و فنل کل.

رژیم‌های آبیاری	سیستم تغذیه	آنتوسیانین (میکرومول در گرم وزن تر برگ)	فنل کل (میلی گرم اسید گالیک در گرم وزن تر برگ)
آبیاری سطح	کود نیتروژن	۰/۰۴۱ ^b	۱/۷۲ ^a
	ریزموجودات مؤثر	۰/۰۴۴ ^b	۱/۳۶ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۰۵۴ ^a	۱/۳۳ ^b
آبیاری متوسط	کود نیتروژن	۰/۰۵۴ ^a	۲/۰۱ ^a
	ریزموجودات مؤثر	۰/۰۵۳ ^b	۱/۸۶ ^b
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۰۵۲ ^c	۲/۰۴ ^a
آبیاری شدید	کود نیتروژن	۰/۰۵ ^a	۲/۸۶ ^b
	ریزموجودات مؤثر	۰/۰۴ ^b	۳/۰۳ ^a
	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۰/۰۴ ^a	۲/۲۱ ^b

برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری انجام شده است. حروف مشترک در هر سطح از رژیم آبیاری در هر ستون نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۱۲. اثر دوگانه رقم و رژیم‌های آبیاری روی پرولین و فنل کل.

ارقام ذرت	رژیم آبیاری	فنل کل (میلی گرم وزن تر برگ)	پرولین (میکرومول در گرم وزن تر)
تری وی ۶۴۷	آبیاری مطلوب	۱/۴۴ ^b	۲/۴۷ ^c
	تنش کم آبیاری متوسط	۱/۶۹ ^b	۳/۰۵ ^b
	تنش کم آبیاری شدید	۲/۴۷ ^a	۶/۸ ^a
سینگل کراس ۷۰۴	آبیاری مطلوب	۱/۴۹ ^b	۱/۹۶ ^c
	تنش کم آبیاری متوسط	۲/۲۵ ^b	۴/۱۴ ^b
	تنش کم آبیاری شدید	۲/۹۲ ^a	۷/۲۴ ^a

برش‌دهی بر اساس رقم انجام شده است. حروف مشترک در هر سطح از رقم در هر ستون نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

۳-۳-۳. پرولین

اثر برهمکنش رقم و رژیم‌های آبیاری در سطح احتمال پنج درصد و اثر اصلی تغذیه در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری روی پرولین برگ ذرت گذاشت (جدول ۱۰). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در هر دو رقم ذرت بر اساس مقدار تنش کم‌آبی، کمترین مقدار پرولین در هر دو رقم مربوط به شرایط آبیاری مطلوب و بیشترین مقدار پرولین در شرایط تنش کم‌آبی شدید به‌دست آمد (جدول ۱۲). مقایسه ارقام نشان داد که در شرایط آبیاری مطلوب مقدار پرولین در رقم تری‌وی کراس ۶۴۷، ۲۶ درصد بیشتر از مقدار پرولین در رقم سینگل کراس ۷۰۴ است (جدول ۱۲). اما در شرایط تنش کم‌آبیاری شدید میزان پرولین رقم سینگل کراس ۷۰۴ با مقدار ۷/۲۴ میکرومول در گرم وزن تر برگ بیشتر از مقدار پرولین در رقم تری‌وی ۶۴۷ (۶/۸ میکرومول در گرم وزن تر برگ) گزارش شد (جدول ۱۲). بالاتر بودن مقدار پرولین در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نسبت به سایر ارقام در مطالعه Farajzadeh et al. (2021) نیز مشاهده شد. در اثر اصلی سیستم تغذیه‌ای بیشترین مقدار پرولین در تیمار شاهد (کود نیتروژن) به مقدار ۸/۲۲ میکرومول در گرم وزن تر برگ و کمترین مقدار پرولین در تغذیه تلفیقی کود نیتروژن و ریزموجودات مؤثر به مقدار ۶/۱۱ میکرومول در گرم وزن تر برگ به‌دست آمد (جدول ۱۳). با این وجود عدم اختلاف معنی‌دار در تیمار کاربرد ریزموجودات مؤثر (۶/۷۳ میکرومول در گرم وزن تر برگ) و تلفیق کود شیمیایی و ریزموجودات مؤثر نیز مشاهده شد (جدول ۱۳). طبق نتایج تحقیق Mashhadi & Oveysi (2012) دریافتیم که افزایش قابل توجه پرولین در تنش کم‌آبی با کاهش مقدار نیتروژن و جایگزینی کودهای آلی و زیستی تنظیم می‌گردد. تحمل تنش کم‌آبی حاصل ترکیبی از صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک است که با محتوای کلروفیل، تجمع پرولین، طول و عرض برگ پرچم، اندازه دم گل‌آذین و پارامترهای دیگر مرتبط می‌باشد. گیاهان در هنگام تنش کم‌آبی با تغییراتی که در برخی از خصوصیات فیزیولوژیک خود ایجاد می‌کنند به تنش‌های محیطی پاسخ می‌دهند و یکی از این پاسخ‌ها تجمع پرولین است. پرولین به عنوان تنظیم‌کننده‌ای مؤثر در K^+ (کانال‌های نفوذپذیر یونی) می‌باشد، علاوه‌براین تأثیر مستقیمی بر هموستازی داخل سلولی K^+/Na^+ دارد و سطح فعالیت گونه‌های اکسیژنی را در طی تنش اسمزی کاهش می‌دهد (Fahad et al., 2017). سطح بیان تولید پرولین در اثر مواجهه با تنش‌ها افزایش می‌یابد و به عنوان محافظ اسمزی عمل می‌کند و با محافظت غشاء پلاسمایی در برابر رادیکال‌های آزاد کاهشی ناشی از خسارت تنش باعث پایداری مجموعه‌ای فتوسیستم II و حفظ ساختار آنزیم‌ها و پروتئین‌ها می‌شود (Shahbazi et al., 2016).

