Journal of Vegetables Sciences, Autumn & Winter 2026, Vol 9, No 18(2), Pages 15-36

doi: 10.22034/iuvs.2024.2023232.1356 Article Type: Research Online ISSN: 2676-4822

The effect of hydropriming, biopriming (*Trichoderma fungus*), and seed coating with nano-chelate on germination indices and antioxidant properties of quinoa leaf extract (*Chenopodium quinoa* Willd.) under cadmium stress

Fatemeh Mahmoudi[1*], Parisa Sheikhzadeh [1]

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Science and Technology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[*]**Corresponding author:** Fatemehmahmoudi2015@gmail.com

(**Received:** 18 February 2024 **Revised:** 04 April 2024 **Accepted:** 13 April 2024)

Extended Abstract

1. **Introduction:** Plants are constantly faced with adverse environmental conditions such as heavy metal stress. Heavy metal stress is one of the most critical abiotic factors that has attracted much attention in the past 30 years. Quinoa (Chenopodium quinoa Wild.) is an annual plant from the Amaranthaceae family, which has been cultivated for thousands of years in South America. The stress caused by the accumulation of heavy metals is considered one of the environmental stresses, which has a wide spread in the world and the effects It hurts plants under stress, and because these metals are not destroyed and have a high tendency to accumulate in biological organs, either by consumption of animals and through entering the food chain, or by direct consumption by humans, their destructive effects and in this sense they have harmful environmental effects. Therefore, this study was conducted to investigate the effect of hydropriming, biopriming (Trichoderma fungus), and coating seeds with nano-chelate on germination indicators and antioxidant properties of quinoa leaf extract (*Chenopodium quinoa* Willd.) under cadmium stress.
2. **Materials and Methods:** To investigate the effect of hydropriming, biopriming (Trichoderma fungus) and seed coating with nanochelate on germination indices and antioxidant properties of quinoa leaf extract (Chenopodium quinoa willd.) under cadmium stress, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design in four replications in the Laboratory of Seed Science and Technology of Mohaghegh Ardabili University in 2024. The experimental treatments included pretreatment methods at four levels (control, hydropriming, biopriming, and seed coating) and cadmium stress (control, 50, 100, and 150 mg/liter). Statistical analysis of the data and comparison of the average of the resulting data, after ensuring their normality, with Statistical software (SAS) Ver 9.4 was used.
3. **Results and Discussion:** The results showed that the cadmium stress of 150 mg/l decreased the germination percentage by 9.46%, the germination rate by 49.68%, and the seedling dry weight by 22.5%, and the quinoa seedling length by 66.6%. Also, cadmium stress was 150 mg/liter, catalase enzyme activity was 13.36%, peroxidase enzyme activity was 19.4%, polyphenol oxidase enzyme was about 37.97%, total phenol content was about 37.97%, hydrogen peroxide content was significantly higher, and it was about 12.5 to increased, by 30% and malondialdehyde increased by about 491.491%. Percentage compared to the control treatment. On the other hand, water pretreatment increased the germination percentage by 17.75% and the germination rate by 97.14%. Also, biopriming with Trichoderm fungus increased polyphenol oxidase enzyme activity by 27.79%, proline content by 65.25%, and hydrogen peroxide by 36.84%. The highest seedling length was related to biopriming with Trichoderma fungus, which was able to increase the seedling length by about 45.45 to 67.06 percent at the same level of cadmium stress compared to untreated samples. Under stress conditions of 150 mg/L of cadmium chloride, the highest catalase enzyme activity was observed in biopriming with Trichoderma fungus, which had no significant difference with hydropriming and coating seeds with nano-chelate, but was about 15.62 percent higher than seeds without pretreatment. Biopriming with Trichoderma fungus increased the peroxidase enzyme activity of quinoa seedlings by 16.87 percent compared to the control treatment. In general, at 150 mg/L cadmium stress, hydropriming and biopriming increased total phenol content by 21.87% and 28.86%, respectively, compared to the control. The highest proline content was observed in the 150 mg/L cadmium chloride stress treatment and was about 25.17% higher than the control treatment, but there was no significant difference with 100 mg/L cadmium stress. Cadmium stress

(150 mg/L concentration) significantly increased the activity of polyphenol oxidase enzyme by about 37.97% compared to zero cadmium stress.

4. **Conclusion:** According to the results of this study, it can be concluded that biopriming with Trichoderma fungus at different levels of cadmium stress by increasing the vigor of seeds and seedlings and increasing the activity of antioxidant enzymes reduces the negative effect of cadmium stress and improves the characteristics of germination and growth of seedlings. But in many cases, hydropriming is not significantly different from biopriming, and in some cases, it has worked better. Therefore, water pretreatment is a simple and cost-effective method, and at the same time, it is simple and does not require complex technical knowledge; it can be easily implemented by farmers. Therefore, this method is recommended to improve germination, seedling growth, and increase the quality and strength of quinoa seeds.

