



Photosynthetic and Biochemical Response of (*Bassia scoparia* L.) Seedlings to Cadmium and Polyvinyl Chloride Microplastics Stresses

Atefeh Mirzaei¹ | Ali Sepehri²✉

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: a_sepehri@basu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: January 07, 2024 Received in revised form: February 22, 2024 Accepted: March 03, 2024 Published online: September 22, 2024</p> <p>Keywords: Chlorophyll, dry matter, soil pollution, transpiration, total phenol.</p>	<p>The contamination of agricultural soils with microplastics and cadmium is considered as an important environmental problem affecting the growth and development of plants. In this research, the physiological and biochemical reaction of <i>Kochia</i> seedlings under the mentioned stresses has been investigated. The study was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications at Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University in 1401. Polyvinyl chloride (PVC) microplastics were used at three levels of zero, 0.1, and 1% by weight of soil and cadmium chloride at two levels of 0 and 10 mg kg⁻¹ of soil. The results showed that with the increase of soil cadmium to 10 mg kg⁻¹ and in the presence of 1% microplastic, the amount of total chlorophyll decreased by 52%, the rate of net photosynthesis by 31%, transpiration by 22%, and as a result, the total dry matter of seedlings decreased by 24% compared to the control. Microplastic stress of 1% and cadmium 10 mg increased malondialdehyde concentration by 35%, hydrogen peroxide concentration by 43% and total phenol by 62%. With the increase of cadmium concentration from 0 to 10 mg, the amount of ionic leakage of seedlings increased by 55%. Therefore, soil contamination with cadmium and polyvinyl chloride microplastics, especially in high amounts of stress (cadmium 10 mg and microplastic 1%) by affecting photosynthetic indicators (net photosynthesis rate, chlorophyll) caused a decrease in total dry matter and as a result the yield of <i>Kochia</i> seedlings. It seems that with the increase in the percentage of polyvinyl chloride in the soil, the access of <i>Kochia</i> seedlings to cadmium increased and it affected the amount of damage and intensity of stress in traits such as total chlorophyll, net photosynthesis rate, transpiration, instantaneous water consumption efficiency, and total dry matter increased in seedlings.</p>

Cite this article: Mirzaei A., & Sepehri, A. (2024). Photosynthetic and biochemical response of (*Bassia scoparia* L.) seedlings to cadmium and polyvinyl chloride microplastics stresses. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(3), 149-160. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.370559.655055.





پاسخ فتوستتزی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کوشیا (*Bassia scoparia* L.) به تنش کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید

عاطفه میرزایی^۱ | علی سپهری^{۲*}

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: a_sephehi@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آلودگی خاک‌های زراعی به کادمیوم و میکروپلاستیک به عنوان یک مسئله مهم زیست محیطی تأثیرگذار در رشد و نمو گیاهان مطرح است. در این پژوهش واکنش فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کوشیا تحت تنش‌های مذکور بررسی شده است. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا در سال ۱۴۰۱ انجام شد. از میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (PVC) در سه سطح صفر، ۰/۱ و یک درصد وزنی خاک و کلرید کادمیوم در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش کادمیوم به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک و در حضور پلی‌وینیل کلراید به میزان یک درصد، غلظت کلروفیل کل ۵۲٪، سرعت فتوستتزر خالص ۳۱٪، تعرق ۲۲٪ و در نتیجه ماده خشک کل گیاهچه‌ها ۲۴٪ نسبت به شاهد کاهش یافت. همچنین تنش کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید یک درصد در خاک، سبب افزایش غلظت مالون‌دی‌آلدئید به میزان ۳۵٪، غلظت پراکسید هیدروژن ۴۳٪ و فنل کل ۶۲٪ شد. با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۱۰ میلی‌گرم میزان نشت یونی گیاهچه‌ها نیز ۵۵٪ افزایش یافت. نتایج نشان داد آلودگی خاک به کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید به خصوص در مقادیر بالا (کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و میکروپلاستیک یک درصد) با تأثیر بر شاخص‌های مهم فتوستتزی مانند کلروفیل، سرعت فتوستتزر خالص و تعرق، سبب کاهش ماده خشک کل در نتیجه عملکرد گیاهچه‌های کوشیا شد. به نظر می‌رسد که با افزایش درصد پلی‌وینیل کلراید در خاک، میزان دسترسی گیاهچه‌های کوشیا به کادمیوم بیشتر شده؛ لذا آسیب وارده و شدت تنش در صفاتی مانند کلروفیل کل، سرعت فتوستتزر خالص، تعرق، کارایی مصرف لحظه‌ای آب و ماده خشک کل افزایش یافت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	
کلیدواژه‌ها:	
آلودگی خاک،	
تعرق،	
فنل کل،	
کلروفیل،	
ماده خشک.	

استناد: میرزایی، ع. و سپهری، ع. (۱۴۰۳). پاسخ فتوستتزی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کوشیا (*Bassia scoparia* L.) به تنش کادمیوم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۵(۳)، ۱۴۹-۱۶۰. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.370559.655055.



