Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

Study of the effect of cadmium and polyvinyl chloride on the accumulation of elements and some physiological traits of Kochia seedlings

Atefeh Mirzaei[1], Ali Sepehri[*2]

1. Ph.D. Student, Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: mirzaei.a1992@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: a_sepehri@basu.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.07.2024
Revised: 03.12.2024
Accepted: 04.14.2024

Keywords:
Antioxidant,
Cadmium,
Free radicals,
Microplastic,
Nutrien

ABSTRACT

Background and Objectives: Microplastics affect plant growth by changing the biological diversity and physical and chemical characteristics of the soil. One of the microplastics with serious environmental risks is polyvinyl chloride, which is consumed in agricultural areas and in direct contact with the soil. Cadmium is also an unnecessary heavy metal with high pollution, whose presence in agricultural lands and natural environments can harm the growth of crops. Phytoremediation is an on-site cleaning method using green plants with high coverage to remove, destroy or separate pollutants including cadmium from the environment. Kochia is a very adaptable herbaceous plant, resistant to salinity, drought and environmental stresses, which has a wide range of expansion due to its high adaptability in different climates. This study was conducted to investigate the potential of cadmium remediation by the Kochia plant in the conditions of soil contamination with cadmium and polyvinyl chloride microplastics and the extent of the plant's access to important nutrients in such conditions.

Materials and Methods: The factorial experiment was carried out on the base of a completely randomized design in three replications in the research greenhouse of Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University in 2022. The experimental treatments included polyvinyl chloride microplastic at three levels of zero, 0.1 and 1% by weight of soil and cadmium at two levels of zero and 10 mg kg^{-1} of soil. In this research, root dry weight, shoot dry weight, proline, total antioxidant capacity, free radical inhibition percentage, bioaccumulation factor and accumulation of cadmium, iron, copper, manganese and zinc elements in shoots were investigated.

Results: The results showed that increasing the concentration of cadmium to 10 mg in the soil and microplastic to 0.1 and 1% caused a decrease in root dry weight, shoot dry weight, iron, copper, manganese and zinc element concentration in Kochia seedlings. The combined effect of cadmium and microplastic significantly increased the amount of proline, the total antioxidant capacity, inhibition percentage of free radicals and cadmium. The interaction of cadmium and microplastic on the dry weight of the root and shoot of the seedling was significant at the 5% probability level. So, at the highest stress level (cadmium 10 mg and microplastic 1%), the dry weight of root and shoot was 1.10 and 5.60 g per plant,

Uncorrected Proof

respectively. Also, the interaction of cadmium and microplastics on the amount of proline was significant at the 1% probability level. The highest amount of proline was obtained in the concentration of 10 mg/kg of cadmium and 1% soil microplastic, equivalent to 38.70 µ/g fresh weight. In the treatment of 10 mg of cadmium, with the increase of soil microplastics from zero to 0.1 and 1%, the amount of total antioxidant activity increased by 53.62 and 81.38%, respectively, compared to the control treatment. The inhibition percentage of free radicals was significant at the probability level of 1% and in the treatment of 10 mg of cadmium and 1% microplastic, it increased by 9.55% compared to the control. The interaction of cadmium and microplastics on the amount of cadmium, iron, copper, manganese and zinc was significant at the 1% probability level. At the concentration of 10 mg of cadmium in the soil, with the increase of soil microplastics from zero to 0.1 and 1%, the amount of cadmium in the shoot increased by 21.30 and 42.02%. At the highest level of stress, cadmium 10 mg and microplastic 1%, the amount of iron, copper, manganese and zinc elements in the shoot decreased to 24.13, 55.97, 39.88 and 47.93 mg kg^{-1} soil, respectively, compared to without microplastic (control), so that the highest negative effect was observed in copper, zinc, manganese and then iron, respectively.

Conclusion: In general, the results of this research showed that although the used concentrations of cadmium and polyvinyl chloride microplastics in the soil, caused a decrease in the absorption of important nutrients, a decrease in the growth and dry weight of the plant's shoot and root, but the Kochia plant through absorption and the accumulation of cadmium in aerial parts has a good potential for plant remediation in cadmium and microplastics contaminated soils.

Cite this article: Mirzaei, Atefeh, Sepehri, Ali. 2025. Study of the effect of cadmium and polyvinyl chloride on the accumulation of elements and some physiological traits of Kochia seedlings. *Journal of Plant Production Research*, 32 (1), 1-18.

© The Author(s).
DOI: ----------
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Uncorrected Proof

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

بررسی تأثیر کادمیوم و پلی‌وینیل‌کلراید بر جذب عناصر کم‌مصرف و برخی صفات فیزیولوژیکی گیاهچه‌های کوشیا

عاطفه میرزایی[۱]، علی سپهری*[۲]

۱. دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.
رایانامه: mirzaei.a1992@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.
رایانامه: a_sepehri@basu.ac.ir

Uncorrected Proof

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

واژه‌های کلیدی:
آنتی‌اکسیدانت،
رادیکال‌های آزاد،
عناصر غذایی،
کادمیوم،
میکروپلاستیک

چکیده

سابقه و هدف: میکروپلاستیک‌ها با تغییر در تنوع زیستی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، رشد گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. یکی از میکروپلاستیک‌های با خطرات جدی زیست‌محیطی، پلی‌وینیل‌کلراید است که در مناطق کشاورزی و در ارتباط مستقیم با خاک مصرف می‌شود. کادمیوم نیز یک فلز سنگین غیرضروری با آلایندگی زیاد بوده که وجود آن در اراضی کشاورزی و محیط‌های طبیعی می‌تواند به رشد محصولات زراعی آسیب وارد کند. گیاه‌پالایی یک روش پاکسازی در محل با استفاده از گیاهان سبز با پوشش زیاد برای حذف، تخریب یا جداسازی آلاینده‌ها ازجمله کادمیوم از محیط‌زیست می‌باشد. کوشیا یک گیاه علفی بسیار سازگار، مقاوم به شوری، خشکی و تنش‌های محیطی است که به‌علت سازگاری بالا در اقلیم‌های مختلف دامنه گسترش وسیعی دارد. این مطالعه باهدف بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی عنصر کادمیوم توسط گیاه کوشیا در شرایط آلودگی خاک به کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید و میزان دسترسی گیاه به عناصر غذایی مهم در چنین شرایطی انجام‌شده است.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید در سه سطح صفر، ۰/۱ و ۱ درصد وزنی خاک و کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم ($CdCl_2$) در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. در این پژوهش وزن خشک‌ریشه، وزن خشک اندام هوایی، پرولین، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، درصد مهار رادیکال‌های آزاد، عامل تجمع زیستی و تجمع عناصر کادمیوم، آهن، مس، منگنز و روی در اندام هوایی موردبررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم به ۱۰ میلی‌گرم در خاک و میکروپلاستیک به ۰/۱ و ۱ درصد سبب کاهش وزن خشک‌ریشه، وزن خشک اندام هوایی، غلظت عنصر آهن، مس، منگنز و روی در گیاهچه‌های کوشیا شد. اثر توأم کادمیوم و میکروپلاستیک به‌طور معنی‌داری سبب افزایش میزان پرولین، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، درصد مهار رادیکال‌های آزاد و کادمیوم گردید. برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی گیاهچه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. به‌طوری‌که، در بالاترین سطح تنش (کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد) وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی به ترتیب ۱/۱۰ و ۵/۶۰ گرم در بوته شد. هم‌چنین برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین مقدار پرولین در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد خاک، معادل ۳۸/۷۰ میکرومول بر گرم وزن‌تر حاصل شد. در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم با افزایش میکروپلاستیک خاک از صفر به ۰/۱ و ۱ درصد میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل به ترتیب ۵۳/۶۲ و ۸۱/۳۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. درصد مهار رادیکال‌های آزاد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد نسبت به شاهد ۹/۵۵ درصد افزایش یافت. برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کادمیوم، آهن، مس، منگنز و روی گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. هم‌چنین در غلظت ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک با افزایش میکروپلاستیک خاک از صفر به ۰/۱ و ۱ درصد میزان کادمیوم اندام هوایی ۲۱/۳۰ و ۴۲/۰۲ درصد افزایش نشان داد. در بالاترین سطح تنش، کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد، میزان عنصر آهن، مس، منگنز و روی اندام هوایی به‌ترتیب ۱۳/۲۴، ۵۵/۹۷، ۳۹/۸۸ و ۴۷/۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نسبت به بدون میکروپلاستیک (شاهد) کاهش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین تأثیر منفی به‌ترتیب در عنصر مس، روی، منگنز و سپس آهن مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد گرچه عنصر کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید در غلظت‌های به‌کاررفته در خاک سبب کاهش جذب عناصر غذایی مهم، کاهش رشد و درنتیجه کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهچه می‌شود اما گیاه کوشیا از طریق جذب و تجمع کادمیوم در اندام هوایی دارای پتانسیل مناسبی جهت گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به کادمیوم و میکروپلاستیک است.