جدول ۱۳. اثر اصلی سیستم تغذیه‌ای روی پرولین.

سیستم تغذیه	پرولین (میکرومول در گرم وزن تر برگ)
کود نیتروژن	۸/۲۲ ^a
ریزموجودات مؤثر	۶/۷۳ ^b
تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	۶/۱۱ ^b

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

۴-۳-۳. فلاونوئید کل

اثر سه گانه تنش کم آبی، سیستم تغذیه ای و رقم تأثیر معنی داری روی فلاونوئید کل در سطح احتمال پنج درصد داشت (جدول ۱۰). نتایج نشان داد در شرایط آبیاری مطلوب بالاترین میزان فلاونوئید کل در رقم تری وی ۶۴۷ از سیستم تغذیه ای کود نیتروژن با ۲/۴۵ میکرومول بر گرم وزن تر برگ به دست آمد (جدول ۱۴). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ بالاترین مقدار فلاونوئید کل در سیستم های تغذیه ای کود نیتروژن با کاربرد ریزموجودات مؤثر به ترتیب با ۲/۱ و ۱/۹ میکرومول در گرم وزن تر برگ مشاهده شد (جدول ۱۴). در شرایط تنش کم آبی متوسط در سیستم های تغذیه ای کود نیتروژن با کاربرد ریزموجودات مؤثر به ترتیب با ۲/۲۲ و ۲/۶۴ میکرومول در گرم وزن تر برگ در رقم تری وی ۶۴۷ بیشترین مقدار فلاونوئید کل به دست آمد (جدول ۱۴). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴، سیستم های تغذیه ای کاربرد ریزموجودات مؤثر با تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۳۰/۲۸ و ۲۹/۵۷ درصدی فلاونوئید کل نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۱۴). در شرایط تنش کم آبی شدید سیستم تغذیه ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۹/۷۹ درصدی مقدار فلاونوئید کل در رقم تری وی ۶۴۷ شد (جدول ۱۴)؛ در حالی که در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ در سیستم تغذیه ای کود نیتروژن با ۲/۴۳ میکرومول در گرم وزن تر برگ بیشترین مقدار به دست آمد (جدول ۱۴).

نیتروژن علاوه بر تأثیر بر رشد رویشی گیاه بیوسنتز متابولیت های ثانویه مانند فنل و فلاونوئیدها را تعدیل می کند (Taiz et al., 2010). سیستم تغذیه ای مناسب که تمام نیازهای گیاه ذرت را رفع کند از طریق تأثیر بر غلظت هورمون های درون زاد گیاهی از جمله اکسین بیوسنتز فلاونوئیدها را کنترل می کند (Mirbagheri et al., 2018). بررسی طیفسنجی Krysa و همکاران (2024) تغییرات بیوشیمیایی قابل توجهی را در ساقه و برگ ذرت در گیاهان تیمار شده با کود زیستی ثابت کرد که یکی از تغییرات شامل افزایش غلظت فلاونوئیدهایی مانند میسین، کوئرستین و روتین بود. فلاونوئیدها نقش مهمی در پاسخ گیاهان به ویژه در ذرت به تنش های زیستی و غیر زیستی دارند. فلاونوئیدها به عنوان ترکیبات ضد اکسیدان عمل کرده و به کاهش آسیب های ناشی از تنش اکسیداتیو کمک می کنند (Ferreira et al., 2021). آن ها می توانند در برابر حملات آفات و بیماری ها مؤثر باشند، زیرا برخی از فلاونوئیدها دارای خواص ضد میکروبی و حشره کش هستند، همچنین این مواد به حفظ سلامت کلروپلاست ها و بهبود فرآیند فتوسنتز در شرایط تنش کمک می کنند (Stafford, 1990).

