Effect of *Piriformospora indica* fungus on biomass, bioaccumulation, and translocation of some nutrients in *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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

Abstract

Background and Objective: Drought, cadmium, and microplastics affect nutrient uptake, translocation and plant growth. In this study, the effect of symbiosis with *Piriformospora 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 sandy loam soil. Treatments included drought stress at 35%, 65%, and 100% (control) of field capacity, 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 parameters included biomass, cadmium accumulation in roots and shoots, cadmium translocation factor and bioaccumulation factor, and nutrient concentrations.

Results: The highest percentage of fungal colonization under non-stress conditions was 87%. In treatments with cadmium, microplastic and drought at 65% and 35% of field capacity, 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 absorption in roots by 14% compared to the treatment without fungus. Under stress conditions, the concentrations of zinc, iron, and calcium decreased, while magnesium increased in roots and shoots.

Conclusion: The results showed that *P. indica* fungus coexisted well with the Kochia plant, and by maintaining ionic balance and improving plant growth during combined stress, it not only contributed to a sustainable biological system but also promoted plant phytoremediation by increasing the plant's ability to absorb and accumulate cadmium in the roots, even under microplastic pollution.

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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

اثر قارچ *Piriformospora indica* بر ماده خشک، انباشت زیستی و انتقال برخی عناصر غذایی 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_sepehri@basu.ac.ir

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک، جذب و انتقال عناصر غذایی و رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این پژوهش اثر همزیستی قارچ *Piriformospora indica* بر انباشت ماده خشک و انتقال عناصر غذایی کوشیا (*Bassia scoparia*) تحت آلودگی کادمیوم، میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید و تنش خشکی بررسی شد.

روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در خاک لومی شنی با تنش رطوبتی ۳۵، ۶۵ و ۱۰۰ (شاهد) درصد ظرفیت زراعی، کادمیوم ۰ (شاهد) و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و سه سطح میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید ۰، ۰/۱ و ۱ درصد درحضور یا عدم حضور قارچ انجام شد. وزن زیست توده، انباشت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی، فاکتور انتقال و انباشت زیستی کادمیوم و عناصر غذایی ارزیابی شد.

نتایج: بیشترین همزیستی قارچ با گیاه در شرایط بدون تنش معادل ۸۷ درصد بود. در تیمارهای کادمیوم و میکروپلاستیک در دو وضعیت ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی، کاهش درصد همزیستی و وزن زیست توده به‌ترتیب حدود ۸ و ۳۶ درصد بود. قارچ اثرات 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 میلی‌گرم بر کیلوگرم موجب افزایش جذب کادمیوم در ریشه ها 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 اندام هوایی افزایش یافت.

نتیجه‌گیری کلی: نتایج نشان داد که قارچ *P. indica* به خوبی با کوشیا همزیستی داشته و با حفظ تعادل یونی و بهبود رشد طی تنش ترکیبی، نه تنها به نظام زیستی پایدار کمک نموده بلکه با افزایش توان گیاه در جذب و تجمع کادمیوم در ریشه حتی تحت آلودگی میکروپلاستیک، گیاه پالایی گیاه را ارتقا می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌وینیل‌کلراید، تنش رطوبتی، انباشت زیستی کادمیوم، عناصرمعدنی، قارچ میکوریزا.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

۱- مقدمه

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های اکوسیستم‌های کشاورزی است که اثرات نامطلوبی بر رشد و تولید گیاهان دارد (Liu et al., 2022). تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر گذاشته و با ایجاد اختلال در متابولیسم 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 طریق مکانیسم‌های مختلف انتشار، جریان توده‌ای و انتقال فعال توسط ریشه‌ها جذب می‌شوند (Marschner & Rengel, 2023). فراهمی عناصر غذایی در ناحیه ریزوسفری، جایی که تبادلات بین ریشه و خاک به‌صورت فعال رخ می‌دهد، نقش کلیدی در جذب عناصر در گیاه دارد (Cheraghi et al., 2023). یکی از محدودکننده‌ترین عوامل محیطی مؤثر در فراهمی عناصر غذایی، میزان رطوبت خاک است. تنش کمبود آب باعث کاهش پیوستگی فاز مایع در منافذ خاک شده، 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 به‌عنوان یک عنصر سمی و غیرضروری، یکی از آلاینده‌هایی است که به‌طور عمده از طریق فعالیت‌های انسانی وارد خاک و گیاه می‌شود. با توجه به اثرات سمی فلزات سنگین بر رشد و عملکرد گیاهان، غلظت بحرانی این فلزات متفاوت بوده و برای کادمیوم، دامنه طبیعی غلظت در گیاهان حدود ۲/۴-۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و غلظت بحرانی ۵ تا ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گزارش شده است (Alloway, 2013). کادمیوم توسط ریشه‌های گیاه جذب و با انتقال و انباشت در اندام‌هوایی، رشد و عملکرد گیاه را مختل و از طریق زنجیره غذایی تهدیدی جدی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند. از سوی دیگر مقادیر زیاد کادمیوم در خاک فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه شامل اندازه سلول، فتوسنتز و تنفس و همچنین جذب عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Tekdal, 2018). در سال‌های اخیر، میکروپلاستیک‌ها نیز به‌عنوان یک تهدید نوظهور، بر اکوسیستم‌های کشاورزی تأثیر داشته و به‌عنوان یکی از منابع آلودگی خاک در نظر گرفته می‌شوند (Pignattelli et al., 2020). داده‌های رسمی در خصوص میزان آلودگی میکروپلاستیک در خاک‌های کشاورزی محدود بوده ولی مطالعات اولیه حاکی از حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های شهری، صنعتی و کشاورزی ایران دارد (Abbasi et al., 2023). حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک می‌تواند جذب و تجمع عناصر غذایی در ریشه و اندام هوایی گیاهان را تغییر دهد (Jiang et al., 2024). ذرات میکروپلاستیک به‌عنوان حامل‌های بالقوه با تأثیر بر پویایی زیستی فلزات سنگین از جمله جذب سطحی، قابلیت دسترسی آن‌ها در خاک را کاهش می‌دهند (Kumar et al., 2022; Erdem et al., 2025). از سوی دیگر ذرات میکروپلاستیک 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 میکروپلاستیک به سبب سطح ویژه زیاد، کادمیوم را جذب و با افزایش دسترسی در ریزوسفر می‌تواند انتقال آن به ریشه گیاه را تسهیل نماید (Wang et al., 2023). میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین میکروپلاستیک‌های آلوده‌کننده خاک، به‌ویژه در ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر موجب کاهش رشد، اختلال در فتوسنتز و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاهان شده است (Colzi et al., 2022; Nei et al., 2024). علاوه بر اثرات مستقیم، پلی‌وینیل‌کلراید می‌تواند جذب و انتقال عناصر سنگین ازجمله کادمیوم را به ریشه گیاه تغییر دهد (Huang et al., 2023).

در مواجهه با تنش‌های محیطی، استفاده از میکروارگانیسم‌های سودمند راهکاری سازگار با محیط زیست و مؤثر برای جلوگیری از کاهش عملکرد گیاهان است (Reshna et al., 2022). استفاده از قارچ *Piriformospora indica* در

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil used

بافت خاک Soil Texture	pH	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	کربن آلی OC (g kg^{-1})	نیتروژن کل N (g kg^{-1})	فسفر P	پتاسیم K	روی Zn	منگنز Mn	آهن Fe	مس Cu
					(mg kg^{-1})					
لوم رسی شنی Sandy Clay Loam	7.1	1.06	7.8	0.8	16	275	2.68	2.90	10.7	2.98

تنش‌های محیطی، اثرات مثبتی بر رشد گیاه داشته و همزیستی آن با گونه‌های مختلف گیاهی به‌خوبی ثابت شده است (Rahman et al., 2023). ریشه‌های کلونیزه شده با قارچ ضخیم‌تر بوده و پوشش قارچی اطراف آن جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهد. میسلیوم‌ها و کلامیدوسپورهای قارچ به‌تنهایی می‌توانند اثرات مثبت بر رشد گیاه در شرایط نامساعد محیطی ایجاد کنند (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[1] یک هالوفیت علفی بسیار بردبار به 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 اندام هوایی و ریشه ذخیره نماید (Hirich et al., 2020). این پژوهش با هدف بررسی اثر همزیستی قارچ *Piriformospora indica* بر انباشت ماده خشک، نحوه انباشت و انتقال عناصر غذایی کوشیا در معرض آلودگی کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید، تحت تنش خشکی انجام شده است. لذا با وجود مطالعات نسبتاً گسترده در زمینه خشکی و کادمیوم، بررسی همزمان اثر خشکی، کادمیوم و آلودگی نوظهور میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید بر انباشت و انتقال عناصر غذایی گیاه متحمل کوشیا می‌تواند پتانسیل آن را جهت گیاه پالایی و همچنین استفاده علوفه‌ای در اندام هوایی در حضور قارچ *P. indica* مورد ارزیابی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه و آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا گردید. 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 عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تهیه شد. جهت آماده نمودن گلدان‌ها ابتدا ماسه و خاک با نسبت یک به دو ترکیب شدند مخلوط و به‌مدت ۶۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد ضدعفونی شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان در جدول ۱ آمده است.

