The Study of Tolerance Indices, Germination and Transfer efficiency of Seed Reserves in Foxtail Millet Seedlings (*Setaria italica* L.) under Cadmium and Polyvinyl Chloride Stresses

S. Nikoumaram[1] and A. Sepehri[2*]

نسخه پیش از انتشار

Abstract

The simultaneous presence of plastics and cadmium in soil can cause various biological effects, especially in the early stages of plant growth. In this research the adverse effect of cadmium in the presence of plastic particles was investigated in the early stages of the growth of foxtail millet (*Setaria italica* L., cv. Bastan). The experiment was arranged in a factorial according to the completely randomized design with three replicates based on five concentrations of cadmium 0, 50, 100, 150, and 200 µM and polyvinyl chloride plastic 0, 1, 2, 4, and 6%. The studied traits included percentage, inhibition, rate and average time of germination, seedling vigor index, the weight of mobilized seed reserve, seed reserve utilization efficiency, seed reserve depletion percentage, relative seed germination, seedling toxicity level, germination tolerance index and root tolerance index. The results showed that the presence of polyvinyl chloride in the seed culture medium reduced the toxicity effect of cadmium, alleviated the stress conditions, and improved the desired indicators. It seems that low concentrations of polyvinyl chloride particles can reduce the adverse effects of cadmium stress and improve the conditions for the growth of seedlings by overcoming cadmium toxicity.

Keywords: Cadmium, Foxtail millet, Germination, Polyvinyl chloride, Seed reserve.

Background and Objective: The simultaneous contamination of soil with plastics and heavy metals may pose a more sever threat to the soil and plants than the contamination of one of them alone (Wang et al., 2021). Due to their high absorption capacity and carrier effect, plastics can change the accessibility and toxicity of co-existing environmental pollutants in soil organisms and plants. Therefore, our objective was to investigate the possible relationships between polyvinyl chloride and cadmium on cadmium toxicity, germination, and growth characteristics of seedlings.

Methods: The factorial completely randomized design experiment with three replicates was conducted. The seeds disinfected with 5% hypochlorite were placed in a sterile petri dish with 20 ml of 0, 50, 100, 150, 200 µM cadmium and 0, 1, 2, 4, and 6% polyvinyl chloride and were kept at 25°C for seven days. The seeds were counted once every 24 hours until the seventh day. At the end of the seventh day, the root and shoot length was measured in centimeters. Each of the seedling parts was separated from each other, placed in an

1- Department of Plant production and genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
* Corresponding author, Email: a_sepehri@basu.ac.ir

oven at 70°C for 48 hours and weighed with an accurate scale (0.001 g). Germination percentage, germination rate, seedling vigor, mean germination time, weight of mobilized seed reserve, seed reserve utilization efficiency, seed reserve depletion percentage, root tolerance index, relative seed germination, germination tolerance index, seedling toxicity level and germination Inhibition were calculated. Data were analyzed through the SAS (9.4) statistical program, and means values were compared by LSD test ($P < 0.05$).

Results: The effect of cadmium and polyvinyl chloride on the examined traits was significant at the 1% probability level, except for the germination percentage, which was at the 5% probability level, and the relative seed germination had no significant difference. The presence of polyvinyl chloride with cadmium improved the percentage of germination, the mean germination time, and the seedling vigor. The presence of plastic decreased the adverse conditions of cadmium stress and reduced the toxicity level and germination inhibition percentage. Heavy metals can be absorbed by plastic particles, which lead to reduced cadmium adverse effects during germination (Yang et al., 2019). However, co-exposure of plastic and cadmium led to decrease in germination rate. Duan et al. (2018) stated that the simultaneous presence of cadmium and plastic causes the accumulation of pollutants in plant cells and the intensification of oxidative stress, which leads to higher toxicity. Our results show the average germination time reduction in the presence of polyvinyl chloride under cadmium stress. Due to the increased concentration of pollutants, disturbances were observed in WMSR, SRUE, and SRDP. Under the heavy metals stress, the starch mobility was reduced, and following the reduction of the mobility of seed reserves, the weight of the transferred seed reserves decreased (Seneviratne et al., 2019). Plastics prevent water and nutrient absorption, then delay germination and root growth (Bosker et al., 2019). The presence of plastic improved the adverse conditions of cadmium stress and reduced the toxicity level, and germination inhibition percentage.

Conclusions: Polyvinyl chloride application reduced the cadmium stress conditions and improved the germination tolerance index as a crucial parameter of plant tolerance to stress. Therefore, despite the pollution of plastic particles in the seed culture environment, our results demonstrated the reducing and balancing effects of polyvinyl chloride on cadmium toxicity in foxtail millet seedlings, especially at low concentrations.

References:

1. Bosker, T., Bouwman, L.J., Brun, N.R., Behrens, P., Vijver, M.G., 2019. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. Chemosphere, 226, 774–781. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163

2. Duan, C., Fang, L., Yang, C., Chen, W., Cui, Y., Li, S., 2018. Reveal the response of enzyme activities to heavy metals through in situ zymography. Ecotoxicol. Environ. Saf., 156, 106–115. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.015

3. Seneviratne, M., Rajakaruna, N., Rizwan, M., Madawala, H.M.S.P., Ok, Y.S., Vithanage, M., 2019. Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: a critical review. Environ. Geochem. Health, 41(4), 1813–1831. https://doi.org/10.1007/s10653-017-0005-8

4. Wang, F., Wang, X., Song, N., 2021. Polyethylene microplastics increase cadmium uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by altering the soil microenvironment. Sci. Total Environ., 784, 147133. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147133

بررسی شاخص‌های تحمل، جوانه‌زنی و کارایی انتقال ذخایر بذر در گیاهچه‌های ارزن دم روباهی (*Setaria italica* L.) تحت تنش کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

سپیده نیکومرام[1] و علی سپهری[*]

چکیده

اخیراً با رشد سریع صنعت و کشاورزی، آلودگی خاک‌های زراعی به فلز سنگین کادمیم و ذرات پلاستیک به یک مسئله جدی تبدیل شده است. هم‌زمانی وجود گسترده میکروپلاستیک‌ها و کادمیم در خاک، می‌تواند آثار بیولوژیکی متنوعی به‌خصوص در مراحل اولیه رشد گیاهان ایجاد کند. در این پژوهش اثر تنش کادمیم در حضور ذرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ارزن دم روباهی (*Setaria italica* L.) رقم با ستان، مورد برر سی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً ت صادفی در سه تکرار با غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار کادمیم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید ۰، ۱، ۲، ۴ و ۶ درصد انجام شد. صفات درصد و مهار جوانه‌زنی، سرعت و متو سط زمان جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه، وزن ذخایر انتقال‌یافته بذر، کارایی انتقال و راندمان ا ستفاده از ذخایر بذر، جوانه‌زنی نسبی، سطح سمّیت گیاهچه، شاخص تحمل جوانه‌زنی و شاخص تحمل ریشه بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو آلاینده منجر به کاهش اغلب شاخص‌های جوانه‌زنی شدند، با این‌حال حضور پلی‌وینیل کلراید در غلظت‌های خاص طی تنش کادمیم منجر به بهبود شاخص‌های مورد نظر گردید. به‌طوری‌که در صد جوانه‌زنی و راندمان ا ستفاده از ذخایر بذر در غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیم به همراه ۱ درصد پلی‌وینیل کلراید به‌ترتیب سبب افزایش ٪ ۴۳/۲ و ۲۰۶٪ نسبت به ۲۰۰ میکرومولار کادمیم به تنهایی شد. بیش‌ترین درصد مهار جوانه‌زنی نیز مربوط به ۲۰۰ میکرومولار کادمیم بود که با مصرف ۱ درصد میکروپلاستیک ٪ ۵۲/۴ کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد حضور غلظت‌های کم ذرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید در محیط رشد اولیه گیاه می‌تواند از شرایط نامطلوب تنش کادمیم کاسته و شرایط را برای رشد گیاهچه‌ها با غلبه بر سمّیت کادمیم بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: ارزن دم روباهی، پلی‌وینیل کلراید، جوانه‌زنی، ذخایر بذر، کادمیم.