***Keywords*:** Activity of antioxidant enzymes, Germination percentage and speed, Pre-treatment, Phenol

Citation: Mahmoudi, F. & Sheikhzadeh, P. (2026). The effect of hydropriming, biopriming (*Trichoderma fungus*), and seed coating with nano-chelate on germination indices and antioxidant properties of quinoa leaf extract (*Chenopodium quinoa Willd*.) under cadmium stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 18(2), 15-36. doi:10.22034/iuvs.2024.2023232.1356

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

دوفصلنامه علمی علوم سبزی‌ها، سال ۹ ، دوره ۱۸، شماره۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحات (۳۶-۱۵)

شاپا الکترونیکی: ۴۸۲۲-۲۶۷۶ نوع مقاله: پژوهشی doi: 10.22034/iuvs.2024.2023232.1356

تأثیر هیدروپرایمینگ، بیوپرایمینگ (قارچ تریکودرما) و پوشش‌دار کردن بذور با نانو کلات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و خواص آنتی‌اکسیدانی عصاره برگ کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) تحت تنش کادمیوم

فاطمه محمودی[1*]، پریسا شیخ‌زاده مصدق[1]

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

***نویسنده مسئول:** Fatemehmahmoudi2015@gmail.com

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۰۱/۱۶ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۱/۲۵)

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر هیدروپرایمینگ، بیوپرایمینگ (قارچ تریکودرما) و پوشش‌دار کردن بذور با نانو کلات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و خواص آنتی‌اکسیدانی عصاره برگ کینوا (*Chenopodium quinoa* willd.) 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 ۱۴۰۲ اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل روش‌های پیش‌تیمار در چهار سطح (بدون تیمار، هیدروپرایمینگ، بایوپرایمینگ و پوشش دار کردن بذر) و تنش کلرید کادمیوم (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد که تنش کادمیوم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر درصد جوانه‌زنی را حدود ۹/۴۶ درصد، سرعت جوانه‌زنی را حدود ۴۹/۶۸ درصد، وزن خشک گیاهچه را ۲۲/۵ درصد و طول گیاهچه کینوا در حدود ۲۰/۶۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. همچنین بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما باعث افزایش ۲۷/۷۹ درصدی فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز، ۶۵/۲۵ درصدی محتوای پرولین و ۳۶/۸۴ درصدی پراکسید هیدروژن شد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان به این نتیجه رسید که انجام بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما 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 اما در بسیاری موارد هیدروپرایمینگ تفاوت معنی داری با بیوپرامینگ ندارد و در بعضی موارد بهتر عمل کرده است. بنابراین پیش‌تیمار آبی روشی ساده و مقرون به‌صرفه بوده و در عین سادگی و عدم نیاز به دانش فنی پیچیده، به آسانی می‌تواند توسط کشاورزان اجرا گردد.

واژه‌های کلیدی: **درصد و سرعت جوانه زنی، پیش‌تیمار، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، فنل**

مقدمه

استناد: محمودی، ف.، شیخ‌زاده، پ. (۱۴۰۴). تأثیر هیدروپرایمینگ، بیوپرایمینگ (قارچ تریکودرما) و پوشش‌دار کردن بذور با نانو کلات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و خواص آنتی‌اکسیدانی عصاره برگ کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) تحت تنش کادمیوم. *علوم سبزی‌ها*، ۱۸(۲)، ۳۶-۱۵.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به‌صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاهی علفی یکساله و بومی کوه‌های آند در بولیوی، شیلی و پرو، بسیار خوش هضم و منبع غنی از پروتئین، آهن، فسفر، انواع ویتامین‌ها و امگا ۳ است (Mahdi *et al*., 2021; Amerian *et al*., 2023). کینوا یک گیاه چند منظوره است که اخیراً در رژیم غذایی انسان به عنوان جایگزینی برای محصولات حیوانی به عنوان منبع پروتئین استفاده می‌شود (Angeli *et al*., 2020). از برگ‌های جوان کینوا به عنوان سبزی تازه یا پخته استفاده می‌شود ولی محصول اصلی این گیاه، دانه آن است که دارای ارزش غذایی بالایی است. این گیاه از خانواده Amaranthaceae 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). کینوا می‌تواند به خوبی با محیط‌های مختلف سازگار شود که در آن بقای سایر محصولات زراعی بسیار دشوار است. گیاه کینوا دارای تنوع ژنتیکی گسترده‌ای است که به آن اجازه می‌دهد در برابر سرما، شوری و شرایط خشکی بسیار مقاوم باشد (Hussain *et al*., 2021; Saeidi *et al*., 2021).

