https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 3041-9603
Vol. 17, Issue 3, No. 65, 2025
Document Type: Research Paper
Received: 30/12/2025 Accepted: 10/02/2026

Effect of polyvinyl chloride microplastics and water deficit stress on leaf greenness and antioxidant activity of maize seedlings mediated by *Piriformospora indica*

Maryam Saman[1]*, Ali Sepehri [2]
[1] Department of Agriculture, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.
[2] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract
Given the increasing contamination of agricultural soils with microplastics and the concurrent rise in water scarcity, this study investigated the effects of symbiosis with Piriformospora indica on the physiological and biochemical parameters of maize seedlings exposed to polyvinyl chloride microplastics under water deficit stress. The experiment was carried out as a factorial based on a completely randomized design with three levels of microplastic (0, 0.1, and 1%), two levels of fungus (inoculation and non-inoculation), and three levels of water deficit stress (100, 75, and 50% of field capacity). The results showed that in plants exposed to 1% microplastic, the activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase increased significantly, similar to water deficit stress. The levels of hydrogen peroxide and malondialdehyde, as well as membrane damage, in maize seedlings exposed to stress, also increased compared to the control. Inoculation with the fungus improved antioxidant enzyme activity, such that the activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in inoculated plants under the highest water deficit stress and in the presence of 1% microplastic were (65.9 and 57.2), (47.1 and 40.2), and (61.3 and 69.3) percent higher than in non-inoculated plants, respectively. Furthermore, the presence of the fungus reduced malondialdehyde and hydrogen peroxide levels, as well as electrolyte leakage, in stressed plants. Overall, the results showed that *P. indica* improved the growth and dry matter production of maize seedlings exposed to microplastic particle toxicity and water deficit stress by enhancing antioxidant defence and increasing the leaf greenness index.

Keywords: Catalase, Endophytic fungus, Peroxidase, Superoxide dismutase, Water deficit stress,

*Corresponding Author: maryam.saman@pnu.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
doi: 10.22108/ijpb.2026.147945.1432

Introduction

In recent years, crop plants have been increasingly exposed to various environmental stresses and emerging contaminants, such as microplastics, which threaten their growth, yield, and overall agricultural sustainability (Illanese et al., 2025). Among abiotic stresses, water deficit stress is a major constraint that limits transpiration and CO_2 uptake through stomatal closure, thereby reducing biomass accumulation and productivity (Xu et al., 2022). Water deficit stress also triggers the excessive generation of reactive oxygen species (ROS), leading to oxidative stress, membrane damage, ion imbalance, and reduced photosynthetic efficiency (Zia et al., 2021). Simultaneously, contamination of agricultural soils with microplastics has become a growing global concern (Hasan & Tarannum, 2025). These particles can abrade root surfaces and disrupt water and nutrient uptake, ultimately inhibiting plant growth (Hartmann et al., 2022). Similar to drought, microplastic exposure induces ROS overproduction and oxidative stress, which compromise cellular integrity and metabolism (Gan et al., 2023). In this context, the utilization of beneficial plant–microbe interactions has gained increasing attention as an eco-friendly and effective strategy to alleviate the adverse effects of environmental stresses on plants (Boorboori et al., 2022). *Piriformospora indica*, a root endophytic fungus, is known for its ability to colonize a wide range of monocot and dicot plants (Jangir et al., 2021). Symbiosis between plants and *P. indica* enhances stress tolerance by activating the plant defence system, upregulating stress-related genes, and boosting antioxidant enzyme activity, thereby improving the plant's resilience to adverse environmental conditions (Li et al., 2023).

Considering the simultaneous occurrence of water deficit stress and microplastic contamination in agricultural ecosystems, it is essential to explore their combined impact on plant physiology. Therefore, this study investigates the influence of *P. indica* symbiosis on key physiological and biochemical traits of maize (*Zea mays*) seedlings exposed to polyvinyl chloride (PVC) microplastics under a water-deficit stress condition.

Materials and Methods

This experiment was conducted using a completely randomized factorial design with three replications in 2023 in the research greenhouse of Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. The experimental factors comprised polyvinyl chloride (PVC) microplastics at three levels (0, 0.1, and 1% of soil weight), Piriformospora indica inoculation at two levels (inoculated and non-inoculated), and water deficit stress at three levels (no stress, moderate, and severe stress, respectively, equivalent to irrigation at 100, 75, and 50% of field capacity). Water deficit stress was initiated 14 days after sowing. Thirty days after sowing, the leaf chlorophyll content (SPAD index) was measured. Fresh leaf samples were collected for biochemical analyses, while shoot and root samples were oven-dried to determine dry biomass. To evaluate root colonization by P. indica, 1-cm-long root segments were carefully washed, stained, and observed under a light microscope to calculate the percentage of colonization. Antioxidant enzyme activities, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD), as well as malondialdehyde (MDA) content and electrolyte leakage, were determined using fresh leaf samples.

Data were statistically analyzed using SAS software (version 9.4) after confirming the normality of residuals. Treatment means were compared using the least significant difference (LSD) test at a 5% probability level. Graphs were prepared using Microsoft Excel.

Results and Discussion

The results demonstrated that *P. indica* fungus successfully colonized plant roots under all experimental conditions. In unstressed plants, the root colonization rate was 89%, whereas in plants exposed to 50% field capacity and 1% microplastic contamination, it was approximately 40%. Stress induced by PVC microplastic particles and reduced soil moisture led to higher hydrogen peroxide accumulation and membrane damage in maize seedlings, resulting in a decline in leaf greenness and overall growth. Inoculation with *P. indica* significantly enhanced the activity of antioxidant enzymes, including SOD, CAT, and POD. This enhanced enzymatic activity reflects the protective role of *P. indica* in mitigating oxidative stress, as evidenced by reduced malondialdehyde and hydrogen peroxide contents and lower electrolyte leakage in inoculated plants under stress. Moreover, symbiosis with *P. indica* contributed to chlorophyll preservation, higher leaf

greenness, and greater biomass accumulation. For example, the dry weight of inoculated plants under severe water deficit and 1% microplastic stress was on average 45.8% higher than that of uninoculated controls. Overall, these findings suggest that the symbiotic association between *P. indica* and crop plants can serve as an effective biological strategy to alleviate the adverse effects of microplastic toxicity and improve plant resilience and productivity under water-deficit conditions.

علوم زیستی گیاهی، سال هفدهم، شمارهٔ پیاپی شصت و پنجم، ۱۴۰۴، صفحهٔ ۸۹- ۱۰۸
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹
تاریخ بررسی مجدد: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
مقاله پژوهشی

تأثیر میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید و تنش کمبود آب بر سبزینگی برگ و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاهچه‌های ذرت تحت تأثیر قارچ *Piriformospora indica*

مریم ثمن [۱*]، علی سپهری [۲]

[۱] گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

با توجه به افزایش آلودگی خاک‌های کشاورزی به میکروپلاستیک‌ها و هم‌زمانی آن با کمبود آب، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر همزیستی قارچ *Piriformospora indica* بر برخی از شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های ذرت در حضور ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید طی تنش کمبود آب انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی در سه سطح میکروپلاستیک (۰، ۰/۱و ۱ درصد)، دو سطح قارچ (تلقیح و عدم‌تلقیح) و سه سطح تنش کمبود آب (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) اجرا شد. نتایج نشان دادند در گیاهان در معرض یک درصد میکروپلاستیک مشابه تنش کمبود آب، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید و نیز میزان آسیب غشایی گیاهچه‌های ذرت در معرض تنش نیز در مقایسه با شاهد افزایش نشان داد. از سوی دیگر، تلقیح گیاهان با قارچ منجر به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شد. به عبارت دیگر، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان تلقیح شده در معرض بالاترین سطح تنش کمبود آب و در حضور یک درصد میکروپلاستیک به ترتیب (۶۵/۹ و ۵۷/۲)، (۴۷/۱ و ۴۰/۲)، و (۶۱/۳ و ۶۹/۳) درصد بیشتر از گیاهان فاقد قارچ بود. علاوه بر این، حضور قارچ با کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن و نشت الکترولیت‌ها در گیاهان در معرض تنش همراه بود. در مجموع نتایج نشان دادند قارچ *P. indica* توسط تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش شاخص سبزینگی برگ سبب بهبود رشد و تولید ماده خشک گیاهچه‌های ذرت در معرض سمّیت ذرات میکروپلاستیک و تنش کمبود آب شد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، قارچ اندوفیت، کاتالاز

