



Effect of *Serendipita indica* Fungus on Biomass, Bioaccumulation, and Translocation of Some Nutrients in Koshia (*Bassia scoparia*) Exposed to Cadmium, Microplastic and Drought Stress

Atefeh Mirzaei and Ali Sepehri* 

Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

* Corresponding author, Email: a_sepehri@basu.ac.ir

(Received: 22 November 2025; Revised: 6 February 2026; Accepted: 7 February 2026)

Abstract

Background and Objective: Drought, cadmium, and microplastics affect nutrient uptake, translocation, and plant growth. In this study, the effect of symbiosis with *Serendipita indica* fungus on dry matter accumulation and nutrient translocation in Koshia (*Bassia scoparia*) under drought stress, cadmium, and polyvinyl chloride (PVC) microplastics.

Methods: The experiment was conducted as a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications in a sandy clay loam soil. Treatments included drought stress at 35, 65, and 100% (control) of field capacity (FC), cadmium at 0 (control) and 10 mg kg⁻¹ soil, and three levels of polyvinyl chloride (PVC) microplastic at 0, 0.1, and 1%, in the presence or absence of the fungus. The evaluated traits included biomass, cadmium accumulation in root and shoot, cadmium translocation factor, bioaccumulation factor, and nutrient concentrations.

Results: The highest percentage of fungal colonization under non-stress conditions was 87%. In the treatments with cadmium, microplastic, and drought at 65 and 35% of FC, the biomass decreased by 8 and 36%, respectively, corresponding with the reduction in fungal colonization. The fungus had positive effects on nutrient uptake, growth, and maintenance of ion homeostasis in the plant. Cadmium accumulation, translocation factor, and bioaccumulation showed a decreasing trend under combined stress conditions. Fungal symbiosis in the 10 mg kg⁻¹ cadmium treatment increased cadmium uptake in root by 14% compared to the treatment without fungus. Under stress conditions, the concentrations of zinc, iron, and calcium decreased, while magnesium increased in the root and shoot.

Conclusion: The results showed that *S. indica* fungus coexisted well with the Koshia plant, and by maintaining ionic balance and improving plant growth during combined stresses. It not only contributed to a sustainable biological system but also promoted plant phytoremediation by increasing the plant's ability to take up and accumulate cadmium in the root, even under microplastic pollution.

Keywords: Cadmium bioaccumulation, Mineral elements, Mycorrhizal fungus, Polyvinyl chloride, Water stress.

How to Cite: Mirzaei, A., Sepehri, A., 2026. Effect of *Serendipita indica* fungus on biomass, bioaccumulation, and translocation of some nutrients in Koshia (*Bassia scoparia*) exposed to cadmium, microplastic and drought stress. J. Soil Plant Interact. 17(1), 51–74 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21222>





اثر قارچ *Serendipita indica* بر زیست توده، انباشت زیستی و انتقال برخی عناصر غذایی در کوشیا (*Bassia scoparia*) در معرض کادمیوم، میکروپلاستیک و تنش خشکی

عاطفه میرزایی و علی سپهری*

گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: a_sepeshri@basu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک، جذب و انتقال عناصر غذایی و رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می دهند. در این پژوهش اثر همزیستی قارچ *Serendipita indica* بر انباشت زیست توده و انتقال عناصر غذایی کوشیا (*Bassia scoparia*) تحت آلودگی کادمیوم، میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید و تنش خشکی بررسی شد.

روش ها: آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در یک خاک لوم رسی شنی با تنش رطوبتی ۳۵، ۶۵ و ۱۰۰ (شاهد) درصد گنجایش مزرعه ای (FC)، کادمیوم ۰ (شاهد) و ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک و سه سطح میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید ۰، ۱/۱ و ۱ درصد در حضور یا بدون حضور قارچ انجام شد. جرم زیست توده، انباشت کادمیوم در ریشه و شاخساره، فاکتور انتقال و انباشت زیستی کادمیوم و عناصر غذایی ارزیابی شد.

نتایج: بیشترین همزیستی قارچ با گیاه در شرایط بدون تنش برابر ۸۷ درصد بود. در تیمارهای کادمیوم و میکروپلاستیک در دو وضعیت ۶۵ و ۳۵ درصد FC، کاهش درصد همزیستی و جرم زیست توده به ترتیب حدود ۸ و ۳۶ درصد بود. قارچ آثار مثبتی بر جذب عناصر غذایی، رشد و تنظیم یونی گیاه داشت. انباشت کادمیوم، فاکتور انتقال و تجمع زیستی در تنش ترکیبی روندی کاهشی را نشان داد، همزیستی قارچ در تیمار کادمیوم ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم موجب افزایش جذب کادمیوم در ریشه به میزان ۱۴ درصد نسبت به تیمار بدون قارچ شد. در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک تحت تنش رطوبتی، غلظت عناصر روی، آهن و کلسیم کاهش ولی منیزیم در ریشه و شاخساره افزایش یافت.

نتیجه گیری کلی: نتایج نشان داد که قارچ *S. indica* به خوبی با کوشیا همزیستی داشته و سبب حفظ تعادل یونی و بهبود رشد در شرایط تنش ترکیبی شد. این قارچ نه تنها به نظام زیستی پایدار کمک نموده بلکه با افزایش توان گیاه در جذب و تجمع کادمیوم در ریشه حتی در شرایط آلودگی میکروپلاستیک، گیاه پالایی گیاه را ارتقاء می بخشد.

واژه های کلیدی: پلی وینیل کلراید، تنش آبی، انباشت زیستی کادمیوم، عناصر معدنی، قارچ میکوریزا.



مقدمه

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های اکوسیستم‌های کشاورزی است که آثار نامطلوبی بر رشد و تولید گیاهان دارد (Liu et al., 2022). تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر گذاشته و با ایجاد اختلال در سوخت‌وساز سلولی، آسیب به غشای پلاسمایی، کاهش فتوسنتز، افزایش تنش اکسیداتیو و کاهش جذب و انتقال عناصر غذایی، کیفیت و بهره‌وری محصول را کاهش می‌دهد (Li et al., 2023). گیاهان برای رشد و نمو و تولید مناسب به عناصر غذایی متعددی نیاز دارند که از راه سازوکارهای مختلف انتشار، جریان توده‌ای و انتقال فعال توسط ریشه جذب می‌شوند (Marschner and Rengel, 2023). فراهمی عناصر غذایی در ناحیه ریزوسفری، جایی که تبادلات بین ریشه و خاک به صورت فعال رخ می‌دهد، نقش کلیدی در جذب عناصر توسط گیاه دارد (Cheraghi et al., 2023). یکی از محدودکننده‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر فراهمی عناصر غذایی، میزان رطوبت خاک است. تنش خشکی باعث کاهش پیوستگی فاز مایع در منافذ خاک شده، و در نتیجه حرکت عناصر غذایی را مختل می‌کند (Zarebanadkouki et al., 2019). از سوی دیگر خشک شدن خاک شکاف‌های فیزیکی بین ریشه و ذرات خاک را افزایش داده و تبادل آب و عناصر غذایی در گیاه را محدود می‌سازد (Liu et al., 2021).

کادمیوم به عنوان یک عنصر سمی و غیرضروری، یکی از آلاینده‌هایی است که به طور عمده از راه فعالیت‌های انسانی وارد خاک و گیاه می‌شود. با توجه به آثار سمی فلزات سنگین بر رشد و عملکرد گیاهان، غلظت بحرانی این فلزات متفاوت بوده و برای کادمیوم، دامنه طبیعی غلظت در گیاهان حدود ۰/۱-۲/۴ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک و غلظت بحرانی ۵ تا ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک گزارش شده است (Alloway, 2013). کادمیوم توسط ریشه‌های گیاه جذب شده و با انتقال و انباشت در شاخساره، رشد و عملکرد گیاه را مختل نموده و از راه زنجیره غذایی تهدیدی جدی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند. از سوی دیگر مقادیر زیاد کادمیوم در خاک، فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه

شامل اندازه سلول، فتوسنتز و تنفس و همچنین جذب عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Tekdal, 2018). در سال‌های اخیر، میکروپلاستیک‌ها (MPs) نیز به عنوان یک تهدید نوظهور، بر اکوسیستم‌های کشاورزی تأثیر داشته و به عنوان یکی از منابع آلودگی خاک در نظر گرفته می‌شوند (Pignattelli et al., 2020). داده‌های رسمی درباره میزان آلودگی MPs در خاک‌های کشاورزی محدود بوده ولی بررسی‌های اولیه حاکی از حضور MPs در خاک‌های شهری، صنعتی و کشاورزی ایران دارد (Abbasi et al., 2023). حضور MPs در خاک می‌تواند جذب و تجمع عناصر غذایی در ریشه و شاخساره گیاهان را تغییر دهد (Jiang et al., 2024). ذرات MPs به عنوان حامل‌های بالقوه با تأثیر بر پویایی زیستی فلزات سنگین از جمله جذب سطحی، فراهمی آن‌ها در خاک را کاهش می‌دهند (Kumar et al., 2022; Erdem et al., 2025). از سوی دیگر ذرات MPs با اتصال به ریشه‌ها و انسداد کانال‌های یونی، جذب عناصر غذایی ضروری توسط گیاه را تحت تأثیر قرار داده و رشد و نمو آن را مختل می‌کند (Colzi et al., 2022). برخی پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند ذرات MPs به سبب سطح ویژه زیاد، کادمیوم را جذب و با افزایش فراهمی آن در ریزوسفر می‌تواند انتقال آن به ریشه گیاه را تسهیل نماید (Wang et al., 2023). میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC-MPs) به عنوان یکی از مهم‌ترین MPs آلوده‌کننده خاک، به ویژه در ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرون موجب کاهش رشد، اختلال در فتوسنتز و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Colzi et al., 2022; Nei et al., 2024). علاوه بر آثار مستقیم، PVC می‌تواند جذب و انتقال عناصر سنگین از جمله کادمیوم را به ریشه گیاه تغییر دهد (Huang et al., 2023). در مواجهه با تنش‌های محیطی، استفاده از ریزجانداران سودمند راه‌کاری سازگار با محیط زیست و مؤثر برای جلوگیری از کاهش عملکرد گیاهان است (Reshna et al., 2022). استفاده از قارچ *Serendipita indica* (یا *Piriformospora indica*) در شرایط وجود تنش‌های محیطی، آثار مثبتی بر رشد گیاه داشته و همزیستی آن با گونه‌های مختلف گیاهی به خوبی ثابت شده است

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil used

مس	آهن	منگنز	روی	پتاسیم	فسفر	نیتروژن کل	کربن آلی	رسانایی الکتریکی	pH	بافت خاک
Cu	Fe	Mn	Zn	K	P	NTotal nitrogen, (g kg ⁻¹)	Organic carbon, OC (g kg ⁻¹)	Electrical conductivity, EC (dS m ⁻¹)		Soil texture
فرم قابل استفاده Available form (mg kg ⁻¹)										
2.98	10.7	2.90	2.68	275	16	0.8	7.8	1.06	7.1	لوم رسی شنی Sandy clay loam

نوظهور PVC-MPs بر انباشت و انتقال عناصر غذایی گیاه متحمل کوشیا می‌تواند پتانسیل آن را برای گیاه‌پالایی و همچنین استفاده علوفه‌ای شاخساره در حضور قارچ *S. indica* مورد ارزیابی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه و آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا در سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر اساس طرح کاملاً تصادفی، در سه تکرار تا مرحله رویشی (BBCH-39) با رقم محلی گیاه کوشیا انجام شد. خاک مورد استفاده با بافت لوم رسی شنی از لایه صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه پژوهشی دانشگاه تهیه شد. برای آماده‌نمودن گلدان‌ها ابتدا ماسه (با اندازه ذرات ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر) و خاک با نسبت وزنی یک به دو ترکیب و مخلوط شدند و به‌مدت ۶۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس ضدعفونی شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان در جدول ۱ آورده شده است.

تیمارهای آزمایش شامل سه سطح رژیم رطوبتی ۳۵، ۶۵، ۱۰۰ (شاهد) درصد گنجایش مزرعه‌ای (FC)، کادمیوم ۰ (شاهد) و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، PVC-MPs با قطر ۷۵ میکرون در سه سطح ۰، ۱/۱، ۱ درصد جرم خاک و در حضور و عدم حضور قارچ *S. indica* بود. غلظت مورد نظر کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم (Merck) به‌صورت خالص برای هر گلدان محاسبه و توزین شده و سپس در حجمی از آب موردنیاز برای

(ur Rahman et al., 2023). ریشه‌های کلونیزه‌شده با قارچ ضخیم‌تر بوده و پوشش قارچی اطراف آن جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهد. میسلیم‌ها و کلامیدوسپورها قارچ به‌تنهایی می‌توانند آثار مثبت بر رشد گیاه در شرایط نامساعد محیطی داشته باشند (Jangir et al., 2021).

