



Original article

Effect of two species of mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae* and *G. fasciculatum*) on agronomic and physiological traits of hybrid maize (single cross 704) under drought stress**Zahra Khoshnam¹, Mohammad Reza Asgharipour^{2*}, Seyed Ahmad Ghanbari²,
Morteza Eshraghi Nejad³**¹. PhD Candidate, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran². Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran³. Assistant Prof., Crop and Horticultural Sciences Research Department, Southern Kerman Agricultural and Natural Resources

Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Jiroft, Iran

Received 28 December 2024; Revised 14 January 2025; Accepted 19 January 2025

Extended abstract**Introduction**

Maize (*Zea mays* L.) is a crucial cereal crop worldwide, particularly in tropical and subtropical regions, valued for its high nutritional content and diverse uses. Drought stress is a major limiting factor for maize growth and yield, impairing key physiological processes such as photosynthesis and cellular division. Effective drought management is essential, as water scarcity directly compromises yield and plant quality. Mycorrhizal fungi form symbiotic associations with plant roots, mitigating the adverse effects of drought by enhancing water and nutrient uptake and improving soil structure. Based on previous findings, plants colonized by mycorrhizal fungi exhibit enhanced drought tolerance and improved physiological performance under water-limited conditions. This study aims to evaluate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize performance under drought stress, with a focus on enhancing agricultural sustainability in the Jiroft region.

Materials and methods

This study was conducted at the Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of South Kerman Province in 2022–2023 to evaluate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on hybrid maize (single cross 704) under drought stress. The experiment was conducted as a split-plot arrangement based on a completely randomized block design with three replications. Four levels of drought stress (50%, 70%, 90%, and 100% of the plant's water requirement) and three seed inoculation treatments—two mycorrhizal fungi species (*Glomus fasciculatum* and *G. mossea*) and a non-inoculated control—were evaluated. The response of maize to drought was examined starting from the 8-leaf stage. Various physiological traits, including chlorophyll content and leaf relative water content, were measured. Chlorophyll was assessed using a chlorophyll meter, and leaf relative water content was determined by measuring the fresh and dry weights of leaf samples. Other traits, including proline content, were also measured using standard methods. Data were analyzed using SAS software (version 4.2) to determine correlations and perform mean comparisons.

Results and discussion

In this study, the interaction between drought stress levels and mycorrhizal fungi significantly influenced several agronomic and physiological traits of hybrid maize (single cross 704). The maximum plant height (251.93 cm) was observed under full irrigation combined with *G. mossea* inoculation.

* Corresponding author: Mohammad Reza Asgharipour; E-Mail: m_asgharipour@uoz.ac.ir

Conversely, the least plant height (205.07 cm) occurred under 50% of the plant's water requirement without mycorrhizal inoculation, indicating a strong influence of water availability on cell division and plant height. Similarly, cob length was maximized under full irrigation combined with *G. mossea*, and decreased under reduced water supply, likely due to reduced photosynthesis and nutrient transport. Cob number per plant and grain number per row were also influenced by water stress and mycorrhizal treatments. Full irrigation supplemented with *G. fasciculatum* resulted in the highest cob count, suggesting enhanced meristematic activity. Grain number per row was maximized under optimal conditions when combined with *G. mossea*. Irrigation levels exerted a significant effect on seed weight, with the highest values observed under full irrigation and *G. mossea* inoculation, highlighting the importance of optimal water availability and mycorrhizal symbiosis for seed development. Notably, the yield was highest under optimal irrigation conditions combined with *G. mossea*, where mycorrhizal symbiosis enhances water and nutrient absorption. Mycorrhizal fungi significantly influenced physiological traits under drought stress. The highest water content and chlorophyll levels were observed under full irrigation and mycorrhizal inoculation, due to enhanced water uptake facilitated by mycorrhizal inoculation. Proline accumulation, a stress indicator, was minimized when drought stress was accompanied by mycorrhizal inoculation, demonstrating the fungi's role in stress mitigation.

Conclusion

The use of mycorrhizal fungi in this study demonstrated that they can mitigate the negative effects of drought stress and contribute to significant improvements in plant performance, including increased chlorophyll content and reduced proline levels. The results indicated that mycorrhizal inoculation under optimal irrigation conditions enhances grain yield. The high correlation observed among most evaluated traits suggests that improvement in one trait may positively influence other traits, enhancing overall plant performance. This study confirms the importance of using mycorrhizal fungi as an effective strategy to enhance plant tolerance to drought stress and improve agronomic traits, underscoring the need for continued research to develop more effective solutions for sustainable agricultural management.

Keywords: Drought stress, Grain yield, Physiological traits, Maize hybrid, *Glomus mossea*, *Glomus fasciculatum*

تأثیر دو گونه قارچ مایکوزیما (*G. fasciculatum* و *Glomus mossea*) بر برخی صفات زراعی و فیزیولوژیک ذرت هیبرید ۷۰۴ تحت تنش خشکی

زهرا خوشنام^۱، محمدرضا اصغری پور^{۲*}، سید احمد قنبری^۳، مرتضی اشراقی نژاد^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۲. استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۳- استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، ایران

چکیده

مشخصات مقاله

در این مطالعه، تأثیر دو گونه قارچ مایکوزیما (*G. fasciculatum* و *Glomus mossea*) بر صفات زراعی و فیزیولوژیک ذرت هیبرید ۷۰۴ تحت تنش خشکی، در مرکز تحقیقات جنوب استان کرمان، به صورت طرح کرت‌های خرد شده و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی ارزیابی شد. در این پژوهش، تنش خشکی به‌عنوان عامل اصلی در چهار سطح (۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و تأثیر تلقیح بذر ذرت با دو گونه قارچ مایکوزیما و یک گروه شاهد (بدون تلقیح) به‌عنوان عامل فرعی بررسی گردید. صفات مختلفی همچون محتوی آب نسبی برگ، کلروفیل، پروتئین، ارتفاع بوته، قطر ساقه، و عملکرد دانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش آبی و استفاده از قارچ‌های مایکوزیما تأثیر قابل توجهی بر تمام ویژگی‌های مورد مطالعه در ذرت داشتند. بیشترین ارتفاع بوته (۲۵۱.۹۳ سانتی‌متر) و طول بلال (۲۲.۵۳ سانتی‌متر) در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و تلقیح با قارچ *G. mossea* مشاهده شد. تعداد بلال در هر بوته نیز تحت تأثیر تنش آبی و مایکوزیما قرار گرفت، به طوری که بیشترین تعداد بلال (۱.۱۷ عدد) در شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ *G. fasciculatum* مشاهده شد. عملکرد دانه نیز به‌طور معناداری تحت تأثیر تنش آبی و مایکوزیما قرار گرفت، به طوری که بیشترین عملکرد دانه (۱۱۶۵۰ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ *G. mossea* ثبت شد. شاخص برداشت نیز در شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ *G. mossea* به حداکثر مقدار خود رسید. محتوای نسبی آب برگ و شاخص کلروفیل نیز تحت تأثیر تنش آبی و مایکوزیما قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که گیاهان تلقیح شده با قارچ مایکوزیما، به‌ویژه گونه *G. mossea*، در شرایط تنش آبی عملکرد بهتری داشته و توانایی بیشتری در حفظ رطوبت نسبی برگ از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی:

تنش خشکی

عملکرد دانه

صفات فیزیولوژیکی

ذرت هیبرید

Glomus mossea
Golmus fasciculatum

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات در سطح جهانی، به‌ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری شناخته می‌شود. این گیاه از خانواده گرامینه‌ها بوده و به دلیل ارزش غذایی بالا و کاربردهای متنوع، نقش کلیدی در تأمین غذای انسان و دام ایفا می‌کند (Shiferaw et al., 2011). در ایران، ذرت پس از غلات پاییزه، دومین محصول زراعی مهم محسوب می‌شود و جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی کشور دارد. با این حال، ذرت به آب فراوانی نیاز دارد و کمبود آب می‌تواند تأثیرات منفی قابل توجهی بر رشد و عملکرد آن داشته باشد (Cairns et al., 2012). تنش خشکی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در کشت ذرت، می‌تواند منجر به کاهش فتوسنتز، کوچک شدن اندازه برگ‌ها و اختلال در تقسیم سلولی شود. یکی از نخستین واکنش‌های گیاهان به کمبود آب، کاهش تورژسانس سلولی و در نتیجه کاهش رشد طولی آن‌هاست. همچنین، سنتز پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Farooq et al., 2017).

مقدمه

از افزایش جذب آب و مواد مغذی توسط قارچ‌ها و انتقال مؤثرتر آنها به گیاه است (Zhang et al., 2019). همچنین، میکوریزا به دلیل افزایش سرعت فتوسنتز، به رشد بهتر گیاه کمک کرده و از طریق مکانیزم‌های متنوعی مانند بهبود وضعیت تغذیه‌ای، مقاومت گیاه در برابر خشکی را افزایش می‌دهد (Wu et al., 2019). میکوریزا تغییراتی در ساختار و عملکرد برگ‌ها ایجاد می‌کند، از جمله افزایش ضخامت برگ و کاهش تعرق، که موجبات کاهش مصرف آب را فراهم می‌آورد. با گسترش شبکه هیفی در خاک، میکوریزا به گیاه کمک می‌کند تا به منابع دورتر آبی و غذایی دسترسی پیدا کند؛ حتی در شرایط خشکی شدید، این قارچ‌ها قادر به جذب آب و مواد غذایی از خاک و انتقال آنها به گیاه هستند که به‌ویژه برای جذب عناصری مانند فسفر اهمیت دارد (Rouphael et al., 2015). مطالعات نشان می‌دهند که گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا توانایی بهتری در حفظ آب در سلول‌های خود دارند و پس از رفع تنش، سریع‌تر به شرایط عادی بازمی‌گردند (Zou et al., 2021).