تیمارهای آزمایش شامل سه سطح رژیم رطوبتی ۳۵، ۶۵، ۱۰۰ (شاهد) درصد ظرفیت زراعی، کادمیوم ۰ (شاهد) و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید با قطر ۷۵ میکرون در سه سطح ۰، ۰/۱، ۱ درصد وزن خاک و در حضور و عدم حضور قارچ *Piriformospora indica* بود. غلظت

1- *Bassia. scoparia*

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

مورد نظر کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم (Merck) به‌صورت خالص برای هر گلدان محاسبه و توزین شده و سپس در حجمی از آب که خاک را به نقطه ظرفیت زراعی می‌رساند 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 از طریق طیف‌سنجی جذب اتمی مورد بررسی قرار گرفت. درصدهای مورد نظر میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) (شرکت LG Chemical) بر اساس آزمایش مقدماتی و در محدوده تحمل گیاه تعیین و به‌صورت درصد وزنی به خاک هر گلدان اضافه شد (Li et al., 2020). خاک‌های آلوده شده به کادمیوم و میکروپلاستیک به مدت چهار هفته تا حد ظرفیت زراعی چندین مرتبه مرطوب و خشک و در دمای اتاق نگهداری شدند تا وضعیت آن‌ها تثبیت و به شرایط طبیعی نزدیک شوند. بذرهای گیاه کوشیا از توده بومی همدان ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی و پس از سه بار شست‌وشو با آب مقطر در گلدان‌های سه لیتری با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر کشت شدند. قارچ اندوفیت *S. indica* از آزمایشگاه پاتولوژی دانشگاه بوعلی‌سینا تهیه و جهت 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 ریشه‌ها از خاک و شستشو، 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 شستشو با آب مقطر به مدت ۳ دقیقه در اسید کلریدریک ۱ درصد قرار گرفتند. در نهایت رنگ آمیزی ریشه‌ها با متیلن بلو ۰/۰۵ درصد در لاکتوفنل انجام شد. قطعات ریشه رنگ‌آمیزی‌شده با میکروسکوپ نوری بررسی و درصد کلونیزاسیون ریشه تعیین شد. آزمایش در شرایط دمایی ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و طول دوره روشنایی ۱۲ تا ۱۴ ساعت در گلخانه اجرا شد. آبیاری گلدان‌ها تا استقرار کامل گیاهان به‌طور مرتب انجام و رطوبت در حد ظرفیت زراعی حفظ گردید. زمانی که ارتفاع گیاهچه‌ها به ۱۰ سانتی‌متر رسید تنش رطوبتی از طریق مقدار آب آبیاری اعمال گردید. در انتهای آزمایش در مرحله رویشی (BBCH–39) گیاهان با دقت از خاک خارج و ریشه‌ها با آب شست‌وشو داده شد سپس به همراه اندام هوایی در آون با دمای۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک و با ترازوی حساس ۰/۰۰۱ گرم توزین شدند. غلظت عناصر کادمیوم، آهن، کلسیم، روی و منیزیم در نمونه‌های گیاهی با روش خاکسترگیری خشک و هضم با هیدروکلریک اسید دو مولار مطابق روش توصیف شده توسط (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 بر کیلوگرم وزن خشک تعیین شد. فاکتور انتقال (TF) و انباشت زیستی کادمیوم (BCF) با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید (Zhang et al., 2020):

$$TF = (Cd\ Shoot) / (Cd\ Root) \quad (۱)$$

$$BCF = (Cd\ Root) / (Cd\ Soil) \quad (۲)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به‌دست آمده از این پژوهش با استفاده از نرم افزار 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 نرم افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

درصد همزیستی ریشه

درصد همزیستی به‌طور 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 *P. indica* معادل ۸۷ درصد در تیمار بدون کادمیوم و میکروپلاستیک مشاهده شد. با این‌حال، حضور کادمیوم و میکروپلاستیک در خاک تأثیر منفی بر درصد همزیستی داشت. درصد همزیستی ریشه گیاهان در

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد، در شرایط بدون تنش خشکی، معادل ۴۲ درصد بود. ولی در تیمار مذکور طی وضعیت آبی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی میزان همزیستی به‌ترتیب به ۳۷ و ۲۵ درصد کاهش یافت. تنش خشکی با کاهش رطوبت خاک و محدود کردن تأمین کربن از سوی گیاه میزبان، موجب کاهش تراکم هاگ‌ها و تضعیف همزیستی ریشه–قارچ می‌شود (Ostadi et al., 2022). با این‌حال، توانایی قارچ *S. indica* در برقراری همزیستی تحت تنش خشکی در برخی گیاهان ثابت شده است (Ghaffari et al., 2019). گزارش شده قارچ مذکور از طریق فعال‌سازی مسیر اکسیداسیون گلوتاتیون–آسکوربات و القای ژن‌های پاسخ‌دهنده 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 بدون تنش، باعث کاهش معنی‌دار رشد هیف‌های قارچ شد. این کاهش می‌تواند ناشی از سمیّت 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 به‌طور قابل توجهی تغییر دهد. گزارش شده میکروپلاستیک‌ها با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأثیر منفی بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، رشد قارچ‌های همزیست را کاهش می‌دهند (Yang et al., 2021).

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک و همچنین برهم‌کنش سه‌گانه قارچ، خشکی و کادمیوم بر وزن زیست توده به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). وزن زیست توده تحت تنش خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و میکروپلاستیک ۱ درصد به‌ترتیب معادل ۳/۱۹ و ۱/۵۹ گرم در بوته بود که نسبت به شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۸/۲۵ و ۳۵/۶۶ درصد کاهش یافت (شکل ۱a).

در شرایط همزیستی، در تیمارهای رطوبتی ۱۰۰، ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و در حضور کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، وزن زیست توده گیاه به‌ترتیب معادل ۴/۳۱، ۳/۴۶ و ۲/۳۲ گرم در بوته بود، اما در شرایط بدون همزیستی وزن زیست توده گیاه کاهش یافت (شکل ۱b). خشکی با کاهش جذب آب توسط سیستم ریشه باعث کاهش پتانسیل آب سلولی، کاهش فشار تورژسانس و اختلال در یکپارچگی غشاء و ساختار پروتئین‌ها می‌شود، همچنین با تشدید سایر تنش‌ها موجب کاهش دسترسی و جذب مواد غذایی در گیاه می‌گردد (Weisany et al., 2021). کاهش وزن خشک در گیاهچه‌های کلزا[2] و گندم[3] تحت تنش خشکی و کادمیوم قبلاً گزارش شده است (Dikšaitytė et al., 2023; Haider et al., 2025). به نظر می‌رسد طی آلودگی کادمیوم و تنش خشکی به دلیل محدودیت‌های روزنه‌ای و غیر روزنه‌ای فتوسنتز، وزن خشک در مقایسه با گیاهان بدون تنش کاهش می‌یابد (Dikšaitytė et al., 2023). علاوه بر این، حضور میکروپلاستیک در خاک منجر به کاهش رشد و وزن زیست توده گیاه گردید (شکل ۱a). نشان داده شده درگیاهچه‌های برنج[4] در معرض میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید نیز کاهش وزن خشک اتفاق می‌افتد (Ma et al., 2022). به نظر می‌رسد حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک مانع جذب و انتقال بهینه آب در خاک و گیاه شده لذا بر رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارند. ذرات میکروپلاستیک رشد طبیعی سیستم ریشه را مختل کرده و با کاهش جذب آب و مواد غذایی در نهایت منجر به کاهش زیست‌توده گیاه می‌شود (Colzi et al., 2022). همزیستی با قارچ *P. indica* موجب افزایش وزن زیست توده گیاه در شرایط تنش گردید (شکل ۱b). افزایش وزن خشک در گیاهان همزیست با قارچ *P. 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 به‌واسطه رشد میسلیوم قارچی منجر به بهبود جذب آب و مواد

2- *Brassica napus* L
3- *Triticum aestivum*
4- *Oryza sativa* L

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

جدول ۲. تجزیه واریانس زیست توده، کادمیوم ریشه، کادمیوم اندام هوایی، 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 *Bassia scoparia* seedlings under the effects of fungus, drought, cadmium, and microplastic

