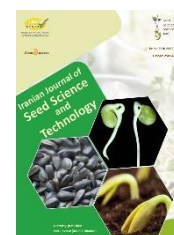




## Iranian Journal of Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

### Research Article

# Investigation of vigor index, root tolerance, toxicity level, and germination inhibition of foxtail millet seeds (*Setaria italica* L.) exposed to lead and microplastic

Sepideh Nikoumaram<sup>1</sup>, Ali Sepehri<sup>2\*</sup>

1. Ph.D student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.  
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

### Article Information

Received: 15 Apr. 2025  
Revised: 02 Jul. 2025  
Accepted: 16 Jul. 2025

#### Keywords:

Germination percentage,  
Heavy metals,  
Polyvinyl chloride,  
Seed reserve depletion.

Corresponding Author:

[a\\_sepehri@basu.ac.ir](mailto:a_sepehri@basu.ac.ir)



### Abstract

Plants are highly vulnerable to diseases and environmental stresses during germination because germination is the most critical stage of their life cycle (Tuğ & Yaprak, 2019). Microplastics (MPs) are often used in agricultural ecosystems as plastic mulch or greenhouse cover. Therefore, there is a possibility of their excessive accumulation in the soil, which greatly affects seed germination (De Silva et al., 2022). On the other hand, lead (Pb) contamination disrupts germination and early growth stages, thus harming the physiology and morphology of seeds (Seneviratne et al., 2019). Experiments were conducted as factorials based on a completely randomized design with three replications. The desired solutions were prepared by calculating the amount of Pb, and PVC-MP by five concentrations of Pb (0, 250, 500, 750, and 1000  $\mu$ M) and five concentrations of PVC-MP (0, 1, 2, 4, and 6% w/w). Three replicates of foxtail millet (*Setaria italica* L.) seeds were disinfected with a 2% sodium hypochlorite solution and washed with distilled water. This study showed that foxtail millet seeds were able to germinate under conditions of Pb toxicity up to 1000  $\mu$ M, but the germination percentage and root tolerance index were significantly reduced. This indicates the tolerance of foxtail millet seeds to Pb stress. Despite environmental concerns regarding MP contamination, the results show that the presence of PVC in the culture medium, even at low concentrations, has a positive effect on seed germination under Pb toxicity.

**How to cite this paper:** Nikoumaram, S., Sepehri, A. (2026). Investigation of vigor index, root tolerance, toxicity level, and germination inhibition of foxtail millet seeds (*Setaria italica* L.) exposed to lead and microplastic. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (2), 113-130. <https://doi.org/10.22092/ijst.2025.369124.1559>



© Authors, Published by Iranian Journal of Seed Science and Technology. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Plants are highly susceptible to environmental stresses during germination, as it represents the most critical stage of their life cycle (Tuğ & Yaprak, 2019). Microplastics (MPs), commonly used in agricultural systems as plastic mulch or greenhouse coverings, have the potential to accumulate excessively in soil, which can adversely affect seed germination (De Silva et al., 2022). Concurrently, lead (Pb) contamination disrupts germination and early growth stages, negatively impacting seed physiology and morphology (Seneviratne et al., 2019). While previous studies on the combined effects of MPs and heavy metals have primarily focused on seedling growth, limited research has explored their impacts during germination (Zong et al., 2021). Moreover, existing findings on the interactive effects of MPs and heavy metals during germination remain inconsistent. Foxtail millet (*Setaria italica*) is recognized as a suitable model for studying plant responses to environmental stress (Pant et al., 2016; Shi et al., 2018). Given the current knowledge gap, this study aimed to examine the effects of lead (Pb) and polyvinyl chloride microplastics (PVC-MPs) on key indicators of foxtail millet seed germination under combined stress conditions.

### Materials and Methods

Experiments were conducted as factorials based on a completely randomized design with three replications. The desired solutions were prepared by calculating the amount of Pb and PVC-MP at five concentrations of Pb (0, 250, 500, 750, and 1000  $\mu\text{M}$ ) and five concentrations of PVC-MP (0, 1, 2, 4, and 6% w/w). Three replicates of foxtail millet (*Setaria italica* L.) seeds were disinfected with a 2% sodium hypochlorite solution and washed with distilled water. Then, they were placed in a sterile 15 cm Petri dish on a layer of sterile filter paper, and 20 ml of the desired solution was added to each Petri dish. The Petri dishes were kept for seven days at 25°C. Therefore, several parameters such as germination percentage (ISTA, 1999), germination rate (ISTA, 1999), vigor index (ISTA, 1999), mean germination time (Ellis & Roberts, 1981), weight of mobilized seed reserve (Soltani et al., 2006), seed reserve utilization efficiency (Soltani et al., 2006), seed reserve depletion efficiency (Soltani et al., 2006), root tolerance index (Valivand et al., 2019), toxicity level (Valivand et al., 2019), and germination inhibition (Pignattelli et al., 2020) were calculated.

### Results and Discussion

Following the increase in Pb concentration, the seed germination percentage decreased. In the presence of PVC-MP particles, more seeds germinated compared to the Pb treatment alone. For instance, in a 1000  $\mu\text{M}$  Pb and 1% PVC-MP treatment, the germination percentage increased by 36.8% compared to the same Pb concentration. Other studies (Zhong et al., 2021) have also observed a decrease in the toxicity and

bioavailability of heavy metals in the presence of MPs, likely due to the ability of MPs to absorb heavy metals (Wang et al., 2020b). Modelling has described this mechanism as the chemical adsorption of Pb on the surface of MP particles (Lin et al., 2021). Co-stress of Pb and PVC-MP also resulted in a decrease in the seed germination rate. In the treatment of 500  $\mu\text{M}$  Pb with 6% PVC-MP, the seed germination rate was 26.3% lower than that of the treatment of 500  $\mu\text{M}$  Pb alone. It has been demonstrated that the coexistence of heavy metals and microplastics (MPs) can influence the toxicity of heavy metals and decrease the germination rate (Patil et al., 2021). In the co-contamination of Pb and MP treatments, the mean germination time was less than that of Pb stress alone at the investigated levels. Thus, with increasing PVC-MP concentration, the average seed germination time increased. The presence of MP particles under Pb stress increased the vigor index compared to Pb stress alone; however, this increase in vigor decreased with increasing PVC-MP concentration. For instance, at a level of 750  $\mu\text{M}$  Pb, the presence of 1% and 6% PVC-MP increased the seedling vigor index by 50.3% and 37.6%, respectively. In some cases, MPs can bind to root surfaces (Yang et al., 2021c) and reduce root activity (Dong et al., 2022c), thereby also reducing the uptake of heavy metals by roots (Liu et al., 2023a). At the beginning of germination, metabolic processes begin with the absorption of water by the seed, which increases respiration and the activation and synthesis of enzymes. This is followed by the digestion of materials stored in the seed and their transfer to the embryo, resulting in cell division and embryo growth (Bareke, 2018). The presence of pollutants such as Pb and PVC-MP can disrupt this process, reducing the weight of the mobilized reserves by increasing the concentration of Pb and PVC-MP. The lowest seed reserve utilization efficiency was observed at the highest Pb level, and the presence of MPs led to a significant increase in this index. This phenomenon can likely be attributed to the fact that MPs, acting like a “nanocatalyst,” can positively induce  $\alpha$ -amylase activity to accelerate the hydrolysis of seed starch granules. This increases the availability of soluble sugars, providing more energy for seedling growth (Lian et al., 2020a). Increasing Pb concentration resulted in a decrease in the efficiency of seed reserve depletion. Even at a concentration of 250  $\mu\text{M}$ , which caused the least toxicity, it resulted in a 29.8% reduction in the desired trait. The presence of PVC-MP also caused a decrease in this index. Recently, Ge et al. (2021) emphasized in their review that seeds are very sensitive to MPs. MPs can easily penetrate the seed coat due to their small particle size (Dietz & Hertz, 2011; Jiang et al., 2019). Co-stress of Pb with PVC-MP improved stress conditions and increased root tolerance compared to Pb stress alone. At a concentration of 750  $\mu\text{M}$  Pb, the presence of 4% PVC-MP resulted in a 40.1% increase in the root tolerance index under Pb toxicity. Previous studies have also shown that the presence of MP particles reduces heavy metal toxicity (Lian et al., 2020b). The highest toxicity

level was observed at a concentration of 1000  $\mu\text{M}$  Pb. The application of PVC-MP particles led to the adjustment of stress conditions and a reduction in Pb toxicity for foxtail millet seedlings. These results may be due to the adsorption of heavy metals by MP particles, which reduces the destructive effects of Pb on seedling growth (Wang *et al.*, 2020c). The presence of PVC-MP particles under Pb toxicity reduced the inhibition of seed germination compared to Pb stress alone. Therefore, MP particles can be considered effective in reducing stress caused by metal pollutants (Mangal *et al.*, 2020).

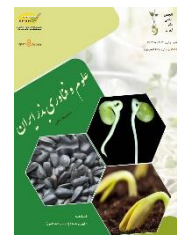
### Conclusion

This study demonstrated that foxtail millet (*Setaria italica*) seeds are capable of germinating under lead (Pb) toxicity conditions up to 1000  $\mu\text{M}$ , although both the

germination rate and root tolerance index were significantly reduced. These findings suggest that *S. italica* exhibits a degree of tolerance to Pb-induced stress. Notably, despite growing environmental concerns regarding microplastic (MP) contamination, the presence of polyvinyl chloride (PVC) particles in the growth medium, even at low concentrations, had a stimulatory effect on seed germination under Pb stress. These results underscore the need for further investigation into the complex interactions between MPs and heavy metals during the early stages of plant development. A deeper understanding of these interactions could contribute to the development of more effective strategies for managing soil contamination, enhancing germination success, and improving plant performance under combined abiotic stress conditions.