تحقیقات متعدد اهمیت قابل توجه قارچ‌های میکوریزا را در بهبود رشد و عملکرد گیاهان، به‌ویژه تحت شرایط تنش خشکی، تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، کومار و همکاران (Kumar et al., 2015) نشان دادند که قارچ‌های میکوریزا می‌توانند با افزایش سطح جذب ریشه‌ها، بهبود انتقال آب و مواد مغذی به بخش‌های هوایی گیاه، و ارتقاء رشد کلی گیاه، عملکرد ذرت را بهبود بخشند. همچنین، تحقیقاتی اشاره کرده‌اند که تعداد و کیفیت میسلیوم‌های قارچ میکوریزا می‌تواند تأثیر مستقیمی بر افزایش جذب آب توسط ریشه گیاه داشته باشد. به طوری که هرچه تعداد و طول میسلیوم‌ها بیشتر باشد، توان گیاه در جذب آب از خاک افزایش می‌یابد (Sharifi et al., 2014). هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزا با ریشه‌های گیاهان باعث بهبود جذب آب و مواد مغذی، افزایش تحمل به تنش خشکی و در نهایت افزایش کربن آلی خاک می‌شود که این ویژگی‌ها آنان را به ابزاری کارآمد برای کشاورزی پایدار تبدیل کرده است (Khalvati et al., 2005).

پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر بهبود مقاومت به خشکی و عملکرد گیاهان انجام شده است. با این حال، نوآوری این مطالعه در بررسی هم‌زمان تأثیر دو گونه قارچ میکوریزا (*Glomus* و *Glomus mosseae fasciculatum*) بر ذرت هیبرید ۷۰۴ تحت سطوح مختلف

اساس مطالعات صورت‌گرفته، مقدار آب مورد نیاز برای کشت ذرت در ایران بین ۶ تا ۱۲ هزار متر مکعب در هکتار برآورد شده است، که نشان‌دهنده نیاز آبی بالای این گیاه است (Karimi et al., 2018).

خشکسالی یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که کشاورزی مدرن با آن مواجه است. این پدیده طبیعی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اثرات قابل توجهی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی دارد. برای مقابله با این مشکل، پژوهشگران به دنبال راه‌حلی هستند که میزان تحمل گیاهان به کمبود آب را افزایش داده و بهره‌برداری از منابع آبی را بهبود بخشند (Lobell et al., 2015). ذرت، که از مهم‌ترین غلات در سطح جهان به شمار می‌رود، نیز از آسیب‌های ناشی از خشکسالی مصون نیست. کمبود آب می‌تواند منجر به کاهش رشد، افت عملکرد و در نهایت، کاهش کیفیت محصول شود. در طول تکامل، گیاهان روش‌های مختلفی برای سازگاری با کم‌آبی توسعه داده‌اند، که این سازگاری‌ها شامل تغییرات در ظاهر گیاه مانند شکل برگ‌ها و همچنین تغییرات در مکانیسم‌های داخلی سلول‌ها است (Zargar et al., 2017). تحقیقات نشان داده‌اند که ذرت در مراحل مختلف رشد به تنش آبی حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد. گرچه اثرات منفی کمبود آب در زمان گلدهی و پر شدن دانه‌ها بیشتر بر عملکرد نهایی تأثیرگذار است، اما تأمین آب کافی در مراحل اولیه رشد نیز برای توسعه سالم گیاه و افزایش عملکرد نهایی آن بسیار مهم است. آبیاری کافی در مراحل اولیه رشد به تقویت سیستم ریشه‌ای و ذخیره بهتر مواد غذایی کمک می‌کند، که این امر در شرایط تنش بیشتر به گیاه یاری می‌رساند (Lobell et al., 2015).

قارچ‌های میکوریزا با برقرار کردن رابطه هم‌زیستی با ریشه گیاهان، قادر به کاهش اثرات منفی تنش خشکی هستند. این قارچ‌ها از طریق افزایش ظرفیت خاک در نگهداری آب، بهبود جذب آب توسط ریشه و تنظیم فرایند تعرق گیاه، به گیاه در تحمل شرایط کم‌آبی کمک می‌کنند. علاوه بر این، میکوریزا به گیاه در جذب مؤثرتر عناصر غذایی مانند فسفر، روی و مس یاری می‌رساند که در شرایط خشکی اهمیت ویژه‌ای دارد (Begum et al., 2019). تحقیقات نشان داده‌اند که گیاهانی که با میکوریزا هم‌زیستی دارند، مقاومت بهتری در برابر تنش خشکی نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا دارای رشد بیشتر و اندام‌های بزرگ‌تری نسبت به گیاهان فاقد میکوریزا هستند، که ناشی

تنش خشکی (۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) است. این مطالعه به طور خاص روی برهم کنش بین تنش خشکی و تلقیح با قارچ‌های میکوریزا تمرکز کرده و تأثیر آن را بر صفات فیزیولوژیکی و زراعی ذرت، مانند محتوای آب نسبی برگ، کلروفیل، پرولین، ارتفاع بوته، قطر ساقه و عملکرد دانه، بررسی کرده است. علاوه بر این، این پژوهش به طور ویژه به بررسی تأثیر میکوریزا بر کاهش محتوای پرولین در شرایط آبیاری مطلوب و بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی پرداخته است، که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. این یافته‌ها می‌تواند به ارائه راهکارهای مؤثر برای مدیریت کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند.

باتوجه به اهمیت مدیریت اثرات منفی ناشی از خشکسالی و نیز کمک به افزایش تولید پایدار محصولات کشاورزی در شرایط اقلیمی سخت، این تحقیق به بررسی اثرات قارچ‌های میکوریزا بر رشد و عملکرد ذرت در شرایط کم‌آبی پرداخته است. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی کمبود آب بر ذرت و بهبود عملکرد آن در منطقه جیرفت بوده است. توانایی قارچ‌های میکوریزا در بهبود جذب آب و مواد مغذی باعث شده است که آن‌ها به عنوان یک رویکرد مؤثر و پایدار در کشاورزی معرفی شوند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، در مختصات جغرافیایی ۵۱°۵۷' شرقی و ۳۳°۲۸' شمالی به اجرا درآمد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در **جدول ۱** ارائه شده است. این آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طراحی شد. در این تحقیق، تنش خشکی به عنوان عامل اصلی در چهار سطح (۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و تلقیح بذر ذرت با دو نوع قارچ میکوریزا (*G. fasciculatum* و *G. mossea*) و همچنین شاهد بدون تلقیح به عنوان عوامل فرعی در نظر گرفته شد.

نیاز آبی گیاه ذرت بر اساس فرمول پنمن-مانتیت فائو محاسبه شد. این فرمول به عنوان روشی استاندارد و معتبر برای برآورد نیاز آبی گیاهان در شرایط مختلف اقلیمی مورد

استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه نیاز آبی، داده‌های اقلیمی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، و تشعشع خورشیدی از ایستگاه هواشناسی نزدیک به مزرعه جمع‌آوری شد. سپس، نیاز آبی گیاه (ETc) با ضرب کردن تبخیر-تعرق مرجع (ETO) در ضریب گیاهی (Kc) محاسبه گردید (Allen et al., 1998). ضریب گیاهی برای ذرت در مراحل مختلف رشد (مراحل اولیه، رشد سریع، میانی، و پایانی) از جداول استاندارد فائو استخراج شد (Allen et al., 2005). بر این اساس، سطوح تنش خشکی به صورت ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه اعمال شد. برای اطمینان از دقت محاسبات، نیاز آبی به صورت روزانه محاسبه و آبیاری بر اساس آن تنظیم گردید. در این پژوهش، واکنش گیاه ذرت هیبرید ۷۰۴ به کم‌آبی

در مرحله رشد رویشی، از زمان ۸ برگی شدن، مورد بررسی قرار گرفت. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت به ابعاد ۴×۴ متر مربع بود و فاصله میان ردیف‌ها ۷۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر تعیین گردید. کاشت ذرت در دو سال متوالی در نیمه دوم مردادماه انجام شد و به طور هم‌زمان، به هر بذر ۱۰ گرم قارچ میکوریزا اضافه شد تا اثر این قارچ‌ها بر رشد گیاه تحت شرایط تنش بررسی شود.

گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا با جمعیت ۱۸۰ واحد زنده قارچ به‌ازای هر گرم، از شرکت زیست فناوریان سبز تهران تهیه شدند و پس از اطمینان از کلونیزاسیون در آزمایشگاه قارچ‌شناسی مرکز تحقیقات کشاورزی، به بذرهای اضافه گردیدند. باتوجه به هدف اصلی مطالعه که تأثیر گونه‌های مختلف میکوریزا را بررسی می‌کند، از استفاده هرگونه کود شیمیایی، به جز کود اوره، اجتناب شد. کود اوره نیز در سه نوبت به صورت سرک در طول دوره رشد به گیاهان داده شد. برای اطمینان از کلونیزاسیون موفق، نمونه‌هایی از خاک ریزوسفر گیاهان در مراحل اولیه رشد بررسی شد و درصد کلونیزاسیون ریشه‌ها با استفاده از روش میکروسکوپی تعیین گردید. درصد کلونیزاسیون ریشه‌ها در این مطالعه به طور متوسط ۷۰ تا ۸۰ درصد بود. برای تلقیح بذرهای ذرت با محلول حاوی قارچ میکوریزا به مدت ۳۰ دقیقه به طور کامل آغشته شدند. سپس بذرهای به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک شدند و پس از آن برای کاشت آماده گردیدند. این روش تضمین می‌کند که قارچ‌های میکوریزا به طور مؤثر با ریشه‌های گیاه ارتباط برقرار کرده و کلونیزاسیون موفقیت‌آمیزی داشته باشند.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای مطالعه

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil at the study site

عمق خاک	بافت خاک	ظرفیت زراعی	بژمردگی دائم	اسیدیته	هدایت الکتریکی	پتاسیم	فسفر	مواد آلی
Depth	Soil texture	Soil arable capacity	Permanent wilting	Acidity	Electrical conductivity	Plant available potassium	Plant available phosphorus	Organic matter
cm		%		dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹			-1%
0-30	Loam	21	7.5	7.4	2.5	180	8	0.172

$$[1] \quad 100 \times \frac{\text{وزن تر محزون خشک}}{\text{وزن تورژانسس محزون خشک}} = \text{محتوی نسبی آب برگ (\%)}$$