جدول ۱۴. اثر سه گانه رژیم های آبیاری، سیستم تغذیه و ارقام ذرت روی فلاونوئید کل (میکرومول در گرم وزن تر برگ).

ارقام ذرت		سیستم تغذیه	رژیم های آبیاری
سینگل کراس ۷۰۴	تری وی ۶۴۷		
۲/۱ ^a	۲/۴۵ ^a	کود نیتروژن	ت۱
۱/۹ ^a	۱/۷۷ ^b	ریزموجودات مؤثر	ت۲
۱/۶۹ ^b	۲/۰۱ ^b	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	ت۳
۱/۴۲ ^b	۲/۲۲ ^a	کود نیتروژن	ت۴
۱/۸۵ ^a	۲/۶۴ ^a	ریزموجودات مؤثر	ت۵
۱/۸۴ ^a	۱/۹۳ ^b	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	ت۶
۲/۴۳ ^a	۱/۹۴ ^b	کود نیتروژن	ت۷
۱/۹۱ ^b	۲/۰۴ ^b	ریزموجودات مؤثر	ت۸
۱/۸۳ ^b	۲/۱۳ ^a	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن	ت۹

برش دهی بر اساس رژیم های آبیاری و تغذیه انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار می باشد.

۵-۳-۳. عملکرد دانه

نتایج نشان داد اثر سه گانه تنش کم آبی، سیستم تغذیه ای و رقم تأثیر معنی داری روی عملکرد دانه در سطح یک درصد داشت (جدول ۱۰). در شرایط آبیاری مطلوب در رقم تری وی ۶۴۷ سیستم تغذیه ای تلفیقی ریزموجودات مؤثر با کود نیتروژن باعث افزایش ۱۷/۵۹ درصدی عملکرد نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۱۵). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نیز،

سیستم تغذیه‌ای تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۲۹ درصدی عملکرد دانه شد (جدول ۱۵). نتایج در شرایط تنش کم‌آبی متوسط بدین صورت بود که در رقم تری‌وی ۶۴۷ تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن باعث افزایش ۱۵/۲۹ درصدی عملکرد دانه شد (جدول ۱۵). در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر باعث افزایش ۳/۴۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۱۵). در شرایط تنش کم‌آبی شدید، سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر در رقم تری‌وی ۶۴۷ باعث افزایش ۶۸/۷۳ درصدی عملکرد دانه در هکتار نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۱۵)؛ درحالی‌که در همین شرایط آبیاری در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نیز سیستم تغذیه‌ای کاربرد ریزموجودات مؤثر باعث افزایش ۲۵/۱۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد کود نیتروژن شد (جدول ۱۵).

استفاده از کودهای زیستی سبب کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی در گیاهانی مانند ذرت، گندم (*Triticum aestivum*)، جو (*Hordeum vulgare*) و سویا (*Glycine max*) می‌شود (Ilyas et al., 2020). تنش کم‌آبی منجر به کاهش طول و عرض برگ‌ها، کاهش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با رشد و توسعه، و به‌طور کلی، محدودیت در فرآیندهای ساختاری گیاه می‌شود که رشد مطلوب گیاه و تشکیل موثر کپسول‌های دانه را مختل می‌کند (Chaves et al., 2003). تنش کم‌آبی باعث کاهش انباشته‌شدن مواد غذایی در دانه‌ها می‌شود، زیرا جریان مواد غذایی در گیاه محدود می‌شود و میزان پروتئین‌ها و چربی‌ها کاهش می‌یابد (Boyer, 1982). در انتها تنش کم‌آبی سبب تغییر در ساختار ریشه‌ها و کاهش توانایی ریشه‌ها در جذب آب و مواد معدنی می‌شود که به‌طور مستقیم منجر به کاهش سطح آب موجود می‌شود و در نتیجه عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (Earl et al., 2003). ریزموجودات مؤثر ظرفیت فتوسنتز گیاهان را افزایش می‌دهند، مقاومت گیاهان را در برابر آفات و بیماری‌ها بالا برده و همچنین عوامل بیماری‌زا و آفات منتقل‌یافته از خاک را سرکوب می‌کنند که در نهایت منجر به افزایش عملکرد می‌شوند (El-Saadony et al., 2022). کاربرد کودهای زیستی باعث افزایش عملکرد گیاهان زراعی می‌شود؛ زیرا در طی اضافه‌شدن کودهای زیستی، عناصر ماکرو در دسترس گیاهان قرار می‌گیرند و اثرات تنش‌های زیستی و غیر زیستی را کاهش می‌دهند (Bayat et al., 2023).