## نشریه علوم و فناوری بذر ایران



ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

## بررسی شاخص بنیه، تحمل ریشه، سطح سمیت و مهار جوانه‌زنی بذر ارزن دم‌روباهی (*Setaria italica* L.) در معرض سرب و میکروپلاستیک

سپیده نیکومرام<sup>۱</sup>، علی سپهری<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی- فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

## اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

## واژه‌های کلیدی:

انتقال ذخایر بذر،

پلی‌وینیل کلراید،

درصد جوانه‌زنی،

فلزات سنگین.

## نویسنده مسئول:

[a\\_sephri@basu.ac.ir](mailto:a_sephri@basu.ac.ir)

## چکیده

امروزه آلاینده‌گی پلاستیک‌ها و فلزات سنگین در خاک به‌عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌ها در تولید محصولات زراعی مطرح است. این پژوهش به بررسی اثر آلودگی سرب و میکروپلاستیک در مراحل اولیه رشد و نمو ارزن دم‌روباهی (*Setaria italica* L.) پرداخته است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، شامل پنج سطح سرب (۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و پنج سطح میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید (۰، ۱، ۲، ۴ و ۶ درصد) انجام شد. نتایج نشان داد که آلاینده‌های سرب و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید سبب کاهش درصد جوانه‌زنی، شاخص بنیه، کارآیی استفاده از ذخایر بذر و شاخص تحمل ریشه شدند. در چنین شرایطی، میانگین زمان جوانه‌زنی، شاخص سطح سمیت و درصد مهار جوانه‌زنی افزایش یافت. با این حال، حضور ذرات پلی‌وینیل کلراید منجر به تعدیل اثرات سوء ناشی از آلودگی سرب گردید. به‌طوری‌که حضور ۱ درصد میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید تحت سمیت ۱۰۰۰ میکرومولار سرب، درصد جوانه‌زنی (۳۶/۸ درصد)، شاخص بنیه (۵۹/۳ درصد)، کارآیی استفاده از ذخایر بذر (۲۲۹ درصد) و شاخص تحمل ریشه (۱۱۶ درصد) را افزایش داده و منجر به کاهش سطح سمیت گیاهچه (۱۴/۱ درصد) و درصد مهار جوانه‌زنی (۳۷ درصد) شد. بر این اساس، میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید در غلظت مذکور با وجود آلاینده‌گی زیست‌محیطی، از سمیت سرب کاسته و شاخص‌های جوانه‌زنی بذر ارزن دم‌روباهی را تحت سمیت سرب ارتقاء داد. با این حال، روابط دقیق بین اثرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر مراحل اولیه رشد و جوانه‌زنی بذر تحت تنش فلزات سنگین نیاز به بررسی بیشتر دارد.

## نحوه استناد به این مقاله:

Nikoumaram, S., Sephri, A. (2026). Investigation of vigor index, root tolerance, toxicity level, and germination inhibition of foxtail millet seeds (*Setaria italica* L.) exposed to lead and microplastic. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (2), 113-130. <https://doi.org/10.22092/ijssst.2025.369124.1559>

## مقدمه

رشد گیاه با جوانه‌زنی بذر که مرحله اصلی و تعیین کننده رشد و نمو گیاه در مراحل بعدی است آغاز می‌شود. به دلیل نبود مکانیسم‌های دفاعی کافی، این مرحله مستعد تنش‌های محیطی است. گیاه در مرحله جوانه‌زنی به شدت در برابر بیماری‌ها و تنش‌های محیطی آسیب‌پذیر بوده زیرا جوانه‌زنی بحرانی‌ترین مرحله در چرخه زندگی آن‌ها است (Tuğ & Yaprak, 2019). سمیت ناشی از آلاینده‌ها در محیط جوانه‌زنی به شدت خسارت زای می‌باشد. پوشش بذر اگرچه شامل ساختاری است که از بذر در برابر تنش زنده و غیرزنده محافظت نموده و جذب آب از طریق منافذ موجود در آن را مقدر می‌شود، اما موفقیت جوانه‌زنی تا حد زیادی به عملکرد پوشش بذر در بستر کشت بستگی دارد، چرا که این پوشش نقش مهمی در فرآیند جذب آب و آغاز رشد ایفا می‌کند (Hajihashemi et al., 2020; Wang et al., 2022). گزارش شده میکروپلاستیک‌ها به عنوان یکی از عوامل تنش‌زا در محیط کشت بر جوانه‌زنی بذر مؤثرند و خاک زراعی به عنوان یکی از مهم‌ترین مخازن تجمع میکروپلاستیک‌های مصرفی در جهان محسوب می‌شود (Rillig, 2018). ذرات میکروپلاستیک از روش‌های مختلف نظیر به کارگیری وسایل گلخانه، مالچ پلاستیکی، فاضلاب‌های حاوی مواد پلاستیکی، آبیاری و کاربرد کودهای آلی وارد خاک‌های زراعی می‌شوند (Rillig & Lehmann, 2020). از این رو، درک اثرات میکروپلاستیک بر سیستم خاک-گیاه برای ارزیابی خطر اکولوژیکی و فیزیولوژیکی آن‌ها ضروری است. با این حال، میکروپلاستیک‌ها از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت بوده و ممکن است اثرات متفاوتی بر محیط خاک داشته باشند (Huang et al., 2022). اثرات میکروپلاستیک‌ها بر جوانه‌زنی بذر، نه تنها رشد گیاهان بلکه سلامت جانوران و انسان را به دلیل استفاده گسترده و سوء مدیریت آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد. میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های کشاورزی اغلب به عنوان مالچ پلاستیکی و یا پوشش گلخانه استفاده می‌شوند. بنابراین، احتمال تجمع بیش از حد آن‌ها در خاک وجود دارد لذا بر جوانه‌زنی بذر تأثیر زیادی بر جای می‌گذارند (De Silva et al., 2022). پژوهش‌های اخیر بیش تر بر تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر

ویژگی‌های بیوشیمیایی، رشد و عملکرد گیاهان متمرکز شده‌اند، درحالی که تأثیر آن‌ها بر جوانه‌زنی بذر و مراحل اولیه رشد گیاه ناشناخته باقی مانده است (Sahasa et al., 2023). از جوانه‌زنی بذر می‌توان به عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی اولیه اثرات سمیت میکروپلاستیک‌ها بر گیاهان استفاده کرد (Patil et al., 2021). با این حال برخی محققان اثرات میکروپلاستیک‌ها بر جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه را متفاوت گزارش کرده‌اند که نیاز به مطالعات بیشتر برای درک کامل اثرات آن‌ها دارد (Bosker et al., 2019; Li et al., 2021).

از سوی دیگر اثر سمیت فلزات سنگین را می‌توان در تمام بافت‌های گیاهی و مراحل مختلف چرخه زندگی گیاهان از جوانه‌زدن بذر تا پیری مشاهده نمود. با این حال، این اثرات در طول جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه بارزتر است. فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک مانند آمیلازها و پروتازها برای جوانه‌زنی بذر بسیار مهم است، شواهد نشان می‌دهد که فلزات سنگین باعث مهار این آنزیم‌ها می‌شوند (Pandey & Sharma, 2002). سرب یکی از آلاینده‌های مهم است که کاربرد فراوان در صنعت مانند ساخت باتری، پوشش کابل، رنگ، پالایشگاه‌های پتروشیمی (Tchounwou et al., 2012)، اسباب بازی، سرامیک (Saba et al., 2019)، استخراج معادن سنگ (Kumar et al., 2020) دارد. همچنین کودهای کشاورزی و آفت کش‌ها (Xing et al., 2020) از منابع اصلی آلودگی سرب در خاک می‌باشند. گیاهان سرب جذب شده را در ریشه انباشته کرده و تنها بخش اندکی از آن را به اندام هوایی گیاه منتقل می‌کنند. اگر سطح سرب از حد بحرانی فراتر رود، می‌تواند مشکلات رشدی و فیزیولوژیکی در گیاهان ایجاد کند (Kumar et al., 2017). کاهش جوانه‌زنی، بنیه بذر و متعاقب آن رشد گیاهچه تحت سمیت فلزات سنگین در بسیاری از مطالعات گزارش شده است. در نخود فرنگی (*Pisum sativum*) کاهش درصد و شاخص تحمل جوانه‌زنی بذر، در معرض آلودگی سرب (۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ پی‌پی‌ام) مشاهده شده است (Majeed et al., 2019). همچنین، گزارش شده که غلظت ۵ تا ۱۰۰۰ میکرومولار کادمیوم و سرب سرعت جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر را در کاهو (*Lactuca sativa*) کاهش داد (Moreira et al., 2020). آلودگی

آزمایش شامل پنج غلظت سرب (۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و پنج غلظت پلی وینیل کلراید (۰، ۱، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی) بود. بذر اصلاح‌شده ارزن دم‌روباهی (رقم باستان) از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد.