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل a و کلروفیل b، نمونه‌ای از برگ‌های پایینی گیاه جمع‌آوری و از آن عصاره تهیه شد. در این فرایند، ۰.۲۵ گرم از برگ تازه در هاوونی چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد تا محلولی یکنواخت به دست آید. سپس این محلول به لوله‌های فالتون ۲۰ میلی‌لیتری منتقل شده و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. در مرحله بعد، میزان جذب نور محلول رویی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۴۷۰، ۵۱۰، ۵۶۴، ۶۵۲، و ۶۶۳ نانومتر اندازه‌گیری گردید. در نهایت، غلظت کلروفیل و کاروتنوئیدها بر اساس معادله ارائه شده توسط آرنون (Arnon, 1943) محاسبه شد (روابط ۲ تا ۵).

$$[2] \quad \text{Chlorophyll } a \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = 12.7(D663) - 2.69(D645) V/1000 \times W$$

$$[3] \quad \text{Chlorophyll } b \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = 22.9(D645) - 4.68(D663) V/1000 \times W$$

$$[4] \quad \text{Chlorophyll } a+b \text{ (mg/g)} = (D652) - 1000/34.5 \times V/1000 \times W$$

$$[5] \quad \text{Carotenoids} = 7.6(D470) - 1.49(D 510) V/1000 \times W$$

برای اندازه‌گیری میزان پرولین از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1937) استفاده گردید. در این روش، ۵۰۰ میلی‌گرم از نمونه تر برگ در ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبی سولفوسالیسیلیک اسید ۳ درصد خرد شد و سپس مخلوط به وسیله کاغذ صافی صاف شد. در مرحله بعد، ۲ میلی‌لیتر از این محلول با ۲ میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین (۱.۲۵ گرم ناین هیدرین در ۳۰ میلی‌لیتر استیک اسید و ۲۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۶ مولار) ترکیب شد و به هر لوله ۲ میلی‌لیتر استیک اسید اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای مطالعه با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). اسیدیته (pH) خاک در عصاره گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1996). هدایت الکتریکی (EC) نیز در عصاره گل اشباع با دستگاه هدایت‌سنج تعیین گردید (Rhoades, 1996). فسفر قابل استفاده گیاه به روش اولسن اندازه‌گیری شد (Olsen et al., 1954). پتاسیم قابل استفاده گیاه با استفاده از روش استات آمونیوم ۱ نرمال (NH₄OAc) تعیین گردید (Knudsen et al., 1982). مواد آلی خاک نیز با روش والکی بلک اندازه‌گیری شد (Walkley Black, 1934). ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم خاک با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد محاسبه شدند (Klute, 1986).

آبیاری گیاهان تا مرحله رسیدن به هشت‌برگی به طور کامل انجام شد. پس از این مرحله، میزان آبیاری بر اساس فرمول پنمن-مانتیت فائو و باتوجه‌به نیاز آبی هر تیمار تنظیم گردید. تمامی عملیات مدیریتی، از جمله تنک کردن قبل از مرحله شش‌برگی و کنترل علف‌های هرز با استفاده از سم نیکوسولفورون، به طور یکسان روی تمامی واحدهای آزمایشی اعمال شد. شاخص کلروفیل با استفاده از کلروفیل‌متر مدل (CCM200) در میانه دوره تنش از برگ‌های بالایی در پنج نقطه اندازه‌گیری شد و میانگین داده‌ها ثبت گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی برگ‌ها در طول دوره تنش، برگ‌های بالایی جدا شدند و بلافاصله وزن‌کشی شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و نور کم قرار داده شدند و پس از جداکردن آب اضافی با کاغذ صافی، وزن تورژانسس آن‌ها به دست آمد. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک شدند و وزن خشک آنها محاسبه شد.

در ادامه، رطوبت نسبی برگ‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از آن، در حمام آب سرد قرار گرفته و ۴ میلی‌لیتر تولوئن به هر نمونه افزوده شد و نمونه‌ها ورتکس شدند تا کاملاً یکنواخت گردند. پس از آن، لوله‌ها برای مدت کوتاهی در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا دو فاز از هم جدا شوند. از فاز روئی برای تعیین میزان غلظت پرولین با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر و بر اساس منحنی استاندارد پرولین استفاده شد. برای ساخت منحنی استاندارد پرولین، غلظت‌های ۰، ۱، ۲.۵، ۲.۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پرولین به کار رفت و تولوئن به‌عنوان شاهد (سطح صفر) مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، از رابطه شماره ۶ برای محاسبه غلظت پرولین بهره‌برداری شد.

$$[6] \quad \mu M \text{ proline } g^{-1} Fw = [(mg \text{ proline } L^{-1} \times ml \text{ benzene}) / 115.5]$$

که در آن FP: محتوای پرولین آزاد، R: عدد قرائت شده از دستگاه اسپکتروفتومتر، T: میزان تولوئن مصرفی؛ و W: وزن نمونه برگ است.

پس از رسیدن فیزیولوژیک گیاهان که با تشکیل لایه سیاه در قاعده دانه‌ها تشخیص داده می‌شود، بوته‌ها از سطحی به مساحت ۲ مترمربع برداشت شدند. به دنبال این برداشت، صفات مختلفی مانند ارتفاع بوته، طول و قطر بلال، تعداد ردیف‌ها و دانه‌ها در بلال، وزن هزار دانه، عملکرد اقتصادی و شاخص برداشت مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

تحلیل آماری

تحلیل‌های آماری به‌منظور بررسی ارتباط میان کلیه صفات از طریق ضریب همبستگی و همچنین ارتباط میان صفات فنولوژیکی، زراعی و کیفی از طریق تجزیه و تحلیل مقایسه میانگین صورت گرفت. تمام محاسبات مذکور، شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین، با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۴.۲ انجام شدند.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

تجزیه و تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که سطوح مختلف تنش رطوبتی، تأثیر معنی‌داری در سطح ۰.۱٪ بر ارتفاع گیاه دارد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی) همراه با تلقیح قارچ *G. mossea* مشاهده شد، در حالی که تنش

شدید خشکی (۵۰٪ نیاز آبی) در شرایط بدون تلقیح، کاهش حدود ۱۸/۴ درصدی در این صفت نسبت به تیمار مطلوب باعث گردید (جدول ۳). این تفاوت نشان‌دهنده کاهش در ارتفاع گیاه تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ میکوریزا است. کاهش ارتفاع گیاه در شرایط افزایش تنش رطوبتی احتمالاً به دلیل اختلال در فرایند فتوسنتز و کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به بافت‌های مریستمی است که در حال رشد هستند. یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش فشار تورژسانس است که منجر به کاهش تقسیم سلولی در بخش‌های جوان و در حال رشد گیاه می‌شود. این کاهش در تقسیم سلولی باعث محدود شدن رشد و توسعه اندام‌ها شده و از این رو، اولین تأثیر قابل‌مشاهده تنش رطوبتی بر گیاهان به‌صورت کاهش اندازه برگ‌ها یا کاهش ارتفاع گیاهان ظاهر می‌شود.

تلقیح با قارچ میکوریزا، به‌ویژه *G. mosseae*، به طور قابل‌توجهی ارتفاع گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید. این بهبود احتمالاً به دلیل افزایش جذب آب و مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، توسط قارچ‌های میکوریزا است که منجر به بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و تقسیم سلولی می‌شود. قارچ‌های میکوریزا با توسعه شبکه هیف‌های خود در خاک، دسترسی گیاه به منابع آب و مواد مغذی را افزایش داده و از این طریق اثرات منفی تنش خشکی را کاهش می‌دهند (Smith and Read, 2008). این مکانیسم‌ها توضیح می‌دهند که چرا گیاهان تلقیح شده با *G. mosseae* در شرایط تنش خشکی، ارتفاع بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند.

کاهش ارتفاع گیاه در شرایط افزایش تنش رطوبتی احتمالاً به دلیل اختلال در فرایند فتوسنتز و کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به بافت‌های مریستمی است که در حال رشد هستند. یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش فشار تورژسانس است که منجر به کاهش تقسیم سلولی در بخش‌های جوان و در حال رشد گیاه می‌شود. این کاهش در تقسیم سلولی باعث محدود شدن رشد و توسعه اندام‌ها شده و از این رو، اولین تأثیر قابل‌مشاهده تنش رطوبتی بر گیاهان به‌صورت کاهش اندازه برگ‌ها یا کاهش ارتفاع گیاهان ظاهر می‌شود. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات اخیر هم‌راستا است. به‌عنوان مثال، جانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) نشان دادند که تنش خشکی به طور قابل‌توجهی رشد

قارچ‌های میکوریزا می‌تواند به طور قابل توجهی اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد و رشد گیاهان را بهبود بخشد. این محققان گزارش کردند که گیاهان تلقیح شده با *Glomus mossea* در شرایط تنش خشکی، ارتفاع بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند که با یافته‌های این تحقیق هم‌خوانی دارد.

رویشی گیاهان را کاهش می‌دهد، به‌ویژه در شرایطی که گیاهان تحت تنش شدید آبی قرار می‌گیرند. این مطالعه تأکید کرد که کاهش رشد ناشی از تنش خشکی با اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و انتقال مواد مغذی مرتبط است. همچنین، مطالعه دیگری توسط کومار و همکاران (Kumar et al., 2021) نشان داد که تلقیح با

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات عملکردی ذرت تحت تأثیر تیمارهای مختلف تنش و مایکوریزا

Table 2. Analysis of variance of corn yield traits under the influence of various stress treatments and mycorrhiza

منبع تغییر S.O.V	df	تعداد دانه در					
		ارتفاع بوته Plant height	طول بلال Cob length	تعداد بلال در بوته Number of ears per plant	قطر بلال Cob diameter	ردیف Number of seeds in row	تعداد ردیف در بلال Number of rows in ear
بلوک Block (B)	2	0.07 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.000 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.04 ^{ns}
تنش آب Water stress (S)	3	3042.18 ^{**}	47.44 ^{**}	0.01 ^{ns}	1.38 ^{**}	364.95 ^{**}	4.17 ^{**}
خطای اصلی Error A		0.06	0.103	0.0038	0.00006	0.011	0.0541
S * B	6	0.06 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.000 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.05 ^{ns}
کود Fert. (F)	2	86.56 ^{**}	5.42 ^{**}	0.01 ^{ns}	0.02 ^{**}	29.91 ^{**}	0.43 ^{**}
تنش * کود S * F	6	54.40 ^{**}	3.68 ^{**}	0.004 ^{ns}	0.05 ^{**}	8.04 ^{**}	14.49 ^{**}
خطای فرعی Error B		0.06	0.091	0.0038	0.00008	8.040	0.0683
CV %	-	0.10	1.49	6.08	0.46	0.27	1.91

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ می‌باشد.

ns, * and ** represent non-significant, significant at the 5% probability level, and significant at the 1% probability level, respectively.