جدول ۱۵. اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، سیستم تغذیه و ارقام ذرت روی عملکرد دانه در هکتار (کیلوگرم در هکتار).

ارقام ذرت	سیستم تغذیه	رژیم‌های آبیاری
تری‌وی ۶۴۷	سینگل کراس ۷۰۴	
۸۱۴۸ ^b	۷۵۲۶ ^c	کود نیتروژن
۸۷۶۸ ^b	۸۴۹۰ ^b	ریزموجودات مؤثر
۹۵۸۲ ^a	۹۷۰۸ ^a	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن
۸۲۲۳ ^b	۸۶۰۵ ^b	کود نیتروژن
۷۷۱۶ ^c	۸۹۰۰ ^a	ریزموجودات مؤثر
۹۴۸۱ ^a	۸۴۹۷ ^b	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن
۳۲۲۴ ^a	۳۳۴۵ ^b	کود نیتروژن
۵۴۴۰ ^a	۴۱۸۵ ^a	ریزموجودات مؤثر
۳۷۷۱ ^b	۳۷۴۳ ^b	تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن

برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری و تغذیه انجام شده است. حروف مشترک در هر ستون از هر سطح رژیم آبیاری نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

یافته‌های این تحقیق نشان‌دهنده تأثیر کود نیتروژن در تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی و عدم اثرگذاری بالای کود زیستی بود. در بررسی صفات فیزیولوژیک مشاهده شد که تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن سرعت فتوسنتز را در شرایط تنش کم‌آبی متوسط در رقم تری‌وی کراس ۶۴۷ بالا می‌برد. استفاده از ریزموجودات مؤثر منجر به افزایش مقادیر فلاونوئید کل در شرایط تنش کم‌آبی متوسط شد. کاهش تجمع پرولین نیز در شرایط تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن مشاهده شد؛ اما با افزایش میزان تنش کم‌آبی مقادیر پرولین افزایش بالایی داشت. در بررسی ارقام ذرت مشاهده شد که صفات رنگیزه‌های فتوسنتزی و فیزیولوژیک مربوط به رقم سینگل کراس ۷۰۴ از لحاظ کمی بالاتر از رقم تری‌وی ۶۴۷ بود. در شرایط تنش کم‌آبی شدید استفاده از ریزموجودات مؤثر منجر به سنتز بیشتر فنل در هر دو رقم ذرت شد. همچنین، نتایج نشان داد بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب از

تیمار تلفیقی کود نیتروژن و ریزموجودات مؤثر و رقم سینگل کراس ۷۰۴ (۹۷۰۸ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. با توجه به عوارض ناشی از اثرات منفی مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، تلفیق ریزموجودات مؤثر با کودهای شیمیایی می‌تواند راهکار مناسبی برای استفاده کمتر از کودهای شیمیایی باشد. در تنش کم‌آبی شدید، ریزموجودات مؤثر توانستند اثرات بیوشیمیایی ناشی از تنش را به خوبی کنترل کنند. در شرایط آبیاری مطلوب تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن در داده‌های مربوط به صفات بیوشیمیایی مطلوب‌ترین نتیجه را به همراه داشتند. در مجموع با بررسی صفات مشاهده شد که تلفیق ریزموجودات مؤثر و کود نیتروژن منجر به کاهش اثرات مخرب ناشی از تنش کم‌آبی بر هر دو رقم ذرت می‌شود.

