



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 15, No. 2, Summer 2025 (167-182)

doi: 10.22124/CR.2025.30052.1860

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Effect of *Piriformospora indica* symbiosis on growth and physiological indices of maize (*Zea mays* L.) seedlings exposed to microplastic particles and water deficit stress

Maryam Saman^{1*} and Ali Sepehri²

1. Assistant Professor, Department of Agricultural Sciences, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran (* Corresponding author: maryam.saman@pnu.ac.ir)
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Microplastic contamination of agricultural lands is one of the major environmental problems that has recently gained attention. The decomposition of plastic mulches and equipment used in irrigation systems, the use of sludge-based fertilizers from wastewater purification, contaminated irrigation water, and the proximity of fields to busy roads are among the most important factors in the contamination of agricultural lands with plastic particles. The presence of microplastics in the soil with particle sizes from 100 nm to five mm causes abrasion of the root surface of plants, and physical damage to plant roots will increase with increasing particle size. Moreover, drought stress, as one of the most important factors limiting crop production, is increasing alarmingly, especially due to global climate change. Therefore, the present study was conducted to investigate the possibility of using the biological potential of the fungus *Piriformospora indica* to reduce the negative effects of stress caused by polyvinyl chloride (PVC) microplastic particles and water deficiency in maize crop.

Materials and methods

The experiment was conducted as factorial experiment in a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran, in 2023. The experimental factors included the addition of three concentrations of polyvinyl chloride microplastics to the soil (0, 0.1, and 1%), *P. indica* fungus at two levels (inoculation and non-inoculation), and water deficit stress at three levels (full irrigation, and irrigation at 75% and 50% of field capacity, as non-stress, moderate stress and severe stress, respectively). Germinated maize seeds (cv. 'Tah') were inoculated with *P. indica*, planted in pots containing three kg of soil, and placed in greenhouse conditions. Water deficit stress was applied 14 days after planting. One month after planting, photosynthetic parameters and relative leaf water content were measured. The plants were then harvested, and the roots were assessed under a microscope to determine the colonization percentage. Proline content, total chlorophyll content, and plant dry matter were also measured.

Research findings

The results showed that the presence of 1% microplastic in the soil, similar to water deficit stress, significantly reduced relative leaf water content, total chlorophyll content, photosynthetic indices, and shoot dry matter of maize seedlings. Although the percentage of root colonization of maize seedlings by *P. indica* fungus decreased by 16.9%, 30.9%, and 47.1% under 1% microplastic contamination and water deficit at 75% and 50% of field capacity conditions compared to the control, respectively, the beneficial effects of the fungus on plant growth and measured parameters was still evident, so that the relative leaf water content, chlorophyll content, net photosynthesis rate, and shoot dry weight of



inoculated plants under the highest level of water deficit stress and in the presence of 1% microplastic were (8.2 and 9), (20.5 and 27), (17.9 and 17.8) and (43.5 and 46.8) percent higher than those of uninoculated plants, respectively. Moreover, the proline content of the plants also increased significantly in the presence of the fungus.

Conclusion

The results of this study showed that the presence of *P. indica* fungus improved the growth and photosynthetic parameters of maize seedlings under microplastic particles and water deficit stress conditions. Thus, utilizing the potential of this fungus can be considered to reduce the negative effects of these stresses.

Keywords: Chlorophyll content, Endophytic fungus, Polyvinyl chloride (PVC), Proline content, Relative water content, Root colonization

Received: March 2, 2025

Accepted: June 30, 2025

Cite this article:

Saman, M., & Sepehri, A. (2025). Effect of *Piriformospora indica* symbiosis on growth and physiological indices of maize (*Zea mays* L.) seedlings exposed to microplastic particles and water deficit stress. *Cereal Research*, 15(2), 167-182. doi: [10.22124/CR.2025.30052.1860](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30052.1860).



تأثیر همزیستی قارچ *Piriformospora indica* بر رشد و شاخص‌های فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت (*Zea mays* L.) در معرض ذرات میکروپلاستیک و تنش کمبود آب

مریم ثمن^{۱*} و علی سپهری^۲

۱- استادیار، گروه علوم کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (* نویسنده مسئول):

(maryam.saman@pnu.ac.ir)

۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: آلودگی اراضی زراعی به ذرات میکروپلاستیک یکی از مشکلات مهم زیست‌محیطی است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. تجزیه مالچ‌ها و تجهیزات پلاستیکی مورد استفاده در سیستم‌های آبیاری، مصرف کودهای مبتنی بر لجن حاصل از تصفیه پساب، آب آبیاری آلوده و مجاورت مزارع با جاده‌های پرتردد، از جمله مهم‌ترین عوامل آلودگی زمین‌های کشاورزی به ذرات پلاستیک هستند. حضور میکروپلاستیک‌ها با اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر تا پنج میلی‌متر در خاک، سبب سایش سطح ریشه گیاهان می‌شود و هر چه اندازه این ذرات بزرگ‌تر باشد، آسیب فیزیکی وارده به ریشه بیش‌تر خواهد بود. از سوی دیگر، تنش خشکی به‌ویژه در اثر تغییرات اقلیمی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید گیاهان زراعی، به‌طور نگران کننده‌ای در حال افزایش است. از این‌رو، پژوهش حاضر اجرا شد که هدف از آن، بررسی امکان استفاده از پتانسیل زیستی قارچ *Piriformospora indica* در جهت کاهش اثرات منفی تنش ناشی از ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) و تنش کمبود آب در گیاه ذرت بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل افزودن سه غلظت میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید به خاک (صفر، ۰/۱ و یک درصد)، قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح) و تنش کمبود آب در سه سطح (آبیاری کامل و آبیاری در ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب به‌عنوان بدون تنش، تنش متوسط و تنش شدید) بودند. بذره‌ای ذرت رقم طله پس از جوانه‌زنی، با قارچ *P. indica* تلقیح و در گلدان‌هایی با ظرفیت سه کیلوگرم خاک کشت و در گلخانه قرار داده شدند. تنش کمبود آب ۱۴ روز پس از کاشت اعمال شد. یک ماه پس از کاشت، پارامترهای فتوسنتزی و محتوای رطوبت نسبی برگ اندازه‌گیری و سپس گیاهان برداشت شدند و ریشه گیاهان به‌منظور تعیین درصد کلونیزاسیون در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت. محتوای پروتئین، محتوای کلروفیل کل و ماده خشک گیاهان نیز اندازه‌گیری شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک مشابه تنش کمبود آب، محتوای رطوبت نسبی برگ، محتوای کلروفیل کل، شاخص‌های فتوسنتزی و ماده خشک اندام هوایی گیاهچه‌های ذرت را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. اگرچه درصد کلونیزاسیون ریشه گیاهچه‌های ذرت توسط قارچ *P. indica* بر اثر افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک و همچنین به‌دنبال کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌ترتیب ۱۶/۹، ۳۰/۹ و ۴۷/۱ درصد نسبت

به شاهد کاهش یافت، اما تأثیر مثبت قارچ بر رشد و پارامترهای مورد بررسی در این شرایط همچنان مشهود بود، به طوری که محتوای رطوبت نسبی، محتوای کلروفیل، سرعت فتوسنتز خالص و وزن خشک اندام‌های هوایی گیاهان تلقیح‌شده با قارچ تحت شرایط بالاترین سطح تنش کمبود آب و در حضور یک درصد میکروپلاستیک، به ترتیب (۸/۲ و ۹)، (۵/۲۰ و ۲۷)، (۹/۱۷ و ۱۷/۸) و (۵/۴۳ و ۸/۴۶) درصد بیش‌تر از گیاهان تلقیح نشده بود. علاوه بر این، محتوای پرولین گیاهان نیز در حضور قارچ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که حضور قارچ *P. indica* موجب افزایش رشد و بهبود پارامترهای فتوسنتزی گیاهچه‌های ذرت تحت شرایط تنش کمبود آب و ذرات میکروپلاستیک شد. به این ترتیب، استفاده از این قارچ به‌منظور تعدیل اثرات منفی تنش‌های مذکور می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌وینیل کلراید، رطوبت نسبی برگ، قارچ اندوفیت، کلونیزه‌شدن ریشه، محتوای پرولین، محتوای کلروفیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