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات(Mean squares)				
		وزن زیست توده Biomass	غلظت کادمیوم ریشه Root cadmium	غلظت کادمیوم اندام هوایی Shoot cadmium	فاکتور انتقال Translocation factor	فاکتور انباشت زیستی Bioaccumulation Factor
قارچ *P. indica* (P)	1	3.61**	1.96**	2.08**	0.49**	0.22**
خشکی Drought (D)	2	37.02**	11.3**	10.9**	18.6**	0.20**
کادمیوم Cadmium (C)	1	13.07**	215**	126**	34.6**	9.38**
میکروپلاستیک Microplastics (M)	2	3.04**	24.7**	13.2**	4.17**	0.31**
P×D	2	0.09 ns	0.15**	0.20**	0.11*	0.0005 ns
P×C	1	0.002 ns	1.91**	1.92**	0.004 ns	0.01**
P×M	2	0.01 ns	0.12**	0.28**	0.003 ns	0.002 ns
D×C	2	1.18**	11.6**	10.5**	7.80**	0.05**
D×M	4	0.40**	4.20**	3.93**	0.29**	0.03**
C×M	2	0.19**	24.4**	12.7**	0.64**	0.15**
P×D×C	2	0.12*	0.15**	0.20**	0.02 ns	0.009**
P×D×M	4	0.02 ns	0.01 ns	0.38**	0.004 ns	0.0007 ns
P×C×M	2	0.004 ns	0.12**	0.28**	0.007 ns	0.002 ns
D×C×M	4	0. 47**	4.24**	3.28**	0.46**	0.04**
P×D×C×M	4	0.01 ns	0.01 ns	0.38**	0.01 ns	0.0006 ns
خطا Error	72	0.03	0.02	0.005	0.03	0.001
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	–	5.14	10.91	6.33	15.33	5.75

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

*, **, and ns indicate significance at the 5% level, 1% level, and non-significant, respectively

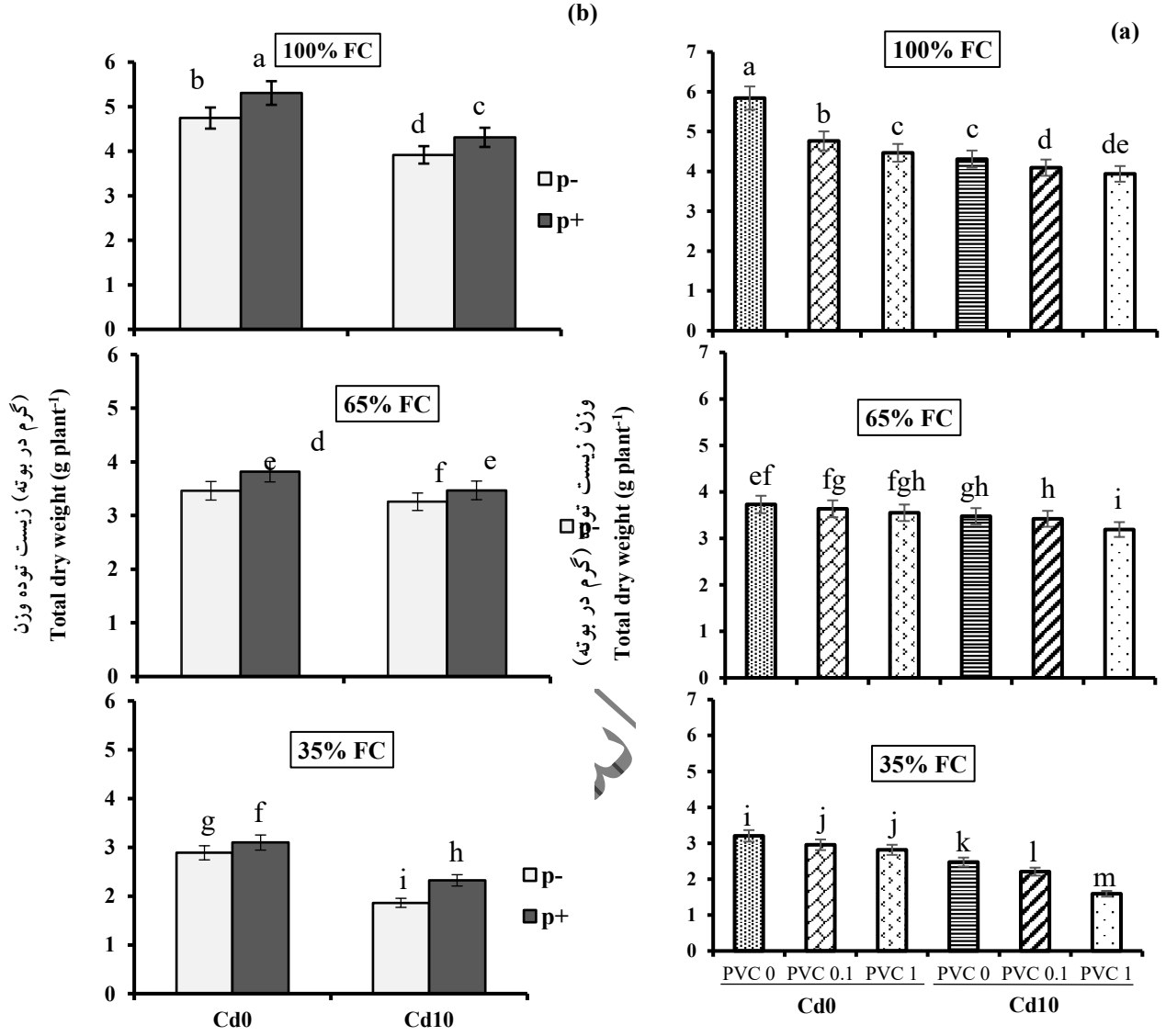
غذایی شده و در نتیجه تحمل گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد (Jyothymol et al., 2024). علاوه بر این، قارچ *P. indica* قادر است با بهبود انتقال آب و موادغذایی از طریق آوند چوبی و آبکش به تنظیم اسمزی در سطح سلولی کمک کرده و از طریق حفظ تورژسانس سلولی، رشد سلول‌های گیاهی را افزایش می‌دهد (Jyothymol et al., 2024; Heris et al., 2022).

غلظت کادمیوم ریشه

محتوای کادمیوم ریشه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش سه‌گانه قارچ، خشکی و کادمیوم، برهم‌کنش قارچ، کادمیوم و میکروپلاستیک و همچنین، برهم‌کنش 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 میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (شکل ۲a). ولی در هر دو شرایط شرایط همزیستی و بدون همزیستی با قارچ،