مقدمه

فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و تولیدات صنعتی باعث انباشت در مقیاس بزرگ و ایجاد آلودگی در خاک می‌شوند (Arfaeinia et al., 2019). سمّیت این عناصر به دلیل آثار مخرب بر محیط زیست و انسان مورد توجه ویژه قرار گرفته است (Riaz et al., 2021). برخی عناصر مانند کادمیم

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a_sepehri@basu.ac.ir

نسخه پیش از انتشار

بسیار سمّی بوده به‌طوری‌که جذب و تجمع آن‌ها در بافت‌های مختلف گیاهان زراعی، سلامتی انسان را تهدید می‌کنند (Rizwan et al., 2019). سیستم دفاعی گیاهان در معرض کادمیم به دلیل محتوای بالای رادیکال‌های آزاد اکسیژن مختل شده (Rizwan et al., 2019)، در نتیجه خسارات بیوشیمیایی و متابولیکی نظیر اختلال در جوانه‌زنی، رشد، زیست توده، فتوسنتز و عدم تعادل در جذب آب و مواد غذایی حیاتی گیاه را به دنبال دارد (Riaz et al., 2021). جوانه‌زنی بذر به‌عنوان یکی از حساس‌ترین فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه، بیش‌تر در معرض آلودگی فلزات سنگین قرار دارد زیرا به دلیل عدم وجود مسیرهای دفاعی مناسب، عناصر سنگین مستقیماً با جنین در تماس بوده و در نهایت منجر به ظهور گیاهچه‌های غیرطبیعی می‌شود (Li et al., 2005). از سوی دیگر میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان یک آلاینده نوظهور به دلیل وجود گسترده در محیط‌های مختلف، نگرانی‌های فزاینده‌ای را در سراسر جهان ایجاد کرده‌اند (de Souza Machado et al., 2018). بیش‌تر مطالعات بر روی تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، رشد و عملکرد گیاهان متمرکز شده‌اند، درحالی‌که تأثیر آن‌ها بر جوانه‌زنی بذر و مراحل اولیه رشد گیاه ناشناخته باقی مانده است (Sahasa et al., 2023). میکروپلاستیک‌ها معمولاً با فلزات سنگین سمّی تعامل داشته و در نتیجه باعث آلودگی شدید در شرایط خاک می‌شوند (Cao et al., 2021). برهم‌کنش میکروپلاستیک‌ها با کادمیم ممکن است آثار مضر یا مفیدی بر گیاهان داشته باشد زیرا رفتار محیطی، فراهمی زیستی و سمّیت آن‌ها را تغییر می‌دهد (Wang et al., 2021). پلی‌وینیل کلراید به‌عنوان یکی از پلاستیک‌ها به‌طور گسترده در سراسر جهان استفاده می‌شود (Ye et al., 2017). از آنجایی‌که پلی‌وینیل کلراید به‌راحتی بازیافت نمی‌شود، اغلب پس از مصرف به محیط‌های زراعی وارد شده، لذا از لحاظ آلودگی خاک اهمیت خاصی دارد (Liu et al., 2020). ارزن دم روباهی (*Setaria italica* L. Beauv) یکی از مهم‌ترین غلات در جنوب اروپا و آسیا است که به‌عنوان گیاه مدل C4 برای مطالعات بیولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Pant et al., 2016). این گیاه علاوه بر تولید محصول غذایی و علوفه‌ای، از فرسایش خاک جلوگیری کرده و تأثیر مثبتی بر تنوع زیستی دارد (Kolenčík et al., 2019). از این‌رو در این مطالعه اثر کادمیم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر برخی فاکتورهای جوانه‌زنی بذر و مراحل اولیه رشد گیاه ارزن دم روباهی بررسی شده است. دو و همکاران (Du et al., 2023) نیز به بررسی اثر میکروپلاستیک و کادمیم بر خصوصیات جوانه‌زنی بذر گندم پرداخته‌اند.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه تحقیقاتی فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل پنج غلظت کادمیم (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ میکرومولار) در محدوده تحمل گیاه، با توجه به پیش آزمایش انجام شده و مطالعات قبلی (Han et al., 2018) و پنج غلظت میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (۰، ۱، ۲، ۴ و ۶ درصد) (Li et al., 2020) با قطر ذرات ۷۵ میکرومتر، انتخاب شده است. بذر اصلاح شده ارزن دم روباهی (*Setaria italica* L.) رقم باستان از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. میزان رطوبت اولیه بذر بر پایه وزن تر بر حسب درصد از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید (Ista, 2009).

$$(M1 - M2) / M2) \times 100 \quad (۱)$$

در این رابطه M1 وزن بذر (بر حسب گرم) قبل از خشک کردن و M2 وزن بذر (بر حسب گرم) بعد از خشک کردن.

به‌منظور آزمایش جوانه‌زنی ۱۰۰ بذر ضدعفونی شده در پتری‌دیش ۱۴ سانتی‌متری بر روی یک لایه کاغذ صافی استریل، قرار داده و به هر پتری دیش ۲۰ میلی‌لیتر از تیمارهای مورد نظر اضافه شد. بذرها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۷ روز نگهداری شدند. شمارش بذور هر ۲۴ ساعت یک بار تا روز هفتم انجام گرفت. در پایان روز هفتم طول ریشه‌چه و ساقه‌چه

نسخه پیش از انتشار

بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس اندام مورد نظر به مدت ۴۸ ساعت در آون ۷۰ درجه سلسیوس خشک و با ترازوی دقیق (۰/۰۰۱ گرم) وزن شد. درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه (Ista, 1999)، متوسط مدت زمان جوانه‌زنی (Ellis and Roberts., 1981)، وزن ذخایر انتقال یافته بذر، راندمان استفاده از ذخایر بذر، کارایی انتقال ذخایر بذر (Soltani et al., 2006)، شاخص تحمل ریشه، جوانه‌زنی نسبی بذر، شاخص تحمل جوانه‌زنی، سطح سمّیت گیاهچه (Amooaghaie et al., 2015) و درصد مهار جوانه‌زنی (Pignattelli et al., 2020) بر اساس روابط (۲) تا (۱۳) محاسبه شدند.

= درصد جوانه‌زنی

(۲) ۱۰۰ × (تعداد کل بذرها)/(تعداد بذرهای جوانه زده)

= سرعت جوانه‌زنی

$$+ \text{---} + \frac{\text{تعداد بذر جوانه زده در شمارش اول}}{\text{تعداد روز شمارش اول}}$$

(۳) $\frac{\text{تعداد بذر جوانه زده در شمارش آخر}}{\text{تعداد روز شمارش آخر}}$

= شاخص بنیه گیاهچه

(۴) میانگین طول گیاهچه (cm) × جوانه‌زنی استاندارد (%)

(۵) $\frac{\sum NiDi}{N}$ = متوسط مدت زمان جوانه‌زنی بذور

Ni تعداد بذر جوانه زده در روز i ام، N تعداد کل بذور جوانه زده و Di تعداد روز پس از شروع آزمایش

= وزن ذخایر انتقال‌یافته بذر

(۶) وزن خشک بقایای بذر – وزن خشک اولیه بذر

(۷) $\frac{\text{وزن خشک گیاهچه}}{\text{وزن ذخیره بذر انتقال‌یافته}}$ = راندمان استفاده از ذخایر بذر

(۸) $\frac{\text{وزن ذخایر انتقال‌یافته بذر}}{\text{وزن خشک اولیه بذر}}$ = کارایی انتقال ذخایر بذر

(۹) $\frac{\text{متوسط طول ریشه در تیمار}}{\text{متوسط طول ریشه در شاهد}} \times ۱۰۰$ = شاخص تحمل ریشه

(۱۰) $\frac{\text{بذرهای جوانه زده در تیمار}}{\text{بذرهای جوانه زده در شاهد}} \times ۱۰۰$ = جوانه‌زنی نسبی بذر

شاخص تحمل جوانه‌زنی

(۱۱) ۱۰۰ / (شاخص تحمل ریشه × جوانه‌زنی نسبی بذر)

= سطح سمّیت گیاهچه

(۱۲) $\frac{\text{طول ریشه‌چه شاهد – طول ریشه‌چه تیمار}}{\text{طول ریشه‌چه شاهد}} \times ۱۰۰$

= درصد مهار جوانه‌زنی

(۱۳) $\frac{\text{بذرهای جوانه زده شاهد – بذرهای جوانه زده از هر تیمار}}{\text{بذرهای جوانه زده شاهد}} \times ۱۰۰$

تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver. 9.4) انجام شد و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنادارLSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر کادمیم و پلی‌وینیل کلراید بر درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود (جدول ۱). کاهش درصد جوانه‌زنی با افزایش غلظت کادمیم مشهود بود. کاهش جوانه‌زنی ممکن است به دلیل از دست دادن مواد مغذی ناشی از نشت مواد معدنی به دنبال تنش کادمیم باشد (Wani et al., 2007). میکروپلاستیک‌ها نیز می‌توانند در پوشش بذر تجمع نموده و مانع از جذب آب شده در نتیجه از جوانه‌زنی بذر جلوگیری کنند (Ge et al., 2021). بیش‌ترین میزان در صد جوانه‌زنی متعلق به تیمار شاهد با میانگین ۸۸/۰۶ ٪ بود و کم‌ترین در صد جوانه‌زنی بذر متعلق به تیمار ۲۰۰ میکرومولار کادمیم با میانگین ۴۹/۳ ٪ بود (جدول ۲). برهم‌کنش کادمیم و میکروپلاستیک باعث افزایش درصد جوانه‌زنی نسبت به حالت کادمیم به تنهایی در تمام غلظت‌های مورد بررسی کادمیم شد. پلی‌وینیل کلراید ظرفیت جذب بالایی در جذب کادمیم دارد این

