



<https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en>
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 2322-2204
Vol. 15, Issue, No. 1, Spring 2023
Document Type: Research Paper
Received: 29/07/2023 Accepted: 22/01/2024

Effect of Seed Pretreatment with Salicylic Acid on Seed Germination, Growth and Biochemical Indices of Quinoa Seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) under Cadmium Stress

Fatemeh Mahmoudi¹, Parisa Shikhzadehmosadegh^{1*} , Nasser Zare¹,
Behrouz Esmailpour²

¹Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

Abstract

To investigate the effect of salicylic acid on the indicators of seed germination and growth of quinoa seedlings under cadmium stress, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized basic design in four replications at Mohaghegh Ardabili University. The treatments included cadmium stress at five levels (0, 50, 100, 150, and 200 mg/l), and salicylic acid at five levels (0, 1, 1.5, 2, and 2.5 mM). The results showed that with the increase in stress intensity, the average percentage and speed of germination, dry weight, and length of quinoa seedlings decreased. In non-stressed conditions, the percentage and speed of germination and the dry weight of the seedlings obtained from the seeds pretreated with salicylic acid were significantly higher than the control seeds. Also, seed pretreatment with salicylic acid significantly increased the characteristics of germination percentage, germination rate, average germination percentage, seedling length, dry weight, activity of catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase enzymes, but decreased the average germination time, time to 90% germination. Application of 2.5 mM salicylic acid as a pre-treatment in non-stress and cadmium stress conditions increased seedling length by 46.48 and 73.83%. By using 2.5 mM concentration of salicylic acid, the activity of catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase enzymes increased by 45.30 to 93.89, 22.51 to 51.6, and 25.4 to 45.17%, respectively. In total, seed pretreatment with 2.5 mM salicylic acid, at different levels of cadmium stress, increased seed and seedling vigor and activity. Antioxidant enzymes had the most positive effect on the germination and growth of quinoa seedlings.

* Corresponding Author: sheikhzadehmp@gmail.com



Introduction

Heavy metal stress is one of the most critical abiotic factors that has attracted a lot of attention in the last 30 years. Heavy metal is any element that exhibits a high density and exerts its lethal effects even when present in small amounts. Among all the discovered elements, 53 elements have been identified as heavy metals. Meanwhile, chromium (Cr), lead (Pb), cadmium (Cd), silver (Ag), cobalt (Co), platinum (Pt), arsenic (As), and nickel (Ni) play the most destructive role in plant physiology. (DeCaroli et al., 2020). Quinoa is a multipurpose plant that has recently been used in the human diet as a substitute for animal products as a source of protein. Quinoa contains a high amount of protein (12-18%), bioactive compounds, essential amino acids, fatty acids, and minerals. (Angeli et al., 2020) Quinoa seeds and leaves are used as food. While its biomass is also used in animal feed. In addition, the high contents of saponins and colors make it useful for industrial and medicinal purposes (Abd El-Moneim et al., 2021). Considering the importance of the quinoa plant and the existing problems in the field of germination and growth of its seedlings (due to the sensitive and critical nature of these steps), the use of the seed pretreatment technique in quinoa can be considered as one of the solutions that be effective directly and indirectly on improving the germination and establishment of seedlings under the conditions of heavy metal stress. Considering the role of salicylic acid in reducing the effects of heavy metal stress such as cadmium on the germination and growth of seedlings, this study aims to investigate the effect of pretreatment of seeds with salicylic acid on the indicators of seed germination and growth of quinoa seedlings. It was done under cadmium stress.

Materials and Methods

To investigate the effect of salicylic acid on the indicators of seed germination and the growth of quinoa seedlings under cadmium stress, a factorial experiment was carried out in the form of a completely randomized basic design in four replications in the Laboratory of Seed Science and Technology of Mohaghegh Ardabili University in 1400. The test treatments include cadmium concentrations at five levels (zero (control), 50, 100, 150, and 200 mg/liter), and salicylic acid concentrations at five levels (zero (control), 1, 1.5, 2, and 2.5 millimolar). Before applying the treatments, the seeds were disinfected with two percent sodium hypochlorite for one minute and then washed with distilled water. To pre-treat the seeds with salicylic acid, after preparing the solutions with concentrations of 1, 1.5, 2, and 2.5 mM, the sterilized seeds were placed in the determined concentrations for 12 hours. Then they were kept in an incubator with a temperature of 20 degrees Celsius for 12 hours. After the end of the period, the seeds were dried in the laboratory environment until reaching the initial moisture (Sheikhzadeh et al., 2021). To perform the germination test, 50 quinoa seeds were randomly placed in Petri dishes in 4 replicates using the top-of-paper method, and based on the desired treatments, cadmium solution at concentrations of 50, 100, 150, and 200 mg/liter was added to Petri dishes (distilled water was used for the control treatment). To measure the biochemical characteristics of seedlings, samples of 10-day-old normal seedlings were randomly selected and these samples were kept in a freezer at -80°C until the biochemical and enzymatic properties were measured. The method of Chang & Koa (1988) was used to prepare the enzyme extract. The activity of the catalase enzyme was used according to the method of Aebi (1984) and the peroxidase enzyme was measured according to the method of Chanec Maehly & (1955) based on the formation of tetragaiacol from guaiacol in the presence of hydrogen peroxide and guaiacol

enzyme. The activity of the polyphenol oxidase enzyme was measured by the method of Kar & Mishra (1955). Statistical analysis of data was done using SAS 9.4 statistical software. The normality of data distribution was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov test. The comparison of means was done using Duncan's multiple range test at the 5% probability level. Excel software was used to draw graphs.

Results and Discussion

In total, the results of this research showed that with the increase in the intensity of cadmium stress, the characteristics of germination percentage, germination speed, average germination percentage, seedling length, and dry weight decreased and the average duration of germination, the time to 90% germination. In women, the activity of catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase enzymes increased. Cadmium stress causes ionic imbalance, which stimulates the production of reactive oxygen species (ROS), which leads to cell membrane disruption, osmotic regulation, and the production of secondary metabolites. Considering the negative effect of this stress on the germination and growth of the obtained seedlings, pre-treating quinoa seeds with salicylic acid will shorten the time required for germination, so that in the conditions without stress and The cadmium stress pretreated seeds germinated faster than the control seeds and by reducing the average germination time and the time to 90% germination through increasing the rate of water absorption, repairing and preparing the structure and enzymes of the seed and the weak seed coat. It reduces cadmium damage and protects the germination process against the toxicity of this heavy metal.

Conclusion

We showed that increasing the activity of antioxidant enzymes during germination, improves the conditions of germination and initial growth, in other words, pre-treating seeds with salicylic acid at a concentration of 2.5 mM and different levels of cadmium stress The way of increasing seed and seedling vigor and increasing the activity of antioxidant enzymes reduces the negative effect of cadmium stress and improves the characteristics of germination and seedling growth.

Key words: Antioxidant enzymes, Cadmium stress, Salicylic acid, Quinoa

تأثیر پیش تیمار سالیسیلیک اسید بر جوانه زنی بذر، رشد و شاخص های بیوشیمیایی گیاهچه های کینوا (*Chenopodium quinoa willd.*) تحت تأثیر تنش کادمیوم

فاطمه محمودی^۱، پریسا شیخزاده مصدق*^۱، ناصر زارع^۱، بهروز اسماعیل پور^۲
^۱ گروه تولید و ژنتیک گیاهی - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

برای بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر شاخص های جوانه زنی بذر و رشد گیاهچه های کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه ی کامل تصادفی در چهار تکرار در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. تیمارها شامل تنش کادمیوم در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر)، سالیسیلیک اسید در پنج سطح (صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی مولار) بودند. نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش، میانگین درصد و سرعت جوانه زنی، وزن خشک و طول گیاهچه های کینوا کاهش یافته بود. در شرایط بدون تنش، درصد و سرعت جوانه زنی و وزن خشک گیاهچه های حاصل از بذرهای پیش تیمار شده با سالیسیلیک اسید به طور معنی داری بیشتر از بذرهای شاهد بود. همچنین پیش تیمار بذر تحت سالیسیلیک اسید منجر به افزایش معنی دار صفات درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی، میانگین درصد جوانه زنی، طول و وزن خشک گیاهچه، فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز شد، اما میانگین مدت جوانه زنی، زمان تا ۹۰ درصد جوانه زنی، را کاهش داد. کاربرد ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید به صورت پیش تیمار در شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم منجر به افزایش طول گیاهچه بین ۴۶/۴۸ و ۷۳/۸۳ درصد شده بود. با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و آنزیم پلی فنل اکسیداز به ترتیب ۴۵/۳۰ تا ۹۳/۸۹، ۲۲/۵۱ تا ۵۱/۶ و ۲۵/۴ تا ۴۵/۱۷ درصد افزایش داد. در مجموع، پیش تیمار بذر با ۲/۵ میلی مولار، در سطوح مختلف تنش کادمیوم از راه افزایش توان بذر و گیاهچه و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی بیشترین اثر مثبت را بر جوانه زنی و رشد گیاهچه های کینوا داشت.

واژه های کلیدی: آنزیم های آنتی اکسیدان، تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید، کینوا



مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاه علفی یکساله است. این گیاه جزو شبه غلات است زیرا از خانواده اسفناج و چغندر قند است. کینوا می‌تواند به خوبی با محیط‌های مختلف سازگار شود که در آن بقای سایر محصولات زراعی بسیار دشوار است. به همین دلایل، فائو سال ۲۰۱۳ را به عنوان سال بین‌المللی کینوا اعلام کرد. گیاه کینوا دارای تنوع ژنتیکی گسترده‌ای است که به این علت در برابر سرما، شوری و شرایط خشکی بسیار مقاوم است (Hussain et al., 2021; Saeidi et al., 2021). کینوا یک گیاه چند منظوره است که به تازگی در رژیم غذایی انسان به عنوان جایگزینی برای محصولات حیوانی به عنوان منبع پروتئین استفاده می‌شود. کینوا حاوی مقدار زیادی از پروتئین (۱۲-۱۸ درصد)، ترکیبات فعال زیستی، اسیدهای آمینه ضروری، اسیدهای چرب و مواد معدنی است (Angeli et al., 2020). از دانه‌ها و برگ‌های کینوا به عنوان غذا استفاده می‌شود، در حالی که زیست توده آن در خوراک دام نیز استفاده می‌شود. علاوه بر این، محتویات بالای ساپونین‌ها و رنگ‌ها، آن را برای مقاصد صنعتی و دارویی مفید می‌کند (Abd El-Moneim et al., 2021). تنش فلزات سنگین یکی از بحرانی‌ترین عوامل غیرزیستی است که در ۳۰ سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. فلز سنگین به هر عنصری گفته می‌شود که چگالی بالایی از خود نشان می‌دهد و اثرات کشنده خود را حتی زمانی که در مقادیر کم موجود باشد، اعمال می‌کند. از میان تمام عناصر کشف شده، ۵۳ عنصر به عنوان فلزات سنگین شناسایی شده است. در این میان کروم