یکی از رویکردهای مؤثر و پایدار برای پالایش محیط زیست استفاده از گیاهان سبز با پوشش وسیع، دارای توانایی حذف، جذب و یا تثبیت آلاینده‌هایی مانند کادمیوم در خاک و آب است (Liu et al., 2021). در این میان، برخی گونه‌های گیاهان هالوفیت به علت توانایی انباشت فلزات سنگین، به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای پالایش خاک‌های آلوده پیشنهاد شده‌اند (Shi et al., 2022). گیاه کوشیا^۱ یک هالوفیت علفی بسیار بردبار به تنش‌های شوری و خشکی بوده که به‌دلیل سیستم ریشه‌ای عمیق، به‌خوبی با شرایط خشک سازگار است (Shi et al., 2022). این گیاه در شرایط نیمه‌خشک ایران در کشت تابستانه و بهاره دو تا سه مرتبه در سال تولید داشته و به‌ترتیب حدود ۱۰ و ۲۳ تن در هکتار علوفه تولید می‌کند. این گیاه قادر است مقادیر زیادی عناصر غذایی شامل پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم را در شاخساره و ریشه ذخیره نماید (Hirich et al., 2020). این پژوهش با هدف بررسی اثر همزیستی قارچ *S. indica* (یا *P. indica*) بر انباشت زیست-توده، چگونگی انباشت و انتقال عناصر غذایی کوشیا در معرض آلودگی کادمیوم و PVC-MPs، تحت تنش خشکی انجام شده است. بنابراین با وجود پژوهش‌های نسبتاً گسترده در زمینه خشکی و کادمیوم، بررسی همزمان اثر خشکی، کادمیوم و آلودگی

1- *Bassia scoparia*

رساندن رطوبت خاک به FC حل شد و به‌طور یکنواخت با خاک استریل مخلوط گردید. برای اطمینان از رسیدن خاک به غلظت نهایی، نمونه‌هایی از خاک پس از طی مدت لازم با طیف‌سنجی جذب اتمی مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین FC خاک، یک گلدان پر از آن به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک و توزین شد. سپس با افزودن تدریجی آب به خاک خشک، خاک به حالت اشباع رسید. پس از خروج کامل آب ثقلی، گلدان توزین شده و FC محاسبه شد. درصدهای مورد نظر میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC) (شرکت LG Chemical) بر اساس آزمایش مقدماتی و در محدوده تحمل گیاه تعیین شده و به‌صورت درصد جرمی به خاک هر گلدان افزوده شد (Li et al., 2020). خاک‌های آلوده‌شده به کادمیوم و میکروپلاستیک به مدت چهار هفته تا حد FC چندین مرتبه مرطوب و خشک شده و در دمای اتاق نگهداری شدند تا وضعیت آن‌ها تثبیت و به شرایط طبیعی نزدیک شوند. بذره‌های گیاه کوشیا از توده بومی همدان ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی شده و پس از سه بار شست‌وشو با آب مقطر در گلدان‌های سه‌لیتری با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر کشت شدند. قارچ اندوفیت *S. indica* از آزمایشگاه پاتولوژی دانشگاه بوعلی سینا تهیه شده و برای تولید مایه تلقیح، از جدایه اولیه قارچ پس از کشت در محیط جامد اختصاصی، سوسپانسیون اسپور با غلظت 5×10^5 اسپور در میلی‌لیتر تهیه شد. سپس بذور در سوسپانسیون مذکور قرار گرفته و کشت شدند. برای بررسی کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ، پس از جداسازی از خاک و شست‌وشو، ریشه‌ها به قطعات یک سانتی‌متری تقسیم شدند. ابتدا قطعات ریشه به‌منظور شفاف‌سازی در محلول پتاسیم هیدروکسید ۱۰ درصد و حمام آب گرم (۹۰ درجه سلسیوس، ۴۵ دقیقه) قرار گرفته و پس از شست‌وشو با آب مقطر به مدت ۳ دقیقه در اسید کلریدریک ۱ درصد قرار گرفتند. در نهایت رنگ‌آمیزی ریشه‌ها با متیلن بلو ۰/۰۵ درصد در لاکتوفل انجام شد. قطعات ریشه رنگ‌آمیزی‌شده با میکروسکوپ نوری بررسی شده و درصد کلونیزاسیون ریشه تعیین شد. آزمایش در شرایط دمایی ۲۵ تا ۳۰

درجه سلسیوس و طول دوره روشنایی ۱۲ تا ۱۴ ساعت در گلخانه اجرا شد. آبیاری گلدان‌ها تا استقرار کامل گیاهان به طور مرتب انجام شده و رطوبت در حدود FC حفظ گردید. زمانی که ارتفاع گیاهچه‌ها به ۱۰ سانتی‌متر رسید تنش رطوبتی از با تنظیم مقدار آب آبیاری اعمال شد. در انتهای آزمایش در مرحله رویشی (BBCH-39)، گیاهان با دقت از خاک خارج شده و ریشه‌ها با آب شست‌وشو داده شد. سپس ریشه‌ها به همراه شاخساره در آون با دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک شده و با ترازوی حساس (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) توزین شدند. غلظت عناصر کادمیوم، آهن، کلسیم، روی و منیزیم در نمونه‌های گیاهی با روش خاکستریگری خشک و هضم با هیدروکلریک اسید دو مولار بر اساس روش (Jones and Benton, 2001) اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر در بافت گیاهی با استفاده از اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت-شده القایی (ICP-OES, Varian VIST-MPX) بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم جرم خشک تعیین شد. فاکتور انتقال (TF) و انباشت زیستی کادمیوم (BCF) با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (Zhang et al., 2020):

$$TF = (Cd \text{ Shoot}) / (Cd \text{ Root}) \quad (1)$$

$$BCF = (Cd \text{ Root}) / (Cd \text{ Soil}) \quad (2)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به‌دست آمده از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. همچنین نمودارها در محیط نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

درصد همزیستی ریشه

درصد همزیستی به طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش سه‌گانه کادمیوم، میکروپلاستیک و خشکی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط بدون تنش خشکی، بیشترین میزان همزیستی ریشه با قارچ *S. indica* برابر ۸۷ درصد در تیمار بدون کادمیوم و میکروپلاستیک مشاهده شد. حضور

۱/۵۹ گرم در بوته بود که نسبت به شاهد کادمیوم به ترتیب ۸/۳ و ۳۵/۷ درصد کاهش یافت (شکل ۱a). در شرایط همزیستی، تیمارهای رطوبتی 100%FC، 65%FC و 35%FC و در حضور کادمیوم ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم، جرم زیست توده گیاه به ترتیب برابر ۴/۳۱، ۳/۴۶ و ۲/۳۲ گرم در بوته بود، اما در شرایط بدون همزیستی جرم زیست توده گیاه کاهش یافت (شکل ۱b). خشکی با کاهش جذب آب توسط سیستم ریشه‌ای باعث کاهش پتانسیل آب سلولی، کاهش فشار آماس و اختلال در یکپارچگی غشاء و ساختار پروتئین‌ها می‌شود، همچنین تشدید سایر تنش‌ها موجب کاهش فراهمی و جذب عناصر غذایی برای گیاه می‌شود (Weisany et al., 2021). پیش از این، کاهش جرم خشک در گیاهچه‌های کلزا^۱ و گندم^۲ تحت تنش خشکی و کادمیوم گزارش شده است (Dikšaitytė et al., 2023; Haider et al., 2025). به نظر می‌رسد در شرایط آلودگی کادمیوم و تنش خشکی به دلیل محدودیت‌های روزنه‌ای و غیرروزنه‌ای فتوسنتز، جرم خشک در مقایسه با گیاهان بدون تنش کاهش می‌یابد (Dikšaitytė et al., 2023). علاوه بر این، حضور MPs در خاک منجر به کاهش رشد و جرم زیست توده گیاه شد (شکل ۱a). نشان داده شده است که در گیاهچه‌های برنج^۳ در معرض PVC-MPs نیز کاهش جرم خشک رخ می‌دهد (Ma et al., 2022). به نظر می‌رسد حضور MPs در خاک مانع جذب و انتقال بهینه آب در خاک و گیاه شده و از این رو بر رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارند. ذرات MPs رشد طبیعی سیستم ریشه‌ای را مختل کرده و با کاهش جذب آب و عناصر غذایی در نهایت منجر به کاهش زیست توده گیاه می‌شود (Colzi et al., 2022). همزیستی با قارچ *S. indica* موجب افزایش جرم زیست توده گیاه در شرایط تنش شد (شکل ۱b). افزایش جرم خشک در گیاهان همزیست با قارچ *S. indica* به افزایش سطح اکسین، انتقال آن و تحریک بیان ژن‌های مرتبط با اکسین در گیاهان میزبان نسبت داده شده است (Jyothymol et al., 2024). از سوی دیگر افزایش سطح ریشه به واسطه رشد

کادمیوم و میکروپلاستیک در خاک تأثیر منفی بر درصد همزیستی داشت. درصد همزیستی ریشه گیاهان در معرض ۱۰ میلی گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد، در شرایط بدون تنش خشکی، برابر ۴۲ درصد بود. ولی در تیمار مذکور در سطوح تنش خشکی 65%FC و 35%FC، میزان همزیستی به ترتیب به ۳۷ و ۲۵ درصد کاهش یافت. تنش خشکی با محدود نمودن تأمین کربن از سوی گیاه میزبان، موجب کاهش تراکم هاگ‌ها و تضعیف همزیستی ریشه-قارچ می‌شود (Ostadi et al., 2022). با این حال، توانایی قارچ *S. indica* در برقراری همزیستی تحت تنش خشکی در برخی گیاهان گزارش شده است (Ghaffari et al., 2019). قارچ مذکور با فعال سازی مسیر اکسیداسیون گلوکاتینون-آسکوربات و القای ژن‌های پاسخ دهنده به خشکی، موجب افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی می‌شود (Ghaffari et al., 2019). افزایش غلظت کادمیوم و میکروپلاستیک، چه در شرایط تنش خشکی و چه در شرایط بدون تنش، باعث کاهش معنی دار رشد هیف‌های قارچ شد. این کاهش می‌تواند ناشی از سمیت یونی کادمیوم و نیز کاهش فتوسنتز و محدود شدن تأمین کربوهیدرات لازم برای رشد قارچ باشد (Boorboori & Zhang., 2024). از سوی دیگر آلودگی خاک با میکروپلاستیک می‌تواند ساختار و فعالیت جامعه میکروبی خاک را به طور قابل توجهی تغییر دهد. گزارش شده است میکروپلاستیک‌ها با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأثیر منفی بر فعالیت ریزجانداران، رشد قارچ‌های همزیست را کاهش می‌دهند (Yang et al., 2021).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، برهم کنش سه گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک و همچنین برهم کنش سه گانه قارچ، خشکی و کادمیوم بر جرم زیست توده به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی دار شد (جدول ۲). جرم زیست توده در سطوح تنش خشکی 65%FC و 35%FC و کادمیوم ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم و میکروپلاستیک ۱ درصد به ترتیب برابر ۳/۱۹ و

3- *Oryza sativa* L.1- *Brassica napus* L.2- *Triticum aestivum*

جدول ۲. تجزیه واریانس زیست توده، کادمیوم ریشه، کادمیوم شاخساره، فاکتور انتقال و تجمع زیستی در گیاهچه کوشیا تحت تاثیر قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک

Table 2. Analysis of variance for biomass, root cadmium, shoot cadmium, translocation factor, and bioconcentration in Koshia seedlings as affected by fungus, drought, cadmium, and microplastic

(Mean squares) میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییر
فاکتور انباشت زیستی	فاکتور انتقال	غلظت کادمیوم شاخساره	غلظت کادمیوم ریشه	زیست توده	df	Sources of variation
Bioaccumulation factor	Translocation factor	Shoot cadmium	Root cadmium	Biomass		
0.22**	0.49**	2.08**	1.96**	3.61**	1	قارچ <i>S. indica</i> (S)
0.20**	18.6**	10.9**	11.3**	37.02**	2	خشکی (D) Drought
9.38**	34.6**	126**	215**	13.07**	1	کادمیوم (C) Cadmium
0.31**	4.17**	13.2**	24.7**	3.04**	2	میکروپلاستیک (M) Microplastics
0.0005 ^{ns}	0.11*	0.20**	0.15**	0.09 ^{ns}	2	S×D
0.01**	0.004 ^{ns}	1.92**	1.91**	0.002 ^{ns}	1	S×C
0.002 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.28**	0.12**	0.01 ^{ns}	2	S×M
0.05**	7.80**	10.5**	11.6**	1.18**	2	D×C
0.03**	0.29**	3.93**	4.20**	0.40**	4	D×M
0.15**	0.64**	12.7**	24.4**	0.19**	2	C×M
0.009**	0.02 ^{ns}	0.20**	0.15**	0.12*	2	S×D×C
0.0007 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.38**	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	4	S×D×M
0.002 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.28**	0.12**	0.004 ^{ns}	2	S×C×M
0.04**	0.46**	3.28**	4.24**	0.47**	4	D×C×M
0.0006 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.38**	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	4	S×D×C×M
0.001	0.03	0.005	0.02	0.03	72	Error خطا
5.75	15.33	6.33	10.91	5.14	—	ضریب تغییرات (%)
						Coefficient of variation (%)