۱. مقدمه

در حال حاضر مصرف پلاستیک‌ها در سراسر جهان منجر به پراکندگی و تجمع گسترده زباله‌های پلاستیکی در محیط‌های آبی و خشکی شده است (Dainelli *et al.*, 2023). به طوری که آلودگی خاک به میکروپلاستیک به یک مسئله مهم زیست‌محیطی در اراضی کشاورزی تبدیل شده است (Huang *et al.*, 2023). میکروپلاستیک‌ها ذراتی کوچک‌تر از پنج میلی‌متر بوده که از تخریب ذرات پلاستیکی بزرگ‌تر ایجاد می‌شوند (Manjate *et al.*, 2020). اکوسیستم‌های کشاورزی یکی از منابع اصلی آلودگی به میکروپلاستیک‌ها در نظر گرفته می‌شوند. فرآیند ریزش پلاستیک‌ها باعث تولید میکروپلاستیک‌های ثانویه از طریق عوامل محیطی مانند نور، دما و آب شده که به طور آهسته وارد محیط رشد گیاه می‌شوند. گرچه وزن مولکولی بالای میکروپلاستیک‌ها و اندازه بزرگ آن‌ها از نفوذ مستقیم به دیواره سلولی در سطح ریشه گیاه تا حدودی جلوگیری می‌کند، ولی سایر آلاینده‌های شیمیایی آزادشده از میکروپلاستیک‌ها توسط گیاهان جذب و در طول فعال‌شدن الگوهای متابولیک باعث تنش اکسیداتیو می‌شوند (Pignattelli *et al.*, 2020). اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها روی انسان و جانوران تا اندازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته، ولی در حال حاضر مطالعات بیشتری لازم است تا به چگونگی تأثیرپذیری گیاهان توسط میکروپلاستیک‌های موجود در خاک در شرایط مختلف پرداخته شود (Karalija *et al.*, 2022).

گزارش شده در میان پلاستیک‌ها، پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌اتیلن مقدار بیشتری از آلودگی را در محیط زیست ایجاد می‌کنند (Yuan *et al.*, 2019). پلی‌وینیل کلراید یکی از پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها در سراسر جهان است که به طور گسترده‌ای به عنوان پوشش گلخانه‌های خورشیدی، پلاستیکی و سایر تأسیسات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلی‌وینیل کلراید با سایر پلاستیک‌ها متفاوت بوده و اغلب بلافاصله پس از استفاده به محیط زیست وارد می‌شود (Li *et al.*, 2020). اخیراً در چندین مطالعه اثرات مخرب میکروپلاستیک‌ها بر رشد و نمو گیاهان گزارش شده است (Khan *et al.*, 2023; Dainelli *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2023). اظهار شده میکروپلاستیک‌ها با تجمع بر سطوح و اطراف ریشه بر رشد، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاهان تأثیر می‌گذارند (Wu *et al.*, 2020). کاهش زیست‌توده گیاهان خردل هندی (*Brassica juncea* L.) در مجاورت با میکروپلاستیک خاک با افزایش گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر و پراکسید هیدروژن همراه بوده است، گزارش شده آلودگی خاک به میکروپلاستیک‌ها در حضور فلزات سنگین مانند کادمیوم، با افزایش تحرک و جذب بیشتر فلز سنگین، اثرات سمی بیشتری در گیاه داشته و تهدیدی جدی برای سلامت انسان و جانوران است (Wang *et al.*, 2024). بالاترین میزان آلودگی در میان آلاینده‌های معدنی مربوط به کادمیوم می‌باشد (Lian *et al.*, 2022). کادمیوم (Cd) به عنوان یک عنصر سمی و غیر ضروری، یک آلاینده مهم برای محیط‌های طبیعی و کشاورزی است که از طریق فعالیت‌های مختلف انسانی ناشی می‌شود.

کادمیوم دارای سمیت بالا برای گیاه، انسان و دام بوده و می‌تواند رشد و عملکرد گیاهان را مختل سازد و از طریق زنجیره غذایی تهدیدی جدی برای سلامتی انسان باشد. ریشه گیاهان فلز کادمیوم را به راحتی از خاک جذب و به اندام‌های هوایی منتقل می‌کند (Tekdal & Çetiner, 2018). گزارش شده کادمیوم سبب افزایش نشت یونی، افزایش تولید پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدی در گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) شده است (Lian *et al.*, 2022). عوامل مؤثر بر جذب در سطح ریشه ممکن است بر تجمع فلزات سنگین در گیاهان تأثیر بگذارد. در بررسی اثر آلودگی میکروپلاستیک و کادمیوم در گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) مشخص شد میکروپلاستیک‌ها از طریق تأثیر بر pH خاک و اشکال شیمیایی فلزات سنگین، بر فراهمی زیستی آن در اکوسیستم کشاورزی تأثیر گذاشته و تجمع آن‌ها را افزایش می‌دهند، در نتیجه سبب آسیب بر سیستم فتوسنتزی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد گیاه می‌شوند (Chen *et al.*, 2023). همچنین در بررسی اثر میکروپلاستیک و کادمیوم بر گیاه ذرت (*Zea mays* L.) مشخص شد که میکروپلاستیک از طریق تأثیر بر بیولوژی خاک، رشد و نمو گیاه را تغییر داده و سبب ایجاد مشکلاتی از جمله افزایش سمیت کادمیوم و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Zhao *et al.*, 2023). کوشیا (*Bassia scoparia*) به عنوان یک هالوفیت علفی یکساله بسیار مقاوم به شوری و خشکی، گیاهی از خانواده Chenopodiaceae بوده که در نواحی معتدله آفریقای شمالی، آسیا، اروپا و جنوب غربی آمریکای شمالی پراکنده و به علت سازگاری با دماها و اقلیم‌های

مختلف، دامنه گسترش وسیعی دارد. تجربیات موفقی از کشت کوشیا به عنوان علوفه در سراسر جهان وجود دارد (Shi et al., 2022). این گیاه در شرایط نیمه خشک ایران در کشت تابستانه و بهاره به ترتیب حدود ۱۰ و ۲۳ تن در هکتار علوفه تولید می کند که دارای توده های مختلف بوده و در شرایط اقلیمی مختلف از جمله خراسان بین ۳۰ تا ۳۵ تن در هکتار علوفه تر و ۱۱ تا ۱۴ تن در هکتار زیست توده خشک تولید می کند (Kafi et al., 2010). مصرف علوفه توسط دام در واقع بخشی از چرخه غذایی انسان محسوب می شود و در مناطقی که خاک دارای آلودگی کادمیوم است به ویژه در مجاورت مناطق صنعتی، افزایش جذب کادمیوم توسط گیاهان علوفه ای می تواند سبب تجمع و آسیب متابولیسی در دام ها شود (Anderson et al., 2022). علاوه بر کادمیوم، آلودگی خاک به میکروپلاستیک ها سبب کاهش رشد و عملکرد محصول شده و سبب افزایش تجمع فلز سنگین در گیاه و به تبع آن ورود به زنجیره غذایی می شود. قابل ذکر است در خصوص گیاه کوشیا در شرایط آلودگی خاک به عنصر کادمیوم و همچنین میکروپلاستیک ها به ویژه میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید اطلاعاتی در دسترس نیست. از این رو پژوهش حاضر به بررسی پاسخ های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کوشیا تحت تأثیر آلودگی خاک به فلز سنگین کادمیوم و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید پرداخته است.