(Cr)، سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، نقره (Ag)، کبالت (Co)، پلاتین (Pt)، آرسنیک (As) و نیکل (Ni) مخرب‌ترین نقش را در فیزیولوژی گیاه دارند (De Caroli et al., 2020). فلزات سنگین با کاهش عملکرد اجزای مختلف سلولی، مانند غشای تیلاکوئید در کلروپلاست، لیپیدها و پروتئین‌ها، رشد گیاه را محدود می‌کنند. در میان تمام فلزات سنگین، کادمیوم به دلیل دخالت گسترده آن در آلودگی زنجیره غذایی اهمیت زیادی یافته است، زیرا به راحتی توسط سلول‌های گونه‌های مختلف گیاهی جذب می‌شود. کادمیوم به آسانی در آب حل می‌شود، بنابراین با یک مکانیسم انتقال فعال وارد غشای نیمه تراوا سلول‌های ریشه می‌شود و مسیر مشابهی را دنبال می‌کند و برای انتقال استفاده می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های بخش کشاورزی و صنعتی، توجه جدی به مسائل مربوط به سمیت کادمیوم در چند دهه گذشته شده است (Jawad Hassan et al., 2020). کادمیوم سبب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌ها در گل گاوزبان (*Borago officinalis* L.) (Mahmoudi et al., 2019) (Sheikhzadeh et al., 2021)، سورگوم (*Sorghum*) (Jawad Hassan et al., 2020)، رازیانه (*Foeniculum vulgare*) (Zhao et al., 2021) و نخود (*Cicer arietinum*) (Singhal et al., 2022) شده است. از آنجایی که تنش کادمیوم، به کاهش جوانه‌زنی و شاخص‌های رشدی گیاهچه‌ها مانند طول ریشه‌چه و ساقه‌چه منجر می‌شود، بنابراین به کار بردن روش‌هایی که منجر به کاهش تأثیر منفی تنش فلزهای سنگین از جمله کادمیوم شده، اهمیت بسیاری دارد. پژوهش‌های متعدد در سال‌های اخیر نشان داده

(Tarigholizadeh et al., 2021)، لویا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata*) (El-Taher et al., 2022) و گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) (Matengu et al., 2021) شده است. با توجه به اهمیت گیاه کینوا و مشکلات موجود در زمینه جوانه زنی و رشد گیاهچه‌های آن (به علت حساس و بحرانی بودن این مراحل)، استفاده از تکنیک پیش تیمار بذر در کینوا می‌تواند یکی از راهکارهایی در نظر گرفت که به طور مستقیم و غیرمستقیم بر بهبود جوانه زنی و استقرار گیاهچه‌ها در شرایط تنش فلزات سنگین موثر باشد. با توجه به نقش سالیسیلیک اسید در کاهش اثرات تنش فلزات سنگین از جمله کادمیوم روی جوانه زنی و رشد گیاهچه‌ها، از این رو، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پیش تیمار بذر با سالیسیلیک اسید بر شاخص‌های جوانه زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر شاخص‌های جوانه زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا تحت تنش کادمیوم، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه‌ی کامل تصادفی در چهار تکرار در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۰ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل غلظت‌های کادمیوم در پنج سطح (صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر)، غلظت‌های سالیسیلیک اسید در پنج سطح (صفر (شاهد)، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی مولار) بودند. کادمیوم کلراید ($CdCl_2 \cdot \frac{1}{2}H_2O$)

است سالیسیلیک اسید (Salicylic acid) یک تنظیم کننده درون‌زا رشد گیاه است، به عنوان یک سیگنال در القای پاسخ ویژه گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل می‌کند. (Maghsoudi et al., 2020; Pruthvi Krishna et al., 2023; Bano et al., 2023; Urmı et al., 2023) سالیسیلیک اسید با افزایش سطح فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها سبب کاهش تنش اکسیداتیو می‌شود. در شرایط وجود تنش فلزات سنگین، سالیسیلیک اسید همچنین موجب بهبود میزان جوانه زنی و رشد گیاهچه‌ها می‌شود (Kumari et al., 2018; Tajti et al., 2019; Mostofa et al., 2019). سالیسیلیک اسید در مراحل مختلف رشدی گیاهان به صورت محلول پاشی و یا ترکیب با خاک مورد استفاده می‌شود (Hasan begi et al., 2021; Rahmanpour et al., 2021). در مرحله بذری سالیسیلیک اسید به صورت پیش تیمار بذر مورد استفاده قرار می‌شود. پیش تیمار بذر یک فناوری با هزینه کم و مفید برای بهبود قدرت و کیفیت بذر است (Finch-Savage & Footitt, 2017). در واقع پرایمینگ بذر با افزایش فعالیت‌های متابولیکی قبل از جوانه زنی، موجب بهبود درصد و سرعت جوانه زنی و افزایش رشد گیاهچه‌ها می‌شود (Ocvirk et al., 2021). پرایمینگ بذر با سالیسیلیک اسید سبب افزایش درصد جوانه زنی و رشد گیاهچه در گاوزبان اروپایی (Mahmoudi et al., 2019) (Tania et al., 2021) (Stanislawska-Glubiak & Korzeniowska, 2022; Sumaiya et al., 2020) (Hakimi et al., 2021) (Papaver somniferum) (Satureja hortensis) می‌شود.

میانگین مدت جوانه‌زنی (Ellis & Roberts, 1981)، سرعت جوانه‌زنی (Rajpar et al., 2006)، زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی و متوسط جوانه‌زنی روزانه (Hunter et al., 1984) تعیین شد. همچنین طول گیاهیچه با خط کش مدرج و وزن خشک گیاهیچه توسط ترازو اندازه‌گیری شد.

جهت اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی گیاهیچه‌ها، نمونه‌هایی از گیاهیچه‌های نرمال ۱۰ روزه به صورت تصادفی انتخاب و این نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوشیمیایی و آنزیمی در فریزر با دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش (Koa & Chang, 1988) استفاده شد. میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با روش (Aebi, 1984) استفاده شد و آنزیم پراکسیداز با روش (Maehly, 1955) طبق تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن و آنزیم گایاکول اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز توسط روش (Mishra & Kar, 1955) اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج

درصد جوانه‌زنی: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان دادند درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم و سالیسیلیک اسید

(شرکت سازنده مرک آلمان) و سالیسیلیک اسید (شرکت سازنده مرک آلمان) برای اعمال تیمارها تهیه شدند. بذر کینوای مورد استفاده در این پژوهش وارپته تی تی کاکا (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، بذرها با هیپوکلرید سدیم دو درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند. برای اعمال پیش تیمار بذر با سالیسیلیک اسید، بعد از تهیه محلول‌ها با غلظت ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌مولار، بذور ضدعفونی شده به مدت ۱۲ ساعت در غلظت‌های تعیین شده قرار داده شدند. سپس در انکوباتوری با دمای ۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت نگهداری شدند. پس از اتمام مدت زمان، بذرها تا رسیدن به رطوبت اولیه در محیط آزمایشگاه خشکانده شدند (Sheikhzadeh et al., 2021). برای انجام آزمون جوانه‌زنی، ۵۰ عدد بذر کینوا به طور تصادفی و در ۴ تکرار به روش روی کاغذ (Top of paper) در داخل پتری‌دیش‌ها قرار داده شد و بر اساس تیمارهای مورد نظر، محلول کادمیوم در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به پتری‌دیش‌ها اضافه شدند (برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد). نمونه‌ها سپس به ژرمیناتوری با دمای ۲۰ درجه سلسیوس انتقال داده شده و به مدت ۱۰ روز در این شرایط قرار گرفتند. تعداد بذور جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت شمارش و یادداشت شدند. ظهور ریشه‌چه به اندازه‌ی ۲ میلی‌متر معیاری برای جوانه‌زنی بذرها در نظر گرفته شد (ISTA, 2017). پس از اتمام ۱۰ روز مدت جوانه‌زنی، تعداد جوانه‌های نرمال شمارش و درصد جوانه‌زنی،

هستند. تنش کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی بذر کینوا شد. در بین تیمارهای مورد بررسی کمترین درصد جوانه‌زنی با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد درصد جوانه‌زنی بذر کینوا با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافته است (شکل ۱). بیشترین درصد جوانه‌زنی (۱۰۰ درصد) در شرایط بدون تنش کادمیوم در تیمار ۲/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید نداشت. در شرایط وجود تنش کادمیوم (غلظت‌های ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) نیز کاربرد غلظت‌های ۱ تا ۲/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید موجب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا شد. در این شرایط در بین غلظت‌های مختلف سالیسیلیک اسید بیشترین درصد جوانه‌زنی با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید حاصل شد (شکل ۱).

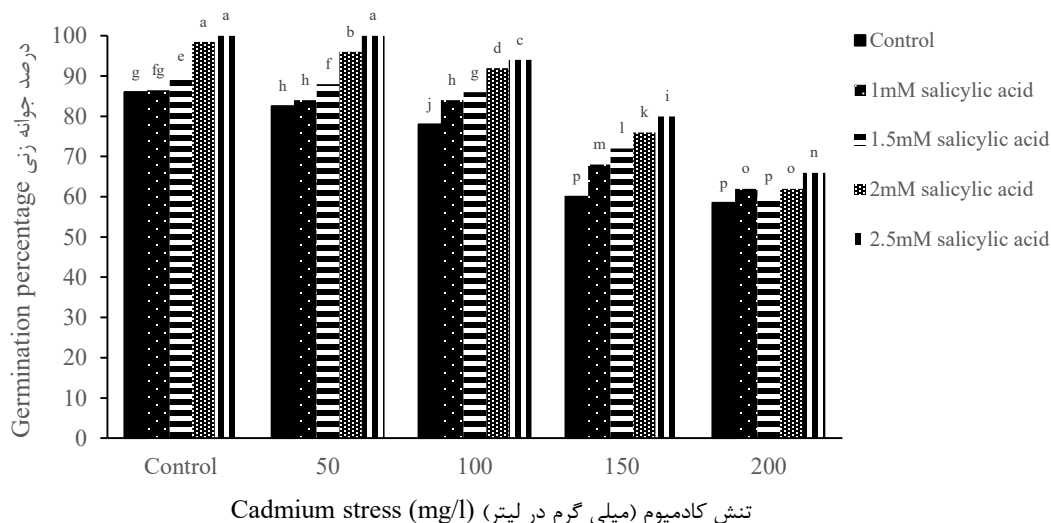
جدول ۱- تجزیه واریانس اثرات تنش کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا

Table 1- Analysis variance of cadmium stress and salicylic acid effects on seed germination and growth of quinoa seedlings

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	میانگین مدت جوانه زنی Mean germination time	سرعت جوانه زنی Germination rate	زمان تا ۹۰ درصد جوانه زنی Time to 90 percentage germination	متوسط جوانه زنی روزانه Mean daily germination	طول گیاهچه Seedling length	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight
تنش کادمیوم Cadmium stress	4	3543.1 **	0.05 **	308.2 *	1.23**	18.06**	2.81**	1×10 ^{-6**}
سالیسیلیک اسید Salicylic acid	4	732.3 **	0.4 **	198.6 **	5.72**	3.7**	39.62**	3×10 ^{-5**}
سالیسیلیک اسید × تنش کادمیوم Salicylic acid × Cadmium stress	16	27.4 **	0.03 **	4.14 **	0.62*	0.13*	0.21**	2×10 ^{-7**}
خطا Error	75	1.65	0.013	0.21	0.29	0.008	0.009	2×10 ⁻⁷
ضریب تغییرات CV %		1.59	6.19	1.48	14.19	1.59	2.49	6.77

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

ns, * and ** are non-significant and significant at the five percent, one percent probability level, respectively



شکل ۱- تاثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر درصد جوانه زنی بذور کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجود داشتن اختلاف معنی دار با آزمون دانکن را نشان می دهند.