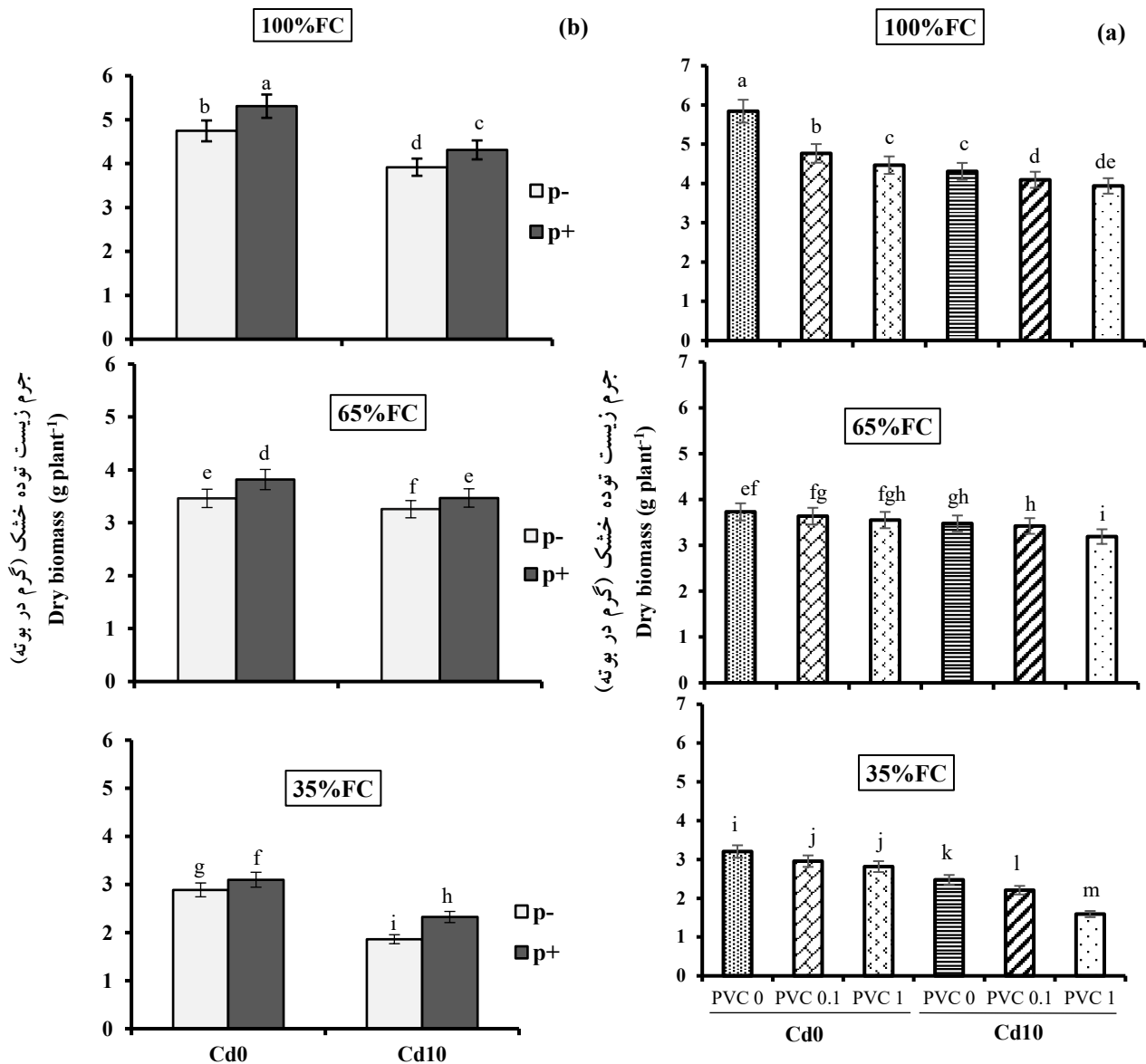
*, **, و ^{ns} به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و اثر غیرمعنی دار است.

*, **, and ^{ns} indicate significant effect at the 5 and 1% probability levels, and non-significant effect, respectively.

غلظت کادمیوم ریشه

محتوای کادمیوم ریشه به طور معنی داری تحت تأثیر برهم کنش سه گانه قارچ، خشکی و کادمیوم، برهم کنش قارچ، کادمیوم و میکروپلاستیک و همچنین برهم کنش خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). در شرایط همزیستی، غلظت کادمیوم ریشه با افزایش کادمیوم خاک به ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (شکل ۲a و ۲b).

میسلیوم قارچی منجر به بهبود جذب آب و عناصر غذایی شده و در نتیجه تحمل گیاه را در برابر تنش های محیطی افزایش می دهد (Jyothymol et al., 2024). علاوه بر این، قارچ *S. indica* قادر است با بهبود انتقال آب و عناصر غذایی از راه آوندهای چوبی و آبکش به تنظیم اسمزی در سطح سلولی کمک کرده و از راه حفظ آماس سلولی، رشد سلول های گیاهی را افزایش دهد (Jyothymol et al., 2024; Heris et al., 2022).

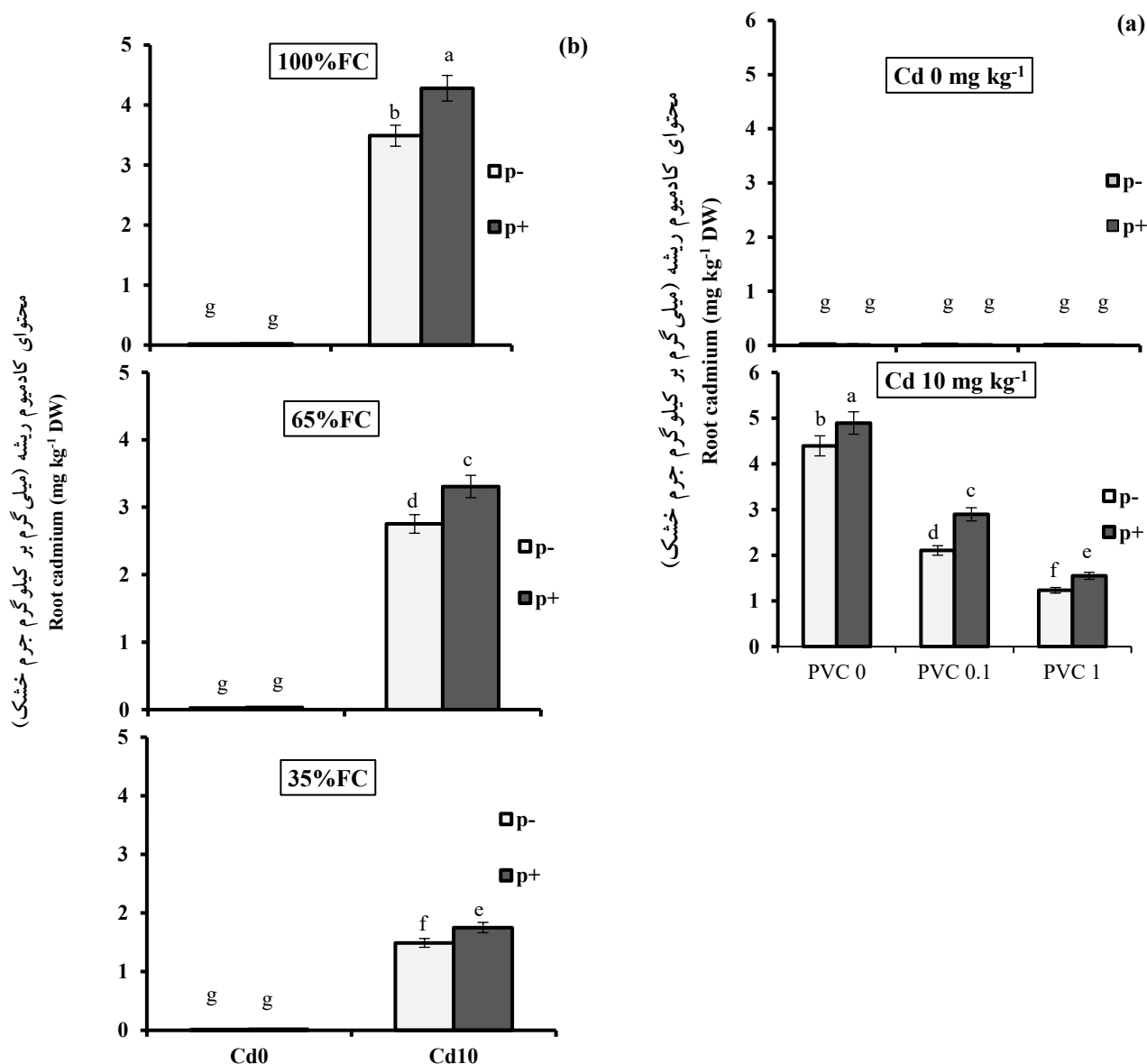


شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) تحت سطوح تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) (a)، و اثر برهم کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* (b) بر جرم زیست توده خشک. ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

Fig. 1. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and polyvinyl chloride microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress levels (35%FC, 65%FC and 100%FC) (a), and the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and drought stress (35%FC, 65%FC and 100%FC) under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* fungus (b) on dry biomass. Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

و در حضور میکروپلاستیک ۱ درصد، انباشت کادمیوم در ریشه کاهش یافته است (شکل ۳b). در شرایط همزیستی و بدون همزیستی، در تنش خشکی 35%FC و کادمیوم ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم، محتوای کادمیوم ریشه به ترتیب برابر ۱/۷۵۲ و ۱/۴۹۱

ولی در هر دو شرایط شرایط همزیستی و بدون همزیستی با قارچ، افزایش میکروپلاستیک خاک به ۱ درصد سبب کاهش محتوای کادمیوم ریشه شد (شکل ۲a). بررسی برهم کنش خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک نیز نشان داد که با کمبود رطوبت خاک



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهم کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) بر محتوای کادمیوم ریشه در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* (a)، و اثر برهم کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* (b) بر محتوای کادمیوم ریشه. ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

Fig. 2. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) on root cadmium content under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* (a), and the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and drought stress (35%FC, 65%FC and 100%FC) under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* (b) on root cadmium content. Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

افزایش میکروپلاستیک به ۱ درصد، محتوای کادمیوم ریشه روند کاهشی داشت (شکل ۳b). اصولاً تنش خشکی انباشت کادمیوم در ریشه گیاه را کاهش می‌دهد (Sun et al., 2024)؛ زیرا کمبود

میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مثبت همزیستی قارچ بر جذب کادمیوم در ریشه است (شکل ۲b). در وضعیت رطوبتی 35%FC و 65%FC در حضور کادمیوم و

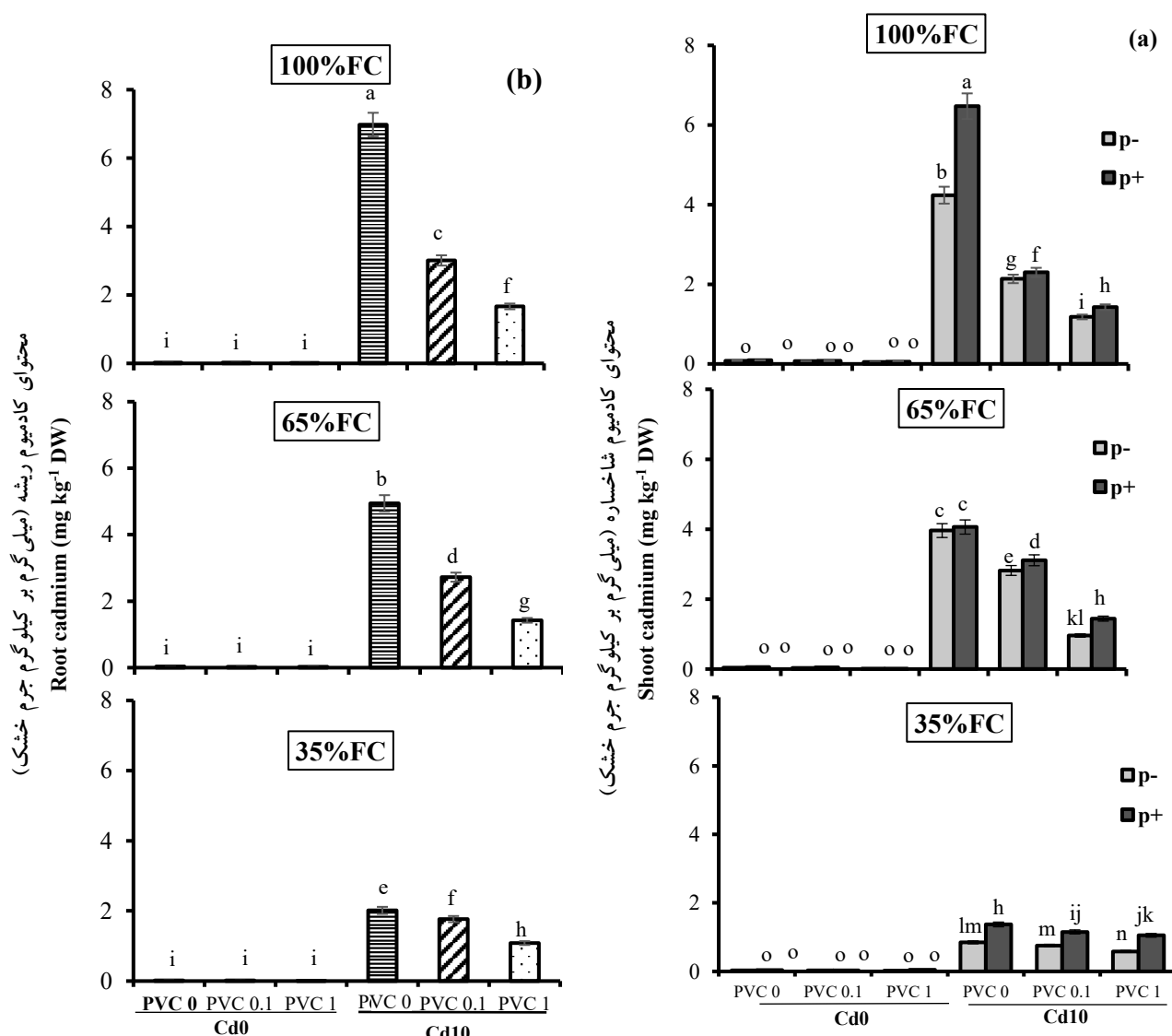
در هر دو شرایط رطوبتی مذکور، همزیستی با قارچ غلظت کادمیوم را در شاخساره گیاه چندان تغییر نداد که حاکی از کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره است.