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

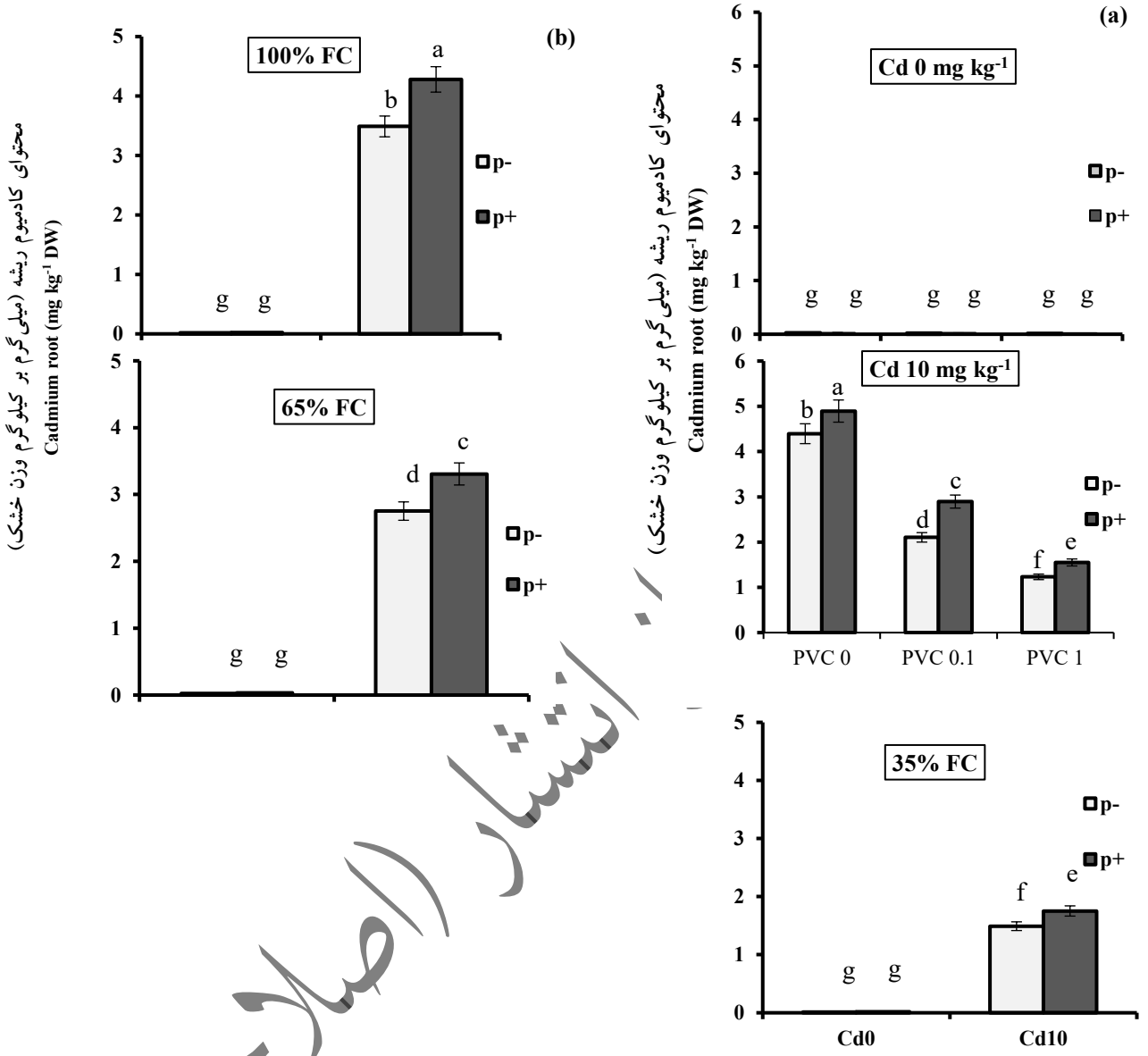


شکل ۱. مقایسه میانگین برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) تحت تنش خشکی (35 FC، 65 FC و 100 FC) (a) و برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و تنش خشکی (35 FC، 65 FC و 100 FC) در شرایط همزیستی (+P) و بدون همزیستی (–P) با قارچ *P. indica* (b) بر وزن زیست توده. ستون‌های با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند.

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

افزایش میکروپلاستیک خاک به ۱ درصد سبب کاهش محتوای کادمیوم ریشه شد (شکل ۲a). بررسی برهم‌کنش خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک نیز نتایج نشان داد که با کمبود رطوبت در خاک و در حضور میکروپلاستیک ۱ درصد، انباشت کادمیوم در ریشه کاهش یافته است (شکل ۳b). در شرایط همزیستی و بدون همزیستی، طی خشکی ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، محتوای کادمیوم ریشه به‌ترتیب معادل ۱/۷۵۲ و ۱/۴۹۱ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک ثبت شد که

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]



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

Fig 2. Comparison of the mean interactions between 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 interaction between cadmium (Cd0 and Cd10) and drought stress (35FC, 65FC and 100FC) on root cadmium content under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P–) conditions with *P. indica* (b). Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

نشان دهنده اثر مثبت همزیستی قارچ بر جذب کادمیوم در ریشه می‌باشد (شکل ۲b). در وضعیت رطوبتی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی در حضور کادمیوم و افزایش میکروپلاستیک به ۱ درصد محتوای کادمیوم ریشه روند کاهشی داشت (شکل ۳b). اصولاً

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

تنش خشکی انباشت کادمیوم در ریشه گیاه را کاهش می‌دهد (Sun et al., 2024). زیرا کمبود آب در محیط بر انباشت کادمیوم در ریشه‌ها 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؛ به‌گونه‌ای که در نهایت موجب کاهش انباشت آن در بافت‌های ریشه‌ای می‌گردد (Ma et al., 2024). ذرات میکروپلاستیک نیز نقش مهمی در پویایی زیستی فلزات سنگین داشته و به‌عنوان حامل‌های بالقوه، با جذب سطحی کادمیوم، میزان قابل دسترس 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* با مکانیسم‌های منحصر به فرد مقابله با تنش کادمیوم، از جمله سیستم‌های رسوب کادمیوم و کلات‌سازی که با بی‌حرکت کردن آن از طریق تشکیل اگزالات فلزی نامحلول یا کلات‌سازی روی پلیمرهای ملانین، تشکیل کمپلکس و جداسازی کادمیوم درون سلولی و اتصال کادمیوم به دیواره سلولی قارچ می‌باشد (Sepehri and Khatabi, 2021؛ Boorboori and Zhang, 2024).

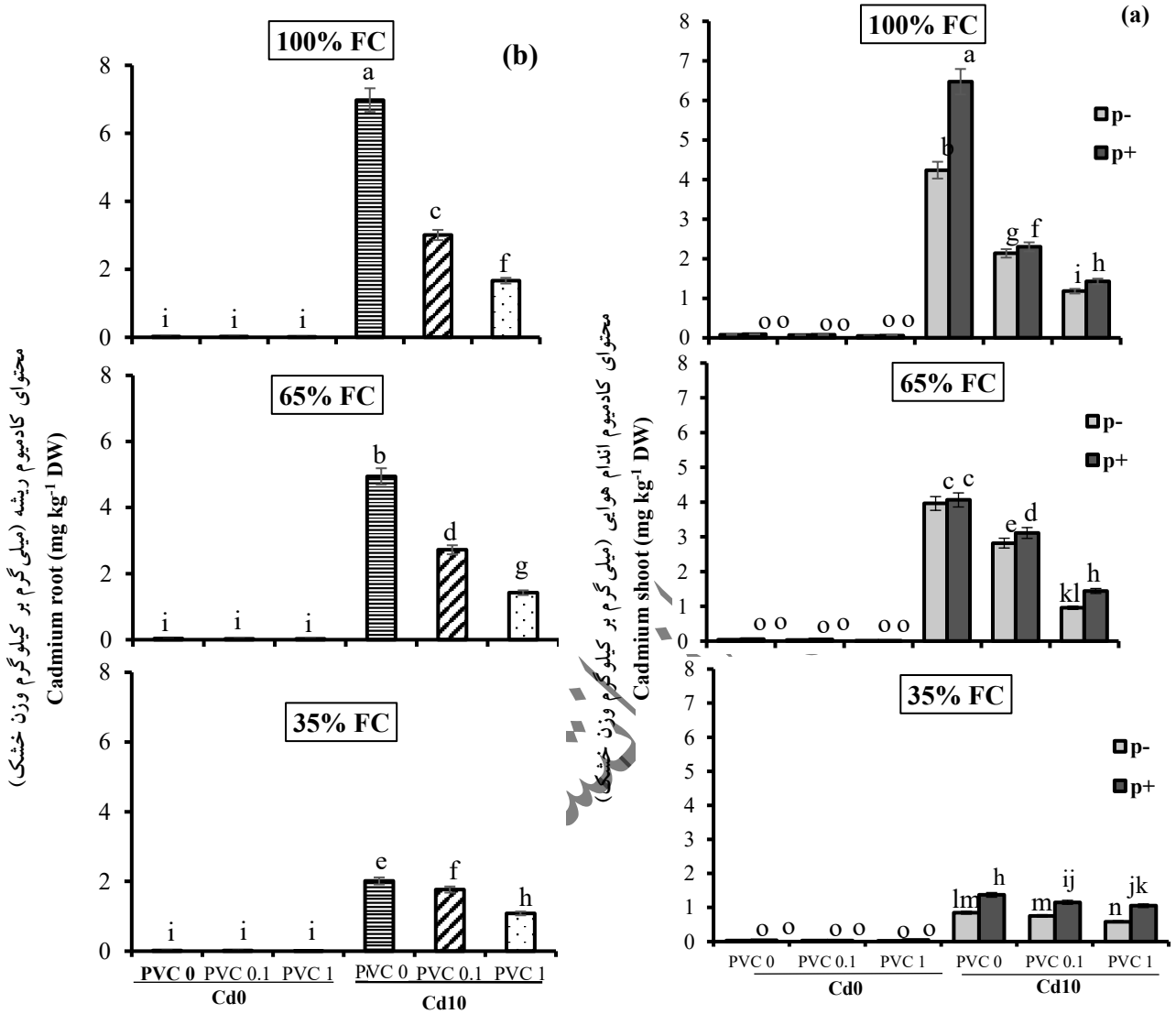
غلظت کادمیوم اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد بر غلظت کادمیوم اندام هوایی معنی‌دار شد (جدول ۲). در وضعیت رطوبتی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک‌های ۰/۱ و ۱ درصد، غلظت کادمیوم اندام هوایی به‌ترتیب معادل ۲/۱۳۵ و ۱/۱۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود که در همزیستی با قارچ اندکی افزایش نشان داد که به‌ترتیب معادل ۸ و ۱۲ درصد نسبت به تیمارهای بدون قارچ شد. البته در شرایط بدون میکروپلاستیک حضور قارچ در وضعیت رطوبتی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی سبب افزایش بیشتری در غلظت کادمیوم نسبت به تیمارهای بدون قارچ گردید (شکل a ۳). با کاهش رطوبت خاک به ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و تحت تأثیر میکروپلاستیک، غلظت کادمیوم در اندام هوایی به‌شدت کاهش یافت که تاثیر میکروپلاستیک ۱ درصد در این کاهش بیش از میکروپلاستیک ۰/۱ درصد بود (شکل a ۳). در هر دو شرایط رطوبتی مذکور همزیستی با قارچ غلظت کادمیوم را در اندام هوایی گیاه را چندان تغییر نداد که حاکی از کاهش انتقال کادمیوم از ریشه‌ها به اندام هوایی است.