### روش اجرای آزمایش

محلول‌های مورد نظر با محاسبه میزان سرب از منبع نیترات سرب (Merck آلمان) (Murtaza et al., 2019) و پلی وینیل کلراید (LG PVC PB-1202) با قطر ذرات ۷۵ میکرومتر (Li et al., 2020)، توسط همزن آهن‌ربایی به‌خوبی در مقدار معینی از آب مقطر حل شده و تشکیل سوسپانسیون یکنواخت دادند. به‌منظور آزمایش جوانه‌زنی برای هر تیمار سه تکرار ۱۰۰ بذری ارزن دم‌روباهی (*Setaria italica* L.) با محلول هیپوکلریت سدیم دو درصد در مدت ۵ دقیقه ضدعفونی و با آب مقطر شستشو شدند. سپس توسط پنس استریل در پتری‌دیش ۱۵ سانتی‌متری استریل، بر روی یک لایه کاغذ صافی استریل قرار داده شدند و به هر پتری‌دیش ۲۰ میلی‌لیتر از محلول‌های مورد نظر اضافه شد. بذرها به‌منظور آزمون جوانه‌زنی استاندارد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در ژرminatور به‌مدت هفت روز نگهداری شدند (ISTA, 2005). شمارش بذره‌های جوانه زده (خروج ریشه‌چه به‌میزان ۲ میلی‌متر) هر ۲۴ ساعت یک بار تا روز هفتم انجام گرفت. در پایان روز هفتم، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهچه‌ها برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و به‌عنوان میانگین طول ریشه‌چه و ساقه‌چه آن تکرار برای هر تیمار در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک همه اندام ساقه‌چه، ریشه‌چه و باقیمانده تمامی بذره‌های موجود در پتری‌دیش از یکدیگر جدا شده و در پاکت جداگانه به‌مدت ۴۸ ساعت در ۷۰ درجه سلسیوس خشک گردیدند و سپس به کمک ترازوی دقیق (۰/۰۰۱ گرم) وزن شدند.

### صفات مورد بررسی

#### درصد جوانه‌زنی

تعداد بذره‌های جوانه زده بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (ISTA, 1999).

$$\text{درصد جوانه‌زنی} = \frac{\text{تعداد بذره‌های جوانه زده}}{\text{تعداد کل بذرها}} \times 100$$

سرب روند جوانه‌زنی و رشد اولیه محصولات زراعی را مختل کرده و اثرات نامطلوبی بر فیزیولوژی و مورفولوژی بذرها دارد (Seneviratne et al., 2019). گزارش شده بذره‌های گندم سیاه (*Fagopyrum tataricum*) کشت شده در خاک‌های آلوده به سرب از جوانه‌زنی، رشد ریشه و تولید زیست توده ضعیفی برخوردار بودند (Pirzadah et al., 2020). همچنین سمیت سرب اثرات نامطلوبی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه ذرت (*Zea mays*) داشته است (Zhang et al., 2018). تحقیقات موجود در مورد اثر ترکیبی میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین بیشتر به مراحل رشدی گیاهچه‌ای پرداخته لذا مطالعات بر فرآیند جوانه‌زنی اندک است (Zong et al., 2021). در این خصوص نتایج متناقضی از تنش هم‌زمان میکروپلاستیک و فلزات سنگین بر جوانه‌زنی گزارش شده است (Dong et al., 2022a; Du et al., 2024).

ارزن دم‌روباهی (*Setaria italica* L.) یکی از قدیمی‌ترین محصولات زراعی جهان با منشاء جنوب آسیا است (Suma & Urooj, 2012). این گیاه یکی از غلات مهم بوده که به‌صورت علوفه‌ای و دانه‌ای کشت شده (Amadou et al., 2013)، و دانه‌های آن علاوه بر دام به‌عنوان غذای اصلی در کشورهای آسیای شرقی و در حال توسعه مانند چین، برخی از بخش‌های هند و ژاپن به مصرف انسان نیز می‌رسد (Sharma & Niranjana, 2018). از سوی دیگر ارزن دم‌روباهی گیاه مناسبی برای تحقیقات زراعی مربوط به پاسخ به تنش‌های محیطی است (Pant et al., 2016; Shi et al., 2018). با توجه به کمبود مطالعات بر خصوصیات جوانه‌زنی بذرها تحت شرایط تنش هم‌زمان فلزات سنگین و میکروپلاستیک، این پژوهش با هدف بررسی اثرات غلظت‌های مختلف سرب و میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید بر شاخص‌های مهم جوانه‌زنی و رشدی بذر ارزن دم‌روباهی در شرایط تنش انجام شد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا در سال ۱۴۰۲ انجام پذیرفت.

**سرعت جوانه‌زنی**

سرعت جوانه‌زنی با توجه به فرمول زیر محاسبه گردید (ISTA, 1999).

$$\text{سرعت جوانه‌زنی} = \frac{\text{تعداد بذر جوانه زده در شمارش آخر}}{\text{تعداد روز شمارش آخر}} + \dots + \frac{\text{تعداد بذر جوانه زده در شمارش اول}}{\text{تعداد روز شمارش اول}}$$

**میانگین زمان جوانه‌زنی**

میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرها با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Ellis & Roberts, 1981).

$$\text{میانگین زمان جوانه‌زنی} = \frac{\text{مجموع (تعداد بذر جوانه زده در روز نام} \times \text{تعداد روز پس از شروع آزمایش)}}{\text{تعداد کل بذرهاى جوانه زده}}$$

**شاخص بنیه گیاهچه**

پس از آخرین روز جوانه‌زنی طول گیاهچه‌ها (cm) اندازه‌گیری و شاخص بنیه گیاهچه از طریق رابطه زیر محاسبه گردید (ISTA, 1999).

$$\text{شاخص بنیه گیاهچه} = \frac{\text{میانگین طول گیاهچه (cm)} \times \text{جوانه‌زنی استاندارد (\%)}}{\text{میانگین طول گیاهچه (cm)}}$$

**وزن ذخایر انتقال یافته بذر**

وزن ذخایر انتقال یافته بذر از رابطه زیر محاسبه گردید (Soltani et al., 2006).

$$\text{وزن ذخایر انتقال یافته بذر} = \frac{\text{وزن خشک بقایای بذر} - \text{وزن خشک اولیه بذر}}{\text{وزن خشک بقایای بذر}}$$

**کارآیی استفاده از ذخایر بذر**

کارآیی استفاده از ذخایر بذر از رابطه زیر محاسبه گردید (Soltani et al., 2006).

$$\text{کارآیی استفاده از ذخایر بذر} = \frac{\text{وزن خشک گیاهچه}}{\text{وزن ذخیره بذر استفاده شده}}$$

**کارآیی انتقال ذخایر بذر**

کارآیی انتقال ذخایر بذر از رابطه زیر محاسبه گردید (Soltani et al., 2006).

$$\text{کارآیی انتقال ذخایر بذر} = \frac{\text{وزن ذخایر انتقال یافته بذر}}{\text{وزن خشک اولیه بذر}}$$

**شاخص تحمل ریشه**

شاخص تحمل ریشه از رابطه زیر محاسبه گردید (Valivand et al., 2019).

$$\text{شاخص تحمل ریشه} = \frac{\text{متوسط طول ریشه در تیمار}}{\text{متوسط طول ریشه در شاهد}} \times 100$$

**سطح سمیت**

سطح سمیت از رابطه زیر محاسبه گردید (Valivand et al., 2019).

$$\text{سطح سمیت} = \frac{\text{طول ریشه‌چه تیمار - طول ریشه‌چه شاهد}}{\text{طول ریشه‌چه شاهد}} \times 100$$

**مهاری جوانه‌زنی**

مهاری جوانه‌زنی از رابطه زیر محاسبه گردید (Pignattelli et al., 2020).

$$\text{مهاری جوانه‌زنی} = \frac{\text{بذرهاى جوانه‌زده هر تیمار - بذرهاى جوانه‌زده شاهد}}{\text{بذرهاى جوانه‌زده شاهد}} \times 100$$

**تجزیه آماری**

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver. 9.4) انجام شد و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel رسم گردیدند.

**نتایج و بحث**

اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم کنش آن‌ها بر درصد جوانه‌زنی بذرهاى ارزن دم روباهی به ترتیب با احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). به دنبال افزایش غلظت سرب، درصد جوانه‌زنی بذر کاهش یافت. این کاهش می‌تواند به دلیل سمیت سرب در تغییر ساختار غشاء سلولی ریشه و کاهش سطوح جاذب آب باشد (Farooqi et al., 2018). در حضور ذرات میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید نسبت به تیمار سرب به تنهایی، تعداد بذرهاى بیشتری جوانه زده و افزایش درصد جوانه‌زنی در بالاترین سطح سرب معنی‌دار بود. به گونه‌ای که درصد جوانه‌زنی در غلظت ۱۰۰۰ میکرومولار سرب به همراه ۱ درصد پلی وینیل کلراید، ۲۰ درصد بیشتر از تیمار ۱۰۰۰ میکرومولار سرب بود (جدول ۲). کاهش سمیت و فراهمی زیستی فلزات سنگین در

حضور میکروپلاستیک‌ها در مطالعه‌ای دیگر نیز مشاهده شده است (Zong et al., 2021). که احتمالاً به دلیل توانایی میکروپلاستیک‌ها در جذب فلزات سنگین می‌باشد

(Wang et al., 2020a). این مسأله توسط مدل سازی نیز توصیف شده و نمایان‌گر مکانیسم جذب شیمیایی سرب بر سطح ذرات میکروپلاستیک است (Lin et al., 2021).