*Corresponding Author: maryam.saman@pnu.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
doi: 10.22108/ijpb.2026.147945.1432

مقدمه

امروزه گیاهان زراعی با انواع مختلفی از تنش‌های محیطی و همچنین آلاینده‌های نوظهور نظیر میکروپلاستیک‌ها مواجه هستند و این مسأله به‌طور فزاینده‌ای رشد، عملکرد و پایداری محصول‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده و امنیت غذایی را با تهدید روبه‌رو می‌سازد (Illanese et al., 2025). تنش کمبود آب یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که انتظار می‌رود شدّت آن به علّت گرمایش جهانی و کاهش منابع آب قابل دسترس در بسیاری از نواحی جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌طور چشم‌گیری افزایش یابد (Zia et al., 2021). بسته شدن روزنه‌ها طی تنش کمبود آب، سبب کاهش تعرق و محدود شدن جذب دی‌اکسید کربن شده و در نتیجه منجر به کاهش تولید ماده خشک و عملکرد گیاه می‌شود (Xu et al., 2022). علاوه بر این، تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و وقوع تنش اکسیداتیو سبب تخریب غشاهای سلولی، افزایش نشت الکترولیت‌ها، برهم خوردن تعادل یونی و کاهش بیشتر ظرفیت فتوسنتزی و رشد گیاه می‌شود (Zia et al., 2021).

طی چند دهه اخیر، ترکیبات پلاستیکی به علّت تنوع، دوام و مقرون به صرفه بودن به‌طور گسترده‌ای در جوامع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در نتیجه سالانه مقادیر انبوهی از زباله‌های پلاستیکی به محیط اضافه شده است. این موضوع سبب شده است تا امروزه آلودگی خاک‌های زراعی به ذرات پلاستیک به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در سطح جهان مورد توجه قرار گیرد(Hasan & Tarannum, 2025). حضور میکروپلاستیک‌ها (ذرات پلاستیکی با ابعاد ۱۰۰ نانومتر تا پنج میلی‌متر) در خاک می‌تواند با سایش سطح ریشه گیاهان همراه باشد. تجمع این ذرات در ناحیه کورتکس ریشه نیز با انسداد فضاهای بین میکروفیبریل‌های سلولی، فرآیند جذب آب و مواد غذایی را مختل کرده و در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Hartmann et al., 2022). مشابه تنش کمبود آب، یکی از مهم‌ترین اثرات فیزیولوژیکی ناشی از سمّیت ذرات میکروپلاستیک افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و وقوع تنش اکسیداتیو است (Gan et al., 2023). اگرچه سازوکارهای دقیق بروز تنش اکسیداتیو ناشی از ذرات پلاستیک هنوز به‌طور کامل روشن نشده است، امّا شواهد موجود بیانگر آن است که افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌تواند از چندین مسیر متفاوت ناشی شود که از جمله این مسیرها، می‌توان به آسیب فیزیکی سطح ریشه گیاه، بروز کمبود آب ناشی از تغییر در ساختار خاک و نیز اختلال در فرآیند فتوسنتز اشاره نمود (Hartmann et al., 2022). در طی تنش اکسیداتیو، ساختار لیپیدی غشاءها آسیب دیده و انسجام غشاهای سلولی برهم‌می‌خورد. در چنین شرایطی سطح ترکیباتی نظیر مالون‌دی‌آلدئید که به‌عنوان نشان‌گر تنش شناخته می‌شود افزایش می‌یابد (Hasan & Tarannum, 2025). علاوه بر این، ساختار ماکرومولکول‌های مهمی نظیر پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک دچار تخریب می‌شود که در نهایت اختلال در عملکرد اندامک‌های سلولی و برهم خوردن تعادل متابولیکی گیاه را به همراه دارد (Hartmann et al., 2022; Wang et al., 2022). امروزه یکی از راهکارهای مورد توجه برای کاهش تأثیر منفی شرایط نامساعد محیطی بر گیاهان بهره‌گیری از رابطه همزیستی بین گیاهان و برخی از ریز جانداران مفید است (Boorboori & Zhang, 2022). قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* از جمله این ریز جانداران است که سبب بهبود رشد، افزایش جذب عناصر غذایی و افزایش مقاومت گیاه میزبان در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. این قارچ که اخیراً با نام *Serendipita indica* شناخته می‌شود، به خانواده سباسیناسه Sebacinaceae تعلق دارد، قادر است انواع مختلفی از گیاهان تک لپه و دو لپه را کلونیزه نموده و اسپورهای گلابی‌شکل خود را در ناحیه کورتکس ریشه تشکیل دهد (Jangir et al., 2021). همزیستی گیاه با قارچ *P. indica* توسط تحریک سیستم دفاعی و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تنش، منجر به افزایش سطح فعالیت

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز (POD) و کاتالاز (CAT) می‌شود و به این ترتیب تحمل گیاه در برابر تنش‌ها را افزایش می‌دهد (Li et al., 2023). با توجه به گسترش روز افزون آلودگی خاک‌های کشاورزی به میکروپلاستیک‌ها و هم‌زمانی آن با بروز تنش‌های غیر زیستی نظیر کمبود آب، بررسی تأثیر این شرایط بر رشد و کارایی فیزیولوژیکی گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر همزیستی قارچ *P. indica* بر برخی از شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های ذرت (*Zea mays*) در حضور ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) طی تنش کمبود آب می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۲ در قالب طرح کامل تصادفی و به‌صورت فاکتوریل در سه تکرار، در گلخانه و آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید در سه سطح (۰، ۰/۱ و ۱ درصد وزنی خاک)، قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح) و تنش کمبود آب در سه سطح (بدون تنش، تنش متوسط و شدید به ترتیب معادل آبیاری در حد ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) بودند. اندازه ذرات میکروپلاستیک حدود ۷۵ میکرومتر بود و از شرکت ال جی کمیکال (LG Chem PVC PB-1202) تهیه شد. جهت حذف اثرات ناخواسته ناشی از ریزجانداران موجود در خاک، خاک مورد استفاده طی دو نوبت و هر بار به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد توسط اتوکلاو استریل شد. برای آلوده نمودن خاک به ذرات میکروپلاستیک ابتدا مقدار میکروپلاستیک مورد نیاز برای هر گلدان (با ظرفیت سه کیلوگرم خاک) با حجمی از آب که خاک را به نقطه ظرفیت زراعی می‌رساند مخلوط و سپس به خاک اضافه شد. جدایه اولیه قارچ *P. indica* از گروه گیاهپزشکی دانشکده کشاورزی تهیه و در محیط PDA تکثیر شد. پس از تهیه سوسپانسیون اسپور با غلظت ۵×۱۰^{۵} اسپور در میلی لیتر حاوی ۰/۰۲ درصد توئین (Dabral et al., 2019) بذور جوانه زده ذرت رقم طه (تهیه شده از بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج) در آن غوطه ور شده و به مدت چهار ساعت بر روی شیکر با سرعت چرخش ۵۰ دور در دقیقه قرار گرفتند (Mohd et al., 2017) و سپس کشت انجام گرفت. لازم به ذکر است که پیش از کاشت نیز حدود ۱۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون قارچ در محل استقرار هر بذر به خاک افزوده شد. در هر گلدان ۱۲ بذر کشت شد و پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها، تعداد بوته‌ها در مرحله دو تا سه برگی به ۷ بوته کاهش یافت. گلدان‌ها در گلخانه با دمای ۲± ۲۲/۳۲ درجه سانتی‌گراد (روز/شب) قرار گرفتند. برای تأمین نیاز نوری گیاهان، یک دوره روشنایی ۱۲ ساعته در نظر گرفته شد و کمبود نور طبیعی با بهره‌گیری از ترکیبی از لامپ‌های بخار سدیم و فلورسنت جبران شد. همچنین تنش کمبود آب ۱۴ روز پس از کاشت اعمال شد. بدین منظور برای تعیین ظرفیت زراعی خاک مورد استفاده، خاک یک گلدان به‌مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شد و سپس وزن آن اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، با افزودن تدریجی آب به خاک خشک‌شده، خاک به حالت اشباع رسید. پس از خروج کامل آب ثقلی، گلدان توزین شد. با کسر وزن گلدان و خاک خشک از وزن نهایی، میزان آب نگهداری‌شده در ظرفیت زراعی محاسبه شد. بر این اساس، سطوح مختلف تنش کمبود آب با توزین روزانه گلدان‌ها و جبران آب ازدست‌رفته ناشی از تبخیر و تعرق اعمال شد.