استناد: میرزایی، عاطفه، سپهری، علی (۱۴۰۴). بررسی تأثیر کادمیوم و پلی‌وینیل‌کلراید بر جذب عناصر کم‌مصرف و برخی صفات فیزیولوژیکی گیاهچه‌های کوشیا. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۲ (۱)، ۱۸-۱.

DOI: ----------

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

Uncorrected Proof

مقدمه

آلودگی زیست‌محیطی به دلیل توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن سبب افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین شده است که می‌توانند از طریق محصولات کشاورزی وارد زنجیره غذایی شوند (۱). در این راستا وجود میکروپلاستیک‌ها نیز در خاک‌های کشاورزی، جنگل‌ها، محیط‌های آبی و مناطق صنعتی در سال‌های اخیر مشکل‌ساز شده است (۲). میکروپلاستیک‌ها ذرات پلیمری ناشی از فعالیت‌های انسانی و دارای ترکیبات شیمیایی مختلف با اندازه‌ای کوچک‌تر از پنج میلی‌متر هستند که از تخریب ذرات پلاستیکی بزرگ‌تر ایجاد می‌شوند (۳). میکروپلاستیک‌های مختلف می‌توانند اثرات متفاوتی بر محیط خاک داشته باشند (٤). رسوب و حرکت میکروپلاستیک‌ها در خاک تحت‌تأثیر فعالیت‌های زیستی و خاک‌ورزی صورت می‌گیرد (۵). گزارش‌شده میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید اغلب در مناطق کشاورزی و در ارتباط مستقیم با خاک استفاده می‌شود (٦). میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید گرچه در برابر تخریب طبیعی تااندازه‌ای مقاوم است اما قابلیت تخریب شدید نوری را داشته و در طی چرخه تولید برخی از محصولات آن مقدار زیادی ذرات به‌صورت میکرو و نانو تشکیل می‌شود (۱). میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید به‌دلیل انتشار مواد مضر مانند فتالات‌ها، سرب و کادمیوم در طول چرخه زندگی خود یکی از خطرناک‌ترین پلاستیک‌ها با خطرات جدی بهداشتی و محیط زیستی محسوب می‌شود (۷). ازآن‌جایی‌که مواد اضافه‌شده مضر در زنجیره پلی‌وینیل‌کلراید پیوند کووالانسی ندارند می‌توانند به‌مرور زمان جداشده و وارد محیط شوند (۸). میکروپلاستیک‌ها در خاک می‌توانند بر تنوع زیستی و ویژگی‌های فیزیکی خاک تأثیر گذاشته و درنتیجه بر رشد گیاه تأثیر منفی بگذارند (۹). از سوی دیگر فلزات سنگین با عبور از خاک و ورود به گیاهان در زنجیره‌های غذایی نقش داشته و تهدیدی مستقیم برای سلامت انسان و حیوانات هستند (۱۰). فلزات سنگین در قسمت‌هایی از گیاهان مانند دانه، ریشه و اندام هوایی تجمع یافته و می‌تواند باعث ایجاد سمیت در محصولات کشاورزی، کاهش کیفیت و عملکرد گیاه شوند (۱). کادمیوم (Cd) یک عنصر غیرضروری با سمیت بالا به‌عنوان یک آلاینده اصلی در محیط‌های طبیعی و کشاورزی گزارش‌شده است (۱۱). وجود کادمیوم بیش‌ازحد در خاک می‌تواند به‌طور جدی از طریق کاهش کارایی فتوسنتز و مهار فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی به رشد محصولات زراعی آسیب وارد کند (۱۲). کادمیوم برای گیاهان و انسان بسیار سمی بوده و می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را مختل کرده و از طریق ورود به زنجیره غذایی تهدیدی جدی برای سلامت انسان باشد (۱۳). در مقادیر بالای کادمیوم، فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه مانند افزایش طول سلول، جذب مواد مغذی، فتوسنتز و تنفس تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند (١٤). گیاه‌پالایی یک روش پاکسازی در محل با استفاده از گیاهان سبز با پوشش زیاد برای حذف، تخریب یا جداسازی آلاینده‌ها ازجمله کادمیوم از محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود (۱۵). برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گیاهان هالوفیت به‌عنوان گزینه مناسب توصیه‌شده‌اند (١٦). در این رابطه گیاه کوشیا (*Bassia scoparia* L.) یک هالوفیت یک‌ساله علفی بسیار سازگار، مقاوم به شوری و خشکی از خانواده کنوپودیاسه (*Chenopodiaceae*) است که در نواحی معتدله آفریقای شمالی، آسیا، اروپا و جنوب غربی آمریکای شمالی پراکنده بوده و به‌علت سازگاری بالا با دماها و اقلیم‌های مختلف دامنه گسترش وسیعی دارد (۱۷). این گیاه روزکوتاه بوده و زمانی که طول روز حدود ۱۳ تا ۱۵ ساعت برسد شروع به گلدهی می‌کند. بر اساس شرایط آب و

