University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2024.7202.2264

Original article

Effect of salicylic acid application methods on seed germination and biochemical characteristics of quinoa seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) under cadmium stress

F. Mahmoudi[1], P. Sheikhzadeh[2*], N. Zare[3], B. Esmailpour[4]

1. *Ph.D Student of Seed Science and Technology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
3. *Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
4. *Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Received 24 January 2024; Accepted 23 June 2024

نسخه پیش از انتشار

Extended abstract

Introduction

Considering that heavy metals are one of the most important environmental stresses in today's agricultural ecosystems, which lead to a decrease in germination, seedling growth, and ultimately plant production. Therefore, it is recommended to use several compounds such as an addition to the culture medium or seed priming to increase the tolerance of plants to environmental stresses. Considering the role of salicylic acid in reducing the effects of heavy metal stress, including cadmium, on germination and seedling growth, this research was conducted to investigate the effect of salicylic acid application methods on seed germination and biochemical characteristics of quinoa seedlings under cadmium stress.

Materials and methods

To investigate the effect of salicylic acid application methods on seed germination and biochemical characteristics of quinoa seedlings under cadmium stress, a factorial experiment based on completely randomized design (CRD) was conducted with four replications at University of Mohaghegh Ardabili. The treatments included the application methods of salicylic acid (seed priming and adding to the culture medium) and cadmium stress at five levels (0, 50, 100, 150, and 200 mg l^{-1}). In this study, the measured traits include the germination percentage, germination rate, germination synchronicity index, mean daily germination (MDG), seedling length, and seedling dry weight, vigor index (VI), mean germination time (MGT), D50, the activity of catalase, peroxidase and polyphenol oxidase enzymes of quinoa seedlings were investigated. All tests were performed in 3 replications and the mean comparison was based Duncan's Multiple Range test at a 5% probability level. The statistical analysis was carried out using SAS 9.4 and Excel software.

* Corresponding author: Parisa Sheikhzade; E-Mail: sheikhzadehmp@gmail.com

© 2025, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results of this research showed that the germination percentage, germination rate, germination synchronicity index, mean daily germination, seedling length, seedling dry weight and, vigor index decreased, and the mean germination time, D50, the activity of catalase, peroxidase and, polyphenol oxidase enzymes increased with the increasing cadmium concentration. Among the salicylic acid application methods (priming and adding to the culture medium), seed priming method had a greater effect on improving the germination percentage, germination rate, germination simultaneity index, mean daily germination, seedling length, seedling dry weight, and increasing vigor index, activity of catalase, peroxidase and polyphenol oxidase enzymes. Also, the mean germination time and D50 were reduced by seed priming methoed. Under cadmium stress, Both methods salicylic acid application, there was a significant increase in the activity of antioxidant enzymes in seedlings. Under 200 mg l^{-1} of cadmium concentration, seed priming with salicylic acid caused an increase in the catalase activity (11.27%), peroxidase activity by 6.51 to 9.69%, and polyphenol oxidase activity by 68.39%.

Conclusion

Overall, the results of this study showed that with increasing cadmium stress concentrations, the traits of germination percentage, germination rate, seedling length, seedling dry weight, germination synchrony index, mean daily germination, and vigor index decreased, while the traits of mean germination time, time to 50% germination, and the activities of catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase enzymes increased. Cadmium stress causes ionic imbalance that stimulates the production of reactive oxygen species (ROS), which leads to disruption of cell membranes, osmotic regulation, and the production of secondary metabolites. Considering the negative effect of this stress on germination and growth of the obtained seedlings, among the application methods (priming and adding to the culture medium), seed priming had a greater effect on improving germination, seedling growth and increasing the quinoa seed vigor index, as well as increasing the activity of antioxidant enzymes compared to the method of adding salicylic acid to the planting medium. Priming of quinoa seeds with salicylic acid by shortening the necessary germination time causes primed seeds to germinate faster than control seeds under normal and cadmium-stressed conditions, and by reducing the mean germination time and D50, it reduces cadmium damage and protects the germination process against the toxicity of this heavy metal.

Keywords: Antioxidant enzymes, Germination, Heavy metals, Vigor index

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2024.7202.2264

مقاله پژوهشی

تأثیر روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) تحت تنش کادمیوم

فاطمه محمودی[1]، پریسا شیخ‌زاده[2]*، ناصر زارع[3]، بهروز اسماعیل‌پور[4]

۱. دانشجوی دکتری علوم و تکنولوژی بذر، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۴. استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان
جوانه‌زنی
شاخص قدرت بذر
فلزات سنگین

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۱/۰۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۴/۰۳

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر روش‌های مختلف کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا تحت تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه‌ی کاملاً تصادفی در چهار تکرار در دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. تیمارها شامل کاربرد اسید سالیسیلیک (پیش‌تیمار بذر و افزودن به بستر کاشت) و تنش کادمیوم در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شدت تنش کادمیوم، صفات درصد جوانه‌زنی، میانگین سرعت جوانه‌زنی، شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، طول و وزن خشک گیاهچه و شاخص قدرت بذر کاهش یافتند و میانگین مدت جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز افزایش یافتند. در بین روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک، پیش‌تیمار نمودن بذرها نسبت به روش اضافه کردن به بستر کاشت، صفات درصد جوانه‌زنی، میانگین سرعت جوانه‌زنی، شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، طول و وزن خشک گیاهچه و شاخص قدرت بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز را به‌طور معنی‌داری افزایش داد؛ اما میانگین مدت جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی را کاهش داد. پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک به هر دو روش در شرایط تنش کادمیوم، موجب افزایش معنی‌دار میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهچه‌ها گردید. در شرایط تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک فعالیت آنزیم کاتالاز را ۱۱/۲۷ درصد، فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۶/۵۱ تا ۹/۶۹ درصد و فعالیت آنزیم پل فنل اکسیداز را در حدود ۶۸/۳۹ درصد نسبت به روش اضافه کردن به بستر کشت افزایش داد. درمجموع، پیش-تیمار بذری اسید سالیسیلیک، در سطوح مختلف تنش کادمیوم از راه افزایش توان بذر و گیاهچه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بیشترین اثر مثبت را بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های کینوا داشت.

مقدمه

در سال‌های اخیر، آلودگی خاک به فلزات سنگین و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از آن به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است (Sheikhzadeh et al., 2021). در بین فلزات سنگین، کادمیوم (Cd) یکی از سمی‌ترین عناصر فلزی بوده که به دلیل حلالیت در آب به‌راحتی توسط پوسته بذر و ریشه گیاه جذب می‌شود و می‌تواند از جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه جلوگیری کند. کادمیوم سرعت جوانه‌زنی بذر را از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند اختلال در جذب آب توسط دانه‌ها محدود می‌کند که درنهایت دسترسی آب را برای رشد جنین کاهش می‌دهد (Anwar et al., 2021). بااین‌حال، تأمین آب تنها محدودیت برای مرحله جوانه‌زنی نیست، بلکه کادمیوم با مهار تحرک نشاسته در آندوسپرم باعث اختلال در

* نگارنده پاسخگو: پریسا شیخ‌زاده. پست الکترونیک: sheikhzadehmp@gmail.com

انتقال قندها به سمت محور جنینی در حال رشد شده که این موضوع درنهایت منجر به کمبود عناصر غذایی جنین در حال رشد می‌شود (Basahi, 2021). کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌ها تحت تنش کادمیوم در گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) (Mahmoudi et al., 2019; Sheikhzadeh et al., 2021)، سورگوم (*Sorghum bicolor*) (Jawad Hassan et al., 2020)، رازیانه (*Foeniculum vulgare*) (Zhao et al., 2021) و نخود (*Cicer arietinum*) (Singhal et al., 2022) گزارش شده است.

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاهی یک‌ساله از خانواده Amaranthaceae است. دانه کینوا به دلیل دارا بودن محتوای بالای پروتئین، ویتامین‌ها، مواد معدنی و عدم وجود گلوتن توسط فائو به‌عنوان یکی از محصولات کشاورزی برای امنیت غذایی در قرن آینده انتخاب شده است (Naik et al., 2020). اگرچه گیاه کینوا تحمل بالایی به تنش فلزات سنگین مانند کادمیوم داشته و در خاک‌های آلوده به کادمیوم رشد می‌کند (Iftikhar et al., 2021; Abdal et al., 2021)، اما تحت این شرایط میزان جوانه‌زنی بذر پایین بوده و رشد گیاهچه‌ها ضعیف است (Basahi, 2021).

ازآنجایی‌که یکی از عوامل کاهش‌دهنده جوانه‌زنی، سبز شدن و رشد گیاهچه‌ها در اکوسیستم‌های زراعی امروزی وجود مقادیر بالای کادمیوم در خاک‌های زراعی است (Anwar et al., 2021)، بنابراین استفاده از تکنیک‌هایی که بتواند موجب کاهش اثرات زیان‌بار تنش فلزات سنگین در مراحل مختلف رشدی گیاهان به‌ویژه در مرحله اولیه رشد باشد، از اهمیت بسیاری برخوردار است؛ زیرا بهبود قدرت بذر از طریق افزایش درصد جوانه‌زنی و تولید گیاهچه‌های قوی و طبیعی موجب می‌شود تا گیاهان بتوانند تنش‌های محیطی را بهتر تحمل کنند. از روش‌های به‌کاررفته برای افزایش تحمل به تنش‌های محیطی ازجمله تنش فلزات سنگین، پیش‌تیمار بذر (Priming) بوده که یک فناوری با هزینه کم و مفید برای بهبود قدرت و کیفیت بذر است (Finch-Savage and Footitt, 2017). درواقع پیش‌تیمار بذر از طریق افزایش فعالیت‌های متابولیکی قبل از جوانه‌زنی، موجب بهبود درصد و سرعت جوانه‌زنی و افزایش رشد گیاهچه‌ها می‌گردد (Ocvirk et al., 2021). کاهش اثرات منفی ناشی از تنش فلزات سنگین و بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها تحت این شرایط با استفاده از تکنیک پیش‌تیمار بذر در بسیاری از گیاهان گزارش شده است (Kiremit et al., 2023; Mahmoudi et al., 2019; Tajti et al., 2019). در بین روش‌های مورداستفاده در پیش‌تیمار بذر، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشدی (اسید سالیسیلیک) سبب افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی می‌شود. مطالعات متعدد در سال‌های اخیر نشان داده است که اسید سالیسیلیک که یک تنظیم‌کننده درون‌زای رشد گیاه است، به‌عنوان یک سیگنال در القای پاسخ ویژه گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش مهمی را ایفا می‌کند (Pruthvi Krishna et al., 2023). اسید سالیسیلیک از طریق افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش تنش اکسیداتیو می‌گردد (Kiremit et al., 2023). در شرایط وجود تنش فلزات سنگین، اسید سالیسیلیک همچنین موجب بهبود میزان جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های گندواش (Kumari et al., 2018)، گندم (Tajti et al., 2019)، برنج (Mostofa et al., 2019) می‌شود. اسید سالیسیلیک در مراحل مختلف رشدی گیاهان به‌صورت محلول‌پاشی روی بوته‌ها (Azadvari et al., 2020) و یا ترکیب با خاک مورداستفاده قرار می‌گیرد (Rahmanpour et al., 2021)؛ اما در مرحله بذری اسید سالیسیلیک را می‌توان به‌صورت اضافه کردن به بستر کاشت (Dris and Marashi, 2019) و به‌صورت تیمارهای پیش از کاشت بذر (Heidari et al., 2019) استفاده کرد. پیش‌تیمار بذر با اسید سالیسیلیک باعث افزایش درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در گاوزبان اروپایی (Mahmoudi et al., 2019)، گندم (Tania et al., 2021)، خشخاش (*Papaver somniferum*) (Hakimi et al., 2021)، مرزه (*Satureja hortensis*) (Tarigholizadeh et al., 2021) و لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata*) (El-Taher et al., 2022) شده است.