کمتری به بلال‌ها تخصیص یابد که این امر رشد و توسعه محور بلال را محدود می‌کند. نتیجه این فرایند در نهایت کاهش طول بلال در شرایط تنش خشکی است. علاوه بر این، تنش خشکی در مرحله ابریشم‌دهی به دلیل پیچ‌خوردگی برگ‌ها، قابلیت انتقال مواد مغذی به بلال را کاهش می‌دهد که نهایتاً اثر منفی بر رشد بلال‌ها می‌گذارد.

تلقیح با قارچ مایکوریزا، به‌ویژه *G. mossea*، به طور قابل توجهی طول بلال را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید. این بهبود احتمالاً به دلیل افزایش جذب آب و مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، توسط قارچ‌های مایکوریزا است که منجر به بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و انتقال مواد مغذی به بافت‌های در حال رشد می‌شود. قارچ‌های مایکوریزا با توسعه شبکه هیف‌های خود در خاک، دسترسی گیاه به منابع آب و مواد مغذی را افزایش داده و از این طریق اثرات منفی تنش خشکی را کاهش می‌دهند (Smith and Read,

طول بلال

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که میانگین طول بلال در شرایط مختلف تنش، تفاوت‌های قابل توجهی دارد. بیشترین طول بلال به میزان ۲۲/۵۳ سانتی‌متر مربوط به شرایطی است که رطوبت ۱۰۰ درصد نیاز آبی به همراه تلقیح با قارچ *G. mossea* فراهم شده بود. در مقابل، کمترین طول بلال، ۱۶/۸۳ سانتی‌متر، در تیماری که تنها ۵۰ درصد از نیاز آبی بدون حضور قارچ مایکوریزا دریافت کرده بود، مشاهده شد (جدول ۳). این تفاوت نشان‌دهنده کاهش ۲۵/۳ درصدی در طول بلال تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ مایکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ است. تنش خشکی منجر به کاهش فعالیت فتوسنتز در برگ‌ها می‌شود که این کاهش باعث افت تولید شیره پرورده و در نتیجه رشد کمتر سلولی و کاهش طول بلال می‌شود. در مرحله گل‌دهی نیز تنش خشکی باعث می‌شود مواد مغذی

2008). این مکانیسم‌ها توضیح می‌دهند که چرا گیاهان تلقیح شده با *G. mossea* در شرایط تنش خشکی، طول بلال بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند. تنش خشکی منجر به کاهش فعالیت فتوسنتز در برگ‌ها می‌شود که این کاهش باعث افت تولید شیره پرورده و در نتیجه رشد کمتر سلولی و کاهش طول بلال می‌شود. در مرحله گل‌دهی نیز تنش خشکی باعث می‌شود مواد مغذی

کمتری به بلال‌ها تخصیص یابد که این امر رشد و توسعه محور بلال را محدود می‌کند. نتیجه این فرایند در نهایت کاهش طول بلال در شرایط تنش خشکی است. علاوه بر این، تنش خشکی در مرحله ابریشم‌دهی به دلیل پیچ‌خوردگی برگ‌ها، قابلیت انتقال مواد مغذی به بلال را کاهش می‌دهد که نهایتاً اثر منفی بر رشد بلال‌ها می‌گذارد.

جدول ۳. مقایسه میانگین صفات مورفولوژیکی ذرت

Table 3. Comparison of average morphological traits of corn

سطح تأمین نیاز آبی گیاه Plant water supply level (%)	مایکوریزا Mycorrhiza	ارتفاع بوته Plant height cm	طول بلال Cob length cm	تعداد بلال		تعداد دانه در ردیف		تعداد ردیف در بلال Number of rows in ear
				در بوته Number of ears per plan	قطر بلال Cob diameter cm	Number of seeds in row		
100	Non-inoculated	248.37 ^b	22.07 ^b	1.00 ^b	2.29 ^b	48.00 ^c	14.07 ^d	
100	<i>G. fasciculatum</i>	250.17 ^{ab}	22.47 ^{ab}	1.17 ^a	2.32 ^a	50.00 ^b	14.13 ^c	
100	<i>G. mossea</i>	251.93 ^a	22.53 ^a	1.07 ^{ab}	2.30 ^{ab}	52.00 ^a	14.60 ^a	
90	Non-inoculated	230.73 ^d	20.53 ^d	1.00 ^b	1.98 ^d	44.47 ^f	13.13 ^h	
90	<i>G. fasciculatum</i>	233.20 ^d	21.57 ^c	1.00 ^b	2.25 ^c	46.07 ^d	14.13 ^c	
90	<i>G. mossea</i>	243.40 ^c	21.67 ^c	1.00 ^b	2.28 ^b	47 ^e	14.23 ^b	
70	Non-inoculated	216.57 ^g	18.20 ^g	1.00 ^b	1.62 ^{fg}	40.33 ⁱ	13.53 ^f	
70	<i>G. fasciculatum</i>	221.60 ^f	19.07 ^f	1.00 ^b	1.68 ^f	42.00 ^h	13.60 ^{fg}	
70	<i>G. mossea</i>	227.53 ^e	20.37 ^{de}	1.00 ^b	1.87 ^e	44 ^g	13.67 ^e	
50	Non-inoculated	205.07 ^h	16.83 ⁱ	1.00 ^b	1.35 ⁱ	33.00 ^k	12.23 ^j	
50	<i>G. fasciculatum</i>	209.47 ^h	19.53 ^f	1.00 ^b	1.37 ^h	38.00 ^j	12.60 ⁱ	
50	<i>G. mossea</i>	207.40 ^{hi}	17.00 ^h	1.07 ^{ab}	1.42 ^g	38.00 ^j	13.27 ^g	

میانگین در هر ستون با حروف یکسان در $p < 0.05$ بر اساس آزمون دانکن از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارد.

The means in each column with the same letters do not have statistically significant differences according to the Duncan test at ($p < 0.05$).

طول بلال بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند، که با یافته‌های این تحقیق هم‌خوانی دارد.

تعداد بلال در بوته

نتایج تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که سطوح مختلف تنش رطوبتی تأثیر معنی‌داری بر تعداد بلال در هر بوته دارند و این تأثیر در سطح احتمال ۵٪ قابل توجه است (جدول ۲). بررسی میانگین‌ها در اثر متقابل میان تنش رطوبتی و مایکوریزا نشان داد که بیشترین تعداد بلال در بوته، با میانگین ۱/۱۷ عدد، در تیمار با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تلقیح با قارچ *G. Fasciculatu* مشاهده شد (جدول ۳). در مقابل، کمترین تعداد بلال در بوته، با میانگین ۰/۸۵ عدد، در تیمار با تنش ۵۰ درصد نیاز آبی و بدون تلقیح با قارچ مایکوریزا

یافته‌های این تحقیق با مطالعات اخیر هم‌خوانی دارد. به‌عنوان مثال، ونگ و همکاران (Wang et al. 2021) نشان دادند که تنش خشکی به طور قابل توجهی طول بلال ذرت را کاهش می‌دهد، به‌ویژه در شرایطی که گیاهان تحت تنش شدید آبی قرار می‌گیرند. این محققان گزارش کردند که کاهش طول بلال ناشی از تنش خشکی با اختلال در فرایندهای فتوسنتز و انتقال مواد مغذی مرتبط است. همچنین، مطالعه دیگری توسط لی و همکاران (Li et al. 2020) تأکید کرد که تلقیح با قارچ‌های مایکوریزا می‌تواند به طور قابل توجهی اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد و رشد بلال‌ها را بهبود بخشد. این محققان دریافتند که گیاهان تلقیح شده با *Glomus mossea* در شرایط تنش خشکی،

خشکی داشته باشد. این نکته می‌تواند به کشاورزان و محققان در بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی کمک کند.

تعداد دانه در ردیف

نتایج تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش رطوبتی و استفاده از قارچ میکوریزا بر تعداد دانه در هر ردیف بلال در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده است (جدول ۲). در مقایسه میانگین‌ها، مشخص شد که بیشترین تعداد دانه در هر ردیف بلال، معادل ۵۲ دانه، در شرایطی به دست می‌آید که ۱۰۰ درصد نیاز آبی تأمین شده و گیاه با قارچ *G. mossea* تلقیح شده است. در مقابل، کمترین تعداد دانه که به طور میانگین ۳۲ عدد است، در شرایطی که تنها ۵۰ درصد نیاز آبی بدون تلقیح میکوریزا برآورده شده، مشاهده شده است (جدول ۳). این تفاوت نشان‌دهنده کاهش ۳۸/۵ درصدی در تعداد دانه‌ها در هر ردیف بلال تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با *G. mossea* است. علت کاهش تعداد دانه در مرحله دانه‌بندی را می‌توان به کاهش منابع فتوسنتزی ناشی از محدودیت‌های زیست‌محیطی نسبت داد. در شرایط تنش شدید خشکی، گیاه ممکن است برای محافظت از بقای خود، رشد زایشی را با سرعت بیشتری پیش ببرد که این امر می‌تواند به کاهش تعداد دانه در هر ردیف بلال منجر شود. یافته‌های افکاری و همکاران (Afkari et al., 2015) نیز تأیید می‌کند که استفاده از میکوریزا به افزایش دانه در ردیف بلال کمک می‌کند، زیرا این هم‌زیستی می‌تواند سبب بهبود رشد و افزایش فتوسنتز در گیاهان شود. همچنین، تحقیقاتی نشان داده‌اند که تغییرات در رژیم‌های آبیاری بر تعداد دانه در بلال تأثیر معنی‌داری دارد. به‌ویژه، تأخیر در ظهور کاکل‌ها به‌خاطر تنش خشکی منجر به کاهش تلقیح مؤثر می‌شود، زیرا زمان ظهور کاکل‌ها وقتی بوده که گرده‌افشانی قبلاً صورت گرفته و گرده‌های زنده کافی برای تلقیح گل‌های ماده وجود نداشته است. این مسئله منجر به کاهش تعداد دانه در هر ردیف شده است. برخی پژوهشگران نیز عقیده دارند که عقیمی تخمدان گلچه‌ها در اثر تنش خشکی می‌تواند به این کاهش منجر شود.