Uncorrected Proof

هوایی و تاریخ کاشت کوشیا می‌تواند دو تا سه مرتبه در سال تولید علوفه داشته باشد. کوشیا قادر است مقدار زیادی مواد معدنی پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم را ذخیره کند. گزارش‌شده این گیاه دارای توانایی جذب و انتقال کادمیوم به اندام هوایی بوده به‌طوری‌که افزایش کادمیوم در محیط کشت سبب افزایش تجمع کادمیوم در ساقه و برگ گیاه می‌گردد (١٦). از سوی دیگر گزارش‌شده در گیاهان شاه‌پسند (*Lantana camara*) و تاج‌ریزی (*Solanum photeinocarpum*) تحت تنش توأم کادمیوم و میکروپلاستیک، افزایش غلظت میکروپلاستیک سبب افزایش جذب کادمیوم توسط گیاهان مذکور شده است (۱۸). مطالعه حاضر باهدف بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی عنصر کادمیوم توسط گیاه کوشیا در شرایط آلودگی توأم خاک با کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید و میزان جذب عناصر غذایی مهم در چنین شرایطی انجام‌شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۰ در گلخانه تحقیقاتی فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا در شرایط دمایی ۳۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و طول دوره روشنایی ١٤ تا ١٢ ساعت اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار بر روی رقم محلی کوشیا انجام شد. خاک موردنظر از مزرعه تحقیقاتی تهیه که به نسبت دوبه‌یک خاک و ماسه‌مخلوط شده و طی دو مرحله به مدت ٦۰ دقیقه در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد ضدعفونی گردید. بافت خاک لوم شنی رسی بود و اسیدیته معادل ۷/۳ و هدایت الکتریکی ۱/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر داشت. مقدار فسفر، پتاسیم، مس، روی و آهن قابل‌استفاده خاک به‌ترتیب ١٤، ۲۷۵، ۲/۳، ۲/۷ و ۳/٤ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. از گلدان‌های سه لیتری با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. تیمارهای موردمطالعه شامل میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) با قطر ۷۵ میکرون در سه سطح صفر، ۰/۱ و ۱ درصد وزنی خاک و کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم ($CdCl_2$) در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. غلظت‌های موردنظر کادمیوم که بر اساس آزمایش مقدماتی در محدود تحمل گیاه تعیین‌شده بود در حجمی از آب که خاک را به نقطه ظرفیت زراعی می‌رساند حل‌شده و به خاک اضافه شد. خاک‌های آلوده به‌مدت چهار هفته به‌منظور نفوذ بهتر عنصر کادمیوم در دمای اتاق نگهداری و سپس مورداستفاده قرار گرفتند. سپس درصدهای موردنظر از میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید که بر اساس آزمایش مقدماتی و در محدوده تحمل گیاه تعیین‌شده به حجم خاک مورد آزمایش هر گلدان اضافه شد (۱۹). بذور گیاه کوشیا با محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی و پس از سه بار شستشو با آب مقطر در گلدان‌های سه لیتری کشت شدند. در طول دوره رشد رطوبت گلدان‌ها در حد ظرفیت زراعی نگه‌داشته شد. پس از سپری شدن طول دوره رشد، اندام هوایی و ریشه جهت اندازه‌گیری‌های موردنظر جمع‌آوری و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ٤۸ ساعت خشک شدند.

جهت اندازه‌گیری پرولین نیم‌گرم برگ تازه با اسید سولفوسالیسیلیک ۳/۳ درصد در ازت مایع ساییده و به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. دو میلی‌لیتر از عصاره به لوله آزمایش منتقل و به آن دو میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه شد. سپس به مدت یک ساعت لوله‌های آزمایش در بن‌ماری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و با نگهداری در حمام یخ واکنش متوقف شد. در پایان

Uncorrected Proof

به هر یک از نمونه‌ها چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه و به‌شدت تکان داده شد. سپس به مدت نیم ساعت به حالت سکون رهاشده و پس‌ازآن میزان جذب نوری مرحله بالایی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر Varian مدل Cary100 جذب در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. درنهایت میزان پرولین بر اساس نمودار استاندارد پرولین برحسب میکرو مول بر گرم وزن تازه برگ به دست آمد (۲۰).

به‌منظور اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و درصد مهار رادیکال‌های آزاد، عصاره متانولی از نیم گرم برگ تازه در پنج میلی‌لیتر متانول ۹۰ درصد هموژن نموده و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ انجام شد. جهت اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل به هر یک از نمونه‌های تهیه‌شده، سه میلی‌لیتر معرف تهیه‌شده از اسید سولفوریک، فسفات سدیم و مولیبدات آمونیوم اضافه شد. سپس لوله‌های درب‌دار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب به مدت یک ساعت قرار داده شد و جذب در طول‌موج ۶۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد (۲۱).

جهت تعیین ظرفیت مهار رادیکال‌های آزاد ابتدا مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره متانولی را با ۴۰۰ میکرولیتر تریس هیدروکلراید و ۵۰۰ میکرولیتر محلول DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) مخلوط شد. لوله‌های آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک قرار داده شد و جذب با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر ثبت شد. علاوه بر نمونه‌های مذکور یک لوله‌آزمایش به‌عنوان شاهد نیز تمامی مراحل تهیه محلول نمونه تکرار شد، فقط به‌جای عصاره گیاهی از متانول ۹۰ درصد استفاده شد (۲۲). نسبت مهار رادیکال‌های آزاد از رابطه یک به دست آمد:

$$\text{Inhibition ratio (\%)} = [(A_{\text{blank}} - A_{\text{sample}}) / A_{\text{blank}}] \times 100 \quad (۱)$$

در رابطه فوق، A_{blank} میزان جذب شاهد و A_{sample} میزان جذب نمونه‌های آزمایشی است.

برای اندازه‌گیری عناصر کادمیوم، آهن، مس، منیزیم، منگنز و روی، نیم‌گرم نمونه گیاهی خشک و آسیاب شده به ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک دو مولار اضافه شد. پس از اتمام فعل‌وانفعالات نمونه‌ها را در حمام آبی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و بعد از صاف کردن عصاره، حجم نهایی آن را به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت عناصر در بافت گیاهی با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمایی جفت القایی ICP-OES (Varian VIST-MPX, USA) تعیین شد (۲۳). هم‌چنین عامل تجمع زیستی که شاخصی از توانایی گیاه در تجمع یک فلز خاص نسبت به غلظت آن در خاک می‌باشد از رابطه دو به‌دست آمد (۲٤):

$$\text{عامل تجمع زیستی کادمیوم} = \text{غلظت کادمیوم در اندام هوایی} / \text{غلظت کادمیوم در خاک} \quad (۲)$$

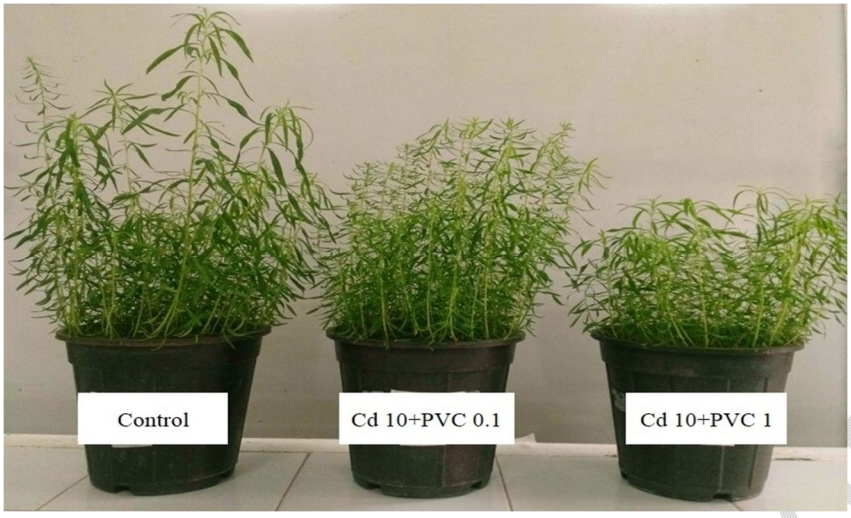
جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار SAS (9.4) و برای مقایسه میانگین داده‌ها از طریق آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. هم‌چنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