۳۰ روز پس از کاشت شاخص سبزینگی برگ توسط کلروفیل‌سنج دستی مدل SPAD-502 (Minolta, Japan) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، در هر گلدان از بخش میانی پهنک جدیدترین برگ کاملاً توسعه‌یافته و برگ ۳۰ یادداشت قبل از آن ثبت شد و میانگین داده‌ها به‌عنوان

شاخص سبزینگی برگ گزارش شد، سپس گیاهان از سطح خاک برداشت شدند. پس از جداسازی نمونه‌های برگی تازه، بخش‌های هوایی جهت تعیین وزن خشک به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نمونه‌های برگی مورد استفاده برای سنجش فاکتورهای بیوشیمیایی در نیتروژن مایع نگهداری شدند. ریشه گیاهان نیز پس از جداسازی از خاک، شستشو و حذف ذرات خارجی در آون خشک شد. همچنین جهت بررسی همزیستی قارچ *P. indica* با ریشه گیاه و محاسبه درصد کلونیزاسیون، بلافاصله پس از جداسازی ریشه‌ها از خاک و شستشو، قطعاتی به طول ۱ سانتی‌متر از ریشه‌ها تهیه و بر اساس روش Phillips & Hayman (1970) رنگ‌آمیزی شدند. در ادامه، نمونه‌های رنگ‌آمیزی‌شده زیر میکروسکوپ نوری مورد مشاهده قرار گرفتند و حضور ساختارهای قارچی شامل هیف و کلامیدوسپورها ثبت شدند. درصد کلونیزاسیون ریشه بر مبنای رابطه ارائه‌شده توسط Rai et al. (2001) محاسبه شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بر اساس روش Beauchamp & Fridovich (1971) و براساس مهار احیای نیتروبلو تترازولیوم (NBT) صورت گرفت و جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر ثبت شد. یک واحد فعالیت آنزیمی به‌عنوان مقدار آنزیمی تعریف شد که ۵۰ درصد کاهش در احیای NBT نسبت به شاهد ایجاد کند. فعالیت آنزیم کاتالاز به روش Aebi (1984) و بر پایه تجزیه پراکسید هیدروژن اندازه‌گیری شد. تغییر جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر پایش و نتایج به‌صورت واحد آنزیم (یک میکرومول پراکسید هیدروژن تجزیه‌شده در دقیقه) بر گرم وزن تر برگ بیان شد. فعالیت آنزیم پراکسیداز بر اساس روش Sanchez et al. (1995) توسط اکسیداسیون گایاکول و ثبت تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر طی یک دقیقه اندازه‌گیری شد. مقدار مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدی با روش Heath & Packer (1968) تعیین شد. برای این منظور، نمونه‌های برگی پس از استخراج با اسید تری‌کلرواستیک و واکنش با تیوباربیتوریک اسید حرارت داده شدند و جذب محلول در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت، قطعات کوچک و با وزن یکسان از بافت تازه برگ تهیه و به مدت دو ساعت در آب مقطر در دمای اتاق نگهداری شدند و سپس هدایت الکتریکی محلول اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌ها به‌مدت دو ساعت در حمام آبی با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از سرد شدن، هدایت الکتریکی نهایی ثبت و درصد نشت الکترولیت براساس نسبت هدایت الکتریکی اولیه به هدایت الکتریکی نهایی محاسبه شد (Dionisio-Sese & Tobita, 1998). داده‌های به‌دست‌آمده (پس از اطمینان از نرمال بودن باقی‌مانده‌ها) توسط نرم‌افزار SAS-9.4 مورد تجزیه آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین تیمارها بر اساس آزمون LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها نشان دادند در همه تیمارهای مورد بررسی کلامیدوسپورها و هیف‌های قارچ *P. indica* در بافت ریشه گیاهان تلقیح شده به خوبی قابل مشاهده بود. درصد کلونیزاسیون ریشه در گیاهان شاهد (بدون تنش) معادل ۸۹ درصد بود و در گیاهان در معرض ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی و در حضور یک درصد میکروپلاستیک مقدار آن به حدود ۴۰ درصد رسید. تداوم کلونیزاسیون در این شرایط حاکی ار آن است که قارچ *P. indica* حتی در شرایط نامساعد رطوبتی و آلودگی میکروپلاستیک توانایی ایجاد رابطه همزیستی مؤثر با ریشه گیاه ذرت را دارد و از سازگاری فیزیولوژیکی قابل توجهی در مواجهه با این‌گونه تنش‌های محیطی برخوردار است.

آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز گیاهچه‌های ذرت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بر هم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان در معرض ۱ درصد میکروپلاستیک به‌طور متوسط ۱۳ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (جدول ۲). همچنین حضور قارچ *P. indica* نیز سطح فعالیت این آنزیم را افزایش داد. به عبارت دیگر، در گیاهان تلقیح شده در معرض ۰، ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب ۷۰/۹، ۸۸/۹ و ۵۷/۲ درصد بیشتر از گیاهان فاقد قارچ بود (جدول ۲). بررسی بر هم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (جدول ۳) نشان دادند با کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به‌طور متوسط و به ترتیب ۱۴/۹ و ۳۱/۴ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، در کلیه سطوح رطوبت خاک فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان تلقیح شده بیشتر از گیاهان فاقد قارچ بود (جدول ۳). افزایش فعالیت این آنزیم بر اثر سمیت ناشی از ذرات میکروپلاستیک در گیاهچه‌های برنج نیز گزارش شده است (Iqbal et al., 2024). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مهم‌ترین سد دفاعی آنتی‌اکسیدانی سلول محسوب می‌شود که ترکیب واکنش‌پذیر و سمی سوپراکسید را به اکسیژن مولکولی و پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند و بدین ترتیب در حفاظت از سلول در برابر تنش اکسیداتیو نقش کلیدی دارد (Martin et al., 2023). مشابه یافته‌های پژوهش حاضر، در گیاهچه‌های برنج در معرض آرسنیک نیز همزیستی با قارچ *P. indica* با افزایش سطح فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز همراه بود (Shukla et al., 2023). پژوهش Li et al. (2021) نشان داده است که قارچ *P. indica* با القای بیان ژن *CSD1C*، که مسئول سنتز سوپراکسید دیسموتاز سیتوپلاسمی نوع روی/مس است، سبب تقویت فعالیت این آنزیم در گیاهان همزیست و کاهش آسیب اکسیداتیو می‌شود.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (SOD، CAT و POD)، محتوای پراکسید هیدروژن، محتوای مالون دی‌آلدئید، درصد نشت الکترولیت‌ها، شاخص سبزینگی برگ و ماده خشک کل گیاهچه‌های ذرت

Table 1- Analysis of variance of the effect of *P. indica*, microplastic and soil water content on activity of antioxidant enzymes (SOD, CAT and POD), hydrogen peroxide content (H_2O_2), malondialdehyde content (MDA), percent of electrolyte leakage (EL), leaf greenness index (SPAD) and total dry weight (T. D.W.) of maize seedlings.