با توجه به اینکه فلزهای سنگین یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در اکوسیستم‌های زراعی امروزی به‌شمار می‌آیند که منجر به کاهش جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و درنهایت کاهش تولید گیاهان می‌شود؛ بنابراین استفاده از تیمارهای مختلف نظیر اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش تیمار بذری یا محلول‌پاشی برای افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی توصیه می‌شود. با توجه به نقش اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات تنش فلزات سنگین ازجمله کادمیوم روی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها، این پژوهش

نسخه پیش از انتشار

با هدف بررسی تأثیر روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا تحت تنش کادمیوم انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر، خصوصیات رشدی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا تحت تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه‌ی کاملاً تصادفی در چهار تکرار در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک (پیش‌تیمار بذر و افزودن به بستر کاشت) (Mahmoudi et al., 2023) و غلظت‌های کادمیوم در پنج سطح (صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. از کادمیوم کلراید ($CdCl_2 \frac{1}{2}H_2O$) (شرکت سازنده مرک آلمان) برای اعمال تیمارهای تنش کادمیوم استفاده شد. بذور کینوای مورداستفاده در این پژوهش واریته تی‌تی کاکا دارای ساپونین کم (درصد خلوص بذر ۹۹ درصد و قوه نامیه ۹۵ درصد با وزن هزار دانه ۲/۶ گرم) بود که از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد.

قبل از اعمال تیمارها، بذرهای کینوا با هیپوکلرید سدیم دو درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند و روی کاغذ دستمالی پهن شدند تا خشک شوند (Amiryousefi et al., 2021). سپس بذرها برای اعمال تیمار اسید سالیسیلیک کشت به‌صورت تصادفی به دو قسمت مساوی تقسیم شدند. یک قسمت از بذرها قبل از انجام آزمون جوانه‌زنی با اسید سالیسیلیک پیش‌تیمار شدند. برای پیش‌تیمار نمودن بذرهای کینوا با اسید سالیسیلیک، ابتدا بذرهای ضدعفونی شده در داخل محلول تهیه‌شده با غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به‌مدت ۱۲ ساعت نگهداری شده و پس از اتمام مدت‌زمان تعیین‌شده، بذور تا رسیدن به رطوبت اولیه در محیط آزمایشگاه خشکانده شدند.

برای انجام آزمون جوانه‌زنی بذر، چهار تکرار ۵۰ بذری به‌طور تصادفی از هر تیمار بذری (بذرهای پیش‌تیمار شده و بذرهای بدون پیش‌تیمار) جدا و به روش روی کاغذ (Top of paper) در پتری‌دیش‌ها (۹ سانتی‌متری) کشت شدند. در شرایط عدم پیش‌تیمار، مقدار ۳ میلی‌لیتر از محلول اسید سالیسیلیک با غلظت (۲/۵ میلی‌مولار) تهیه‌شده و به ظروف کشت اضافه شدند. برای بذرهای پیش‌تیمار شده نیز از آب مقطر به مقدار ۳ میلی‌لیتر استفاده گردید. سپس نمونه‌ها به ژرمیناتوری با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند. برای اعمال تنش کادمیوم به هر پتری‌دیش مقدار ۳ میلی‌لیتر محلول کادمیوم (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) اضافه گردید. جهت اعمال تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. سپس نمونه‌های تهیه‌شده به مدت ۱۰ روز در ژرمیناتوری با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. بذور جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت شمارش و یادداشت شدند. ظهور ریشه‌چه به‌اندازه ۲ میلی‌متر معیاری برای جوانه‌زنی بذرها در نظر گرفته شد (ISTA, 2017). در پایان آزمایش جوانه‌زنی (بعد از ۱۰ روز)، درصد جوانه‌زنی بذر محاسبه و طول و وزن خشک گیاهچه‌ها اندازه‌گیری شد. طول گیاهچه‌های نرمال توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد. جهت تعیین وزن خشک گیاهچه، گیاهچه‌های نرمال از هر تیمار و تکرار به‌صورت جداگانه در پاکت‌های کاغذی ریخته شده و در آونی با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا خشک شوند (ISTA, 2017).

همچنین صفات میانگین مدت جوانه‌زنی (Ellis and Roberts, 1981)، میانگین سرعت جوانه‌زنی (Salehzade et al., 2009)، متوسط جوانه‌زنی روزانه، شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی (Hunter et al., 1984)، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی (Yari et al., 2012) و شاخص قدرت بذر (ISTA, 2017) (جدول ۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. روابط محاسباتی برای سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، سرعت جوانه‌زنی روزانه، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی و شاخص قدرت بذر در جدول (۱) بیان شده است.

جهت اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی گیاهچه‌ها، نمونه‌هایی از گیاهچه‌های نرمال ۱۰ روزه به‌صورت تصادفی انتخاب و این نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری خصوصیات بیوشیمیایی و آنزیمی در فریزر با دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش چانگ و کوآ (Chang and Koa, 1988) استفاده شد. میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به روش ابی (Aebi, 1984) سنجش شد و آنزیم پراکسیداز با روش چانس و ماهلی (Chance and Maehly, 1955) بر پایه تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن و آنزیم گایاکول اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز توسط روش کار و میشرا (Kar and Mishra, 1955) اندازه‌گیری شد.

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱. روابط محاسباتی موردمطالعه در آزمایش

Table 1. Calculation relationships studied in the experiment

سرعت جوانه‌زنی Germination rate	$GR=\sum_{i=1}^{n} Si/Di$
سرعت جوانه‌زنی روزانه Daily Germination Speed	$DGS=\frac{1}{MDG}$
میانگین مدت جوانه‌زنی Mean Germination Time	$MGT=\frac{\sum D.\,n}{\sum n}$
متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean Daily Germination	$MDG=\frac{GP}{D}$
زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی D50	$D50=t_{i+}\left[\frac{\frac{N}{2}-ni}{nj-ni}\right]\times(tj-ti)$
شاخص قدرت بذر Vigor Index	$VI=GP\times SW$

Si: تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر شمارش، Di: تعداد روز تا شمارش n ام، n: دفعات شمارش، D: تعداد روزهای سپری‌شده از شروع آزمایش، n تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز، GP درصد جوانه‌زنی، SW: وزن خشک گیاهچه

Si: the number of germinated seeds per count, Di: the number of days until the nth count, n: counting times, D: the number of days since the beginning of the experiment, n number of germinated seeds per day, GP: germination percentage, SW: Seedling dry weight

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های حاصل، پس از اطمینان از نرمال بودن آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آماری (SAS) نسخه ۹,۴ انجام گرفت. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف ارزیابی شد. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همچنین برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، درصد جوانه‌زنی بذور تحت تأثیر اثر ساده تنش کادمیوم، روش‌های کاربرد و اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۲).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در هر دو روش کاربرد اسید سالیسیلیک، درصد جوانه‌زنی بذور کینوا با افزایش شدت تنش کادمیوم کاهش یافت به‌طوری‌که در هر دو روش کاربرد اسید سالیسیلیک، کمترین درصد جوانه‌زنی در تیمار کاربرد ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیوم مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار عدم کاربرد کادمیوم (شاهد) بود (شکل a۱). غلظت‌های اعمال‌شده کادمیوم از طریق جلوگیری از جذب و حرکت آب در محور جنینی باعث کاهش جوانه‌زنی و درنتیجه رشد گیاهچه می‌شود (Vijayaragavan et al., 2011). کاهش درصد جوانه‌زنی تحت تنش کادمیوم در بذور گاوزبان اروپایی (Sheikhzadeh et al., 2021) و پسته (Baroni et al., 2020) نیز گزارش شده بود که با یافته‌های این پژوهش مطابقت داشت.

با مقایسه دو روش کاربرد اسید سالیسیلیک می‌توان بیان نمود که در شرایط بدون تنش کادمیوم و شرایط وجود تنش کادمیوم در تمام سطوح تنش کادمیوم، در روش کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار بذر، درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا به‌طور معنی‌داری بیشتر از روش اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت بود. در شرایط بدون تنش کادمیوم، بیشترین درصد جوانه‌زنی (۱۰۰ درصد) در روش پیش‌تیمار بذر حاصل شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از روش اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت بود. در هر دو روش کاربرد اسید سالیسیلیک، بین درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا در تیمار شاهد (بدون تنش کادمیوم) و غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که این امر ناشی از اثر مثبت اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات منفی تنش کادمیوم در سطوح پایین‌تر تنش برای جوانه‌زنی است (شکل a۱). با توجه به نتایج حاصل می‌توان به این نتیجه رسید که کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار و اضافه کردن به بستر کاشت از طریق بهبود قدرت بذر در کینوا باعث افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها در شدت‌های کم تنش کادمیوم می‌شود (Fraszczak et al., 2024). افزایش شاخص‌های رشدی در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک در گیاه دارویی لرگ (*Pterocarya fraxinifolia*) نیز گزارش شده است (Torun et al., 2024) که با یافته‌های این پژوهش مطابقت داشت.