وزن صد دانه

نتایج بررسی اثرات تنش و میکوریزا بر وزن صد دانه نشان داد که در سطح احتمال ۱٪ این تأثیرات معنادار هستند

ثابت شد. این تفاوت نشان‌دهنده کاهش ۲۷/۴ درصدی در تعداد بلال تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ است. تفاوت بیشتر در تعداد بلال‌های هر بوته در شرایط کم‌آبی به علت اثرات بازدارنده آن بر تولید یا گسترش مریستم‌های مولد است. این تنش با کاهش تقسیم سلولی باعث کاهش تولید این مریستم‌ها شده و در نتیجه، تعداد بلال در هر بوته کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مدیریت مناسب شرایط آبیاری و استفاده از قارچ‌های میکوریزا می‌تواند نقش مهمی در افزایش تعداد بلال در هر بوته، به‌خصوص در شرایط کم‌آبی، داشته باشد. مطالعات پیشین همچون سپاسی (Sepasi et al., 2012) نیز به این نکته اشاره داشته‌اند که تنش رطوبتی از طریق کاهش فعالیت سلولی و مریستمی، می‌تواند باعث کاهش تولید بلال شود.

تعداد ردیف در بلال

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و استفاده از قارچ میکوریزا بر تعداد ردیف در بلال در سطح احتمال ۱٪ به‌طور معنی‌داری چشمگیر بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر آن است که بیشترین تعداد ردیف در بلال با میانگین ۱۴/۶۰ در تیمار با ۱۰۰ درصد تأمین نیاز آبی و تلقیح با قارچ *G. mossea* مشاهده شد، در حالی که کمترین تعداد ردیف با میانگین ۱۲/۲۳ مربوط به تیماری بود که تنها ۵۰ درصد از نیاز آبی بدون تلقیح با میکوریزا را دریافت کرده بود (جدول ۳). این تفاوت نشان‌دهنده کاهش ۱۶/۲ درصدی در تعداد ردیف‌های بلال تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با *G. mossea* است.

براین اساس می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه این ویژگی بیشتر جنبه ژنتیکی دارد، اما عوامل محیطی مانند تنش خشکی و استفاده از میکوریزا نیز بر آن تأثیرگذار هستند. تحقیقات اردلان و همکاران (Ardalan et al., 2011) نیز نشان می‌دهد که تنش رطوبتی شدید می‌تواند منجر به کاهش تعداد ردیف دانه در بلال شود، در مقایسه با شرایطی که نیاز آبی به‌صورت مطلوب تأمین شده و قارچ *G. mossea* به کار رفته است. به‌طور کلی، استفاده از میکوریزا همراه با مدیریت مناسب منابع آبی، می‌تواند تأثیر مثبتی در حفظ یا افزایش تعداد ردیف‌های دانه در بلال حتی تحت شرایط تنش

(جدول ۴). طبق مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین وزن صد دانه به مقدار ۴۴/۰۴ گرم در شرایطی به دست آمده که آبیاری مطلوب انجام شده و گیاه با قارچ *G. mosseae* تلقیح شده بود. کمترین وزن صد دانه، معادل ۲۴/۱۴ گرم، در شرایط تنش شدید رطوبتی مشاهده شد (جدول ۵). کاهش وزن دانه در شرایط تنش کم‌آبی شدید به مرحله پر شدن دانه‌ها مرتبط است، که منجر به تولید دانه‌های لاغر و چروکیده با وزن کمتر شده است؛ این موضوع در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است. کمبود آب در این مرحله باعث کاهش فتوسنتز برگ‌ها و میزان شیره سلولی می‌شود، که در نهایت به شکل‌گیری دانه‌های چروکیده در ذرت می‌انجامد (Ribaut et al., 2012). این یافته‌ها با مطالعات اخیر هم‌خوانی دارد. به‌عنوان مثال جانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) نشان دادند که تنش خشکی به طور قابل‌توجهی وزن دانه‌های ذرت را کاهش می‌دهد، به‌ویژه در شرایطی که گیاهان تحت تنش شدید آبی قرار می‌گیرند. این محققان گزارش کردند که کاهش وزن دانه ناشی از تنش خشکی با اختلال در فرایندهای فتوسنتز و انتقال مواد مغذی مرتبط است. کاربرد قارچ میکوریزا می‌تواند باعث بهبود رشد و افزایش فتوسنتز گیاه میزبان شود و در نتیجه تولید اسمولیت‌ها افزایش یابد. این افزایش باعث می‌شود که در مرحله پر شدن دانه، شیره پرورده کافی به دانه‌ها منتقل شود و دانه‌های درشت و سنگین‌تری تولید گردند. مطالعه اخیر توسط لی و همکاران (Li et al., 2022) تأیید کرد که تلقیح با قارچ‌های میکوریزا به‌ویژه *G. mosseae* می‌تواند به طور قابل‌توجهی

وزن دانه‌ها را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد. این محققان دریافتند که گیاهان تلقیح شده با *G. mosseae* در شرایط تنش خشکی، وزن دانه بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند که با یافته‌های این تحقیق هم‌خوانی دارد.

عملکرد دانه

نتایج تحلیل اثرات تنش و میکوریزا بر عملکرد دانه نشان داد که این اثرات در سطح احتمال ۱٪ معنادار است (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین عملکرد دانه (۱۱۶۵۰ کیلوگرم در هکتار) در شرایطی به دست آمد که ۱۰۰ درصد نیاز آبی تأمین شده و گیاه با قارچ *G. mosseae* تلقیح شده است. در مقابل، کمترین عملکرد دانه در شرایط تنش شدید و بدون تلقیح میکوریزا مشاهده شد (جدول ۵). یکی از دلایل افزایش عملکرد در شرایط هم‌زیستی با قارچ میکوریزا، افزایش جذب آب و عناصر غذایی از خاک است که منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و به‌تبع آن تولید بیشتر محصولات، از جمله عملکرد بیشتر دانه‌های ذرت می‌شود. این تفاوت نشان‌دهنده کاهش ۴۴/۲ درصدی در عملکرد دانه تحت تنش شدید رطوبتی و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا نسبت به شرایط آبیاری کامل و تلقیح با *G. mosseae* است. یکی از دلایل افزایش عملکرد در شرایط هم‌زیستی با قارچ میکوریزا، افزایش جذب آب و عناصر غذایی از خاک است که منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و به‌تبع آن تولید بیشتر محصولات، از جمله عملکرد بیشتر دانه‌های ذرت می‌شود.

جدول ۴. تجزیه واریانس صفات عملکردی ذرت تحت تأثیر تیمارهای مختلف تنش و میکوریزا

S.O.V	منبع تغییر	df	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	وزن صد دانه 100 grains weight
Block (B)	بلوک	2	6567.36 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.001 ^{ns}
Water stress (S)	تنش آب	3	21145.07 ^{**}	229.74 ^{**}	191.31 ^{**}
S * B	تنش * بلوک	6	4589.51 ^{ns}	0.032 ^{ns}	0.004 ^{ns}
Fert. (F)	کود	2	4403897 ^{**}	10.32 ^{**}	30.88 ^{**}
S * F	تنش * کود	6	2594815 ^{**}	16.36 ^{**}	6.33 ^{**}
Error B	خطای فرعی		1779.39	0.030	0.008
CV %	-	-	8.78	0.34	0.28

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ هستند.

ns, * and ** represent non-significant, significant at the 5% probability level, and significant at the 1% probability level, respectively.

جدول ۵. مقایسه میانگین صفات عملکردی ذرت تحت تأثیر تیمارهای مختلف تنش و میکوریزا

Table 5. Comparison of average yield traits of corn under the influence of various stress treatments and mycorrhiza

سطح تأمین نیاز آبی گیاه (%) Plant water supply level (%)	مایکوریزا Mycorrhiza	عملکرد دانه Grain yield kg ha ⁻¹	شاخص برداشت HI %	وزن صد دانه One hundred grains weight gr
100	Non-inoculated	8033.33 ^f	53.55 ^{cd}	35.06 ^c
100	<i>G. fasciculatum</i>	10166.66 ^b	56.05 ^b	37.07 ^b
100	<i>G. mossea</i>	11650.00 ^a	57.37 ^a	44.04 ^a
90	Non-inoculated	9016.67 ^{ef}	53.60 ^d	34.42 ^d
90	<i>G. fasciculatum</i>	9151.67 ^c	55.60 ^c	35.01 ^c
90	<i>G. mossea</i>	9083.33 ^e	55.67 ^c	35.43 ^c
70	Non-inoculated	7500.00 ^h	49.44 ^g	27.50 ^f
70	<i>G. fasciculatum</i>	8184.33 ^g	50.91 ^f	29.32 ^h
70	<i>G. mossea</i>	9133.33 ^d	52.69 ^e	23.40 ^h
50	Non-inoculated	6033.33 ^j	41.32 ⁱ	24.17 ^g
50	<i>G. fasciculatum</i>	6540.00 ⁱ	44.73 ⁱ	28.37 ^e
50	<i>G. mossea</i>	6505.67 ⁱ	47.93 ^h	27.29 ^f

میانگین در هر ستون با حروف یکسان در $p < 0.05$ بر اساس آزمون دانکن از نظر آماری تفاوت معنی داری ندارد.

The means in each column with the same letters do not have statistically significant differences according to the Duncan test at ($p < 0.05$).

گیاهان تلقیح شده با *Glomus mosseae* در این مطالعه عملکرد دانه بیشتری در شرایط تنش خشکی داشتند. همچنین، بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی ممکن است با افزایش تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین و جیبرلین مرتبط باشد، که توسط قارچ‌های میکوریزا تحریک می‌شوند (Poveda et al., 2021).

علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریزا با بهبود جذب آب و مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، می‌توانند مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی را افزایش دهند (Rouphael et al., 2022). این مکانیسم‌ها توضیح می‌دهند که چرا گیاهان تلقیح شده *G. mosseae* در این مطالعه عملکرد دانه بیشتری در شرایط تنش خشکی داشتند. همچنین، بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی ممکن است با افزایش تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین و جیبرلین مرتبط باشد، که توسط قارچ‌های میکوریزا تحریک می‌شوند (Poveda et al., 2021).

شاخص برداشت

نتایج بررسی اثرات تنش و میکوریزا بر شاخص برداشت نشان داد که این اثرات در سطح احتمال ۱٪ معنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که بیشترین

مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که در شرایط استفاده از میکوریزا، عملکرد دانه افزایش می‌یابد، درحالی‌که در شرایط کم‌آبی و بدون استفاده از میکوریزا، وزن دانه کمتر است، که این نتایج با پژوهش حاضر مطابقت دارد (Zhang et al., 2021). در شرایط آبیاری بهینه و عدم وجود تنش آبی، افزایش فتوسنتز و تولید مواد پرورده بیشتر، منجر به بهبود سرعت پر شدن و وزن دانه و در نهایت افزایش عملکرد دانه می‌شود. قارچ‌های میکوریزا می‌توانند اثرات مخرب تنش خشکی را کاهش داده و با توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه، جذب مستقیم آب توسط هیف‌ها و انتقال آن به گیاه میزبان را تسهیل کنند. مطالعه اخیر توسط لی و همکاران (Li et al., 2022). تأیید کردند که تلقیح با قارچ‌های میکوریزا به‌ویژه *G. mosseae* می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد دانه را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد. این محققان دریافتند که گیاهان تلقیح شده با *G. mosseae* در شرایط تنش خشکی، عملکرد دانه بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند، که با یافته‌های این تحقیق هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریزا با بهبود جذب آب و مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، می‌توانند مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی را افزایش دهند (Rouphael et al., 2022). این مکانیسم‌ها توضیح می‌دهند که چرا

شاخص برداشت در شرایط آبیاری مطلوب و با تلقیح قارچ *G. mossea* به دست آمد و کمترین شاخص در شرایط تنش شدید و بدون تلقیح قارچ میکوریزا ثبت شده است (جدول ۵).

تلقیح با قارچ میکوریزا، به ویژه *G. mossea*، به طور قابل توجهی شاخص برداشت را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید. این بهبود احتمالاً به دلیل افزایش جذب آب و مواد مغذی، به ویژه فسفر و نیتروژن، توسط قارچ‌های میکوریزا است که منجر به افزایش عملکرد دانه و در نتیجه بهبود شاخص برداشت می‌شود. قارچ‌های میکوریزا با توسعه شبکه‌ای از هیف‌ها، دسترسی گیاه به منابع آب و مواد مغذی را افزایش داده و از این طریق اثرات منفی تنش خشکی را کاهش می‌دهند (Smith and Read, 2008).

این مکانیسم‌ها توضیح می‌دهند که چرا گیاهان تلقیح شده با *G. mossea* در شرایط تنش خشکی، شاخص برداشت بیشتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند. حمزه و میابادی (Hamzeh and Meyabadi, 2014) گزارش کردند که قارچ میکوریزا باعث افزایش شاخص برداشت در ذرت می‌شود. از آنجا که شاخص برداشت به‌طور مستقیم با عملکرد دانه مرتبط است و تابعی از آن محسوب می‌شود، افزایش عملکرد دانه می‌تواند منجر به بهبود شاخص برداشت گردد. این بهبودی ناشی از فراهم آمدن شرایط تغذیه‌ای بهتر برای گیاه به وسیله تلقیح قارچ میکوریزا است. این قارچ‌ها از طریق توسعه شبکه‌ای از هیف‌ها، قادر به دسترسی به مناطقی از خاک هستند که ریشه‌های گیاهان عادی به آن‌ها نمی‌رسند و بدین ترتیب عملکرد زیستی گیاه ذرت را افزایش می‌دهند. قارچ‌های میکوریزا از طریق تولید هیف‌ها توانایی جذب آب و عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن را دارند که مستقیماً به نفع گیاه است. به همین دلیل، گیاهان میکوریزایی نیاز کمتری به انرژی برای تشکیل ریشه دارند و به جای آن، می‌توانند اندام‌های هوایی بیشتری را پرورش دهند، که این امر توسط انصوری (Ansoori, 2013) نیز تأیید شده است. این مکانیسم‌ها نشان می‌دهند که چرا گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی، شاخص برداشت بالاتری دارند.

محتوای نسبی آب برگ

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش و قارچ میکوریزا نشان داد که با افزایش شدت تنش، محتوای نسبی آب برگ

کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های مقایسه‌ای، بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ در شرایط آبیاری کامل و تلقیح با قارچ میکوریزا حاصل شد، درحالی‌که کمترین مقدار آن در شرایط عدم تلقیح و تأمین تنها ۵۰ درصد نیاز آبی مشاهده گردید (جدول ۷). در شرایط کم‌آبی، کاهش جذب آب و افزایش تبخیر و تعرق از سطح گیاه، محتوای رطوبت نسبی برگ را کاهش داده و بنابراین میزان فتوسنتز گیاه کمتر می‌شود (Li et al., 2016). در مواقع کمبود آب، کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ باعث افزایش میزان اسید آسبیزیک و در نتیجه توقف رشد برگ، کاهش تقسیم سلولی و عدم تأمین کافی اسمولات‌های لازم برای رشد برگ می‌گردد، که این موضوع منجر به کاهش اندازه‌ی برگ‌ها می‌شود. مقایسه میانگین رطوبت نسبی در شرایط استفاده از قارچ میکوریزا نشان داد که در مقایسه با شرایط عدم استفاده از آن، گیاهانی که با میکوریزا تیمار شده‌اند محتوای رطوبت نسبی بیشتری دارند. دلیل این امر را می‌توان نقش میسلیوم‌های قارچ در جذب و هدایت آب به ریشه‌ها دانست، که منجر به افزایش محتوای آب نسبی در گیاهان می‌شود.

در شرایط تنش، برگ‌های گیاه ذرت به‌صورت لوله‌ای تغییر شکل می‌دهند و سطح برگ کاهش می‌یابد؛ این مسئله ناشی از عدم دسترسی گیاه به آب کافی برای تنظیم فشار اسمزی ریشه‌ها در مواجهه با تنش خشکی است. نتایج این پژوهش با یافته‌های منصورفر و همکاران (Khademian et al., 2010) و همچنین نصرالله‌زاده اصل و همکاران (Nasrollahzadeh Asl et al., 2017) تطابق دارد و نشان‌دهنده این است که میکوریزا می‌تواند نقش مؤثری در بهبود شرایط آبی گیاهان ایفا نماید.

شاخص کلروفیل برگ

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین شاخص کلروفیل برگ، با مقداری معادل ۳۲/۵۲، در شرایطی که آبیاری کامل انجام و تلقیح با قارچ *G. mossea* صورت گرفته بود به دست آمد. در مقابل، کمترین مقدار شاخص کلروفیل در شرایط عدم استفاده از میکوریزا و تحت تنش شدید، یعنی تنها تأمین ۵۰ درصد از نیاز آبی گیاه، مشاهده شد (جدول ۷). این نتایج با یافته‌های مجیدی و همکاران (Majidi et al., 2019) همخوانی دارد و تأیید کننده تأثیر مثبت میکوریزا بر میزان کلروفیل برگ در شرایط بهینه آبیاری می‌باشد.

جدول ۶. تجزیه واریانس برخی صفات فیزیولوژیک ذرت تحت تأثیر تیمارهای مختلف تنش و مایکوریزا

Table 6. Analysis variance of some physiological traits of corn under the influence of different stress and mycorrhiza treatments

S.O.V	منبع تغییر	df	محتوای آب نسبی برگ RWC	پرولین برگ Leaf proline	کلروفیل a Chl. a	کلروفیل b Chl. b	شاخص کلروفیل Chl. Index
Block (B)	بلوک	2	0.04 ^{ns}	2.32 ^{**}	0.01 [*]	0.01 ^{ns}	0.002 ^{ns}
Water stress (S)	تنش آب	3	577.05 ^{**}	272.35 ^{**}	18.26 ^{**}	19.68 ^{**}	96.17 ^{**}
Error A	خطای اصلی		100.214	55.9920	3.9858	4.2899	0.4059
S * B		6	0.03 ^{ns}	2.29 ^{**}	0.002 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.001 ^{ns}
Fert. (F)	کود	2	58.16 ^{**}	13.00 ^{**}	4.37 ^{**}	0.82 ^{**}	5.11 ^{**}
S * F	تنش * کود	6	9.38 ^{**}	33.73 ^{**}	2.02 ^{**}	3.44 ^{**}	2.02 ^{**}
Error B	خطای فرعی		0.0305	0.3506	0.0028	0.0121	0.0007
CV %		-	0.32	1.70	0.47	1.66	0.12

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ می‌باشد.

ns, * and ** represent non-significant, significant at the 5% probability level, and significant at the 1% probability level, respectively.

جدول ۷. مقایسه میانگین برخی صفات فیزیولوژیک ذرت

Table 7. Comparison of the averages of some physiological traits of corn

گیاه (%)	محتوای آب نسبی برگ	پرولین برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	شاخص کلروفیل	
Plant water supply level (%)	Mycorrhiza	RWC	Ch. a	Ch. b	Ch. Index	
100	Non-inoculated	58.73 ^d	25.34 ^g	12.35 ^b	6.34 ^e	31.52 ^c
100	<i>G. fasciculatum</i>	63.41 ^a	30.49 ^e	14.18 ^a	7.32 ^d	33.22 ^a
100	<i>G. mossea</i>	62.78 ^b	31.18 ^e	12.31 ^b	9.31 ^a	32.52 ^b
90	Non-inoculated	56.71 ^e	27.18 ^f	11.48 ^d	8.71 ^b	28.08 ^e
90	<i>G. fasciculatum</i>	60.52 ^c	33.30 ^d	10.57 ^f	8.31 ^c	30.19 ^d
90	<i>G. mossea</i>	53.74 ^f	34.32 ^d	10.42 ^g	7.36 ^d	27.32 ^f
70	Non-inoculated	47.30 ⁱ	40.52 ^b	10.60 ^f	4.90 ^g	25.91 ⁱ
70	<i>G. fasciculatum</i>	51.43 ^g	36.21 ^c	11.67 ^c	5.45 ^f	26.17 ^h
70	<i>G. mossea</i>	50.73 ^h	33.84 ^d	11.64 ^c	6.41 ^e	26.85 ^g
50	Non-inoculated	41.50 ^j	41.30 ^{ab}	8.42 ⁱ	5.51 ^f	25.05 ^k
50	<i>G. fasciculatum</i>	46.15 ^j	42.58 ^a	10.91 ^e	5.50 ^f	25.63 ^j
50	<i>G. mossea</i>	42.63 ^k	40.14 ^b	9.15 ^h	4.47 ^h	24.14 ^l

در هر ستون، میانگین‌هایی با حروف یکسان در $p < 0.05$ بر اساس آزمون دانکن از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارد.