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد و سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنيه گیاهچه، میانگین زمان جوانه‌زنی و وزن ذخایر انتقال یافته بذر ارزن دم‌روباهی  
Table 1- Analysis of variance (mean squares) of studied traits on the percentage and rate of germination, seedling vigor index, mean germination time, and weight of mobilized seed reserve in foxtail millet seed

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean squares				
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص بنيه گیاهچه Vigor index	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean germination time	وزن ذخایر انتقال یافته بذر weight of mobilized seed reserve
سرب (Pb) Lead	4	865.3**	4001.7**	319567**	2.39**	0.004**
پلی‌وینیل کلراید Polyvinyl chloride (PVC)	4	74.8**	219.3**	33597**	0.13**	0.0002 <sup>ns</sup>
سرب × پلی‌وینیل کلراید Pb × PVC	16	39.7*	23.8**	6985**	0.05**	0.0003**
خطا Error	50	18.8	9.63	2839	0.02	0.0001
ضریب تغییرات (% CV)	-	5.46	6.47	10.2	7.03	7.86

\*, \*\* و <sup>ns</sup> به ترتیب معنی دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی دار

\*, \*\* and <sup>ns</sup> indicate significant effect at the 5% and 1% of probability level, and non-significant effect, respectively

پلی وینیل کلراید، سرعت جوانه‌زنی بذر به میزان ۱۳/۷ درصد کمتر از تیمار ۵۰۰ میکرومولار سرب به‌تنهایی بود (جدول ۲). نشان داده شده وجود همزمان فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها ممکن است بر سمیت فلزات سنگین تأثیر بگذارد و باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی شود (Patil et al., 2021).

بررسی اثر سرب، میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص بنيه گیاهچه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۱). تنش سرب و میکروپلاستیک (۴ و ۶ درصد)، بنيه گیاهچه را کاهش دادند. از آنجایی که شاخص بنيه گیاهچه تابعی از دو صفت درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه است، کاهش درصد جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه را می‌توان به‌عنوان پاسخ‌های مرتبط با سمیت فلزات سنگین در نظر گرفت (Radić et al., 2010). حضور ذرات میکروپلاستیک در تنش سرب منجر به افزایش شاخص مورد نظر نسبت به تنش سرب به‌تنهایی شد؛ ولی این افزایش بنيه با افزایش

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سرب، پلی وینیل کلراید و برهم‌کنش آن‌ها بر سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی دار است (جدول ۱). هر یک از آلاینده‌های سرب و میکروپلاستیک باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی شدند. تنش فلزات سنگین منجر به افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر می‌شود، چراکه آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی دخیل در جوانه‌زنی نمی‌توانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن ناشی از سمیت سرب را حذف کنند (Hu et al., 2007). میکروپلاستیک‌ها نیز در محیط کشت به سطوح بذر و ریشه جذب شده و روی منافذ پوسته بذر تجمع می‌کنند و از طریق انسداد فیزیکی از جذب آب و مواد مغذی جلوگیری کرده، از این‌رو جوانه‌زنی و رشد ریشه را به تأخیر می‌اندازند (Bosker et al., 2019). تنش همزمان سرب و میکروپلاستیک نیز منجر به کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر شد. به‌گونه‌ای که در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سرب به‌همراه ۶ درصد

غلظت پلی وینیل کلراید کاهش یافت. برای مثال در سطح ۷۵۰ میکرومولار سرب حضور ۱ و ۶ درصد پلی وینیل کلراید، به ترتیب باعث افزایش ۵۰/۳ و ۳۷/۶ درصد شاخص بنيه گیاهچه شد (جدول ۲). در برخی موارد میکروپلاستیک می تواند به

سطوح ریشه متصل شده (Yang et al., 2021) و فعالیت ریشه را کاهش دهد (Dong et al., 2022a)، بنابراین جذب فلزات سنگین توسط ریشه را نیز کاهش می دهد (Liu et al., 2023).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات برهم کنش سرب و پلی وینیل کلراید بر درصد و سرعت جوانه زنی، شاخص بنيه گیاهچه و میانگین زمان جوانه زنی بذر ارزن دم روباهی  
Table 2- Comparison of the mean effects of the interaction between lead and polyvinyl chloride on the percentage and rate of germination, seed vigor index, and mean germination time in foxtail millet seed

سرب Pb ( $\mu$ M)	پلی وینیل کلراید PVC (%)	درصد جوانه زنی Germination percentage	سرعت جوانه زنی Germination rate	شاخص بنيه گیاهچه Vigor index	میانگین زمان جوانه زنی Mean germination time
0	0	91 <sup>a</sup>	82.7 <sup>a</sup>	770 <sup>a</sup>	1.5 <sup>h</sup>
	1	89 <sup>ab</sup>	75.7 <sup>b</sup>	719 <sup>ab</sup>	1.58 <sup>h</sup>
	2	88 <sup>a-c</sup>	71.1 <sup>bc</sup>	690 <sup>a-c</sup>	1.62 <sup>gh</sup>
	4	87 <sup>a-d</sup>	66.5 <sup>cd</sup>	680 <sup>b-d</sup>	1.85 <sup>e-g</sup>
	6	86.3 <sup>a-d</sup>	64.4 <sup>de</sup>	594 <sup>d-g</sup>	1.9 <sup>ef</sup>
250	0	83 <sup>b-f</sup>	60.9 <sup>ef</sup>	520 <sup>g-i</sup>	2.3 <sup>d</sup>
	1	85.6 <sup>a-e</sup>	58 <sup>fg</sup>	679 <sup>b-d</sup>	1.6 <sup>gh</sup>
	2	84.6 <sup>a-e</sup>	55.3 <sup>gh</sup>	654 <sup>b-f</sup>	1.66 <sup>f-h</sup>
	4	83.6 <sup>b-f</sup>	52.3 <sup>hi</sup>	664 <sup>b-e</sup>	1.74 <sup>e-h</sup>
	6	83.3 <sup>b-f</sup>	52 <sup>hi</sup>	622 <sup>c-f</sup>	1.95 <sup>e</sup>
500	0	78.6 <sup>e-j</sup>	51.8 <sup>hi</sup>	411 <sup>j-l</sup>	2.5 <sup>a-d</sup>
	1	82.6 <sup>b-f</sup>	48.6 <sup>i</sup>	592 <sup>e-g</sup>	2.29 <sup>d</sup>
	2	82 <sup>b-g</sup>	42.6 <sup>j</sup>	569 <sup>f-h</sup>	2.33 <sup>cd</sup>
	4	81.3 <sup>c-h</sup>	40.3 <sup>jk</sup>	522 <sup>g-i</sup>	2.35 <sup>b-d</sup>
	6	80 <sup>d-i</sup>	38.1 <sup>j-l</sup>	488 <sup>h-j</sup>	2.41 <sup>b-d</sup>
750	0	72.6 <sup>jk</sup>	36.6 <sup>k-m</sup>	307 <sup>mn</sup>	2.57 <sup>a-c</sup>
	1	77 <sup>f-k</sup>	35.6 <sup>k-n</sup>	461 <sup>i-k</sup>	2.45 <sup>a-d</sup>
	2	76.6 <sup>f-k</sup>	35.8 <sup>k-n</sup>	441 <sup>i-k</sup>	2.47 <sup>a-d</sup>
	4	75.3 <sup>g-k</sup>	34.7 <sup>l-o</sup>	425 <sup>jk</sup>	2.48 <sup>a-d</sup>
	6	74.6 <sup>h-k</sup>	34.2 <sup>l-o</sup>	422 <sup>j-l</sup>	2.48 <sup>a-d</sup>
1000	0	54.3 <sup>l</sup>	33.7 <sup>l-o</sup>	261 <sup>ln</sup>	2.69 <sup>a</sup>
	1	74.3 <sup>h-k</sup>	32.8 <sup>m-o</sup>	416 <sup>j-l</sup>	2.51 <sup>a-d</sup>
	2	73 <sup>i-k</sup>	32.5 <sup>m-o</sup>	374 <sup>k-m</sup>	2.52 <sup>a-d</sup>
	4	72 <sup>jk</sup>	31 <sup>no</sup>	336 <sup>l-n</sup>	2.58 <sup>a-c</sup>
	6	70.6 <sup>k</sup>	30.2 <sup>o</sup>	310 <sup>mn</sup>	2.59 <sup>ab</sup>

در هر ستون، میانگین های دارای حروف مشترک اختلاف معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

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

اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم کنش آن ها بر میانگین زمان جوانه زنی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). حضور سرب و پلی وینیل کلراید در محیط کشت بذر منجر به افزایش میانگین زمان جوانه زنی شد. گزارش شده سرب در پایان مرحله جذب آب، به پوسته و جنین بذر نفوذ کرده و جوانه زنی را به تأخیر می اندازد (Wierzbicka & Obidzińska, 1998). اثرات مخرب میکروپلاستیک ها بر ویژگی های جوانه زنی بذر برنج

(*Oryza sativa*) نیز گزارش شده است (Kaur et al., 2022). این اثرات ممکن است به دلیل ممانعت میکروپلاستیک ها از جذب آب توسط بذر رخ داده و موجب اختلال در فرآیند طبیعی جوانه زنی شود.