Uncorrected Proof

نتایج و بحث

وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی: نتایج تجزیه واریانس تأثیر کادمیوم و میکروپلاستیک بر روی صفات موردبررسی کوشیا در جدول یک ارائه‌شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد علاوه بر اثرات اصلی کادمیوم و میکروپلاستیک، برهمکنش آن‌ها بر وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی گیاهچه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است. وزن خشک‌ریشه در شرایط بدون کادمیوم، در حضور ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید نسبت به شاهد به‌ترتیب ۱۸/۹۸ و ۳۹/۸۷ درصد کاهش یافت (جدول ۳، شکل ۱). وزن خشک اندام هوایی نیز در شرایط بدون کادمیوم، در غلظت‌های ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک به‌ترتیب ۲۶/۸۱ و ۳۵/۷۲ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳، شکل ۱). در گیاهچه‌های در معرض تنش توأم کادمیوم میکروپلاستیک کمترین مقدار وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی تولید شد (جدول ۳، شکل ۱). در بالاترین سطح تنش (کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد) وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی به ترتیب ۱/۱۰ و ۵/۶۰ گرم در بوته بود که نسبت به شرایط بدون کادمیوم در همان غلظت میکروپلاستیک ۴۲/۱۰ و ۲۴/۶۲ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳، شکل ۱). کاهش وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی در گیاهچه‌های جو (*Hordeum vulgare* L.) در معرض سمیت کادمیوم قبلاً گزارش شده است. نشان داده شده در گیاهچه‌های برنج (*Oryza sativa* L.) در معرض میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی اتفاق می‌افتد (۲۵). هم‌چنین گزارش شده بین درصدهای مختلف میکروپلاستیک موجود در خاک و رشد گیاهچه رابطه عکس وجود دارد (۲۶). به نظر می‌رسد حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک مانع جذب و جابجایی بهینه آب در خاک و در نتیجه داخل گیاه شده و بر رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (۹). در تأیید یافته‌های ما بیان شده میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید موجود در خاک سبب کاهش وزن خشک گیاهچه‌های بارهنگ (*Plantago lanceolata* L.) شده و وزن خشک ریشه در مقایسه با اندام هوایی به مقدار بیش‌تری تحت‌تأثیر میکروپلاستیک قرار گرفته است (۲۷)، که می‌تواند به دلیل تماس بیش‌تر ریشه با میکروپلاستیک در محیط خاک می‌باشد. هم‌چنین مشخص شده تخریب ذرات میکروپلاستیک‌ها و انتشار ترکیبات سمی حاصل از آن‌ها بر رشد ریشه و اندام هوایی گیاه اثر سوء دارد (۲۵). ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان نمودند در گیاهچه‌های کلم‌برگ (*Brassica chinensis* L.) در معرض میکروپلاستیک و کادمیوم وزن خشک‌ریشه بیش‌تر از اندام هوایی کاهش‌یافته است. تحت‌تأثیر قرار گرفتن وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی در اثر میکروپلاستیک می‌تواند به دلیل ارتباط مستقیم میکروپلاستیک باریشه گیاه در محیط خاک باشد که جذب عناصر غذایی موردنیاز را با مشکل مواجه ساخته و سبب کاهش وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی می‌شود (۲۸). از سوی دیگر حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک به‌عنوان تنش فیزیکی می‌تواند بر سرعت انتقال مواد غذایی از ریشه به اندام هوایی تأثیر گذاشته و سبب کاهش سرعت جابجایی عناصر و درنتیجه فتوسنتز کم‌تر و درنهایت کاهش رشد گیاه شود (۲۹).

Uncorrected Proof



شکل ۱- گیاهچه‌های کوشیا رشد یافته تحت تنش کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید.

Fig. 1. Kochia seedlings grown under cadmium and polyvinyl chloride microplastic stress.

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات کادمیوم و میکروپلاستیک بر صفات اندازه‌گیری‌شده در گیاهچه کوشیا.

Table 1. Analysis of variance (mean square) of the effects of cadmium and microplastics on measured traits in Kochia seedlings.

مهار رادیکال‌های آزاد Free radical scavenging	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل Total antioxidant capacity	پرولین Prolin	وزن خشک‌ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	درجه آزادی (df)	منابع تغییرات Sources of changes
1020.40**	81056.80**	2404.94**	5.89**	42.33**	1	کادمیوم Cadmium
222.91**	55044.09**	891.36**	1.26**	10.63**	2	میکروپلاستیک Microplastic
49.06*	5729.89**	598.06 **	0.183*	4.05*	2	کادمیوم × میکروپلاستیک Cadmium × Microplastic
7.48	649.26	3.493	0.030	0.624	12	خطا Error
5.15	6.76	8.53	8.86	10.36	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد غیرمعنی‌دار

**, * and ns are significant at 1% and 5% probability level and non-significant, respectively

Uncorrected Proof

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات کادمیوم و میکروپلاستیک بر عناصر موردنظر در گیاهچه کوشیا.

Table 2. Analysis of variance (mean square) of the effects of cadmium and microplastics on the desired elements in Kochia seedlings.

عامل تجمع زیستی Bioconcentration Factor	روی Zn	منگنز Mn	مس Cu	آهن Fe	کادمیوم Cd	درجه آزادی df	منابع تغییرات Sources of changes
4.5541**	0.2431**	0.1475**	0.0115**	0.0040^{ns}	75.29**	1	کادمیوم Cadmium
0.3109**	0.0350**	0.0548**	0.0048**	0.2518**	0.929**	2	میکروپلاستیک Microplastic
0.2342**	0.0053**	0.0040*	0.0008**	0.0687**	0.782**	2	کادمیوم × میکروپلاستیک Cadmium × Microplastic
0.0058**	0.0010	0.0010	0.0001	0.0058	0.092	12	خطا Error
10.09	7.07	6.23	10.30	5.31	13.17	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد غیرمعنی‌دار

**, * and ^{ns} are significant at 1% and 5% probability level and non-significant, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و میکروپلاستیک بر صفات اندازه‌گیری‌شده در گیاهچه کوشیا.

Table 3. Comparison of the average interaction effect of cadmium and microplastic on measured traits in Kochia seedlings.

عامل تجمع زیستی Bioconcentration Factor	روی Zn (mg kg^{-1})	منگنز Mn (mg kg^{-1})	مس Cu (mg kg^{-1})	آهن Fe (mg kg^{-1})	کادمیوم Cd (mg kg^{-1})	پرولین Prolin (µmol g^{-1} FW)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g p^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g p^{-1})	میکروپلاستیک Microplastic (%)	کادمیوم Cadmium (mg kg^{-1})
0.211^{c}	0.609^{a}	0.709^{a}	0.174^{a}	1.715^{a}	0.221^{d}	7.58^{e}	3.16^{a}	11.56^{a}	0	
0.258^{c}	0.593^{a}	0.599^{b}	0.146^{b}	1.523^{b}	0.268^{d}	10.84^{de}	2.56^{b}	8.46^{b}	0.1	0
0.284^{c}	0.519^{b}	0.534^{c}	0.137^{b}	1.107^{d}	0.286^{d}	12.63^{d}	1.90^{c}	7.43^{bc}	1	
0.991^{b}	0.436^{c}	0.514^{cd}	0.134^{bc}	1.517^{b}	3.591^{c}	17.32^{c}	1.66^{cd}	6.63^{cd}	0	
1.033^{b}	0.360^{d}	0.475^{d}	0.111^{c}	1.422^{bc}	4.356^{b}	24.38^{b}	1.43^{d}	6.03^{cd}	0.1	10
1.747^{a}	0.227^{e}	0.309^{e}	0.059^{d}	1.316^{c}	5.100^{a}	38.70^{a}	1.10^{e}	5.60^{d}	1	

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار به روش LSD در سطح پنج درصد می‌باشد

In each column, the averages with different letters indicate the presence of a significant difference using the LSD method at the 5 % level

پرولین: بر اساس نتیجه تجزیه واریانس داده‌ها اثرات کادمیوم، میکروپلاستیک و برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار پرولین در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد خاک، معادل ۳۸/۷۰