Source of Variation	df	Mean of squares							
		SOD	CAT	POD	H_2O_2	MDA	EL	SPAD	T.D.W.
P. indica (P)	1	7312.4**	0.3901**	3469.9**	775.5**	76.4**	1150.4**	118.6**	8.1**
Microplastic (M)	2	199.6**	0.0105**	43.7**	374.7**	36.7**	553.9**	90.8**	1.8**
Soil Water Content (D)	2	660.0**	0.0333**	105.0**	2010.4**	197.6**	2976.2**	259.0**	14.0**
P×M	2	26.7*	0.0014*	9.1*	6.8*	0.6*	10.1*	5.8*	0.19**
P×D	2	21.6*	0.0012*	10.1*	66.1**	6.5**	98.2**	19.7**	1.0**
M×D	4	12.6$^{n.s.}$	0.0007$^{n.s.}$	1.2$^{n.s.}$	4.7$^{n.s.}$	0.4$^{n.s.}$	6.9$^{n.s.}$	1.9$^{n.s.}$	0.06$^{n.s.}$
P×M×D	4	0.7$^{n.s.}$	0.00005$^{n.s.}$	1.4$^{n.s.}$	2.7$^{n.s.}$	0.2$^{n.s.}$	4.0$^{n.s.}$	1.0$^{n.s.}$	0.01$^{n.s.}$
Error	36	6.3	0.0003	2.9	1.9	0.2	3.0	1.8	0.02
Cv (%)		5.6	4.4	6.0	6.5	6.6	6.8	4.0	9.5

$^{n.s.}$، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

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

جدول ۲- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ P. indica و میکروپلاستیک بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD)

Table 2. Comparison of means of *P. indica* and microplastice interaction on activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD).

P. indica	Microplastic (%)	SOD (Ug^{-1} FW)	CAT (Ug^{-1} FW)	POD (Ug^{-1} FW)
Absence of Fungus	0	31.45[d]	0.343[d]	19.99[d]
	0.1	29.27[d]	0.328[d]	18.36[d]
	1	37.48[c]	0.388[c]	22.29[c]
Presence of fungus	0	53.77[b]	0.507[b]	34.97[b]
	0.1	55.32[b]	0.518[b]	36.01[b]
	1	58.94[a]	0.544[a]	37.75[a]
LSD		2.41	0.018	1.63

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

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

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ *P. indica* و درصد رطوبت خاک بر بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD)

Table 3. Comparison of means of *P. indica* and soil water content interaction on activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD).

P. indica	soil water content (%)	SOD (Ug^{-1} FW)	CAT (Ug^{-1} FW)	POD (Ug^{-1} FW)
Absence of Fungus	100	28.01[f]	0.320[f]	17.16[e]
	75	32.19[e]	0.351[e]	20.01[d]
	50	38.00[d]	0.390[d]	23.47[c]
Presence of fungus	100	48.84[c]	0.472[c]	34.54[b]
	75	56.14[b]	0.524[b]	36.32[a]
	50	63.05[a]	0.574[a]	37.88[a]
LSD		2.41	0.018	1.63

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

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

آنزیم کاتالاز

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود از لحاظ آماری تأثیر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح یک درصد و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک به همراه برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهان در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک تفاوت معنی‌داری با گیاهان شاهد نداشتف اما افزودن یک درصد

میکروپلاستیک به خاک با افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم همراه بود (جدول ۲). حضور قارچ همزیست به‌طور معنی‌داری موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در تمامی سطوح میکروپلاستیک شد؛ به‌گونه‌ای که در غلظت‌های ۰، ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک، فعالیت این آنزیم در گیاهان تلقیح‌شده به ترتیب ۴۷/۸، ۵۷/۹ و ۴۰/۲ درصد نسبت به گیاهان بدون قارچ افزایش نشان داد (جدول ۲). بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهان درشرایط رطوبتی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب و به‌طور میانگین ۱۰/۳ و ۲۱/۷ درصد بیشتر از گیاهان بدون تنش رطوبتی بود. همچنین در تمامی سطوح رطوبتی خاک، همزیستی با قارچ *P. indica* فعالیت آنزیم کاتالاز را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۳). فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های کاهو (Gao et al., 2019) و شاهی (Pflugmacher et al., 2021) نیز طی تنش حاصل از ذرات میکروپلاستیک افزایش یافته است. همچنین تأثیر مثبت همزیستی با قارچ *P. indica* بر فعالیت این آنزیم نتایج مشابهی توسط Tsai et al. (2020) در گیاهچه‌های ذرت گزارش شده است. القای بیان ژن کاتالاز در گیاهان همزیست با قارچ‌های اندوفیت از جمله عوامل موثر بر افزایش فعالیت این آنزیم در گیاهان تلقیح شده است (Shahabivand et al., 2016).

آنزیم پراکسیداز

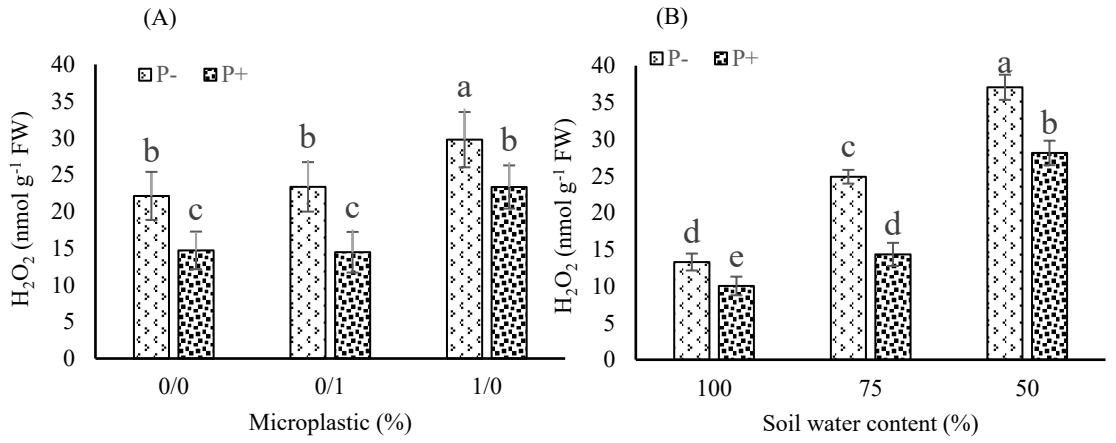
علاوه بر اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک که در سطح یک درصد بر فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار بود، برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). همچنین نتایج جدول ۲ نشان دادند میزان فعالیت این آنزیم در گیاهان فاقد میکروپلاستیک به‌طور متوسط برابر با ۲۷/۴ واحد در گرم برگ تازه بود، در حالی‌که در گیاهان در معرض ۱ درصد میکروپلاستیک به ۳۰ واحد در گرم برگ تازه رسید. حضور قارچ *P. indica* نیز سبب افزایش فعالیت این آنزیم گردید، به‌گونه‌ای که در کلیه سطوح میکروپلاستیک فعالیت این آنزیم در گیاهان تلقیح شده به‌طور معنی‌داری بیش از گیاهان بدون قارچ بود (جدول ۲). بررسی برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (جدول ۳) نشان دادند کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌طور میانگین سبب افزایش ۸/۹ و ۱۸/۶ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز شد. علاوه بر این، فعالیت این آنزیم در گیاهان همزیست با قارچ *P. indica* در شرایط رطوبتی بدون تنش، تنش متوسط و تنش شدید به ترتیب ۵۰/۳، ۸۱/۵ و ۶۱/۳ درصد بیشتر از گیاهان بدون قارچ بود (جدول ۳).

در پژوهش Wang et al. (2025) و Khan et al. (2024) نیز فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاهچه‌های *Astragalus sinicus* و برنج در معرض سمیت ذرات میکروپلاستیک افزایش یافت. طی تنش ناشی از میکروپلاستیک‌ها، تولید گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان افزایش می‌یابد که این امر برای ساختار سلولی گیاه مضر است. در این شرایط، نقش اصلی آنزیم پراکسیداز تسریع اکسیداسیون ترکیبات آلی توسط پراکسید هیدروژن است و بدین ترتیب می‌تواند با کاهش سطح H_2O_2 در بخش‌های مختلف گیاه به کاهش تنش اکسیداتیو و جلوگیری از آسیب به ساختارهای سلولی کمک نماید (Batool et al., 2025). همسو با نتایج پژوهش حاضر، همزیستی با قارچ *P. indica* در گیاه هندوانه در معرض تنش کمبود آب با افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز همراه بود (Jyothymol et al., 2024). مشخص شده است که این قارچ توسط افزایش بیان ژن مربوط به سنتز این آنزیم سبب افزایش مقاومت گیاهان همزیست نسبت به تنش اکسیداتیو و کمک به حفظ تعادل اکسایش- کاهش در این گیاهان می‌شود (Su et al., 2021).