در سطوح تنش خشکی 65%FC و 35%FC در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد، به ترتیب محتوای کادمیوم شاخساره به کمترین مقدار خود رسید (شکل ۳a). با این حال، در شرایط همزیستی با قارچ، میزان کادمیوم شاخساره افزایش یافت (شکل ۳a). ولی با افزایش PVC-MPs موجود در خاک از ۰/۱ به ۱ درصد، میزان انباشت کادمیوم در شاخساره کاهش یافت (شکل ۳a). بر اساس نتایج به دست آمده، تنش خشکی منجر به کاهش محتوای کادمیوم در شاخساره گیاه شد (شکل ۳a). این یافته پژوهش حاضر با گزارش Yang et al. (2021) مبنی بر کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره در شرایط تنش خشکی هم‌راستا است. بسته شدن روزه‌ها و کاهش تعرق از جمله دلایل محدودیت انتقال عناصر در تنش خشکی به شمار می‌رود (Ma et al., 2024). میکروپلاستیک نیز منجر به کاهش محتوای کادمیوم شاخساره در شرایط تنش خشکی شد (شکل ۲d). MPs با تغییر ساختمان بر تخلخل خاک اثر گذاشته و گنجایش نگهداری آب و گنجایش تبادل کاتیونی خاک را کاهش می‌دهند. همچنین MPs با کاهش pH خاک و افزایش کربن آلی محلول، بر تحرک فلزات سنگین مانند کادمیوم در خاک تأثیر گذارند. ذرات ریز آن‌ها به دلیل سطح ویژه زیاد و گروه‌های عامل مختلف، توان جذب کادمیوم را داشته و با ایجاد تغییرات در ویژگی‌های شیمیایی، دسترسی ریشه برای جذب کادمیوم را محدود می‌کنند؛ در نتیجه، انتقال آن به شاخساره کاهش می‌یابد (Lin et al., 2024). علاوه بر این، کاهش رطوبت خاک با محدود کردن حرکت آب نقش MPs در انتقال فلزات را محدود می‌کند. در شرایط همزیستی، علاوه بر ریشه، افزایش کادمیوم در شاخساره مشاهده شد که عمدتاً مربوط به شرایط مطلوب رطوبتی و بدون حضور میکروپلاستیک بود (شکل ۳a). قارچ‌های میکوریزا با توسعه شبکه‌های میسلومی در خاک و افزایش جذب آب، انتقال فلزات سنگین را بهبود می‌بخشند (Khalid et al., 2022). دیواره سلولی

آب در محیط بر انباشت کادمیوم در ریشه و جذب و انتقال آن‌ها در گیاه تأثیر می‌گذارد (Ma et al., 2024). این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش بیان ژن‌های مرتبط با انتقال یون‌های کادمیوم در ریشه باشد؛ به گونه‌ای که در نهایت موجب کاهش انباشت آن در بافت‌های ریشه‌ای می‌گردد (Ma et al., 2024). ذرات MPs نیز نقش مهمی در پویایی زیستی فلزات سنگین داشته و به عنوان حامل‌های بالقوه، با جذب سطحی کادمیوم، میزان فراهمی آن در خاک را کاهش می‌دهند (Kumar et al., 2022; Erdem et al., 2025; Afzalinejad et al., 2025). از سوی دیگر (Boorboori and Zhang, 2024) گزارش کردند که قارچ *P. indica* سازوکارهای منحصر به فرد مقابله با تنش کادمیوم، شامل سیستم‌های رسوب کادمیوم و کلات‌سازی که با بی‌حرکت کردن آن از راه تشکیل اگزالات فلزی نامحلول یا کلات‌سازی روی پلیمرهای ملانین، تشکیل کمپلکس و جداسازی کادمیوم درون سلولی و اتصال کادمیوم به دیواره سلولی قارچ است (Sepehri, 2021; Boorboori and Zhang, 2024).

غلظت کادمیوم شاخساره

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد بر غلظت کادمیوم شاخساره معنی‌دار شد (جدول ۲). در وضعیت رطوبتی 100%FC در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک‌های ۰/۱ و ۱ درصد، غلظت کادمیوم شاخساره به ترتیب برابر ۲/۱۳۵ و ۱/۱۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در همزیستی با قارچ اندکی افزایش یافت (به ترتیب افزایش ۸ و ۱۲ درصد نسبت به تیمارهای بدون قارچ). البته در شرایط بدون میکروپلاستیک، حضور قارچ در وضعیت رطوبتی 100%FC سبب افزایش بیشتری در غلظت کادمیوم نسبت به تیمارهای بدون قارچ شد (شکل ۳a). با کاهش رطوبت خاک به 65%FC و 35%FC و تحت تأثیر میکروپلاستیک، غلظت کادمیوم در شاخساره به شدت کاهش یافت که تأثیر میکروپلاستیک ۱ درصد در این کاهش بیش از میکروپلاستیک ۰/۱ درصد بود (شکل ۳a).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش کادمیوم کادمیوم (Cd0 و Cd10)، میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC0.1، PVC0 و PVC1)، و تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* بر محتوای کادمیوم شاخساره (a)، و اثر برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) تحت سطوح تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) بر محتوای کادمیوم ریشه (b). ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

Fig. 3. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10), microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1), and drought stress (35%FC, 65%FC and 100%FC) under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* on shoot cadmium content (a), and the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress levels (35%FC, 65%FC and 100%FC) on root cadmium content (b). Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

سازوکار باعث می‌شود بخشی از کادمیوم موجود در خاک توسط قارچ جذب یا تثبیت شود (Khalid et al., 2022). حضور قارچ-های میکوریزی می‌تواند با افزایش سطح ریشه مؤثر، جذب

قارچ‌های میکوریزی به دلیل وجود کیتین و پلی‌ساکاریدهای دارای گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل، آمین و فسفات، توانایی زیادی در اتصال و تثبیت یون‌های فلزی مانند کادمیوم دارند. این

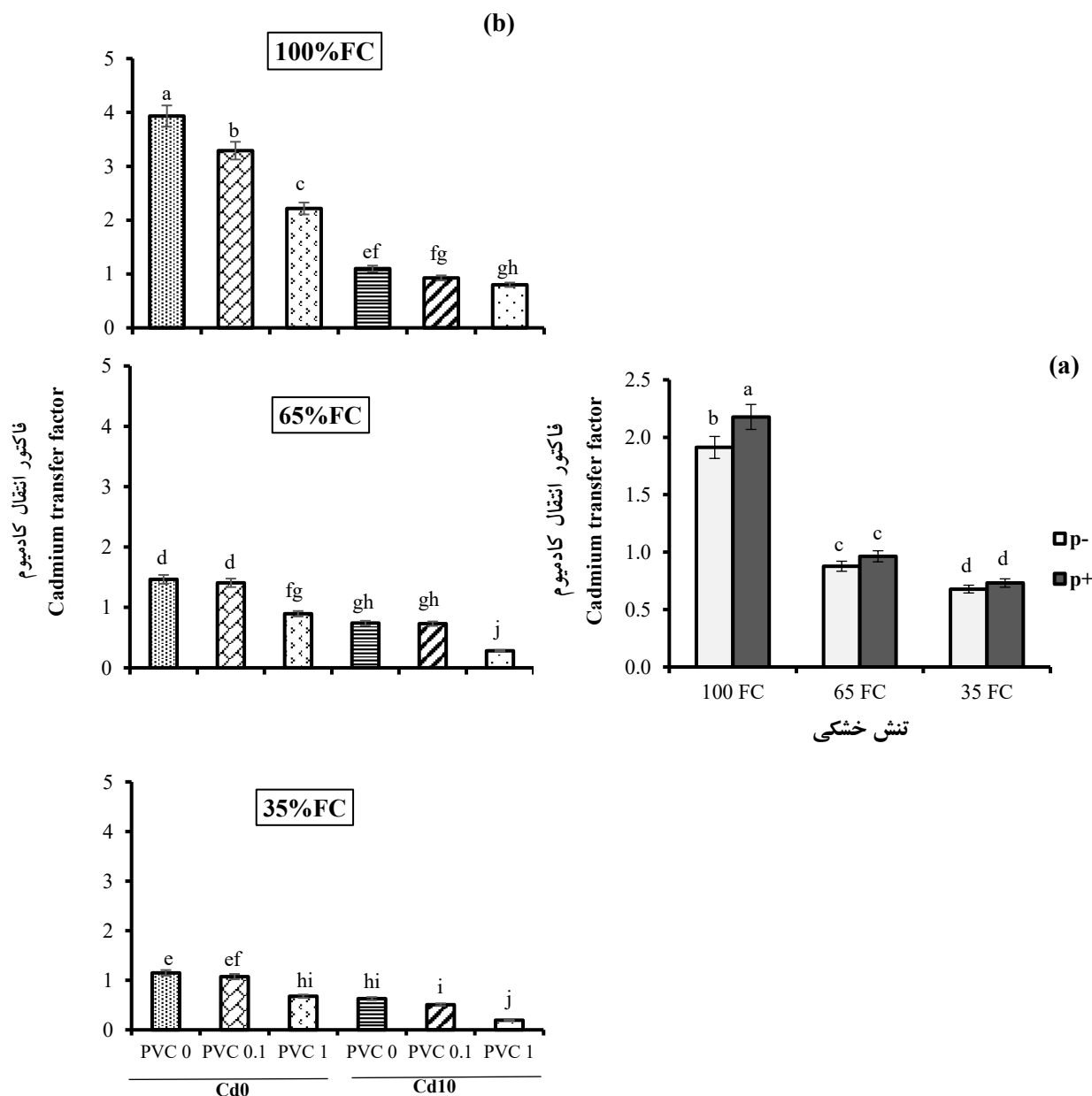
فاکتور انباشت زیستی

آثار برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک و همچنین، برهم‌کنش سه‌گانه قارچ، خشکی و کادمیوم بر انباشت زیستی کادمیوم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با کاهش رطوبت خاک فاکتور انباشت زیستی کادمیوم کاهش یافت هر چند شرایط همزیستی با قارچ، سبب افزایش فاکتور انباشت زیستی کادمیوم شد (شکل ۵a). به‌طورکلی در حضور کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد و در تنش خشکی، فاکتور انباشت زیستی کادمیوم کاهش یافت (شکل ۵b). فاکتور انباشت زیستی ریشه به‌عنوان معیاری برای انتخاب گیاهان بیش‌انباشت‌گر در نظر گرفته می‌شود (Yang et al., 2019). در غلظت زیاد کادمیوم و درصدهای مختلف میکروپلاستیک در شرایط تنش خشکی، نسبت به شرایط بدون تنش، فاکتور انباشت زیستی کاهش یافت (شکل ۵b). در تنش خشکی، مقدار هورمون آبسپیک اسید در گیاه افزایش می‌یابد که با تغییر در فعالیت ژن‌هایی که مسئول عبور یون‌ها از غشاهای سلولی هستند بر میزان جذب کادمیوم تأثیر می‌گذارد. از طرفی، تغییر در ساختار ریشه در شرایط تنش خشکی از جمله طول، تراکم و سطح ریشه سبب کاهش جذب کادمیوم توسط ریشه می‌شود (Haider et al., 2025). همچنین حضور میکروپلاستیک در ریزوسفر با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط خاک سبب کاهش فراهمی کادمیوم برای ریشه می‌شود (Roy et al., 2023). همزیستی قارچ با تغییر محیط خاک، آثار مهمی بر جذب و انتقال کادمیوم به‌ویژه در شرایط بدون خشکی و خشکی متوسط دارد. میسلیم‌های قارچ می‌تواند کادمیوم را در ریشه بی‌تحرك نموده و به‌طور مؤثر توان انتقال کادمیوم به شاخساره را کاهش دهد که سبب افزایش انباشت زیستی کادمیوم در ریشه می‌شود (Pu et al., 2024). اما در شرایط خشکی شدید با وجود ثابت ماندن جمعیت قارچ، فعالیت‌های متابولیکی خاک و ترشحات ریشه کاهش یافته و اثر قارچ بر افزایش انتقال کادمیوم محدود می‌شود (Parsamanesh and Sadeghi, 2023).