میانگین مدت جوانه‌زنی

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، میانگین مدت جوانه‌زنی تحت تأثیر اثر ساده تنش کادمیوم، روش کاربرد و اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲).

در تمام سطوح تنش کادمیوم، در روش کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار بذر میانگین مدت جوانه‌زنی بذرهای کینوا کمتر از روش اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت بود. به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش کادمیوم،

نسخه پیش از انتشار

روش پیش‌تیمار نمودن سبب شده تا میانگین مدت جوانه‌زنی بذرهای کینوا در حدود ۷/۵۸ درصد نسبت به روش افزودن به بستر کاشت کاهش داشته باشد (شکل b۱). با اعمال تنش کادمیوم کاهش سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش کادمیوم را می‌توان با کاهش فعالیت‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی مانند کاهش حرکت آب و ذخایر به سمت محور جنین توصیف کرد (Vijayaragavan et al., 2011). انوار و همکاران (Anwar et al., 2021) گزارش کردند که سمیت کادمیوم در جوانه زدن گیاهچه‌های سورگوم فعالیت آنزیم هیدرولیز را مختل می‌کند و تأثیر منفی بر انتقال محصولات هیدرولیز به سمت محور جنینی در حال رشد دارد و درنتیجه باعث افزایش میانگین مدت جوانه‌زنی می‌شود. محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2019) در مطالعه اثر کادمیوم بر مرحله جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های گاوزبان اروپایی گزارش کردند که تنش کادمیوم موجب کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی، شاخص قدرت، طول و وزن خشک گیاهچه و کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌شود.

جدول ۲. تجزیه واریانس خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های کینوا تحت تأثیر تیمارهای کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک

Table 2. Variance analysis of germination and growth characteristics of quinoa seedlings under the influence of cadmium treatments and salicylic acid application methods

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	میانگین مدت جوانه‌زنی Mean germination time	میانگین سرعت جوانه‌زنی Mean germination rate	شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی Germination synchrony index	زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی D_{50}
Cadmium stress (CS)	تنش کادمیوم	4	268.9 **	0.13 **	0.004 **	16.69 **	0.14 **
Salicylic acid Application methods (SA)	روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک	1	883.6 **	0.047 *	0.002 *	3.87 **	0.65 **
CS × SA	تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد	4	368.1 **	0.108 **	0.003 **	20.49 **	0.10 **
Error	خطای آزمایش	30	3.27	0.008	0.0004	0.20	0.002
CV(%)	ضریب تغییرات		*1.98*	*3.78*	*4.57*	*1.69*	*3.31*

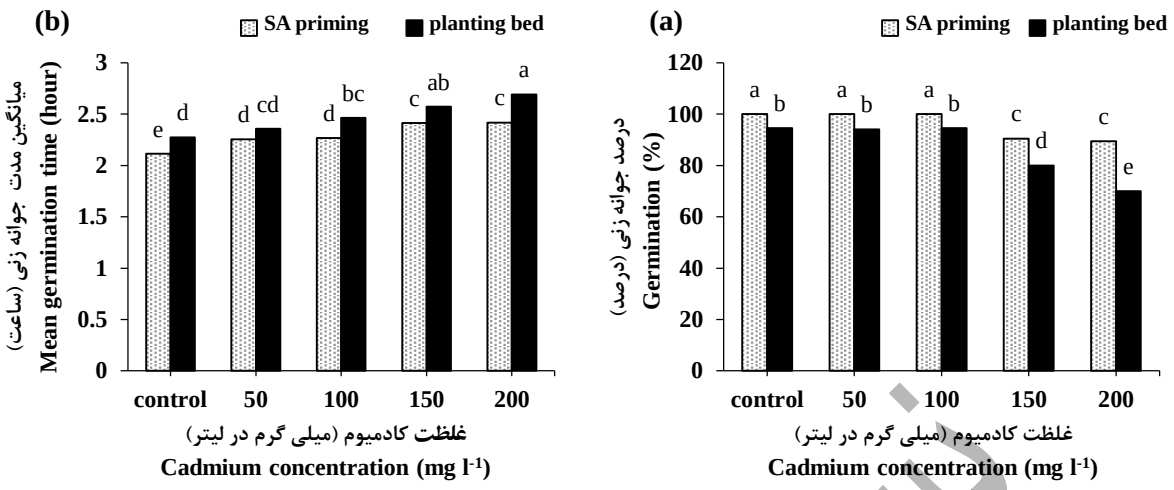
Table 2. Continued **جدول ۲. ادامه**

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	طول گیاهچه Seedling length	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	شاخص قدرت بذر Vigor index
Cadmium stress (CS)	تنش کادمیوم	4	1.37**	0.09 ns	0.001 *	169375**
Salicylic acid Application methods(SA)	روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک	1	4.52 **	0.64 **	0.011 **	51833.9 **
CS × SA	تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد	4	1.87 **	0.32 **	0.004 **	4447.1 **
Error	خطای آزمایش	30	0.017	0.029	2×10^{-4}	705.8
CV(%)	ضریب تغییرات		*2.01*	*8.87*	*8.39*	*6.11*

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

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

نسخه پیش از انتشار



شکل ۱. درصد جوانه‌زنی (a) و میانگین مدت جوانه‌زنی (b) بذرهای کینوا تحت تاثیر تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک
وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Fig. 1. Germination percentage (a) and mean germination time (b) of quinoa seeds under the influence of cadmium stress and salicylic acid application methods. The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، بین دو روش ازنظر میانگین مدت جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ اما با افزایش غلظت کادمیوم از ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بین دو روش پیش‌تیمار نمودن و افزودن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. به‌طوری‌که در این شرایط پیش‌تیمار نمودن بذرها سبب شد تا میانگین مدت جوانه‌زنی در حدود ۴/۴۴ تا ۱۱/۶ درصد نسبت به روش افزودن به بستر کاشت کاهش یابد (شکل b۱). درواقع میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی رابطه عکس با سرعت جوانه‌زنی و کیفیت توده بذری دارد، به‌طوری‌که هر چه سرعت جوانه‌زنی افزایش یابد مدت‌زمان لازم برای جوانه‌زدن بذر نیز کاهش پیدا می‌کند و درنتیجه کیفیت نمونه بذری بالا خواهد بود. کاربرد اسید سالیسیلیک از طریق افزایش فعالیت متابولیکی بذور تیمار شده باعث می‌شود که بذور پیش‌تیمار شده ازلحاظ مراحل جوانه‌زنی نسبت به بذور پیش‌تیمار نشده پیشرفته‌تر باشند (Mahmoudi et al., 2019). پژوهشی که برای تعیین بهترین مدت‌زمان پیش‌تیمار و بررسی اثر آن بر روی صفات مختلف رشدی در هنگام جوانه‌زنی بذر تربچه انجام گرفت نشان داد که مجموعه این فاکتورها موجب رشد سریع‌تر و استقرار بهتر گیاهچه‌های تربچه (*Raphanus sativus*) در شرایط تنش می‌شود (Farzaneh et al., 2013). این امکان وجود دارد که اسید سالیسیلیک از طریق سنتز اتیلن باعث افزایش درصد جوانه‌زنی و درنتیجه کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی می‌شود (Sharafizadeh, 2017).

میانگین سرعت جوانه‌زنی

مطابق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) میانگین سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت.

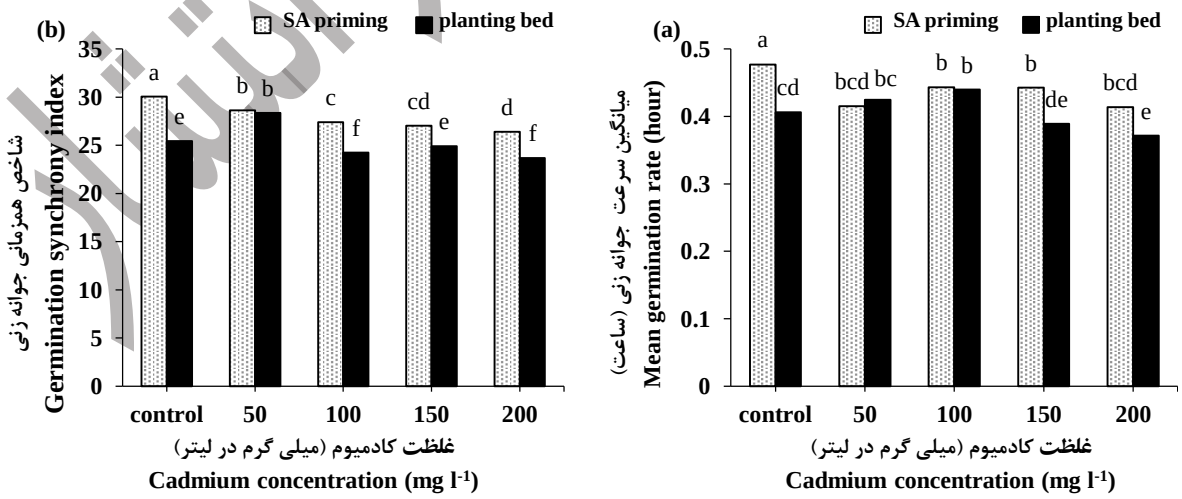
در شرایط بدون تنش کادمیوم، پیش‌تیمار کردن بذرهای کینوا با اسید سالیسیلیک سبب شد تا میانگین سرعت جوانه‌زنی بذور به‌طور معنی‌داری بیشتر از روش کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت افزودن به بستر کاشت گردد به‌طوری‌که این میزان افزایش در حدود ۱۹/۲۵ بود (شکل a۲). در شرایط تنش ملایم کادمیوم (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بین دو روش کاربرد اسید سالیسیلیک ازنظر میانگین سرعت جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. با افزایش غلظت کادمیوم از ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر، در روش پیش‌تیمار نمودن بذرهای کینوا با اسید سالیسیلیک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این امر بیان‌گر این مطلب است که افزایش غلظت کادمیوم از یک سطحی به بالا می‌تواند سبب کاهش جوانه‌زنی بذر شود. در شدت‌های بالاتر تنش کادمیوم (۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، میانگین سرعت جوانه‌زنی