نحوه استناد به این مقاله:

ثمن، مریم، و سپهری، علی. (۱۴۰۴). تأثیر همزیستی قارچ *Piriformospora indica* بر رشد و شاخص‌های فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت (*Zea mays* L.) در معرض ذرات میکروپلاستیک و تنش کمبود آب. *تحقیقات غلات*، ۱۵(۲)، ۱۸۲-۱۶۷. doi: [10.22124/CR.2025.30052.1860](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30052.1860)

مقدمه

کاربرد گسترده ترکیبات و مصنوعات پلاستیکی در جوامع مختلف و افزودن مقادیر انبوهی از زباله‌های پلاستیکی به محیط زیست طی چند دهه اخیر، باعث شده است آلودگی خاک‌های زراعی به ذرات میکروپلاستیک به یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی تبدیل شود و تولید محصولات زراعی را با مخاطره جدی مواجه کند (He et al., 2021). تجزیه مالچ‌ها و تجهیزات پلاستیکی مورد استفاده در سیستم‌های آبیاری، مصرف کودهای مبتنی بر لجن حاصل از تصفیه پساب، آب آبیاری آلوده و مجاورت مزارع با جاده‌های پرتردد از جمله مهم‌ترین عوامل آلودگی زمین‌های کشاورزی به ذرات پلاستیک هستند (Cao et al., 2021). حضور میکروپلاستیک‌ها (ذرات پلاستیکی با اندازه ۱۰۰ نانومتر تا پنج میلی‌متر) در خاک سبب سایش سطح ریشه گیاهان می‌شود و هر چه اندازه ذرات بزرگ‌تر باشد، آسیب فیزیکی وارده به ریشه بیش‌تر خواهد بود (Hartmann et al., 2022). چسبیدن این ذرات به لایه اپیدرم ریشه و انباشت آن‌ها در ناحیه کورتکس نیز جذب آب و عناصر غذایی را مختل می‌کند (Bosker et al., 2019). این موضوع در نهایت از طریق تأثیر منفی بر فرایند فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Dong et al., 2020). علاوه بر این، مشخص شده است که افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و وقوع تنش اکسیداتیو یکی از مهم‌ترین اثرات منفی ناشی از سمیت ذرات میکروپلاستیک است که از طریق اکسیداسیون پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها، سبب تخریب اندامک‌های مختلف سلول و اختلال در متابولیسم گیاه می‌شود (Gong et al., 2021). تغییر در ساختار و ترکیب جوامع میکروبی خاک و تأثیر بر باکتری‌ها و قارچ‌های همزیست از جمله دیگر عوارض ذرات میکروپلاستیک است که رشد و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hartmann et al., 2022).

از سوی دیگر پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد در بسیاری از نقاط جهان، شدت و میزان وقوع دوره‌های خشکی ناشی از افزایش دما و کمبود آب رو به افزایش است که تهدیدی جدی برای تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود (Zia et al., 2021). بسته شدن روزنه‌ها طی تنش کمبود آب منجر به کاهش سرعت تعرق، کاهش جذب دی‌اکسید کربن و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. از سوی دیگر، برهم‌خوردن تعادل بین واکنش نوری و مسیر تثبیت دی‌اکسید کربن سبب آسیب اکسیداتیو فتوسیستم II

می‌شود که این موضوع کاهش بیش‌تر ظرفیت فتوسنتزی را به دنبال دارد (Xu et al., 2022). کاهش محتوای کلروفیل، پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و اختلال در سنتز پروتئین‌ها و فعالیت غشای سلولی از جمله اثرات مهم دیگر تنش کمبود آب است که در نهایت منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود (Zia et al., 2021).

طی سالیان اخیر، تأثیر استقرار رابطه همزیستی بین گیاهان و برخی از ریزجانداران بر افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش‌های مختلف محیطی، مورد توجه قرار گرفته است. به نظر می‌رسد استفاده از این دسته از ریزجانداران می‌تواند نقش مهمی در حفظ و تقویت بهره‌وری فعالیت‌های کشاورزی داشته باشد (Harman, 2011). قارچ *Piriformospora (Serendipita) indica* که به راسته *Sebacinales* (بازیدیومایکوتا) تعلق دارد یکی از این ریزجانداران مفید است. این قارچ از لحاظ فیلوژنتیک به قارچ‌های میکوریزایی ارکید و اریکوئید بسیار نزدیک است (Gill et al., 2016)، و به دلیل وجوه مشترک زیاد، یک قارچ شبه میکوریزی نامیده می‌شود، اما این مزیت را دارد که در محیط مصنوعی نیز قابل کشت است (Aslam et al., 2019). *P. indica* قادر است ریشه بسیاری از گیاهان تک‌لپه و دولپه را کلونیزه کند و سبب بهبود رشد و عملکرد شود. علاوه بر این، ثابت شده است که همزیستی با این قارچ، تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی را افزایش می‌دهد (Gill et al., 2016; Aslam et al., 2019). تحریک سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و غیر آنتی‌اکسیدانی و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تنش، از جمله دلایل افزایش تحمل گیاهان همزیست با این قارچ نسبت به تنش محسوب می‌شود (Gill et al., 2016). با توجه به آلایندگی ناشی از ذرات پلاستیک و با در نظر گرفتن نقش مهم گیاه ذرت در تأمین امنیت غذایی پایدار به‌همراه رشد سریع ریشه و اندام‌های هوایی، تولید زیست‌توده زیاد و حساسیت بالای آن به تنش کمبود آب، پژوهش حاضر انجام شد که هدف از آن، بررسی تأثیر همزیستی قارچ *P. indica* بر رشد و شاخص‌های فتوسنتزی و فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت در معرض ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) طی تنش کمبود آب بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی و آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا

(همدان) در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل افزودن سه غلظت صفر، ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (LG Chem PVC PB-1202) با قطر ذرات ۷۵ میکرومتر به خاک، قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح) و تنش کمبود آب در سه سطح (آبیاری در ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب معادل بدون تنش، تنش متوسط و تنش شدید) بودند. خاک مورد استفاده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌تهیه و پس از عبور از الک دو میلی‌متری به نسبت دو به یک با ماسه مخلوط شد. بافت خاک لوم شنی رسی با اسیدیته ۷/۵ و هدایت الکتریکی ۱/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. مقدار فسفر، پتاسیم، مس و روی قابل استفاده خاک به‌ترتیب ۷، ۲۷۴، ۲/۹ و ۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. به‌منظور حذف اثرات ناخواسته ریزجانداران موجود، خاک مورد استفاده توسط اتوکلاو طی دو مرحله و هر مرحله به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس استریل شد. برای آلوده کردن خاک به ذرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید ابتدا میزان میکروپلاستیک مورد نیاز برای هر گلدان (با ظرفیت سه کیلوگرم خاک) توزین و پس از مخلوط کردن آن در حجمی از آب که خاک را به نقطه ظرفیت زراعی می‌رساند، به خاک اضافه شد.