محتوای پراکسید هیدروژن

بر اساس نتایج جدول ۲ ، تأثیر سطوح مختلف قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر محتوای پراکسید

هیدروژن گیاهچه‌های ذرت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین، برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک در سطح یک درصد معنی‌دار شد. نتایج ارائه شده در شکل ۱. A نشان دادند افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک به‌طور متوسط سطح پراکسید هیدروژن گیاهان را در مقایسه با شاهد به میزان ۴۴/۲ درصد افزایش داد. در مقابل، تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* به‌طور معنی‌داری سبب کاهش این ترکیب شد؛ به‌گونه‌ای که در غلظت‌های ۰، ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک، محتوای پراکسید هیدروژن در گیاهان همزیست با قارچ به‌ترتیب ۳۳/۴، ۳۸/۰ و ۲۱/۶ درصد کمتر از گیاهان فاقد قارچ بود. همان‌گونه که در شکل ۱. Bمشخص است کاهش رطوبت خاک سبب افزایش تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهان شد. در شرایط بدون تنش، محتوای پراکسید هیدروژن گیاهان برابر با ۱۱/۶ نانومول در گرم برگ تازه بود، در حالی‌که محتوای این ترکیب در شرایط رطوبتی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به ترتیب و به‌طور میانگین به ۱۹/۶ و ۳۲/۵ نانومول در گرم برگ تازه افزایش یافت. همچنین، نتایج نشان داد که در تمامی سطوح رطوبتی، حضور قارچ *P. indica* به‌طور معنی‌داری سبب کاهش محتوای پراکسید هیدروژن در گیاهان در معرض سمیت ذرات میکروپلاستیک توسط Gao et al. (2019) در کاهو و Ma et al. (2022) درگیاه برنج نیز گزارش شده است. در ارتباط با تأثیر قارچ‌های اندوفیت بر کاهش محتوای پراکسید هیدروژن نتایج مشابهی توسط Ma et al. (2019) در گیاهچه‌های برنج در معرض کادمیوم به‌دست آمده است. به نظر می‌رسد کاهش محتوای پراکسید هیدروژن در گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* می‌تواند به علّت افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های موثر در تجزیه آن نظیر کاتالاز و پراکسیداز (جدول ۲ و ۳) باشد.



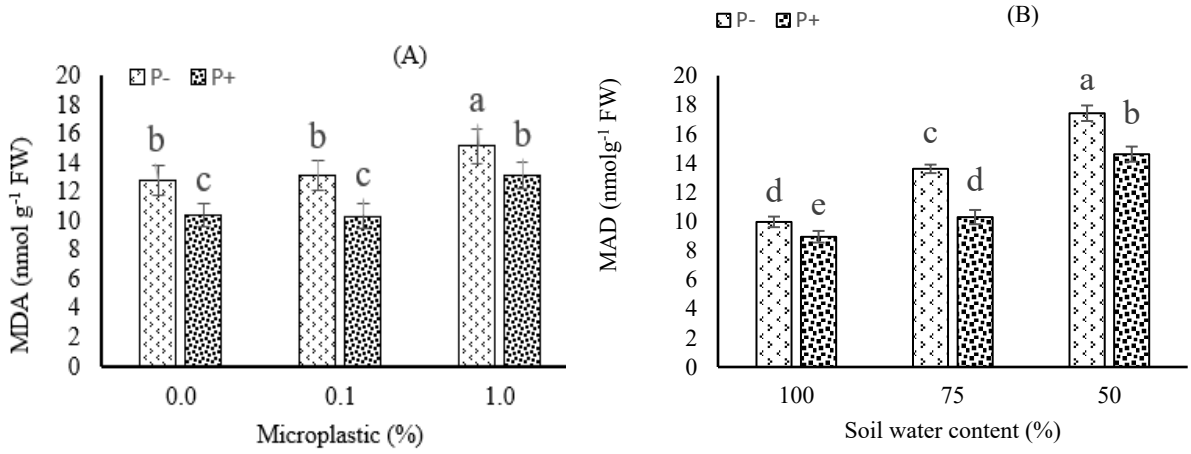
شکل ۱- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر محتوای پراکسید هیدروژن. (+P): گیاهان تلقیح شده، (-P): گیاهان فاقد قارچ.

Figure 3- Comparison of means of *P. indica* and microplastice (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on hydrogen peroxide content. (P+): inoculated plants, (P-): non-inoculated plants.

محتوای مالون‌دی‌آلدئید

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، اختلاف بین محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهچه‌های ذرت در سطوح مختلف قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز

در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). افزودن ۰/۱ درصد میکروپلاستیک به خاک تأثیر معنی‌داری بر محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهچه‌های ذرت نداشت، امّا محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهچه‌های در معرض ۱ درصد میکروپلاستیک به‌طور متوسط ۲۲/۰ درصد بیشتر از گیاهچه‌های شاهد بود. در همه سطوح میکروپلاستیک، تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* سبب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید شد (شکل ۲. A). بررسی برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (شکل ۲. B) نشان دادند کاهش محتوای رطوبت خاک محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهان روندی افزایش داشته است، به‌گونه‌ای که محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهان بدون تنش به‌طور متوسط ۹/۴ نانومول در گرم برگ تازه بود در حالی در گیاهان تحت تنش رطوبتی متوسط و شدید محتوای این ترکیب به ترتیب به ۱۱/۹ و ۱۶/۰ نانومول در گرم برگ تازه افزایش یافت. شکل ۲. B نشان داد محتوای مالون‌دی‌آلدئید گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* در کلیه سطوح رطوبت خاک به‌طور معنی‌داری کمتر از گیاهان فاقد قارچ بود. افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدئید در گیاهان در معرض ذرات میکروپلاستیک توسط Ma et el. (2022) در برنج و Sajjad et al. (2025) در ذرت و گندم نیز گزارش شده است. هنگامی که پیوندهای دوگانه موجود در اسیدهای چرب چندغیراشباعی فسفولیپیدهای غشایی تحت حمله بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن قرار گیرند، فرآیند پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء آغاز شده و در نتیجه، مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان یکی از محصولات نهایی این واکنش تولید می‌شود (Farmer & Mueller, 2013). در ارتباط با تأثیر همزیستی با قارچ *P. indica* بر کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید نتایج مشابهی در گیاهچه‌های برنج در معرض کادمیوم (Ma et al., 2019) و ذرت در معرض تنش کمبود آب (Tsai et al., 2020) وجود دارد. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۲ و ۳) و کاهش پراکسید هیدروژن (شکل ۱) از جمله دلایل کاهش مالون‌دی‌آلدئید در گیاهان تلقیح‌شده با *P. indica* محسوب می‌شود.

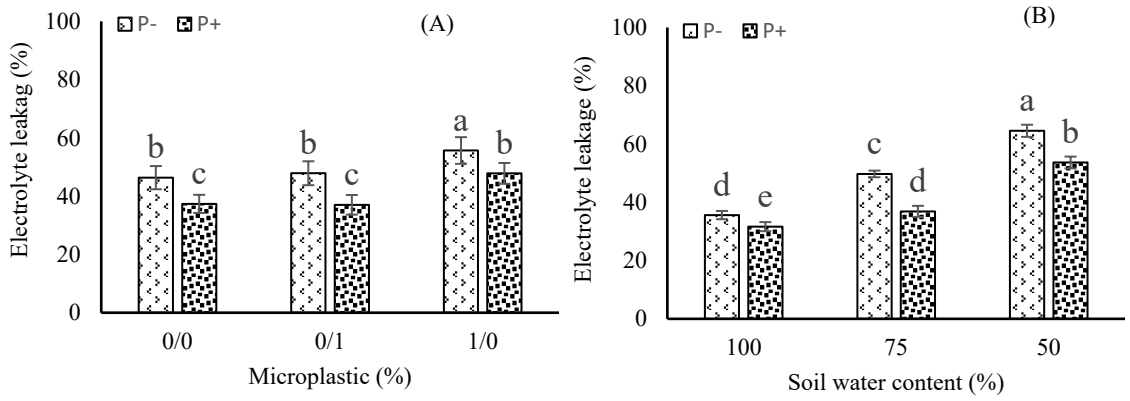


شکل ۲- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر محتوای مالون‌دی‌آلدئید. (+P): گیاهان تلقیح شده، (-P): گیاهان فاقد قارچ.