The means in each column with the same letters do not have statistically significant differences according to the Duncan test at ($p < 0.05$).

پرولین

مختلف آبیاری از جمله آبیاری کامل و تنش‌های خشکی ملایم و شدید، تلقیح با قارچ باعث کاهش مقدار پرولین در مقایسه با عدم تلقیح شد. محدودیت آبی باعث افزایش محتوای پرولین گردید، اما کاربرد مایکوریزا توانست این ویژگی را تحت شرایط محدودیت آبی بهبود بخشد و نتایج مشابهی با آبیاری معمولی ایجاد کند. شریفی و نظری (Sharifi and Nazarli, 2013) تأکید کرده است که

بررسی جدول مقایسه میانگین نشان می‌دهد که با افزایش تنش خشکی، میزان پرولین به طور معناداری افزایش یافته است. بیشترین میزان پرولین در شرایط عدم تلقیح با مایکوریزا و تحت تنش شدید با تأمین ۵۰ درصد از نیاز آبی مشاهده شد، درحالی‌که کمترین میزان آن در شرایط آبیاری کامل و تلقیح با مایکوریزا به دست آمد (جدول ۷). در شرایط

منفی تنش خشکی بر کلروفیل و کارایی فتوسنتز را کاهش دهد.

ماتریس ضرایب همبستگی نشان داد که اکثر صفات با همدیگر همبستگی بالایی دارند. این یافته حاکی از آن است که افزایش مقدار این صفات می‌تواند منجر به افزایش عملکرد دانه شود. در مقابل، روابط منفی و معناداری بین عملکرد و سایر صفات مشاهده گردید که در شکل ۱ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر تأثیر متقابل پیچیده‌ای میان صفات مختلف بر عملکرد کلی گیاه هستند.

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، اثرات متقابل تنش خشکی و تلقیح با قارچ میکوریزا روی برخی صفات زراعی و فیزیولوژیک ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تلقیح با قارچ میکوریزا می‌تواند به طور مؤثری اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را تعدیل کرده و بهبود قابل توجهی در شاخص‌های مختلف گیاهی از جمله محتوای کلروفیل و میزان پرولین ایجاد کند. همچنین، مشخص گردید که در شرایط آبیاری مطلوب، تلقیح با میکوریزا سبب کاهش محتوای پرولین و در نتیجه افزایش کارایی عملکرد دانه می‌گردد. همبستگی بالای میان اکثر صفات مورد بررسی نشان‌دهنده این است که بهبود یک صفت می‌تواند تأثیر مثبتی بر صفات دیگر و به تبع آن بر عملکرد کلی گیاه داشته باشد. درعین حال، روابط منفی میان عملکرد و برخی دیگر از صفات نشان‌دهنده پیچیدگی‌های فیزیولوژیک و نیاز به مدیریت بهینه شرایط زراعی برای دستیابی به بالاترین کارایی است. نتایج این تحقیق همچنین همسویی با مطالعات پیشین داشته و بر اهمیت نقش میکوریزا در بهبود مقاومت به خشکی تأکید می‌کند.

به‌عنوان نتیجه‌گیری، می‌توان اشاره کرد که استفاده از میکوریزا به‌عنوان روشی مؤثر برای بهبود شرایط زراعی و افزایش تحمل گیاهان به خشکی توصیه می‌شود. این روش نه تنها می‌تواند به بهبود عملکرد دانه کمک کند، بلکه از طریق بهبود شرایط آب و تغذیه‌ای، به حفظ پایداری اکوسیستم‌های زراعی نیز یاری رساند. در نهایت، ادامه و توسعه پژوهش‌ها در این زمینه می‌تواند به ارائه راهکارهای بهتر برای مدیریت کشاورزی پایدار منجر گردد.

می‌توان با استفاده از میکوریزا اثرات منفی کاهش آب را تعدیل کرد. کامروا و همکاران (Kamrava et al., 2017) گزارش کردند که اعمال تنش خشکی شدید در مراحل گلدهی و غلاف‌دهی سویا، میزان پرولین را نسبت به آبیاری معمولی ۳/۳۷ برابر افزایش داد.

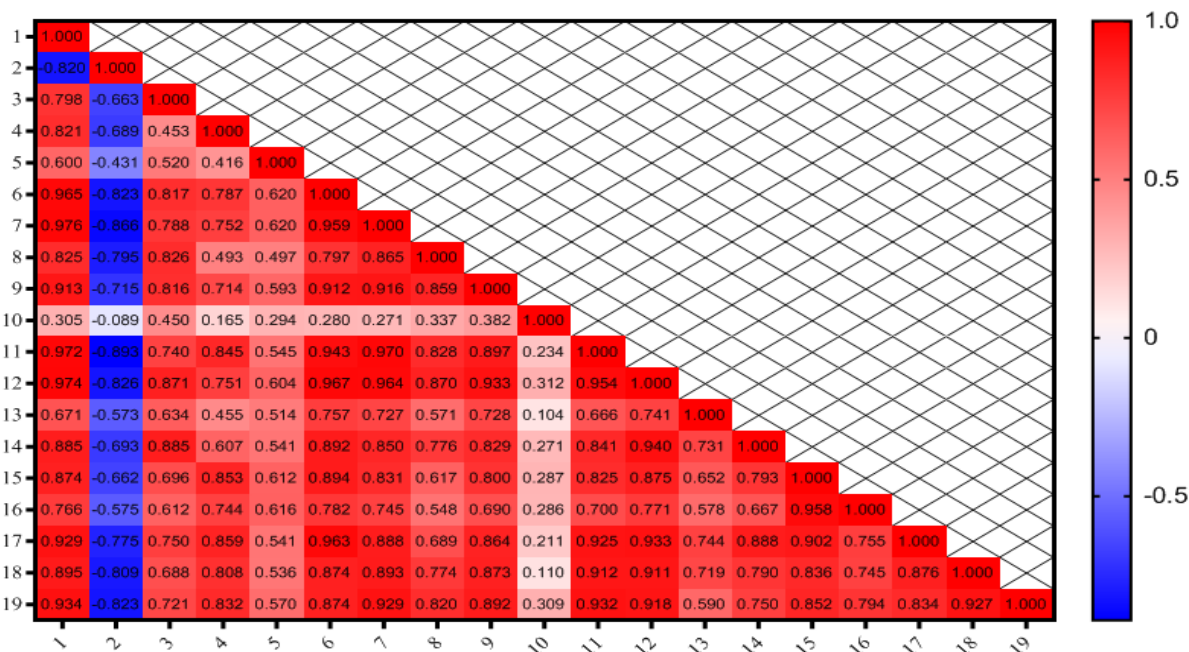
افتخاری و همکاران (Eftekhari et al., 2025) یافته‌اند که کاهش میزان مصرف آب به یک‌سوم ظرفیت مزرعه در گیاهان ذرت در شرایط آزمایشگاه باعث افزایش پرولین شد، و تلقیح با قارچ توانست مقدار پرولین را کاهش دهد که این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. این نشان می‌دهد که تلقیح با میکوریزا می‌تواند روش مؤثری برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر گیاهان باشد.

کلروفیل

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی، میزان کلروفیل b و کاروتنوئیدها به طور معناداری کاهش یافته است. بیشترین میزان کلروفیل b در شرایط آبیاری مطلوب مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار آن در شرایط تنش شدید، یعنی تأمین تنها ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، به دست آمد (جدول ۷). شریفی و نظری (Sharifi and Nazarli, 2013) گزارش کرده است که با افزایش تنش آبی، محتویات کلروفیل a و b کاهش می‌یابد، اما استفاده از قارچ میکوریزا می‌تواند تا پنج درصد باعث افزایش کلروفیل نسبت به شرایط عدم تلقیح شود؛ این امر به دلیل جذب نیتروژن بیشتر توسط گیاهان میکوریزایی عنوان شده است.

راهداری و حسینی (Rahdari and Hoseini, 2012) بیان کرده‌اند که کاهش در میزان کلروفیل تحت تأثیر خشکی به میزان تنش بستگی دارد و این کاهش نتیجه کاهش تولید و تخریب کلروفیل در گیاهان است. با افزایش تنش خشکی، کمبود مواد مغذی و تخریب ساختاری کلروفیل باعث افت کیفیت نوری و فتوسنتز گیاه می‌شود. این موضوع اهمیت استفاده از میکوریزا را در تنظیم سطح کلروفیل و بهبود جذب عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن نشان می‌دهد.

جباری و همکاران (Jabbari et al., 2017) نیز کاهش میزان کلروفیل a را در اثر تنش خشکی در گیاه کلزا گزارش کردند؛ این کاهش همراه با افزایش تنش خشکی بیشتر می‌شود و این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. به‌طور کلی، مدیریت بهینه مصرف آب و استفاده از تکنیک‌های بهبود تغذیه گیاهی مانند تلقیح با میکوریزا می‌تواند تأثیرات



شکل ۱. نقشه حرارتی روابط متقابل متغیرها در ضریب همبستگی برای صفات مورد مطالعه. محور Y و X به ترتیب عبارت‌اند از: ۱- ارتفاع بوته، ۲- قطر ساقه، ۳- طول بلال، ۴- تعداد بلال در بوته، ۵- قطر بلال، ۶- تعداد دانه در ردیف، ۷- تعداد ردیف در بلال، ۸- وزن چوب بلال، ۹- عملکرد دانه، ۱۰- شاخص برداشت، ۱۱- وزن صد دانه، ۱۲- محتوای آب نسبی برگ، ۱۳- پرولین برگ، ۱۴- کلروفیل a، ۱۵- کلروفیل b، ۱۶- شاخص کلروفیل و ۱۷- کارتنوئید.