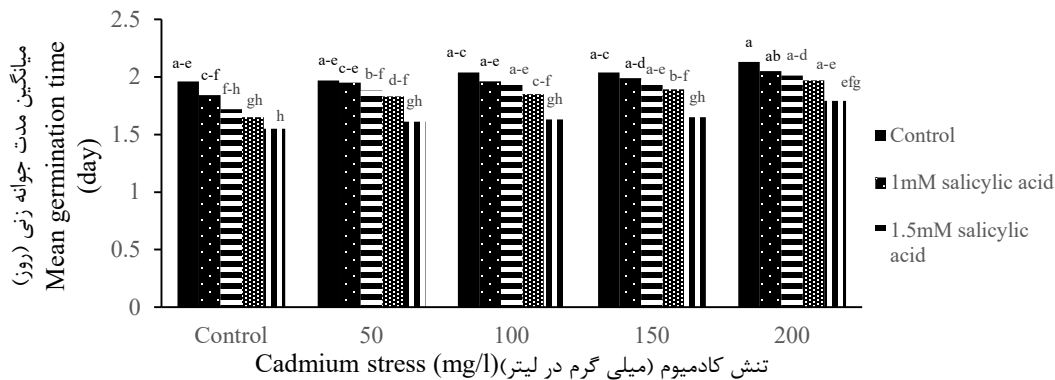
Figure 1- The effects of salicylic acid treatment on the germination percentage of quinoa seeds under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

پیش تیمار نمودن بذور کینوا با سالیسیلیک اسید به کاهش میانگین مدت جوانه زنی بذور در شرایط بدون تنش و نیز در شرایط تنش کادمیوم منجر شد. در شرایط وجود تنش کادمیوم (غلظت های ۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) نیز کاربرد غلظت های ۱ تا ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید موجب کاهش میانگین مدت جوانه زنی بذور کینوا شد. بیشترین میانگین مدت جوانه زنی بذور در تیمار شاهد سالیسیلیک اسید و کمترین میانگین مدت جوانه زنی (۱/۵۵ روز) در تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید دیده شدند (شکل ۲).

میانگین مدت جوانه زنی: نتایج حاصل از

جدول تجزیه واریانس داده ها (جدول ۱) نشان دادند میانگین مدت جوانه زنی تحت تاثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار شد.

تنش کادمیوم به افزایش معنی دار میانگین مدت جوانه زنی بذور کینوا منجر شد. به طوری که در بین تیمارهای مورد پژوهش بیشترین میانگین مدت جوانه زنی بذور (۲/۱۳ روز) در شرایط تنش کادمیوم ۲۰۰ میلی گرم در لیتر و کمترین میانگین مدت جوانه زنی (۱/۵۵ روز) در شرایط عدم تنش کادمیوم دیده شد (شکل ۲).

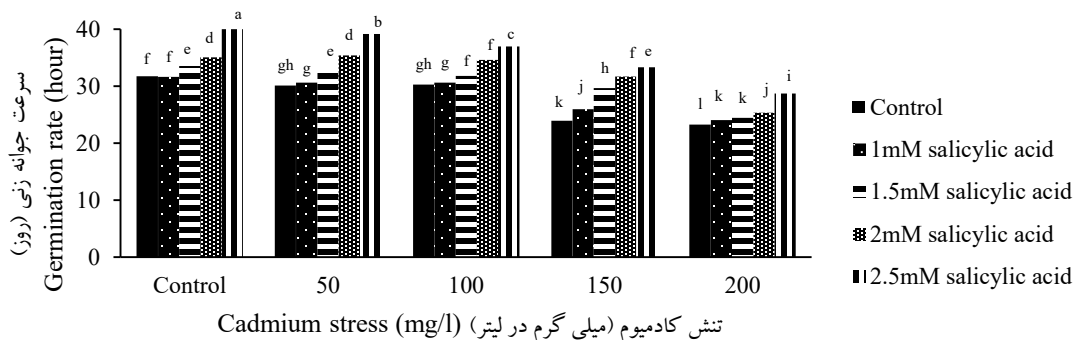


شکل ۲- تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر میانگین مدت جوانه زنی بذور کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجود نداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 2- The effects of salicylic acid treatment on the Mean germination time of quinoa seeds under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

میلی گرم در لیتر) بود (شکل ۳). تنش کادمیوم سبب کاهش معنی دار سرعت جوانه زنی بذور کینوا شد، اما پیش تیمار بذور با سالیسیلیک اسید سرعت جوانه زنی در تمام سطوح تنش کادمیوم افزایش نشان داد بطوری که بیشترین سرعت جوانه زنی (۳۹/۹۹) در تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد حدود ۷۱/۶۸ درصد بیشتر از بذور شاهد بود (شکل ۳).

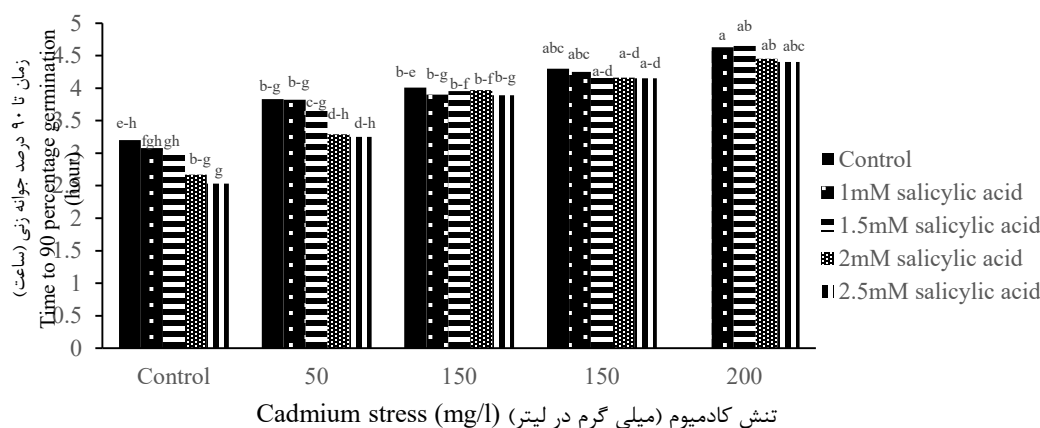
سرعت جوانه زنی: سرعت جوانه زنی تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار شد (جدول ۱). افزایش تنش کادمیوم منجر به کاهش سرعت جوانه زنی شد. از سوی دیگر در بین تیمارهای مورد بررسی کمترین سرعت جوانه زنی (۲۳/۲۴ ساعت) با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که بطور معنی داری کمتر از سایر سطوح تنش کادمیوم (غلظت های ۵۰ تا ۱۵۰



شکل ۳- تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر سرعت جوانه زنی بذور کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجود نداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 3- The effect of salicylic acid treatment on the Germination rate of quinoa seeds under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

سوی دیگر بیشترین زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش کادمیوم ۲۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۴). همچنین با کاربرد غلظت‌های مختلف سالیسیلیک اسید مدت زمان لازم برای رسیدن به ۹۰ درصد جوانه‌زنی نسبت به تیمار عدم کاربرد سالیسیلیک اسید به‌طور معنی‌داری کاهش نشان داد. از سوی دیگر نتایج نشان داد که کاربرد ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی را کاهش داد (شکل ۴). کمترین زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی (۲/۵۳ ساعت) در تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید در شرایط نرمال مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۴- تاثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر میانگین زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی بذور کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 4- The effect of salicylic acid treatment on the Time to 90 percentage germination of quinoa seeds under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

بیشترین میانگین درصد جوانه‌زنی روزانه (۷/۱۴ درصد) در شرایط بدون تنش کادمیوم مشاهده شد (شکل ۵). کمترین میانگین درصد جوانه‌زنی روزانه (۳/۰۷ درصد) در تنش کادمیوم ۲۰۰ میلی گرم در لیتر در تیمار شاهد مشاهده شد که حدود ۳۲/۵۷ درصد کمتر از سایر تیمارها بود (شکل ۵). پیش تیمار سالیسیلیک اسید به‌طور معنی‌داری در

زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی: نتایج حاصل

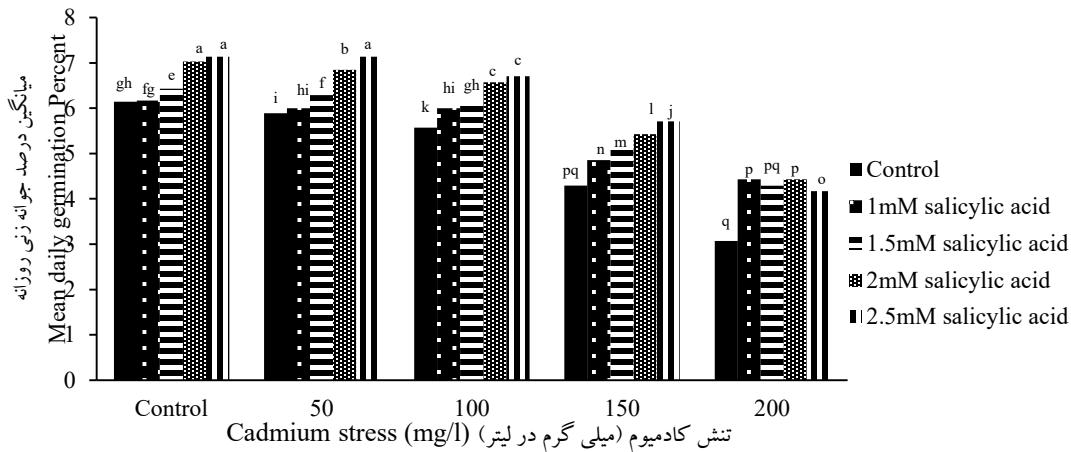
از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی‌دار شد. تنش کادمیوم سبب افزایش زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی بذور کینوا شد. بطوری که در بین تیمارهای مورد بررسی بیشترین درصد زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی (۵ ساعت) با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم نداشت. تنش کادمیوم تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی افزایش نشان داد، از

میانگین درصد جوانه‌زنی روزانه: بر اساس

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) میانگین درصد جوانه‌زنی روزانه تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی‌دار شد. میانگین درصد جوانه‌زنی روزانه با افزایش تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. از سوی دیگر؛

با کاربرد ۲ میلی مولار سالیسیلیک اسید در همین شرایط و ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید در شرایط تنش کادمیوم ۵۰ میلی گرم در لیتر نداشت (شکل ۵).