بذرهای کینوای پیش‌تیمار شده به‌طور معنی‌داری بیشتر از میانگین سرعت جوانه‌زنی بذرهایی بوده که اسید سالیسیلیک به بستر کاشت اضافه شده بود. به‌طوری‌که میانگین سرعت جوانه‌زنی در غلظت‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم، در روش پیش‌تیمار نمودن به ترتیب در حدود ۱۵/۷۸ و ۱۰/۸۱ درصد بیشتر از روش اضافه کردن به بستر کشت بود (شکل a۲). افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های تجزیه‌کننده در بذور پیش‌تیمار شده با اسید سالیسیلیک در مقایسه با روش کاربرد اسید سالیسیلیک در بستر کاشت باعث افزایش میانگین سرعت جوانه‌زنی بذرهای کینوا می‌شود. به‌طوری‌که در روش پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک آنزیم‌های هیدرولیتی نسبت به روش کاربرد اسید سالیسیلیک در بستر کاشت زودتر فعالیت خودشان را آغاز می‌کنند و به همین دلیل سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی در این بذرهای کینوا می‌شود (Mahmoudi et al., 2019). تیمارهای آلی همانند اسید سالیسیلیک می‌توانند با افزایش و تنظیم فعالیت آنزیم-های آنتی‌اکسیدان و هیدرولیز کننده نشاسته در طی جوانه-زنی موجب افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر در شرایط متغیر محیطی شود (Coolbear, 2020). افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های تجزیه‌کننده در بذور پیش‌تیمار شده با اسید سالیسیلیک در مقایسه با روش کاربرد اسید سالیسیلیک در بستر کاشت باعث افزایش میانگین سرعت جوانه‌زنی بذرهای کینوا می‌شود به‌طوری‌که در روش پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک آنزیم‌های هیدرولیتی نسبت به روش کاربرد اسید سالیسیلیک در بستر کاشت زودتر فعالیت خودشان را آغاز می‌کنند و به همین دلیل سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی در این بذرهای کینوا می‌شود (Mahmoudi et al., 2019).

شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی

مطابق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) میانگین شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت.

در شرایط بدون تنش کادمیوم و غلظت‌های ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی بذرهای کینوای پیش‌تیمار شده با اسید سالیسیلیک به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی بذرهای کینوایی بود که اسید سالیسیلیک به بستر کشت اضافه شده بود. در شرایط تنش ملایم کادمیوم (غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بین روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک ازنظر آماری اختلافی وجود نداشت (شکل b۲).



شکل ۲. سرعت جوانه‌زنی (a) و شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی (b) بذرهای کینوا تحت تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک
وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 2. Germination rate (a) and germination synchronicity index (b) of quinoa seeds under cadmium stress and salicylic acid application methods. The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

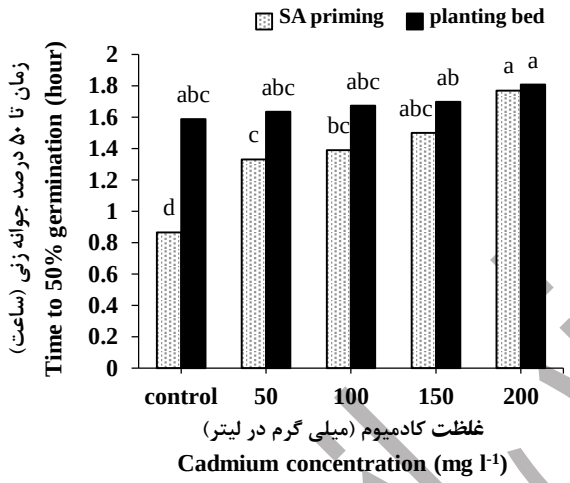
نسخه پیش از انتشار

بین تیمارهای موردمطالعه، کمترین شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی در تیمار اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت در شرایط وجود غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تنش کادمیوم ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نداشت. بیشترین شاخص هم‌زمانی جوانه-زنی در شرایط بدون تنش کادمیوم در روش پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که حدود ۲۲/۹۱ درصد بیشتر از روش اضافه کردن به بستر کشت بود (شکل b۲). به نظر می‌رسد پیش‌تیمار بذرهای کینوا با اسید سالیسیلیک با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتی، فرایند جوانه‌زنی را از طریق افزایش میانگین سرعت جوانه‌زنی (شکل b۲) و یکنواختی در جوانه‌زنی، بهبود بخشیده و باعث بهبود شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی (به‌واسطه تجزیه سریع‌تر مواد ذخیره‌ای) گردید. پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک از طریق افزایش آنزیم-های آنتی‌اکسیدان مانند گلوتاتیون و آسکوربات، باعث کاهش پراکسیداسیون لیپیدی در مرحله‌ی جوانه‌زنی شدند که درنتیجه افزایش شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی در بذور را در پی داشت (Sharafizadeh, 2017).

زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی

جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. تنش کادمیوم، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی را افزایش داد به‌طوری‌که کمترین زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی در شرایط عدم تنش کادمیوم، در روش پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که ۴۵/۵۶ درصد کمتر از روش اضافه کردن به بستر کشت بود، مشاهده شد (شکل ۳). قادری و علیلو (Ghaderi and Aliloo, 2023) کاهش زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی در تیمار با اسید سالیسیلیک در گیاه کلزا گزارش کردند. محققین اثرات مثبت پیش‌تیمار را بر جوانه‌زنی گیاهان مختلف موردبررسی قراردادند که این روش‌های تیماری در افزایش شاخص‌های جوانه‌زنی مؤثر هستند (Murungu et al., 2003). جوانه‌زنی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل رشدی محصولات زراعی است یکنواختی و درصد سبز شدن بذر می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد و کیفیت محصول داشته باشد (Najafi et al., 2015).

با توجه به نتایج این پژوهش، چنین استنباط می‌شود که پیش‌تیمار نمودن بذور با اسید سالیسیلیک در مقایسه با روش کاربرد اسید سالیسیلیک در بستر کاشت، از طریق کوتاه شدن متوسط زمان جوانه‌زنی (شکل a۱) و افزایش میانگین سرعت جوانه‌زنی (شکل a۲) منجر به کاهش زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی گردید. در حقیقت دلیل بهبود زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی با پیش‌تیمار نمودن بذرها این است که بذرهای کینوا قبل از قرار گرفتن در بستر خود مراحل اولیه جوانه‌زنی را سپری می‌کنند (Ghaderi and Aliloo, 2023; Mahmoudi et al., 2023).



شکل ۳. زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک. وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 3. Time to 50% germination of quinoa seeds under cadmium stress and methods of salicylic acid application The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

متوسط جوانه‌زنی روزانه

متوسط جوانه‌زنی روزانه تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم، روش کاربرد و اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲). کمترین متوسط جوانه‌زنی روزانه در تنش کادمیوم ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۴).

بیشترین متوسط جوانه‌زنی روزانه در شرایط عدم تنش کادمیوم و تنش ۵۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که در شرایط عدم تنش کادمیوم اختلاف معنی‌داری ازنظر روش کاربرد اسید سالیسیلیک وجود نداشت (شکل a۴). در تمام

سطوح تنش کادمیوم (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک ۲۴/۳۹ تا ۲۷/۱۱ درصد متوسط جوانه‌زنی روزانه را نسبت به تیمار بستر کشت افزایش داد (شکل a۴). پیش‌تیمار سبب تغییرات زیستی و فیزیولوژیکی زیادی در بذر و همچنین گیاه حاصل از آن می‌گردد، به‌طوری‌که نتیجه این عمل در جوانه‌زنی، استقرار اولیه گیاه، زودرسی و افزایش کمی و کیفی محصول قابل‌مشاهده است. مرحله جوانه‌زنی بذر جهت تعیین تراکم نهایی بوته در واحد سطح اهمیت زیادی دارد و تراکم کافی بوته در واحد سطح هنگامی حاصل می‌شود که بذرهای کشت‌شده به‌طور کامل و با سرعت کافی جوانه بزنند (Najafi et al., 2015). گزارش‌های رحمان و همکاران (Rehman et al., 2019) حاکی از آن است که خیساندن بذر کدو (Cucurbita) نیز باعث افزایش درصد جوانه‌زنی بذر، کاهش متوسط مدت جوانه‌زنی شد و همچنین پیری بذر را کاهش داد. به نظر می‌رسد پیش‌تیمار نمودن بذرها با اسید سالیسیلیک منجر به افزایش سرعت جوانه‌زنی (شکل a۲) شده که همین امر منجر به افزایش متوسط جوانه‌زنی روزانه می‌شود.

شاخص قدرت بذر

همچنین شاخص قدرت بذر تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. (جدول ۲).

مقایسه میانگین اثر روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص قدرت بذر نشان داد که در تمام سطوح تنش کادمیوم پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک شاخص قدرت بذر را ۲۸/۹۰ تا ۶۶/۹۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل b۴). تنش کادمیوم موجب کاهش شاخص قدرت بذر شد به‌طوری‌که کمترین شاخص قدرت بذر در شرایط تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت اما در همین شرایط کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار نسبت به روش اضافه کردن به بستر کشت ۸۸/۰۲ درصد شاخص قدرت بذر را نسبت به شاهد افزایش داد. (شکل b۴). سانتوس و همکاران (Santos et al., 2021) در بررسی خود گزارش کردند که کادمیوم، درصد جوانه‌زنی و میانگین زمان جوانه‌زنی را در گیاه پنبه کاهش داد که با نتایج نایم و همکاران (Naeem et al., 2021) روی گیاه کینوا مطابقت داشت. بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که تحت تنش کادمیوم کاهش قابل‌توجهی در رشد گیاهان وجود دارد (Rehman et al., 2019). به‌طور مشابه، امجد و همکاران (Amjad et al., 2022) دریافتند که رشد گیاه کینوا با افزایش سطح کادمیوم خاک از ۳۰ به ۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از کادمیوم در رشد کینوا به ناهنجاری‌های متعددی مانند جذب محدود مواد مغذی، سمیت یون کادمیوم، محدودیت روابط آبی گیاهی، فرآیند فتوسنتزی و فعالیت‌های آنزیمی نسبت داده می‌شود (Abdal et al., 2021; Rehman et al., 2019).