در تنش خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد، به‌ترتیب محتوای کادمیوم اندام هوایی به کمترین مقدار خود رسید (شکل a۳). با این حال، در شرایط همزیستی با قارچ میزان کادمیوم اندام هوایی افزایش نشان داد (شکل a۳). ولی با افزایش میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید موجود در خاک از ۰/۱ به ۱ درصد میزان انباشت کادمیوم در اندام هوایی کاهش یافت (شکل d۲). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تنش خشکی منجر به کاهش محتوای کادمیوم در اندام هوایی گیاه شد (شکل a۳). این یافته با گزارش (2021) Yang et al مبنی بر کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی طی تنش کمبود آب هم‌راستا است. بسته شدن روزنه‌ها و کاهش جریان تعرق از جمله دلایل محدودیت انتقال عناصر در تنش خشکی به‌شمار می‌رود (Ma et al., 2024). میکروپلاستیک نیز منجر به کاهش محتوای کادمیوم اندام هوایی طی تنش خشکی گردید (شکل d۲). میکروپلاستیک‌ها با تغییر ساختمان خاک بر حجم و تخلخل خاک اثر گذاشته و ظرفیت نگه‌داری آب و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را کاهش می‌دهند، همچنین با کاهش pH خاک و افزایش کربن آلی محلول خاک بر تحرک فلزات سنگین از جمله کادمیوم در خاک تأثیر گذارند (Lin et al., 2024). ذرات ریز آن‌ها به‌دلیل سطح ویژه زیاد و گروه‌های عامل مختلف، قابلیت جذب کادمیوم را داشته و با ایجاد تغییرات در ویژگی‌های شیمیایی دسترسی ریشه برای جذب کادمیوم را محدود می‌کنند در نتیجه انتقال آن به اندام هوایی کاهش می‌یابد (Lin et al., 2024). علاوه براین، کاهش رطوبت خاک با محدود کردن حرکت آب نقش میکروپلاستیک‌ها در انتقال فلزات را محدود می‌کند. در شرایط همزیستی، علاوه بر ریشه، افزایش

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]



شکل ۳. مقایسه میانگین برهم‌کنش کادمیوم کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC01، PVC0.1 و PVC1) تحت تنش خشکی (35 FC، 65 FC و 100 FC) در شرایط همزیستی (+P) و بدون همزیستی (–P) با قارچ *P. indica* بر محتوای کادمیوم اندام هوایی (a) و برهم‌کنش کادمیوم (Cd0 و Cd10) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC0، PVC0.1 و PVC1) تحت 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. Comparison of the mean interaction between cadmium cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress (35FC, 65FC and 100FC) on shoot cadmium content under symbiotic (P+) and non-symbiotic (P–) conditions with *P. indica* (a) and interaction between cadmium (Cd0 and Cd10) and microplastics (PVC0, PVC0.1 and PVC1) under drought stress (35FC, 65FC and 100FC) on root cadmium content (b). Columns with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p \leq 0.05$).

کادمیوم در اندام هوایی مشاهده شد که عمدتاً مربوط به شرایط نرمال رطوبتی و بدون حضور میکروپلاستیک بود (شکل ۳a). قارچ‌های میکوریزا با توسعه شبکه‌های میسلیومی در خاک، افزایش جذب آب، انتقال فلزات سنگین را بهبود می‌بخشند (Khalid et al., 2022). دیواره سلولی قارچ‌های میکوریزی به‌دلیل وجود کیتین و پلی‌ساکاریدهای دارای گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل، آمین و فسفات قابلیت بالایی در اتصال و تثبیت یون‌های فلزی مانند کادمیوم دارند، این مکانیسم باعث می‌شود

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

بخشی از کادمیوم موجود در خاک توسط قارچ جذب یا تثبیت شود (Khalid et al., 2022). بر اساس برخی گزارش‌ها حضور قارچ‌های میکوریزی می‌تواند با افزایش سطح ریشه مؤثر، جذب کادمیوم در ریشه را افزایش داده که مقداری از آن به اندام هوایی انتقال می‌یابد (Lin et al., 2024 ؛Li et al., 2023).

فاکتور انتقال

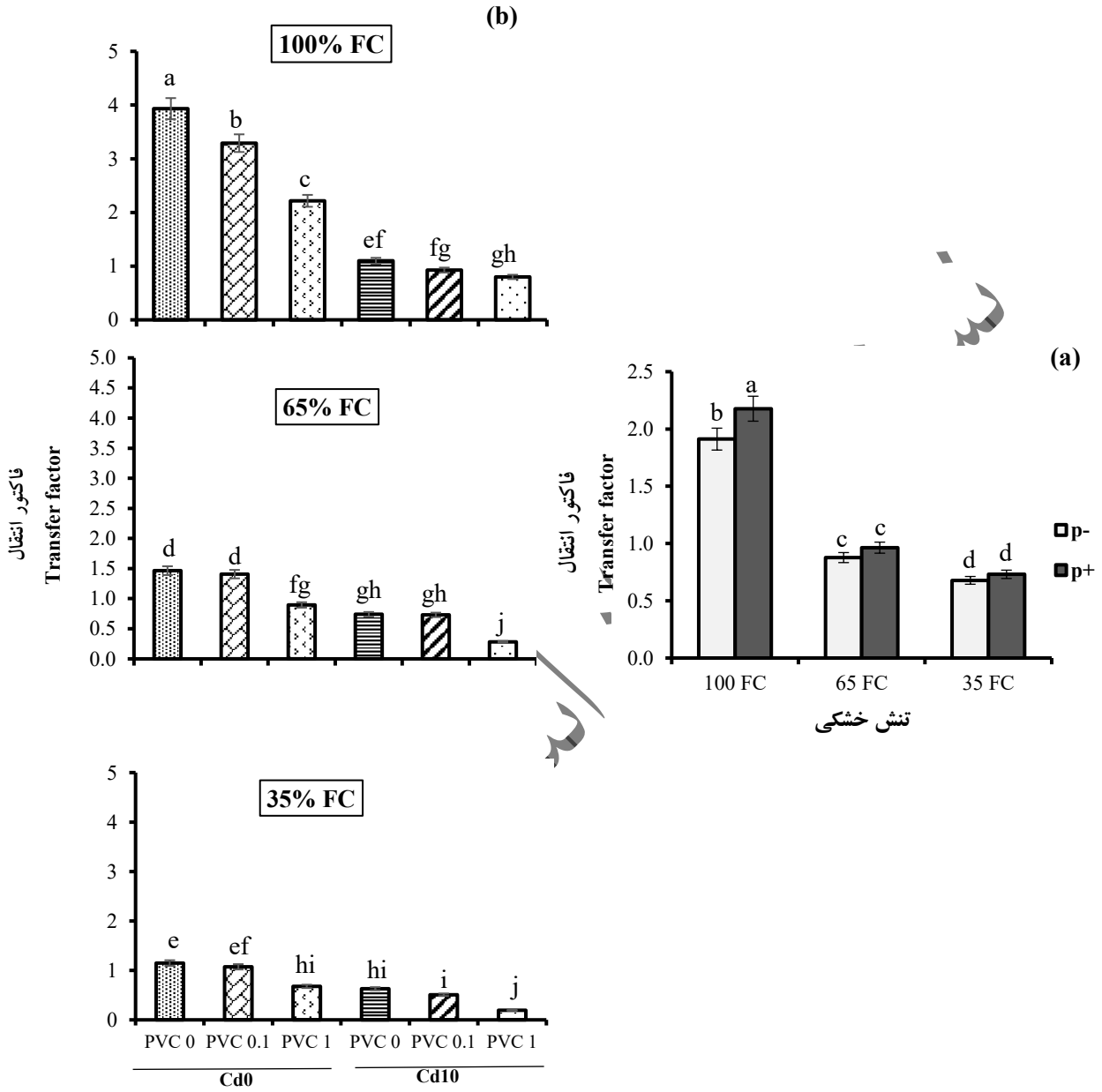
برهم‌کنش سه‌گانه مربوط به خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر فاکتور انتقال در سطح احتمال یک درصد و همچنین، برهم‌کنش قارچ و خشکی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). فاکتور انتقال کادمیوم با افزایش تنش کمبود آب در خاک و به خصوص در غلظت بالای میکروپلاستیک روندی کاهشی نشان داد. البته در شرایط بدون تنش کمبود آب، نیز این روند به خصوص در میکروپلاستیک ۱ درصد، مشاهده شد (شکل ۴b). در تنش خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی کاهش فاکتور انتقال در اثر حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در مقایسه با شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۶۱/۹۴ 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 ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شرایط بدون همزیستی تفاوتی در این خصوص مشاهده نگردید (شکل ۴a). فاکتور انتقال شاخص کلیدی برای سنجش توانایی گیاهان در انتقال فلزات سنگین به اندام هوایی است (Shukla et al., 2022). کاهش فاکتور انتقال احتمالاً ناشی از جذب کادمیوم توسط میکروپلاستیک‌ها از طریق اتصال به سطح ریشه بوده که سبب انباشت بیشتر کادمیوم در ناحیه ریزوسفر می‌شود و انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی را کاهش می‌دهد (Huang et al., 2023). همچنین گزارش شده میسلیوم‌های قارچ می‌تواند کادمیوم را در ریشه بی‌حرکت نموده و سبب کاهش فاکتور انتقال کادمیوم می‌گردد (Pu et al., 2024). البته از سوی دیگر گزارش شده همزیستی با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه و قارچ‌های میکوریزا می‌تواند رشد گیاه و تثبیت کادمیوم در ریشه را افزایش دهد. اما تحت شرایط خشکی، محدودیت جریان آب و تثبیت فلز در ریشه موجب می‌شود انتقال کادمیوم به اندام هوایی تغییر قابل توجهی نداشته باشد (Parsamanesh and Sadeghi, 2023).