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات مورد بررسی

Table 1. Analysis of variance (mean square) for studied traits

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص بنیه گیاهچه Vigor index	متوسط مدت زمان جوانه‌زنی Mean germination time	وزن ذخایر انتقال‌یافته بذر weight of mobilized seed reserve	راندمان استفاده از ذخایر بذر Seed reserve utilization efficiency
کادمیم Cadmium (Cd)	4	1551**	3518**	32.8**	1.08**	0.005**	0.34**
پلی‌وینیل کلراید polyvinyl chloride (PVC)	4	308**	359**	5.08**	0.17**	0.0003**	0.01**
کادمیم پلی‌وینیل کلراید Cd × PVC	16	53.4*	25.3**	1.01**	0.05**	0.0004**	0.007**
خطا Error	50	26.9	11.1	0.11	0.02	0.0001	0.001
ضریب تغییرات CV(%)	–	6.78	6.68	9.13	8.09	9.80	10

* و** به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and ** is significant at the 5 and 1 percent probability level, respectively

امر می‌تواند مانع از آثار نامطلوب کادمیم بر جوانه‌زنی بذر شود (Guo et al., 2020).

سرعت جوانه‌زنی

در خصوص سرعت جوانه‌زنی نتایج نشان داد که اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر سرعت جوانه‌زنی بذر معنادار است (جدول ۱). با افزایش غلظت کادمیم، سرعت جوانه‌زنی به‌صورت معناداری کاهش یافت به‌طوری‌که در غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیم سرعت جوانه‌زنی به میزان ٪ ۳۹/۸ کم‌تر از ۵۰ میکرومولار کادمیم بود (جدول ۲). تنش کادمیم به‌شدت از تقسیم، رشد سلولی و تجمع زیست توده جلوگیری کرده و باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌شود (Rady and Hemida, 2015).

همچنین بر اساس جدول (۲) با افزایش غلظت پلی‌وینیل کلراید سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت؛ ولی کاهش سرعت جوانه‌زنی به دنبال افزایش غلظت پلی‌وینیل کلراید نسبت به افزایش غلظت کادمیم ناچیز بود. رسوبات میکروپلاستیک متصل به پوسته بذر می‌تواند جذب آب که اولین مرحله جوانه‌زنی است را به تأخیر بیاندازد (Bosker et al., 2019). سرعت جوانه‌زنی بذر در تیمار کادمیم به همراه پلی‌وینیل کلراید کم‌تر از تیمار تنش کادمیم به تنهایی بود. احتمالاً این مسئله به دلیل غلظت بالای کادمیم و برهم‌کنش آن با میکروپلاستیک باشد. علاوه بر این، دوان و همکاران (Duan et al., 2018) نیز اظهار کردند حضور همزمان کادمیم و میکروپلاستیک باعث تجمع آلاینده‌ها در سلول‌های گیاه و تشدید تنش اکسیداتیو می‌شود.

شاخص بنیه گیاهچه

نتایج حاصل از تجزیه داده‌ها نشان داد که اثر فلز سنگین کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص بنیه گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۱). با افزایش غلظت کادمیم و پلی‌وینیل کلراید شاخص بنیه گیاهچه کاهش یافت (جدول ۲). یکی از علل کاهش بنیه گیاهچه کاهش انرژی لازم بذر برای جوانه‌زنی در حضور عوامل تنش‌زا می‌باشد (Abdul Baki and Anderson, 1973). به‌طور کلی فلزات

نسخه پیش از انتشار

جدول ۲. مقایسه میانگین‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه و متوسط مدت زمان جوانه‌زنی در بذر ارزن دم روباهی برای اثر برهم‌کنش کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

Table 2. Mean comparision the effect of cadmium and polyvinyl chloride on the percentage and rate of germination, seed vigor index and mean germination time in foxtail millet seed

تیمار Treatment	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص بنیه گیاهچه Vigor index	متوسط مدت زمان جوانه‌زنی Mean germination time
0 µM Cd + 0 PVC	90.6	80.6	6.60	1.47
0 µM Cd + 1% PVC	88.6	75.4	6.06	1.63
0 µM Cd + 2% PVC	87.6	70.4	5.65	1.74
0 µM Cd + 4% PVC	86.6	65.9	5.87	1.95
0 µM Cd + 6% PVC	86.6	63.7	4.88	1.90
50 µM Cd + 0 PVC	82	66.5	3.06	1.97
50 µM Cd + 1% PVC	86.6	58.1	5.80	1.67
50 µM Cd + 2% PVC	84.6	56.5	4.67	1.68
50 µM Cd + 4% PVC	83.3	55.2	4.47	1.72
50 µM Cd + 6% PVC	82.3	53.7	4.01	1.80
100 µM Cd + 0 PVC	63.6	52	2.79	2.18
100 µM Cd + 1% PVC	81.6	50.3	3.23	1.81
100 µM Cd + 2% PVC	80.6	48.3	3.32	1.91
100 µM Cd + 4% PVC	79.6	46.7	2.87	1.93
100 µM Cd + 6% PVC	78	45.7	2.97	1.95
150 µM Cd + 0 PVC	59.6	43.9	2.25	2.28
150 µM Cd + 1% PVC	77.6	40.3	3.59	1.98
150 µM Cd + 2% PVC	74.6	39.5	3.48	2.10
150 µM Cd + 4% PVC	73.6	38.2	3.40	2.09
150 µM Cd + 6% PVC	72.3	36.8	2.20	2.12
200 µM Cd + 0 PVC	49.3	40.9	0.78	2.74
200 µM Cd + 1% PVC	70.6	36.6	3.26	2.14
200 µM Cd + 2% PVC	66.3	33.6	2.49	2.25
200 µM Cd + 4% PVC	63.3	30.6	2.47	2.34
200 µM Cd + 6% PVC	61.6	19.2	1.01	2.49
LSD	8.50	5.48	0.54	0.26

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معناداری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

سنگین منجر به کاهش شاخص بنیه گیاهچه می‌شوند (Valivand et al., 2019). زیرا در مرحله جذب آب برای جوانه‌زنی، نفوذ فلزات سنگین به داخل بذر، از تقسیم سلولی جلوگیری کرده و در نهایت رشد گیاهچه را مختل می‌کند (Kranner and Colville, 2011). همچنین قرار گرفتن بذور در معرض غلظت‌های زیاد میکروپلاستیک سبب کاهش شاخص بنیه می‌شود که در نهایت تأخیر در جوانه‌زنی و کاهش رشد گیاهچه را به دنبال دارد (Sahasa et al., 2023). بذور در حضور غلظت‌های پایین کادمیم به همراه پلی‌وینیل کلراید نسبت به حضور کادمیم تنها قدرت بیش‌تری برای جوانه‌زنی داشتند، البته با افزایش غلظت عوامل مورد بررسی میزان بنیه گیاهچه کاهش یافت. این مسئله ممکن است به دلیل خاصیت پلاستیک

نسخه پیش از انتشار

پلی‌وینیل کلراید نسبت به سایر پلاستیک‌ها در انباشت فلزات سنگین باشد (Imran et al., 2019).

متوسط زمان جوانه‌زنی

متوسط زمان جوانه‌زنی بذر تفاوت معناداری در سطح احتمال یک درصد با قرار گرفتن در معرض پلی‌وینیل کلراید، کادمیم و برهم‌کنش دوگانه آن‌ها نشان داد (جدول ۱). با افزایش غلظت کادمیم و پلی‌وینیل کلراید متوسط زمان جوانه‌زنی افزایش یافت، به‌طوری‌که بین غلظت‌های مختلف کادمیم و پلی‌وینیل کلراید (به‌غیر از ۱ درصد) با تیمار شاهد تفاوت معناداری وجود داشت (جدول ۲). کاهش سرعت جوانه‌زنی و افزایش زمان لازم برای جوانه‌زنی احتمالاً به دلیل وقفه‌ای است که در شروع فرآیند جوانه‌زنی بذور تحت تنش ایجاد می‌شود. علت وقفه می‌تواند به دلیل ترمیم خسارت‌های وارد شده به غشاء و دیگر قسمت‌های سلول، همچنین آغاز مجدد فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی و جلوگیری از بروز تنش اکسیداتیو باشد که نیاز به زمان دارد. با وجود این‌که میکروپلاستیک جوانه‌زنی را به تأخیر می‌اندازد ولی می‌تواند آثار نامطلوب فلز سنگین را محدود کند. نشان داده شده میکروپلاستیک‌ها دسترسی به مواد مغذی را در چنین شرایطی افزایش می‌دهند و باعث بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه می‌شوند (de Souza Machado et al., 2019).