جدایه اولیه قارچ *P. indica* از گروه گیاهپزشکی دانشگاه بوعلی‌سینا تهیه و پس از کشت در محیط PDA، به‌مدت ۱۰ روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری و سوسپانسیون اسپور با غلظت 5×10^5 اسپور در میلی‌لیتر حاوی ۰/۰۲ درصد توئین تهیه شد (Dabral et al., 2019). سپس بذره‌های جوانه‌زده ذرت رقم طه (که از بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد)، در سوسپانسیون اسپور غوطه‌ور و به‌مدت چهار ساعت روی شیکر با سرعت ۵۰ دور در دقیقه قرار داده شد (Mohd et al., 2017) و سپس کشت انجام گرفت. قابل ذکر است که قبل از کشت بذره‌های تلقیح‌شده در گلدان، حدود ۱۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون قارچ نیز به محل کشت هر بذر اضافه شد. در هر گلدان ۱۲ بذر کشت شد که در نهایت پس از اطمینان از استقرار کامل گیاهچه‌ها در مرحله دو تا سه برگی، تعداد بوته‌ها به هفت بوته در هر گلدان کاهش یافت. گلدان‌ها در گلخانه با دمای $22/32 \pm 2$ درجه سلسیوس (روز/شب) و طول دوره روشنایی ۱۲ ساعت قرار گرفتند و کمبود نور مورد نیاز گیاهان با ترکیبی از لامپ‌های بخارسدیم و

فلورسنت تأمین شد. تنش کمبود آب ۱۴ روز پس از کاشت بذرها اعمال شد. برای این منظور، پیش از شروع آزمایش، ابتدا خاک هر گلدان به‌مدت ۴۸ ساعت در داخل آون در دمای ۷۲ درجه سلسیوس قرار گرفت و وزن خاک خشک به‌دست آمد. سپس با افزودن تدریجی آب به خاک خشک موجود در گلدان، خاک به وضعیت اشباع رسید و پس از خروج کامل آب ثقلی، گلدان توزین شد. پس از کسر وزن گلدان و خاک خشک، مقدار آب نگهداری شده در ظرفیت زراعی محاسبه شد و بر این اساس سطوح مختلف تنش کمبود آب با توزین روزانه گلدان‌ها و اضافه نمودن آب مصرفی بر اثر تبخیر و تعرق اعمال شد.

حدود پنج روز بعد از کاشت، همه بوته‌ها سبز شدند. برای بررسی عملکرد فتوسنتزی گیاه ۳۰ روز پس از کاشت (۲۵ روز پس از سبز شدن)، میزان فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق با استفاده از دستگاه آنالیز گازی مادون قرمز (Lci, ADC Bioscientific Ltd. England) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری روی جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته انجام شد و مساحت بخشی از برگ که در داخل محفظه دستگاه قرار گرفت، معادل ۶/۲۵ سانتی‌متر مربع بود. اندازه‌گیری‌ها در محیط گلخانه در فاصله زمانی ۹ تا ۱۱ صبح و در شدت نور بیش از ۱۰۰۰ میکرومول فوتون در متر مربع در ثانیه صورت گرفت. سپس گیاهان برداشت و پس از جداسازی ریشه و اندام هوایی و تهیه نمونه برگی تازه، جهت اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی به‌مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بخشی از نمونه‌های برگی تازه مورد استفاده برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و پروتئین در نیتروژن مایع نگهداری شدند.

به‌منظور بررسی وضعیت همزیستی قارچ *P. indica* با ریشه و تعیین درصد کلونیزاسیون، بلافاصله پس از جداسازی ریشه‌ها از خاک و شستشوی آن‌ها، نمونه‌هایی به‌طول یک سانتی‌متر تهیه و رنگ‌آمیزی شد (Phillips & Hayman, 1970). قطعات رنگ‌آمیزی‌شده از لحاظ وجود ساختارهای قارچی نظیر هیف و کلامیدوسپورهای گلایی شکل در زیر میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند و سپس درصد کلونیزاسیون ریشه (CP) از نسبت تعداد قطعات حاوی ساختارهای قارچ (NRFS) به تعداد کل ریشه مشاهده شده (NTOR) بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (Rai et al., 2001):

$$CP = \frac{NRFS}{NTOR} \quad (1)$$

SAS-9.4 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. نمودارهای مربوطه نیز با استفاده از نرم‌افزار اکسل رسم شدند.

نتایج و بحث

درصد کلونیزاسیون ریشه

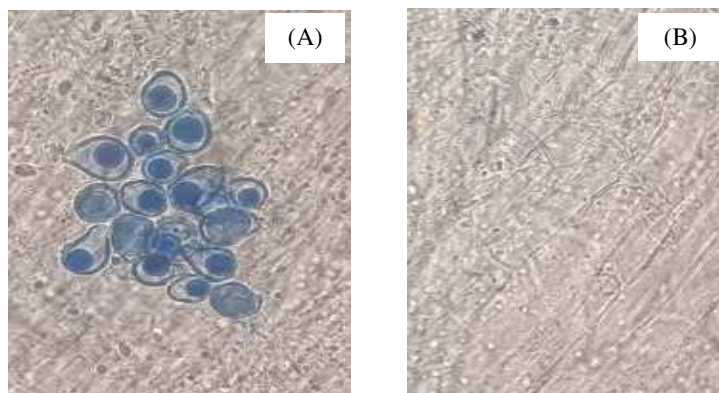
کلامیدوسپورهای قارچ *P. indica* در بافت ریشه گیاه ذرت پس از رنگ‌آمیزی در شکل ۱ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌های به‌دست آمده نشان داد که تأثیر میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر درصد کلونیزاسیون ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک، میزان کلونیزاسیون ۱۶/۹ درصد کاهش یافت (شکل ۲-A). علاوه بر این، کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز میزان کلونیزاسیون را به‌ترتیب ۳۰/۹ و ۴۷/۱ درصد در مقایسه با شاهد کاهش داد (شکل ۲-B). کاهش درصد کلونیزاسیون قارچ *P. indica* در اثر تنش خشکی در مطالعات تیاگی و همکاران (Tyagi et al., 2023) نیز گزارش شد. در خصوص تأثیر منفی میکروپلاستیک بر درصد کلونیزاسیون قارچ‌های هم‌زیست نیز نتایج مشابهی توسط دسوزا ماچادو و همکاران (de Souza Machado et al., 2019) گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد که تأثیر منفی تنش خشکی و ذرات میکروپلاستیک بر فتوسنتز و رشد گیاه و کاهش تامین کربوهیدرات مورد نیاز قارچ از جمله دلایل موثر بر کاهش درصد کلونیزاسیون در این شرایط باشد (Tyagi et al., 2017).

برای تعیین محتوای رطوبت نسبی برگ (RWC)، ابتدا وزن تازه (FW) نمونه‌ها اندازه‌گیری و سپس قطعات برگ در پتری دیش‌های حاوی آب مقطر غوطه‌ور و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شدند. در مرحله بعد آب اضافی موجود در سطح نمونه‌ها حذف و وزن اشباع (TW) اندازه‌گیری شد. در نهایت، نمونه‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و پس از توزین و ثبت وزن خشک (DW)، محتوای رطوبت نسبی برگ بر اساس رابطه (۲) به‌دست آمد (Barrs & Weatherley, 1962):

$$RWC = \frac{FW-DW}{TW-DW} \times 100 \quad (2)$$

سنجش میزان پرولین نمونه‌ها با استفاده از روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۵ گرم برگ با اسید سولفوسالسیلیک عصاره‌گیری شد. پس از افزودن معرف ناین هیدرین و اسید استیک، نمونه‌ها در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و در نهایت تولوئن اضافه شد. در پایان میزان جذب نوری فاز بالایی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. محلول‌های استاندارد نیز با ال-پرولین تهیه و تولوئن به‌عنوان شاهد استفاده شد. برای تعیین میزان کلروفیل برگ، پس از همگن کردن ۰/۵ گرم برگ تازه در استون، مخلوط حاصل در سانتریفیوژ قرار گرفت و سپس میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b تعیین شد (Arnon, 1949).