Uncorrected Proof

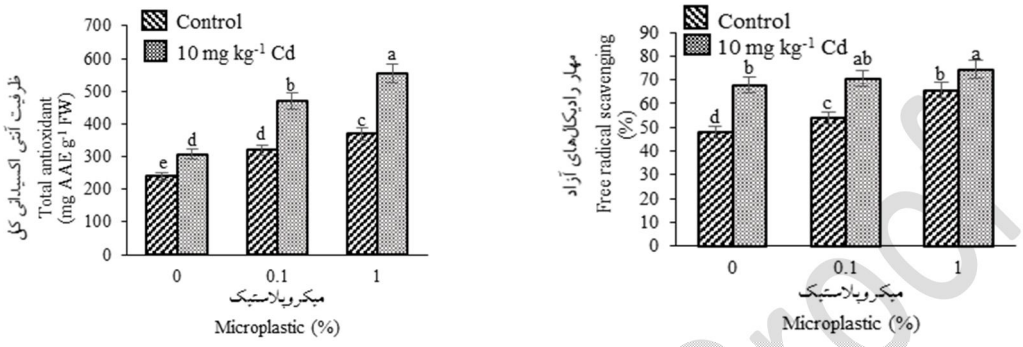
میکرومول بر گرم وزن‌تر مشاهد شد (جدول ۳). در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم با افزایش میکروپلاستیک به ۰/۱ و ۱ درصد میزان پرولین به ترتیب ٤۰/۷٦ و ۱۲۳/٤٤ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۳). پرولین به‌عنوان اسمولیت آنتی‌اکسیدانی، در شرایط تنش در برگ‌های گیاه تجمع یافته و تحمل گیاه را از طریق تنظیم فشار اسمزی سلول‌ها افزایش می‌دهد (۳۰). سایر پژوهش‌گران افزایش پرولین تحت تنش کادمیوم را در گیاه بادَرشبی (*Dracocephalum moldavica* L.) و در گیاهچه‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.) گزارش کرده‌اند (۳۱، ۳۲). هم‌چنین بیان شده پلی‌وینیل‌کلراید تجمع فلز سنگین در برگ‌های سیب‌زمینی شیرین (*Ipomoea batatas* L.) را افزایش داده و برای جلوگیری از اثرات مضر فلز سنگین گیاه تولید پرولین را افزایش می‌دهد (۳۳). طبق پژوهش‌های به‌عمل‌آمده بسیاری از گیاهان در شرایط نامطلوب محیطی در پاسخ به تنش، پرولین تولید می‌کنند، گرچه در مورد نحوه تولید و عمل پرولین در چنین شرایطی اختلاف‌نظر وجود دارد (۳٤).

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و مهار رادیکال‌های آزاد:

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و مهار رادیکال‌های آزاد گیاهچه تحت‌تأثیر سطوح مختلف کادمیوم و میکروپلاستیک و برهمکنش آن‌ها قرارگرفته و ازنظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۱). عنصر کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید و اثرات متقابل آن‌ها سبب افزایش میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل و هم‌چنین افزایش درصد مهار رادیکال‌های آزاد شد. همان‌طور که در شکل یک مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت کادمیوم خاک به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل گیاهچه افزایش‌یافته به‌گونه‌ای که فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل گیاهچه نسبت به شاهد (بدون کادمیوم) حدود ۲۷/٤۰ درصد بیش‌تر است. هم‌چنین درصد مهار رادیکال‌های آزاد گیاهچه‌های در معرض ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم نسبت به شاهد (بدون کادمیوم) حدود ٤۱/۲٦ درصد افزایش یافت. در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم با افزایش میکروپلاستیک به ۰/۱ و ۱ درصد میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل به ترتیب ۵۳/٦۲ و ۸۱/۳۸ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. درصد مهار رادیکال‌های آزاد نیز در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۱ درصد نسبت به شاهد ۹/۵۵ درصد افزایش نشان داد (شکل ۲). آلودگی توأم میکروپلاستیک‌ها و کادمیوم مسیرهای متابولیک کلیدی گیاه مانند سوخت‌وساز کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه و لیپیدها را دچار آسیب کرده درنتیجه پاسخ‌های دفاعی اکسیداتیو رخ می‌دهد (۳۵). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌توانند تولید بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از تنش را از بین برده و نقش مهمی در افزایش تحمل به‌تنش در گیاه ایفا کنند (۳٤). گزارش‌شده تنش کادمیوم و میکروپلاستیک در گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) نیز باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزادشده است و زمانی که افزایش سطح گونه‌های فعال اکسیژن از ظرفیت مهار آنزیم‌ها فراتر رفت گیاه از طریق تولید آنتی‌اکسیدان‌ها از خود محافظت نموده است (۳٦). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان نشان‌دهنده سازوکار دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های محیطی است (۳۵). وانگ و همکاران (۲۰۲٤) نیز بیان نمودند در تنش کادمیوم و میکروپلاستیک در گیاه خردل هندی (*Brassica juncea var. multiceps*) افزایش درصد مهار رادیکال‌های آزاد مشاهده‌شده است (۳۵). ازآن‌جایی‌که گونه‌های فعال اکسیژن مولکول‌های سیگنال‌دهنده کلیدی در سلول هستند گیاهان را قادر می‌سازند که به‌سرعت به محرک‌های

Uncorrected Proof

مختلف محیطی پاسخ دهند. گونه‌های فعال اکسیژن ممکن است به ساختار کلروپلاست آسیب رسانده و فعالیت فتوسنتزی را مهار کنند، درنتیجه سبب کاهش رشد در گیاه شوند (۳۷). بدیهی است در این حالت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌حذف گونه‌های فعال اکسیژن اضافی کمک کرده و آسیب‌های ناشی از تنش‌های زیستی را کاهش می‌دهند.



شکل ۲- اثر کادمیوم و میکروپلاستیک بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و مهار رادیکال‌های آزاد گیاهچه کوشیا.

Fig. 2. The effect of cadmium and microplastics on the total antioxidant capacity and inhibition of free radicals of Kochia seedlings.

کادمیوم: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اثر کادمیوم و میکروپلاستیک و برهمکنش آن‌ها بر غلظت کادمیوم اندام هوایی گیاهچه در جدول دو آمده است. برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کادمیوم اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم و میکروپلاستیک در محیط رشد گیاهچه میزان جذب کادمیوم در اندام هوایی افزایش‌یافته است (جدول ۳). به‌طوری‌که در حضور ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم در خاک، افزایش میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید از صفر به ۰/۱ و ۱ درصد میزان جذب کادمیوم را به ترتیب ۲۱/۳۰ و ۴۲/۰۲ درصد افزایش داد (جدول ۳). افزایش تجمع کادمیوم در اندام هوایی در حضور میکروپلاستیک در گیاهچه‌های خردل هندی (*Brassica juncea var. multiceps*) نیز مشاهده‌شده، بیان شده با افزایش سطوح میکروپلاستیک در خاک محتوای کادمیوم در برگ‌های گیاه افزایش می‌یابد (۳۵). اصولاً میکروپلاستیک‌ها بر میزان فلزات سنگین جذب‌شده توسط گیاه تأثیر گذاشته و با تغییر محتوای زیستی فلزات سنگین در خاک بر کارایی گیاه‌پالایی تأثیر می‌گذارند، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با تجمع در سطح ریشه باعث افزایش غلظت کادمیوم در مجاورت ریشه گیاهان می‌شوند (۳۷). محتوای کادمیوم در اندام هوایی گیاه تاج‌ریزی (*Solanum photeinocarpum*) نیز با افزایش غلظت میکروپلاستیک افزایش‌یافته است (۱۸). هم‌چنین تجمع میکروپلاستیک در اطراف ریشه گیاه سبب افزایش تجمع کادمیوم در ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) شده است (۳۸). سطح ریشه به‌عنوان مسیر اصلی انتقال و حرکت یون‌های کادمیوم از خاک به گیاه محسوب می‌شود. میکروپلاستیک‌ها به دلیل خاصیت آب‌گریزی قوی و سطح ویژه بالا با تأثیر بر ویژگی‌های پایه خاک و اشغال مکان‌های جذب، سبب افزایش تحرک کادمیوم شده و از طریق افزایش فراهمی زیستی کادمیوم در سیستم خاک-گیاه سمیت کادمیوم در گیاه را افزایش

Uncorrected Proof

می‌دهند. هم‌چنین میکروپلاستیک با کاهش ظرفیت جذب کادمیوم توسط خاک، تحرک کادمیوم در خاک را افزایش داده بنابراین دسترسی گیاه به کادمیوم بیش‌تر می‌شود (۳۹).