تمام سطوح تنش کادمیوم میانگین درصد جوانه زنی روزانه را افزایش داد به طوری که بیشترین میانگین درصد جوانه زنی روزانه در تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد و اختلاف معنی داری

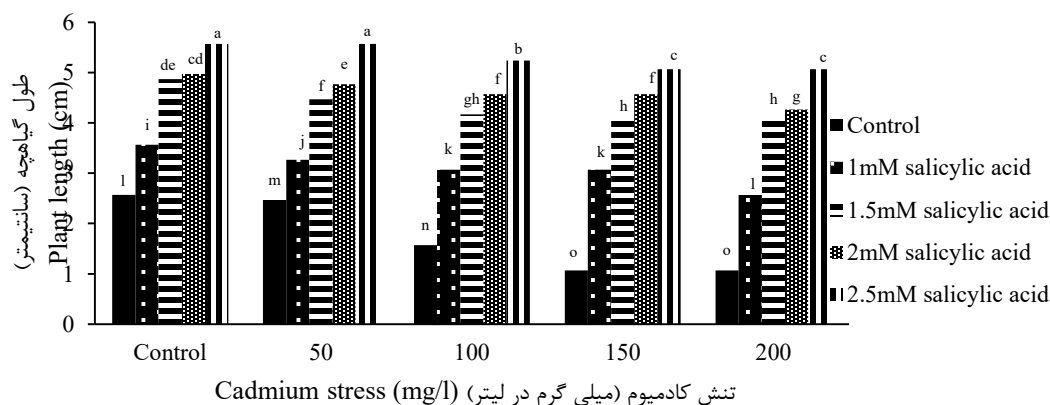


شکل ۵- تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر میانگین درصد جوانه زنی روزانه بذور کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 5- The effect of salicylic acid treatment on the average daily germination percentage of quinoa seeds under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

کادمیوم نداشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که طول گیاهچه کینوا با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافته است (شکل ۶). بیشترین طول گیاهچه در تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد که اختلاف معنی داری در شرایط تنش کادمیوم ۵۰ میلی گرم در لیتر نداشت. کاربرد ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید به صورت پیش تیمار به ترتیب در شرایط بدون تنش کادمیوم و تنش کادمیوم طول گیاهچه را ۴۶/۴۸ و ۷۳/۸۳ درصد افزایش داد (شکل ۶).

طول گیاهچه: بر اساس نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) طول گیاهچه تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار شد. تنش کادمیوم سبب کاهش معنی دار طول گیاهچه کینوا در حدود ۴۰/۱۸ درصد در تیمار شاهد شد (شکل ۶). در بین تیمارهای مورد پژوهش، کمترین طول گیاهچه با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی داری با غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر



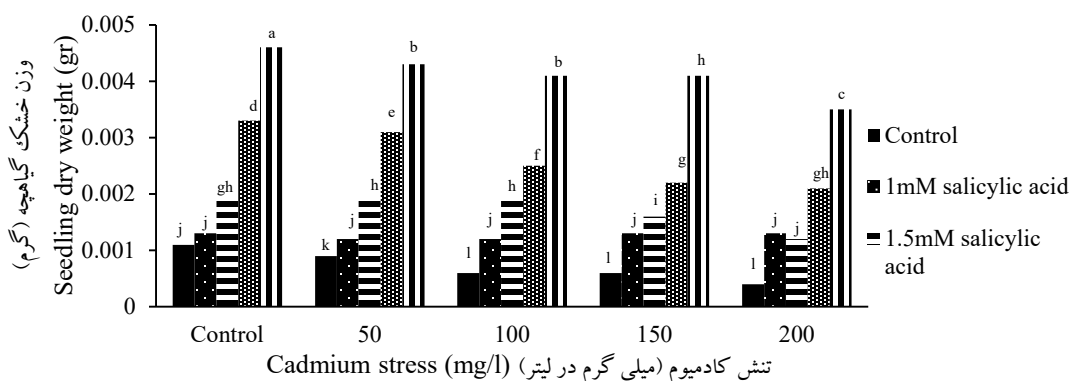
شکل ۶- تاثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر میانگین طول گیاهچه کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 6- The effect of salicylic acid treatment on quinoa seedling length under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

لیتر کادمیوم در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۷). پیش تیمار نمودن بذور کینوا با سالیسیلیک اسید به افزایش وزن خشک گیاهچه در شرایط بدون تنش و نیز در شرایط تنش کادمیوم منجر شد. همچنین بیشترین میزان وزن خشک گیاهچه (۰/۰۰۴۶ گرم) در شرایط پیش تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد که بطور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود (شکل ۷).

وزن خشک گیاهچه: بر اساس نتایج حاصل از

جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) وزن خشک گیاهچه تحت تاثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار شد. نتایج نشان داد که وزن خشک گیاهچه در بالاترین سطوح کادمیوم (۲۰۰ میلی گرم در لیتر) ۱۸ تا ۳۶/۳۶ درصد کاهش یافت. از سوی دیگر، کمترین وزن خشک گیاهچه با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی گرم در



شکل ۷- تاثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر میانگین وزن خشک گیاهچه کینوا تحت تنش کادمیوم. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 7- The effect of salicylic acid treatment on dry weight of quinoa seedlings under cadmium stress. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

نمودن بذر کینوا با سالیسیلیک اسید به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز منجر شد. به طوری که بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط پیش تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد که بطور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود، اما اختلاف معنی داری با پیش تیمار ۲ میلی مولار سالیسیلیک اسید نداشت و حدود ۹۴/۱۵ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (شکل ۸ ب).

فعالیت آنزیم کاتالاز: بر اساس نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده ها (جدول ۲) فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر تنش کادمیوم، سالیسیلیک اسید معنی دار شد، اما اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار نشد. تنش کادمیوم فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد به طوری که ۲۰۰ میلی گرم در لیتر تنش کادمیوم فعالیت آنزیم کاتالاز را ۱۷/۹۷ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۸ آ). پیش تیمار

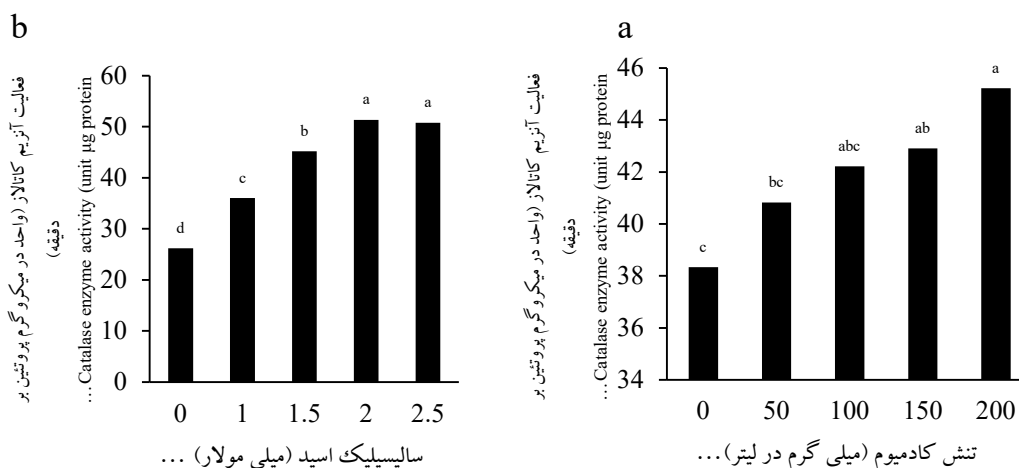
جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات تنش کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانت گیاهچه های کینوا

Table 2- Analysis variance of cadmium stress and salicylic acid effects on antioxidant enzyme activity of quinoa seedlings

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme activity	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidase enzyme activity	فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase enzyme activity
تنش کادمیوم Cadmium stress	4	129.8 °	39.86 °°	43.01 °
سالیسیلیک اسید Salicylic acid	4	2304.9 °°	653.2 °°	546.42 °°
سالیسیلیک اسید × تنش کادمیوم Salicylic acid × Cadmium stress	16	29.94 ns	6.43 ns	6.76 ns
خطا Error	75	37.7	9.89	4.21
ضریب تغییرات CV %		14.65	8.61	13.43

ns, * and ** are non-significant and significant at the five percent, one percent probability level, respectively

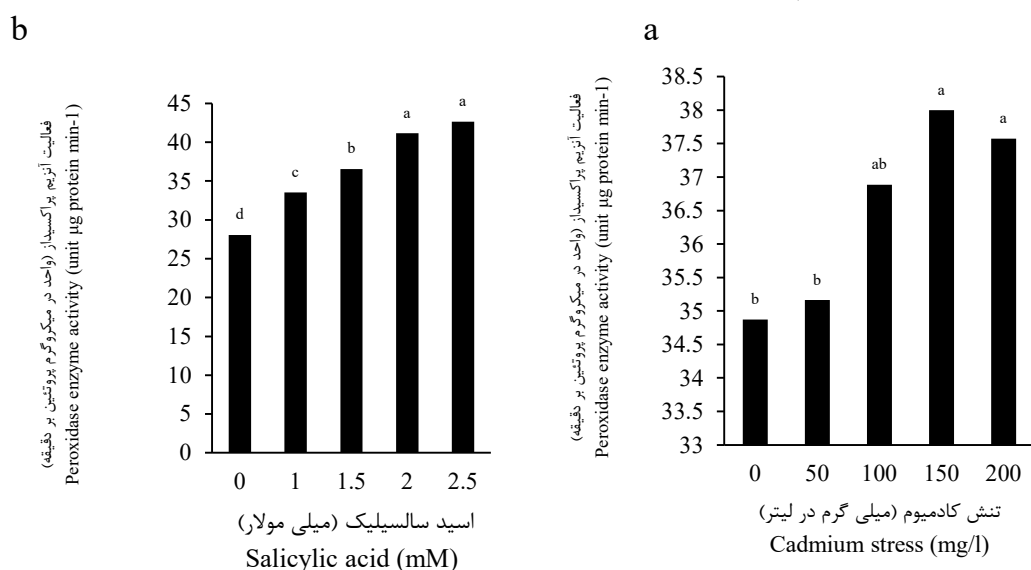
ns, * and ** are non-significant and significant at the five percent, one percent probability level, respectively



شکل ۸- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و سالیسیلیک اسید (b) بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه های کینوا. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجود داشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 8- The effect of cadmium stress treatment (a) and salicylic acid (b) on catalase enzyme activity. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۹). H_2O_2 بیشتر توسط پراکسیداز (POD) و کاتالاز (CAT) به اکسیژن و آب تبدیل می‌شود (Guedes et al., 2021). تیمار سالیسیلیک اسید سبب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز شد. از سوی دیگر بیشترین افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در شرایط پیش تیمار ۲/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد که حدود ۵۱/۹۲ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (شکل ۹ ب).