۲. روش شناسی پژوهش

آزمایش به صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار روی گیاه کوشیا در سال ۱۴۰۱ انجام شد. خاک مورد استفاده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری مزرعه تحقیقاتی تهیه و به نسبت یک به دو خاک و ماسه مخلوط شد. سپس در دمای ۱۲۱ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه در اتوکلاو استریل شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک براساس روش های استاندارد آزمایشگاهی تعیین شد (جدول ۱). عوامل مورد آزمایش شامل میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) با قطر ۷۵ میکرون در سه سطح صفر، ۰/۱ و ۱ درصد وزنی خاک و کادمیوم (Cd) در دو سطح صفر و ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود. از گلدان های سه لیتری با قطر دهانه ۲۰ سانتی متر استفاده شد. غلظت های مورد نظر کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم (شرکت Merck) (Shi et al., 2022) و درصدهای مورد نظر میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید (PVC) (شرکت LG-Chemical) بر اساس آزمایشات مقدماتی و مطالعات قبلی تعیین شد (Li et al., 2020). به منظور ایجاد آلودگی کادمیوم در خاک، وزن مورد نظر برحسب میلی گرم بر کیلوگرم خاک توزین و پس از حل نمودن در حجمی از آب که خاک را به نقطه ظرفیت زراعی می رساند، به خاک اضافه شد. قبل از کشت خاک های آلوده به کادمیوم و پلی وینیل کلراید به مدت چهار هفته تا حد رطوبت ظرفیت زراعی چندین مرتبه مرطوب شدند تا وضعیت شیمیایی آن ها تثبیت و به شرایط طبیعی نزدیک شود. به منظور نفوذ بهتر کادمیوم و تثبیت میکروپلاستیک، خاک ها در دمای اتاق نگهداری و سپس مورد استفاده قرار گرفتند (Shi et al., 2022; Li et al., 2020).

بذور گیاه کوشیا ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه ضد عفونی شده و پس از سه بار شستشو با آب مقطر در گلدان های سه لیتری کشت شدند. رشد گیاهچه های کوشیا در گلخانه با طول دوره روشنایی ۱۲ تا ۱۴ ساعت و دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد انجام شد. در طول دوره رشد رطوبت گلدان ها در فواصل زمانی مختلف از طریق وزنی در حد ظرفیت زراعی نگه داشته شد، به گونه ای که میزان رطوبت گلدان ها هیچگاه کمتر از ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نبود. پس از سپری شدن ۶۰ روز از کاشت در دوره رشد رویشی و قبل از شروع گلدهی، اندام هوایی و ریشه جهت اندازه گیری های مورد نظر جمع آوری شدند. سپس به منظور تعیین ماده خشک کل (اندام هوایی و ریشه) نمونه ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند.

جدول ۱. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش.

K (ppm)	P (ppm)	Total nitrogen (%)	Organic carbon (%)	EC (dsm m ⁻¹)	pH	Soil texture
274	15	0.07	0.78	1.08	7.5	Sandy clay loam

به‌منظور سنجش کلروفیل کل، نمونه‌هایی از آخرین برگ توسعه‌یافته در گیاهچه انتخاب شد، سپس میزان کلروفیل با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر تعیین شد (Amon, 1949). میزان کلروفیل کل با استفاده از رابطه یک به‌دست آمد:

$$\text{رابطه ۱: } \text{کلروفیل کل} = 17.76 A_{645} + 7.34 A_{663} \times V/W$$

که در این رابطه V حجم نهایی عصاره (۱۰ میلی‌لیتر)، W وزن تر بافت برگ برحسب میلی‌گرم، A₆₄₅ میزان جذب نور در طول موج ۶۴۵ نانومتر و A₆₆₃ میزان جذب نور در طول موج ۶۶۳ نانومتر می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز خالص، تعرق و کارایی مصرف آب لحظه‌ای (نسبت فتوسنتز خالص به تعرق) (Zhu et al., 2024)، از دستگاه فتوسنتز متر ساخت انگلستان (LCi, ADC BioScientific Ltd., England) استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها بین ساعت ۹ تا ۱۱ صبح و در شدت نور ۱۱۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع در ثانیه در محیط گلخانه انجام شد. میزان نشت یونی (EL) بر اساس نفوذپذیری نسبی غشاء اندازه‌گیری شد (Dionisio & Tobita, 1998). تکه‌های کوچک و یکسان برگ‌های تازه در یک لوله آزمایش حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. سپس هدایت الکتریکی آب (EC1) لوله‌های آزمایش در دمای اتاق ثبت شد. سپس برای آزادسازی الکترولیت‌ها و تخریب بافت، لوله‌ها به بن‌ماری (دو ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد) منتقل شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها، هدایت الکتریکی (EC2) ثبت شد و نشت یونی طبق رابطه دو محاسبه شد:

$$\text{رابطه ۲: } EL = (EC1/EC2) \times 100$$

برای سنجش محتوای مالون‌دی‌آلدئید، از نمونه‌های برگ‌های تازه استفاده شد و جذب هر نمونه در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ثبت شد (Bao et al., 2009). محتوای پراکسید هیدروژن در بافت برگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۳۹۰ نانومتر ثبت شد (Sinha & Gupta, 2005). محتوای فنل کل از طریق اسپکتروفوتومتری با معرف فولین سیوکالتیو تعیین شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. نتایج از یک منحنی کالیبراسیون مبتنی بر اسیدگالیک محاسبه و به‌صورت میلی‌گرم معادل اسیدگالیک بیان شد (Ali & Hadi, 2015). قابل ذکر است برای اندازه‌گیری خصوصیات بیوشیمیایی از هر تیمار حداقل سه نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. محاسبات آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (9.4) و مقایسه میانگین داده‌ها از طریق آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. غلظت کلروفیل کل