اما در همین شرایط کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار نسبت به روش اضافه کردن به بستر کشت ۸۸/۰۲ درصد شاخص قدرت بذر را افزایش داد. (شکل b۴). مقایسه میانگین اثر روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر شاخص قدرت بذر نشان داد که در تمام سطوح تنش کادمیوم پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک شاخص قدرت بذر را ۲۸/۹۰ تا ۶۶/۹۲ درصد افزایش داد (شکل b۴). اسیدسالیسلیک از طریق فعال کردن آنزیم‌های آلفا آمیلاز و بتا آمیلاز متابولیک لازم برای جوانه‌زنی و سنتز RNA ریبوزومی و DNA میتوکندری، سبب افزایش جوانه‌زنی و درنتیجه افزایش ویگور بذر می‌شود (Sharifzadeh, 2017).

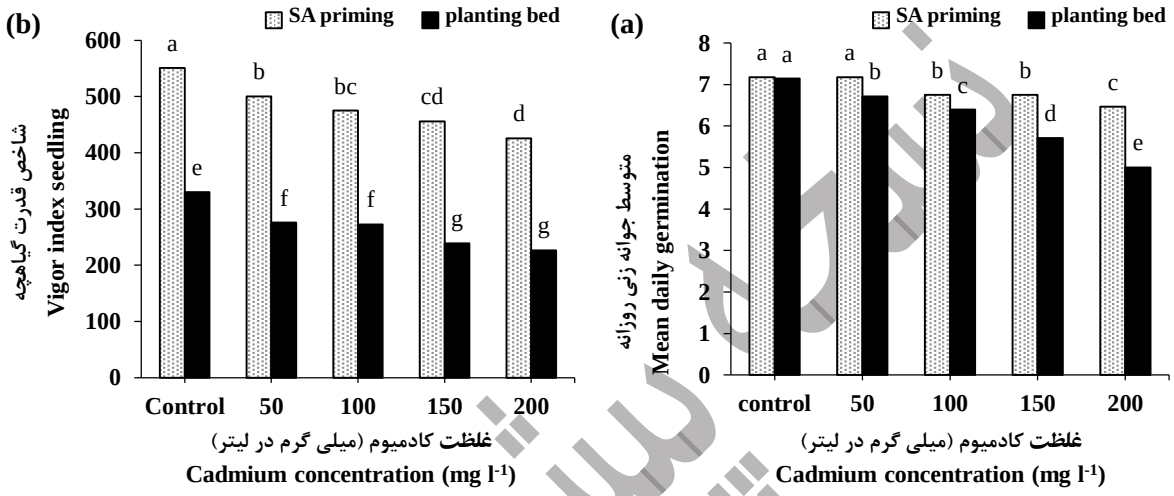
طول گیاهچه

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس طول گیاهچه تحت تأثیر اثرات ساده روش کاربرد و اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت اما اثر ساده تنش کادمیوم بر این شاخص معنی‌دار نشد (جدول ۲).

تنش کادمیوم (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در روش پیش‌تیمار و بستر کشت به ترتیب به‌طور معنی‌داری باعث کاهش طول گیاهچه در حدود ۲۴/۵۹ و ۳۱/۱۳ درصد در تیمار شاهد شد. بیشترین طول گیاهچه در روش پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک در تیمار شاهد مشاهده شد به‌طوری‌که کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار طول گیاهچه را ۶۶/۷۶ درصد نسبت به اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت افزایش داد (شکل a۵). رهویی و همکاران (Rahoui et al., 2010) گزارش کردند که در معرض تنش کادمیوم، جوانه‌زنی بذر نخود و باقلا به دلیل آسیب غشاء و نشت الکترولیت‌ها از سلول با تأخیر صورت می‌گیرد. این موضوع نشان می‌دهد که حساسیت پارامترهای رشد به تنش کادمیوم با گونه‌ها،

نسخه پیش از انتشار

ژنوتیپ‌ها و ارقام متفاوت است. جوادحسن و همکاران (Jawad Hassan et al., 2020) در سورگوم و زاو و همکاران (Zhao et al., 2021) در رازیانه و سینگال و همکاران (Singhal et al., 2022) در نخود، به این نتیجه رسیدند که در همه سطوح تنش کادمیوم، کاهش جوانه‌زنی و پارامترهای رشد مانند طول ریشه‌چه و ساقه‌چه رخ می‌دهد؛ بنابراین این نتیجه نشان می‌دهد که طول گیاهچه درجاتی از تحمل به تیمارهای کادمیوم را نشان می‌دهد. اسید سالیسیلیک احتمالاً از طریق افزایش تقسیم سلولی در مریستم انتهایی (شکل a۱) باعث افزایش طول گیاهچه شد که با نتایج شرفی‌زاده (Sharafizadeh, 2017) در گیاه جو مطابقت دارد.

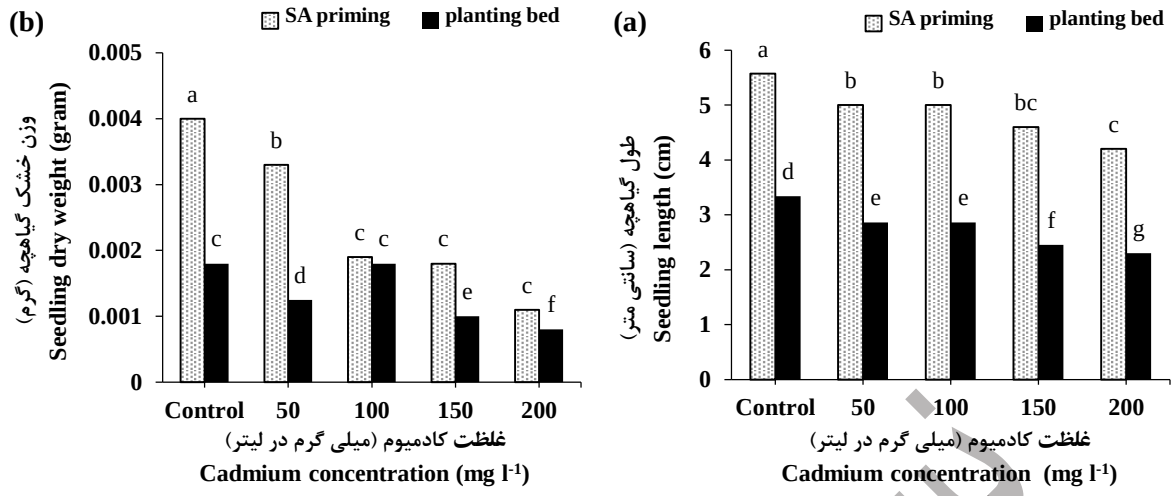


شکل ۴. متوسط جوانه‌زنی روزانه (a) و شاخص قدرت (b) بذرهای کینوا تحت تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک. وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 4. Mean daily germination (a) and vigor index (b) of quinoa seeds under cadmium stress and salicylic acid application methods. The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

وزن خشک گیاهچه

وزن خشک گیاهچه بذر تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). در شرایط عدم تنش کادمیوم کاربرد اسید سالیسیلیک به‌صورت پیش‌تیمار وزن خشک گیاهچه را ۲۲/۲۲ درصد نسبت به تیمار بستر کشت افزایش داد (شکل b۵). از طرفی اعمال پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک وزن خشک گیاهچه را افزایش داد به‌طوری‌که کمترین وزن خشک گیاهچه در تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در روش بستر کشت مشاهده شد که حدود ۱۷/۵ درصد کمتر از روش پیش-تیمار اسید سالیسیلیک بود (شکل b۵). قرار گرفتن در معرض تنش کادمیوم سرعت جوانه‌زنی بذر و صفات رشد اولیه گیاهچه ازجمله وزن خشک گیاه را نسبت به شاهد کاهش داد. نتایج نشان داد که وزن خشک گیاهچه در بالاترین سطوح کادمیوم (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) ۷۲/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل b۵). رهویی و همکاران (Rahoui et al., 2010) تأخیر در جوانه‌زنی را زمانی که بذر نخود و باقلا به دلیل آسیب غشاء و نشت املاح آلوده به کادمیوم شدند گزارش کردند. بیشترین میزان وزن خشک گیاهچه در روش پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. اسیدسالیسیک از طریق افزایش هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد ازجمله اکسین و سیتوکینین باعث افزایش وزن خشک گیاهچه می‌شود (Ahmadpoor Dehkordi et al., 2018) که با نتایج کبیری و نقی‌زاده (Kabiri and Naghizadeh, 2014) در گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa*) مطابقت دارد.



شکل ۵. میانگین طول گیاهچه (a) و وزن خشک گیاهچه (b) بذرهای کینوا تحت تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک. وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 5. Average seedling length (a) and seedling dry weight (b) of quinoa seeds under cadmium stress and salicylic acid application methods. The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