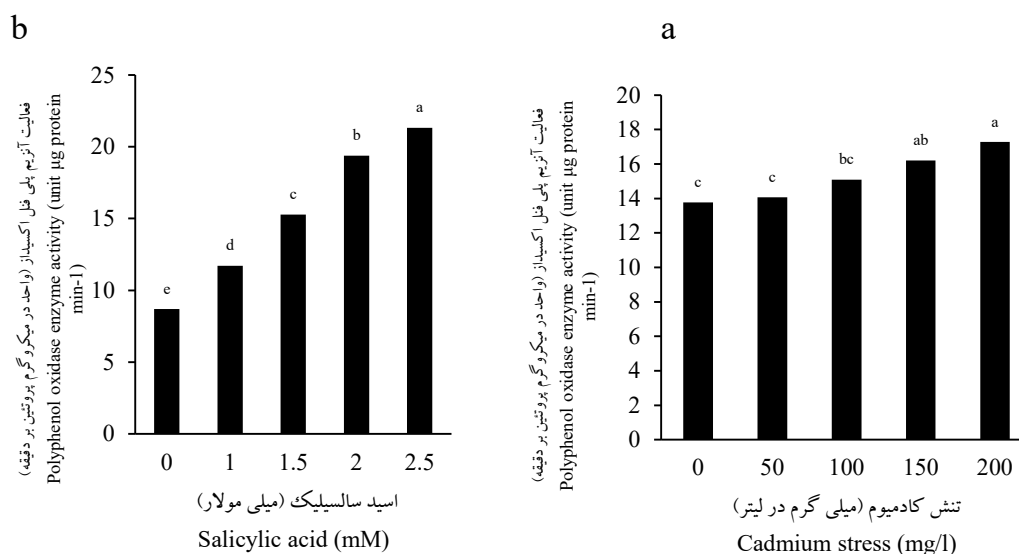
شکل ۹- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و سالیسیلیک اسید (b) بر فعالیت آنزیم پراکسیداز. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 9- The effect of cadmium stress treatment (a) and salicylic acid (b) on Peroxidase enzyme activity. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

در لیتر فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز در حدود ۲/۱۰ تا ۲۵/۴۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. پیش تیمار نمودن بذور کینوا با ۲/۵ و ۲ میلی مولار سالیسیلیک اسید به افزایش فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز را به ترتیب ۴۵/۰۳ و ۲۲/۵۱ درصد منجر شد (شکل ۱۰ ب).

فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز: بر اساس

نتایج جدول تجزیه واریانس، فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز تحت تأثیر اثر ساده تنش کادمیوم و سالیسیلیک اسید قرار گرفت، اما اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید معنی دار نشد (جدول ۲). همانطور که در شکل ۱۰ آ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت تنش کادمیوم از ۵۰ به ۲۰۰ میلی گرم



شکل ۱۰- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و سالیسیلیک اسید (b) بر فعالیت آنزیم پراکسیداز. مقادیر میانگین چهار تکرار هستند و حروف یکسان وجودناشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می دهند.

Figure 10- The effect of cadmium stress treatment (a) and salicylic acid (b) on Peroxidase enzyme activity. The values are the mean values of four repetitions and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

بحث

القاء تحمل به تنش نیز مورد نیاز است. افزایش درصد جوانه زنی در تیمار با سالیسیلیک اسید در گیاه کاسنی گزارش شده است (Haleema et al., 2023). تیمارهای آلی همانند سالیسیلیک اسید می توانند با افزایش و تنظیم فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و هیدرولیز کننده نشاسته در طی جوانه زنی به افزایش درصد و سرعت جوانه زنی بذر در شرایط متغیر محیطی منجر می شود (Coolbear, 2020). پیش تیمار سبب تغییرات زیستی و فیزیولوژیکی زیادی در بذر و همچنین گیاه حاصل از آن می شود، به طوری که نتیجه این عمل در جوانه زنی، استقرار اولیه گیاه، زودرسی و افزایش کمی و کیفی محصول قابل مشاهده می باشد. مرحله جوانه زنی بذر جهت تعیین تراکم نهایی بوته در واحد سطح اهمیت زیادی دارد و تراکم کافی بوته

در پژوهش حاضر، تأثیر مثبت غلظت های مختلف سالیسیلیک اسید بر گیاهچه کینوا در شرایط سمیت کادمیوم در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد. بر اساس نتایج این پژوهش درصد جوانه زنی بذور کینوا با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافته است (شکل ۱) که با نتایج Sheikhzadeh et al (2021) بر روی گیاه گاوزبان (*Borago officinalis*)، Silva et al (2021) روی پنبه (*Gossypium*) مطابقت داشت. پیش تیمار نمودن بذور کینوا با سالیسیلیک اسید منجر شد تا درصد جوانه زنی بذور در شرایط بدون تنش و نیز در شرایط تنش کادمیوم افزایش یابد. اگرچه سالیسیلیک اسید در نمو و پیشرفت علائم تنش شرکت می کند، این هورمون برای فرآیند سازش و

جوانه‌زنی (شکل ۲) منجر شد و این موضوع نشان دهنده افزایش قدرت بذر کینوا با کاربرد سالیسیلیک اسید است. اگر بذر نتواند رطوبت را جذب کند و یا در جذب آب توسط بذر اختلالی به وجود بیاید، فعالیت‌های متابولیک جوانه‌زنی در داخل بذر آهسته صورت می‌گیرد و در نتیجه مدت زمان لازم برای خروج ریشه‌چه از بذر افزایش می‌یابد که تحت تنش علاوه بر اینکه در مرحله آب نوشی و استقرار گیاهچه جذب آب کاهش می‌یابد، یون‌های اضافه نیز جذب می‌شوند که سبب ایجاد پتانسیل اسمزی شده و در نهایت باعث تأخیر در جوانه‌زنی و خروج ریشه‌چه می‌شود (Mousavi & Omid, 2021). کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر توسط کادمیوم در گیاهان شنبلیله (Zayneb et al., 2015) و زیره سبز (Salarizadeh et al., 2016) نشان داده شده است. همچنین، کاهش جوانه‌زنی بذر ممکن است به اثرات منفی کادمیوم بر جذب حرکت آب یا تجزیه و یا تغییر در ویژگی‌های نفوذپذیری غشای سلولی مرتبط باشد (Zayneb et al., 2016; Salarizadeh et al., 2015). پیش‌تیمار سبب تغییرات زیستی و فیزیولوژیکی زیادی در بذر و همچنین گیاه حاصل از آن می‌شود، به طوری که نتیجه این عمل در جوانه‌زنی، استقرار اولیه گیاه، زودرسی و افزایش کمی و کیفی محصول قابل مشاهده می‌باشد. 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 بذرها کشت شده به طور کامل و با سرعت کافی جوانه‌زنند (Najafi et al., 2015). یافته‌های (Rehman et al., 2019) نشان‌دهنده این

در واحد سطح هنگامی حاصل می‌شود که بذرها کشت شده به طور کامل و با سرعت کافی جوانه‌زنند (Najafi et al., 2015). نتایج (Rehman et al., 2019)، نشان دادند خیساندن بذر کدو (*Cucurbita*) سبب افزایش درصد جوانه‌زنی بذر و کاهش متوسط مدت جوانه‌زنی شد و نیز پیری بذر را کاهش داد. پژوهشی که برای تعیین بهترین مدت زمان پیش‌تیمار رطوبتی 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 نامطلوب منجر به تحمل بهترین شرایط می‌شود (Farzaneh et al., 2013). (Anwar et al., 2021) گزارش کردند سمیت کادمیوم در جوانه‌زدن نهال‌های سورگوم (*Sorghum*) دو رنگ فعالیت آنزیم هیدرولیز را مختل می‌کند و تأثیر منفی بر انتقال محصولات هیدرولیز به سمت محور جنینی در حال رشد دارد و در نتیجه سبب افزایش میانگین مدت جوانه‌زنی می‌شود. در واقع سرعت جوانه‌زنی رابطه معکوسی با میانگین مدت زمان جوانه‌زنی دارد، به نحوی که هر چه سرعت جوانه‌زنی افزایش یابد، مدت زمان لازم برای جوانه‌زدن بذر نیز کاهش پیدا می‌کند. میانگین مدت جوانه‌زنی همچنین با کیفیت توده بذری رابطه عکس دارد، بنابراین هر چه میانگین مدت جوانه‌زنی بذر کمتر باشد، نمونه بذری از کیفیت بیشتری برخوردار است. می‌توان بیان نمود که سالیسیلیک اسید با بهبود فرایند جوانه‌زنی به افزایش سرعت جوانه‌زنی (شکل ۳) و کاهش میانگین مدت زمان

شدن بذر می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد و کیفیت محصول داشته باشد (Shahrousvand, 2010). (Najafi et al., 2015) تنش کادمیوم باعث کاهش طول گیاهچه شد که با نتایج Sheikhzadeh et al., (2021) روی گیاه گاوزبان، Silva et al. (2021) روی پنبه مطابقت داشت. افزایش در شاخص‌های رشد گیاهان تحت تنش کادمیوم در پاسخ به سالیسیلیک اسید ممکن است با تغییراتی در مواد معدنی و نقش حفاظتی غشا مرتبط باشد که تحمل گیاه را در برابر آسیب افزایش می‌دهد. بنابراین این نتیجه نشان می‌دهد که طول گیاهچه در جاتی از تحمل به تیمارهای کادمیوم را نشان می‌دهد. به علت ماهیت متحرک، کادمیوم از طریق ریشه وارد گیاهان می‌شود و از طریق ناقلان مختلف آوند چوبی و آوند آبکش به شکل یونی به سمت شاخه‌ها منتقل می‌شود. از هر دو مسیر انتقال آپوپلاستیک و سمپلاستیک برای ورود کادمیوم به آوند چوبی استفاده می‌شود و در نهایت به شاخه منتقل می‌شود (Dong et al., 2019). یون‌های کادمیوم بیش از حد به آسانی توسط ریشه گیاه جذب می‌شوند، سپس به اندام‌های هوایی منتقل می‌شوند و تغییرات پیچیده‌ای را در گیاهان در سطوح مختلف ایجاد می‌کنند (Salarizadeh et al., 2016). پیش تیمار سالیسیلیک اسید در مقایسه با تیمار شاهد، رشد طولی ریشه‌چه و گیاهچه را به ترتیب به میزان ۴۶ و ۳۰ درصد افزایش داد (Ghaderi, Aliloo, 2023). پیش تیمار سالیسیلیک اسید صفات جوانه زنی و رشدی را با تعدیل اثر تنش‌ها بهبود می‌بخشد (Zhu et al.,