براساس نتیجه تجزیه واریانس داده‌ها اثرات کادمیوم، میکروپلاستیک و برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر غلظت کلروفیل کل برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش میزان کادمیوم و میکروپلاستیک در محیط کشت، غلظت کلروفیل کل کاهش می‌یابد. در مقادیر مختلف میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید، بیشترین غلظت کلروفیل کل در تیمار بدون کادمیوم حاصل شد (جدول ۳). غلظت کلروفیل کل در تیمار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و میکروپلاستیک ۰/۱ و یا یک درصد به کمترین مقدار خود رسید. در تیمار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با افزایش میکروپلاستیک به ۰/۱ و یک درصد خاک غلظت کلروفیل کل به ترتیب ۳۶/۶۵ و ۵۲/۰۳ درصد نسبت به شاهد کادمیوم کاهش یافت (جدول ۳).

محتوای کلروفیل یک پارامتر ضروری برای فعالیت فتوسنتزی است که به عنوان شاخص تنش در گیاه نیز شناخته می‌شود (Chen et al., 2022; Huang et al., 2023). به‌طور کلی، میکروپلاستیک‌ها با القای تنش اکسیداتیو سبب کاهش و ممانعت در سنتز کلروفیل می‌شوند، در نتیجه فتوسنتز و رشد گیاه را مهار و یا متوقف می‌کنند (Wang et al., 2022b).

جدول ۲. تجزیه واریانس برهمکنش تیمارهای کادمیوم و میکروپلاستیک بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کوشیا.

S.O.V	df	Ms								
		Total chlorophyll content	Total dry matter	Total phenol	Net photosynthesis rate	Transpiration rate	Water use efficiency	Hydrogen peroxide	Electrolyte linkage	Malondialdehyde
Cadmium	1	**12.86	**19.84	**6799.33	**2.41	**3.48	**0.015	**0.0014	**2335.8	**0.0007
Microplastic	2	**0.94	**3.84	**1089.83	**1.09	**0.330	0.073**	**0.0039	*275.51	**0.0001
Cadmium × Microplastic	2	**0.23	**2.24	**384.26	0.46**	**0.051	**0.091	**0.0008	33.09 ^{ns}	**0.0006
Error	12	0.014	0.107	3.899	0.006	0.008	0.006	0.00004	52.15	0.00009
CV (%)	-	5.04	7.95	5.05	5.53	5.72	8.98	7.97	12.19	13.08

*، **، *** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کوشیا.

Cadmium (mg kg ⁻¹)	Microplastic (%)	Total chlorophyll content (μg g ⁻¹ FW)	Total dry matter (g plant ⁻¹)	Net photosynthesis rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Transpiration rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Hydrogen peroxide (μmol g ⁻¹ FW)	Malondialdehyde (μmol g ⁻¹)
0	0	3.45 ^a	5.530 ^a	2.64 ^a	a 2.35	0.060 ^d	0.019 ^{bc}
	0.1	3.24 ^{ab}	4.516 ^b	1.53 ^b	b 2.11	0.094 ^a	0.021 ^{bc}
	1	3.04 ^b	4.330 ^c	1.37 ^c	c 1.71	0.134 ^b	0.034 ^a
10	0	2.21 ^c	3.176 ^d	1.27 ^{cd}	d 1.33	0.063 ^d	0.017 ^c
	0.1	^d 1.40	2.593 ^e	1.21 ^d	e 1.16	0.080 ^{bc}	0.022 ^{bc}
	1	1.06 ^e	2.416 ^f	0.870 ^e	1.04 ^e	0.090 ^c	0.023 ^b

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

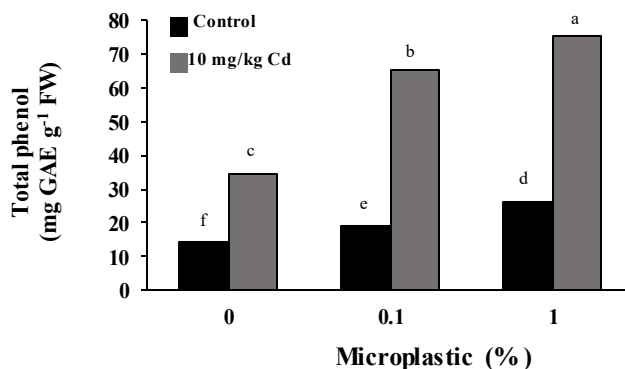
گزارش شده انواع میکروپلاستیک‌ها از جمله پلی‌وینیل‌کلراید تغییراتی را در رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه ایجاد می‌کنند (Yang *et al.*, 2021). همچنین میکروپلاستیک‌ها از طریق افزایش pH خاک انتقال مواد معدنی ضروری برای سنتز کلروفیل را کاهش می‌دهند و بدین شکل مانع سنتز کافی کلروفیل در گیاه می‌شوند. در ذرت (*Zea mays* L.) آلودگی به کادمیوم در خاک به‌طور قابل توجهی محتوای کلروفیل را کاهش داده است (Wang *et al.*, 2022a). گزارش شده میکروپلاستیک‌ها از طریق جایگزینی با منیزیم کلروفیل، سبب کاهش بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی شده، در نتیجه باعث کاهش فتوسنتز و رشد گیاه می‌شوند (Wang *et al.*, 2022b)، از سوی دیگر برهم‌کنش کادمیوم و میکروپلاستیک سبب کاهش بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی شده و در نهایت فتوسنتز کاهش می‌یابد.