Figure 3- Comparison of means of *P. indica* and microplastice (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on malondialdehyde content. (P+): inoculated plants, (P-): non-inoculated plants.

نشت الکترولیت‌ها

نتایج جدول ۲ نشان دادند از لحاظ آماری تأثیر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک بر میزان نشت الکترولیت گیاهچه‌های ذرت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بر هم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد. همان‌گونه که در شکل ۳. A مشخص است، بیشترین مقدار نشت الکترولیت در گیاهچه‌های ذرت فاقد قارچ در معرض یک درصد میکروپلاستیک (معادل ۵۵/۶ درصد) به‌دست آمد. علاوه بر این، شکل ۳. A نشان می‌دهد که در همه سطح میکروپلاستیک تلقیح گیاهچه‌ها با قارچ *P. indica* با کاهش معنی‌دار میزان نشت الکترولیت همراه بود. بررسی بر هم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (شکل ۳. B) نشان دادند با افزایش شدت تنش کمبود آب میزان نشت الکترولیت نیز افزایش یافت و این افزایش در گیاهان تلقیح شده کمتر بود، به‌گونه‌ای که کمترین مقدار نشت الکترولیت در گیاهچه‌های تلقیح شده بدون تنش (معادل ۳۱/۶ درصد) و بیشترین آن در گیاهچه‌های فاقد قارچ در معرض ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی (معادل ۶۴/۵ درصد) حاصل شد. افزایش میزان نشت الکترولیت بر اثر سمیت ناشی از ذرات میکروپلاستیک در گیاهچه‌های ذرت توسط Irshad et al. (2025) نیز گزارش شده است. میزان نشت الکترولیت به‌طور غیرمستقیم میزان یکپارچگی غشای سلولی در شرایط تنش را مشخص می‌کند و افزایش آن نشان‌دهنده کاهش پایداری غشاء و خروج یون پتاسیم از سلول است که می‌تواند فرآیندهای حیاتی گیاه مانند فتوسنتز و تعادل یونی را مختل سازد (Parkash et al., 2020). تأثیر مثبت همزیستی با قارچ *P. indica* بر کاهش میزان نشت الکترولیت در گیاهچه‌های ارزن انگشتی در معرض خشکی نیز مشاهده شده است (Tyagi et al., 2017).



شکل ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر درصد نشت الکترولیت. (P+): گیاهان تلقیح شده، (P-): گیاهان فاقد قارچ.

Figure 3- Comparison of means of *P. indica* and microplastice (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on electrolyte leakage percent. (P+): inoculated plants, (P-): non-inoculated plants.

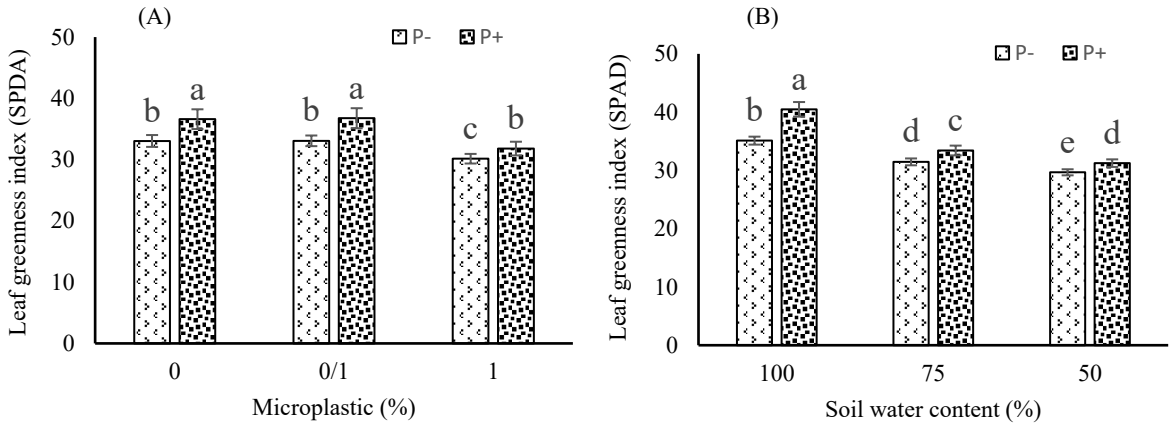
شاخص سبزینگی برگ (SPAD)

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از لحاظ آماری اثر قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک به همراه برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک در سطح یک درصد و برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد بر شاخص سبزینگی برگ معنی‌دار بود. بررسی بر هم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (شکل ۴.A) نشان دادند افزودن ۰/۱ درصد میکروپلاستیک به خاک تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت، امّا شاخص سبزینگی برگ گیاهان در معرض یک درصد میکروپلاستیک به‌طور متوسط ۰/۱۱

درصد کمتر از گیاهان شاهد بود. همچنین نتایج نشان داد که در کلیه سطوح میکروپلاستیک شاخص سبزینگی برگ گیاهان تلقیح شده بیشتر از گیاهان فاقد قارچ بود (شکل ۴.A). همان‌گونه که در شکل ۴ B مشخص است شاخص سبزینگی برگ در گیاهان بدون تنش رطوبتی به‌طور میانگین ۳۷/۷ بود . از سوی دیگر، این مقدار در گیاهان در معرض ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی به ترتیب به ۳۲/۴ و ۳۰/۴ کاهش یافت. به عبارت دیگر، تأثیر مثبت همزیستی با قارچ *P. indica* در کلیه سطوح رطوبت خاک مشهود بود، به‌گونه‌ای که شاخص سبزینگی در گیاهان فاقد قارچ تحت شرایط بدون تنش رطوبتی، تنش متوسط و تنش شدید به ترتیب ۳۵/۱، ۳۱/۴ و ۲۹/۶ مشاهده شد، با این وجود، در گیاهان تلقیح شده این مقادیر به ترتیب به ۴۰/۴، ۳۳/۴ و ۳۱/۵ افزایش یافت (شکل ۴ B).

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل کل توسط دستگاه‌های کلروفیل‌سنج مانند SPAD-502 روشی کارآمد، غیرمخرب و کم‌هزینه است که امکان ارائه مقادیر دقیق کلروفیل به ازای واحد سطح برگ را فراهم می‌کند (Shah et al., 2017).

همچنین کاهش شاخص سبزینگی برگ طی سمیت ناشی از ذرات میکروپلاستیک در پژوهش Khan et al. (2024) در گیاهچه‌های برنج گزارش شده است. وقوع تنش اکسیداتیو، فعالیت بیشتر آنزیم کلروفیلاز، کاهش جذب عناصر غذایی و تغییر در تعادل یونی برگ که سبب اختلال در مسیر بیوسنتز این رنگدانه می‌شود که از جمله عوامل موثر بر کاهش محتوای کلروفیل در این شرایط است (Jia et al., 2023). تأثیر مثبت همزیستی با قارچ *P. indica* بر شاخص سبزینگی برگ در گیاهچه‌های مریم گلی در معرض تنش خشکی نیز مشاهده شده است (Aslani et al., 2023). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بر اثر همزیستی با قارچ (جدول‌های ۲ و ۳) و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان تلقیح شده در معرض تنش بر حفظ کلروفیل و بهبود شاخص سبزینگی برگ این دسته از گیاهان موثر است. علاوه بر این، افزایش بیان ژن‌های مرتبط با سنتز کلروفیل و نیز بهبود جذب عناصر غذایی از جمله سازوکارهای مطرح در ارتباط تأثیر مثبت قارچ *P. indica* بر محتوای کلروفیل گیاهان است (Aslam et al., 2019; Jangir et al., 2021).