۵. منابع

- جهانبخش، ح.، مدرس ثانوی، ع.م.، قناتی، ف.، و توکلی، ا. (۱۳۹۳). بررسی عملکرد دانه و صفات کیفی ذرت شیرین (*Zea mays* var. *Sacarana*) تحت تیمارهای کم‌آبی، تشعشع فرابنفش و ازدیاد دی‌اکسید کربن. <https://civilica.com/doc/704677>
- Abdelkhalik, A., Abd El-Mageed, T.A., Mohamed, I.A., Semida, W.M., Al-Elwany, O.A., Ibrahim, I.M., ... , & Gyushi, M.A. (2023). Soil application of effective microorganisms and nitrogen alleviates salt stress in hot pepper (*Capsicum annum* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1079260. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079260>.
- Adeleke, R.A., Nunthkumar, B., Roopnarain, A., & Obi, L. (2019). Applications of plant-microbe interactions in agro-ecosystems. *Microbiome in Plant Health and Disease. Challenges and Opportunities*, 1-34. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8495-01>.
- Afshari, M., & Naderi, A. (2023). Phenol content assays and corn grain yield by zinc and iron consumption in cut-off irrigation conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 69-80. Doi: <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.352955.654965>.
- Alhammad, B.A., & Seleiman, M.F. (2023). Improving plant growth, seed yield, and quality of faba bean by integration of bio-fertilizers with biogas digestate. *Agronomy*, 13(3), 744. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030744>.
- Ayub, M., Ashraf, M.Y., Kausar, A., Saleem, S., Anwar, S., Altay, V., & Ozturk, M. (2021). Growth and physio-biochemical responses of maize (*Zea mays* L.) to drought and heat stresses. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 155(3), 535-542. Doi: Read this article /doi/full/10.1080/11263504.2020.1762785?needAccess=true.
- Bakhshi, D., & Arakawa, O. (2006). Induction of phenolic compounds biosynthesis with light irradiation in the flesh of red and yellow apples. *Journal of Applied Horticulture*, 8(2), 101-104. DOI: <https://doi.org/10.37855/jah.2006.v08i02.23>.
- Bayat, S., Dalir, N., Mokhtassi-Bidgoli, A., Malakouti, M.J., & Shahbazi, K. (2023). Selenium alleviates cadmium-induced stress in durum wheat (*Triticum durum*) by enhancing the accumulation of cadmium in the roots and by modulating of photosynthesis parameters. *Journal of Plant Nutrition*, 46(9), 1903-1919. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105713>.
- Bhagwat, A.S. (2005). Photosynthetic carbon assimilation of C3, C4, and CAM pathways. *Handbook of Photosynthesis*, 2, 367-389.
- Boyer, J.S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571), 443-448. DOI: 10.1126/science.218.4571.443.
- Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A., & Kumar, G. (2022). Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 930340. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>.
- Chavarria, G., & dos Santos, H.P. (2012). Plant water relations: Absorption, transport and control mechanisms. *Advances in Selected Plant Physiology Aspects*. Rijeka: Intech, 1(8), 105-132.
- Chaves, M.M., Maroco, J.P., & Pereira, J.S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264. Doi: <https://doi.org/10.1071/FP02076>.
- Dabija, A., Ciocan, M.E., Chettrariu, A., & Codină, G.G. (2021). Maize and sorghum as raw materials for brewing: A review. *Applied Sciences*, 11(7), 3139. Doi: <https://doi.org/10.3390/app11073139>.
- Dear, J., & Aronoff, S. (1965). Kinetics of chlorogenic and caffeic acids during the onset of boron deficiency in sunflower. *Journal of Plant Physiology*, 40, 458-459. Doi: <https://doi.org/10.1104/pp.40.3.458>.
- Demirevska, K., Simova-Stoilova, L., Fedina, I., Georgieva, K., & Kunert, K. (2010). Response of oryzacystatin I transformed tobacco plants to drought, heat and light stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(2), 90-99. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00396.x>.