۳-۲. ماده خشک کل

اثر میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید و کادمیوم بر میزان ماده خشک کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). برهم‌کنش کادمیوم و میکروپلاستیک نیز تأثیر معنی‌داری بر ماده خشک کل در گیاهچه داشت (جدول ۳). مقدار ماده خشک کل گیاه در شرایط بدون کادمیوم، در غلظت‌های ۰/۱ و یک درصد تیمار میکروپلاستیک به‌ترتیب ۴/۵۱۶ و ۴/۳۳۰ گرم در بوته بود. ماده خشک کل در تیمار حاوی ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در حضور میکروپلاستیک ۰/۱ و یک درصد ۱۸/۳۵ و ۲۳/۹۲ درصد نسبت به شاهد کادمیوم کاهش یافت (جدول ۳). گیاهان در معرض میکروپلاستیک، فلزات سنگین را در سطح ریشه‌های خود جذب و انباشته کرده (Sun *et al.*, 2023) و از طریق ایجاد سمیت در سطح ریشه‌ها سبب اختلال در رشد و کاهش ماده خشک کل می‌شوند (Dainelli *et al.*, 2023). گزارش شده غلظت میکروپلاستیک در خاک با رشد گیاه رابطه معکوس دارد؛ به‌طوری‌که میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید بر رشد و ارتفاع بوته‌های برنج (*Oryza sativa* L.) تأثیری منفی گذاشته است (Ma *et al.*, 2022). همچنین تنش همزمان کادمیوم و میکروپلاستیک از طریق تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، بر رشد گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) تأثیر گذاشته و سبب کاهش وزن خشک در گیاه شده است؛ لذا میکروپلاستیک به صورت غیر مستقیم بر ریزوسفر و در نتیجه تأمین مواد غذایی و تجمع وزن خشک در گیاه تأثیر می‌گذارد (Chen *et al.*, 2023).

۳-۳. غلظت فنل کل

براساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و برهم‌کنش میکروپلاستیک و کادمیوم بر غلظت فنل کل گیاهچه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). شکل ۱ نشان می‌دهد کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار غلظت فنل کل شده و برهم‌کنش کادمیوم و میکروپلاستیک نیز در این خصوص روند افزایشی نشان داده است. در شرایط بدون کادمیوم، تیمار میکروپلاستیک در غلظت‌های ۰/۱ و یک درصد سبب افزایش معنی‌دار غلظت فنل کل نسبت به شاهد شد. در حضور ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و غلظت ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک غلظت فنل کل نسبت به شاهد کادمیوم به‌ترتیب ۵۱ و ۶۱/۷۰ درصد افزایش یافت (شکل ۱). فنل‌ها به عنوان آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی و محلول در آب معمولاً تحت شرایط تنش به عنوان یک سیستم دفاعی در گیاهان افزایش می‌یابند و به عنوان یک پاسخ مقاومتی در برابر تنش اکسیداتیو عمل می‌کنند (Khan *et al.*, 2020). گزارش شده فنل‌ها پتانسیل سم‌زدایی از گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد را دارند، بنابراین از سلول‌ها در برابر آسیب‌های آن‌ها محافظت می‌کنند (Azimi *et al.*, 2021).



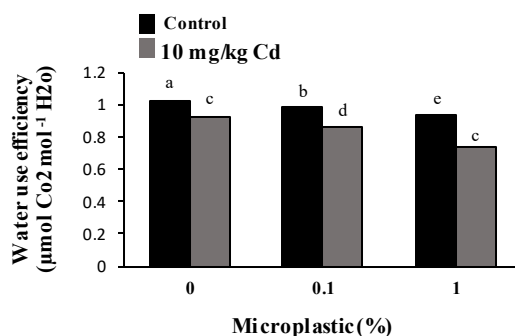
شکل ۱. اثر کادمیوم و میکروپلاستیک بر فنل کل گیاهچه کوشیا.

۳-۴. سرعت فتوسنتز خالص

سرعت فتوسنتز خالص در پاسخ به تیمارهای مختلف کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). در شرایط بدون تنش کادمیوم فتوسنتز خالص در تیمار ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک به ترتیب ۴۲/۰۴ و ۴۸/۱۰ درصد نسبت به شاهد بدون کادمیوم کاهش یافت (جدول ۳)؛ ولی با افزایش سطوح میکروپلاستیک در حضور کادمیوم سرعت فتوسنتز خالص گیاهچه‌های کوشیا کاهش یافت. سرعت فتوسنتز خالص در سطوح ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و یک درصد میکروپلاستیک در مقایسه با تیمار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و بدون میکروپلاستیک ۳۱/۴۹ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). اثرات منفی میکروپلاستیک پلی‌وینیل‌کلراید بر کاهش سرعت فتوسنتز خالص در گیاهچه‌های کدوی تخمه‌کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) و در گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) نیز مشاهده شده است (Clozi *et al.*, 2022; Dainelli *et al.*, 2023). کاهش سرعت فتوسنتز خالص در گیاهان تیمار شده با میکروپلاستیک پلی‌وینیل-کلراید می‌تواند به علت کاهش اندازه برگ و محتوای کلروفیل ناشی از کاهش جذب عناصر از جمله آهن باشد (Clozi *et al.*, 2022). همچنین کاهش میزان سرعت فتوسنتز خالص در گیاه ذرت در معرض تنش فلزات سنگین و میکروپلاستیک توسط Sun *et al.* (2023) گزارش شده است. میکروپلاستیک‌ها از طریق اختلال در جذب مواد غذایی و تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر سبب آسیب به فتوسنتز و کاهش رشد گیاه می‌شوند (Sun *et al.*, 2020).