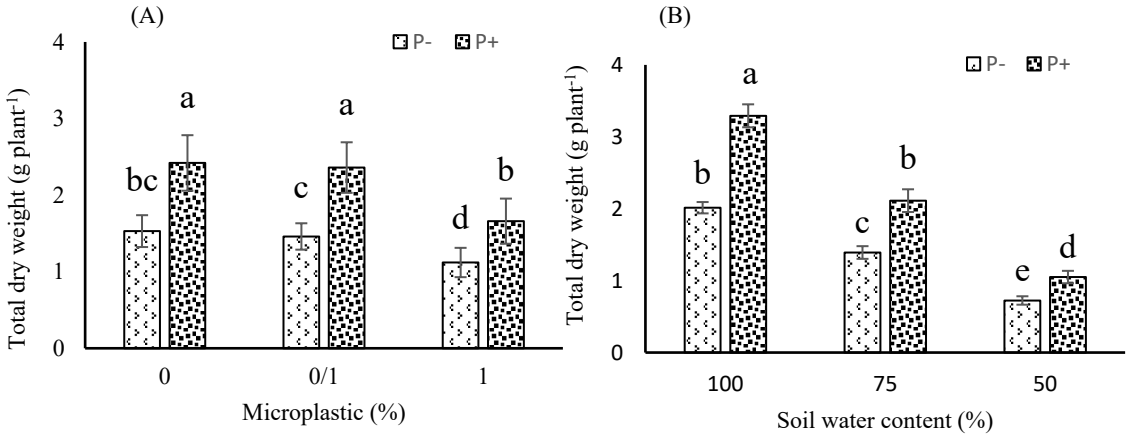


شکل ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر شاخص سبزینگی برگ. (+P): گیاهان تلقیح شده، (-P): گیاهان فاقد قارچ.

Figure 4- Comparison of means of *P. indica* and microplastice (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on leaf greenness index (SPAD). (P+): inoculated plants, (P-): non-inoculated plants.

ماده خشک کل

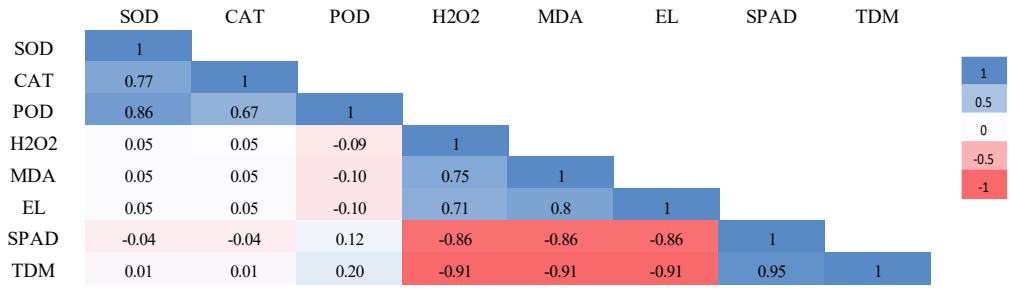
تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اختلاف بین ماده خشک گیاهچه‌های ذرت در سطوح مختلف قارچ، میکروپلاستیک و رطوبت خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین بر هم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک در سطح پنج درصد و برهم‌کنش قارچ و رطوبت خاک نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). همان‌گونه که در شکل ۵A مشخص است ماده خشک تولیدی گیاهان در معرض ۰/۱ درصد میکروپلاستیک تفاوت معنی‌داری با گیاهان شاهد نشان نداد، امّا افزودن یک درصد میکروپلاستیک به خاک ماده خشک تولیدی گیاهان را به‌طور متوسط ۲۹/۶ درصد کاهش داد. در کلیه سطوح میکروپلاستیک، حضور قارچ *P. indica* با افزایش معنی‌دار ماده خشک گیاهان همراه بود (شکل ۵A). از سوی دیگر، بررسی بر هم‌کنش قارچ و رطوبت خاک (شکل ۵B) نشان داد کاهش رطوبت خاک به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی سبب کاهش ۳۳/۹ و ۶۶/۷ درصدی ماده خشک گیاهان شد. حضور قارچ تأثیر منفی کاهش رطوبت خاک بر ماده خشک تولیدی گیاهان را تا حد زیادی کاهش داد. به عبارت دیگر، در گیاهان در معرض تنش متوسط و تنش شدید کمبود آب ماده خشک گیاهان تلقیح شده به ترتیب ۵۱/۷ و ۴۵/۸ درصد بیشتر از گیاهان غیر همزیست بود. تأثیر منفی ذرات میکروپلاستیک بر ماده خشک تولیدی در گیاهچه‌های *Astragalus sinicus* و شاهی نیز مشاهده شده است (Pflugmacher et al., 2021, Wang et al., 2025). کاهش جذب آب و عناصر غذایی به همراه افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تأثیر منفی آن بر ظرفیت فتوسنتزی گیاه از جمله دلایل اصلی این موضوع محسوب می‌شود (Jia et al., 2023). همچنین درباره بهبود رشد در حضور قارچ *P. indica* نتایج مشابهی در گیاهچه‌های برنج در معرض آرسنیک (Shukla et al., 2023) و گیاهچه‌های هندوانه طی تنش کمبود آب (Jyothymol et al., 2024) گزارش شده است. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که این قارچ توسط بهبود تعادل آبی گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی، تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و افزایش محتوای کلروفیل سبب افزایش ماده خشک تولیدی گیاهان می‌شود (Jangir et al., 2021; Li et al., 2023).



شکل ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ و میکروپلاستیک (A) و قارچ و رطوبت خاک (B) بر ماده خشک کل. (+P): گیاهان تلقیح شده، (-P): گیاهان فاقد قارچ.

Figure 5. Comparison of means of *P. indica* and microplastice (A) and *P. indica* and soil water content (B) interaction on total dry weight. (P+): inoculated plants, (P-): non-inoculated plants.

در یک جمع بندی کلی، همان‌گونه که در نمودار حرارتی همبستگی (شکل ۶) مشاهده می‌شود بین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز همبستگی مثبت و قوی وجود دارد که نشان‌دهنده فعالیت هماهنگ سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی گیاهچه‌های ذرت در شرایط تنش است. از سوی دیگر، همبستگی منفی نسبتاً زیاد بین شاخص‌های محتوای پراکسید هیدروژن، محتوای مالون‌دی‌آلدئید و میزان نشت الکترولیت‌ها با شاخص‌های مهم سبزینگی برگ و تولید ماده خشک کل حاکی ازآن است که تنش اکسیداتیو ناشی از تنش ترکیبی خشکی و میکروپلاستیک با افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به سیستم غشایی سبب کاهش کلروفیل واختلال در سیستم فتوسنتزی شده و در نهایت کاهش تولید ماده خشک گیاه را به همراه داشته است که این موضوع با گزارش Parkash et al. (2020) همخوانی دارد. بدیهی است که همبستگی مثبت و قوی مشاهده شده بین شاخص سبزینگی برگ و کل ماده خشک تولیدی بیان‌گر نقش کلیدی قابلیت سنتز و حفظ کلروفیل بر بهبود رشد گیاهچه‌های ذرت در حضور قارچ *P. indica* در این شرایط است.



شکل ۶- نمودار حرارتی همبستگی بین سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)، محتوای پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA)، نشت الکترولیت‌ها (EL)، شاخص سبزینگی برگ (SPAD) و ماده خشک کل (TDM) تحت تنش کمبود آب و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) در حضور قارچ *P. indica* در گیاهچه‌های ذرت

Figure 6- Correlation heatmap between superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), hydrogen peroxide content (H_2O_2), malondialdehyde content (MDA), electrolyte leakage (EL), leaf greenness index (SPAD) and total dry matter (TDM) under water deficit stress and polyvinyl chloride (PVC) microplastic stress in the presence of P. *indica* in maize seedlings.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش ناشی از حضور ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید و کمبود رطوبت خاک با افزایش سطح پراکسید هیدروژن و آسیب غشایی گیاهچه‌های ذرت همراه بوده و سبب کاهش شاخص سبزینگی برگ و در نهایت کاهش رشد گیاهچه‌های ذرت شده است. تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز را افزایش داد. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش کلیدی در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن ایفا کرده و به‌عنوان شاخص اساسی کارآمدی سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه در شرایط تنش شناخته می‌شوند. بنابراین، افزایش سطح فعالیت این آنزیم‌ها بر اثر همزیستی با قارچ *P. indica* نشان‌دهنده نقش مهم حفاظتی این قارچ در افزایش تحمل گیاه در برابر تنش اکسیداتیو است. نتایج بدست آمده مبتنی بر کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن و نیز کاهش میزان نشت الکترولیت‌ها در گیاهچه‌های ذرت تلقیح شده در معرض تنش به‌خوبی نشان دهنده این موضوع است. همچنین علاوه بر بهبود کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، همزیستی با قارچ *P. indica* به حفظ کلروفیل و افزایش شاخص سبزینگی برگ نیز کمک نمود و در نهایت موجب افزایش ماده خشک گیاهان (حتی

در شرایط تنش رطوبتی شدید و غلظت یک درصد میکروپلاستیک) شد. بر این اساس، به نظر می‌رسد استفاده از رابطه همزیستی قارچ *P. indica* با گیاهان زراعی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار زیستی کارآمد جهت کاهش اثرات منفی ناشی از سمیت ذرات میکروپلاستیک و ارتقاء پایداری تولید در شرایط کمبود آب مورد توجه قرار گیرد.