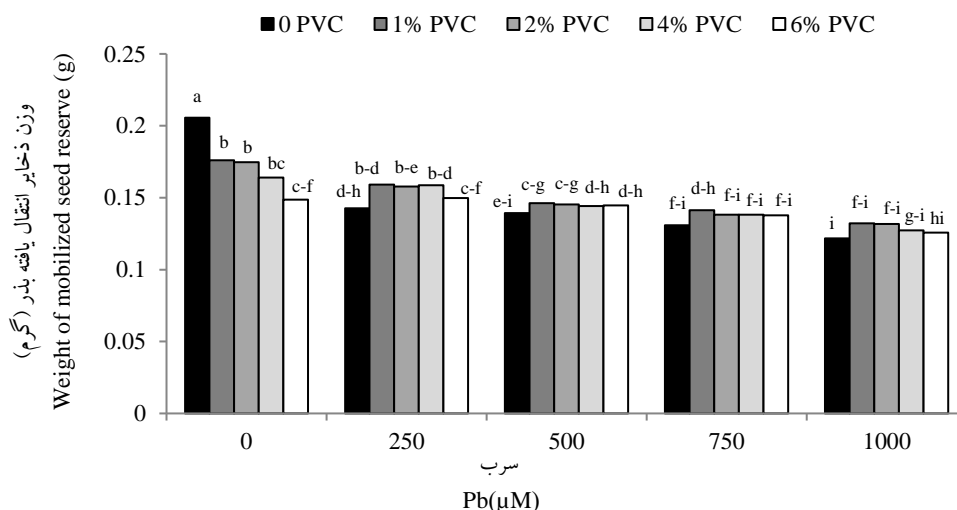
در تنش ترکیبی میانگین زمان جوانه زنی کمتر از تنش سرب به تنهایی در سطوح مورد بررسی بود. به طوری که با افزایش غلظت پلی وینیل کلراید میانگین زمان جوانه زنی بذر افزایش یافت.

اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم کنش آن ها بر میانگین زمان جوانه زنی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). حضور سرب و پلی وینیل کلراید در محیط کشت بذر منجر به افزایش میانگین زمان جوانه زنی شد. گزارش شده سرب در پایان مرحله جذب آب، به پوسته و جنین بذر نفوذ کرده و جوانه زنی را به تأخیر می اندازد (Wierzbicka & Obidzińska, 1998). اثرات مخرب میکروپلاستیک ها بر ویژگی های جوانه زنی بذر برنج

(Bareke, 2018). حضور آلاینده‌هایی نظیر سرب و میکروپلاستیک می‌تواند منجر به اختلال در این فرآیند شده و وزن ذخایر انتقال یافته با افزایش غلظت سرب و پلی‌وینیل کلراید را کاهش دهد. تحت سمیت سرب، تحرک مواد غذایی ذخیره شده کاهش یافته و منجر به کاهش رشد ریشه، تخریب فعالیت‌های پروتئولیتیک، اختلال در تنظیم اسمزی سلولی می‌شود؛ از این رو کاهش ذخایر بذر، جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را به دنبال دارد (Cokkizgin & Cokkizgin, 2010). Zhang et al. (2021) گزارش کردند، ذرات میکروپلاستیک به‌عنوان تنش فیزیکی برای بذر عمل می‌کنند، زیرا این ذرات کوچک بوده و در سلول‌های اپیدرمی بذر تجمع می‌یابند. بررسی نتایج نشان داد حضور ذرات میکروپلاستیک در کلیه سطوح سرب وزن ذخایر انتقال یافته بذر را نسبت به تنش سرب به‌تنهایی، به‌طور معنی‌دار افزایش نداد (شکل ۱).

کاربرد ۱ درصد پلی‌وینیل کلراید در تنش ۲۵۰ میکرومولار سرب، به‌میزان ۳۰/۲ درصد میانگین زمان جوانه‌زنی بذر را کاهش داد (جدول ۲). در پژوهش Dong et al. (2022b) حضور میکروپلاستیک جذب فلز سنگین آرسنیک توسط برنج را کاهش داد، که نشان دهنده یک تعامل متضاد بین میکروپلاستیک و فلزات موجود است، این پدیده را می‌توان تا حدی با افزایش شاخص بینه توضیح داد.

بررسی تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سرب و برهم‌کنش سرب و میکروپلاستیک بر وزن ذخایر انتقال یافته بذر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). در شروع جوانه‌زنی، فرآیندهای متابولیک با جذب آب توسط بذر شروع شده که باعث افزایش تنفس و فعال شدن و سنتز آنزیم‌ها می‌شود و به دنبال آن مواد ذخیره شده در بذر تجزیه شده و به جنین منتقل می‌شوند، در نتیجه تقسیم و رشد سلولی جنین اتفاق می‌افتد



شکل ۱- مقایسه میانگین وزن ذخایر انتقال یافته بذر در پاسخ به سطوح مختلف سرب و پلی‌وینیل کلراید

Fig. 1- The weight of mobilized seed reserve in response to different levels of lead (Pb) and polyvinyl chloride (PVC)

رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌باشد (Islam et al., 2007). Urbina et al. (2020)، تأثیرات مخرب سطح بالای پلاستیک‌ها بر پارامترهای جوانه‌زنی نظیر فعالیت‌های آنزیمی دخیل در تجزیه ذخایر بذر از طریق انسداد مکانیکی منافذ پوشش بذر، مهار جذب آب و کاهش استفاده از مواد مغذی، گزارش دادند. کمترین کارایی استفاده از ذخایر بذر مربوط به بالاترین سطح سرب (۱۰۰۰ میکرومولار) بود که حضور میکروپلاستیک منجر به

ولی اثرات سرب و میکروپلاستیک و برهم‌کنش آن‌ها بر کارایی استفاده از ذخایر بذر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). با افزایش غلظت سرب و میکروپلاستیک شاخص مورد نظر کاهش نشان داد. بیان شده است که سرب با فعالیت آنزیم‌های درگیر در جوانه‌زنی بذر مانند آمیلاز و پروتئاز تداخل می‌کند (Sengar et al., 2009). از این رو بذر نمی‌تواند به‌خوبی از ذخایر خود بهره‌بردارد لذا سرب دارای اثرات مخرب بر

مانند یک "نانو کاتالیست" می‌تواند به طور مثبت فعالیت  $\alpha$ -آمیلاز را برای تسریع هیدرولیز دانه‌های نشاسته بذر القا کنند، از این رو دسترسی قندهای محلول را افزایش داده و انرژی بیشتری برای رشد گیاهچه فراهم می‌کنند (Lian et al., 2020a).

افزایش چشم‌گیر این شاخص شد. سطح ۱۰۰۰ میکرومولار سرب و کاربرد ۶ درصد پلی‌وینیل کلراید، کارایی استفاده از ذخایر بذر را به میزان ۱۵۷/۸ درصد افزایش داد (شکل ۲). احتمالاً این رخداد را می‌توان به این مسأله نسبت داد که میکروپلاستیک‌ها

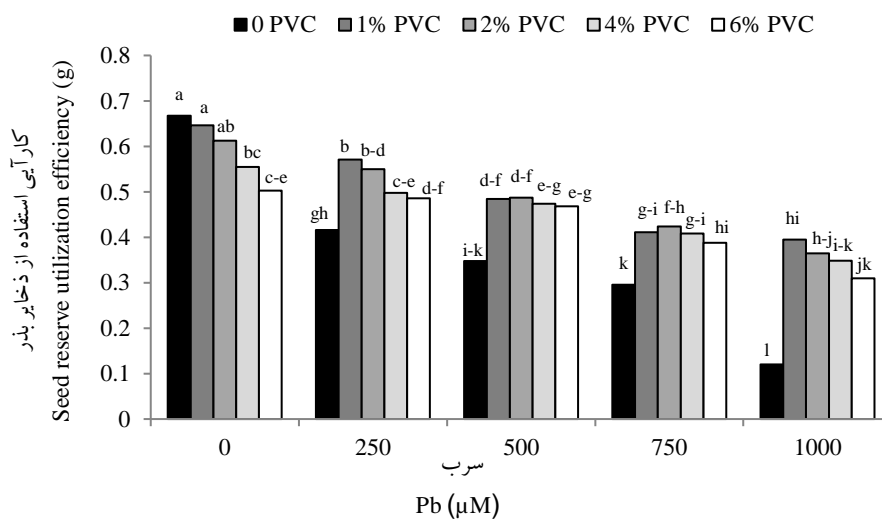
جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) کارایی استفاده از ذخایر بذر، کارایی انتقال ذخایر بذر، شاخص تحمل ریشه، سطح سمیت گیاهچه و درصد مهار جوانه‌زنی بذر ارزن دم‌روپاهی

Table 3- Analysis of variance (mean squares) of studied traits on the seed reserve utilization efficiency, seed reserve depletion efficiency, root tolerance index, seedling toxicity level, and germination inhibition in foxtail millet seed

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean squares				
		کارایی استفاده از ذخایر بذر Seed reserve utilization efficiency	کارایی انتقال ذخایر بذر Seed reserve depletion efficiency	شاخص تحمل ریشه Root tolerance index	سطح سمیت گیاهچه Seedling toxicity level	مهار جوانه‌زنی Germination inhibition
سرب Lead (Pb)	4	0.18**	0.03**	15228.4**	12168.9**	518.5**
پلی‌وینیل کلراید Polyvinyl chloride (PVC)	4	0.04**	0.003*	570.3**	346.2**	33.3**
سرب × پلی‌وینیل کلراید Pb × PVC	16	0.009**	0.003**	82**	159.7**	11.4**
خطا Error	50	0.001	0.001	33.05	13.8	1.37
ضریب تغییرات (CV) %	-	8.95	8.74	9.41	8.81	10.04