فاکتور انباشت زیستی

اثرات 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). به‌طور کلی، با کاهش رطوبت در خاک فاکتور انباشت زیستی کادمیوم نیز کاهش یافت هر چند که شرایط همزیستی با قارچ، سبب افزایش فاکتور انباشت زیستی کادمیوم شد (شکل ۵a). به‌طور کلی در حضور کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در حضور میکروپلاستیک ۱ درصد و طی تنش کمبود آب فاکتور انباشت زیستی کادمیوم کاهش نشان داد (شکل ۵b). فاکتور انباشت زیستی ریشه به‌عنوان معیاری جهت انتخاب گیاهان پیش‌انباشت‌کننده در نظر گرفته می‌شود (Yang et al., 2019). در غلظت بالای کادمیوم و درصدهای مختلف میکروپلاستیک طی تنش کمبود آب، نسبت به شرایط بدون تنش، فاکتور انباشت زیستی کاهش یافت (شکل ۵b). در تنش خشکی، مقدار هورمون آبسیسیک اسید در گیاه افزایش می‌یابد، آبسیسیک اسید با تغییر در فعالیت ژن‌هایی که مسئول انتقال یون‌ها از طریق غشاهای سلولی هستند بر میزان جذب کادمیوم تأثیر می‌گذارد (Haider et al., 2025). از طرفی، تغییر در ساختار ریشه طی تنش خشکی از جمله طول، تراکم و سطح ریشه سبب کاهش جذب کادمیوم در ریشه می‌شود (Haider et al., 2025). همچنین حضور میکروپلاستیک در ریزوسفر از طریق تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط خاک شده و سبب کاهش دسترسی ریشه به کادمیوم می‌شود (Roy et al., 2023). مشاهدات حاکی از آن است که همزیستی قارچ با تغییر محیط خاک، اثرات مهمی بر جذب و انتقال کادمیوم به خصوص در شرایط بدون خشکی و خشکی متوسط دارد. میسلیوم های قارچ می‌تواند کادمیوم را در ریشه

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]



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

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

بی‌حرکت نموده و به‌طور مؤثر ظرفیت انتقال کادمیوم به اندام هوایی را کاهش دهد که سبب افزایش انباشت زیستی کادمیوم در ریشه می‌گردد (Pu et al., 2024). اما در شرایط خشکی شدید با وجود ثابت ماندن جمعیت قارچ، فعالیت‌های متابولیکی خاک و

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

جدول ۳. تجزیه واریانس غلظت عناصر روی، آهن، منیزیم، کلسیم ریشه و اندام هوایی 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 Bassia scoparia seedlings under the effects of fungus, drought, cadmium, and microplastic

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

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

*,** ,and ns indicate significance at the 5% level, 1% level, and non-significant, respectively.

ترشحات ریشه کاهش یافته و اثر قارچ بر افزایش انتقال کادمیوم محدود می‌شود (Parsamanesh and Sadeghi, 2023).

غلظت عنصر روی در ریشه و اندام هوایی

برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت عنصر روی در ریشه و اندام هوایی گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۳). به‌طور کلی، غلظت روی در ریشه و اندام هوایی با افزایش کمبود آب در خاک کاهش یافت.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

جدول ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش کادمیوم (Cd) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) تحت تنش خشکی در شرایط همزیستی (+P) و بدون همزیستی (–P) با قارچ *P. indica* بر غلظت روی، آهن، منیزیم و کلسیم ریشه

Table 4. Comparison of the mean interaction of cadmium (Cd) and microplastics (PVC) under 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 roots

کلسیم Ca	منیزیم Mg	آهن Fe	روی Zn		پلی‌وینیل‌کلراید polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg^{-1})	خشکی Drought (Field Capacity %)
(mg kg^{-1} DW)							
Pi-	Pi-	Pi-	Pi+	Pi-			
37.4^{a}	4.82^{k}	8.48^{a}	0.26^{a}	0.24^{b}	0		100
35.3^{b}	6.30^{j}	7.82^{b}	0.18^{c}	0.18^{c}	0.1	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}	0.1	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
25.4^{e}	8.95^{hi}	5.95^{e}	0.12^{g}	0.14^{f}	0.1	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}	0.1	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
27.2^{d}	9.67^{fg}	4.31^{ij}	0.07^{j-l}	0.04^{no}	0.1	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}	0.1	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 معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند. برای صفاتی که اثر همزیستی با قارچ *P. indica* معنی‌دار نبود، فقط داده‌های شرایط بدون همزیستی (–P)ارائه شده‌اند.

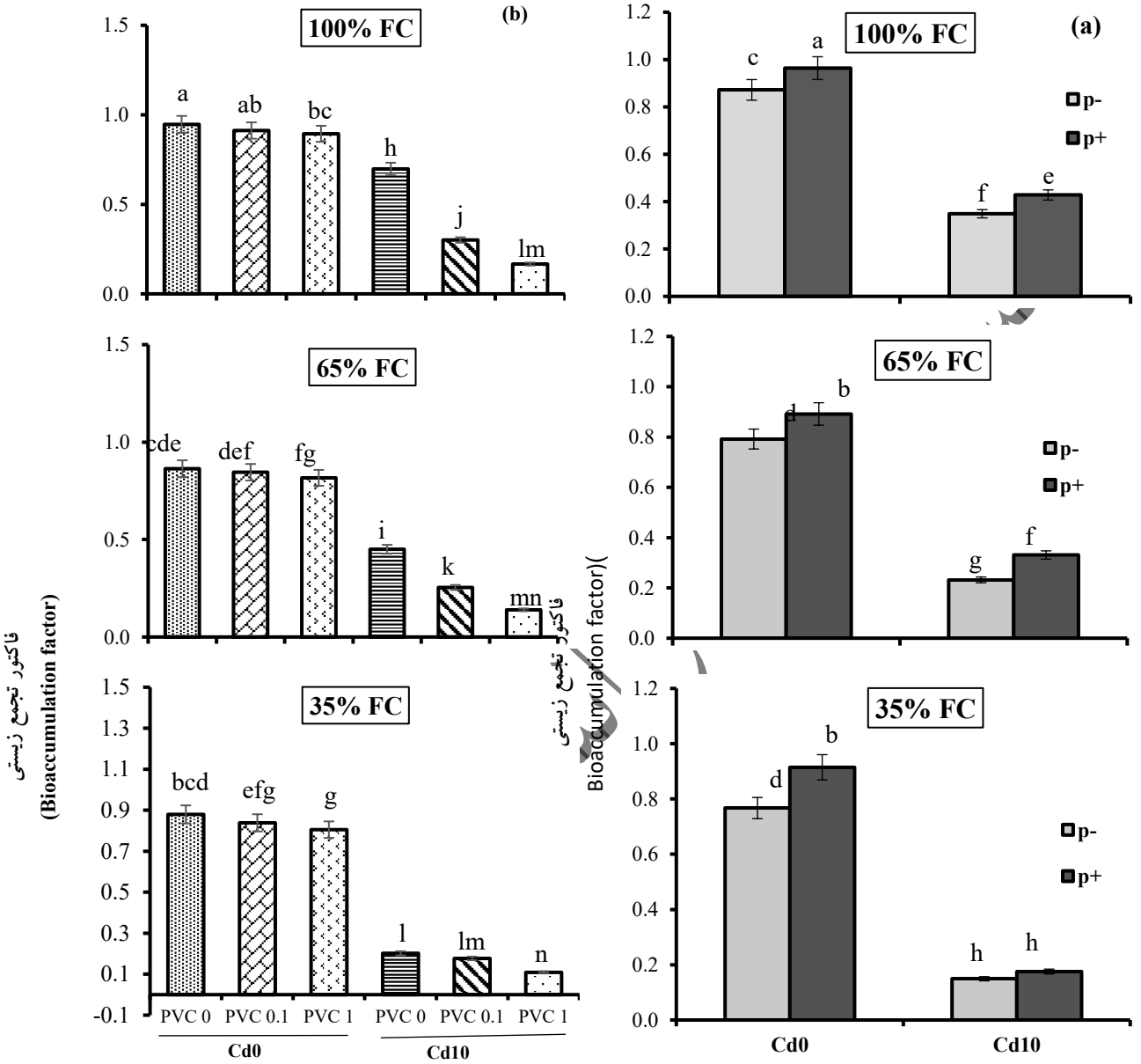
In each trait, for both columns of symbiosis (P+) and non-symbiotic (P–) conditions, treatments with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test. For traits which the effect of symbiosis with the fungus *P. indica* was not significant,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

در شرایط بدون همزیستی، غلظت روی در ریشه در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد تحت شرایط رطوبتی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی معادل ۰/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود و حضور قارچ سبب افزایش غلظت روی ریشه گردید (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 معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۴).