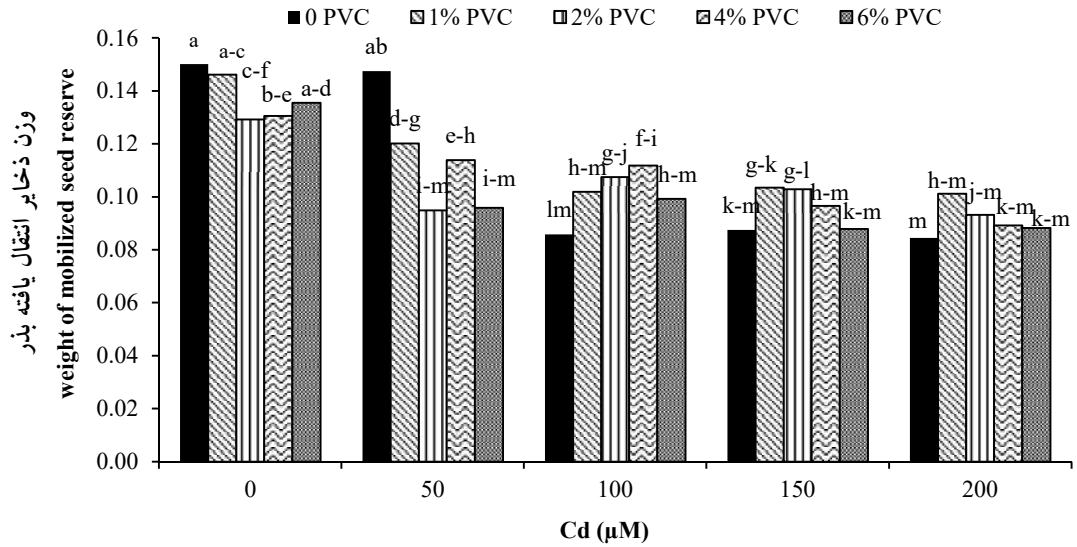
وزن ذخایر انتقال یافته بذر

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و اثرات متقابل دوگانه آن‌ها بر وزن ذخایر انتقال یافته بذر در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۱). پوشش بذر از تجمع زیاد آلاینده‌ها در بافت‌های ذخیره‌ای بذر جلوگیری کند، بنابراین پاسخ جوانه‌زنی به تنش فلزات سنگین را نمی‌توان تنها با توجه به میزان آلودگی در محیط جوانه‌زنی بذر در نظر گرفت، بلکه باید به تجمع مواد در بافت‌های ذخیره‌ای بذر توجه نمود (Ernst, 1998). با افزایش غلظت کادمیم و پلی‌وینیل کلراید میزان وزن ذخایر انتقال یافته بذر کاهش پیدا کرد (جدول ۲). بذر برای جوانه زدن به انرژی کافی مانند قند و اسیدآمینه نیاز دارد؛ اما تحت تنش فلزات سنگین، از تحرک نشاسته کاسته شده، منابع غذایی محدود و وزن ذخایر انتقال یافته در بذر کاهش می‌یابد (Seneviratne et al., 2019). در شروع جوانه‌زنی، فرآیندهای متابولیک با جذب آب شروع شده و باعث افزایش تنفس و فعال شدن و سنتز آنزیم‌ها می‌شود و به دنبال آن مواد ذخیره‌ای در بذر هضم و به جنین منتقل می شود (Bareke, 2018). همان‌طور که در شکل (۱) آمده است، وزن ذخایر انتقال یافته بذر در زمان مصرف پلی‌وینیل کلراید ۲ و ۴ درصد، تفاوت معنادار با شاهد دارد. طبق گزارش بوتس و همکاران (Boots et al., 2019) در حضور آلاینده‌هایی نظیر میکروپلاستیک‌ها فعالیت درونی و میزان انتقال ذخایر بذر کاهش می‌یابد. در غلظت‌های پایین کادمیم (۰ و ۵۰ میکرومولار) استفاده همزمان کادمیم و پلی‌وینیل کلراید منجر به کاهش وزن ذخایر انتقال یافته بذر نسبت به کادمیم تنهایی شد، درحالی‌که در غلظت‌های بالاتر کادمیم تیمارهای ترکیبی با پلی‌وینیل کلراید میزان ذخایر انتقال یافته بیش‌تری نسبت به کاربرد کادمیم به تنهایی داشتند. مطالعات اخیر نشان دادند، بذرهای در معرض میکروپلاستیک، به دلیل افزایش قابل توجه جذب آب، بازسازی متابولیسم پایه را با سرعت بیش‌تری آغاز می‌کنند و می‌توانند به شرایط تنش کادمیم بیش‌تر غلبه کنند (Lian et al., 2020).

راندمان استفاده از ذخایر بذر

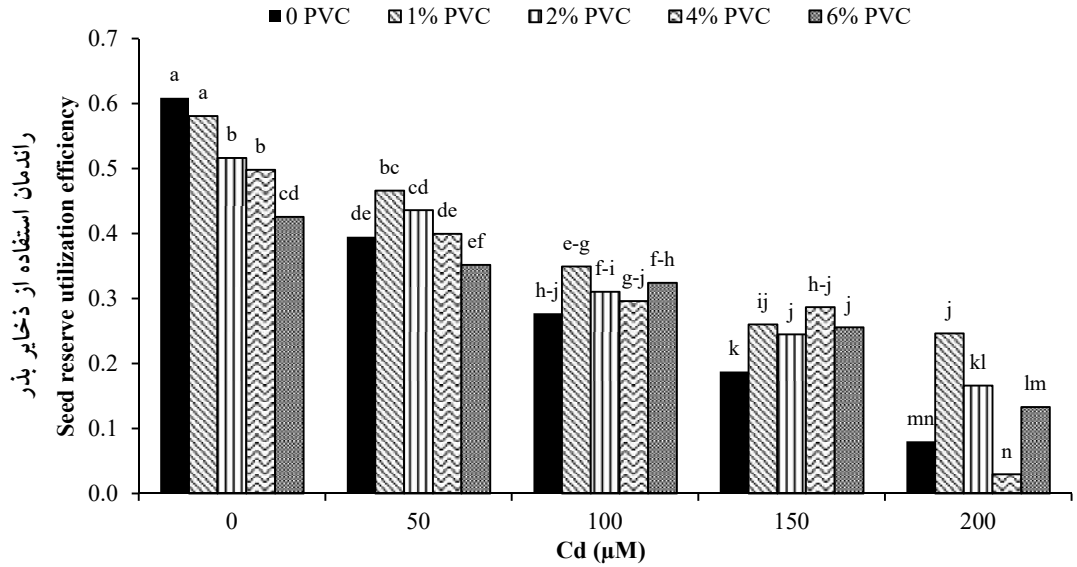
اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر راندمان استفاده از ذخایر بذر در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۱). بر اساس شکل (۲) افزایش غلظت کادمیم و میکروپلاستیک منجر به کاهش راندمان استفاده از ذخایر بذر شد؛ به صورتی‌که راندمان استفاده از ذخایر بذر در تمامی غلظت‌های کادمیم و پلی‌وینیل کلراید (به غیر از ۱ درصد) به‌صورت انفرادی با شاهد دارای تفاوت معنادار بود. در پاسخ به سمّیت کادمیم، بسیاری از سازوکارهای آنزیمی و غیر آنزیمی به‌منظور سرکوب آثار سوء رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاهان فعال می شوند (Li et al., 2013). بنابراین به علت برهم خوردن فعالیت‌های آنزیمی

نسخه پیش از انتشار



شکل ۱. وزن ذخایر انتقال یافته بذر در پاسخ به سطوح مختلف کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

Figure 1. The weight of mobilized seed reserve in response to different levels of cadmium and polyvinyl chloride



شکل ۲. راندمان استفاده از ذخایر بذر در پاسخ به سطوح مختلف کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

Figure 2. Seed reserve utilization efficiency in response to different levels of cadmium and polyvinyl chloride

راندمان استفاده از ذخایر بذر کاهش می‌یابد. گزارش شده وجود آلاینده‌ها در محیط جوانه‌زنی فعالیت آلفا آمیلاز را مهار کرده و منجر به کاهش تجزیه قند های محلول می‌شود. هم‌چنین اسیدهای آمینه آزاد کم‌تر است، که نشان‌دهنده آثار بازدارنده سمّیت کادمیم بر انتقال پروتئین می‌باشد (Lei et al., 2021). استفاده همزمان ۱۵۰ میکرومولار کادمیم و پلی‌وینیل کلراید ۶ درصد، منجر به افزایش ۳۶/۱٪ راندمان استفاده از ذخایر بذر نسبت به تیمار ۱۵۰ میکرومولار کادمیم شد (شکل ۲). بنابراین میکروپلاستیک‌های موجود در محیط می‌توانند به‌عنوان حامل فلزات سنگین عمل کنند، آن‌ها را جمع‌آوری و از جذب آن‌ها توسط گیاهان ممانعت کنند (Huang et al., 2021).