\*, \*\* و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی‌دار

\*, \*\* and ns indicate significant effect at the 5% and 1% of probability level, and non-significant effect, respectively

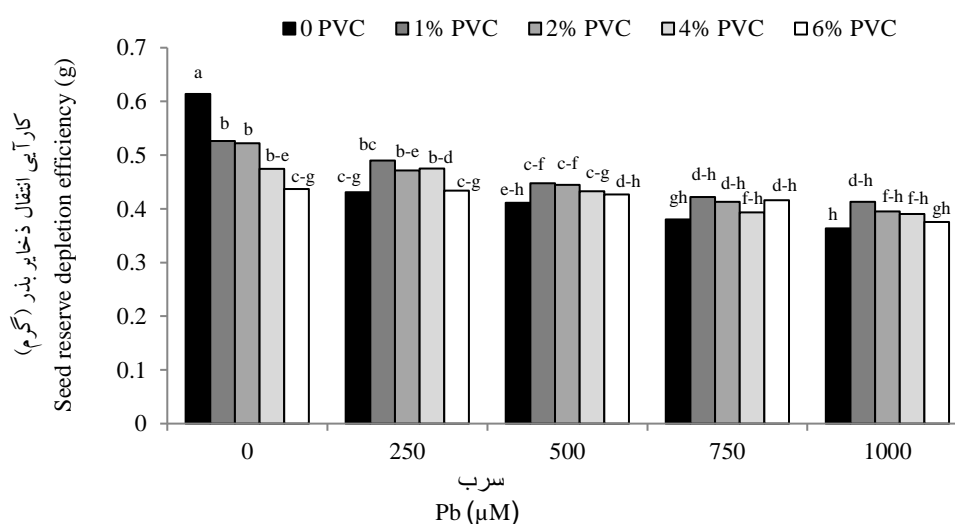


شکل ۲- مقایسه میانگین کارایی استفاده از ذخایر بذر در پاسخ به سطوح مختلف سرب و پلی‌وینیل کلراید

Fig. 2- Seed reserve utilization efficiency in response to different levels of lead (Pb) and polyvinyl chloride (PVC)

بررسی خود تأکید کرده‌اند که بذرها به میکروپلاستیک بسیار حساس هستند. میکروپلاستیک‌ها به دلیل اندازه کوچک ذراتشان می‌توانند به راحتی به پوشش بذر نفوذ کنند (Dietz & Hertz, 2011; Jiang et al., 2019). از این رو جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را به دلیل تأثیر مستقیم آن بر سطوح فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی فرآیندهای دخیل در جوانه‌زنی مختل می‌کنند (Martínez-Ballesta et al., 2016). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها در هر سطح سرب، تیمار تنش ترکیبی تفاوت معنی‌داری با تیمار عدم استفاده از میکروپلاستیک نداشت (شکل ۳).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم‌کنش آن‌ها بر کارآیی انتقال ذخایر بذر معنی‌دار بود (جدول ۳). افزایش غلظت سرب منجر به کاهش کارآیی انتقال ذخایر بذر شد. به گونه‌ای که حتی در غلظت ۲۵۰ میکرومولار که کم‌ترین سمیت را به دنبال داشت، منجر به کاهش ۲۹/۸ درصد صفت مورد نظر شد. این مسأله ممکن است به دلیل کاهش انتقال بعدی کربوهیدرات‌ها به محور جنینی در پی تنش سرب رخ دهد (Joshi et al., 2019). حضور پلی‌وینیل کلراید نیز باعث کاهش شاخص مورد نظر بود. اخیراً (Ge et al., 2021)



شکل ۳- مقایسه میانگین کارآیی انتقال ذخایر بذر در پاسخ به سطوح مختلف سرب و پلی‌وینیل کلراید

Fig. 3- Seed reserve depletion efficiency in response to different levels of lead (Pb) and polyvinyl chloride (PVC)

به‌تنهایی شد. در غلظت ۷۵۰ میکرومولار سرب، حضور ۴ درصد میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید منجر به افزایش ۴۰/۱ درصدی شاخص تحمل ریشه در شرایط سمیت سرب شد (جدول ۴). سلول‌های اپیدرمی و سلول‌های مرزی اولین خط دفاعی ریشه‌ها را در برابر آلاینده‌های خارجی فراهم می‌کنند. این مسأله ممکن است تا حدی توضیح دهد که چرا فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها نمی‌توانند به راحتی در نوک ریشه نفوذ کنند و تحمل ریشه نسبت به شرایط تنش افزایش می‌یابد (Sun et al., 2020). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که حضور ذرات میکروپلاستیک سمیت فلزات سنگین را کاهش می‌دهند (Lian et al., 2020b).

اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص تحمل ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). به خوبی شناخته شده که رشد ریشه نسبت به جوانه‌زنی بذر به سمیت فلز حساس‌تر است (Araujo & Monteiro, 2005). علاوه بر این، از آنجایی که ریشه گیاه اولین نقطه تماس با فلزات سنگین است، لذا کاهش طول ریشه گیاه در مواجهه با تیمارهای مختلف سرب رخ می‌دهد (Faheed, 2005). در این آزمایش تنش سرب باعث مهار بیشتر رشد ریشه ارزن دم‌روباهی نسبت به جوانه‌زنی بذر شد. با این حال ذرات پلی‌وینیل کلراید شاخص تحمل ریشه را نسبت به شاهد کاهش نداد. ولی در تنش همزمان با سرب منجر به بهبود شرایط تنش و افزایش تحمل ریشه در مقایسه با تنش سرب

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات برهم کنش سرب و پلی وینیل کلراید بر شاخص تحمل ریشه، شاخص تحمل جوانه‌زنی، سطح سمیت گیاهچه و درصد مهار جوانه‌زنی بذر ارزن دم روباهی

Table 4- Comparison of the mean effects of the interaction between lead and polyvinyl chloride on the root tolerance index, seedling toxicity level, and germination inhibition in foxtail millet seed

سرب Pb ( $\mu\text{M}$ )	پلی وینیل کلراید PVC (%)	شاخص تحمل ریشه Root tolerance index	سطح سمیت گیاهچه Seedling toxicity level	مهار جوانه‌زنی Germination inhibition
0	0	100 <sup>a</sup>	0 <sup>m</sup>	0 <sup>n</sup>
	1	97.5 <sup>a</sup>	5.89 <sup>lm</sup>	2.39 <sup>m</sup>
	2	96.7 <sup>ab</sup>	9.2 <sup>kl</sup>	3.12 <sup>lm</sup>
	4	95.5 <sup>ab</sup>	11.8 <sup>kl</sup>	4.22 <sup>lm</sup>
	6	90.6 <sup>a-c</sup>	13 <sup>k</sup>	4.72 <sup>l</sup>
250	0	79.5 <sup>de</sup>	31.1 <sup>hi</sup>	10.6 <sup>hi</sup>
	1	93 <sup>a-c</sup>	14.9 <sup>k</sup>	6.95 <sup>k</sup>
	2	91.1 <sup>a-c</sup>	24.3 <sup>j</sup>	8.42 <sup>jk</sup>
	4	88 <sup>b-d</sup>	25 <sup>ij</sup>	9.89 <sup>ij</sup>
	6	83.7 <sup>c-e</sup>	30.8 <sup>hi</sup>	10.5 <sup>hi</sup>
500	0	41.8 <sup>hi</sup>	58.1 <sup>de</sup>	15.7 <sup>cd</sup>
	1	74.4 <sup>ef</sup>	39.7 <sup>g</sup>	11.7 <sup>g-i</sup>
	2	67.5 <sup>fg</sup>	34.6 <sup>gh</sup>	12 <sup>f-h</sup>
	4	65.3 <sup>g</sup>	32.4 <sup>h</sup>	12.2 <sup>f-h</sup>
	6	60.2 <sup>g</sup>	24.5 <sup>j</sup>	12.4 <sup>f-h</sup>
750	0	28.3 <sup>j</sup>	71.6 <sup>c</sup>	18.3 <sup>b</sup>
	1	50.8 <sup>h</sup>	49.1 <sup>f</sup>	13.9 <sup>d-f</sup>
	2	46.2 <sup>hi</sup>	53.7 <sup>ef</sup>	13.7 <sup>ef</sup>
	4	39.6 <sup>i</sup>	60.3 <sup>d</sup>	13.5 <sup>e-g</sup>
	6	39.6 <sup>i</sup>	60.2 <sup>d</sup>	16.4 <sup>bc</sup>
1000	0	10.8 <sup>l</sup>	89.1 <sup>a</sup>	24.3 <sup>a</sup>
	1	23.4 <sup>kl</sup>	76.5 <sup>bc</sup>	15.3 <sup>c-e</sup>
	2	23.9 <sup>kl</sup>	76 <sup>bc</sup>	15.7 <sup>cd</sup>
	4	19.5 <sup>j-l</sup>	81.6 <sup>b</sup>	17.2 <sup>bc</sup>
	6	18.3 <sup>kl</sup>	80.4 <sup>b</sup>	17.9 <sup>b</sup>