- Dodd, I.C., & Pérez-Alfocea, F. (2012). Microbial amelioration of crop salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3415-3428. Doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers033>.
- Earl, H.J., & Davis, R.F. (2003). Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*, 95(3), 688-696. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2003.6880>.
- Elbagory, M. (2023). Reducing the adverse effects of salt stress by utilizing compost tea and effective microorganisms to enhance the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants. *Agronomy*, 13(3), 823. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030823>.
- Eliaspour, S., Seyed Sharifi, R., Shirkhani, A., & Farzaneh, S. (2020). Effects of biofertilizers and iron nano-oxide on maize yield and physiological properties under optimal irrigation and drought stress conditions. *Food Science & Nutrition*, 8(11), 5985-5998. Doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1884>.
- El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.M., Ahmed, A.I., Mahmood, M., ..., & AbuQamar, S.F. (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>.
- Elshepiny, M.A., El-Bakry, F.A., Ibrahim, N.R., & El-Shaboury, H.A. (2023). Role of compost, biochar and sugar alcohols in raising the maize tolerance to water deficit conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 63(1), 67-81. Doi: <https://doi.org/10.21608/ejss.2022.178322.1556>.
- Enaru, B., Dreţcanu, G., Pop, T.D., Stănilă, A., & Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation. *Antioxidants*, 10(12), 1967. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10121967>.
- Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., ..., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.
- Farajzadeh-Memari-Tabrizi, E., & Babashpour-Asl, M. (2021). Bio-fertilizer impact on production efficiency and yield of corn (*Zea mays*) cultivars under water deficiency. *Agritech*, 41(1), 85-94. Doi: <https://doi.org/10.22146/agritech.58541>.
- Farnia, A., & Khodabandehloo, S. (2015). Changes in yield and its components of maize (*Zea mays* L.) to foliar application of zinc nutrient and mycorrhiza under water stress condition. *International Journal of Life Sciences*, 9(5), 75-80.
- Farooq, M., Bramley, H., Palta, J.A., & Siddique, K.H. (2011). Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(6), 491-507. Doi: <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615687>.
- Ferreira, M.L.F., Serra, P., & Casati, P. (2021). Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. *Physiologia Plantarum*, 173(3), 736-749. Doi: <https://doi.org/10.1111/ppl.13543>.
- Gul, N., Haq, Z.U., Ali, H., Munsif, F., Hassan, S.S.U., & Bungau, S. (2022). Melatonin pretreatment alleviated inhibitory effects of drought stress by enhancing anti-oxidant activities and accumulation of higher proline and plant pigments and improving maize productivity. *Agronomy*, 12(10), 2398. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102398>.
- Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A.I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>.
- Hanway, J.J., & Ritchie, S.W. (2019). *Zea mays*. In *Handbook of flowering*. CRC Press (pp. 525-541). Link: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781351072564-66/zea-mays-john-hanway-steven-ritchie>.
- Hetherington, A.M., & Woodward, F.I. (2003). The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424(6951), 901-908. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature01843>.
- Higa, T., & Parr, J.F. (1994). Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. Atami, Japan. *International Nature Farming Research Center*, 1, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0465-3>.
- Hiscox, J.D., & Israelstam, G.F. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57(12), 1332-1334. Doi: <https://doi.org/10.1139/b79-163>.
- Hussein, M., Ali, M., Abbas, M.H.H., & Bassouny, M.A. (2022). Composting animal and plant residues for improving the characteristics of a clayey soil and enhancing the productivity of wheat plant grown thereon. *Egyptian Journal of Soil Science*, 62(3), 195-208. (In Persian). Doi: <https://dx.doi.org/10.21608/ejss.2022.154465.1524>.
- Jahanbakhsh, H., Modares Sanavi, S.A.M., Qanati Tawakoli, F., Moradi Qahdrijani, M., & Panahi, M. (2014). Investigating the grain yield and quality traits of sweet corn (*Zea mays* L. var. *Saccharata*) under water deficit, ultraviolet radiation and increased carbon dioxide treatments. *Iranian Plant Sciences*, 45(3), 335-344. Doi: <https://civilica.com/doc/704677>.
- Joshi, H., Somduttand, C.P., & Mundra, S.L. (2019). Role of effective microorganisms (EM) in sustainable

- agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(3), 172-181.
- Karunaratne, W.A.H.M., Molagoda, I.M.N., Lee, K.T., Choi, Y.H., Yu, S.M., Kang, C.H., & Kim, G.Y. (2021). Protective effect of anthocyanin-enriched polyphenols from *Hibiscus syriacus* L. (malvaceae) against ultraviolet b-induced damage. *Antioxidants*, 10(4), 584. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10040584>.
- Khan, M.B., Asif, M., & Aman, M. (2003). Response of some maize (*Zea mays* L.) genotypes to different irrigation levels. *International Journal of Agriculture and Biology*, 5(1), 17-18.
- Kramer, P.J., & Boyer, J.S. (1995). Water relations of plants and soils. Academic Press.
- Krysa, M., Susniak, K., Song, C.L., Szymanska-Chargot, M., Zdunek, A., Pieta, I.S., ..., & Kazarian, S.G. (2024). Multimodal spectroscopic studies to evaluate the effect of nod-factor-based fertilizer on the maize (*Zea mays*) stem. *Applied Spectroscopy*, 78(6), 591-604. Doi: <https://doi.org/10.1177/00037028241239358>.
- Kumar, R., Saurabh, K., Kumawat, N., Sundaram, P.K., Mishra, J.S., Singh, D.K., ..., & Bhatt, B.P. (2021). Sustaining productivity through integrated use of microbes in agriculture. *Role of Microbial Communities for Sustainability*, 109-145. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9912-5_5.
- Lal, A., & Edwards, G.E. (1996). Analysis of inhibition of photosynthesis under water stress in the C4 species *Amaranthus cruentus* and *Zea mays*: Electron transport, CO₂ fixation and carboxylation capacity. *Functional Plant Biology*, 23(4), 403-412.
- Lawlor, D.W. (1995). Effects of water deficit on photosynthesis. *Environment and Plant Metabolism: Flexibility and Acclimation*, 129-160.
- Ls, B. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
- Manderscheid, R., Erbs, M., & Weigel, H.J. (2014). Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. *European Journal of Agronomy*, 52, 11-21. Doi: <https://doi.org/10.1071/PP9960403>.
- Medina-Lozano, I., Bertolín, J.R., & Díaz, A. (2024). Impact of drought stress on vitamin C and anthocyanin content in cultivated lettuces (*Lactuca sativa* L.) and wild relatives (*Lactuca* spp.). *Frontiers in Plant Science*, 15, 1369658. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1369658>.
- Mekouar, M.A. (2021). 15. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO). *Yearbook of International Environmental Law*, 32(1), 298-304.
- Mirbaqeri, S.M., Karimi, R., & Rasouli, M. (2018). The combination effect of potassium and iron on fruit yield and quality, raisin and cold tolerance of grapevine. *Journal of Crops Improvement*, 20(3), 737-754. Doi: <https://doi.org/10.22059/jci.2018.251761.1933>.
- Miri, S., Alizadeh, Y., Alizadeh, H., & Amini, I. (2024). Investigating the effects of drought stress on seed yield, photosynthetic parameters and physiological characteristics of seed corn (*Zea mays* L.) and mung bean (*Vigna radiata* L.) in different planting patterns and environmental stresses. *Agricultural Sciences*, 455-471. Doi: <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5999.2188>.
- Misra, M., Sachan, A., & Sachan, S.G. (2020). Current aspects and applications of biofertilizers for sustainable agriculture. *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture*, 445-473. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_15.
- Neffati, M., Sriti, J., Hamdaoui, G., Kchouk, M.E., & Marzouk, B. (2010). Salinity impact on fruit yield, essential oil composition and antioxidant activities of *Coriandrum sativum* fruit extracts. *Food Chemistry*, 124, 221-225. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.022>.
- Nisar, S., Rashid, Z., Touseef, A., Kumar, R., Nissa, S.U., Faheem, J., ..., & Dar, Z.A. (2024). Productivity of fodder maize (*Zea mays* L.) SFM-1 under varied sowing dates and nitrogen levels. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 15(1), 1-12. Doi: <http://dx.doi.org/10.23910/1.2024.5031>.
- Okorski, A., Olszewski, J., Pszczółkowska, A., & Kulik, T. (2008). Effect of fungal infection and the application of the biological agent EM 1TM on the rate of photosynthesis and transpiration in pea (*Pisum sativum* L.) leaves. *Polish Journal of Natural Sciences*, 23(1), 35-47. Doi: <http://10.2478/v10020-008-0003-5>.
- Rehman, G., Muhammad, J., Ilyas, M., Subhanullah, M., Ullah, K., Massimzhan, M., ..., & Zhakypbek, Y. (2024). Phytoremediation of heavy metals from soil and their effects on plant physiology-A review. *ES Materials & Manufacturing*, 26, 1298. DOI: <https://dx.doi.org/10.30919/esmm1298>.
- Rezaei Rad, H., Houshmand, A., Naseri, A., & Siahpoosh, M.R. (2015). Effect of drought stress on physiological indicators and corn yield in the presence of shallow water table in the climatic conditions of Ahvaz. *Irrigation Science and Engineering*, 39(1), 55-66. Doi: <http://10.22055/jise.2016.12012>.
- Rosa, A.P., Dias, T., Mouazen, A.M., Cruz, C., & Santana, M.M. (2023). Finding optimal microorganisms to increase crop productivity and sustainability under drought—a structured reflection. *Journal of Plant Interactions*, 18(1), 2178680. Doi: <https://doi.org/10.1080/17429145.2023.2178680>.
- Salehi, M., Zare, M., Bazrafshan, F., Aien, A., & Amiri, B. (2024). Morpho-physiological and biochemical response of different maize cultivars to zeolite application under drought stress conditions. *Physiology of Agricultural Plants*, 60, 89-103.