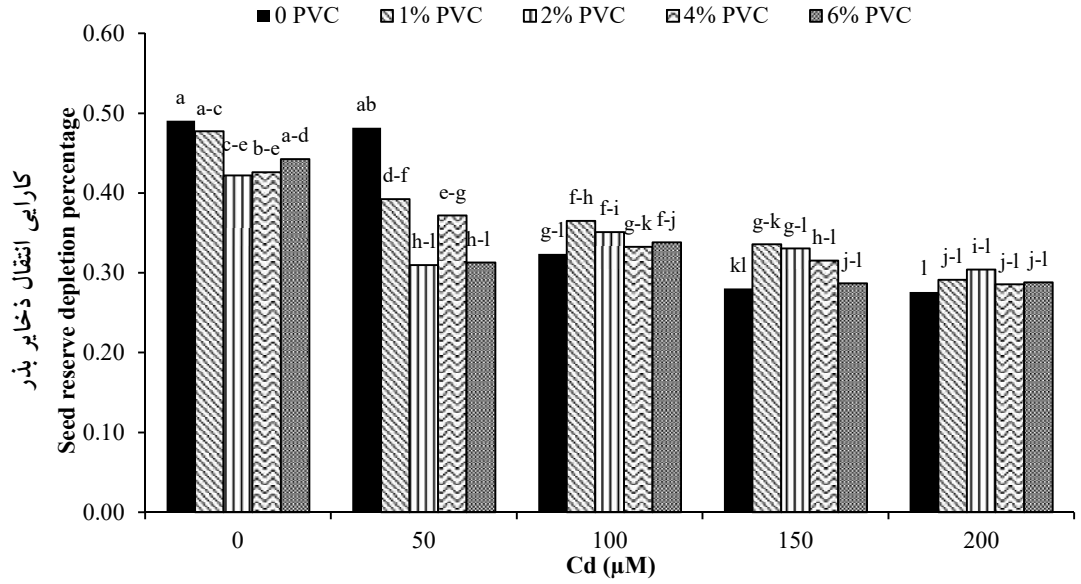
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات مورد بررسی

Table 3. Analysis of variance (mean square) for studied traits

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	کارایی انتقال ذخایر بذر Seed reserve depletion percentage	شاخص تحمل ریشه Root tolerance index	جوانه‌زنی نسبی بذر Relative seed germination	شاخص تحمل جوانه‌زنی Germination tolerance index	سطح سمّیت گیاهچه Toxicity level	درصد مهار جوانه‌زنی Inhibition seed germination percentage
کادمیم Cadmium (Cd)	4	0.06**	12021**	344**	12035**	10899**	1890**
پلی‌وینیل کلراید polyvinyl chloride (PVC)	4	0.004**	854**	153**	888**	629**	387**
کادمیم پلی‌وینیل کلراید Cd x PVC	16	0.004**	161**	30.7ns	183**	128**	63.6**
خطا Error	50	0.001	10.8	36	10.8	18.1	1.23
ضریب تغییرات CV(%)	–	9.67	5.98	6.72	6.52	9.20	7.39

*، ** و ns به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم وجود اختلاف معنادار

*, ** and ns is significant at the 5 and 1 percent probability level, respectively and non-significant



شکل ۳. کارایی انتقال ذخایر بذر در پاسخ به سطوح مختلف کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

Figure 3. Seed reserve depletion percentage in response to different levels of cadmium and polyvinyl chloride

کارایی انتقال ذخایر بذر

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر کارایی انتقال ذخایر بذر در سطح احتمال یک درصد معنادار شد (جدول ۳).

به دنبال افزایش غلظت کادمیم و پلی‌وینیل کلراید در محیط جوانه‌زنی، شاخص کارایی انتقال ذخایر موجود در بذر کاهش یافت (شکل ۳). مهار جوانه‌زنی بذور در تنش فلزات سنگین به

دنبال تأثیر این فلزات بر انتقال ذخایر آلی و معدنی از لپه‌ها، کاهش فعالیت آلفا و بتا آمیلاز، اسید و آلکالین فسفاتاز رخ می‌دهد (Mabrouk et al., 2019). بنابراین آثار سمّی فلزات سنگین ممکن است از طریق تأثیر بر مهار جذب آب (Li et al., 2005)، یا اختلال در انتقال ذخایر بذر از طریق اختلال در فعالیت آنزیم‌های هیدرولتیک باشد (Kranner and Colville, 2011). برخی مطالعات نشان می‌دهد در حضور غلظت‌های بالای فلزات سنگین، بذرها ممکن است جوانه بزنند اما رشد گیاهچه‌ها مختل می‌شود؛ که به عدم کارایی لازم برای انتقال ذخایر موجود در بذر برمی‌گردد (Ozdener and Kutbay, 2009). پلی‌وینیل کلراید، تنها در غلظت‌های ۲ و ۴ درصد دارای تفاوت معنادار با شاهد در کارایی انتقال ذخایر بذر بود، به‌طوری‌که به‌ترتیب کاهش ٪ ۱۳/۹ و ۱۳٪ را نشان دادند. از آنجاکه جوانه‌زنی بذر توسط سیگنال‌های داخلی (عمدتاً هورمون‌های گیاهی) و سیگنال‌های خارجی (عوامل محیطی) تنظیم می‌شود (Yang et al., 2020). می‌توان گفت تجمع میکروپلاستیک‌ها روی منافذ پوسته بذر به‌عنوان سیگنال خارجی باعث تأخیر در جوانه‌زنی شده است (Bosker et al., 2019). قابل ذکر است در غلظت‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار کادمیم، بذوری که در معرض کادمیم و غلظت‌های مختلف پلی‌وینیل کلراید قرار داشتند دارای کارایی انتقال ذخایر بیش‌تری نسبت به کادمیم به تنهایی بودند. ظرفیت مناسب پلی‌وینیل کلراید برای نفوذ به پوسته بذر و افزایش تنظیم کانال‌های آب با تشکیل منافذ میکرو سکوپی و آبگیری بیش‌تر بذر در حضور کادمیم، می‌تواند منجر به بهبود جوانه‌زنی شود؛ که به دنبال جذب آب بهتر، ذخایر موجود در بذر نیز با کارایی بیش‌تری منتقل می‌شوند (Mondal et al., 2022).

شاخص تحمل ریشه

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص تحمل ریشه در سطح احتمال یک در صد معنادار بود (جدول ۳). از آنجاکه ریشه‌ها مستقیماً در معرض عوامل تنش‌زا قرار می‌گیرند، لذا حضور آلاینده‌ها در محیط جوانه‌زنی باعث کاهش شاخص تحمل ریشه شد، و با افزایش غلظت کادمیم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید روند نزولی در این شاخص مشاهده شد (جدول ۴). کم‌ترین شاخص تحمل ریشه مربوط به غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیم بود، که نسبت به غلظت ۵۰ میکرومولار کادمیم ۸۰٪ کاهش نشان داد. کادمیم تأثیر مستقیم بر جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه‌چه دارد (Bouziani et al., 2019). میکروپلاستیک‌ها نیز اثر منفی خود را عمدتاً بر رشد ریشه بر جای می‌گذارند؛ چرا که رشد ریشه برای توسعه بعدی گیاه بسیار مهم است (Li et al., 2021). شاخص تحمل ریشه تحت پلی‌وینیل کلراید ۶ درصد، نسبت به شاهد ٪۱۰/۴ کاهش یافت. غلظت بالای میکروپلاستیک در مرحله جوانه‌زنی بذور تأثیر سوء قابل توجهی بر پارامترهای رشدی ریشه مانند طول، وزن، تعداد، زیست توده، و زنده ماندن سلول‌های آن دارد (Li et al., 2021). در تیمار ۲۰۰ میکرومولار کادمیم و پلی‌وینیل کلراید ۴ درصد، شاخص تحمل ریشه به میزان ۱۳۱٪ بیش‌تر از زمانی بود که بذور در معرض ۲۰۰ میکرومولار کادمیم به تنهایی قرار گرفتند. یانگ و همکاران (Yang et al. 2019) اظهار داشتند فلزات سنگین می‌توانند توسط ذرات میکروپلاستیک جذب شوند، به همین دلیل از آثار سوء آن‌ها در زمان جوانه‌زنی می‌تواند کاسته شود.