آهن: برهمکنش تیمارهای کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت آهن اندام هوایی گیاهچه معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح مختلف کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت آهن اندام هوایی در جدول سه ارائه‌شده است. بیش‌ترین غلظت آهن در اندام هوایی در تیمار بدون کادمیوم (سطح صفر) و بدون میکروپلاستیک به غلظت ۱/۷۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد. در شرایط بدون کادمیوم و با حضور میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید ۰/۱ و ۱ درصد در خاک غلظت عنصر آهن در اندام هوایی نسبت به شاهد به ترتیب ۱۱/۱۹ و ۳۵/٤۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). از سوی دیگر با افزایش غلظت کادمیوم خاک به ۱۰ میلی‌گرم، حضور میکروپلاستیک ۱ درصد میزان عنصر آهن را نسبت به شاهد ۱۳/۲٤ درصد کاهش داد (جدول ۳). کاهش محتوای آهن براثر تنش میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید در گیاه کدوی تخمه کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) توسط کلوزی و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش‌شده است (٤۰). در ارتباط با تأثیر منفی کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت عنصر آهن نتایج مشابهی در مطالعه لیو و همکاران (۲۰۲۳) در گیاهچه‌های برنج (*Oryza sativa* L.) مشاهده شد (۳٦). در مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲٤) در گیاهچه‌های خردل هندی (*Brassica juncea var. multiceps*) نیز غلظت عنصر آهن در معرض کادمیوم و میکروپلاستیک به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. آهن عنصری مهم برای بیوسنتز کلروفیل و مسیرهای مختلف زیست‌شیمیایی گیاهان به‌شمار می‌رود (٤۱). میکروپلاستیک‌ها از طریق بستن منافذ دیواره سلولی، جذب آب را محدود کرده و سبب کاهش جذب عناصر غذایی مانند آهن توسط گیاه شده و درنهایت سبب کاهش زیست‌توده و عملکرد در گیاه می‌شود (۳۵).

مس: غلظت مس در اندام هوایی گیاهچه تحت‌تأثیر تیمارهای کادمیوم، میکروپلاستیک و هم‌چنین برهمکنش آن‌ها در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط بدون کادمیوم و حضور میکروپلاستیک ۱ درصد میزان عنصر مس ۲۱/۲٦ درصد کاهش یافت (جدول ۳). همان‌طور که در جدول سه مشاهده می‌شود با افزایش غلظت کادمیوم در خاک مقدار انتقال مس به اندام هوایی کاهش یافت در این شرایط میکروپلاستیک موجود در خاک میزان کاهش عنصر مس در اندام هوایی را شدت بخشید. به‌طوری‌که با افزایش غلظت کادمیوم به ۱۰ میلی‌گرم در خاک و تیمار میکروپلاستیک ۱ درصد میزان عنصر مس در اندام هوایی گیاهچه کوشیا به میزان ۵۵/۹۷ درصد کاهش یافت (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار عنصر مس در تیمار بدون کادمیوم و میکروپلاستیک معادل ۰/۱۷٤ میلی‌گرم و کم‌ترین میزان عنصر مس مربوط به تیمار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد معادل ۰/۰۵۹ میلی‌گرم مشاهده شد (جدول ۳). نتایج مشابهی در گیاهچه‌های کدوی تخمه کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) در معرض میکروپلاستیک گزارش‌شده است، به‌طوری‌که با افزایش میکروپلاستیک در محیط رشد گیاه غلظت عنصر مس کاهش‌یافته است (٤۰). هم‌چنین بیان‌شده اثر هم‌زمان تنش کادمیوم و میکروپلاستیک سبب کاهش جذب مس در برگ گیاه می‌شود (۳۵). میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به ریشه‌های گیاه متصل شده و سبب انسداد کانال‌های یونی شده درنتیجه از جذب مواد مغذی و سایر اجزای ضروری توسط ریشه‌ها جلوگیری می‌کنند (۲۹). ازآن‌جاکه عنصر مس یک عنصر ضروری

Uncorrected Proof

موردنیاز برای زنجیره انتقال الکترون و تولید ATP[1] در گیاهان است بنابراین کمبود آن اثرات جدی بر فرآیندهای مهم ازجمله فعالیت‌های آنزیمی و فتوسنتز گیاه گذاشته و از رشد گیاه می‌کاهد (٤١).

منگنز: منگنز موجود در اندام هوایی گیاهچه تحت‌تأثیر تیمارهای کادمیوم، میکروپلاستیک و هم‌چنین برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در شرایط تنش کادمیوم و میکروپلاستیک میزان غلظت عنصر منگنز در اندام هوایی کوشیا کاهش یافت (جدول ۳). در شرایط بدون کادمیوم تأثیر کاهشی در غلظت‌های ۰/۱ و ۱ درصد میکروپلاستیک بر میزان عنصر منگنز نسبت به شاهد به ترتیب ۱۵/۵۱ و ۲٤/٦۸ درصد بود (جدول ۳). با افزایش کادمیوم در خاک تأثیر کاهشی میکروپلاستیک بر میزان جذب عنصر منگنز بیش‌تر بود به‌طوری‌که کاهش میزان جذب منگنز در سطح تنش ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در حضور میکروپلاستیک ۱ درصد نسبت به شاهد ۳۹/۸۸ درصد شد. وانگ و همکاران (۲۰۲٤) بیان نمودند که غلظت منگنز در برگ گیاه خردل هندی (*Brassica juncea var. multiceps*) به‌طور قابل‌توجهی بستگی به سطوح میکروپلاستیک موجود در خاک دارد به‌طوری‌که سمیت میکروپلاستیک و کادمیوم سبب کاهش محتوای منگنز در اندام هوایی می‌شود (۳۵). به‌طورکلی، میکروپلاستیک‌ها از طریق تأثیر بر محیط فعالیت ریشه سبب جلوگیری و کاهش انتقال عناصر معدنی شده و باعث ایجاد مشکلات تغذیه‌ای در گیاهان می‌شوند (٤۲). از سوی دیگر حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط رشد گیاه سبب کاهش رشد ریشه شده و سطح جذب عناصر ضروری ازجمله منگنز را کاهش می‌دهد و بدین شکل سبب کاهش دسترسی گیاه به عناصر غذایی و انتقال آن به اندام هوایی می‌شود (۱۸).