از سوی دیگر، غلظت روی در اندام هوایی نیز با افزایش شدت خشکی کاهش یافت؛ ولی همزیستی تأثیری در مقدار

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]



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

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

غلظت روی در اندام هوایی با حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۰/۱ و ۱ درصد تحت تنش خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی نداشت (جدول ۶). مکانیسم‌های جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان تابع رطوبت خاک بوده به‌طوری‌که کاهش

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

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

Table 5. Comparison of the mean interaction 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 roots

منیزیم Mg (mg kg^{-1})		پلی‌وینیل‌کلراید polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg^{-1})
Pi+	Pi-		
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 براساس آزمون LSD ندارند.

For both columns of symbiosis (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.

رطوبت، سرعت و جذب عناصر را تغییر می‌دهد (Aslanpour et al., 2019). در تطابق با نتایج حاصله، Weisany et al (2021) نیز کاهش عنصر روی در گیاه ذرت را در شرایط خشکی گزارش کردند، علت این مسئله می‌تواند ناشی از اختلال در جذب آب توسط سیستم ریشه، کاهش پتانسیل آب و فشار تورژسانس و همچنین آسیب به یکپارچگی غشاء و ساختار منظم پروتئین‌ها باشد که در نهایت منجر به کمبود عنصر روی در گیاه می‌شود. از سوی دیگر، گزارش شده حضور کادمیوم طی تنش خشکی، سبب کمبود روی در اندام‌های مختلف گیاه کلزا در کنار جذب کادمیوم شده است (Diksaityte et al., 2023). کادمیوم عمدتاً از طریق کانال‌های کاتیونی عنصرروی یا ناقل‌های سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی وارد سلول‌های گیاه شده لذا جذب روی را کاهش می‌دهد (Shorobi et al., 2023). همچنین کاهش جذب عناصر غذایی از طریق اتصال میکروپلاستیک‌ها 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 اندام هوایی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت آهن ریشه و برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی،کادمیوم و میکروپلاستیک بر محتوای آهن اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۳). غلظت آهن ریشه طی 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 و میکروپلاستیک ۱ درصد، همزیستی با قارچ تأثیر محسوسی بر جذب آهن در اندام هوایی نداشت. با این‌حال، در سطوح رطوبتی ۱۰۰ و ۶۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار فوق در همزیستی با قارچ موجب افزایش قابل توجهی در غلظت آهن اندام هوایی 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

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

جدول ۶. مقایسه میانگین برهم‌کنش کادمیوم (Cd) و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) تحت تنش خشکی در شرایط همزیستی (+P) و بدون همزیستی (–P) با قارچ *P. indica* بر غلظت روی، آهن، منیزیم و کلسیم اندام هوایی

Table 6. Comparison of the mean interaction of cadmium (Cd) and microplastics (PVC) under 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 shoots

کلسیم Ca		منیزیم Mg	آهن Fe		روی Zn		پلی‌وینیل‌کلراید polyvinyl chloride (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg^{-1})	خشکی Drought (Field Capacity %)
(mg kg^{-1} DW)									
Pi+	Pi-	Pi-	Pi+	Pi-	Pi+	Pi-			
80.3^{a}	65.6^{b}	9.81^{l}	1.73^{a}	0.93^{g}	0.28^{a}	0.20^{c}	0		100
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^{e}	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^{e}	0.15^{g}	0		65
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
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^{jk}	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 معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD ندارند. برای صفاتی که اثر همزیستی با قارچ *P. indica* معنی‌دار نبود، فقط داده‌های شرایط بدون همزیستی (–P) ارائه شده‌اند.

In each trait, for both columns of symbiosis (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.

آهن در ذرت کاهش یافته است. گزارش شده 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 مواد مغذی از جمله آهن در شرایط کمبود آب در سورگوم (Symanczik et al., 2018) نیز گزارش شده است. همچنین میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید بر جذب مواد مغذی توسط ریشه‌ها و انتقال آن‌ها به قسمت‌های مختلف گیاه تأثیر می‌گذارد. کاهش محتوای آهن بر اثر تنش میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید در گیاه گوجه فرنگی گزارش شده است (Chang et al., 2024). در گیاهچه‌های خردل هندی نیز غلظت

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

عنصر آهن در معرض کادمیوم و میکروپلاستیک به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است (Wang et al., 2024). میکروپلاستیک‌ها از طریق بستن منافذ دیواره سلولی، جذب آب را محدود کرده و سبب کاهش جذب عناصر غذایی شده و در نهایت سبب کاهش زیست توده و عملکرد گیاه می‌شوند (Wang et al., 2024). در تأیید نتایج ما، همزیستی سبب بهبود جذب و انتقال آهن در ریشه و اندام هوایی گندم گردیده است (Karimi et al., 2022)، تحقیقات دیگر نیز بر تأثیر مثبت همزیستی بر محتوای آهن گیاه تأکید دارد (Sogonda et al., 2021). مطالعات نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریزا حتی در شرایطی که بر جذب آهن توسط ریشه تأثیر مستقیمی ندارند، با توسعه شبکه هیفی و افزایش بیان ژن‌های انتقال‌دهنده آهن مانند IRT1 و FRO2 می‌توانند انتقال آهن به اندام هوایی را در تنش خشکی تسهیل نمایند (Begum et al., 2023).

غلظت عنصر منیزیم در ریشه و اندام هوایی

نتایج جدول ۳ بیان‌گر معنی‌دار شدن برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش سه‌گانه قارچ، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت منیزیم ریشه است. همچنین، برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد بر غلظت منیزیم اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۳). در جدول ۵ ملاحظه می‌شود که کادمیوم و میکروپلاستیک در بستر کشت باعث افزایش منیزیم ریشه شده است. قابل ذکر است در شرایط بدون همزیستی، غلظت منیزیم ریشه در تیمار حاوی ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم و میکروپلاستیک ۰/۱ و ۱ درصد به‌ترتیب معادل ۱۰/۳۷ و ۱۱/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک 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 ۱۰۰، ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۹/۴۷، ۱۵/۲۹ و ۱۸/۵۷ درصد افزایش یافت (جدول ۴). غلظت منیزیم در اندام هوایی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد در خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۴۲/۱۱ و ۲۲/۳۴ درصد بیشتر از شاهد کادمیوم بود (جدول ۶). همزیستی بر افزایش جذب منیزیم اندام هوایی تأثیر نداشت، با این‌حال تنش کادمیوم و میکروپلاستیک در شرایط خشکی، جذب منیزیم اندام هوایی 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 لذا کمبود آن در شرایط تنش می‌تواند اثرات منفی بر فتوسنتز و رشد گیاه بگذارد. گزارش شده در برخی موارد تنش خشکی باعث افزایش موقت جذب عناصر خاص مانند منیزیم می‌شود که می‌تواند به سازوکارهای تطبیقی 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 از طریق ریشه‌های مویین افزایش یافته تا به تنظیم فشار اسمزی و حفظ عملکرد آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کمک کند (Li et al., 2023). همچنین، حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک می‌تواند ساختار فیزیکی خاک را تغییر داده و تهویه و نفوذپذیری آن را بهبود بخشد، در نتیجه دسترسی ریشه‌ها به برخی عناصر معدنی افزایش یافته و جذب منیزیم ارتقا می‌یابد (Lozano et al., 2020). با این‌حال، اثرات میکروپلاستیک‌ها بر جذب مواد مغذی پیچیده است و به نوع، اندازه و غلظت آن‌ها وابسته می‌باشد؛ برخی مطالعات نشان داده‌اند میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با مسدود کردن منافذ ریشه یا جذب مواد مغذی، جذب منیزیم و سایر عناصر را کاهش دهند (Xu et al., 2024). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده که تنش‌های محیطی مانند خشکی، آلودگی کادمیوم و میکروپلاستیک‌ها، 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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

ریشه بهبود یافت. در واقع، قارچ همزیست با تغییر ساختار ریشه و افزایش طول ریشه توسط هیف‌های خارج، جذب منیزیم را در ریشه‌ها افزایش می‌دهند (Ghorbani et al., 2019). به‌طور کلی همزیستی با قارچ میکوریزا می‌تواند محتوای منیزیم ریشه را افزایش دهد که حاکی از نقش مؤثر همزیستی در بهبود جذب مواد مغذی است، با این‌حال همزیستی بر محتوای منیزیم اندام هوایی تأثیری نداشت که احتمالاً مربوط به محدودیت‌های انتقال درون‌گیاه و اولویت گیاه در تخصیص منیزیم به ریشه‌ها می‌باشد. یافته‌ها تأکید می‌کند که اثر همزیستی بر جذب مواد مغذی ممکن است در ریشه و اندام هوایی متفاوت بوده و بررسی مسیرهای انتقال داخل گیاه برای درک کامل پاسخ گیاه به میکوریزا ضروری است (Xiao et al., 2014).