Fig. 1. Heatmap of the Interrelationships of Variables in the Correlation Coefficient for the Studied Traits. The Y and X axes represent the following respectively: 1- plant height, 2- stem diameter, 3- ear length, 4- number of ears per plant, 5- ear diameter, 6- number of kernels per row, 7- number of rows per ear, 8- cob weight, 9- grain yield, 10- harvest index, 11- hundred grain weight, 12- relative water content of the leaf, 13- leaf proline, 14- chlorophyll a, 15- chlorophyll b, 16- chlorophyll index, and 17- carotenoid.

منابع

- Afkari, A., 2015. Effect of arbuscular mycorrhiza symbiosis on some physiological characteristics of maize (SC704) under water deficit condition. *Journal of Developmental Biology*. 7(3), 1-12.
- Alebrahim, M.T., Janmohammadi, M., Sharifzade, F., Tokasi, S., 2008. Evaluation of salinity and drought stress effects on germination and early growth of maize (*Zea mays* L.) inbred lines (short technical report). *Electronic Journal of Crop Production*. 1(2), 43-64. [In Persian with English Summary].
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Smith, M., 2005. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*. 81(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.020>
- Ansoori, A., 2013. The effect of symbiosis between mycorrhizal fungi and Thiobacillus bacteria and different levels of phosphorus on corn growth and yield. Master's thesis, Shahrood University. [In Persian].
- Ardalan, V., Aghayari, F., Paknezhad, F., Sadeghi-Shojaee, M., Esmaeilzade-Khorsani, S.H., Fatemi, Z., 2011. Effects of water deficit stress and different irrigation methods on yield and yield components in two hybrids of corn (*Zea mays* L.). *Journal of*

- Agronomy and Plant Breeding. 8(3), 175-189. [In Persian with English Summary].
- Arnon, D.I., 1943. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology. 18(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.18.1.1>
- Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil. 39(1), 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M.A., Raza, S., Khan, M.I., Ashraf, M., Ahmed, N., Zhang, L., 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. Frontiers in Plant Science. 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Cairns, J.E., Hellin, J., Sonder, K., Araus, J.L., MacRobert, J.F., Thierfelder, C., Prasanna, B.M., 2012. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. Food Security. 5(3), 345-360. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x>
- Eftekhari, F., Sarcheshmehpour, M., Lohrasbi-Nejad, A., Boroomand, N., 2025. Effects of mycorrhizal and Trichoderma treatment on enhancing maize tolerance to salinity and drought stress, through metabolic and enzymatic evaluation. BMC Plant Biology. 25, 687. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06729-x>
- Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S.S., Siddique, K.H.M., 2017. Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. Journal of Agronomy and Crop Science. 203(2), 81-102. <https://doi.org/10.1111/jac.12169>
- Hamzeh, J., Meyabadi, S., 2014. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi irrigation and irrigation on chlorophyll index, yield, and yield components of sorghum. Journal of Plant Production and Processing. 4(13), 47-58. [In Persian with English Summary].
- Jabbari, H., Akbari, G.A., Shirani Rad, A.H., Alahdadi, I., 2017. Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence indices and grain yield in canola (*Brassica napus* L.) under different irrigation regimes. Iranian Journal of Crop Sciences. 19(3), 233-248.
- Kamrava, S., Babaeian Jolodar, N., Bagheri, N., 2017. Evaluation of drought stress on chlorophyll and proline traits in soybean genotypes. Journal of Crop Breeding. 9(23), 95-104. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.23.95>
- Karimi, V., Karami, E., Keshavarz, M., 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture. 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Khademian, R., Asghari, B., Abedi, T., 2010. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient uptake and water relations in maize under drought stress conditions. Iranian Journal of Soil and Water Research. 41(2), 123-134.
- Khalvati, M.A., Mzafar, A., Schmidhalter, U., 2005. Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. Plant Biology. 7(6), 706-712. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872893>
- Klute, A., 1986. Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison.
- Knudsen, D., Peterson, G.A., Pratt, P.F., 1982. Lithium, sodium, and potassium. In: Page, A.L., ed. Methods of soil analysis: Part 2—Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Madison, pp. 225-246.
- Kumar, A., Sharma, S., Chunduri, V., 2021. Mycorrhizal fungi enhance drought tolerance in crops: Mechanisms and applications. Journal of Plant Growth Regulation. 40(3), 789-801. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10345-8>
- Kumar, A., Sharma, S., Mishra, S., 2015a. Influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L. Journal of Plant Growth Regulation. 34(2), 329-338. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9467-4>
- Kumar, M., Kaur, A., Pachouri, C.U., Singh, J., 2015b. Growth-promoting characteristics of rhizobacteria and AM fungi for biomass amelioration of *Zea mays*. Archives of Biological Sciences. 67(3), 877-887. <https://doi.org/10.2298/ABS140928057K>
- Li, T., Sun, Y., Ruan, Y., Xu, L., Hu, Y., Hao, Z., Chen, B., 2016. Potential role of D-myo-inositol-3-phosphate synthase and 14-3-3 genes in the crosstalk between *Zea mays* and *Rhizophagus intraradices* under drought stress. Mycorrhiza. 26(8), 879-893. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0723-2>
- Li, X., Zhang, Y., Wang, Z., 2020. Effects of mycorrhizal fungi on maize ear development under drought stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 206(4), 456-467. <https://doi.org/10.1111/jac.12412>
- Li, X., Zhang, Y., Wang, Z., 2022. Effects of mycorrhizal fungi on grain yield under drought stress in maize. Journal of Plant Physiology. 258-259, 153162. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153162>
- Lobell, D.B., Hammer, G.L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M.J., Schlenker, W., 2015a. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. Nature Climate Change. 5(5), 497-501. <https://doi.org/10.1038/nclimate2581>
- Lobell, D.B., Roberts, M.J., Schlenker, W., Braun, N., Little, B.B., Rejesus, R.M., Hammer, G.L., 2015b. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. Science. 344(6183), 516-519. <https://doi.org/10.1126/science.1252007>
- Majidi, A. and Amiri, P. (2020). Effect of two species of mycorrhizal-arbuscular fungi in different levels of moisture stress on some growth characteristics of Maize. Environmental Stresses in Crop Sciences, 13(1), 121-129. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1927.1466>

- Nasrollahzadeh Asl, V., Moharramnejad, S., Yusefi, M., 2017. Grain yield, chlorophyll content, osmolyte accumulation, total phenolics and catalase activity in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 27(4), 81-92.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture Circular No. 939.
- Poveda, J., Zabalgoeazcoa, I., Soengas, P., Rodríguez, V.M., Carrea, M.E., 2021. The role of mycorrhizal fungi in plant hormone production and drought stress mitigation. *Frontiers in Plant Science*. 12, 659769. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659769>
- Rahdari, P., Hosseini, S.M., 2012. The studying effect of drought stress on germination, proline, sugar, lipid, protein and chlorophyll content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) leaves. *Journal of Medicinal Plants Research*. 6(9), 1539-1547. <https://doi.org/10.5897/JMPR11.698>
- Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 417-435.
- Ribaut, J.M., Betran, J., Monneveux, P., Setter, T., 2012. Drought tolerance in maize. In: Bennetzen, J.L., Hake, S.C., (eds.), *Handbook of Maize: Its Biology*. Springer, New York, pp. 311-334.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Di Mattia, E., Tullio, M., Rea, E., Colla, G., 2015. Enhancement of alkalinity tolerance in two cucumber genotypes inoculated with an arbuscular mycorrhizal biofertilizer containing *Glomus intraradices*. *Biology and Fertility of Soils*. 51(5), 601-612. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1006-3>
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Colla, G., 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*. 287, 110356. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110356>
- Sepasi, S., Klarstaqy, K., Abraham, H., 2012. Effects of different levels of drought stress and plant density on yield and yield components of SC 704. *Journal of Crop Ecophysiology*. 6(3), 279-288. [In Persian with English Summary].
- Sharifi, M., Ghorbanli, M., Ebrahimzadeh, H., 2014. Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology*. 171(10), 868-874. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.01.016>
- Sharifi, R., Nazarli, H., 2013. The effect of seed priming with growth-promoting bacteria on grain yield, fertilizer use efficiency, and dry matter remobilization of sunflower at different levels of nitrogen fertilizer. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*. 23(2), 1-14. [In Persian with English Summary].
- Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Hellin, J., Bänziger, M., 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*. 3(3), 307-327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., Mohammadi, V., 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*. 98, 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001>
- Smith, S.E., Read, D.J., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Academic Press, London.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, Y., Li, J., Zhang, H., 2021. Drought stress impacts on maize ear development and yield: A review. *Crop Science*. 61(3), 1234-1245. <https://doi.org/10.1002/csc2.20456>
- Wu, Q.S., Srivastava, A.K., Zou, Y.N., 2019. AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*. 243, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.020>
- Zargar, S.M., Gupta, N., Nazir, M., Mahajan, R., Malik, F.A., Sofi, N.R., Shikari, A.B., Salgotra, R.K., 2017. Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant Gene*. 11, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.04.003>
- Zhang, F., Zou, Y.N., Wu, Q.S., 2019. Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress. *Scientia Horticulturae*. 243, 255-259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.021>
- Zhang, Y., Li, X., Wang, Z., 2021. Drought stress impacts on maize grain development and yield: A review. *Crop Science*. 61(4), 1234-1245. <https://doi.org/10.1002/csc2.20456>
- Zhang, Y., Li, X., Wang, Z., 2022. Drought stress impacts on plant growth and physiological responses: A review. *Agronomy Journal*. 114(3), 1234-1245. <https://doi.org/10.1002/agj2.20987>
- Zou, Y.N., Srivastava, A.K., Wu, Q.S., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi and drought tolerance in plants: Mechanisms and practical applications. *Journal of Plant Growth Regulation*. 40(3), 1169-1184. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10185-2>