است که خیساندن بذر کدو (*Cucurbita*) نیز سبب افزایش درصد جوانه زنی بذر، کاهش متوسط مدت جوانه زنی شد و نیز پیری بذر را کاهش داد. پژوهشی که برای تعیین بهترین مدت زمان پیش تیمار رطوبتی و بررسی اثر آن بر روی صفات مختلف رشدی در هنگام جوانه زنی بذر تربچه انجام شد، نشان داد مجموعه این فاکتورها موجب رشد سریعتر و استقرار بهتر گیاهچه‌های تربچه در شرایط نامطلوب منجر به تحمل بهترین شرایط می‌شود (Farzaneh et al., 2013) Ghaderi, (2023) & Aliloo نشان دادند تیمار سالیسیلیک اسید در گیاه کلزا منجر به کاهش زمان لازم برای رسیدن به ۹۰ درصد جوانه زنی شد. بعضی از پژوهشگران اثرات مثبت پیش تیمار را بر جوانه زنی گیاهان مختلف مورد بررسی قرار دادند که این روش‌های تیماری در افزایش شاخص‌های جوانه زنی موثر هستند (Murungu et al., 2006; Demir kaya et al., 2012; Ansari et al., 2003). کاهش جوانه زنی بذر توسط کادمیوم در گیاهان شنبلیله (Zayneb et al., 2015) al., و زیره سبز (Salarizadeh et al., 2016) نشان داده شده است. کاهش جوانه زنی بذر ممکن است به اثرات منفی کادمیوم بر جذب و حرکت آب یا تجزیه و یا تغییر در ویژگی‌های نفوذپذیری غشای سلولی مرتبط باشد (Salarizadeh et al., 2016). کاهش درصد جوانه زنی روزانه در اثر سمیت مس در کاهو گزارش شده است (Shams et al., 2018). جوانه زنی از مهمترین و حساسترین مراحل رشدی محصولات زراعی است. یکنواختی و درصد سبز

بهبود در وزن خشک ریشه‌چه (۷۴/۱ درصد) و گیاهچه (۶۰ درصد) در تیمار با سالیسیلیک اسید در نتایج (Ghaderi & Aliloo, 2023) در گیاه کلزا گزارش شده است. افزایش شاخصه‌های رشدی گیاهچه مانند طول و وزن گیاهچه ارتباط بسیار نزدیکی با سرعت جوانه‌زنی دارند، زیرا بذور تحت پیش‌تیمار زودتر جوانه‌زده و گیاهچه بزرگتری را ایجاد می‌کنند. از سوی دیگر، تمامی تیمارها در یک زمان مشخص ارزیابی می‌شوند. گیاهان برای تعدیل تنش اکسیداتیو، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز، پراکسیدازهای مختلف و سوپراکسید دیسموتاز، همچنین سنتز آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی را افزایش می‌دهند تا وضعیت ردوکس سلولی را کنترل کنند (Jafarhaddadian et al., 2020). این موضوع به خوبی اثبات شده است که سیستم آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی در تحمل گیاه به شرایط تنش‌زا دارد و فعالیت یک یا تعداد بیشتری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان قرار گرفته در شرایط تنش‌زا افزایش می‌یابد و منجر به افزایش تحمل گیاه به تنش می‌شود (Gerami et al., 2018). فعال شدن بیش از حد ممکن است به دلیل توانایی آن در تبدیل رادیکال‌های سوپر اکسید به H_2O_2 باشد (Rehman et al., 2011; Shahid et al., 2019). مشابه این یافته‌ها، افزایش فعال‌سازی آنزیم کاتالاز در تنش فلزات در گیاه کینوا به خوبی ثبت شده است (Abdal et al., 2021; Iftikhar et al., 2021). سمیت H_2O_2 زمانی که به اکسیژن مولکولی و آب تبدیل می‌شود، کاهش می‌یابد. این مرحله مهم در سم زدایی از H_2O_2 از طریق بیان بیش از حد کاتالاز و

(2021). افزایش شاخصه‌های رشدی گیاهچه مانند طول و وزن گیاهچه ارتباط بسیار نزدیکی با سرعت جوانه‌زنی دارند، زیرا، بذور تحت پیش‌تیمار زودتر جوانه‌زده و گیاهچه بزرگتری را ایجاد می‌کنند. در حالی که، تمامی تیمارها در یک زمان مشخص ارزیابی می‌شوند. تیمار سالیسیلیک اسید در گیاهان، سیستم آنتی‌اکسیدانی را تنظیم می‌کند، رشد و عملکرد را بهبود می‌بخشد و سبب کاهش آسیب اکسیداتیو در شرایط تنش فلزات سنگین می‌شود (Ghasemifar & Habibi, 2023). مهار رشد توسط کادمیوم می‌تواند به علت مهار تقسیم سلولی و سرعت طویل شدن سلول‌ها باشد که اغلب توسط مهار غیر قابل برگشت پمپ پروتون که مسئول این فرآیند است، رخ می‌دهد (Amooaghaie et al., 2013) و با نتایج Amjad et al (2021)، روی گیاه کینوا مطابقت دارد. بسیاری از پژوهشگران گزارش کرده‌اند که تحت تنش کادمیوم کاهش قابل توجهی در رشد گیاهان وجود دارد (Panda et al., 2017). به طور مشابه، Rehman et al., (2019). در یافتند 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 (Rehman et al., 2019; Abdal et al., 2021). اثر مثبت سالیسیلیک اسید در گیاهان مختلف به تنش به نقش سالیسیلیک اسید در جذب عناصر غذایی، توانایی رشد نسبت داده شده است. روند

در تیمار با سالیسیلیک اسید در ذرت گزارش شده است (Pruthvi Krishna et al., 2023). تنش کادمیوم به طرز متفاوتی فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز را تغییر داد (Kamalvand et al., 2022). شرایط تنش از جمله تنش کادمیوم سبب عدم تعادل یونی می شود که تولید گونه های اکسیژن فعال (ROS) را تحریک می کند و منجر به اختلال در غشای سلول و اندامک می شود که فعالیت متابولیکی سلول را از طریق تغییر سیگنالینگ مولکولی، تنظیم اسمزی و تولید متابولیت های ثانویه تغییر می دهد. سیستم دفاعی گیاه از طریق پاسخ آنتی اکسیدانی، که از اجزای آنتی اکسیدانی (آنزیمی و غیر آنزیمی) تشکیل شده است، برای مقابله با ROS تولید می شود و اثرات مخرب ROS را خنثی می کند (Ullah et al., 2019). Dawuda et al (2020), در گیاه کاهو نشان دادند ۱۰۰ میلی مولار $CdCl_2$ هر دو فعالیت پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز در ریشه و برگ گیاهان را افزایش داد. افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی در گیاه یونجه تحت تنش کادمیوم گزارش شده است (Pakbaz et al., 2023). پیش تیمار نمودن بذور کینوا با سالیسیلیک اسید موجب شد تا فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز را افزایش داد که با نتایج Kwon et al (2023), در گیاه مریم گلی مطابقت داشت. (Pai & Sharma 2023) در برنج افزایش فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز تحت تنش گزارش کردند. پژوهش های مختلف نشان داده اند تیمار SA اگزوزن سبب

پراکسیداز به دست می آید (Shahid et al., 2019; Amjad et al., 2021). تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم و آسیب غشاء در بسیاری از گیاهان مشاهده شده است (Rasafi et al., 2021; Kaya et al., 2021; Murtaza et al., 2019). نتایج (Pai & Sharma 2023) در برنج افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانت را در اثر پیش تیمار با سالیسیلیک اسید نشان داد. افزایش فعالیت بسیاری از آنزیم های آنتی اکسیدانی، SOD، APX و CAT توسط سالیسیلیک اسید نیز نشان داده شده است (Jini & Joseph, 2017). افزایش سطح بیان آنزیم های آنتی اکسیدان در تیمارهای بذری توسط سالیسیلیک اسید گزارش شده است (Tayyab et al., 2020). نتایج پژوهش Alharby و همکاران (۲۰۲۱) نشان می دهد فعالیت های CAT، APX و POD روند افزایشی بر سمیت کادمیوم دارد. پژوهش حاضر نشان داد که تحت تنش کادمیوم فعالیت هر دو آنزیم افزایش یافته است. نتایج مشابهی در فعالیت این آنزیم ها تحت تنش کادمیوم در آزمایش های خاک و نیز در کشت محلول در کینوا (Amjad et al., 2021; Abdal et al., 2021; Iftikhar et al., 2021) و همچنین گیاهان دیگر مشاهده شده است (Rehman et al., 2019; Shahid et al., 2019). بنابراین، می توان استنباط کرد که هر دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز نقش مهمی در سم زدایی H_2O_2 و آسیب سلولی حاصل در گیاهان تحت تنش کادمیوم دارند (Abdal et al., 2021; Iftikhar et al., 2021). افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز توسط (Pai & Sharma 2023) در برنج گزارش شده است. افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از تأثیر منفی تنش کادمیوم می‌کاهد و موجب بهبود ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها می‌شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از تمامی افرادی که در اجرای پژوهش همکاری داشتند کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

References

- AbdEl-Moneim, D. Elsarag, E.I.S., Aloufi, S., El-Azraq, A.M. Alshamrani, S.M., Safhi, F.A.A., & Ibrahim, A.A. (2021) Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*): Genetic Diversity According to ISSR and SCoT Markers, Relative Gene Expression, and Morpho-Physiological Variation under Salinity Stress. *Plant Journal*, 10, 2802. doi: [10.3390/plants10122802](https://doi.org/10.3390/plants10122802).
- 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-oxidative stress: Implications for phytoremediation. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-15. doi: [10.1007/s10653-021-01082-y](https://doi.org/10.1007/s10653-021-01082-y).
- Abdolrahmani, B., Ghasemi Golezani, K., Valizadeh, M., Feizi Asl, V., & Tavakoli, A.R. (2011) Effect of Seed Priming on the Growth Trend and Grain Yeild of Barley (*Hordeum Vulgare L.*) CV. Abidar under Rainfed Conditions. *Seed and Plant Production Journal*, 27-2(1): 111-128. doi://sppj.areeo.ac.ir/article_110427.htm [?lang=en. [In Persian]
- Aebi, H. (1984) Catalase in vitro. *Methods Enzymol*, 105: 121-126. doi:

افزایش فعال شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (et al., 2021; [Golkar et al., 2019](#); [Brahimova](#)).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد با افزایش شدت تنش کادمیوم، صفات درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین درصد جوانه‌زنی، طول و وزن خشک گیاهچه کاهش و میانگین مدت جوانه‌زنی، زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز افزایش یافت. تنش کادمیوم سبب عدم تعادل یونی می‌شود که باعث تحریک تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و 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 به‌دست آمده، پیش‌تیمار نمودن بذره‌های کینوا با سالیسیلیک اسید از طریق کوتاه کردن مدت زمان لازم جوانه‌زنی سبب می‌شود تا در شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم بذره‌های پیش‌تیمار شده نسبت به بذره‌های 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 ضعیف‌پوسته بذر از آسیب‌های کادمیوم کاسته و فرآیند جوانه‌زنی را در برابر سمیت این فلز سنگین محافظت کند. با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان طی جوانه‌زنی سبب بهبود شرایط جوانه‌زنی و رشد اولیه می‌شود به عبارتی انجام پیش‌تیمار بذر با سالیسیلیک اسید در غلظت ۲/۵ میلی‌مولار و در سطوح مختلف تنش کادمیوم از راه افزایش توان بذر و گیاهچه و فعالیت

- Anwar, S., Shafiq Zaib-un, F., Muhammad, U., Ashraf, Y., & Ali, N. (2021) Effect of cadmium stress on seed germination, plant growth and hydrolyzing enzymes activities in mungbean seedlings. *Journal of Seed Science*, 43. doi: [10.1590/2317-1545v43256006](https://doi.org/10.1590/2317-1545v43256006)
- Bano, K., Kumar, B., Tenguria, R., Abdullah Alsahli, A., Chen, Y. (2023) Salicylic acid and sulfur synergism ameliorates arsenic toxicity in *Brassica napus* through regulating carbohydrate accumulation and ethylene production, *South African Journal of Botany*, 160; 246-259. doi: [10.1016/j.sajb.2023.07.017](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.07.017).
- 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. doi: [10.1016/j.jbiotec.2021.02.007](https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.02.007).
- Chang, C.J., & Kao, C.H. (1998) H₂O₂ metabolism during senescence of rice leaves: changes in enzyme activities in light and darkness. *Plant. Growth Regul.*, 25 (1): 11-15. doi: [10.1023/A:1005903403926](https://doi.org/10.1023/A:1005903403926).
- Coolbear, P. (2020) Mechanisms of Seed Deterioration. *Seed Quality*. CRC Press eBook doi: [10.1201/9781003075226-8](https://doi.org/10.1201/9781003075226-8).
- Dawuda, MM., Liao, W., Hu, L., Yu, J., Xie, J., Calderón-Urrea, A., Wu, Y., & Tang, Z. (2020) Foliar application of abscisic acid mitigates cadmium stress and increases food safety of cadmium-sensitive lettuce (*Lactuca sativa* L.) genotype. *Peer Journal*, 8: e9270. doi: [10.7717/peerj.9270](https://doi.org/10.7717/peerj.9270).
- DeCaroli, M., Furini, A., Dalcorso, G., Rojas, M., & Sansebastiano, G.P.D. (2020) Endomembrane Reorganization Induced by Heavy Metals. *Plant*, 9, 482. doi: [10.1016/s0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05016-3). PMID: 6727660.
- Alharby, HF. Al-Zahrani, HS. & 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(4):169. doi: doi.org/10.3390/toxics10040169.
- Amjad, M., Iqbal, M.M., Abbas, G., Farooq, A.B.U., Naeem, M.A., Imran, M., Murtaza, B., Nadeem, M., & Jacobsen, S.-E. (2021) 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*, 1–14. doi: [10.1007/s10653-021-00826-0](https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0).
- Amooaghaie, R., Marefat, E., & Shabani, L. (2013) Interaction of salicylic acid and cadmium on growth, photosynthetic pigments and ion distribution in arial parts of soybean plantlets. *Iranian Journal of Plant Biology*, 4(14), 75-88. doi: [doi://www.sid.ir/paper/160042/en](https://www.sid.ir/paper/160042/en). [In Persian]
- Angeli, V., Miguel Silva, P., Crispim Massuela, D., Khan, M.W., Hamar, A., Khajehei, F., Graeff-Hönniger, S., & Piatti, C. (2020) Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the “Golden Grain” and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization. *Foods*, 9, 216. doi: [10.3390/foods9020216](https://doi.org/10.3390/foods9020216).
- Ansari, O., Chogazardi, H. R., Sharifzadeh, F., & Nazarli, H. (2012) Seed reserve utilization and seedling growth of treated seeds of mountain rye (*Secale montanum*) as affected by drought stress. *Cercetari agronomice in Moldova*, 45 (2): 43-48.7. doi: [doi://api.semanticscholar.org/CorpusID:83608207](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:83608207).

- environments. *Journal of Experimental Botany*, 68 (4): 843-856.
- Gerami, M., Ghorbani, A., & Karimi, S. (2018) Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium-induced toxicity in *Salvia officinalis* L.. *Iranian Journal of Plant Biology*, 10(1), 81-96. doi: [10.22108/ijpb.2018.108633.1069](https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.108633.1069). [In Persian]
- 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 (54) :123-138. doi://jisp.iut.ac.ir/article-1-1763-en.html.
- Ghafoor, M.F., Ali, Q., & A Malik. (2020) Effects of salicylic acid priming for salt stress tolerance in wheat. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*. 2020, e024. <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2020i1.24>.
- Ghasemifar, E., & Habibi, G. (2023) The Effect of Salicylic Acid and Nitric Oxide Pretreatment on Reducing the Toxicity of Zinc Nanoparticles in *Phlomis tuberosa*. *Iranian Journal of Plant Biology*, 14(4), 1-20. doi: [10.22108/ijpb.2023.136672.1310](https://doi.org/10.22108/ijpb.2023.136672.1310). [In Persian]
- Golkar, P., Taghizadeh. M., & Yousefian, Z. (2019) The effects of chitosan and salicylic acid on elicitation of secondary metabolites and antioxidant activity of safflower under in vitro salinity stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 137, 575–585. doi: [10.1007/s11240-019-01592-9](https://doi.org/10.1007/s11240-019-01592-9).
- 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 doi: [10.3390/plants9040482](https://doi.org/10.3390/plants9040482).
- DemirKaya, M., Okçu Gamze Atak, M., Çikili, Y., & Kolsarici, O. (2006) Seed treatment to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L). *European Journal of Agronomy*, 24, 291-295. doi: [10.1016/j.eja.2005.08.001](https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.08.001).
- Dong, Q., Fang, J., Huang, F., & Cai, K. (2019) Silicon amendment reduces soil cd availability and Cd uptake of two Pennisetum species. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(9): 1624. doi: [10.3390/ijerph16091624](https://doi.org/10.3390/ijerph16091624). PMID: 31075897; PMCID: PMC6539824.
- Ellis, R.H., & Roberts, E.H. (1981). The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, 9: 373-409. doi://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALAGROLINEINRA8110518359.
- ElTaher, 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. doi: [10.3390/plants11010115](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(1): 65-74. doi://ecophysiology.gorgan.iau.ir/article_557085.html. [in Persian]
- FinchSavage, W.E., & Footitt, S. (2017) Seed dormancy cycling and the regulation of dormancy mechanisms to time germination in variable field

- 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*, 2021, 44, 257–272. doi: [10.1007/s10653-021-00937-8](https://doi.org/10.1007/s10653-021-00937-8).
- ISTA. (2017) International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, *Bassersdorf*, Switzerland. doi://www.ingentaconnect.com/content/ista/rules.
- Jafarhaddadian, E., Zoufan, P., & Shafiei, M. (2021) Effect of NaCl on Cd stress modulation, antioxidant system and Cd uptake and accumulation in *Malva parviflora* L. *Iranian Journal of Plant Biology*, 12(4), 59-76. doi: [10.22108/ijpb.2021.122156.1204](https://doi.org/10.22108/ijpb.2021.122156.1204). [In Persian]
- JawadHassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., Wajid, M., Ahmed, M., Abbas Shah, G., Peng, Y., & Li, Z (2020). Effect of Cadmium Toxicity on Growth, Oxidative Damage, Antioxidant Defense System and Cadmium Accumulation in Two Sorghum Cultivars. *The Plant Journal*, 9(11):1575. doi: [10.3390/plants9111575](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. doi: [10.1016/j.rsci.2016.07.007](https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.07.007)
- Kamalvand, A., Hosseini Sarghein, S., & Karamian, R. (2022) Impact of cadmium stress on growth and physiological responses of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 12(1), 51-65. doi: [10.22034/jppb.2022.15483](https://doi.org/10.22034/jppb.2022.15483)
- Kar, M., & D. Mishra. (1976) Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase content and oxidative stress. *Environmental Pollution*, 280, 116992. doi: [10.1016/j.envpol.2021.116992](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116992). Epub 2021 Mar 21.
- Hakimi, Y. Fatahi, R., Naghavi, M.R., & Zamani, Z. (2021) Effect of Salicylic Acid and Methyl Jasmonate on Stress Indices in *Papaver bracteatum* Lindl. 1, x. doi: [10.3390/IECPS2021-12039](https://doi.org/10.3390/IECPS2021-12039)
- Haleema, S. Muhammad, Sh. Aysha, K., & Muhammad, F. (2023) Interactive effect of salicylic acid and ascorbic acid on gaseous exchange and mineral nutrients of chicory (*Cichorium intybus* L.) under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 55(6): 1999-2012. doi://[dx.doi.org/10.30848/PJB2023-6\(22\)](https://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-6(22)).
- Hasanbeigi, H., Mohammadi, M., & saidi, M. (2021) The improvement growth indices and seed germination of *Echinacea purpurea* by some of pre-harvest and priming treatments of seeds. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 34(2), 399-411. doi: [20.1001.1.23832592.1400.34.2.9.8](https://doi.org/20.1001.1.23832592.1400.34.2.9.8).
- Heidari, M., Esmailzadeh Bahabadi, S., & sangtarash, M. (2021) Effect of Salicylic Acid on Physiological and Biochemical characteristics of *Melissa officinalis* L. under Cadmium Stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 34(3), 694-707. doi: [20.1001.1.23832592.1400.34.3.10.1](https://doi.org/20.1001.1.23832592.1400.34.3.10.1) [In Persian]
- Hunter, E.A., Glasbey, C.A., & Naylor, R.E.L. (1984) The analysis of data from germination tests. *Journal of Agricultural Science*, 102 (1): 207 -213. doi: [10.1017/S0021859600041642](https://doi.org/10.1017/S0021859600041642)
- Hussain, M.I., Farooq, M., Syed, Q.A., Ishaq, A., Al-Ghamdi, A.A., & Hatamleh, A.A. (2021) Botany, Nutritional Value, Phytochemical Composition and Biological Activities of Quinoa. *The Plant Journal*, 2021, 10, 2258. doi: [10.3390/plants10112258](https://doi.org/10.3390/plants10112258)