روی: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کادمیوم، میکروپلاستیک و برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر میزان عنصر روی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط بدون کادمیوم، حضور میکروپلاستیک به میزان ۱ درصد در خاک میزان عنصر روی در اندام هوایی را نسبت به شاهد (صفر میکروپلاستیک) ۱٤/۷۷ درصد کاهش داد (جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیوم و میکروپلاستیک در خاک، میزان کاهش جذب عنصر روی در اندام هوایی گیاهچه شدت بیش‌تری یافت به‌طوری‌که در غلظت کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و در حضور میکروپلاستیک ۰/۱ و ۱ درصد به ترتیب کاهش میزان جذب روی نسبت به تیمار شاهد ۱۷/٤۳ و ٤۷/۹۳ درصد بود (جدول ۳). بیش‌ترین محتوای عنصر روی در اندام هوایی در تیمار بدون کادمیوم و میکروپلاستیک معادل ۰/٦۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم و کم‌ترین محتوای روی در کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک ۱ درصد، معادل ۰/۲۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک ملاحظه شد. لیان و همکاران (۲۰۲۰) نیز دریافتند که در حضور کادمیوم و میکروپلاستیک، میزان جذب و انتقال عنصر روی به اندام هوایی گندم (*Triticum aestivum* L.) کاهش‌یافته است. میکروپلاستیک‌ها انتقال مواد مغذی را از ریشه به اندام هوایی کاهش می‌دهند بنابراین قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض میکروپلاستیک‌ها منجر به عدم تعادل مواد مغذی در گیاه می‌شود (۱۳). کاهش جذب مواد مغذی از طریق اتصال میکروپلاستیک‌ها به ریشه و بستن کانال‌های جذب مواد غذایی است زیرا جابجایی عناصر توسط آوند چوبی و غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه در جذب و انتقال عناصر به بافت‌های هوایی گیاه ازجمله برگ نقش اساسی دارد (۲۹).

عامل تجمع زیستی: عامل تجمع زیستی کادمیوم تحت‌تأثیر تیمارهای کادمیوم، میکروپلاستیک و هم‌چنین برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد

1- Adenosine tri phosphate

Uncorrected Proof

قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در تنش کادمیوم و میکروپلاستیک عامل تجمع زیستی کادمیوم در گیاهچه کوشیا افزایش یافت (جدول ۳). در حضور کادمیوم اثر افزایشی میکروپلاستیک بر تجمع زیستی کادمیوم بیش‌تر بود به‌طوری‌که در سطح ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک و حضور میکروپلاستیک ۱ درصد، تجمع کادمیوم در گیاه نسبت به شاهد معادل ۷۶/۲۸ درصد افزایش یافت (جدول ۳). عامل تجمع زیستی نشان‌دهنده توانایی گیاه در جذب فلز سنگین و انتقال آن از خاک به اندام هوایی استفاده است. بیان شده گیاهان دارای پتانسیل گیاه‌پالایی عامل تجمع زیستی بیش‌تر از یک دارند (۱۶، ۱۸). در مطالعه شی و همکاران (۲۰۲۲) طی تنش کادمیوم در گیاه کوشیا میزان تجمع کادمیوم در اندام هوایی بیش‌تر از ریشه گزارش‌شده است. در مطالعه دیگر تجمع کادمیوم در حضور میکروپلاستیک در اندام هوایی و ریشه گیاهان موردبررسی به سبب تحرک بیش‌تر کادمیوم افزایش یافت (۱۶). هم‌چنین افزودن میکروپلاستیک به خاک سبب افزایش تجمع کادمیوم در ریشه و اندام هوایی ذرت گردیده است (۳۸). میکروپلاستیک‌ها در خاک با تبدیل به ذرات کوچک‌تر قادرند توسط گیاهان جذب‌شده و با ورود به فضای بین سلولی، سبب افزایش جذب فلزات سنگین شوند (۱۸). بنابراین به‌نظر می‌رسد میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید جذب فلز سنگین کادمیوم توسط ریشه گیاه را تسهیل نموده و از این طریق سبب افزایش کارآیی گیاه‌پالایی گیاهچه‌های کوشیا شده است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در شرایط تنش‌زای کادمیوم، حضور میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید در محیط کشت به‌ویژه در سطح یک درصد سبب افزایش میزان جذب کادمیوم در اندام هوایی گیاهچه کوشیا می‌شود. در اثر تنش ایجادشده محتوای پرولین و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل و از سوی دیگر مهار رادیکال‌های آزاد افزایش‌یافته و در چنین شرایطی جذب و تجمع عناصر غذایی ضروری مانند آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی کاهش می‌یابد که می‌تواند یکی از دلایل اصلی کاهش رشد گیاهچه‌ها و کاهش تجمع ماده خشک در اندام هوایی و ریشه باشد؛ بنابراین گیاهچه کوشیا به‌عنوان یک گیاه مقاوم به تنش‌های محیطی، از طریق جذب کادمیوم در اندام هوایی دارای پتانسیل مناسب جهت گیاه‌پالایی کادمیوم در خاک‌های آلوده بوده و در حضور میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید، پتانسیل مذکور نه‌تنها کاهش نیافته بلکه افزایش می‌یابد. البته گیاه در غلظت کادمیوم موردبررسی ازلحاظ رشد و تجمع زیست‌توده با کاهش روبرو شده و جذب عناصر ضروری مهم نیز به‌خصوص در حضور میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید تااندازه‌ای با کاهش مواجه می‌گردد.

منابع

Aborisade, M. A., Geng, H., Oba, B. T., Kumar, A., Ndudi, E. A., Battamo, A. Y., Liu, J., Chen, D., Okimiji, O. P., & Ojekunle, O. Z. (2023). Remediation of soil polluted with Pb and Cd and alleviation of oxidative stress in *Brassica rapa* plant using nanoscale zerovalent iron supported with coconut-husk biochar. *Journal of Plant Physiology*, 154023.

2.Shen, H., Sun, Y., Duan, H., Ye, J., Zhou, A., Meng, H., Zhu ,F., He, H., & Gu, C. (2023). Effect of PVC microplastics on soil microbial community and nitrogen availability under laboratory-controlled and field-relevant temperatures. *Applied Soil Ecology,* 184, 104794.

3.Nosova, A. O., & Uspenskaya, M. V. (2023). Ecotoxicological effects and

Uncorrected Proof

detection features of polyvinyl chloride microplastics in soils: A review. *Environmental Advances,* 13, 100437.