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

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

پراکسید هیدروژن یک پاسخ کلی به شرایط تنش در گیاهان بوده و به‌عنوان معیار سمیت در گیاهچه شناخته می‌شود (Radić et al., 2010)، از سوی دیگر حضور ذرات میکروپلاستیک احتمال انتقال آلاینده‌های شیمیایی به بافت‌های گیاهی را افزایش می‌دهد که خطر بالقوه‌ای را به‌همراه دارد. علاوه بر این، میکروپلاستیک پلی وینیل کلراید حاوی الیگومرهای است که می‌توانند جوانه‌زنی بذر را مختل کرده و فرآیندهای فیزیولوژیکی جوانه‌زنی بذر را تحت تأثیر قرار دهند و حتی باعث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بیان‌گر معنی‌دار بودن اثر سرب، میکروپلاستیک و برهم کنش آن‌ها بر سطح سمیت گیاهچه در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). حضور میکروپلاستیک و افزایش غلظت سرب منجر به افزایش شاخص مورد بررسی شد. مطالعات Yang et al. (2010) نشان داده در بذرهای تحت تنش سرب، تولید پراکسید هیدروژن خارج سلولی افزایش معنی‌داری داشته است. این مسأله می‌تواند با افزایش سطح سمیت گیاهچه‌ها تأثیر نامطلوبی بر جوانه‌زنی بذر بگذارد. قابل ذکر است تولید

### نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که بذر ارزن دم‌روباهی قادر به جوانه‌زنی در شرایط سمیت سرب تا غلظت ۱۰۰۰ میکرومولار است، اما درصد جوانه‌زنی و شاخص تحمل ریشه به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این مسأله بیان‌گر تحمل بذر ارزن دم‌روباهی نسبت به تنش سرب است. حضور ذرات پلی‌وینیل کلراید در بستر کشت حاوی سرب تا حدودی منجر به بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و کاهش سطح سمیت سرب شد. به‌گونه‌ای که کاربرد میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید در غلظت ۱ درصد نسبت به ۶ درصد اثرات تعدیل‌کننده بیشتری برای تنش سرب بر جای گذاشت. در بالاترین غلظت سرب (۱۰۰۰ میکرومولار) حضور ۱ و ۶ درصد ذرات پلی‌وینیل کلراید به ترتیب شاخص مهار جوانه‌زنی را به میزان ۳۷ و ۲۶/۳ درصد کاهش داد و منجر به افزایش کارایی استفاده از ذخایر بذر به میزان ۲۲۹ و ۱۵۷ درصد شد. با وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی در رابطه با آلودگی میکروپلاستیک، نتایج نشان داد که حضور پلی‌وینیل کلراید در بستر کشت، حتی در غلظت‌های کم، می‌تواند تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذر در شرایط تنش‌زای سرب داشته باشد. این پژوهش اهمیت بررسی بیشتر در زمینه تعاملات پیچیده آلاینده‌های میکروپلاستیک و فلزات سنگین بر مراحل اولیه رشد و نمو گیاهان برجسته می‌کند تا بتوان به راهکارهای بهتری برای مدیریت آلودگی‌ها، موفقیت جوانه‌زنی و بهبود عملکرد گیاهان در چنین شرایطی دست یافت.

### 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 نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

### تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

مرگ برنامه‌ریزی شده سلول شود (Campanale et al., 2020). بیشترین سطح سمیت گیاهچه‌ها مربوط به غلظت ۱۰۰۰ میکرومولار سرب بود و کاربرد ذرات پلی‌وینیل کلراید منجر به تعدیل شرایط تنشی و کاهش سمیت سرب برای گیاهچه‌های ارزن دم‌روباهی شد. به‌گونه‌ای که کاربرد ۱ درصد پلی‌وینیل کلراید در تنش ۱۰۰۰ میکرومولار سرب، سطح سمیت برای گیاهچه‌ها را به میزان ۱۴/۱ درصد کاهش داد (جدول ۴). این نتایج ممکن است به دلیل جذب فلز سنگین توسط ذرات میکروپلاستیک و کاهش اثرات مخرب سرب بر رشد گیاهچه باشد (Wang et al., 2020b).

اثرات سرب، میکروپلاستیک و برهم‌کنش آن‌ها بر مهار جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). سمیت سرب منجر به مهار جوانه‌زنی بذرها شد، به‌طوری‌که با افزایش غلظت سرب درصد مهار جوانه‌زنی افزایش قابل‌توجهی داشت و بیشترین میزان شاخص مذکور در تیمار ۱۰۰۰ میکرومولار سرب مشاهده شد. این مسأله در گیاهانی مانند جو، برنج و ذرت نیز گزارش شده است (Sengar et al., 2007; Tomulescu et al., 2004). مهار جوانه‌زنی ممکن است نتیجه تداخل یون‌های سرب با آنزیم‌های مرتبط با هیدرولیز و انتقال ذخایر غذایی مانند پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌های مورد نیاز برای رشد و متابولیسم جنین باشد (Singh et al., 2011). همچنین استفاده از ذرات میکروپلاستیک نیز مهار جوانه‌زنی بذر را افزایش داد. احتمالاً ماهیت اسیدی میکروپلاستیک، اسیدیته محیط کشت را کاهش داده و ممکن است از این طریق جوانه‌زنی را مهار کند (Zaba & Jaafar, 2020). حضور ذرات میکروپلاستیک پلی‌وینیل کلراید در تنش سرب میزان مهار جوانه‌زنی بذر را نسبت به تنش سرب به‌تنهایی کاهش داد. در پژوهش حاضر، نتایج نشان داد که بالاترین سطح سمیت سرب (۱۰۰۰ میکرومولار) حتی با استفاده از بیشترین غلظت پلی‌وینیل کلراید (۶ درصد)، فرآیند جوانه‌زنی بذر را به میزان ۲۶/۳ درصد کاهش داده است (جدول ۴). بنابراین در تایید اظهارات (Mangal et al., 2020) می‌توان اظهار نمود که ذرات میکروپلاستیک می‌توانند در کاهش تنش ناشی از آلاینده‌های فلزی مؤثر باشند.

## References

- Amadou, I., Mahamadou, E., & Le, G. W. (2013).** Millets: Nutritional composition, some health benefits and processing: A review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(7), 501–508. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i7.12045>
- Araújo, A. S. F., & Monteiro, R. T. R. (2005).** Plant bioassays to assess toxicity of textile sludge compost. *Scientia Agricola*, 62(3), 286–290. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300013>
- Bareke, T. (2018).** Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(4), 336–346. <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00335>
- 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>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020).** A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), Article 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Cokkizgin, A., & Cokkizgin, H. (2010).** Effects of lead (PbCl<sub>2</sub>) stress on germination of lentil (*Lens culinaris* Medic.) lines. *African Journal of Biotechnology*, 9(50), 8608–8612. <https://doi.org/10.5897/AJB10.890>
- De Silva, Y. S. K., Rajagopalan, U. M., Kadono, H., & Li, D. (2022).** Effects of microplastics on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Chemosphere*, 303, Article 135162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135162>
- Dietz, K. J., & Herth, S. (2011).** Plant nanotoxicology. *Trends in Plant Science*, 16(11), 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.08.003>
- Dong, R., Liu, R., Xu, Y., Liu, W., Wang, L., Liang, X., Huang, Q., & Sun, Y. (2022a).** Single and joint toxicity of polymethyl methacrylate microplastics and As (V) on rapeseed (*Brassica campestris* L.). *Chemosphere*, 291, Article 133066. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133066>
- Dong, Y., Bao, Q., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z. (2022b).** A novel mechanism study of microplastic and As co-contamination on indica rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 421, Article 126694. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126694>
- Du, L., Wu, D., Yang, X., Xu, L., Tian, X., Li, Y., Huang, L., & Liu, Y. (2024).** Joint toxicity of cadmium (II) and microplastic leachates on wheat seed germination and seedling growth. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(5), Article 166. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01942-3>
- 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. *Annals of Botany*, 48(1), 93–96. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086103>
- Faheed, F. A. (2005).** Effect of lead stress on the growth and metabolism of *Eruca sativa* M. seedlings. *Acta Agronomica Hungarica*, 53(3), 319–327. <https://doi.org/10.1556/AAgr.53.2005.3.9>
- Farooqi, R. (2018).** The effects of lead and cadmium individually and in combinations on germination and seedling growth of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 43(1), 33–43.
- 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. *Science of The Total Environment*, 791, Article 148333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148333>
- Hajhashemi, S., Skalicky, M., Brestic, M., & Pavla, V. (2020).** Cross-talk between nitric oxide, hydrogen peroxide and calcium in salt-stressed *Chenopodium quinoa* Willd. at seed germination stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 657–664. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.022>
- Hu, K.-D., Hu, L.-Y., Li, Y.-H., Zhang, F.-Q., & Zhang, H. (2007).** Protective roles of nitric oxide on germination and antioxidant metabolism in wheat seeds under copper stress. *Plant Growth Regulation*, 53(3), 173–183. <https://doi.org/10.1007/s10725-007-9216-9>
- 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, Article 151487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151487>
- International Seed Testing Association. (1999).** *International rules for seed testing: Rules 1999*. International Seed Testing Association.
- International Seed Testing Association. (2005).** *International rules for seed testing*. International Seed Testing Association.