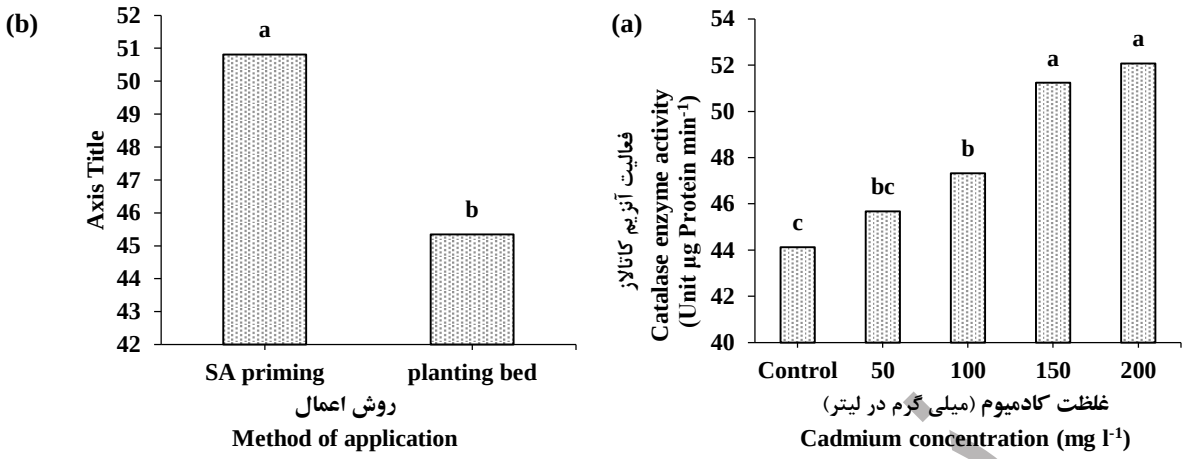
فعالیت آنزیم کاتالاز

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و روش کاربرد قرار گرفت اما اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر این صفت معنی‌دار نشد. با افزایش تنش کادمیوم فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت و ۱۸/۰۱ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (شکل a۶). کادمیوم حتی در غلظت‌های بسیار کم بسیار سمی است، بنابراین جذب کادمیوم توسط گیاهان بر رشد و فعالیت‌های متابولیکی طبیعی آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Zhang et al., 2020). یکی از اثرات غیرمستقیم گیاهان در مواجهه با تنش کادمیوم، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است (Bamagoos et al., 2022). رادیکال‌های ROS اصلی که برای گیاهان مضر هستند عبارت‌اند از سوپر اکسید (O^{2-})، اکسیژن منفرد (O_2)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و هیدروکسیل (HO) (Shahid et al., 2019). این ROSها اثرات نامطلوبی بر روی ماکرو مولکول‌ها مانند لیپیدها، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای نوکلئیک دارند. تولید بیش‌ازحد ROS، به‌عنوان‌مثال، H_2O_2، باعث پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش پایداری غشای سلولی خواهد شد. مشابه این یافته‌ها، افزایش فعال‌سازی آنزیم کاتالاز در تنش زیر فلزات گیاهان کینوا به‌خوبی ثبت شده است (Iftikhar et al., 2021 Abdal et al., 2021;). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز با نتایج پای و شارما (Pai and Sharma et al., 2023) در برنج مطابقت داشت. کمترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار بستر کشت مشاهده شد که حدود ۱۲/۰۳ درصد کمتر از روش پیش‌تیمار اسید سالیسیلیک بود (شکل b۶).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش کادمیوم و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک قرار گرفت. (جدول ۳). مطابق شکل ۷، بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز به ترتیب در شرایط تنش شدید کادمیوم (۲۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم) و تیمار شاهد به دست آمد. همچنین در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم، روش پیش‌تیمار دارای بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز بود (شکل ۷). به عبارتی در شرایط تنش ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، روش پیش‌تیمار نمودن بذر سبب شد تا فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۱/۲۷ تا ۱۴/۷۰ درصد نسبت به تیمار شاهد و ۶/۵۱ تا ۹/۶۹ درصد نسبت به روش اضافه کردن به بستر کشت افزایش یابد (شکل ۷). همچنین تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری با تنش کادمیوم

نسخه پیش از انتشار



شکل ۶. فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر تنش کادمیوم (a) و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک (b). وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Fig. 6. Activity of catalase enzyme under the influence of cadmium (a) and stress salicylic acid application methods (b) The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

جدول ۳. تجزیه واریانس میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاهچه‌های کینوا تحت تأثیر کادمیوم و روش کاربرد اسید سالیسیلیک

Table 3. Variance analysis of antioxidant enzyme activity of quinoa seedlings under the influence of cadmium and salicylic acid application method

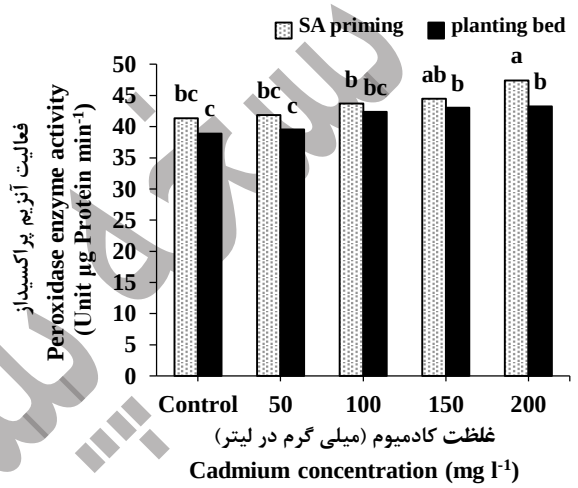
S.O.V	منابع تغییر	df	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme activity	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidase enzyme activity	فعالیت آنزیم پلی‌فنول‌اکسیداز Polyphenoloxidase enzyme activity
Cadmium stress (CS)	تنش کادمیوم	4	95.87 **	36.17 **	0.24 *
Salicylic acid Application methods(SA)	روش‌های کاربرد اسیدسالسیلیک	1	298.33 **	0.11 ns	50.14 **
CS × SA	تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد	4	2.21 ns	16.56 *	0.01 ns
Error	خطای آزمایش	30	3.90	4.47	0.06
CV(%)	ضریب تغییرات		4.10	4.96	7.33

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

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

(۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم) نداشت. امجد و همکاران (Amjad et al., 2022) دریافتند که سطوح کادمیوم خاک بالاتر از ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث تنش اکسیداتیو شدید در کینوا شد. همچنین افزایش سطوح Cd از ۵۰ به ۲۰۰ میکرومولار باعث تنش اکسیداتیو شدید شد (Abdal et al., 2021). در میان ROSهای مختلف، H_2O_2 به‌عنوان مهم‌ترین ROS در نظر گرفته می‌شود، زیرا تمایل به تبدیل‌شدن به ROS سمی‌تر را دارد (Shahid et al., 2019). بسیاری از محققان مشاهده کرده‌اند که تنش کادمیوم باعث استرس اکسیداتیو در گیاهانی غیر از کینوا نیز می‌شود (Shahid et al., 2019 Rehman et al., 2019;). فعال شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت ممکن است به دلیل توانایی آن در تبدیل رادیکال‌های سوپر اکسید به H_2O_2 باشد (Rehman et al, 2019)؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که هر دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز نقش مهمی در سم‌زدایی H_2O_2 و آسیب سلولی حاصل در گیاهان تحت تنش کادمیوم دارند (Abdal et al.,

2021; Iftikhar et al., 2021). مطالعه حاضر نشان داد که تحت تنش کادمیوم فعالیت هر دو این آنزیم افزایش یافته است. افزایش‌های مشابهی در فعالیت این آنزیم‌ها نیز تحت تنش کادمیوم هم در آزمایش‌های خاک و هم در کشت هیدروپونیک در کینوا (Abdal et al., 2021; Amjad et al., 2022; Iftikhar et al., 2021) و همچنین گیاهان دیگر مشاهده شد (Rehman et al., 2019; Shahid et al., 2019).



شکل ۷. فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های کینوا تحت تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک

وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 7. Activity of peroxidase enzyme activity of quinoa seedlings under cadmium stress and salicylic acid application methods

The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level

افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار با اسید سالیسیلیک توسط پای و شارما (Pai and Sharma et al., 2023) در برنج گزارش شده است. افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار با اسید سالیسیلیک در ذرت گزارش شده است (Pruthvi Krishna et al., 2023). افزایش فعالیت بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، SOD، APX و CAT توسط اسید سالیسیلیک نیز نشان داده شده است (Jini and Joseph, 2017). افزایش سطح بیان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در تیمارهای بذری توسط اسید سالیسیلیک گزارش شده است (Tayyab et al., 2020).

آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز

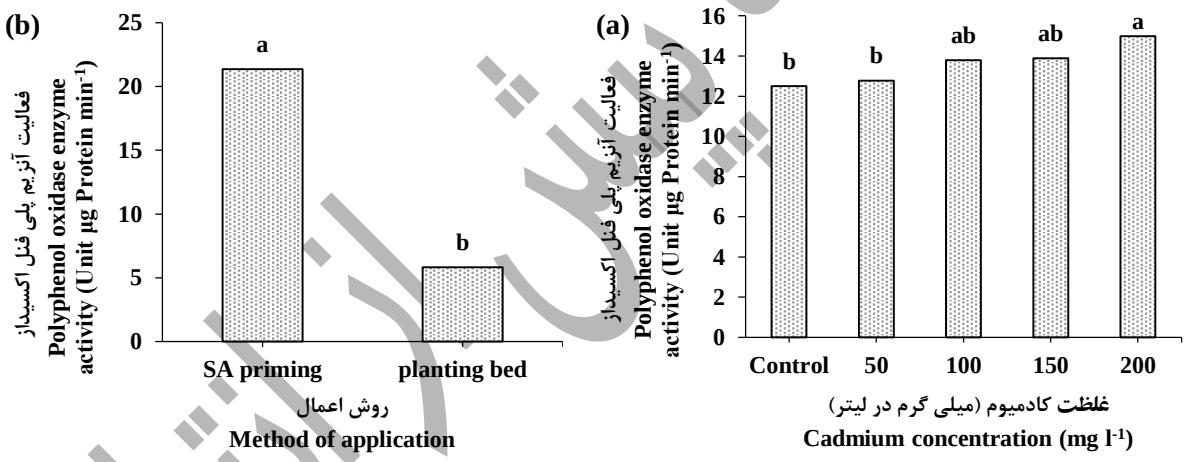
تأثیر تنش کادمیوم و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز معنی‌دار بود؛ اما اثر متقابل تنش کادمیوم × روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۳).

با افزایش تنش کادمیوم فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز افزایش یافت. بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم پلی-فنل‌اکسیداز به ترتیب در تیمار ۲۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و تیمار شاهد مشاهده شد به‌طوری‌که تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز را در حدود ۱۹/۹۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل a۸). سمیت H_2O_2 زمانی که به اکسیژن مولکولی و آب تبدیل می‌شود کاهش می‌یابد. این مرحله مهم در سم‌زدایی از H2O2 از طریق بیان بیش‌ازحد کاتالاز و پراکسیداز به دست می‌آید (Amjad et al., 2022 Shahid et al., 2019;). تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم و آسیب غشا در بسیاری از گیاهان مشاهده شده است (H_2O_2 Kaya, 2021). بیشتر توسط پراکسیداز (POD) و کاتالاز (CAT) به اکسیژن و آب تبدیل می‌شود (Guedes et al., 2021). نتایج مطالعه الهربی و همکاران (Alharby et al., 2022) نشان می‌دهد که فعالیت‌های CAT، APX و POD روند افزایشی ناشی از افزایش سمیت کادمیوم را نشان می‌دهد. روش پیش‌تیمار میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز را در حدود ۶۷/۱۸ درصد نسبت به تیمار بستر کشت افزایش داد (شکل b۸). پیش-تیمار نمودن بذور کینوا با اسید سالیسیلیک موجب شد تا فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز افزایش یابد که با نتایج کان و همکاران (Kwon et al., 2023) در گیاه مریم‌گلی مطابقت داشت. پای و شارما (Pai and Sharma et al., 2023) در برنج افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز تحت تنش گزارش کردند. تیمار اسید سالیسیلیک باعث افزایش فعال شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Brahimova et al., 2021).