جوانه‌زنی نسبی بذر

نتایج حاصل از آزمایش نشان داد اثر انفرادی کادمیم و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر جوانه‌زنی نسبی بذر در سطح احتمال یک درصد معنادار بود ولی برهم‌کنش آن‌ها بر صفت مورد بررسی معنادار نشد (جدول ۳). به‌طور کلی استفاده از کادمیم و پلی‌وینیل کلراید در محیط جوانه‌زنی بذور ارزن دم‌روباهی منجر به کاهش جوانه‌زنی نسبی بذر گردید.

این روند کاهشی به دنبال افزایش غلظت آلاینده‌ها ادامه داشت (شکل ۴). بین غلظت‌های مختلف کادمیم تفاوت معنادار در جوانه‌زنی نسبی بذر نسبت به شاهد مشاهده شد، به طوری‌که

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های شاخص تحمل ریشه، شاخص تحمل جوانه‌زنی، سطح سمّیت گیاهچه و درصد مهار جوانه‌زنی در بذر ارزن دم روباهی برای اثر برهم‌کنش کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

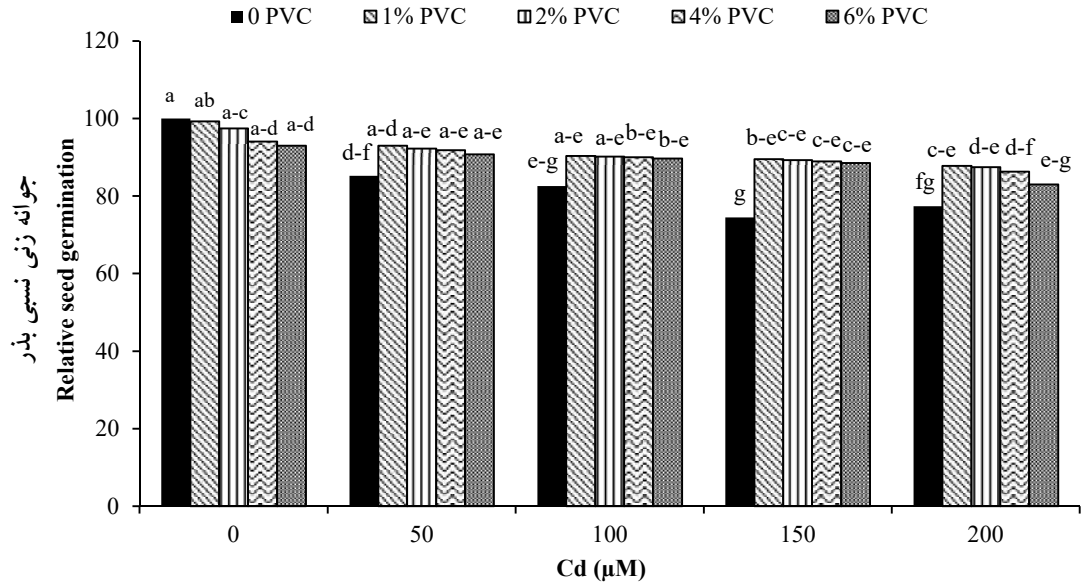
Table 4. Mean comparision the effect of cadmium and polyvinyl chloride on the root and germination tolerance index, toxicity level and inhibition seed germination percentage in foxtail millet seed

تیمار Treatment	شاخص تحمل ریشه Root tolerance index	شاخص تحمل جوانه‌زنی Germination tolerance index	سطح سمّیت گیاهچه Toxicity level	درصد مهار جوانه‌زنی Inhibition seed germination percentage
0 µM Cd + 0 PVC	100	100	0	0
0 µM Cd + 1% PVC	97.4	96.7	6.68	1.46
0 µM Cd + 2% PVC	96.6	94.1	9.40	2.59
0 µM Cd + 4% PVC	90.4	85	12.3	3.70
0 µM Cd + 6% PVC	89.5	83.2	13.3	3.70
50 µM Cd + 0 PVC	54	46	45.6	8.88
50 µM Cd + 1% PVC	93	86.4	22.7	4.37
50 µM Cd + 2% PVC	77.2	71.1	19	5.92
50 µM Cd + 4% PVC	67.7	62	32.9	7.40
50 µM Cd + 6% PVC	57	51.7	66.1	8.51
100 µM Cd + 0 PVC	33.8	27.9	46.7	29.2
100 µM Cd + 1% PVC	51.4	46.5	46.8	9.25
100 µM Cd + 2% PVC	53.2	48	48.5	10.3
100 µM Cd + 4% PVC	53.6	48.3	49.5	11.4
100 µM Cd + 6% PVC	53.1	47.5	49.5	13.3
150 µM Cd + 0 PVC	26.4	19.7	73.5	33.7
150 µM Cd + 1% PVC	50.4	45	51.3	13.3
150 µM Cd + 2% PVC	42.6	38	57.3	17
150 µM Cd + 4% PVC	40	35.6	58.1	18.1
150 µM Cd + 6% PVC	41.8	37	59.9	19.6
200 µM Cd + 0 PVC	10.7	8.43	89.2	45.1
200 µM Cd + 1% PVC	30.8	27	69.1	21.4
200 µM Cd + 2% PVC	26.3	22.9	73.6	26.2
200 µM Cd + 4% PVC	24.8	21.4	75.1	29.6
200 µM Cd + 6% PVC	12.7	10.7	87.2	31.4
LSD	5.40	5.39	6.99	1.82

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معناداری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$)

نسخه پیش از انتشار



شکل ۴. جوانه‌زنی نسبی بذر در پاسخ به سطوح مختلف کادمیم و پلی‌وینیل کلراید

Figure 4. Relative Seed germination in response to different levels of cadmium and polyvinyl chloride

غلظت ۵۰ میکرومولار کادمیم ٪ ۱۴/۸ جوانه‌زنی نسبی کم‌تری نسبت به شاهد داشت. حضور فلزاتی نظیر کادمیم در محیط جوانه‌زنی بذر، باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک در آندوسپرم شده و باعث کاهش محتویات قندها و پروتئین‌های محلول می‌شود که بر جوانه‌زنی نسبی بذر اثرگذار است (Amri et al., 2016). با این‌حال میکروپلاستیک‌ها به‌خصوص در سطوح پایین، می‌توانند جایگزین فلزات سنگین وارد شده به سلول‌های اپیدرمی و کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن (شرایط تنشی) شوند (Dong et al. 2020).

شاخص تحمل جوانه‌زنی

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و اثرات متقابل دوگانه بر شاخص تحمل جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳). شاخص تحمل جوانه‌زنی تلفیقی از رشد ریشه و پارامتر جوانه‌زنی بذر است، بنابراین وضعیت کامل‌تری از تحمل گیاه به سمّیت محیطی را ارائه می‌دهد (Amooaghaie et al., 2015). بررسی مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد؛ در حضور کادمیم و پلی‌وینیل کلراید شاخص تحمل جوانه‌زنی کاهش یافت (جدول ۴). گزارش شده وجود عوامل تنش‌زا، از جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه جلوگیری کرده و منجر به کاهش شاخص تحمل جوانه‌زنی می‌شود (Liu et al. 2012). در مرحله خروج ریشه‌چه، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به سطح ریشه متصل شده و به دلیل خاصیت آب‌گریزی از جذب آب و مواد مغذی توسط ریشه جلوگیری می‌کنند (Ziccardi et al. 2016)، لذا منجر به کاهش طول ریشه‌چه شده و شاخص تحمل جوانه‌زنی نیز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصله در استفاده همزمان پلی‌وینیل کلراید و کادمیم این شاخص بالاتر از تنش کادمیم به‌تنهایی بود. بذوری که تحت غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیم و کلراید ۴ درصد بودند، ٪۱۵۴ شاخص تحمل جوانه‌زنی بیش‌تری نسبت به ۲۰۰ میکرومولار کادمیم به تنهایی داشتند. این وضعیت ممکن است به دلیل رابطه جذب رقابتی بین ذرات میکروپلاستیک و کادمیم در سطح ریشه‌های گیاه باشد که باعث کاهش میزان کادمیم وارد شده به بافت‌های گیاهی و کاهش فراهمی زیستی آن‌ها شده است (Wang et al. 2019).