4. Huang, D., Wang, X., Yin, L., Chen, S., Tao, J., Zhou, W., Chen, H., Zhang, G., & Xiao, R. (2022). Research progress of microplastics in soil-plant system: ecological effects and potential risks. *Science of The Total Environment,* 812, 151487.
5. Wang, W., Ge, J., & Yu, X. (2020). Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: a review. *Ecotoxicology and environmental safety,* 189, 109913.
6. Briassoulis, D. (2023). Agricultural plastics as a potential threat to food security, health, and environment through soil pollution by microplastics: Problem definition. *Science of The Total Environment*, 164-533.
7. Rad, M. M., Moghimi, H., & Azin, E. (2022). Biodegradation of thermo-oxidative pretreated low-density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) microplastics by Achromobacter denitrificans Ebl13. *Marine Pollution Bulletin,* 181, 113830.
8. Abreu, C. M., Rezende, T. C., Serra, A. C., Fonseca, A. C., Braslau, R., & Coelho, J. F. (2023). Convenient and industrially viable internal plasticization of polyvinylchloride: copolymerization of vinyl chloride and commercial monomers. *Polymer,* 267, 125688.
9. Khalid, N., Aqeel, M., & Noman, A. (2020). Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly. *Environmental Pollution,* 267, 115653.
10. Bitarishvili, S., Dikarev, A., Kazakova, E., Bondarenko, E., Prazyan, A., Makarenko, E., Babina, D., Podobed, M., & Geras' kin, S. (2023). Growth, antioxidant system, and phytohormonal status of barley cultivars contrasting in cadmium tolerance. *Environmental Science and Pollution Research,* 30, 59749-59764.
11. Zhao, L., Liu, W., Lian, J., Shen, M., & Huo, X. (2020). Effects of electric fields on Cd accumulation and photosynthesis in *Zea mays* seedlings. *Journal of Environmental Management,* 276, 111328.
12. Cao, X., Luo, J., Wang, X., Chen, Z., Liu, G., Khan, M. B., Kang, K. J., Feng, Y., He, Z., & Yang, X. (2020). Responses of soil bacterial community and Cd phytoextraction to a Sedum alfredii-oilseed rape (*Brassica napus* L. and *Brassica juncea* L.) intercropping system. *Science of the Total Environment*, 7, 138152.
13. Lian, J., Wu, J., Zeb, A., Zheng, S., Ma, T., Peng, F., Tang, J., & Liu, W. (2020). Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution,* 263, 114498.
14. 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. *South African Journal of Botany,* 118, 274-279.
15. Liu, W., Wu, J., Lian, J., Zhang, X., Zeb, A., Zhou, Q., & Sun, Y. (2021). Potential use of Impatiens *balsamina* L. for bioremediation of lead and polychlorinated biphenyl contaminated soils. *Land Degradation & Development,* 32, 3773-3784.
16. Shi, R., Liang, L., Liu, W., & Zeb, A. (2022). *Kochia scoparia* L., a newfound candidate halophyte, for phytoremediation of cadmium-contaminated saline soils. *Environmental Science and Pollution Research,* 29, 44759-44768.
17. Kafi, M., Asadi, H., & Ganjeali, A. (2010). Possible utilization of high-salinity waters and application of low amounts of water for production of the halophyte *Kochia scoparia* as alternative fodder in saline agroecosystems. *Agricultural Water Management,* 9 (7), 139-147.
18. Yu, Q., Gao, B., Wu, P., Chen, M., He, C., & Zhang, X. (2023). Effects of microplastics on the phytoremediation

Uncorrected Proof

of Cd, Pb, and Zn contaminated soils by *Solanum photeinocarpum* and *Lantana camara*. *Environmental Research*, 15, 231 (Pt 3), 116312.

19. Li, R., Yu, L., Chai, M., Wu, H., & Zhu, X. (2020). The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China. *Science of the Total Environment,* 708, 135025.
20. Bates, L. S., Waldren, R. A., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil,* 39, 205-207.
21. Pavithra, K., & Vadivukkarasi, S. (2015). Evaluation of free radical scavenging activity of various extracts of leaves from Kedrostis foetidissima (Jacq.) Cogn. *Food Science and Human Wellness,* 4, 42-46.
22. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology,* 28, 25-30.
23. Tessier, A., Campbell, P. G., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry,* 51, 844-851.
24. 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*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110230.
25. Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, F. M., Al-mushhin, A. A., Hakami, O., Iqbal, M. F., Chen, F., & Alamri, S. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere,* 307, 135749.
26. Wu, P., Tang, Y., Dang, M., Wang, S., Jin, H., Liu, Y., Jing, H., Zheng, C., Yi, S., & Cai, Z. (2020). Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of the total environment,* 717, 135187.
27. Van Kleunen, M., Brumer, A., Gutbrod, L., & Zhang, Z. (2020) .A microplastic used as infill material in artificial sport turfs reduces plant growth. *Plants, people, planet,* 2, 157-166.
28. Zhang, Z., Li, Y., Qiu, T., Duan, C., Chen, L., Zhao, S., Zhang, X., & Fang, L. (2022). Microplastics addition reduced the toxicity and uptake of cadmium to *Brassica chinensis* L. *Science of the Total Environment,* 852, 158353.
29. 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.
30. Masoudniaragh, A., Oraei, M., Gohari, G., Akbari, A., & Faramarzi, A. (2021). Using halloysite nanotubes as carrier for proline to alleviate salt stress effects in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Scientia Horticulturae,* 285, 110202.
31. Azimi, F., Oraei, M., Gohari, G., Panahirad, S., & Faramarzi, A. (2021). Chitosan-selenium nanoparticles (Cs–Se NPs) modulate the photosynthesis parameters, antioxidant enzymes activities and essential oils in *Dracocephalum moldavica* L. under cadmium toxicity stress. *Plant Physiology and Biochemistry,* 167, 257-268.
32. Mehmood, S., Saeed, D. A., Rizwan, M., Khan, M. N., Aziz, O., Bashir, S., Ibrahim, M., Ditta, A., Akmal, M., & Mumtaz, M. A. (2018). Impact of different amendments on biochemical responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants grown in lead-cadmium contaminated soil. *Plant Physiology and Biochemistry,* 132, 345-355.
33. Khan, M. A., Kumar, S., Wang, Q., Wang, M., Fahad, S., Nizamani, M. M., Chang, K., Khan, S., Huang, Q., & Zhu, G. (2023). Influence of polyvinyl chloride microplastic on chromium uptake and toxicity in sweet potato.

Uncorrected Proof

Ecotoxicology and Environmental Safety, 251, 114526.

34. Tan, B., Tan, X., Liu, C., Zeng, Y., & Li, Y. (2022). Effects of lead stress on rice (*Oryza sativa* L.) growth and metabolism in the rhizosphere microenvironment: the role of eicosanoid compounds. *Plant Growth Regulation,* 96, 483-495.
35. Wang, J., Liu W., Wang, X., Zeb, A., Wang, Q., Mo, F., Shi, R., Liu, J., Yu, M., & Li, J. (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. *Science of The Total Environment,* 907, 167920.
36. Liu, Y., Cui, W., Li, W., Xu, S., Sun, Y., Xu, G., & Wang, F. (2023). Effects of microplastics on cadmium accumulation by rice and arbuscular mycorrhizal fungal communities in cadmium-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials,* 442, 130102.
37. Sun, J., Peng, Z., Zhu, Z.-R., Fu, W., Dai, X., & Ni, B. J. (2022). The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters. *Water Research,* 225, 119116.
38. Zhao, M., Xu, L., Wang, X., Li, C., Zhao, Y., Cao, B., Zhang, C., Zhang, J., Wang, J., & Chen, Y. (2023). Microplastics promoted cadmium accumulation in maize plants by improving active cadmium and amino acid synthesis. *Journal of Hazardous Materials,* 447, 130788.
39. Huang, F., Hu, J., Chen, L., Wang, Z., Sun, S., Zhang, W., Jiang, H., Luo, Y., Wang, L., & Zeng, Y. (2023). Microplastics may increase the environmental risks of Cd via promoting Cd uptake by plants: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials,* 448, 130887.
40. Colzi, I., Renna, L., Bianchi, E., Castellani, M.B., Coppi, A., Pignattelli, S., Loppi, S., & Gonnelli, C. (2022). Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127-238.
41. Vinodkumar, T., Jithina, M., Vineethkumar, V., Raj, K. V., Sreejesh, P., Vishnu, C., Jose, A., & Prakash, V. (2023). Determination of trace elements concentration and transfer factor in medicinal plants growing in the wetland of Payyanur Region, Kerala, India. *Materials Today: Proceedings*.
42. Manjate, E., Ramos, S., & Almedia, C. M. R. (2020). Potential interferences of microplastics in the phytoremediation of Cd and Cu by the salt marsh plant Phragmites australis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 103658.

Uncorrected Proof