نتیجه‌گیری نهایی

درمجموع نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شدت تنش کادمیوم، صفات درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص هم‌زمانی جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه و شاخص قدرت بذر، کاهش یافت درحالی‌که صفات میانگین

مدت جوانه‌زنی، زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز افزایش یافت. تنش کادمیوم باعث عدم تعادل یونی می‌شود که باعث تحریک تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) می‌شود که منجر به اختلال در غشای سلولی، تنظیم اسمزی و تولید متابولیت‌های ثانویه می‌شود. با توجه به تأثیر منفی این تنش بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های به‌دست‌آمده، در بین روش‌های کاربرد (پیش‌تیمار و بستر کشت اسید سالیسیلیک)، پیش‌تیمار نمودن بذرها تأثیر بیشتری در بهبود جوانه‌زنی، رشد گیاهچه‌های و افزایش شاخص قدرت بذر کینوا و همچنین افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت به روش اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت داشته است. پیش‌تیمار نمودن بذرهای کینوا با اسید سالیسیلیک از طریق کوتاه کردن مدت‌زمان لازم جوانه‌زنی سبب می‌شود تا در شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم بذرهای پیش‌تیمار شده نسبت به بذرهای شاهد سریع‌تر جوانه‌زده و با کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی و زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی از طریق افزایش سرعت جذب آب، ترمیم و آماده‌سازی ساختار و آنزیم‌های بذر و تضعیف پوسته بذری از آسیب‌های کادمیوم کاسته و فرآیند جوانه‌زنی را در برابر سمیت این فلز سنگین محافظت کند. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان طی جوانه‌زنی باعث بهبود شرایط جوانه‌زنی و رشد اولیه می‌شود. به عبارتی انجام پیش‌تیمار بذر با اسید سالیسیلیک در مقایسه با اضافه کردن به بستر کشت در سطوح مختلف تنش کادمیوم از راه افزایش توان بذر و گیاهچه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از تأثیر منفی تنش کادمیوم می‌کاهد و موجب بهبود ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها می‌شود.



شکل ۸. فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز تحت تأثیر تنش کادمیوم (a) و روش‌های کاربرد اسید سالیسیلیک (b). وجود حداقل یک حرف آماری مشترک، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 8. Activity of polyphenol oxidase enzyme under the influence of cadmium (a) and stress salicylic acid application methods (b). The presence of at least one common statistical letter indicates no significant difference based on Duncan's test at the 5% probability level.

منابع

Abdal, N., Abbas, G., Asad, S.A., Ghfar, A.A., Shah, G.M., Rizwan, M., Ali, S., Shahbaz, M., 2021. Salinity mitigates cadmi-um-induced phytotoxicity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) by limiting the Cd uptake and improved responses to ox-idative stress: Implications for phytoremediation. Environmental Geochemistry and Health. 45, 171-185. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01082-y

Aebi, H., 1984. Catalase in vitro. Methods in Enzymology. 105, 121-126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3

Ahmadpoor Dehkordi, E., Danesh Shahraki, A., Khosravi Lamjiri, P., 2018. Effect of seed priming with salicylic acid on seed germination and seedling growth of *Hibiscus sabdariffa* under drought stress. Iranian Journal of Seed Sciences and Research, 5, 1-11. https://doi.org/10.22124/jms.2018.2941

Alharby, H.F., Al-Zahrani, H.S., Abbas, G., 2022. Potassium and silicon synergistically increase cadmium and lead tolerance and phytostabilization by quinoa through modulation of physiological and biochemical attributes. toxics. 10, 169. https://doi.org/10.3390/toxics10040169

Amiryousefi, M., Tadayon, M. R., Ebrahimi, R., 2021. Effect of nitrogenous and phosphorus biofertilizers on seed germination and some biochemical characteristics of two quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress. Iranian Journal of Plant Biology. 13, 107-126. https://doi.org/10.22108/ijpb.2021.125105.1227

Amjad, M., Iqbal, M.M., Abbas, G., Farooq, A.B.U., Naeem, M.A., Imran, M., Murtaza, B., Nadeem, M., Jacobsen, S.E., 2022. Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and its implications for phy-toremediation and human health. Environmental Geochemistry and Health. 44, 1487–1500. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0

Anwar, S., Shafiq, F., Nisa Uzma, Z., Muhammad Yasin, U., Ali Ashraf, N., 2021. Effect of cadmium stress on seed germination, plant growth and hydrolyzing enzymes activities in mungbean seedlings. Journal of Seed Science. 43, 2317-1545. https://doi.org/10.1590/2317-1545v43256006

Azadvari, H., Masoumeh, N., Gholizadeh, A., Nakhzari Moghaddam, A., 2020. Evaluation of salicylic acid application on the physiological responses of black cumin (*Nigella sativa* L.) under different irrigation conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 1904-1626. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2398.1626

Bamagoos, A.A., Alharby, H.F., Abbas, G., 2022. Differential uptake and translocation of cadmium and lead by quinoa: a multivariate comparison of physiological and oxidative stress responses. Toxics. 10, 68. https://doi.org/10.3390/toxics10020068

Baroni, G. Pereira, M. Corrêa, F. de Castro, E. José Pereira, F., 2020. Cadmium tolerance during seed germination and seedling growth of *Schinus molle* (Anacardiaceae). floresta. ambiente. 27, e20170502. https://doi.org/10.1590/2179-8087.050217

Basahi, M., 2021. Humic acid improved germination rate, seedling growth and antioxidant system of pea (*Pisum sativum* L. var. Alicia) grown in water polluted with $CdCl_2$. AIMS Environmental Science. 8, 358-370. https://doi.org/10.3934/environsci.2021023

Brahimova, U. Kumari, P. Yadav, S. Rastogi, A. Antala, M. Suleymanova, Z. Zivcak, M. Tahjib-Ul-Arif, M. Hussain, S. Abdelhamid, M., 2021. Progress in understanding salt stress response in plants using biotechnological tools. Journal of Biotechnology. 329, 180–191. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.02.007

Chance, B. Maely, A.C., 1955. Assay of catalase and peroxidase. Methods in Enzymology. 2: 764-775. https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14

Chang, C.J., Kao, C.H., 1998. H_2O_2 metabolism during senescence of rice leaves: changes in enzyme activities in light and darkness. Plant Growth Regulation. 25, 11-15. https://doi.org/10.1023/A:1005903403926

Coolbear, P., 2020. Mechanisms of Seed Deterioration. Seed Quality. CRC Press

Dris, H., Marashi, S. K., 2019. Study the effect of different methods of applying salicylic acid on quantitative, qualitative and biochemical parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) in drained and not drained lands. Environmental Stresses in Crop Sciences, 12, 561-571. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1371.1291

Ellis, R.H. Roberts, E.H., 1981. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology. 9, 373-409. https://doi.org/10.15258/sst.2022.50.1.s.01

El-Taher, A.M. Abd, El-Raouf, H.S. Osman, N.A. Azoz, S.N. Omar, M.A. Elkelish, A. Abd El-Hady, M.A.M., 2022. Effect of salt stress and foliar application of salicylic acid on morphological, biochemical, anatomical, and productivity characteristics of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants. The Plant Journal. 11, 115. https://doi.org/10.3390/plants11010115

Farzaneh, M. Ghanbari, M. Eftekharian Jahromi, A.R., 2013. Effect of hydro-priming on seed germination and proline content of radish (*Raphanus Sativus* L.) under salt stress. Journal of Plant Environmental Physiology. 8, 65-74. https://doi.org/10.22034/jchr.2019.665823

Finch-Savage, W.E. Footitt, S., 2017. Seed dormancy cycling and the regulation of

dormancy mechanisms to time germination in variable field environments. Journal of Experimental Botany. 68, 843-856. https://doi.org/10.1093/jxb/erw477

Fraszczak, B., Matysiak, R., Smiglak, M., Kukawka, R., Spychalski, M., Kleiber, T., 2024. Application of salicylic acid derivative in modifying the iron nutritional value of lettuce (*Lactuca sativa* L.). Plants. 13, 180. https://doi.org/10.3390/plants13020180

Ghaderi, M., Aliloo, A.A., 2023. Improving activity of antioxidant enzymes and vigor in rapeseed by salicylic acid and gum arabic seed priming. Plant Process and Function. 12, 123-138. https://doi.org/20.1001.1.23222727.1402.12.54.8.8

Guedes, F.R.C.M., Maia, C.F., da Silva, B.R.S., Batista, B.L., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., da Silva., Lobato, A.K., 2021. Exogenous 24-Epibrassinolide stimulates root protection, and leaf antioxidant enzymes in lead stressed rice plants: Central roles to minimize Pb content and oxidative stress. Environmental Pollution. 1,280:116992. https://doi.org/10.1016/.envpol.2021.116992

Hakimi, Y. Fatahi, R. Naghavi, M.R. Zamani, Z., 2021. Effect of salicylic acid and methyl jasmonate on stress indices in *Papaver bracteatum* Lindl. The 2nd International Electronic Conference on Plant Sciences—10th Anniversary of Journal Plants. 1–15 December, Online. https://doi.org/10.3390/IECPS2021-12039

Heidari, H., Alizadeh, Y., fazeli, A., 2019. Effects of seed priming and foliar application of salicylic acid on some of physiological characteristic and yield on mung bean (*Vigna radiata* L.) under drought stress condition. Journal of Plant Production Research, 26, 127-141. http://doi.org/10.22069/jopp.2019.14863.2327

Hunter, E.A., C.A. Glasbey, R.E.L. Naylor. 1984. The analysis of data from germination tests. The Journal of Agricultural Science. 102, 207-213. http://doi.org/10.1017/S0021859600041642

Iftikhar, A., Abbas, G., Saqib, M., Shabbir, A., Amjad, M., Shahid, M., Ahmad, I., Iqbal, S., Qaisrani, S.A., 2021. Salinity modulates lead (Pb) tolerance and phytoremediation potential of quinoa: A multivariate comparison of physiological and biochemical attributes. Environmental Geochemistry and Health. 44, 257–272. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00937-8

International Seed Testing Association (ISTA), 2017. International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.

Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., Wajid, M., Ahmed, M., Abbas Shah, G., Peng, Y., Li, Z., 2021. Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. Plants. 9, 1575. https://doi.org/10.3390/plants9111575

Jini, D. Joseph, B., 2017. Physiological mechanism of salicylic acid for alleviation of salt stress in rice. Rice Science. 24, 97–108. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.07.007

Kabiri, R, Naghizadeh, M., 2014. Study the effect of salicylic acid pretreatment on germination and early growth of black cumin (*Nigella sativa*) under salt stress. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 4, 61-72. https://ijsst.areeo.ac.ir/article_107272.html?lang=en

Kar, M., D. Mishra, 1976. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiology. 57, 315-319. https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315

Kaya, C., 2021. Salicylic acid-induced hydrogen sulphide improves lead stress tolerance in pepper plants by upraising the ascorbateglutathione cycle. Physiologia Plantarum. 173, 8–19. https://doi.org/10.1111/ppl.13159

Kiremit, M.S., 2023. Optimization of salicylic acid dose to improve lettuce growth, physiology and yield under salt stress conditions. Gesunde Pflanzen. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00930-4

Kumari, A. Pandey, N. Pandey-Rai, S., 2018. Exogenous salicylic acid-mediated modulation of arsenic stress tolerance with enhanced accumulation of secondary metabolites and improved size of glandular trichomes in *Artemisia annua* L. Protoplasma. 255, 139–152. https://doi.org/10.1007/s00709-017-1136-6

Kwon, E-H. Adhikari, A. Imran, M. Lee, D-S. Lee, C-Y. Kang, S-M. Lee, I-J., 2023. Exogenous SA applications alleviate salinity stress via physiological and biochemical

changes in st john's wort plants. Plants. 12, 310. https://doi.org/10.3390/plants12020310

Mahmoudi, F., Sheikhzadeh Mosaddegh, P., Zare, N., Esmaielpour, B., 2019. Improvement of seed germination, growth and biochemical characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.) seedlings with seed priming under cadmium stress conditions. Iranian Journal of Plant Biology, 11, 23-42. https://doi.org/10.22108/ijpb.2019.111889.1104

Mahmoudi, F., Shikhzadehmosadegh, P., zare, N., Esmailpour, B., 2023. Effect of seed pretreatment with salicylic acid on seed germination, growth and biochemical indices of quinoa seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) under cadmium stress. Journal of Plant Biological Sciences, 15, 1-26. https://doi.org/10.22108/ijpb.2024.138548.1330

Mostofa, M.G. Rahman, M. Ansary, M. Uddin, M. Fujita, M. Tran, L.S.P., 2019. Interactive effects of salicylic acid and nitric oxide in enhancing rice tolerance to cadmium stress. International Journal of Molecular Sciences. 20, 5798. https://doi.org/10.3390/ijms20225798

Murungu, F.S. Nyamugafata, P. Chiduza, C. Clark, L.J. Whalley, W.R. 2003. Effects of seed priming aggregate size and soil matric potential on emergence of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and Maize (*Zea mays* L.). Soil and Tillage Research. 74, 161- 168. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.06.003

Naeem, A.B., M., Imran, M., Murtaza, B., Nadeem, M., Jacobsen, S., 2021. Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and its implications for phytoremediation and human health. Environmental Geochemistry and Health. 44, 1487 - 1500. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0.

Naik, S., Paramesh, R., Siddaraju, R., Ravi Shankar, P., 2020. Studies on growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*Willd.). International Journal of Chemical Studies. 8, 393-397. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1f.8278

Najafi, Gh. Khomari, S. Javadi, A., 2015. Germination response of Canola seeds to seed vigor changes and hydro-priming. Seed Science Research. 45, 55-70. https://doi.org/20.1001.1.22520961.1394.5.17.6.9

Ocvirk, D. M, Špoljarević. M, Kristić. J T, Hancock. T, Teklić. M, Lisjak., 2021. The effects of seed priming with sodium hydrosulphide on drought tolerance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in germination and early growth. Annals of Applied Biology. 178, 400-413.0000. https://doi.org/10.1111/aab.12658

Pai, R. Sharma, P.K., 2023. Exogenous application of salicylic acid mitigates salt stress in rice seedlings by regulating plant water status and preventing oxidative damage. Environmental and Experimental biology. 20(4), 193-204. https://doi.org/10.22364/eeb.20.18

Pai, R. Sharma, P.K., 2022. Exogenous application of salicylic acid mitigates salt stress in rice seedlings by regulating plant water status and preventing oxidative damage. Environmental and Experimental Biology. 20(4), 193-204.

Pruthvi Krishna, V. Vinai, K. Dipti, B., 2023. Foliar application of silicon and salicylic acid improves growth, leaf pigments and yield of maize (*Zea mays* L.) under nutrient deficient sandy soil. available at Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3144795/v1

Rahmanpour, A., Vaziri, A., Salehi Shanjani, P., Rabie, M., Asri, Y., 2021. Effect of osmo-priming on germination in seven species of Allium L. seeds in drought stress conditions. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 34, 855-868. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1400.34.4.11.4

Rahoui, S., Chaoui, A., Elferjani, E., 2010. Reserve mobilization disorder in germinating seeds of *Vicia faba* L. exposed to cadmium. Journal of Plant Nutrition. 33, 809-817. https://doi.org/10.1080/01904161003654055

Rehman, S., Abbas, G., Shahid, M., Saqib, M., Farooq, A.B.U., Hussain, M., Farooq, A., 2019. Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stresss. Ecotoxicology and Environmental Safety. 171, 146–153. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077

Salehzade, H. M. Izadkhah Shishvan, M. Chiyasi, F. Forouzin, A., 2009. Effect of seed priming on germination and seedling growth of wheat

(*Triticum aestivum* L.). Research Journal of Biological Sciences. 4(5), 629-631. https://www.researchgate.net/publication/299468927.

Santos, P. S., de Souza Guilherme, M. D. F., de Souza Guilherme, L., dos Santos Oliveira, J. L., Silva, E., 2021. Evaluation of seed germination development and initial growth of cotton plants exposed to cadmium. Anales de Biología. 43, 111-116. http://doi.org/10.6018/analesbio.43.11

Shahid, M., Farooq, A.B.U., Rabbani, F., Khalid, S., Dumat, C., 2019. Risk assessment and biophysiochemical responses of spinach to foliar application of lead oxide nanoparticles: A multivariate analysis. 245, 125605. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125605

Sharafizadeh, M., 2017. Effect of salicylic acid and drought stress on germination and activity of antioxidant enzymes of barely. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 6, 161-169. https://doi.org/10.22034/ijsst.2018.116567

Sheikhzadeh, P., Zare, N., Mahmoudi, F., 2021. The synergistic effects of hydro and hormone priming on seed germination, antioxidant activity and cadmium tolerance in borage. Acta Botanica Croatica, 80, 18–28. https://doi.org/10.37427/botcro-2021-007

Singhal, R.K., Kumar, M., Bose, B., Mondal, S., Srivastava, S., Dhankher, O.P., Tripathi, R.D., 2022. Heavy metal (loid)s phytotoxicity in crops and its mitigation through seed priming technology. International journal of phytoremediation, 1-20. https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2068502

Tajti J. Németh, E. Glatz, G. Janda, T. Pál, M., 2019. Pattern of changes in salicylic acid-induced protein kinase (SIPK) gene expression and salicylic acid accumulation in wheat under cadmium exposure. Plant Biology. 21, 1176–1180. https://doi.org/10.1111/plb.13032

Tania,S.S. Rahaman, M.M. Rauf, F. Suborna, M. A. Humayun Kabir, M. Hoque, M. A Rhaman, M.S., 2021. Seed priming with salicylic acid (SA) and hydrogen peroxide (H_2O_2) improve germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*) under salt stress. Asian Journal of Crop Science. 6, 60-69. https://doi.org/10.3390/seeds1020008

Tarigholizadeh, S., Motafakkerazad, R., Kosarinasab, M., Movafeghi, A., Mohammadi, S., Sabzi, M., Talebpour, A., 2021. Influence of plant growth regulators and salicylic acid on the production of some secondary metabolites in callus and cell suspension culture of *Satureja sahendica* Bornm. Acta Agriculturae Slovenica. 117, 1–12. https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.4.773

Tayyab, N. Naz, R. Yasmin, H. Nosheen, A. Keyani, R. Sajjad, M. Hassan, M. N. Roberts, T. H., 2020. Combined seed and foliar pre-treatments with exogenous methyl jasmonate and salicylic acid mitigate drought induced stress in maize. PLoS One 15, e0232269. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232269

Torun, H. Cetin, B. Stojnic, S. Petrı´k P., 2024. Salicylic acid alleviates the effects of cadmium and drought stress by regulating water status, ions, and antioxidant defense in *Pterocarya fraxinifolia*. Frontiers in Plant Science. 14, 1339201. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1339201

Vijayaragavan, M., Prabhahar, C., Sureshkumar, J., Natarajan, A., Vijayaragavan, P., Sharavanan, S., 2011. Toxic effect of cadmium on seed germination, growth and biochemical contents of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants. International Multidisciplinary Research Journal. 1, 1–6.

Yari, L., Zareyan, A., Sheidaie, S., Khazaei F., 2012. Influence of high and low temperature treatments on seed germination and seedling vigor of rice (*Oryza sativa* L.). World Applied Sciences Journal. 16, 1015-1018. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:5965608.

Zhang, S., Ni, X., Arif, M., Zheng, J., Stubbs, A., Li, C., 2020. NaCl improved Cd tolerance of the euhalophyte *Suaeda glauca* but not the recretohalophyte *Limonium aureum*. Plant and Soil. 449, 303–318. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04475-7

Zhao, H., Guan, J., Liang, Q., Zhang, X., Hu, H., Zhang, J., 2021. Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings. Scientific Reports. 11, 9913. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0