سطح سمّیت گیاهچه

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر سطح سمّیت گیاهچه با احتمال یک درصد معنادار شد (جدول ۳). سطح

سمّیت گیاهچه به دنبال حضور کادمیم و پلی‌وینیل کلراید در محیط کشت بذر افزایش یافت. پلی‌وینیل کلراید نسبت به کادمیم باعث ایجاد سمّیت بسیار کم‌تری شد (جدول ۴). کادمیم، رشد ریشه‌چه را مهار کرده و جوانه‌زنی را سرکوب می‌کند؛ همچنین باعث اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی رشد گیاهچه می‌شود (Guilherme et al., 2015). ذرات میکروپلاستیک نیز آب‌گریز بوده و می‌توانند مانع از جذب آب شوند لذا تأثیر منفی بر جوانه‌زنی و رشد ریشه گیاهچه دارد (Liu et al., 2019). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد سطح سمّیت گیاهچه‌ها در تنش کادمیم با حضور ذرات میکروپلاستیک کاهش یافته است (جدول ۴).

مهار جوانه‌زنی

اثر کادمیم، پلی‌وینیل کلراید و برهم‌کنش دوگانه آن‌ها بر مهار جوانه‌زنی بذر در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیم و میکروپلاستیک، اختلال و مهار در جوانه‌زنی بذر افزایش یافت. بر اساس گزارشات سوزا و همکاران (Souza et al., 2020)، قرار گرفتن بذور در معرض میکروپلاستیک‌ها منجر به کاهش تقسیم سلولی و مهار جوانه‌زنی بذر می‌شود. تفاوت بین درصد مهار جوانه‌زنی بذر در غلظت‌های بالای کادمیم نسبت به غلظت‌های پایین کم‌تر بود (جدول ۴). گزارش شده اثر بازدارندگی کادمیم بر جوانه‌زنی بذر، به دلیل کاهش جذب آب برای رشد جنین است (Vijayaragavan et al., 2011). دسترسی محدود به آب، باعث عدم تحرک نشاسته در آندوسپرم و به دنبال آن اختلال در انتقال قندهای محلول به محور جنینی شده در نهایت مهار جوانه‌زنی بذر را افزایش می‌دهد (Kuriakose and Prasad, 2008). به دنبال استفاده همزمان از کادمیم و پلی‌وینیل کلراید نسبت به استفاده از کادمیم به تنهایی، کاهش در مهار جوانه‌زنی بذر مشاهده شد. ترکیب ۱۰۰ میکرومولار کادمیم و میکروپلاستیک ۱ درصد نسبت به ۱۰۰ میکرومولار کادمیم منجر به کاهش ۶۸/۳ در صدی مهار جوانه‌زنی بذر شد (جدول ۴). این مسئله ممکن است به دلیل جذب کادمیم توسط ذرات میکروپلاستیک باشد (Wang et al., 2020).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد شاخص‌های رشد اولیه ارزن دم روباهی به‌شدت تحت تأثیر کادمیم و ذرات پلی‌وینیل کلراید قرار گرفت و منجر به اختلال در شاخص‌های تجزیه و انتقال مواد ذخیره‌ای بذر، درصد و سرعت جوانه‌زنی، متوسط زمان و درصد نسبی جوانه‌زنی، بنیه گیاهچه و شاخص تحمل ریشه شد. حضور ذرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید به میزان ۶ درصد در غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیم منجر به کاهش ٪۴۵/۹ راندمان استفاده از ذخایر بذر، ٪ ۱۲/۷ درصد جوانه‌زنی و ٪ ۵۸/۷ شاخص تحمل ریشه نسبت به پلی‌وینیل‌کلراید ۱ درصد شد. افزایش میزان سمّیت کادمیم تا ۲۰۰ میکرومولار در محیط کشت، کاهش ٪ ۹۱/۵ شاخص تحمل جوانه‌زنی نسبت به شاهد را به دنبال داشت. به‌طور کلی حضور ذرات پلی‌وینیل‌کلراید از شرایط تنشی کادمیم کاست و شاخص تحمل جوانه‌زنی را به‌عنوان پارامتری مهم از تحمل گیاه به تنش تا اندازه‌ای بهبود داد. بنابراین می‌توان اظهار کرد علی‌رغم آلایندگی ذرات میکروپلاستیک در محیط کشت بذر، نتایج به‌دست آمده بیان‌گر آثار متعادل‌کننده غلظت‌های پایین ذرات پلی‌وینیل کلراید بر سمّیت کادمیم در گیاهچه‌های ارزن دم روباهی است.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است. بدین وسیله از معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه بوعلی‌سینا که در پیشبرد این پژوهش همکاری و مساعدت نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نسخه پیش از انتشار

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

منابع مورد استفاده

1. Abdul-Baki, A.A., Anderson, J.D., 1973. Vigor Determination in Soybean Seed by Multiple Criteria1. Crop Sci., 13(6). https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x
2. Amooaghaie, R., Tabatabaei, F., Ahadi, A.-m., 2015. Role of hematin and sodium nitroprusside in regulating *Brassica nigra* seed germination under nanosilver and silver nitrate stresses. Ecotoxicol. Environ. Saf., 113, 259–270. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.017
3. Amri, B., Khamassi, K., Ali, M.B., Teixeira da Silva, J.A., Bettaieb Ben Kaab, L., 2016. Effects of gibberellic acid on the process of organic reserve mobilization in barley grains germinated in the presence of cadmium and molybdenum. S. Afr. J. Bot., 106, 35–40. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.05.007
4. Arfaeinia, H., Dobaradaran, S., Moradi, M., Pasalari, H., Mehrizi, E.A., Taghizadeh, F., Esmaili, A., Ansarizadeh, M., 2019. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf. Sci. Total Environ., 653, 783–791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.009
5. Bareke, T., 2018. Biology of seed development and germination physiology. Adv. Plants Agric. Res., 8(4-2018), 336–346. https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00335
6. Boots, B., Russell, C.W., Green, D.S., 2019. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. Environ. Sci. Technol., 53(19), 11496–11506. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304
7. Bosker, T., Bouwman, L.J., Brun, N.R., Behrens, P., Vijver, M.G., 2019. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. Chemosphere, 226, 774–781. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163
8. Bouziani, Y., Degaichia, H., Benmoussa, M., 2019. Effect of cadmium on the germinative parameters of bread wheat. Rev. Mex. De Cienc. Agric., 10(2). https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1476
9. Cao, Y., Zhao, M., Ma, X., Song, Y., Zuo, S., Li, H., Deng, W., 2021. A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans. Sci. Total Environ., 788, 147620. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147620
10. de Souza Machado, A.A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., Rillig, M.C., 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. Global Change Biol., 24(4), 1405–1416. https://doi.org/10.1111/gcb.14020
11. de Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J.B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A.S., Rillig, M.C., 2019. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. Environ. Sci. Technol., 53(10), 6044–6052. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339
12. Dong, Y., Gao, M., Song, Z., Qiu, W., 2020. Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings. Environ. Pollut., 259, 113892. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113892
13. Duan, C., Fang, L., Yang, C., Chen, W., Cui, Y., Li, S., 2018. Reveal the response of enzyme activities to heavy metals through in situ zymography. Ecotoxicol. Environ. Saf., 156, 106–115. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.015
14. Du L, Wu D, Yang X, Xu L, Tian X, Li Y, Liu Y., 2023. Joint toxicity of Cadmium (II) and microplastic leachates on wheat seed germination and seedling growth. Res. Sq. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2938063/v1.
15. Ellis, R.H., Roberts, E.H., 1981. An Investigation into the Possible Effects of Ripeness and Repeated Threshing on Barley Seed Longevity under Six Different Storage Environments. Ann. Bot., 48(1), 93–96. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086103
16. Ernst, W.H.O., 1998. Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic level. Ecotoxicology. https://cir.nii.ac.jp/crid/1574231874895184256
17. Ge, J., Li, H., Liu, P., Zhang, Z., Ouyang, Z., Guo, X., 2021. Review of the toxic effect of microplastics on terrestrial and aquatic plants. Sci. Total Environ., 791, 148333. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148333
18. Guilherme, M.D.F., de Oliveira, H.M., Silva, E.D., 2015. Cadmium toxicity on seed germination and seedling growth of wheat *Triticum aestivum*. Acta. Sci. Biol. Sci., 37(4), 499–504. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v37i4.28148
19. Guo, X., Hu, G., Fan, X., Jia, H., 2020. Sorption properties of cadmium on microplastics: The common practice experiment and A two-dimensional correlation spectroscopic study. Ecotoxicol. Environ. Saf., 190, 110118. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110118
20. Han, Y., Wu, M., Hao, L., Yi, H., 2018. Sulfur dioxide derivatives alleviate cadmium toxicity by enhancing antioxidant defence and reducing Cd2+ uptake and translocation in foxtail millet seedlings. Ecotoxicol. Environ. Saf., 157, 207–215. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.084