تجزیه آماری داده‌های به‌دست آمده، پس از اطمینان از نرمال بودن باقی‌مانده داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار

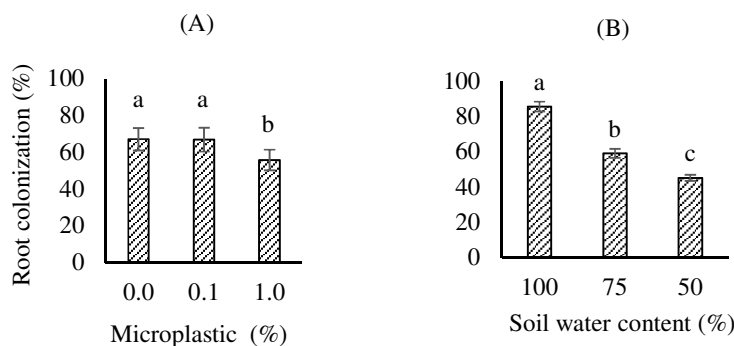


شکل ۱- کلامیدوسپورهای قارچ *P. indica* در بافت ریشه ذرت رقم طه با بزرگ‌نمایی 40x. (A) ریشه تلقیح‌شده، (B) ریشه تلقیح نشده.
Figure 1. Chlamydospores of *P. indica* fungus in the root tissue of maize cv. Tah with 40x magnification.
A) Inoculated root, B) Uninoculated root.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر میکروپلاستیک و درصد رطوبت خاک بر درصد کلونیزاسیون ریشه

Table 1. Analysis of variance of the effect of microplastic and soil water content on root colonization percentage

Source of variation	df	Mean square
Microplastic (M)	2	376.48**
Drought stress (Soil water content)	2	3779.32**
M × D	4	8.25 ^{ns}
Error	18	24.16
CV (%)	-	7.77

^{ns} and ** Not- significant and significant at 1% probability level, respectively.

شکل ۲- تأثیر غلظت میکروپلاستیک (A) و رطوبت خاک (B) بر درصد کلونیزاسیون ریشه ذرت رقم طه

Figure 2. Effect of microplastic (A) and soil water content (B) on root colonization percentage of maize cv. Tah

رطوبت نسبی برگ با حضور قارچ بهبود یافت، به طوری که محتوای رطوبت نسبی برگ در شرایط بدون تنش، تنش متوسط و تنش شدید در گیاهان تلقیح شده با قارچ به ترتیب ۱۹/۳، ۱۳/۴ و ۸/۱ درصد بیش تر از گیاهان تلقیح نشده بود.

محتوای رطوبت نسبی برگ یکی از شاخص های مهمی است که برای توصیف وضعیت آب گیاه مورد استفاده قرار می گیرد (Tyagi *et al.*, 2017). لیان و همکاران (Lian *et al.*, 2021) نیز تأثیر منفی میکروپلاستیک بر محتوای رطوبت نسبی برگ ذرت را مشاهده کردند. انسداد فیزیکی منافذ ریشه ناشی از حضور میکروپلاستیک به همراه آسیب ساختاری ریشه که در نهایت سبب کاهش جذب آب می شود (Jia *et al.*, 2023)، از جمله دلایل احتمالی موثر بر این موضوع است. افزایش محتوای رطوبت نسبی برگ بر اثر همزیستی با قارچ *P. indica* طی تنش خشکی قبلاً توسط سوئتا و پادماواتی (Swetha & Padmavathi, 2020) در گیاه بادمجان نیز گزارش شده است. به نظر می رسد که هیف های قارچ از طریق انتقال بیش تر آب به ریشه گیاهان همزیست به حفظ تعادل آبی گیاه کمک می کنند (Jangir *et al.*, 2021).

محتوای رطوبت نسبی (RWC)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف بین محتوای رطوبت نسبی گیاهچه های ذرت در سطوح مختلف قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). برهمکنش قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح احتمال یک درصد برهمکنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود. برهمکنش قارچ و میکروپلاستیک (شکل ۳- A) نشان داد که بالاترین محتوای رطوبت نسبی (۸۰/۸ درصد) در گیاهان تلقیح شده با قارچ بدون حضور میکروپلاستیک مشاهده شد و تفاوت آن با محتوای رطوبت نسبی گیاهان در گیاهان تلقیح شده و در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک معنی دار نبود. گیاهان فاقد قارچ در معرض یک درصد میکروپلاستیک نیز کم ترین محتوای رطوبت نسبی (۶۴/۵ درصد) را داشتند. همزیستی با قارچ *P. indica* در غلظت های صفر، ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک، محتوای رطوبت نسبی برگ را به ترتیب ۱۶/۲، ۱۶/۷ و ۹ درصد افزایش داد (شکل ۳- A). بررسی برهمکنش قارچ و درصد رطوبت خاک (شکل ۳- B) نیز نشان داد که در کلیه سطوح رطوبت خاک، محتوای

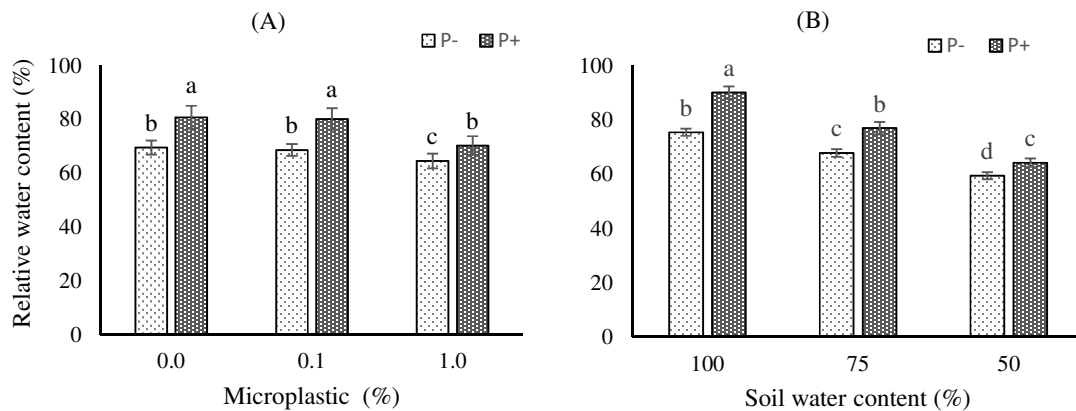
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر محتوای رطوبت نسبی، محتوای کلروفیل، سرعت فتوسنتز خالص،

هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و ماده خشک اندام هوایی ذرت

Table 2. Analysis of variance of the effect of microplastic and soil water content on relative water Content (RWC), chlorophyll content (Chl.), net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and shoot dry weight (SDW) of maize

Source of variation	df	Mean square						
		RWC	Proline	Chl.	P_n	G_s	T_r	SDW
<i>P. indica</i> (P)	1	12223.6**	18.2**	2.0**	84.3**	0.0061**	5.84**	5.28**
Microplastic (M)	2	327.9**	11.3**	1.6**	13.5**	0.0011**	0.85**	1.18**
Drought stress (D)	2	1969.6**	31.6**	5.1**	105.4**	0.0075**	6.49**	9.05**
P×M	2	47.3*	0.38*	0.08**	2.1**	0.0001*	0.18*	0.12**
P×D	2	108.0**	0.38*	0.4**	5.3**	0.0003**	0.42**	0.64**
M×D	4	5.5 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.000003 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.04 ^{ns}
P×M×D	4	5.7 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}
Error	36	14.5	0.11	0.01	0.6	0.00004	0.04	0.01
Cv (%)		5.2	7.4	9.3	7.1	5.5	5.6	9.4