- growth and biochemical characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.) seedlings with seed priming under cadmium stress conditions. *Iranian Journal of Plant Biology*, 11(1), 23-42. doi: [10.22108/ijpb.2019.111889.1104](https://doi.org/10.22108/ijpb.2019.111889.1104). [In Persian]
- Matengu, T., Makaza, W., Ngadze, E., Rugare, J. T., Upenyu, M., & Gasura, E. (2021) Role of salicylic acid in disease resistance against *Alternaria* spp in tomatoes (*Solanum esculentum* L.). *Journal of Current Opinion in Crop Science*, 2(4), 391-401. doi://www.jcoocs.com/index.php/ej/article/view/121
- 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. doi: [10.3390/ijms20225798](https://doi.org/10.3390/ijms20225798)
- Mousavi, S. E., & Omid, H. (2021) Effect of biological pre-treatment of seed on germination and growth indices and pigments of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) under salinity stress. *Iranian journal of Seed Science and Technology*. 10(3), 133-144. doi: [10.22034/ijssst.2021.343191.1349](https://doi.org/10.22034/ijssst.2021.343191.1349) [In Persian]
- 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, 362–370. doi: [10.1007/s11356-018-3605-7](https://doi.org/10.1007/s11356-018-3605-7)
- Murungu, F.S., Nyamugafata, P., Chiduzza, 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 activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, 57 (2): 315-319. doi: [10.1104/pp.57.2.315](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 ascorbate-glutathione cycle. *Physiologia Plantarum*, 173, 8–19. doi: [10.1111/ppl.13159](https://doi.org/10.1111/ppl.13159)
- 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. doi: [10.1007/s00709-017-1136-6](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(2):310. doi: [10.3390/plants12020310](https://doi.org/10.3390/plants12020310)
- Li, H., H, Yue., J, Xie., J, Bu., L, Li., X, Xin., Y, Zhao., H, Zhang., Li, Yang., J, Wang., & X, Jiang. (2021) Transcriptomic profiling of the high-vigour maize (*Zea mays* L.) hybrid variety response to cold and drought stresses during seed germination. *Scientific Reports*, 11: 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98907-8>
- Maely, A.C. (1955) Assay of catalase and peroxidase. *Methods Enzymol*, 2: 764-775. doi:[10.1002/9780470110171.ch14](https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14)
- Maghsoudi, K., Arvin, M.J., & Ashraf, M. (2020) Mitigation of Arsenic Toxicity in Wheat by the exogenously applied salicylic acid, 24-epi-brassinolide and silicon. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 20, 577–588. doi:[10.1007/s42729-019-00147-3](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00147-3)
- Mahmoudi, F., Sheikhzadeh Mosaddegh, P., Zare, N., & Esmailpour, B. (2019) Improvement of seed germination,

- Available at Research Square
doi: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(4), 855-868. doi:20.1001.1.23832592.1400.34.4.11.4 [In Persian]
- Rasafi, T.E., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E.E., Bolan, N., Tack, F.M., Sebastian, A., Prasad, M.N.V., & Rinklebe, J. (2021) Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52, 1-52. doi:10.1080/10643389.2020.1835435
- Rehman, H., Iqbal, H., Basra, S.M.A., Afzal, I., Farooq, M., Wakeel, A., & Ning, W. (2019) Seed priming improves early seedling vigor, growth and productivity of spring maize. *Journal of International Agriculture*, 14(9): 1745-1754. doi:10.1016/S2095-3119(14)61000-5
- Saeidi, S., Siadat, S.A., Moshatati, A., Moradi-Telavat, S.N. (2021) Effect of sowing time and nitrogen fertilizer rates on growth, seed yield and nitrogen use efficiency of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) in Ahvaz. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21, 354-367. doi:agrobreedjournal.ir/article-1-1080-en.html [In Persian]
- Salarizadeh, S., Kavousi, H.R., & Pourseyadi, S. (2016) Effect of cadmium on germination characters and biochemical parameters of two Iranian ecotypes of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 5: 15-22. doi:10.22092/jmpb.2016.108919
- Rajpar, I., Khanif, Y.M. & Memon, A.A., Maize (*Zea mays* L.). *Soil and Tillage Research*, 74: 161- 168. doi: 10.1016/j.still.2003.06.003
- Najafi, Gh., Khomari, S., & Javadi, A. (2015) Germination response of Canola seeds to seed vigor changes and hydro-priming. *Seed Science Research*, 45(4): 55-70. doi: 20.1001.1.22520961.1394.5.17.6.9 [In Persian]
- 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 (2): 400-413.0000. doi: 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. *Ecotoxicology environmental biology*, 20(4), 193-204. doi: 10.22364/eeb.20.18
- Pakbaz, Z., Ebrahimi, A., & Ben, C. (2023) Genetic control and molecular responses of *Medicago truncatula* to cadmium stress. *Euphytica*, 219, 84. doi:10.1007/s10681-023-03200-6
- Panda, A., Rangani, J., Kumari, A., & Parida, A. (2017) Efficient regulation of arsenic translocation to shoot tissue and modulation of phytochelatin levels and antioxidative defense system confers salinity and arsenic tolerance in the Halophyte *Suaeda maritima*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 143, 149-171. doi:10.1016/j.envexpbot.2017.09.007
- PruthviKrishna, 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.

- Botanica Croatica*, 80(1), 18–28. doi:[10.37427/botcro-2021-007](https://doi.org/10.37427/botcro-2021-007)
- Silva, P., Guilherme, M., Guilherme, L., Santos-Oliveira, J., & da Silva, E. (2021) Evaluation of seed germination development and initial growth of cotton plants exposed to cadmium. *Anales de Biologia*, 43:111-116. doi:[10.6018/analesbio.43.11](https://doi.org/10.6018/analesbio.43.11)
- 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. doi:[10.1080/15226514.2022.2068502](https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2068502)
- Stanislawska-Glubiak, E., & Korzeniowska, J. (2022) Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Two Wheat Cultivars Grown under Zinc Stress. *Agronomy*, 12, 60. doi:[10.3390/agronomy12010060](https://doi.org/10.3390/agronomy12010060)
- Sumaiya, F., Rasel, M., Tahjib-Ul-Arif, M., AlGalib, M.A., Sarker, K.K., & Hossain, M.A. (2020) Exogenous salicylic acid and thiourea ameliorate salt stress in wheat by enhancing photosynthetic attributes and antioxidant defense. *Journal Of The Bangladesh Agricultural University*, 18(2):272-282. doi:[10.5455/JBAU.86574](https://doi.org/10.5455/JBAU.86574)
- 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. doi:[10.1111/plb.13032](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 (H₂O₂) Improve Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum*) under Salt Stress. *Asian Journal of Crop Science*, 6(4), 60-69. doi:[10.3390/seeds1020008](https://doi.org/10.3390/seeds1020008)
- (2006) Effect of Seed Priming on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Non-Saline Conditions. *International Journal of Agricultural Research*, 1: 259-264 . doi:[scialert.net/abstract/?doi=ijar.2006.259.264](https://doi.org/scialert.net/abstract/?doi=ijar.2006.259.264)
- 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. *Chemosphere*, 245, 125605. doi:[10.1016/j.chemosphere.2019.125605](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125605)
- Shahid, M., Pinelli, E., Pourrut, B., Silvestre, J., & Dumat, C. (2011) Lead-induced genotoxicity to *Vicia faba* L. roots in relation with metal cell uptake and initial speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74, 78–84. doi:[10.1016/j.ecoenv.2010.08.037](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.037)
- Shahrousvand, S. (2010) Effects of hormonal priming by gibberellic acid and salicylic acid on seed development and seedling physiological quality of two varieties of carrot. MSc. thesis of Plant science, Lorestan University, 35p.
- Shams, M., YildirimI, E., Agar, G., Ercisli, S., Dursun, A., Ekinici, M., Kul, R. (2018) Nitric Oxide Alleviates Copper Toxicity in Germinating Seed and Seedling Growth of *Lactuca sativa* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(1), 167–172. doi:[10.15835/nbha46110912](https://doi.org/10.15835/nbha46110912)
- Sharma, A., Sidhu, G.P., Araniti, F., Bali, A.S., Shahzad, B., Tripathi, D.K., Brestic, M., Skalicky, M., & Landi, M. (2020) The role of salicylic acid in plants exposed to heavy metals. *Molecules*, 25, 540. doi: [10.3390/molecules25030540](https://doi.org/10.3390/molecules25030540)
- 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*

- doi:[10.1007/s11356-015-4270-8](https://doi.org/10.1007/s11356-015-4270-8)
- Zhang, M., Q, Qi., D, Zhang., S, Tong., X, Wang., Y, An., & X, Lu. (2021) Effect of priming on *Carex Schmidtii* seed germination and seedling growth: Implications for tussock wetland restoration. *Ecology and engineering*, 171 (106389): 1-7. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2021.106389](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106389)
- 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*, 10;11(1):9913. doi:[10.1038/s41598-021-89322-0](https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0)
- Zhu, Z., H. Sami., A. Xu, Q., Q. Wu, L. L., Zheng, W. Y., Chen, Z. P., Jin, X. Z., Zhang, H., Li, Y., & Yu, Y. (2021) Effects of seed priming treatments on the germination and development of two rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties under the co-influence of low temperature and drought. *PLOS ONE*, 16: e0257236. doi: [10.1371/journal.pone.0257236](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257236)
- Tarigholizadeh, S., Motafakkerzad, 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(4), 1–12. doi: [10.14720/aas.2021.117.4.773](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. doi:[10.1371/journal.pone.0232269](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232269)
- Ullah, I., Al-Johny, B.O., Al-Ghamdi, K.M., Al-Zahrani, H.A.A., Anwar, Y., Firoz, A., Al-Kenani, N., & Almatry, M.A.A. (2019) Endophytic bacteria isolated from *Solanum nigrum* L., alleviate cadmium (Cd) stress response by their antioxidant potentials, including SOD synthesis by *sodA* gene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174: 197-207. doi:[10.1016/j.ecoenv.2019.02.074](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.074)
- Urmi, T.A., Islam, M.M., Zumur, K.N., Abedin, M.A., Haque, M.M., Siddiqui, M.H., Murata, Y., & Hoque, M.A. (2023) Combined Effect of Salicylic Acid and Proline Mitigates Drought Stress in Rice (*Oryza sativa* L.) through the Modulation of Physiological Attributes and Antioxidant Enzymes. *Antioxidants*, 12, 1438. doi:[10.3390/antiox12071438](https://doi.org/10.3390/antiox12071438)
- Zayneb, C., Bassem, K., Zeineb, K., Grubb, CD., Nouredine, D., Hafedh, M., & Amine, E. (2015) Physiological responses of fenugreek seedlings and plants treated with cadmium. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 10679-10689.