کادمیوم در ریشه را افزایش داده که مقداری از آن به شاخساره انتقال می‌یابد (Li et al., 2023؛ Lin et al., 2024).

فاکتور انتقال

اثر برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد و همچنین، برهم‌کنش قارچ و خشکی در سطح احتمال پنج درصد بر فاکتور انتقال معنی‌دار بود (جدول ۲). فاکتور انتقال کادمیوم با افزایش تنش آبی در خاک و به‌ویژه در غلظت‌های زیاد میکروپلاستیک روندی کاهشی نشان داد. البته در شرایط بدون تنش آبی، نیز این روند به‌ویژه در میکروپلاستیک ۱ درصد، مشاهده شد (شکل ۴b). در سطوح تنش خشکی ۱ درصد، ۳۵٪FC و ۶۵٪FC کاهش فاکتور انتقال در اثر حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در مقایسه با شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۶۱/۹ و ۶۹/۱۵ درصد بود (شکل ۴b). در شرایط همزیستی با قارچ، فاکتور انتقال در وضعیت بدون تنش رطوبتی، اندکی منجر به افزایش فاکتور انتقال شد ولی با کاهش رطوبت خاک به ۳۵٪FC و ۶۵٪FC نسبت به شرایط بدون همزیستی تفاوتی در این مورد مشاهده نشد (شکل ۴a). فاکتور انتقال شاخص کلیدی برای سنجش توانایی گیاهان در انتقال فلزات سنگین به شاخساره است (Shukla et al., 2022). کاهش فاکتور انتقال احتمالاً ناشی از جذب کادمیوم توسط MPs از راه اتصال به سطح ریشه بوده که سبب انباشت بیشتر کادمیوم در ناحیه ریزوسفر می‌شود و انتقال کادمیوم به شاخساره را کاهش می‌دهد (Huang et al., 2023). همچنین میسلیم‌های قارچ می‌تواند کادمیوم را در ریشه بی‌حرکت نموده و سبب کاهش فاکتور انتقال کادمیوم شوند (Pu et al., 2024). همچنین گزارش شده است همزیستی با ریزجانداران محرک رشد گیاه و قارچ‌های میکوریزا می‌تواند رشد گیاه و تثبیت کادمیوم در ریشه را افزایش دهد؛ اما در شرایط خشکی، محدودیت جریان آب و تثبیت فلز در ریشه موجب می‌شود که انتقال کادمیوم به شاخساره تغییر قابل‌توجهی نداشته باشد (Parsamanesh and Sadeghi, 2023).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تنش خشکی (100%FC و 65%FC، 35%FC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* (a)، و اثر برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC0، PVC0.1، PVC1) در سطوح تنش خشکی (100%FC و 65%FC، 35%FC) بر فاکتور انتقال کادمیوم. ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

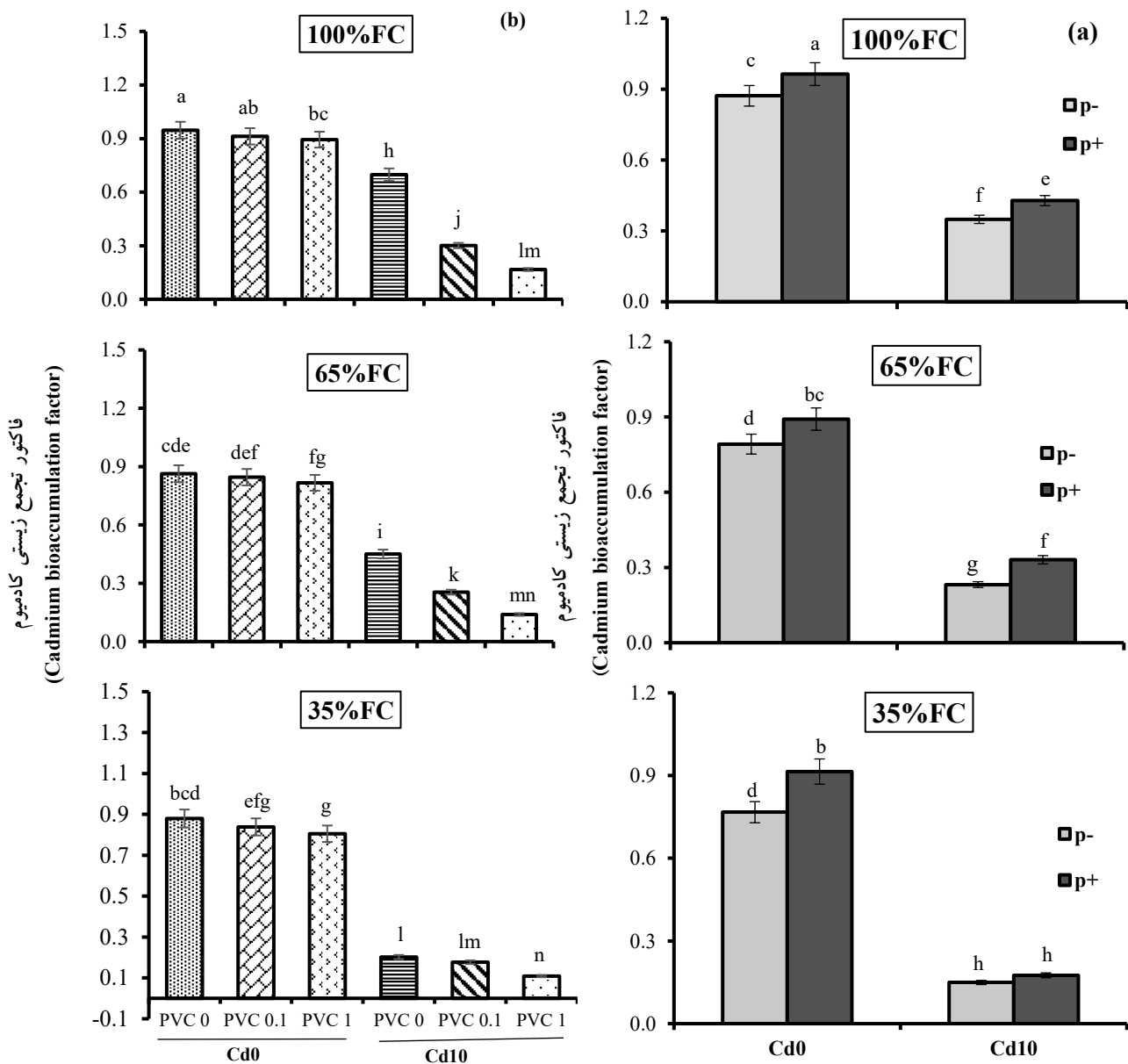
Fig. 4. Mean comparisons for the interaction effect of drought stress (35%FC, 65%FC and 100%FC) under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* (a), and the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress levels (35%FC, 65%FC and 100%FC) (b) on the cadmium transfer factor. Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

بر غلظت عنصر روی در ریشه و شاخساره گیاه در سطح احتمال

غلظت عنصر روی در ریشه و شاخساره

یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). به‌طورکلی، غلظت روی در

اثر برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و تنش خشکی (35 FC، 65 FC و 100 FC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* (a)، و اثر برهم‌کنش (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) در سطوح تنش خشکی (35%FC، 65%FC و 100%FC) (b) بر فاکتور انباشت زیستی کادمیوم. ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

Fig. 5. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and drought stress (35%FC, 65%FC and 100%FC) under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with *P. indica* (a), and the interaction effect of cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress levels (35%FC, 65%FC and 100%FC) (b) on the cadmium bioaccumulation factor. Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

و میکروپلاستیک ۱ درصد تحت شرایط رطوبتی 100%FC برابر ۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و حضور قارچ سبب افزایش آن

ریشه و شاخساره با تشدید کمبود آب خاک کاهش یافت. در شرایط بدون همزیستی، غلظت روی در ریشه در حضور کادمیوم

جدول ۳. تجزیه واریانس غلظت عناصر روی، آهن، منیزیم، کلسیم ریشه و شاخساره در گیاهچه کوشیا تحت تأثیر قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک

Table 3. Analysis of variance for the concentrations of zinc, iron, magnesium, and calcium in roots and shoots of Koshia seedlings as affected by fungus, drought, cadmium, and microplastic

(Mean squares) میانگین مربعات								درجه آزادی df	منابع تغییر Sources of variation
کلسیم Ca		منیزیم Mg		آهن Fe		روی Zn			
شاخساره Shoot	ریشه Root	شاخساره Shoot	ریشه Root	شاخساره Shoot	ریشه Root	شاخساره Shoot	ریشه Root		
813**	116**	18.1**	19.6**	3.86**	2.34**	0.005**	0.003**	1	قارچ (P) <i>P. indica</i>
680**	336**	190**	100**	4.85**	56.5**	0.06**	0.08**	2	خشکی (D) Drought
8705**	2461**	518**	190**	2.64**	148**	0.23**	0.18**	1	کادمیوم (C) Cadmium
795**	369**	60.6**	47.9**	0.56**	10.5**	0.02**	0.01**	2	میکروپلاستیک (M) Microplastics
25.2*	2.14 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.31 ^{ns}	1.14**	0.07 ^{ns}	0.0004**	0.002**	2	P×D
0.01 ^{ns}	0.71 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.04**	0.004 ^{ns}	0.003**	0.0004**	1	P×C
2.12 ^{ns}	3.19 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.02**	0.05 ^{ns}	0.001**	0.0002**	2	P×M
58.01**	144**	18.9**	0.31 ^{ns}	0.27**	13.7**	0.03**	0.01**	2	D×C
74.4**	12.1**	4.08**	0.40 ^{ns}	0.05**	0.87**	0.001**	0.002**	4	D×M
60.1**	15.2**	10.4**	5.32**	0.05**	0.60**	0.0009**	0.003**	2	C×M
0.26 ^{ns}	4.99 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.47 ^{ns}	0.009**	0.12 ^{ns}	0.0002**	0.0005**	2	P×D×C
22.3**	^{ns} 0.54	0.67 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.01**	0.08 ^{ns}	0.0003**	0.0001**	4	P×D×M
11.5 ^{ns}	0.54 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.85*	0.004*	0.01 ^{ns}	0.0008**	0.0001**	2	P×C×M
85.04**	7.42**	6.28**	2.31**	0.03**	0.31**	0.0005**	0.001**	4	D×C×M
18.3*	1.11 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.005**	0.08 ^{ns}	0.00002**	0.0002**	4	P×D×C×M
5.78	1.84	0.45	0.26	0.001	0.05	0.0005	0.00002	72	خطا Error
5.02	5.65	4.42	5.26	5.49	5.01	6.51	6.05	–	ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

*, **, and ^{ns} به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و اثر غیرمعنی دار است.

*, **, and ^{ns} indicate significant effect at the 5 and 1% probability levels, and non-significant effect, respectively.

از سوی دیگر، غلظت روی در شاخساره نیز با افزایش شدت خشکی کاهش یافت؛ ولی همزیستی تأثیری بر مقدار غلظت روی در شاخساره با حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱/۰ و ۱ درصد در سطوح تنش خشکی ۶۵٪FC و ۳۵٪FC نداشت (جدول ۶).