21. Huang, C., Ge, Y., Yue, S., Zhao, L., Qiao, Y., 2021. Microplastics aggravate the joint toxicity to earthworm *Eisenia fetida* with cadmium by altering its availability. Sci. Total Environ., 753, 142042. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142042
22. Imran, M., Das, K.R., Naik, M.M., 2019. Co-selection of multi-antibiotic resistance in bacterial pathogens in metal and microplastic contaminated environments: An emerging health threat. Chemosphere, 215, 846–857. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.114
23. International Seed Testing, A., 1999. International rules for seed testing. Rules 1999.
24. International Seed Testing, A., 2008. Zurich. CH-Switzerland: ISTA: 3.
25. Kolenčík, M., Ernst, D., Komár, M., Urík, M., Šebesta, M., Dobročka, E., Černý, I., Illa, R., Kanike, R., Qian, Y., Feng, H., Orlová, D., & Kratošová, G., 2019. Effect of Foliar Spray Application of Zinc Oxide Nanoparticles on Quantitative, Nutritional, and Physiological Parameters of Foxtail Millet (*Setaria italica* L.) under Field Conditions. Nanomater., *9*(11), 1559. https://doi.org/10.3390/nano9111559
26. Kranner, I., Colville, L., 2011. Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. Environ. Exp. Bot., 72(1), 93–105. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.005
27. Kuriakose, S.V., Prasad, M.N.V., 2008. Cadmium stress affects seed germination and seedling growth in Sorghum bicolor (L.) Moench by changing the activities of hydrolyzing enzymes. Plant Growth Regul., 54(2), 143–156. https://doi.org/10.1007/s10725-007-9237-4
28. Lei, K., Sun, S., Zhong, K., Li, S., Hu, H., Sun, C., Zheng, Q., Tian, Z., Dai, T., Sun, J., 2021. Seed soaking with melatonin promotes seed germination under chromium stress via enhancing reserve mobilization and antioxidant metabolism in wheat. Ecotoxicol. Environ. Saf., 220, 112241. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112241
29. Li, S., Wang, T., Guo, J., Dong, Y., Wang, Z., Gong, L., Li, X., 2021. Polystyrene microplastics disturb the redox homeostasis, carbohydrate metabolism and phytohormone regulatory network in barley. J. Hazard. Mater., 415, 125614. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125614
30. Li, W., Khan, M.A., Yamaguchi, S., Kamiya, Y., 2005. Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana*. Plant Growth Regul., 46(1), 45–50. https://doi.org/10.1007/s10725-005-6324-2
31. Li, Y., Zhang, S., Jiang, W., Liu, D., 2013. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L. Environ. Sci. Pollut. Res., 20(2), 1117–1123. https://doi.org/10.1007/s11356-012-1054-2
32. 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
33. Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., Liu, W., 2020. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). J. Hazard. Mater., 385, 121620. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620
34. Liu, J.G., Zhang, Y.X., Shi, P.L., Chai, T.Y., 2012. Effect of cadmium on seed germination and antioxidative enzymes activities in cotyledon of *Solanum nigrum* L. J. Agro-Environ. Sci., 31(5), 880–884.
35. Liu, Y., Zhang, Q., Cui, W., Duan, Z., & Wang, F., 2019. Toxicity of polyethylene microplastics to seed germination of mung bean. Environ. Dev., 05, 123–125.
36. Liu, Y., Zhou, C., Li, F., Liu, H., Yang, J., 2020. Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980-2050. Resour. Conserv. Recycl., 154, 104584. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104584
37. Mabrouk, B., Kâab, S.B., Rezgui, M., Majdoub, N., Teixeira da Silva, J.A., Kâab, L.B.B., 2019. Salicylic acid alleviates arsenic and zinc toxicity in the process of reserve mobilization in germinating fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seeds. S. Afr. J. Bot., 124, 235–243. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.020
38. Mondal, N.K., Kundu, S., Debnath, P., Mondal, A., Sen, K., 2022. Effects of polyethylene terephthalate microplastic on germination, biochemistry and phytotoxicity of *Cicer arietinum* L. and cytotoxicity study on *Allium cepa* L. Environ. Toxicol. Pharmacol., 94, 103908. https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103908
39. Ozdener, Y., Kutbay, H.G., 2009. Toxicity of copper, cadmium, nickel, lead and zinc on seed germination and seedling growth in *Eruca sativa*. Fresenius Environ. Bull., 18, 26–31.
40. Pant, S.R., Irigoyen, S., Doust, A.N., Scholthof, K.B., Mandadi, K.K., 2016. Setaria: a food crop and translational research model for C4 grasses. Front. Plant Sci. 7, 1885. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01885
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. Rady, M.M., Hemida, K.A., 2015. Modulation of cadmium toxicity and enhancing cadmium-tolerance in wheat seedlings by exogenous application of polyamines. Ecotoxicol. Environ. Saf., 119, 178–185. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.008
43. Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Yang, G., Rizwan, M., Ali, S., Zhou, Y., Wang, Q., Deng, L., Wang, Y., Wang, X., 2021. Boron supply alleviates cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by enhancing cadmium adsorption on cell wall and triggering antioxidant defense system in roots. Chemosphere, 266, 128938.

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128938
44. Rizwan, M., Ali, S., Ur Rehman, M.Z., Malik, S., Adrees, M., Qayyum, M.F., Alamri, S.A., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., 2019. Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*). Acta Physiol. Plant., 41(3), 35. https://doi.org/10.1007/s11738-019-2828-7
45. Sahasa, R.G.K., Dhevagi, P., Poornima, R., Ramya, A., Moorthy, P.S., Alagirisamy, B., Karthikeyan, S., 2023. Effect of polyethylene microplastics on seed germination of Blackgram (*Vigna mungo* L.) and Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Environ. Adv., 11, 100349. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100349
46. Seneviratne, M., Rajakaruna, N., Rizwan, M., Madawala, H.M.S.P., Ok, Y.S., Vithanage, M., 2019. Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: a critical review. Environ. Geochem. Health, 41(4), 1813–1831. https://doi.org/10.1007/s10653-017-0005-8
47. Soltani, A., Gholipoor, M., Zeinali, E., 2006. Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. Environ. Exp. Bot., 55(1), 195–200. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.012
48. Souza, P.M.S., Sommaggio, L.R.D., Marin-Morales, M.A., Morales, A.R., 2020. PBAT biodegradable mulch films: Study of ecotoxicological impacts using *Allium cepa*, *Lactuca sativa* and HepG2/C3A cell culture. Chemosphere, 256, 126985. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126985
49. Valivand, M., Amooaghaie, R., Ahadi, A., 2019. Seed priming with H2S and Ca2+ trigger signal memory that induces cross-adaptation against nickel stress in zucchini seedlings. Plant Physiol. Biochem., 143, 286–298. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.016
50. Vijayaragavan, M., Prabhahar, C., Sureshkumar, J., Natarajan, A., Vijayarengan, P., Sharavanan, S., 2011. Toxic effect of cadmium on seed germination, growth and biochemical contents of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants. Int. Multidiscip. Res. J., 1(5).
51. Wang, F., Wang, X., Song, N., 2021. Polyethylene microplastics increase cadmium uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by altering the soil microenvironment. Sci. Total Environ., 784, 147133. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147133
52. Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., Sun, Y., 2020. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. Chemosphere, 254, 126791. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791
53. Wang, H., Ding, J., Xiong, C., Zhu, D., Li, G., Jia, X., Zhu, Y., Xue, X., 2019. Exposure to microplastics lowers arsenic accumulation and alters gut bacterial communities of earthworm *Metaphire californica*. Environ. Pollut., 251, 110–116. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.054
54. Wani, P.A., Khan, M.S., Zaidi, A., 2007. Impact of heavy metal toxicity on plant growth, symbiosis, seed yield and nitrogen and metal uptake in chickpea. Aust. J. Exp. Agric., 47(6), 712–720. https://doi.org/10.1071/EA05369
55. Yang, J., Cang, L., Sun, Q., Dong, G., Ata-Ul-Karim, S.T., Zhou, D., 2019. Effects of soil environmental factors and UV aging on Cu2+ adsorption on microplastics. Environ. Sci. Pollut. Res., 26(22), 23027–23036. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05643-8
56. Yang, L., Liu, S., Lin, R., 2020. The role of light in regulating seed dormancy and germination. J. Integr. Plant Biol., 62(9), 1310–1326. https://doi.org/10.1111/jipb.13001
57. Ye LP, Qi CC, Hong JG, Ma XT. 2017. Life cycle assessment of polyvinyl chloride production and its recyclability in China. J. Cleaner Prod.142:2965–2972. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.171
58. Ziccardi, L. M., Edgington, A., Hentz, K., Kulacki, K. J., & Kane Driscoll, S., 2016. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review. *Environ. Toxicol. Chem.*, *35*(7), 1667–1676. https://doi.org/10.1002/etc.3461