References

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. In *Methods in enzymology* (Vol. 105, pp. 121-126). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3

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. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111610

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 and Molecular Plant Pathology*, *106,* 232-237. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.02.010

Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, *44*(1), 276-287. https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8

Batool, I., Anwar, A., Imran, M., & Alvi, Z. I. (2025). Prospecting carbon-based nanomaterials for harnessing multienzyme-like activities. *Topics in Catalysis*, *68*(9), 823-855. https://doi.org/10.1007/s11244-024-01910-2

Boorboori, M. R., & Zhang, H. Y. (2022). The role of *Serendipita indica* (*Piriformospora indica*) in improving plant resistance to drought and salinity stresses. *Biology*, *11*(7), 952. https://doi.org/10.3390/biology11070952

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 and Environmental Safety*, *186,* 109741. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109741

Dionisio-Sese, M. L., & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, *135*(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9

Farmer, E. E., & Mueller, M. J. (2013). ROS-mediated lipid peroxidation and RES-activated signaling. *Annual Review of Plant Biology*, *64*(1), 429-450. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120132

Gan, Q., Cui, J., & Jin, B. (2023). Environmental microplastics: Classification, sources, fates, and effects on plants. *Chemosphere*, *313,* 137559. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137559

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. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124482

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. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118420

Hasan, M. M., & Tarannum, M. N. (2025). Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and crop health in agricultural systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *17,* 100528. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100528

Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), 189-198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Irshad, M. K., Saleem, S., Ansari, J. R., Noman, A., Aqeel, M., Alshahrani, M. O., Alotaibi, M.O., Irshad, M.S., & Lee, S. S. (2025). An analysis of impact of soil co-pollution with lead and traditional/biodegradable microplastics on growth characteristics of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.09.022

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. 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. https://doi.org/10.1007/s40502-024-00797-1

Illanes, M., Toro, M. T., Schoebitz, M., Zapata, N., Moreno, D. A., & López-Belchí, M. D. (2025). Integrating microplastic research in sustainable agriculture: Challenges and future directions for food production. *Current Plant Biology*, 100458. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100458

Iqbal, B., Zhao, X., Khan, K. Y., Javed, Q., Nazar, M., Khan, I., Zhao, X., Li, G., & Du, D. (2024). Microplastics meet invasive plants: unraveling the ecological hazards to agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 906, 167756. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167756

Jangir, P., Shekhawat, P. K., Bishnoi, A., Ram, H., & Soni, P. (2021). Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *116,* 101691. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101691

Khan, K. Y., Ali, B., Ghani, H. U., Cui, X., Luo, X., Ali, Z., Ahmed, W., Tan, J., Lysenko, V., & Guo, Y. (2024). Polyvinyl chloride microplastics and drought co-exposure alter rice growth by affecting metabolomics and proteomics. *Science of the Total Environment*, *955,* 177002. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177002

Li, D., Bodjrenou, D. M., Zhang, S., Wang, B., Pan, H., Yeh, K. W., Lai, Z., & Cheng, C. (2021). The endophytic fungus *Piriformospora indica* reprograms banana to cold resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(9), 4973. https://doi.org/10.3390/ijms22094973

Li, L., Feng, Y., Qi, F., & Hao, R. (2023). Research progress of *Piriformospora indica* in improving plant growth and stress resistance to plant. *Journal of Fungi*, *9*(10), 965. https://doi.org/10.3390/jof9100965

Ma, L., Li, X., Wang, L., Li, Y., Bu, N., & Yu, C. (2019). Endophytic infection modulates ROS-scavenging systems and modifies cadmium distribution in rice seedlings exposed to cadmium stress. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, *31*(4), 463-474. https://doi.org/10.1007/s40626-019-00159-5

Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, F. M., Al-Mushhin, A. A., Hakami, O., Iqbal, M.F., Chen, F., Alamri, S., and Hashem, M. & Noman, A. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, *307,* 135749. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135749

Martín, C., Pirredda, M., Fajardo, C., Costa, G., Sánchez-Fortún, S., Nande, M., Mengs, G., & Martín, M. (2023). Transcriptomic and physiological effects of polyethylene microplastics on *Zea mays* seedlings and their role as a vector for organic pollutants. *Chemosphere*, *322,* 138167. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138167

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. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00754

Parkash, V., & Singh, S. (2020). A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. *Sustainability*, *12*(10), 3945. https://doi.org/10.3390/su12103945

Phillips, J. M., & Hayman, D. (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. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3

Pflugmacher, S., Tallinen, S., Kim, Y. J., Kim, S., & Esterhuizen, M. (2021). Ageing affects microplastic toxicity over time: Effects of aged polycarbonate on germination, growth, and oxidative stress of *Lepidium sativum*. *Science of the Total Environment*, *790,* 148166. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148166

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*(3), 123-128. https://doi.org/10.1007/s005720100115

Sajjad, M., Bahadur, S., Farooq, M. A., & Ren, M. X. (2025). Interactive impacts of heat stress and microplastics contamination on the growth and biochemical response of wheat (*Triticum aestivum*) and maize (*Zea mays*) plants. *Ecotoxicology*, 1-23. https://doi.org/10.1007/s10646-025-02892-x

Sanchez, M., Revilla, G., & Zarra, I. (1995). Changes in peroxidase activity associated with cell walls

during pine hypocotyl growth. *Annals of Botany*, *75*(4), 415-419. https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1039

Shah, S. H., Houborg, R., & McCabe, M. F. (2017). Response of chlorophyll, carotenoid and SPAD-502 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, *7*(3), 61. https://doi.org/10.3390/agronomy7030061

Shahabivand, S., Maivan, H. Z., Mahmoudi, E., Soltani, B. M., Sharifi, M., & Aliloo, A. A. (2016). Antioxidant activity and gene expression associated with cadmium toxicity in wheat affected by mycorrhizal fungus. *Zemdirbyste-Agriculture*, *103*(1), 53-60. https://doi.org/10.13080/z-a.2016.103.007

Shukla, J., Narayan, S., Mishra, A., Shirke, P. A., & Kumar, M. (2023). Reduction of arsenic accumulation in rice grain by endophytic fungus *Serendipita indica*. *Rhizosphere*, *26,* 100680. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100680

Su, Z., Zeng, Y., Li, X., Perumal, A. B., Zhu, J., Lu, X., Dai, M., Liu, X., & Lin, F. (2021). The endophytic fungus *Piriformospora indica*-assisted alleviation of cadmium in tobacco. *Journal of Fungi*, *7*(8), 675. https://doi.org/10.3390/jof7080675

Tsai, H. J., Shao, K. H., Chan, M. T., Cheng, C. P., Yeh, K. W., Oelmüller, R., & Wang, S. J. (2020). *Piriformospora indica* symbiosis improves water stress tolerance of rice through regulating stomata behavior and ROS scavenging systems. *Plant Signaling and Behavior*, *15*(2), 1722447. https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1722447

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. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.05.007

Wang, W., Do, A. T. N., & Kwon, J. H. (2022). Ecotoxicological effects of micro-and nanoplastics on terrestrial food web from plants to human beings. *Science of the Total Environment, 834,* 155333. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155333

Wang, H., Muhammad, M., Chen, X., Lu, C., Wang, X., Dong, H., Zhang, J., Yang, Y., Li, W., Liang, L., & Cao, Y. (2025). Modulation of soil microenvironment and plant gene expression by earthworms reduces polypropylene microplastic-induced growth stress in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.). *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *7,* 2080-2093. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2025.09.006

Xu, J., Guo, L., & Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, *201,* 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. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626