شد (جدول ۴). غلظت عنصر روی در ریشه با افزایش تنش خشکی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در شرایط همزیستی و بدون همزیستی تفاوت معنی داری را نشان نداد (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم کنش کادمیوم (Cd)، میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) و تنش خشکی در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* بر غلظت روی، آهن، منیزیم و کلسیم در ریشه

Table 4. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd), microplastics (PVC) and drought stress in symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with the fungus *P. indica* on the content of zinc (Zn), iron (Fe), magnesium (Mg), and calcium (Ca) in root

کلسیم Ca	منیزیم Mg	آهن Fe	روی Zn	پلی وینیل کلراید Polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg ⁻¹)	خشکی Drought (Field capacity, %FC)
(mg kg ⁻¹ DW)						
P-	P-	P-	P+	P-		
37.4 ^a	4.82 ^k	8.48 ^a	0.26 ^a	0.24 ^b	0	100%FC
35.3 ^b	6.30 ^j	7.82 ^b	0.18 ^c	0.18 ^c	0	
30.2 ^c	8.67 ⁱ	7.17 ^c	0.17 ^d	0.13 ^f	1	
21.4 ^{fg}	9.07 ^{hi}	4.67 ^h	0.09 ^h	0.07 ^{j-l}	0	
21.0 ^{gh}	9.40 ^{f-h}	4.21 ^j	0.09 ^{hi}	0.06 ^l	10	
18.7 ⁱ	9.93 ^{ef}	3.26 ^k	0.06 ^{kl}	0.04 ^{mn}	1	
30.1 ^c	6.66 ^j	6.29 ^d	0.16 ^{de}	0.15 ^e	0	65%FC
25.4 ^e	8.95 ^{hi}	5.95 ^e	0.12 ^g	0.14 ^f	0	
22.7 ^f	9.71 ^{fg}	5.66 ^f	0.09 ^{hi}	0.08 ⁱ	1	
21.8 ^{fg}	10.3 ^{de}	4.52 ^{hi}	0.08 ^{jk}	0.07 ^{n-p}	0	
21.1 ^{gh}	10.7 ^d	4.41 ^{h-j}	0.06 ^m	0.05 ^{pq}	10	
17.1 ^j	11.9 ^c	4.23 ^j	0.02 ^{rt}	0.02 ^{s-u}	1	
28.7 ^{cd}	9.17 ^{g-i}	5.34 ^g	0.07 ^j	0.05 ^m	0	35%FC
27.2 ^d	9.67 ^{fg}	4.31 ^{ij}	0.07 ^{j-l}	0.04 ^{no}	0	
21.4 ^{fg}	11.4 ^c	3.35 ^k	0.06 ^l	0.02 ^{qr}	1	
19.8 ^{hi}	11.5 ^c	2.97 ^l	0.03 ^{o-q}	0.01 ^{s-u}	0	
19.6 ^{hi}	12.5 ^b	2.81 ^l	0.02 ^{q-s}	0.01 ^{tu}	10	
12.0 ^k	13.7 ^a	2.13 ^m	0.01 ^{tu}	0.01 ^u	1	
1.56	0.58	0.28	0.008	0.008	-	LSD _{0.05}

در هر صفت برای هر دو ستون شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-)، تیمارهای با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند. برای صفاتی که اثر همزیستی با قارچ *P. indica* معنی دار نبود، تنها داده‌های شرایط بدون همزیستی (P-) ارائه شده‌اند.

In each trait, for both columns of symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions, treatments with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test. For traits which the effect of symbiosis with the fungus *P. indica* was not significant, only data for the non-symbiotic (P-) condition are presented.

ناشی از اختلال در جذب آب توسط سیستم ریشه، کاهش پتانسیل آب و فشار آماس و همچنین آسیب به یکپارچگی غشاء و ساختار منظم پروتئین‌ها دانستند که در نهایت منجر به کمبود عنصر روی در گیاه می‌شود. از سوی دیگر، حضور کادمیوم در شرایط تنش خشکی، سبب کمبود روی در اندام‌های مختلف گیاه

سازوکارهای جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان تابع رطوبت خاک بوده به‌طوری‌که کاهش رطوبت، سرعت و جذب عناصر را تغییر می‌دهد (Aslanpour et al., 2019). هماهنگ با نتایج پژوهش حاضر، (Weisany et al. (2021 نیز کاهش عنصر روی در گیاه ذرت را در شرایط خشکی گزارش کردند که این یافته را

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش کادمیوم (Cd) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC) در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) (با قارچ *P. indica* بر محتوای منیزیم ریشه)

Table 5. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd) and microplastics (PVC) in symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with the fungus *P. indica* on the content of magnesium (Mg) in root

منیزیم Mg (mg kg ⁻¹)		پلی‌وینیل کلراید Polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg ⁻¹)
P+	P-		
7.38 ^e	6.39 ⁱ	0	0
8.68 ^d	7.94 ^g	0.1	
10.4 ^{ab}	9.48 ^e	1	
10.9 ^c	9.75 ^h	0	10
11.4 ^b	10.3 ^f	0.1	
11.9 ^a	11.7 ^d	1	
0.48	0.48	—	LSD _{0.05}

برای هر دو ستون شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) تیمارهای با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

For both columns of symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions, treatments with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test.

و میکروپلاستیک ۱ درصد، همزیستی با قارچ تأثیر محسوسی بر جذب آهن در شاخساره نداشت. با این حال، در سطوح رطوبتی 100%FC و 65%FC، تیمار فوق در همزیستی با قارچ موجب افزایش قابل توجهی در غلظت آهن شاخساره در مقایسه با شرایط بدون قارچ شد (جدول ۶). آهن عنصری مهم برای بیوسنتز کلروفیل و مسیرهای مختلف بیوشیمیایی گیاهان به شمار می‌رود (Vinod Kumar et al., 2024). (Weisany et al., 2021) دریافتند که در تنش خشکی میزان جذب و انتقال عنصر آهن در ذرت کاهش یافته است. گزارش شده است خشکی شدید همراه آلودگی خاک به کادمیوم باعث عدم تعادل جذب آهن و کاهش ورود آن به سلول‌های گیاهی می‌شود (Dikšaitytė et al., 2023). جذب کمتر عناصر غذایی از جمله آهن در شرایط کمبود آب در سورگوم (Symaniczik et al., 2018) نیز گزارش شده است. همچنین PVC-MPs بر جذب عناصر غذایی توسط ریشه و انتقال آن‌ها به قسمت‌های مختلف گیاه تأثیر می‌گذارد. کاهش محتوای آهن بر اثر تنش PVC-MPs در گیاه گوجه فرنگی گزارش شده است (Chang et al., 2024). در گیاهچه‌های خردل هندی

کلزا در کنار جذب کادمیوم شده است (Diksaityte et al., 2023). کادمیوم عمدتاً از راه کانال‌های کاتیونی عنصر روی یا ناقل‌های سایر کاتیون‌های دوزفرتی وارد سلول‌های گیاه شده و در نتیجه جذب روی را کاهش می‌دهد (Shorobi et al., 2023). همچنین کاهش جذب عناصر غذایی از راه اتصال MPs به ریشه و بستن کانال‌های جذب عناصر غذایی، در جذب و انتقال آن‌ها به بافت‌های هوایی گیاه از جمله برگ نقش اساسی دارد (Shorobi et al., 2023).

غلظت عنصر آهن در ریشه و شاخساره

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت آهن ریشه و اثر برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر محتوای آهن شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۳). غلظت آهن ریشه در شرایط تنش خشکی در حضور کادمیوم کاهش یافت. همچنین با افزایش میکروپلاستیک به ۱ درصد، غلظت آهن ریشه به‌طور قابل توجهی کاهش نشان داد (جدول ۴). در سطح تنش خشکی ۳۵ درصد در حضور کادمیوم

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر برهم کنش کادمیوم (Cd)، میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) و تنش خشکی در شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-) با قارچ *P. indica* بر غلظت روی، آهن، منیزیم و کلسیم شاخساره

Table 6. Mean comparisons for the interaction effect of cadmium (Cd), microplastics (PVC) and drought stress in symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions with the fungus *P. indica* on the content of zinc (Zn), iron (Fe), magnesium (Mg), and calcium (Ca) in shoot

کلسیم Ca		منیزیم Mg		آهن Fe (mg kg ⁻¹ DW)		روی Zn		پلی وینیل کلراید Polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg ⁻¹)	خشکی Drought (Field capacity, %FC)
P+	P-	P-	P+	P-	P+	P-	P-			
80.3 ^a	65.6 ^b	9.81 ^l	1.73 ^a	0.93 ^g	0.28 ^a	0.20 ^c	0			100%FC
58.4 ^{c-f}	52.8 ^{g-i}	11.0 ^k	1.60 ^b	0.84 ^h	0.21 ^b	0.19 ^d	0.1		0	
52.92 ^{h-j}	52.2 ^{g-j}	11.2 ^k	1.46 ^c	0.66 ^l	0.17 ^c	0.16 ^f	1			
52.0 ^{g-j}	45.8 ^{kl}	15.8 ^{fg}	1.19 ^e	0.50 ^{mn}	0.08 ⁱ	0.07 ^j	0			
49.2 ^{i-k}	40.5 ^{mn}	16.5 ^{ef}	1.03 ^f	0.47 ⁿ	0.03 ^{n-p}	0.03 ^{op}	0.1		10	
45.6 ^{kl}	38.7 ^{m-p}	17.1 ^{de}	0.93 ^g	0.19 ^{u-w}	0.02 ^q	0.02 ^q	1			
61.9 ^{bc}	58.7 ^{cd}	12.2 ^j	1.40 ^d	0.76 ^{ij}	0.18 ^c	0.15 ^g	0			65%FC
54.6 ^{fg}	50.8 ^{g-j}	12.8 ^{ij}	0.80 ^{hi}	0.47 ⁿ	0.12 ^h	0.11 ^h	0.1		0	
53.6 ^g	49.5 ^{h-k}	13.1 ⁱ	0.73 ^{jk}	0.36 ^o	0.08 ⁱ	0.07 ^j	1			
40.3 ^m	37.7 ^{n-p}	13.3 ⁱ	0.70 ^{kl}	0.33 ^{op}	0.05 ^k	0.05 ^k	0			
36.8 ^{n-q}	33.3 ^{q-s}	14.7 ^h	0.54 ^m	0.29 ^{pq}	0.03 ^{n-p}	0.03 ^p	0.1		10	
35.9 ^{o-r}	30.4 ^s	18.9 ^c	0.53 ^m	0.18 ^{u-w}	0.01 ^q	0.01 ^{qr}	1			
58.6 ^{c-e}	54.7 ^{e-g}	14.6 ^h	0.38 ^o	0.36 ^o	0.09 ⁱ	0.05 ^{kl}	0			35%FC
58.0 ^{c-f}	53.4 ^{gh}	15.3 ^{gh}	0.27 ^{qr}	0.26 ^{q-s}	0.07 ^j	0.04 ^{l-n}	0.1		0	
57.5 ^{d-f}	48.8 ^{ijk}	16.8 ^e	0.25 ^{q-t}	0.22 ^{s-v}	0.05 ^{k-m}	0.04 ^{m-o}	1			
42.4 ^{lm}	37.0 ^{n-q}	17.8 ^d	0.23 ^{r-u}	0.20 ^{t-v}	0.03 ^{n-p}	0.04 ^{n-p}	0			
39.2 ^{mn}	35.1 ^{p-r}	20.5 ^b	0.17 ^{vw}	0.15 ^{wx}	0.03 ^p	0.03 ^{op}	0.1		10	
32.8 ^{rs}	26.1 ^t	21.8 ^a	0.11 ^x	0.10 ^x	0.01 ^{qr}	0.01 ^r	1			
3.91	3.91	0.77	0.05	0.05	0.008	0.008	-		-	LSD _{0.05}

در هر صفت برای هر دو ستون شرایط همزیستی (P+) و بدون همزیستی (P-)، تیمارهای با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند. برای صفاتی که اثر همزیستی با قارچ *P. indica* معنی دار نبود، تنها داده‌های شرایط بدون همزیستی (P-) ارائه شده‌اند.

In each trait, for both columns of symbiotic (P+) and non-symbiotic (P-) conditions, treatments with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test. For traits which the effect of symbiosis with the fungus *P. indica* was not significant, only data for the non-symbiotic (P-) condition are presented.

پژوهش حاضر، یافته‌های Karimi et al. (2022) نیز اثر همزیستی بر بهبود جذب و انتقال آهن در ریشه و شاخساره گندم را تأیید کرد. همچنین نتایج پژوهشی دیگر نیز بر تأثیر مثبت همزیستی بر محتوای آهن گیاه تأکید دارد (Sogonda et al., 2021). پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریزا حتی در

نیز غلظت عنصر آهن در معرض کادمیوم و میکروپلاستیک به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است (Wang et al., 2024). میکروپلاستیک‌ها به دلیل بستن منافذ دیواره سلولی، جذب آب و عناصر غذایی را کاهش داده و در نهایت سبب کاهش زیست‌توده و عملکرد گیاه می‌شوند (Wang et al., 2024). در راستای نتایج

شرایطی که بر جذب آهن توسط ریشه تأثیر مستقیمی ندارند، با توسعه شبکه هیفی و افزایش بیان ژن‌های انتقال‌دهنده آهن مانند IRT1 و FRO2 می‌تواند انتقال آهن به شاخساره را در شرایط تنش خشکی تسهیل نمایند (Begum et al., 2023).