^{ns}, * and ** Not- significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر محتوای رطوبت نسبی برگ
Figure 3. Comparison of means of *P. indica* and microplastic (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on leaf relative water content

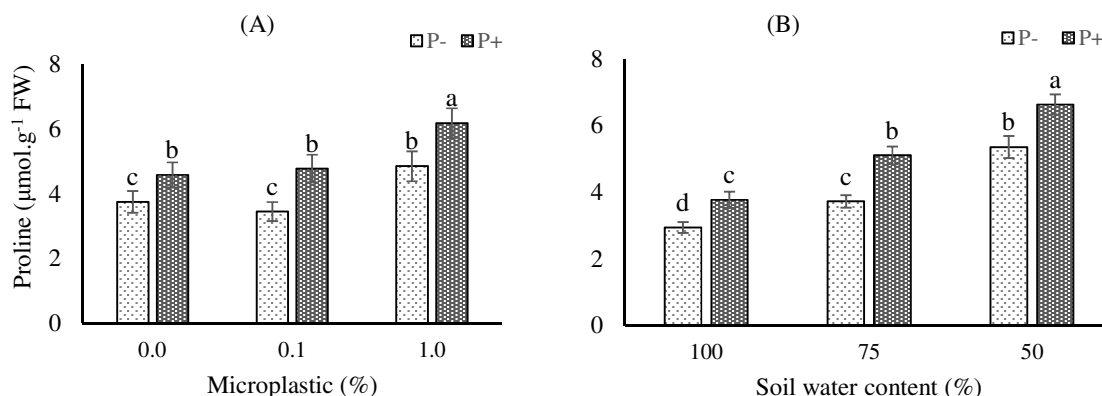
محتوای پرولین

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک، برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک و همچنین قارچ و رطوبت خاک نیز بر محتوای پرولین گیاهان معنی‌دار بود (جدول ۲). محتوای پرولین گیاهچه‌های در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت، اما با افزایش غلظت میکروپلاستیک خاک به یک درصد، محتوای پرولین گیاهان به‌طور متوسط ۳۲/۴ درصد افزایش نشان داد. در کلیه سطوح میکروپلاستیک، محتوای پرولین گیاهان تلقیح شده بیش‌تر از گیاهان فاقد قارچ بود (شکل ۴- A). بررسی برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (شکل ۴- B) نیز نشان داد که کاهش رطوبت خاک به ۷۵

و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، محتوای پرولین گیاهان را به‌ترتیب ۳۱/۵ و ۷۸/۵ درصد افزایش داد. علاوه بر این حضور قارچ *P. indica* در کلیه سطوح رطوبت خاک با افزایش محتوای پرولین گیاهان همراه بود. مشابه نتایج مطالعه حاضر، محتوای پرولین گیاهچه‌های شاهی (*Lepidium sativum* L.) در معرض میکروپلاستیک نیز افزایش نشان داد (Pignattelli et al., 2020). از جمله رایج‌ترین راه‌کارهای گیاهان برای تحمل تنش، تولید انواع مختلفی از ترکیبات محافظت‌کننده‌های اسمزی است که اسید آمینه پرولین یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. پرولین قادر است از طریق کمک به تنظیم اسمزی، خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و کمک به حفظ ساختار طبیعی غشاهای و ترکیبات پروتئینی، سبب کاهش اثرات مخرب

مختلف نشان می‌دهد که افزایش تجمع پرولین در گیاهان همزیست با قارچ میکوریزا مرتبط با افزایش تنظیم بیان ژن دلتا ۱-پیرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز (MeP5CS) است (Huang *et al.*, 2010).

تنش‌های محیطی شود (Zia *et al.*, 2021). افزایش محتوای پرولین گیاهچه‌های هندوانه (*Citrullus lanatus*) بر اثر کلونیزاسیون قارچ *P. indica* نیز مشاهده شده است (Jyothymol *et al.*, 2024). شواهد



شکل ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر محتوای پرولین
Figure 4. Comparison of means of *P. indica* and microplastic (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on proline

مهم‌ترین دلایل این موضوع می‌باشد (Hartmann *et al.*, 2022). کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان در معرض تنش کمبود آب عمدتاً به دلیل انباشت گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به غشاهای سلولی رخ می‌دهد (Xu *et al.*, 2022). مطالعات مختلف نشان داده است که قارچ *P. indica* می‌تواند از طریق افزایش جذب آب و عناصر غذایی (Aslani *et al.*, 2023) و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی (Aslam *et al.*, 2019) سبب بهبود محتوای کلروفیل گیاهان شود.

پارامترهای فتوسنتزی

سرعت فتوسنتز خالص

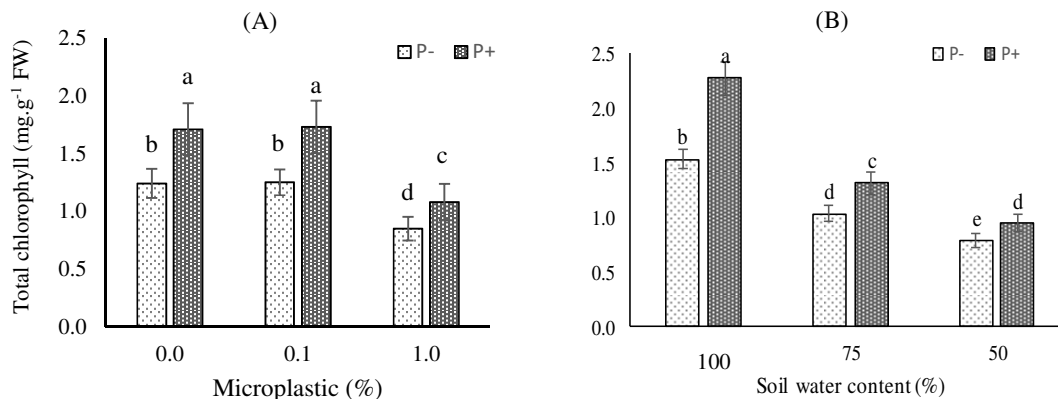
بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، اثرات اصلی قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک و برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک و قارچ و رطوبت خاک بر سرعت فتوسنتز خالص در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که حضور ۰/۱ درصد میکروپلاستیک در خاک تأثیر معنی‌داری بر سرعت فتوسنتز خالص نداشت (جدول ۳)، اما این پارامتر در حضور یک درصد میکروپلاستیک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. حضور قارچ *P. indica* سبب بهبود سرعت فتوسنتز گیاهان شد، به‌طوری که سرعت فتوسنتز خالص گیاهان تلقیح‌شده در غلظت‌های صفر و یک درصد میکروپلاستیک به‌ترتیب ۲۷/۱ و ۱۷/۹ درصد بیش‌تر از گیاهان فاقد قارچ بود. مقایسه میانگین

محتوای کلروفیل کل

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر محتوای کلروفیل کل گیاهان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک و قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محتوای کلروفیل گیاهان بر اثر افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک به‌طور متوسط ۳۴/۶ درصد کاهش یافت، اما حضور قارچ *P. indica* منجر به افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل کل شد، به‌گونه‌ای که تلقیح گیاهان با قارچ در غلظت‌های صفر، ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک، محتوای کلروفیل کل را به‌ترتیب ۳۷/۹، ۳۸/۴ و ۲۷ درصد افزایش داد (شکل ۵-A). بررسی برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز نشان داد که حضور قارچ سبب کاهش تأثیر منفی کاهش رطوبت خاک بر محتوای کلروفیل گیاهان شد، به‌طوری که محتوای کلروفیل گیاهان تلقیح‌شده با قارچ در شرایط تنش کمبود آب متوسط و شدید به‌ترتیب ۲۷/۱ و ۲۰/۵ درصد بیش‌تر از گیاهان تلقیح‌نشده بود (شکل ۵-B). تأثیر منفی میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر محتوای کلروفیل گیاهچه‌های ذرت قبلاً نیز گزارش شده است (Pehlivan & Gedik, 2021). وقوع تنش اکسیداتیو و اختلال در مسیرهای متابولیک بیوسنتز کلروفیل از جمله

گیاهان با قارچ *P. indica* تا حد زیادی سبب تخفیف اثر منفی تنش خشکی بر سرعت فتوسنتز خالص شد، به‌گونه‌ای که سرعت فتوسنتز خالص گیاهان تلقیح‌شده در بالاترین سطح تنش خشکی ۹/۹۴ میکرومول CO_2 در مترمربع در ثانیه بود که در مقایسه با گیاهان فاقد قارچ ۱۸ درصد افزایش نشان داد.

برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز نشان داد که بیش‌ترین سرعت فتوسنتز خالص (معادل ۱۵/۸۱ میکرومول CO_2 در مترمربع در ثانیه) در گیاهان تلقیح‌شده فاقد تنش به‌دست آمد (جدول ۴). کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، سرعت فتوسنتز خالص گیاهان را به‌طور متوسط به‌ترتیب ۲۰/۸ و ۳۳/۸ درصد کاهش داد. تلقیح



شکل ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر محتوای کلروفیل کل
Figure 5. Comparison of means of *P. indica* and microplastic (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on total chlorophyll content

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ *P. indica* و میکروپلاستیک بر سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق
Table 3. Comparison of means of *P. indica* and microplastic interaction on net photosynthesis (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r).

<i>P. indica</i>	Microplastic (%)	P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	G_s ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	T_r ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Absence of fungus	0	10.49 ^{bc}	0.108 ^c	3.47 ^{bc}
	0.1	10.41 ^c	0.111 ^{bc}	3.41 ^{cd}
	1	9.54 ^d	0.101 ^d	3.23 ^d
Presence of fungus	0	13.34 ^a	0.134 ^a	4.19 ^a
	0.1	13.36 ^a	0.135 ^a	4.23 ^a
	1	11.25 ^b	0.116 ^b	3.66 ^b
LSD _{5%}		0.78	0.006	0.20

Means followed by at least one similar letter are not significantly different by LSD test at 5% probability level.

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ *P. indica* و درصد رطوبت خاک بر سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق
Table 4. Comparison of means of *P. indica* and soil water content interaction on net photosynthesis (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r).

<i>P. indica</i>	Soil water content (%)	P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	G_s ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	T_r ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Absence of fungus	100	12.15 ^b	0.12 ^b	3.84 ^b
	75	9.86 ^c	0.10 ^c	3.31 ^c
	50	8.43 ^d	0.09 ^d	2.95 ^d
Presence of fungus	100	15.81 ^a	0.15 ^a	4.84 ^a
	75	12.19 ^b	0.12 ^b	3.90 ^b
	50	9.94 ^c	0.10 ^c	3.52 ^c
LSD _{5%}		0.78	0.006	0.20

Means followed by at least one similar letter are not significantly different by LSD test at 5% probability level.

کاهش سرعت فتوسنتز خالص گیاهچه‌های برنج بر اثر سمیت میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید نیز مشاهده شده است (Ma et al., 2022). کاهش محتوای کلروفیل و محدودیت روزنه‌ای ناشی از کاهش دسترسی به آب در گیاهان در معرض میکروپلاستیک از جمله عوامل موثر بر این موضوع محسوب می‌شود (Hartmann et al., 2022). از جمله دلایل کاهش فتوسنتز گیاهان در معرض کمبود آب، تأثیر منفی تنش خشکی بر هدایت روزنه‌ای گیاهان و کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی به همراه تخریب ساختار کلروپلاست عنوان شده است (Zia et al., 2021). نتایج مطالعه هوسین و همکاران (Hussin et al., 2017) نیز نشان داد که همزیستی با قارچ *P. indica* سبب بهبود سرعت آسیمیلسیون دی‌اکسید کربن در گیاهچه‌های کینوا (*Chenopodium quinoa*) در معرض تنش کمبود آب شد. قارچ *P. indica* قادر است از طریق افزایش توسعه ریشه‌ها سبب بهبود تعادل آبی گیاهان در شرایط تنش شود و علاوه بر این با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش عوارض ناشی از تنش اکسیداتیو به حفظ ساختار دستگاه فتوسنتزی گیاه کمک کند (Jangir et al., 2021).

هدایت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک به همراه برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک بر هدایت روزنه‌ای گیاهان در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (جدول ۳) نشان داد که تأثیر منفی میکروپلاستیک بر هدایت روزنه‌ای گیاهان به دنبال کلونیزاسیون قارچ *P. indica* کاهش یافت. بالاترین مقدار هدایت روزنه‌ای در شرایط حضور قارچ و در گیاهان بدون تنش (معادل ۰/۱۳ میلی مول CO₂ بر متر مربع در ثانیه) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با گیاهان تلقیح‌شده در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک نداشت. در غلظت یک درصد میکروپلاستیک نیز هدایت روزنه‌ای گیاهان تلقیح شده ۱۴/۸ درصد بیش‌تر از گیاهان فاقد قارچ بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌طور متوسط و به‌ترتیب سبب کاهش ۱۷/۲ و ۲۹/۴ درصدی هدایت روزنه‌ای گیاهان شد (جدول ۴). از سوی دیگر، همزیستی با قارچ *P. indica* در شرایط بدون تنش، تنش متوسط و

تنش شدید خشکی توانست هدایت روزنه‌ای گیاهان را به‌ترتیب ۲۴/۱، ۱۹ و ۱۴/۱ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد افزایش دهد. کاهش هدایت روزنه‌ای گیاهان در معرض میکروپلاستیک در کاهو (Gao et al., 2019) و برنج (Ma et al., 2022) نیز مشاهده شده است. این موضوع نشان‌دهنده پاسخ برگ به محدودیت آب است که از تأثیر منفی ذرات میکروپلاستیک بر جذب آب توسط ریشه‌ها ناشی می‌شود (Fu et al., 2022). در ارتباط با تأثیر مثبت قارچ *P. indica* بر هدایت روزنه‌ای، نتایج مشابهی توسط هوسین و همکاران (Hussin et al., 2017) در گیاهچه‌های کینوا در معرض تنش خشکی گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد افزایش پتانسیل آب در برگ گیاهان تلقیح‌شده با قارچ *P. indica* (Khalid et al., 2022)، می‌تواند در افزایش هدایت روزنه‌ای و بهبود تبادلات گازی گیاه موثر باشد.