- Samadi, A., Derafshi, M., Hassani, A., Gholamhoseini, M., Asgari Lajayer, B., Astatkie, T., & Price, G.W. (2024). Effects of biofertilizers and potassium sulfate on nutrients uptake and physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Crop Health*, 76(1), 209-218. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00954-w>.
- Seleiman, M.F., Almutairi, K.F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B.A., & Battaglia, L.M. (2021). Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use. *Plants*, 10(2). Doi: <https://doi.org/10.3390/plants10010002>.
- Selmar, D., & Kleinwachter, M. (2013). Stress enhances the synthesis of secondary plant products: The impact of stress-related over-reduction on the accumulation of natural products. *Plant and Cell Physiology*, 54(6), 817–826. Doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pct054>.
- Shahbazi, H., Arzani, A., & Esmaelzadeh Moghadam, M. (2016). Effects of drought stress on physiological characteristics in wheat recombinant inbred lines. *Plant Process and Function*; 5(15), 123-132.
- Shirinpour, M., Aharizad, S., Atazadeh, E., Amini, A., Asghari, A., Bybordi, A., & Monirifar, H. (2024). Genetic assessment of pheno-physiological and yield traits of maize under optimal irrigation and water deficiency conditions. Doi: <https://doi.org/10.22034/saps.2023.55247.2992>.
- Shirzad, H., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Rezapour, S., Xiao, J., & Popović-Djordjević, J. (2024). Combined effect of biological and organic fertilizers on agrobiological traits of corn (*Zea mays* L.) under wastewater irrigation. *Plants*, 13(10), 13-31. Doi: <https://doi.org/10.3390/plants13101331>.
- Singh, T.B., Ali, A., Prasad, M., Yadav, A., Shrivastav, P., Goyal, D., & Dantu, P.K. (2020). Role of organic fertilizers in improving soil fertility. Contaminants in agriculture: Sources, impacts and management, 61-77. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3.
- Stafford, H.A. (1990). Flavonoid metabolism.
- Susilowati, L.E., Sukartono, S., Akbar, M.F., Kusumo, B.H., Suriadi, A., Leksono, A.S., & Fahrudin, F. (2024). Assessing the synergistic effects of inorganic, organic, and biofertilizers on rhizosphere properties and yield of maize. *Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 21(1), 104-116. Doi: <https://jurnal.lppm.unram.ac.id/index.php/prosidingsaintek/article/view/257>.
- Talaat, N.B. (2015). Effective microorganisms modify protein and polyamine pools in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants grown under saline conditions. *Scientia Horticulturae*, 190, 1-10. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.005>.
- Tarighaleslami, M., Zarghami, R., Boojar, M.M.A., & Oveisi, M. (2012). Effects of drought stress and different nitrogen levels on morphological traits of proline in leaf and protein of corn seed (*Zea mays* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 12, 49-56.
- Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A. (2019). Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. *Advances in Agronomy*, 156, 109-157. Doi: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>.
- Wang, Y. (2022). LP karcavin and the world of personality. *Open Journal of Philosophy*, 12(4), 559-567. Doi: <https://doi.org/10.4236/ojpp.2022.124038>.
- Wang, Z., Wang, C., & Liu, S. (2022). Elevated CO₂ alleviates adverse effects of drought on plant water relations and photosynthesis: A global meta-analysis. *Journal of Ecology*, 110(12), 2836-2849. Doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13988>.
- Yadav, M.R., Kumar, R., Parihar, C.M., Yadav, R.K., Jat, S.L., Ram, H., ..., & Jat, M.L. (2017). Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. *Agricultural Reviews*, 38(1), 29-40. Doi: <http://dx.doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7306>.
- Yapa, N., Lakmali, D., Silva, K.S., Manawadu, C., Herath, B.M., Madhushan, A., ..., & Bamunuarachchige, C. (2022). Biofertilizers: An Emerging Trend in Agricultural Sustainability. URL: <http://repo.lib.jfn.ac.lk/ujrr/handle/123456789/8984>.
- Yüzbaşıoğlu, E., Dalyan, E., & Akpınar, I. (2017). Changes in photosynthetic pigments, anthocyanin content and antioxidant enzyme activities of maize (*Zea mays* L.) seedlings under high temperature stress conditions. *Journal of Natural Sciences*, 18(2), 97-104.
- Zainuddin, N., Keni, M.F., Ibrahim, S.A.S., & Masri, M.M.M. (2022). Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 102237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102237>.
- Zargar, S.M., Gupta, N., Nazir, M., Mahajan, R., Malik, F.A., Sofi, N.R., ..., & Salgotra, R.K. (2017). Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant Gene*, 11, 154-159. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.04.003>.
- Zhu, X.C., Song, F.B., Liu, S.Q., Liu, T.D., & Zhou, X. (2012). Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* (L.) under drought stress. *Plant, Soil and Environment*, 58(4), 186-191. Link: <http://pse.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2012/04/06.pdf>.