غلظت عنصر منیزیم در ریشه و شاخساره

نتایج جدول ۳ بیان‌گر معنی‌دار شدن اثر برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد و اثر برهم‌کنش سه‌گانه قارچ، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت منیزیم ریشه است. همچنین، اثر برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد بر غلظت منیزیم شاخساره معنی‌دار بود (جدول ۳). کادمیوم و میکروپلاستیک در بستر کشت باعث افزایش منیزیم ریشه شد (جدول ۵). قابل ذکر است در شرایط بدون همزیستی، غلظت منیزیم ریشه در تیمار دارای ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم و میکروپلاستیک ۰/۱ و ۱ درصد به‌ترتیب برابر ۱۰/۳۷ و ۱۱/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، اما در شرایط همزیستی، مقدار آن افزایش یافت (جدول ۵). غلظت منیزیم در ریشه در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در شرایط رطوبتی 100%FC، 65%FC و 35%FC در مقایسه با شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۹/۵، ۱۵/۳ و ۱۸/۶ درصد افزایش یافت (جدول ۴). غلظت منیزیم در شاخساره در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در تیمارهای خشکی 65%FC و 35%FC به‌ترتیب ۴۲/۱ و ۲۲/۳ درصد بیشتر از شاهد کادمیوم بود (جدول ۶). همزیستی بر جذب منیزیم شاخساره تأثیر نداشت، با این‌حال تنش کادمیوم و میکروپلاستیک در شرایط خشکی، جذب منیزیم شاخساره را افزایش داد. خشکی یکی از عوامل مهم محیطی است که بر جذب، انتقال و توزیع عناصر غذایی از جمله منیزیم در گیاهان تأثیر می‌گذارد (Farooqi et al., 2020). منیزیم جزء مرکزی مولکول کلروفیل بوده و در تنظیم فعالیت آنزیم‌ها نیز نقش دارد؛ بنابراین کمبود آن در شرایط تنش می‌تواند آثار منفی بر فتوسنتز و رشد گیاه بگذارد. در برخی موارد،

تنش خشکی باعث افزایش موقت جذب عناصر خاص مانند منیزیم می‌شود که می‌تواند به سازوکارهای سازگاری گیاه در برابر تنش بازگردد (Farooqi et al., 2020). در شرایط خشکی، گیاهان برای مقابله با کمبود آب و حفظ تعادل یونی، جذب برخی مواد معدنی را افزایش می‌دهند. در تنش خشکی شدید، جذب منیزیم توسط ریشه‌های موین افزایش یافته تا به تنظیم فشار اسمزی و حفظ عملکرد آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کمک کند (Li et al., 2023). همچنین، حضور MPs در خاک می‌تواند ساختار فیزیکی خاک را تغییر داده و تهویه و نفوذپذیری آن را بهبود بخشد، و در نتیجه دسترسی ریشه‌ها به برخی عناصر معدنی افزایش یافته و جذب منیزیم ارتقاء می‌یابد (Lozano et al., 2020). با این‌حال، آثار MPs بر جذب عناصر غذایی پیچیده بوده و به نوع، اندازه و غلظت آن‌ها وابسته است؛ برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند MPs می‌تواند با مسدودکردن منافذ ریشه یا جذب عناصر غذایی، جذب منیزیم و سایر عناصر را کاهش دهند (Xu et al., 2024). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که تنش‌های محیطی مانند خشکی، آلودگی کادمیوم و MPs، می‌تواند منجر به افزایش جذب منیزیم شود، که احتمالاً به دلیل رقابت یونی و یا اختلال در جذب سایر کاتیون‌ها در خاک است (Hildebrandt et al., 2021). در شرایط همزیستی با قارچ *P. indica* جذب منیزیم در ریشه بهبود یافت. در واقع، قارچ همزیست با تغییر ساختار و افزایش طول ریشه توسط هیف‌های خارج، جذب منیزیم توسط ریشه را افزایش می‌دهند (Ghorbani et al., 2019). به‌طورکلی همزیستی با قارچ میکوریزا می‌تواند محتوای منیزیم ریشه را افزایش دهد که حاکی از نقش مؤثر همزیستی در بهبود جذب عناصر غذایی است. با این‌حال همزیستی بر محتوای منیزیم شاخساره تأثیری نداشت که احتمالاً مربوط به محدودیت‌های انتقال درون‌گیاه و اولویت گیاه در تخصیص منیزیم به ریشه است. یافته‌ها تأکید می‌کند که اثر همزیستی بر جذب عناصر غذایی ممکن است در ریشه و شاخساره متفاوت بوده و بررسی مسیرهای انتقال درون گیاه برای درک کامل پاسخ گیاه به میکوریزا ضروری است (Xiao et al., 2014).

غلظت عنصر کلسیم در ریشه و شاخساره

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کلسیم ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین اثر برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کلسیم شاخساره در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط رطوبتی 100%FC، غلظت کلسیم ریشه هنگامی که گیاه در معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و ۱ درصد میکروپلاستیک خاک قرار گرفت، برابر ۱۸/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. با این حال، غلظت کلسیم ریشه در سطوح تنش خشکی 65%FC و 35%FC در تیمار فوق به ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۴). در شرایط رطوبتی مختلف، حضور میکروپلاستیک ۰/۱ درصد در شرایط بدون کادمیوم تفاوت معنی‌داری در جذب کلسیم ریشه ایجاد نکرد؛ اما افزایش غلظت میکروپلاستیک به ۱ درصد منجر به کاهش بیشتر غلظت کلسیم در ریشه شد (جدول ۴). لازم به ذکر است اثر همزیستی با قارچ در برهم‌کنش با عوامل تنشی بر غلظت کلسیم ریشه معنی‌دار نبود؛ اما به تنهایی اثر مثبت بر غلظت کلسیم ریشه داشت. در شرایط بدون همزیستی، غلظت کلسیم شاخساره در معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد خاک تحت شرایط رطوبتی 100%FC، 65%FC و 35%FC به ترتیب برابر ۳۸/۷۶، ۳۰/۴۳ و ۲۶/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد؛ اما، در شرایط همزیستی غلظت کلسیم شاخساره در تمام سطوح رطوبتی افزایش یافت (جدول ۶). این نتایج نشان‌دهنده نقش مؤثر قارچ مذکور در افزایش جذب کلسیم شاخساره تحت تنش خشکی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک است. به‌طورکلی کمبود آب خاک سبب کاهش جذب کلسیم توسط ریشه و شاخساره کوشیا شد که با گزارش‌های Wei et al. (2022) و Tekdal et al. (2018) همخوانی دارد. قابل ذکر است فتوسیستم II فتوستنزی شامل ساختار Mn_4CaO_5 در مرکز خود است که مسئول تجزیه آب و تولید اکسیژن بوده و کلسیم برای کارکرد درست آن ضروری است. از طرفی در شرایط تنش خشکی،

عنصر کادمیوم به‌صورت رقابتی جایگاه‌های اتصال کلسیم را در فتوسیستم II اشغال نموده و عملکرد نوری کمپلکس تجزیه آب را مهار نموده و جذب کلسیم توسط گیاه را کاهش می‌دهد (Diksaityte et al., 2023). از سوی دیگر، MPs با اختلال در کارکرد ریشه، جذب عناصر را مختل می‌کند (Jiang et al., 2024). کادمیوم در حضور میکروپلاستیک سبب کاهش توسعه ریشه گیاه و جذب عناصر غذایی شده، و در نتیجه جذب و انتقال عناصر از جمله کلسیم را مختل می‌نماید (Bosker et al., 2019). در تأیید نتایج پژوهش حاضر، Ghorbani et al. (2019) بیان کردند که در شرایط تنش، همزیستی در مقایسه با شرایط بدون همزیستی جذب عنصر کلسیم را در گیاه گوجه فرنگی بهبود بخشیده و منجر به افزایش انباشت کلسیم در ریشه گیاه شده است. همزیستی با تعدیل جریان یون‌های کلسیم در غشای پلاسمایی، موجب تقویت انتقال سیگنال‌های مولکولی شده و به دلیل حفظ نفوذپذیری انتخابی غشاء، پایداری عملکرد سلولی را در شرایط تنش حفظ می‌کند (Kaboosi et al., 2023). از این رو گیاهان همزیست با قارچ شانس بهتری برای جذب آب و عناصر غذایی در این شرایط دارا می‌باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد قارچ *S. indica* پتانسیل خوبی برای همزیستی با گیاه کوشیا در شرایط آلودگی خاک به کادمیوم و PVC-MPs حتی در شرایط تنش خشکی دارد. گرچه درصد همزیستی قارچ با ریشه گیاه در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک و تحت تنش خشکی روندی کاهش داشت، اما اثر مثبت قارچ بر رشد گیاه و جذب عناصر قابل توجه بود. کمبود رطوبت خاک تا ۳۵ درصد گنجایش مزرعه‌ای در حضور میکروپلاستیک سبب کاهش انباشت کادمیوم و در نتیجه کاهش فاکتورهای انتقال و انباشت زیستی آن گردید. ولی همزیستی گیاه با قارچ *P. indica* باعث افزایش جذب کادمیوم در ریشه (به‌طور میانگین حدود ۱۴ درصد) در مقایسه با تیمارهای بدون قارچ شد. در شرایط تنش خشکی و در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک، انباشت

کادمیوم در ریشه حتی تحت آلودگی MPs، گیاه‌پالایی را ارتقا می‌بخشد، گرچه این توانایی در شرایط تنش آبی تا حدودی کاهش می‌یابد.

تشکر و سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین بخشی از هزینه‌ها و امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

زیست‌توده و جذب و انباشت عناصر غذایی مانند روی، آهن و کلسیم در ریشه و شاخساره گیاه کاهش یافته و مقدار منیزیم افزایش یافت. با این حال، در شرایط همزیستی انباشت و غلظت عناصر غذایی مهم از جمله روی، آهن، منیزیم و کلسیم در ریشه و شاخساره افزایش نشان داد. نتایج حاکی از آن است که کوشیا به عنوان یک گیاه مقاوم به خشکی، دارای پتانسیل مناسبی برای گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به کادمیوم است، هرچند حضور MPs در خاک از این پتانسیل می‌کاهد. همچنین قارچ *S. indica* با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و رشدی گیاه کوشیا و حفظ تعادل یونی در شرایط تنش ترکیبی، نه تنها به نظام زیستی پایدار کمک می‌نماید، بلکه به دلیل افزایش توان گیاه در جذب و تجمع

منابع مورد استفاده

References

- Abbasi, S., Jaafarzadeh, N., Zahedi, A., Ravanbakhsh, M., Abbaszadeh, S., Turner, A., 2023. Microplastics in the atmosphere of Ahvaz City, Iran. J. Environ. Sci. 126, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.044>.
- Alloway, B.J., 2013. Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. In: Alloway, B.J. (Ed.), Heavy Metals in Soils. 3rd Edition, Springer, Netherlands, Dordrecht, 22, 4–18.
- Afzalinejad, F., Hamidpour, M., Ghasemi, S., Khodayegan, P., Akhgar, A., 2025. Effect of rubber powder on some growth characteristics of wheat (cv. Barzegar) under salinity stress. J. Soil Plant Interact. 16(1), 71–87. <https://doi.org/10.47176/jspi.16.1.03206>.
- Aslanpour, M., Baneh, H.D., Tehranifar, A., Shoor, M., 2019. Effect of water stress on growth traits of roots and shoots (fresh and dry weights, and amount of water) of the white seedless grape. Int. Trans. J. Eng. Manage. Appl. Sci. Technol. 10(2), 169–181. <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2019.17>.
- Begum, N., Xiao, Y., Wang, L., Li, D., Irshad, A., Zhao, T., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* alleviates drought stress in soybean with overexpressing the GmSPL9d gene by promoting photosynthetic apparatus and regulating the antioxidant system. Microbiol. Res. 273, 127398. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127398>.
- Boorboori, M.R., Zhang, H., 2024. The effect of cadmium on soil and plants, and the influence of *Serendipita indica* (*Piriformospora indica*) in mitigating cadmium stress. Environ. Geochem. Health. 46(11), 426. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02231-9>.
- Bosker, T., Olthof, G., Vijver, M.G., Baas, J., Barmentlo, S. H., 2019. Significant decline of *Daphnia magna* population biomass due to microplastic exposure. Environ. Pollut. 250, 669–675. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.067>.
- Chang, N., Chen, L., Wang, N., Cui, Q., Qiu, T., Zhao, S., He, H., Zeng, Y., Dai, W., Duan, C., Fang, L., 2024. Unveiling the impacts of microplastic pollution on soil ecosystems: A comprehensive review. Sci. Total Environ. 951, 175643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175643>.
- Cheraghi, M., Moteszarezaheh, B., Mousavi, S. M., Ma, Q., Ahmadabadi, Z., 2023. Silicon (Si): A regulator nutrient for optimum growth of wheat under salinity and drought stresses—a review. J. Plant Growth Regul. 42(9), 5354–5378. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-10959-4>.
- Colzi, I., Renna, L., Bianchi, E., Castellani, M.B., Coppi, A., Pignattelli, S., Gonnelli, C., 2022. Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L. J. Hazard. Mater. 423, 127238. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127238>.
- Dikšaitytė, A., Kniūpiytė, I., Žaltauskaitė, J., 2023. Drought-free future climate conditions enhance cadmium phytoremediation capacity by *Brassica napus* through improved physiological status. J. Hazard. Mater. 452, 131181. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131181>.
- Erdem, H., Gence, C.Ç., Öztürk, M., Buhan, E., Kholikulov, S.T., Kaya, Y., 2025. Microplastics in soil increase

- cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water Air Soil Pollut.* 236(9), 575. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08222-5>.
13. Farooqi, Z.U.R., Ayub, M.A., ur Rehman, M.Z., Sohail, M.I., Usman, M., Khalid, H., Naz, K., 2020. Regulation of drought stress in plants. In: Tripathi, D.K., Singh, V.P., Chauhan, D.K., Sharma, S., Prasad, S.M., Dubey, N.K., Ramawat, N. (Eds.), *Plant Life under Changing Environment*. Academic Press, Amsterdam. pp. 77–104. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818204-8.00004-7>.
 14. Ghaffari, M.R., Mirzaei, M., Ghabooli, M., Khatabi, B., Wu, Y., Zabet-Moghaddam, M., Salekdeh, G.H., 2019. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* improves drought stress adaptation in barley by metabolic and proteomic reprogramming. *Environ. Exp. Bot.* 157, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.002>.
 15. Ghorbani, A., Omran, V.O.G., Razavi, S.M., Pirdashti, H., Ranjbar, M., 2019. *Piriformospora indica* confers salinity tolerance on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) through amelioration of nutrient accumulation, K^+/Na^+ homeostasis and water status. *Plant Cell Rep.* 38(9), 1151–1163. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02434-w>.
 16. Haider, F.U., Ain, N.U., Siddique, K.H., Farooq, M., Li, Y., 2025. Enhancing bread wheat resilience to cadmium and drought stress: Insights from physiological, morphological, and transcriptomic responses to biochar and 24-epibrassinolide application. *Biochar* 7(1), 59. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00457-z>.
 17. Heris, Z.M., Azarmi, R., Shokouhian, A.A., Esmailpour, B., Gharalar, A.S., 2022. The effect of *Serendipita indica* and *Rhizophagus irregularis* fungi on the growth and nutritional status of lettuce under chromium stress in soilless culture. *J. Soil Plant Interact.* 13(3), 77–90. <https://doi.org/10.47176/jspi.13.3.16223>. (In Persian with English abstract)
 18. Hildebrandt, L., Nack, F.L., Zimmermann, T., Pröfrock, D., 2021. Microplastics as a Trojan horse for trace metals. *J. Hazard. Mater. Lett.* 2, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100035>.
 19. Hirich, A., Choukr-Allah, R., Ragab, R., 2020. *Emerging Research in Alternative Crops*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90472-6>.
 20. Huang, F., Hu, J., Chen, L., Wang, Z., Sun, S., Zhang, W., Jiang, H., Luo, Y., Wang, L., Zeng, Y., Fang, L., 2023. Microplastics may increase the environmental risks of Cd via promoting Cd uptake by plants: A meta-analysis. *J. Hazard. Mater.* 448, 130887. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130887>.
 21. Jangir, P., Shekhawat, P. K., Bishnoi, A., Ram, H., Soni, P., 2021. Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 116, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101691>.
 22. Jiang, M., Zhao, W., Liang, Q., Cai, M., Fan, X., Hu, S., Zhu, Y., Xie, H., Peng, C., Liu, J., 2024. Polystyrene microplastics enhanced the toxicity of cadmium to rice seedlings: Evidence from rice growth, physiology, and element metabolism. *Sci. Total Environ.* 945, 173931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173931>.
 23. Jones, J. B., 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/978142002529>.
 24. 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 Physiol. Rep.* 29(3), 638–650. <https://doi.org/10.1007/s40502-024-00797-1>.
 25. Kaboosi, E., Rahimi, A., Abdoli, M., Ghabooli, M., 2023. Comparison of *Serendipita indica* inoculums and a commercial biofertilizer effects on physiological characteristics and antioxidant capacity of maize under drought stress. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 23(1), 900–911. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01091-5>.
 26. Karimi, R., Amini, H., Ghabooli, M., 2022. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* and zinc attenuate cold stress in grapevine by influencing leaf phytochemicals and minerals content. *Sci. Hortic.* 293, 110665. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110665>.
 27. Khalid, M., Saeed, U.R., Haoxin, T.A.N., Lantian, S.U., Pei, Z.H.O.U., Nan, H.U.I., 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. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60014-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60014-0).
 28. Kumar, R., Ivy, N., Bhattacharya, S., Dey, A., Sharma, P., 2022. Coupled effects of microplastics and heavy metals on plants: Uptake, bioaccumulation, and environmental health perspectives. *Sci. Total Environ.* 836, 155619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155619>.
 29. Liu, B., Jing, D., Liu, F., Ma, H., Liu, X., Peng, L., 2021. *Serendipita indica* alleviates drought stress responses in walnut (*Juglans regia* L.) seedlings by stimulating osmotic adjustment and antioxidant defense system. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 105(23), 8951–8968. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11653-9>.
 30. Liu, X., Chen, A., Wang, Y., Jin, G., Zhang, Y., Gu, L., Li, C., Shao, X., Wang, K., 2022. Physiological and transcriptomic insights into adaptive responses of *Seriphidium transiliense* seedlings to drought stress. *Environ. Exp. Bot.* 194, 104736. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104736>.
 31. Li, Z., Li, Q., Li, R., Zhao, Y., Geng, J., Wang, G., 2020. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27(24), 30306–30314. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09349-0>.
 32. Li, S., Yang, L., Huang, X., Zou, Z., Zhang, M., Guo, W., Addo-Danso, S.D., Zhou, L., 2023. Mineral nutrient uptake, accumulation, and distribution in *Cunninghamia lanceolata* in response to drought stress. *Plants* 12(11), 2140.

- <https://doi.org/10.3390/plants12112140>.
33. Lin, H., Cui, G., Jin, Q., Liu, J., Dong, Y., 2024. Effects of microplastics on the uptake and accumulation of heavy metals in plants: A review. *J. Environ. Chem. Eng.* 12(1), 111812. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111812>.
 34. Lozano, Y.M., Rillig, M.C., 2020. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities. *Environ. Sci. Technol.* 54(10), 6166–6173. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01051>.
 35. Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135749>.
 36. Ma, Y., Hu, J. C., Yu, Y., Cheng, X., Du, Y. L., Zhao, Q., Du, J. D., 2024. Interactive effects of drought and cadmium stress on Adzuki bean seedling growth, DNA damage repair, and Cd accumulation. *Sci. Hortic.* 324, 112624. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112624>.
 37. Marschner, P., Rengel, Z., 2023. Nutrient availability in soils. In: Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*. Academic Press, Amsterdam, pp. 499–522. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00003-4>.
 38. Nei, N., Changmai, U., Kumar, N., Borah, B., Chikkaputtaiah, C., Saikia, R., Phukan, T., 2024. Impact of polyvinyl chloride (PVC) microplastic on growth, photosynthesis and nutrient uptake of *Solanum lycopersicum* L.(Tomato). *Environ. Pollut.* 349, 123994. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123994>.
 39. Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Sadeghpour, A., Maggi, F., Nouraein, M., Morshedloo, M.R., Hano, C., Lorenzo, J.M., 2022. Co-application of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi improves essential oil quantity and quality of sage (*Salvia officinalis* L.) in drought stress conditions. *Plants* 11(13), 1659. <https://doi.org/10.3390/plants11131659>.
 40. Parsamanesh, S., Sadeghi, H., 2023. Modeling the interactions between inter-correlated variables of plant and soil micro-ecology responses under simultaneous cadmium stress and drought. *J. Cleaner Prod.* 418, 138163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138163>.
 41. Pignattelli, S., Broccoli, A., Renzi, M., 2020. Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Sci. Total Environ.* 727, 138609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609>.
 42. Pu, Z.T., Wang, D.D., Song, W.X., Wang, C., Li, Z.Y., Chen, Y.L., Shimozono, T., Yang, Z.M., Tian, Y.Q., Xie, Z. H., 2024. The impact of arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria on peanuts under the combined pollution of cadmium and microplastics. *J. Hazard. Mater.* 469, 133934. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133934>.
 43. Reshna, O.P., Beena, R., Joy, M., Viji, M.M., Roy, S., 2022. Elucidating the effect of growth promoting endophytic fungus *Piriformospora indica* for seedling stage salinity tolerance in contrasting rice genotypes. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 25(5), 583–598. <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00153-5>.
 44. Roy, T., Dey, T.K., Jamal, M. 2023. Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: an imminent concern. *Environ. Monit. Assess.* 195(1), 27. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10654-z>.
 45. Sepehri, M., Khatabi, B. 2021. Combination of siderophore-producing bacteria and *Piriformospora indica* provides an efficient approach to improve cadmium tolerance in alfalfa. *Microb. Ecol.* 81(3), 717–730. <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01629-z>.
 46. Shi, R., Liang, L., Liu, W., Zeb, A., 2022. *Kochia scoparia* L., a newfound candidate halophyte, for phytoremediation of cadmium-contaminated saline soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29(29), 44759–44768. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18895-8>.
 47. Shorobi, F.M., Vyavahare, G.D., Seok, Y.J., Park, J.H., 2023. Effect of polypropylene microplastics on seed germination and nutrient uptake of tomato and cherry tomato plants. *Chemosphere* 329, 138679. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138679>.
 48. Shukla, J., Mohd, S., Kushwaha, A.S., Narayan, S., Saxena, P.N., Bahadur, L., Mishra, A., Shirke, P.A., Kumar, M., 2022. Endophytic fungus *Serendipita indica* reduces arsenic mobilization from root to fruit in colonized tomato plant. *Environ. Pollut.* 298, 118830. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118830>.
 49. Sun, Y., Guo, J., Mur, L.A.J., Xu, X., Chen, H., Yang, Y., Yuan, H., 2024. Nitrogen starvation modulates the sensitivity of rhizobacterial community to drought stress in *Stevia rebaudiana*. *J. Environ. Manage.* 354, 120486. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120486>.
 50. Symanczik, S., Lehmann, M. F., Wiemken, A., Boller, T., Courty, P.E., 2018. Effects of two contrasted *arbuscular mycorrhizal* fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. *Mycorrhiza* 28(8), 779–785. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0853-9>.
 51. Tekdal, D., Çetiner, S., 2018. Investigation of the effects of salt (NaCl) stress and cadmium (Cd) toxicity on growth and mineral acquisition of *Vurulia turcica*. *S. Afr. J. Bot.* 118, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.07.029>.
 52. ur Rahman, S., Khalid, M., Hui, N., Rehman, A., Kayani, S. I., Fu, X., Zheng, H., Shao, J., Khan, A.A., Ali, M., Taheri, A., Tang, K., 2023. *Piriformospora indica* alter root-associated microbiome structure to enhance *Artemisia annua* L. tolerance to arsenic. *J. Hazard. Mater.* 457, 131752. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131752>.
 53. Vinod Kumar, S., Singh, C.D., Rao, K.R., Rajwade, Y.A., Kumar, M., Jawaharlal, D., Asha, K.R., 2024. IoT-based

- smart drip irrigation scheduling and wireless monitoring of microclimate in sweet corn crop under plastic mulching. *Irrig. Sci.* 43(5), 1107–1126. <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00945-3>.
54. Wang, B., Wang, P., Zhao, S., Shi, H., Zhu, Y., Teng, Y., Jiang, G., Liu, S., 2023. Combined effects of microplastics and cadmium on the soil-plant system: phytotoxicity, Cd accumulation and microbial activity. *Environ. Pollut.* 333, 121960. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121960>.
55. Wang, J., Liu, W., Wang, X., Zeb, A., Wang, Q., Mo, F., Lian, Y., 2024. Assessing stress responses in potherb mustard (*Brassica juncea* var. multiceps) exposed to a synergy of microplastics and cadmium: Insights from physiology, oxidative damage, and metabolomics. *Sci. Total Environ.* 907, 167920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167920>.
56. Wei, L., Zhao, H., Wang, B., Wu, X., Lan, R., Huang, X., Chen, B., Chen, G., Jiang, C., Wang, J., Liu, Y., Zheng, Q., 2022. Exogenous melatonin improves the growth of rice seedlings by regulating redox balance and ion homeostasis under salt stress. *J. Plant Growth Regul.* 41(6), 2108–2121. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10417>.
57. Weisany, W., Mohammadi, M., Tahir, N.A.R., Aslanian, N., Omer, D.A., 2021. Changes in growth and nutrient status of maize (*Zea mays* L.) in response to two zinc sources under drought stress. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 21(4), 3367–3377. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00612-y>.
58. Xiao, J.X., Hu, C.Y., Chen, Y.Y., Yang, B., Hua, J., 2014. Effects of low magnesium and an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth, magnesium distribution and photosynthesis of two citrus cultivars. *Sci. Hortic.* 177, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.016>.
59. Xu, H., Chen, C., Pang, Z., Zhang, G., Zhang, W., Kan, H., 2024. Effects of microplastics concentration on plant root traits and biomass: Experiment and meta-analysis. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 285, 117038. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117038>.
60. Yang, S., Zu, Y., Li, B., Bi, Y., Jia, L., He, Y., Li, Y., 2019. Response and intraspecific differences in nitrogen metabolism of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under cadmium stress. *Chemosphere* 220, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.101>.
61. Yang, W., Cheng, P., Adams, C.A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., Wang, F., 2021. Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biol. Biochem.* 155, 108179. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>.
62. Zarebanadkouki, M., Fink, T., Benard, P., Banfield, C.C., 2019. Mucilage facilitates nutrient diffusion in the drying rhizosphere. *Vadose Zone J.* 18(1), 1–13. <https://doi.org/10.2136/vzj2019.02.0021>.
63. Zhang, S., Ni, X., Arif, M., Yuan, Z., Li, L., Li, C., 2020. Salinity influences Cd accumulation and distribution characteristics in two contrasting halophytes, *Suaeda glauca* and *Limonium aureum*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 191, 110230. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110230>.