۳-۵. سرعت تعرق و کارایی مصرف آب

سرعت تعرق و کارایی مصرف آب در پاسخ به تیمارهای مختلف کادمیوم و میکروپلاستیک در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). افزایش میزان کادمیوم و میکروپلاستیک در خاک سبب کاهش سرعت تعرق و کاهش کارایی مصرف آب شد؛ به طوری که کمترین سرعت تعرق (جدول ۳) و کارایی مصرف آب در تیمار ترکیبی کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و میکروپلاستیک یک درصد به ترتیب ۱/۰۸ و ۰/۷۳۳ بود (شکل ۲). با افزایش غلظت ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک و افزایش درصد میکروپلاستیک سرعت تعرق و کارایی مصرف آب نسبت به بدون وضعیت کادمیوم کاهش یافت. گزارش شده گیاهان تیمار شده با میکروپلاستیک دسترسی کمتری به آب داشته، بنابراین محتوای آب کمتری در برگ داشته و سرعت تعرق و کارایی مصرف آب لحظه‌ای در آن‌ها کاهش می‌یابد (Falsini *et al.*, 2022). همچنین گزارش شده وجود ذرات میکروپلاستیک در سطح ریشه سبب افزایش آب‌گریزی توسط ریشه‌های گیاه شده و بدین صورت هدایت هیدرولیکی آب در گیاه کاهش می‌یابد (Falsini *et al.*, 2022). در ارتباط با کاهش تعرق و کارایی مصرف آب گیاهان در معرض تنش کادمیوم و میکروپلاستیک نتایج مشابهی توسط Iqbal *et al.* (2023) در گندم (*Triticum aestivum* L.) گزارش شده است.



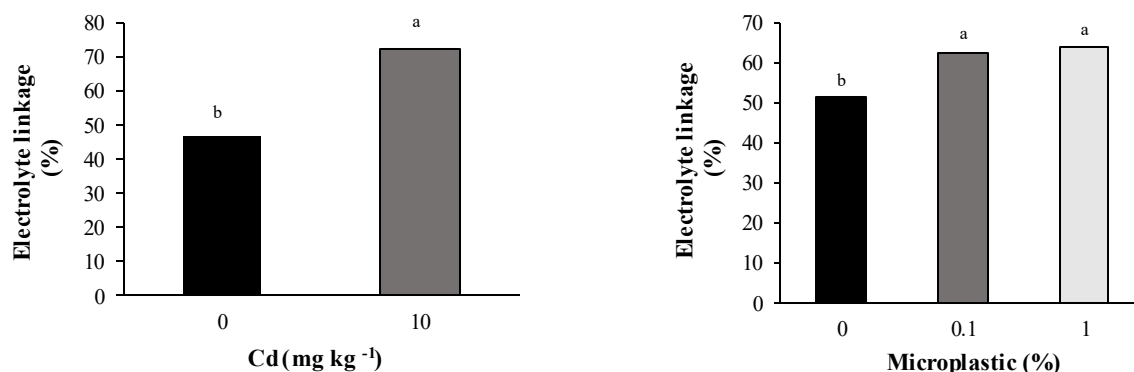
شکل ۲. اثر کادمیوم و میکروپلاستیک بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی گیاهچه کوشیا.

۳-۶. غلظت پراکسید هیدروژن

بررسی نتایج نشان داد که از لحاظ غلظت پراکسید هیدروژن تولیدشده در گیاهچه‌ها بین سطوح مختلف کادمیوم، میکروپلاستیک و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). با افزایش غلظت کادمیوم و میکروپلاستیک در غلظت پراکسید هیدروژن اندام هوایی گیاهچه‌ها به‌ویژه در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم و میکروپلاستیک ۰/۱ و یک درصد نسبت به شاهد کادمیوم افزایش مشاهده شد (جدول ۳). در غلظت کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم با افزایش میکروپلاستیک خاک به ۰/۱ و یک درصد به ترتیب ۲۶/۹۸ و ۴۲/۸۵ درصد نسبت به شاهد کادمیوم بر غلظت پراکسید هیدروژن افزوده شد. کادمیوم با فعال‌سازی NADPH اکسیداز در غشاء، تولید پراکسید هیدروژن را در دیواره‌های سلولی افزایش می‌دهد (Manquían *et al.*, 2018). همچنین گزارش شده افزایش محتوای پراکسید هیدروژن بر اثر تنش عمدتاً از طریق اختلال در فتوسنتز است که منجر به انتقال الکترون به اکسیژن به جای گیرنده‌های فتوسنتز و تنفس می‌شود (Andresen *et al.*, 2016). اثرات منفی افزایش غلظت کادمیوم و میکروپلاستیک بر افزایش غلظت پراکسید هیدروژن در سبب زمینی شیرین (*Ipomoea batatas* L.) و در ذرت (*Zea mays* L.) نیز گزارش شده است (Khan *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023). مشخص شده است افزایش غلظت پراکسید هیدروژن از طریق ایجاد رادیکال‌های آزاد در سلول طی تنش اکسیداتیو ناشی از ذرات میکروپلاستیک صورت می‌گیرد، در این حالت گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر به‌صورت درون‌سلولی در داخل سلول تولید می‌شوند (Pehlivan & Gedik, 2021).