سرعت تعرق

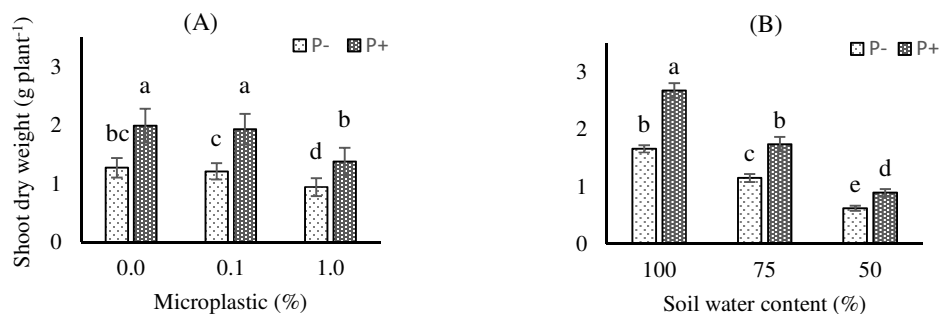
نتایج نشان داد که اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک به همراه برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد بر سرعت تعرق معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (جدول ۳) نشان داد که سرعت تعرق گیاهان در معرض یک درصد میکروپلاستیک به‌طور متوسط ۱۳/۲ درصد کم‌تر از گیاهان شاهد بود. در این شرایط حضور قارچ سبب بهبود سرعت تعرق شد و سرعت تعرق گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان فاقد قارچ ۱۳/۳ درصد افزایش نشان داد. حضور قارچ *P. indica* در گیاهان بدون تنش و گیاهان در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک نیز سرعت تعرق گیاهان را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. همچنین، کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه با کاهش سرعت تعرق گیاهان همراه بود، اما تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* در شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، سرعت تعرق گیاهان را به‌ترتیب ۲۶، ۱۷/۸ و ۱۳/۵ درصد بهبود بخشید (جدول ۴). کاهش سرعت تعرق طی تنش میکروپلاستیک در کاهو (Gao et al., 2019) و برنج (Ma et al., 2022) نیز گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد مسدود شدن منافذ دیواره سلول‌های ریشه و آکوپورین‌ها توسط ذرات میکروپلاستیک و در نتیجه کاهش قابلیت جذب آب (Hartmann et al., 2022) از جمله دلایل این موضوع باشد. در ارتباط با تأثیر

(جدول ۲). افزودن ۰/۱ درصد میکروپلاستیک به خاک تغییر معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی ایجاد نکرد، اما در سطح یک درصد میکروپلاستیک، وزن خشک اندام هوایی گیاهان تلقیح‌شده و تلقیح‌نشده به ترتیب ۳۰/۶ و ۲۵/۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل‌های ۶-۱ و ۶-۲). وزن خشک گیاهان در کلیه سطوح میکروپلاستیک به‌طور معنی‌داری با حضور قارچ بهبود یافت (شکل ۶-۱). بررسی برهمکنش قارچ و تنش رطوبتی نیز نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین ماده خشک اندام هوایی به ترتیب در گیاهان تلقیح‌شده بدون تنش و تلقیح‌نشده تحت تنش رطوبتی ۵۰ درصد به‌دست آمد (شکل ۶-۲).

مثبت قارچ *P. indica* بر سرعت تعرق گیاهان تحت شرایط تنش خشکی، نتایج مشابهی توسط جیوتیمول و همکاران (Jyothymol et al., 2024) در گیاهچه‌های هندوانه گزارش شده است. افزایش سرعت تعرق گیاهان ذرت تلقیح‌شده با قارچ طی تنش خشکی می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت قارچ بر هدایت روزنه‌ای باشد (جدول ۴).

ماده خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک و برهمکنش قارچ و میکروپلاستیک و قارچ و تنش رطوبتی بر ماده خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود



شکل ۶- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر ماده خشک اندام هوایی
Figure 6. Comparison of means of *P. indica* and microplastic (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on shoot dry weight



شکل ۷- رشد بوته‌ها در شرایط بدون کمبود آب و میکروپلاستیک "شاهد" (a)، تنش کمبود آب شدید و بدون میکروپلاستیک (b)، تنش کمبود آب شدید با ۰/۱ درصد میکروپلاستیک (c)، تنش کمبود آب شدید با یک درصد میکروپلاستیک (d) در حضور قارچ *P. indica*
Figure 7. Plant growth under conditions without water deficit and microplastic "control" (a), severe water deficit stress without microplastic (b), severe water deficit stress with 0.1% microplastic (c), severe water deficit stress with 1% microplastic (d) in the presence of *P. indica*

(2022) نیز کاهش یافت. شواهد نشان می‌دهد که انباشت ذرات میکروپلاستیک در ناحیه کورتکس ریشه و مسدود شدن فضاهای بین میکروفیبریل‌های سلولزی در دیواره سلولی منجر به کاهش جذب آب و عناصر غذایی و در نتیجه کاهش تولید ماده خشک می‌شود (Bosker et al.,

همزیستی با قارچ *P. indica* ماده خشک اندام هوایی را در شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی متوسط و شدید به ترتیب ۶۱/۴، ۵۱/۳ و ۴۳/۵ درصد افزایش داد. وزن خشک اندام هوایی گیاهچه‌های برنج در معرض ذرات میکروپلاستیک در مطالعه ما و همکاران (Ma et al.,

2019). تأثیر منفی میکروپلاستیک بر محتوای کلروفیل (شکل ۴) و سرعت فتوسنتز خالص گیاهان (جدول ۳) از جمله دیگر دلایل این موضوع محسوب می‌شود. نتایج مطالعه حاضر در ارتباط با بهبود رشد و افزایش ماده خشک در گیاهان کلونیزه‌شده با قارچ *P. indica* با نتایج مشاهده شده در گیاهچه‌های بادمجان تحت تنش خشکی (Swetha & Padmavathi, 2020) و گیاهچه‌های مریم گلی در معرض ذرات میکروپلاستیک (Aslani et al., 2023) مطابقت داشت. افزایش جذب عناصر غذایی به‌همراه بهبود و اصلاح هر دو مسیر بیوسنتز و سیگنال رسانی فیتوهورمون‌ها و تقویت سیستم دفاعی از جمله مکانیسم‌های مطرح در ارتباط تأثیر مثبت این قارچ بر رشد گیاهان است (Aslam et al., 2019).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک مشابه تنش کمبود رطوبت خاک، محتوای رطوبت نسبی برگ، محتوای کلروفیل، شاخص‌های فتوسنتزی و ماده خشک اندام هوایی گیاهچه‌های ذرت را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. در مقابل، محتوای پرولین در این شرایط افزایش یافت. اگرچه درصد کلونیزاسیون ریشه گیاهان ذرت توسط قارچ *P. indica* در غلظت یک درصد میکروپلاستیک و نیز تحت شرایط تنش کمبود آب کاهش یافت، اما تأثیر مثبت قارچ بر صفات مورد بررسی همچنان مشهود بود. به‌نظر می‌رسد گسترش و نفوذ هیف‌های قارچ به نقاطی از خاک که برای ریشه گیاه قابل دسترسی نیست، سبب افزایش سطح تماس ریشه با خاک شده و بهبود جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه را به‌دنبال داشته

است، به‌طوری که محتوای رطوبت نسبی برگ گیاهچه‌های تلقیح‌شده در معرض تنش بیش‌تر از گیاهچه‌های فاقد همزیستی با قارچ بود و عملکرد فتوسنتزی و تولید ماده خشک نیز در حضور قارچ افزایش یافت. در مجموع با توجه با نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، به‌نظر می‌رسد بهره‌گیری از پتانسیل قارچ *P. indica* می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری در جهت تخفیف اثرات منفی ناشی از تنش میکروپلاستیک و کمبود آب و افزایش تحمل گیاهان مورد توجه قرار گیرد.

تضاد منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. doi: [10.1104/pp.24.1.1](https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1).
- Aslam, M. M., Karanja, J., & Bello, S. K. (2019). *Piriformospora indica* colonization reprograms plants to improved P-uptake, enhanced crop performance, and biotic/abiotic stress tolerance. *Physiological & Molecular Plant Pathology*, 106, 232-237. doi: [10.1016/j.pmp.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.pmp.2019.02.010).
- Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B. A., Barin, M., & Maleki, R. (2023). Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*, 309, 111610. doi: [10.1016/j.scienta.2022.111610](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111610).
- Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3), 413-428. doi: [10.1071/B19620413](https://doi.org/10.1071/B19620413).
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant & Soil*, 39, 205-207. doi: [10.1007/BF00018060](https://doi.org/10.1007/BF00018060).