غلظت عنصر کلسیم در ریشه و اندام هوایی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، برهم‌کنش سه‌گانه خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کلسیم ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین برهم‌کنش چهارگانه قارچ، خشکی، کادمیوم، و میکروپلاستیک بر غلظت کلسیم اندام هوایی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط رطوبتی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، غلظت کلسیم ریشه موقعی‌که گیاه در معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و ۱ درصد میکروپلاستیک خاک قرار گرفت، معادل ۱۸/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود. با این‌حال، غلظت کلسیم ریشه طی تنش خشکی ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی در تیمار فوق به‌ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک 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 افت بیشتر غلظت کلسیم در ریشه شد (جدول ۴). لازم به ذکر است اثر همزیستی با قارچ در تعامل 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 اندام هوایی در معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد خاک تحت شرایط رطوبتی ۱۰۰، ۶۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب معادل ۳۸/۷۶، ۳۰/۴۳ و ۲۶/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک اندازه‌گیری شد. اما، در شرایط همزیستی غلظت کلسیم اندام هوایی در تمام سطوح رطوبتی افزایش یافت (جدول ۶). این نتایج نشان‌دهنده نقش مؤثر قارچ مذکور در افزایش جذب کلسیم اندام هوایی تحت تنش خشکی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک است. به‌طور کلی کمبود آب در خاک سبب کاهش جذب کلسیم در ریشه و اندام هوایی کوشیا گردید که با گزارش‌های Wei et al., (2022) و Tekdal et al., (2018) هماهنگ است. قابل ذکر است فتوسیستم II فتوسنتزی شامل ساختار Mn_4CaO_5 در مرکز خود است که مسئول تجزیه آب و تولید اکسیژن است و کلسیم برای عملکرد صحیح آن ضروری است. از طرفی طی تنش خشکی، عنصر کادمیوم به‌صورت رقابتی جایگاه‌های اتصال کلسیم را در فتوسیستم II اشغال نموده و عملکرد نوری کمپلکس تجزیه آب را مهار و جذب کلسیم در گیاه را کاهش می‌دهد (Diksaityte et al., 2023). از سوی دیگر، میکروپلاستیک‌ها با ایجاد اختلال در ریشه، جذب عناصر را مختل می‌کند (Jiang et al., 2024). گزارش شده کادمیوم در حضور میکروپلاستیک سبب کاهش توسعه ریشه گیاه و محدودیت جذب عناصر غذایی شده، در نتیجه جذب و انتقال عناصر از جمله کلسیم را مختل می‌نمایند (Bosker et al., 2019). در تأیید نتایج ما، Ghorbani et al (2019) بیان کردند که در شرایط تنش، همزیستی در مقایسه با شرایط بدون همزیستی جذب عنصر کلسیم را در گیاه گوجه‌فرنگی 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 از طریق حفظ نفوذپذیری انتخابی غشاء، پایداری عملکرد سلولی را در شرایط تنش حفظ می‌کند (Kaboosi et al., 2023). از این‌رو گیاهان همزیست با قارچ شانس بهتری برای جذب آب و مواد مغذی در این شرایط را دارا می‌باشند.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد قارچ *P.indica* پتانسیل خوبی برای همزیستی با گیاه کوشیا در شرایط آلودگی خاک به کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید حتی تحت 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 ظرفیت زراعی در حضور میکروپلاستیک سبب کاهش انباشت کادمیوم و به تبع آن کاهش فاکتورهای انتقال و انباشت زیستی آن گردید. ولی همزیستی گیاه با قارچ *P. indica* باعث افزایش جذب کادمیوم در ریشه‌ها به‌طور متوسط حدود ۱۴ درصد در مقایسه با تیمارهای بدون قارچ شد. طی تنش رطوبتی در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک، انباشت ماده خشک و جذب و انباشت عناصر غذایی مانند روی، آهن و کلسیم در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهش و مقدار منیزیم افزایش یافت. با این‌حال، در شرایط همزیستی انباشت و غلظت عناصر غذایی مهم از جمله روی، آهن، منیزیم و کلسیم در ریشه و اندام هوایی افزایش نشان داد. نتایج حاکی از آن است که کوشیا به‌عنوان یک گیاه مقاوم به خشکی، دارای پتانسیل مناسبی جهت گیاه پالایی در خاک‌های آلوده به کادمیوم می‌باشد هرچند حضور میکروپلاستیک در خاک از این پتانسیل می‌کاهد. همچنین نتایج نشان داد که قارچ *P. indica* با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و رشدی گیاه کوشیا با حفظ تعادل یونی طی تنش ترکیبی، نه تنها به نظام زیستی پایدار کمک می‌نماید، بلکه به علت افزایش توان گیاه در جذب و تجمع کادمیوم در ریشه حتی تحت آلودگی میکروپلاستیک، گیاه پالایی گیاه را ارتقا می‌بخشد، گرچه این توانایی طی تنش کمبود آب تا حدودی کاهش می‌یابد.

تشکر و سپاسگزاری

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

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. 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.
2. Alloway, B. J., 2013. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Chang, N., Chen, L., Wang, N., Cui, Q., Qiu, T., Zhao, S., Fang, L., 2024. Unveiling the impacts of microplastic

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

pollution on soil ecosystems: A comprehensive review. Sci. Total Environ, 175643. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175643.
9. Cheraghi, M., Motesharezadeh, 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, 9, 5354–5378. https://doi.org/10.1007/s00344-023-10959-4.
10. 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.
11. Dikšaitytė, A., Kniuipytė, 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.
12. 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 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, 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.
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. Centre for Ecology & Hydrology, United Kingdom. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90472-6.
20. Huang, F., Hu, J., Chen, L., Wang, Z., Sun, S., Zhang, W., 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., 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.
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.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

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, 8951-8968. https://doi.org/10.1007/s00253-021-11653-9.
30. Liu, X., Chen, A., Wang, Y., Jin, G., Zhang, Y., Gu, L., 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., 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., 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., & 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., 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. Sagonda, T., Adil, M. F., Sehar, S., Rasheed, A., Joan, H. I., Ouyang, Y., Shamsi, I. H., 2021. Physio-ultrastructural footprints and iTRAQ-based proteomic approach unravel the role of *Piriformospora indica*-colonization in counteracting cadmium toxicity in rice. Ecotoxicol. Environ. Saf, 220, 112390. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112390.
46. 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, 717-730. https://doi.org/10.1007/s00248-020-01629-z.
47. 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.
48. 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.
49. Shukla, J., Mohd, S., Kushwaha, A. S., Narayan, S., Saxena, P. N., Bahadur, L., Kumar, M., 2022. Endophytic fungus

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]

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.
50. 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.
51. 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.
52. Tekdal, D., Çetiner, S., 2018. Investigation of the effects of salt (NaCl) stress and cadmium (cd) toxicity on growth and mineral acquisition of *Vuralia turcica*. S. Afr. J. Bot, 118, 274-279. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.07.029.
53. ur Rahman, S., Khalid, M., Hui, N., Rehman, A., Kayani, S. I., Fu, X., 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.
54. 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, 1-20. https://doi.org/10.1007/s00271-024-00945-3.
55. Wang, B., Wang, P., Zhao, S., Shi, H., Zhu, Y., Teng, Y., 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.
56. 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.
57. Wei, L., Zhao, H., Wang, B., Wu, X., Lan, R., Huang, X., 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.
58. 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, 3367-3377. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00612-y.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. Zarebanadkouki, M., Fink, T., Benard, P., Banfield, C. C., 2019. Mucilage facilitates nutrient diffusion in the drying rhizosphere. Vadose Zone J, 18, 190021. https://doi.org/10.2136/vzj2019.02.0021.
64. 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.

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-09]