۳-۷. نشت یونی

اثرات اصلی کادمیوم در سطح احتمال یک درصد و میکروپلاستیک در سطح احتمال پنج درصد بر میزان نشت یونی معنی‌دار بود، اما برهمکنش کادمیوم و میکروپلاستیک بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که میزان نشت یونی در اثر افزایش غلظت کادمیوم در خاک افزایش یافته و در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم میزان نشت یونی افزایش ۵۴/۹۶ درصد را در مقایسه با گیاهان بدون تنش کادمیوم نشان داد (شکل ۳). در تیمار ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید نیز نسبت به شاهد (بدون میکروپلاستیک) به ترتیب ۲۰/۸۴ و ۲۴/۳۵ درصد میزان نشت یونی افزایش یافت؛ اما به لحاظ آماری بین سطوح ۰/۱ و یک درصد میکروپلاستیک اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۳). تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری سبب افزایش نفوذپذیری و کاهش یکپارچگی غشاء در گیاه بادرنجبویه (*Dracocephalum moldavica* L.) شد که نشان‌دهنده کاهش شاخص پایداری غشاء می‌باشد (Azimi *et al.*, 2021). افزایش نشت یونی در گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) در معرض تنش میکروپلاستیک گزارش شده است، افزایش نشت یونی در غلظت‌های بالای میکروپلاستیک و فلزات سنگین نشان‌دهنده پراکسیداسیون اسیدهای چرب در غشاء بوده که سبب کاهش پایداری غشای سلولی می‌شود (Jia *et al.*, 2022).



شکل ۳. اثر کادمیوم و میکروپلاستیک بر درصد نشت یونی گیاهچه کوشیا.

۳-۸. غلظت مالون دی آلدئید

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر کادمیوم، میکروپلاستیک و برهمکنش آنها تأثیر معنی داری بر غلظت مالون دی آلدئید در اندام هوایی گیاهچه کوشیا را نشان داد (جدول ۲). در سمیت کادمیوم ۱۰ میلی گرم و غلظت های یک درصد میکروپلاستیک، بیشترین غلظت مالون دی آلدئید در اندام هوایی گیاهچه حاصل شد؛ به گونه ای که غلظت مالون دی آلدئید ۳۵/۲۹ درصد بیشتر از تیمار شاهد کادمیوم بود (جدول ۳). از آنجایی که غلظت مالون دی آلدئید نشان گر آسیب به غشای سلولی و لیپیدها است؛ از این رو این پارامتر شاخص مهمی برای میزان تنش ایجاد شده در اثر کادمیوم و میکروپلاستیک است. در ارتباط با اثرات مخرب تنش کادمیوم بر غشای سلولی و غلظت مالون دی آلدئید نتایج مشابهی در گیاه بادرنجبویه (*Dracocephalum moldavica* L.) گزارش شده است. به طور کلی تنش کادمیوم منجر به تولید پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش مالون دی آلدئید می شود (Azimi et al., 2021). میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید و فلز سنگین با افزایش پراکسیداسیون لیپیدها سبب افزایش غلظت مالون دی آلدئید در گیاه سیب-زمینی شیرین (*Ipomoea batatas* L.) شده است (Khan et al., 2023).

۴. نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان دهنده اثرات نامطلوب تنش کادمیوم و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید بر شاخص های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه های کوشیا است. با افزایش غلظت کادمیوم در خاک غلظت فنل کل، غلظت پراکسید هیدروژن، نشت یونی و غلظت مالون دی آلدئید در پاسخ به تنش کادمیوم افزایش یافت. گیاهان تیمار شده با میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید در شرایط بدون کادمیوم آسیب کمتری در مقایسه با تنش همزمان کادمیوم و میکروپلاستیک از خود نشان دادند. در واقع در حضور میکروپلاستیک، فلز سنگین کادمیوم به مقدار بیشتری در تماس با سطح ریشه قرار گرفته و اثرات سمی کادمیوم افزایش می یابد. افزایش غلظت فنل کل، غلظت پراکسید هیدروژن، نشت یونی و غلظت مالون دی آلدئید در شرایط توأم حضور کادمیوم و میکروپلاستیک در مقایسه با گیاهچه های تیمار شده با میکروپلاستیک بدون کادمیوم دلیلی بر افزایش تنش در این وضعیت است. همچنین فتوسنتز خالص، تعرق، کلروفیل کل و ماده خشک کل گیاهچه های کوشیا در معرض توأم میکروپلاستیک و کادمیوم کاهش بیشتری نسبت به شرایط حضور کادمیوم یا میکروپلاستیک به صورت انفرادی داشتند. بیشترین کاهش فتوسنتز خالص، تعرق و کارایی مصرف آب در شرایط حضور ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیوم و به ترتیب در میکروپلاستیک ۱/۰ و یک درصد پلی وینیل-کلراید در خاک حاصل شد. لذا آلودگی توأم خاک به کادمیوم و میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید به خصوص در مقادیر بالای میکروپلاستیک با تأثیر بر شاخص های فتوسنتزی (کلروفیل کل، فتوسنتز خالص و تعرق)، سبب کاهش ماده خشک کل و در نتیجه عملکرد گیاهچه های کوشیا می شود. به نظر می رسد با افزایش درصد پلی وینیل کلراید در خاک، میزان دسترسی گیاهچه های کوشیا

به کادمیوم افزایش یافته و بر میزان آسیب و شدت تنش در صفاتی نظیر (کلروفیل کل، فتوسنتز خالص، تعرق، کارایی مصرف آب و ماده خشک کل) گیاهچه‌ها افزوده می‌شود.