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P., & Vijver, M. G. (2019). Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere*, 226, 774-781. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.03.163](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163).
- Cao, L., Wu, D., Liu, P., Hu, W., Xu, L., Sun, Y., Wu, Q., Tian, K., Huang, B., Yoon, S. J., Kwon, B. O., & Khim, J. S. (2021). Occurrence, distribution and affecting factors of microplastics in agricultural soils along the lower reaches of Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 794, 148694. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.148694](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148694).
- Dabral, S., Varma, A., Choudhary, D. K., Bahuguna, R. N., & Nath, M. (2019). Biopriming with *Piriformospora indica* ameliorates cadmium stress in rice by lowering oxidative stress and cell death in root cells. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 186, 109741. doi: [10.1016/j.ecoenv.2019.109741](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109741).
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044-6052. doi: [10.1021/acs.est.9b01339](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339).
- Dong, Y., Gao, M., Song, Z., & Qiu, W. (2020). Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings. *Environmental Pollution*, 259, 113892. doi: [10.1016/j.envpol.2019.113892](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113892).
- Fu, Q., Lai, J. L., Ji, X. H., Luo, Z. X., Wu, G., & Luo, X. G. (2022). Alterations of the rhizosphere soil microbial community composition and metabolite profiles of *Zea mays* by polyethylene-particles of different molecular weights. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127062. doi: [10.1016/j.jhazmat.2021.127062](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127062).
- Gao, M., Liu, Y., & Song, Z. (2019). Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort). *Chemosphere*, 237, 124482. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.124482](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124482).
- Gill, S. S., Gill, R., Trivedi, D. K., Anjum, N. A., Sharma, K. K., Ansari, M. W., Ansari, A. A., Johri, A. K., Prasad, R., Pereira, E., Varma, A., & Tuteja, N. (2016). *Piriformospora indica*: Potential and significance in plant stress tolerance. *Frontiers in Microbiology*, 7, 332. doi: [10.3389/fmicb.2016.00332](https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00332).
- Gong, W., Zhang, W., Jiang, M., Li, S., Liang, G., Bu, Q., Xu, L., Zhy, H., & Lu, A. (2021). Species-dependent response of food crops to polystyrene nanoplastics and microplastics. *Science of the Total Environment*, 796, 148750. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.148750](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148750).
- He, D., Zhang, Y., & Gao, W. (2021). Micro (nano) plastic contaminations from soils to plants: Human food risks. *Current Opinion in Food Science*, 41, 116-121. doi: [10.1016/j.cofs.2021.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.001).
- Harman, G. E. (2011). Multifunctional fungal plant symbionts: new tools to enhance plant growth and productivity. *New Phytologist*, 189(3), 647-649. doi: [10.1111/j.1469-8137.2010.03614.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03614.x).
- Hartmann, G. F., Ricachenevsky, F. K., Silveira, N. M., & Pita-Barbosa, A. (2022). Phytotoxic effects of plastic pollution in crops: what is the size of the problem?. *Environmental Pollution*, 292, 118420. doi: [10.1016/j.envpol.2021.118420](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118420).
- Huang, Z., Zou, Z. R., Huang, H. H., He, C. X., Zhang, Z. B., Wang, H. S., & Li, J. M. (2010). Cloning, analysis and expression of a drought-related gene *MeP5CS* from melon. *Acta Horticulturae Sinica*, 37(8), 1279-1286.
- Hussin, S., Khalifa, W., Geissler, N., & Koyro, H. W. (2017). Influence of the root endophyte *Piriformospora indica* on the plant water relations, gas exchange and growth of *Chenopodium quinoa* at limited water availability. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 203(5), 373-384. doi: [10.1111/jac.12199](https://doi.org/10.1111/jac.12199).
- Jangir, P., Shekhawat, P. K., Bishnoi, A., Ram, H., & Soni, P. (2021). Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. *Physiological & Molecular Plant Pathology*, 116, 101691. doi: [10.1016/j.pmpp.2021.101691](https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101691).
- Jia, L., Liu, L., Zhang, Y., Fu, W., Liu, X., Wang, Q., Tanveer, M., & Huang, L. (2023). Microplastic stress in plants: Effects on plant growth and their remediations. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1226484. doi: [10.3389/fpls.2023.1226484](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226484).
- Jyothymol, C. P., Kutty, M. S., Pradeepkumar, T., Parvathi, M. S., & Rashmi, C. R. (2024). *Piriformospora indica* improves water stress tolerance in watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum & Nakai). *Plant Physiology Reports*, 29(3), 638-650. doi: [10.1007/s40502-024-00797-1](https://doi.org/10.1007/s40502-024-00797-1).
- Khalid, M., Ur-Rahman, S., Tan, H., Su, L., Zhou, P., & Hui, N. (2022). Mutualistic fungus *Piriformospora indica* modulates cadmium phytoremediation properties of host plant via concerted

- action of enzymatic and non-enzymatic biochemicals. *Pedosphere*, 32(2), 256-267. doi: [10.1016/S1002-0160\(21\)60014-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60014-0).
- Lian, J., Liu, W., Meng, L., Wu, J., Zeb, A., Cheng, L., Lian, Y., & Sun, H. (2021). Effects of microplastics derived from polymer-coated fertilizer on maize growth, rhizosphere, and soil properties. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128571. doi: [10.1016/j.jclepro.2021.128571](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128571).
- Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuair, F. M., Al-Mushhin, A. A., Hakami, O., Iqbal, M. F., Chen, F., Alamri, S., Hashem, M., & Noman, A. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 307, 135749. doi: [10.1016/j.chemosphere.2022.135749](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135749).
- Mohd, S., Shukla, J., Kushwaha, A. S., Mandrah, K., Shankar, J., Arjaria, N., Saxena, P. N., Narayan, R., Roy, S. K., & Kumar, M. (2017). Endophytic fungi *Piriformospora indica* mediated protection of host from arsenic toxicity. *Frontiers in Microbiology*, 8, 754. doi: [10.3389/fmicb.2017.00754](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00754).
- Pehlivan, N., & Gedik, K. (2021). Particle size-dependent biomolecular footprints of interactive microplastics in maize. *Environmental Pollution*, 277, 116772. doi: [10.1016/j.envpol.2021.116772](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116772).
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-161. doi: [10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3).
- Pignattelli, S., Broccoli, A., & Renzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Science of the Total Environment*, 727, 138609. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.138609](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609).
- Rai, M., Acharya, D., Singh, A., & Varma, A. (2001). Positive growth responses of the medicinal plants *Spilanthes calva* and *Withania somnifera* to inoculation by *Piriformospora indica* in a field trial. *Mycorrhiza*, 11, 123-128. doi: [10.1007/s005720100115](https://doi.org/10.1007/s005720100115).
- Swetha, S., & Padmavathi, T. (2020). Mitigation of drought stress by *Piriformospora indica* in *Solanum melongena* L. cultivars. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90(3), 585-593. doi: <https://doi.org/10.1007/s40011-019-01128-3>.
- Tyagi, J., Mishra, A., Kumari, S., Singh, S., Agarwal, H., Pudake, R. N., Varma, A., & Joshi, N. C. (2023). Deploying a microbial consortium of *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices*, and *Azotobacter chroococcum* to boost drought tolerance in maize. *Environmental & Experimental Botany*, 206, 105142. doi: [10.1016/j.envexpbot.2022.105142](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105142).
- Tyagi, J., Varma, A., & Pudake, R. N. (2017). Evaluation of comparative effects of arbuscular mycorrhiza (*Rhizophagus intraradices*) and endophyte (*Piriformospora indica*) association with finger millet (*Eleusine coracana*) under drought stress. *European Journal of Soil Biology*, 81, 1-10. doi: [10.1016/j.ejsobi.2017.05.007](https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.05.007).
- Xu, J., Guo, L., & Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental & Experimental Botany*, 201, 104974. doi: [10.1016/j.envexpbot.2022.104974](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104974).
- Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. doi: [10.1016/j.micres.2020.126626](https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626).