- Islam, E., Yang, X., Li, T., Liu, D., Jin, X., & Meng, F. (2007). Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 806–816. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.117>
- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., & Klobučar, G. (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, 250, 831–838. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055>
- Joshi, N., Menon, P., & Joshi, A. (2019). Effect of chromium on germination in some crops of India. *Journal of Agricultural Science and Botany*, 3(1), 1–5. <https://doi.org/10.35841/2591-7897.3.1.1-5>
- Kaur, M., Shen, C., Wang, L., & Xu, M. (2022). Exploration of single and co-toxic effects of polypropylene micro-plastics and cadmium on rice (*Oryza sativa* L.). *Nanomaterials*, 12(22), Article 3967. <https://doi.org/10.3390/nano12223967>
- Kumar, A., Kumar, A., M. M. S., C.-P., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A., & Yadav, K. K. (2020). Lead toxicity: Health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), Article 2179. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>
- Kumar, B., Smita, K., & Cumbal Flores, L. (2017). Plant mediated detoxification of mercury and lead. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2335–S2342. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.010>
- Li, B., Huang, S., Wang, H., Liu, M., Xue, S., Tang, D., Cheng, W., Fan, T., & Yang, X. (2021). Effects of plastic particles on germination and growth of soybean (*Glycine max*): A pot experiment under field conditions. *Environmental Pollution*, 272, Article 116418. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116418>
- Li, Z., Li, Q., Li, R., Zhao, Y., Geng, J., & Wang, G. (2020). Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30306–30314. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09349-0>
- Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., & Liu, W. (2020a). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 385, Article 121620. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620>
- Lian, J., Wu, J., Zeb, A., Zheng, S., Ma, T., Peng, F., Tang, J., & Liu, W. (2020b). Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution*, 263, Article 114498. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lin, Z., Hu, Y., Yuan, Y., Hu, B., & Wang, B. (2021). Comparative analysis of kinetics and mechanisms for Pb(II) sorption onto three kinds of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, Article 111451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111451>
- 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, Article 130102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130102>
- Majeed, A., Muhammad, Z., & Siyar, S. (2019). Assessment of heavy metal induced stress responses in pea (*Pisum sativum* L.). *Acta Ecologica Sinica*, 39(4), 284–288. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.12.002>
- Mangal, V., Nguyen, T. Q., Fiering, Q., & Guéguen, C. (2020). An untargeted metabolomic approach for the putative characterization of metabolites from *Scenedesmus obliquus* in response to cadmium stress. *Environmental Pollution*, 266, Article 115123. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115123>
- Martínez-Ballesta, M. C., Zapata, L., Chalbi, N., & Carvajal, M. (2016). Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of Nanobiotechnology*, 14(1), Article 42. <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4>
- Moreira, I. N., Martins, L. L., & Mourato, M. P. (2020). Effect of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn on seed germination and seedling growth of two lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.). *Plant Physiology Reports*, 25(2), 347–358. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00509-5>
- Murtaza, B., Naeem, F., Shahid, M., Abbas, G., Shah, N. S., Amjad, M., Bakhat, H. F., Imran, M., Niazi, N. K., & Murtaza, G. (2019). A multivariate analysis of physiological and antioxidant responses and health hazards of wheat under cadmium and lead stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 362–370. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3605-7>
- Pandey, N., & Sharma, C. P. (2002). Effect of heavy metals Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> on growth and metabolism of cabbage. *Plant Science*, 163(4), 753–758. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00210-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00210-8)

- Pant, S. R., Irigoyen, S., Doust, A. N., Scholthof, K. B., & Mandadi, K. K. (2016). *Setaria*: A food crop and translational research model for C<sub>4</sub> grasses. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1885. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01885>
- Patil, S., Bafana, A., Naoghare, P. K., Krishnamurthi, K., & Sivanesan, S. (2021). Environmental prevalence, fate, impacts, and mitigation of microplastics: A critical review on present understanding and future research scope. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(5), 4951–4974. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11700-4>
- Pignattelli, S., Broccoli, A., & Renzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Science of The Total Environment*, 727, Article 138609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609>
- Pirzadah, T. B., Malik, B., Tahir, I., Hakeem, K. R., Alharby, H. F., & Rehman, R. U. (2020). Lead toxicity alters the antioxidant defense machinery and modulates the biomarkers in Tartary buckwheat plants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 151, Article 104992. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104992>
- Radić, S., Babić, M., Škobić, D., Roje, V., & Pevalek-Kozlina, B. (2010). Ecotoxicological effects of aluminum and zinc on growth and antioxidants in *Lemna minor* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(3), 336–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.10.014>
- Rillig, M. C. (2018). Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6079–6080. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02338>
- Rillig, M. C., & Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*, 368(6498), 1430–1431. <https://doi.org/10.1126/science.abb5979>
- Saba, D., Manouchehri, N., Besançon, S., El Samad, O., Baydoun, R., Bou Khozam, R., Nafeh Kassir, L., Kassouf, A., Chebib, H., Ouaini, N., & Cambier, P. (2019). Bioaccessibility and radioisotopes of lead in soils around a fertilizer industry in Lebanon. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(6), 2749–2762. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00320-8>
- 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.). *Environmental Advances*, 11, Article 100349. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100349>
- 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. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(4), 1813–1831. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0005-8>
- Sengar, R. S., Gautam, M., Sengar, R. S., Garg, S. K., Sengar, K., & Chaudhary, R. (2008). Lead stress effects on physiobiochemical activities of higher plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 196, 73–93. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1_3)
- Sharma, N., & Niranjana, K. (2018). Foxtail millet: Properties, processing, health benefits, and uses. *Food Reviews International*, 34(4), 329–363. <https://doi.org/10.1080/87559129.2017.1290103>
- Shi, W., Cheng, J., Wen, X., Wang, J., Shi, G., Yao, J., Hou, L., Sun, Q., Xiang, P., Yuan, X., Dong, S., Guo, P., & Guo, J. (2018). Transcriptomic studies reveal a key metabolic pathway contributing to a well-maintained photosynthetic system under drought stress in foxtail millet (*Setaria italica* L.). *PeerJ*, 6, Article e4752. <https://doi.org/10.7717/peerj.4752>
- Singh, H. P., Kaur, G., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2011). Lead (Pb)-inhibited radicle emergence in *Brassica campestris* involves alterations in starch-metabolizing enzymes. *Biological Trace Element Research*, 144(1), 1295–1301. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9129-3>
- Soltani, A., Gholipour, M., & Zeinali, E. (2006). Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 55(1), 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.012>
- Suma, P. F., & Urooj, A. (2012). Antioxidant activity of extracts from foxtail millet (*Setaria italica*). *Journal of Food Science and Technology*, 49(4), 500–504. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0300-9>
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012).** Heavy metal toxicity and the environment. In A. Luch (Ed.), *Molecular, clinical and environmental toxicology: Volume 3: Environmental toxicology* (pp. 133–164). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
- Tomulescu, I. M., Radovicu, E. M., Merca, V. V., & Tuduce, A. D. (2004).** Effect of copper, zinc and lead and their combinations on the germination capacity of two cereals. *Acta Agraria Debreceniensis*, (15), 39–42. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/15/3355>
- Tuğ, G. N., & Yaprak, A. E. (2019).** An overview of the germination behavior of halophytes and their role in food security. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M. Öztürk (Eds.), *Ecophysiology, abiotic stress responses and utilization of halophytes* (pp. 39–61). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3762-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3762-8_3)
- Urbina, M. A., Correa, F., Aburto, F., & Ferrio, J. P. (2020).** Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize. *Science of the Total Environment*, 741, Article 140216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140216>
- Valivand, M., Amooaghaie, R., & Ahadi, A. (2019).** Seed priming with H<sub>2</sub>S and Ca<sup>2+</sup> trigger signal memory that induces cross-adaptation against nickel stress in zucchini seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 143, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.016>
- Wang, F., Feng, X., Liu, Y., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022).** Micro(nano)plastics and terrestrial plants: Up-to-date knowledge on uptake, translocation, and phytotoxicity. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, Article 106503. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106503>
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020a).** Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 254, Article 126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
- Wang, Q., Zhang, Y., Wangjin, X., Wang, Y., Meng, G., & Chen, Y. (2020b).** The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *Journal of Environmental Sciences*, 87, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.07.006>
- Wierzbicka, M., & Obidzińska, J. (1998).** The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species. *Plant Science*, 137(2), 155–171. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00138-1)
- Xing, W., Yang, H., Ippolito, J. A., Zhang, Y., Scheckel, K. G., & Li, L. (2020).** Lead source and bioaccessibility in windowsill dusts within a Pb smelting-affected area. *Environmental Pollution*, 266, Article 115110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115110>
- Yang, W., Cheng, P., Adams, C. A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., & Wang, F. (2021).** Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology and Biochemistry*, 155, Article 108179. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>
- Yang, Y., Wei, X., Lu, J., You, J., Wang, W., & Shi, R. (2010).** Lead-induced phytotoxicity mechanism involved in seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(8), 1982–1987. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.041>
- Zaaba, N. F., & Jaafar, M. (2020).** A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polymer Engineering & Science*, 60(9), 2061–2075. <https://doi.org/10.1002/pen.25511>
- Zhang, Q., Zhao, M., Meng, F., Xiao, Y., Dai, W., & Luan, Y. (2021).** Effect of polystyrene microplastics on rice seed germination and antioxidant enzyme activity. *Toxics*, 9(8), Article 179. <https://doi.org/10.3390/toxics9080179>
- Zhang, Y., Deng, B., & Li, Z. (2018).** Inhibition of NADPH oxidase increases defense enzyme activities and improves maize seed germination under Pb stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 158, 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.028>
- Zong, X., Zhang, J., Zhu, J., Zhang, L., Jiang, L., Yin, Y., & Guo, H. (2021).** Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, Article 112217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112217>