۵. سپاسگزاری

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

۶. منابع

- Ali, N., & Hadi, F. (2015). Phytoremediation of cadmium improved with the high production of endogenous phenolics and free proline contents in *Parthenium hysterophorus* plant treated exogenously with plant growth regulator and chelating agent. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 13305-13318.
- Anderson, C.W., Smith, S.L., Jeyakumar, P., Thompson-Morrison, H., & Cavanagh, J.A.E. (2022). Forage crops and cadmium: How changing farming systems might impact cadmium accumulation in animals. *Science of the Total Environment*, 827, 154256.
- Andresen, L.C., Muller, C., De Dato, G., Dukes, J.S., Emmett, B.A., Estiarte, M., Jentsch, A., Kroel-Dulay, G., Luscher, A., & Niu, S. (2016). Shifting impacts of climate change: Long-term patterns of plant response to elevated CO₂, drought, and warming across ecosystems. *Advances in Ecological Research*. Elsevier.
- Amon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1.
- 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.
- Bao, P., Kodra, A., Tomic-Canic, M., Golinko, M.S., Ehrlich, H.P., & Brem, H. (2009). The role of vascular endothelial growth factor in wound healing. *Journal of Surgical Research*, 153, 347-358.
- Chen, W., Lin, F., Lin, K.H., Chen, C., Xia, C., Liao, Q., Chen, S.P., & Kuo, Y.W. (2022). Growth promotion & salt-tolerance improvement of *Gerbera jamesonii* by root colonization of *Piriformospora indica*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1219-1228.
- Chen, C.F., Ju, Y.R., Chen, C.W., Albarico, F.P.J.B., Lim, Y.C., Ke, C., & Dong, C.D. (2023). Microplastics in coral reef sediments underestimated? They may hide in biominerals. *Science of the Total Environment*, 899, 165708.
- 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.
- Dainelli, M., Pignattelli, S., Bazihizina, N., Falsini, S., Papini, A., Baccelli, I., Mancuso, S., Coppi, A., Castellani, M.B., & Colzi, I. (2023). Can microplastics threaten plant productivity and fruit quality? Insights from Micro-Tom and Micro-PET/PVC. *Science of The Total Environment*, 165119.
- Dionisio, M.L., & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135, 1-9.
- Falsini, S., Colzi, I., Chelazzi, D., Dainelli, M., Schiff, S., Papini, A., Coppi, A., Gonnelli, C., & Ristori, S. (2022). Plastic is in the air: Impact of micro-nanoplastics from airborne pollution on *Tillandsia usneoides* (L.) (Bromeliaceae) as a possible green sensor. *Journal of Hazardous Materials*, 437, 129314.
- Jia, H., Wu, D., Yu, Y., Han, S., Sun, L., & Li, M. (2022). Impact of microplastics on bioaccumulation of heavy metals in rape (*Brassica napus* L.). *Chemosphere*, 288, 132576.
- 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.
- Iqbal, B., Javed, Q., Khan, I., Tariq, M., Ahmad, N., Elansary, H.O., & Du, D. (2023). Influence of soil microplastic contamination and cadmium toxicity on the growth, physiology, and root growth traits of *Triticum aestivum* L. *South African Journal of Botany*, 160, 369-375.
- 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*, 97, 139-147.
- Karalija, E., Carbo, M., Coppi, A., Colzi, I., Dainelli, M., Gasparovic, M., Grebenc, T., Gonnelli, C., Papadakis, V., & Pilic, S. (2022). Interplay of plastic pollution with algae and plants: Hidden danger or a blessing? *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129450.

- 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. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 251, 114526.
- Khan, S.A.R., Yu, Z., Belhadi, A., & Mardani, A. (2020). Investigating the effects of renewable energy on international trade and environmental quality. *Journal of Environmental Management*, 272, 111089.
- Li, C., Busquets, R., & Campos, L.C. (2020). Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Science of the Total Environment*, 707, 135578.
- Lian, J., Cheng, L., Zhai, X., Wu, R., Liu, W., Pan, J., Shohag, M., Xin, X., He, Z., & Yang, X. (2022). Foliar spray of combined metal-oxide nanoparticles alters the accumulation, translocation and health risk of Cd in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 440, 129857.
- Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, F.M., Almushhin, A.A., Hakimi, O., Iqbal, M.F., Chen, F., & Alamri, S. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 307, 135749.
- 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.
- Manquian, K., Cruces, E., Escudey, M., Zuniga, G., & Calderon, R. (2018). Interactive effects of aluminum and cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets cultivated in vitro. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 320-326.
- Pehlivan, N., & Gedik, K. (2021). Particle size-dependent biomolecular footprints of interactive microplastics in maize. *Environmental Pollution*, 277, 116772.
- Pignattelli, S., Broccoli, A., & Renzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*Lepidium sativum*) to different types of microplastics. *Science of the Total Environment*, 727, 138609.
- 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.
- Sinha, S., & Gupta, A.K. (2005). Translocation of metals from fly ash amended soil in the plant of *Sesbania cannabina* L. Ritx: Effect on antioxidants. *Chemosphere*, 61, 1204-1214.
- Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y., Feng, L.J., Zhu, F.P., Dong, S.S., Liu, J., Kong, X., Tian, H., Duan, J.L., Ding, Z., Wang, S.G., & Xing, B. (2020). Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Nanotechnology*, 15(9), 755-760.
- Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y., Feng, L.J., Zhu, F.P., Dong, S.S., Liu, J., Kong, X., Tian, H., Duan, J.L., Ding, Z., Wang, S.G., & Xing, B. (2023). Effects of polyethylene and biodegradable microplastics on photosynthesis, antioxidant defense systems, and arsenic accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown in arsenic contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 868, 161-557.
- 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.
- 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. *Science of The Total Environment*, 907, 167920.
- Wang, Y., Peng, X., Lai, L., Li, H., Zhang, X., Chen, H., & Xie, L. (2022a). Phosphorus fertilization regimes and rates alter Cd extractability in rhizospheric soils and uptake in maize (*Zea mays* L.). *Chemosphere*, 298, 134288.
- Wang, X., Xing, Y., Lv, M., Zhang, T., Ya, H. & Jiang, B. (2022b). Recent advances on the effects of microplastics on elements cycling in the environment. *Science of The Total Environment*, 849, 157884.
- 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.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780, 146546.
- Yuan, W., Liu, X., Wang, W., Di, M., & Wang, J. (2019). Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 180-187.
- Zhao, M., Xu, L., Wang, X., Li, C., Zhao, Y., Cao, B., & Zou, G. (2023). Microplastics promoted cadmium accumulation in maize plants by improving active cadmium and amino acid synthesis. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130788.
- Zhu, K., Zuo, Q., Liu, F., Qin, J., Wang, A., Zhang, J., & Flexas, J. (2024). Divergences in leaf CO₂ diffusion conductance and water use efficiency of soybean coping with water stress and its interaction with N addition. *Environmental and Experimental Botany*, 217, 105572.