گیاهان به‌طور مداوم با شرایط محیطی نامطلوب مانند تنش فلزات سنگین مواجه هستند. تنش فلزات سنگین یکی از بحرانی‌ترین عوامل غیرزیستی است که در ۳۰ سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. کادمیوم (cd) سمیت بالایی را در خاک‌های آلوده ایجاد می‌کند. میزان آلودگی کادمیوم در ایران از ۰/۱۵ به ۳/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک رسیده است که نشان از افزایش آلودگی خاک به کادمیوم است. کادمیوم با مقدار معمول ۰/۶ تا ۱/۱ میلیگرم در کیلوگرم خاک متحرک‌ترین عنصر سنگین درخاک محسوب می گردد . تحمل گیاهان نسبت به کادمیوم از ۰/۲ تا ۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک متغیر است اما وجود کادمیوم به مقدار ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، رشد گیاهان زیادی را متوقف می نماید. این فلز از رشد ریشه و ساقه جلوگیری می‌کند و باعث افت عملکرد می‌گردد. همین بر روی جذب عناصر غذایی و تعادل آنها تاثیر می‌گذارد و به شدت در محصولات زراعی مهم انباشته شده و وارد چرخه مواد غذایی شده و به سلامت انسان و دام آسیب وارد می‌کند (Xin *et al*., 2023). به‌تازگی کادمیوم به‌عنوان یکی از مهمترین آلاینده‌های زیست‌محیطی مطرح است. در میان فلزات سنگین، کادمیوم به‌عنوان یک فلز سمی و غیرضروری، به سرعت از طریق ریشه‌ها جذب و در بافت‌های مختلف گیاهی تجمع می‌یابد که وجود چنین شرایطی مانع رشد گیاهان در سرتاسر دنیا است. علایم اصلی سمیت کادمیوم برای گیاهان کلروز و بازداری از رشد است. باوجود سمیت گیاهی بالای آن، کادمیوم توسط ریشه‌های گیاهان جذب و به بافت‌های بالای سطح خاک منتقل و به این‌صورت وارد زنجیره غذایی می‌شود که به‌عنوان یک تهدید برای سلامت انسان است (Mallamaci *et al*., 2023).

کادمیوم باعث کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشدی گیاهچه‌ها در گاوزبان (*Borago officinalis* L.) (Mahmoudi *et al.,* 2019 a,b; Sheikhzadeh et al., 2021)، سورگوم (*Sorghum*) (Jawad Hassan et al., 2020) رازیانه (*Foeniculum vulgare*) (Zhao *et al.,* 2021)، نخود (*Cicer arietinum*) (Singhal *et al.,* 2022)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) (Marković *et al*., 2023)، کینوا (Radovanovic *et al*., 2020; Mahdi *et al*., 2021; Alghamdi *et al*., 2023; Alharby *et al*., 2023; Mahmoudi *et al.,* 2024)، کاهو (*Lactuca sativa* L.) (Zhou *et al*., 2023) و هویج (*Daucus carota* L.) (Novák *et al*., 2023) شده است. از آنجایی که تنش کادمیوم، موجب کاهش جوانه‌زنی و شاخص‌های رشدی گیاهچه‌ها مانند طول ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌شود، بنابراین به‌کار بردن روش‌هایی که بتواند موجب کاهش تأثیر منفی تنش فلزهای سنگین از جمله کادمیوم شده، اهمیت بسیاری دارد. بذور به روش‌های گوناگونی تیمار می‌شوند که عمده‌ترین آنها شامل تلقیح، پوشش‌دار کردن و پرایم است. پیش‌تیمار بذر (Priming) از جمله راهکارهایی

است که بذرها در مواجهه با شرایط اکولوژیک محیطی، به لحاظ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی آمادگی جوانه‌زنی را به‌دست می‌آورند که شامل هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ، هورموپرایمینگ، هالوپرایمینگ و بایوپرایمینگ است (Mahmoudi *et al*., 2019a).

یکی از رایج‌ترین روش‌های پرایمینگ، هیدروپرایمینگ (پیش‌تیمار آبی) است که در این روش، بذرها با آب خالص و بدون استفاده از هیچ ماده شیمیایی تیمار می‌شوند که این نوع پیش‌تیمار بسیار ساده مقدار جذب آب از طریق مدت زمانی که بذرها ارزان بوده و و در تماس با آب هستند، کنترل می‌شوند (Mahmoudi *et al*., 2019b). در شرایط تنش‌های محیطی یکی از راه‌های افزایش سبزشدن و استقرار گیاهچه استفاده از تکنیک‌های بهبود دهنده بذر است. یکی از مفیدترین روش‌های بهبود بذر پوشش‌دار کردن بذر (Seed coating) است (Farzaneh *et al*., 2019). در این روش مواد مختلفی از جمله سموم آفتکش، مواد تنظیم‌کننده رشد، کودها، مواد جاذب رطوبت، پوشش‌های حساس به حرارت و عناصر غذایی به همراه مواد چسبنده به سطح خارجی بذر اضافه می‌گردد که سبب بهبود جوانه‌زنی و کارآیی آن می‌شود (Pedrini *et al*., 2017; Esmaielpour *et al*., 2020). پوشش‌دار کردن بذر برای بهبود کارکرد بذر استفاده می‌شود. در واقع این ترکیبات بذر را از تنش‌هایی که احتمال وقوع آنها در محیط زیاد است محافظت می‌کنند (Saadat *et al*., 2015). بایوپرایمینگ یک پیش‌تیمار بیولوژیکی بذر است که منوط به ترکیبی از آبنوشی و تلقیح بذر با ارگانیسم‌های مفید برای حفاظت از بذر می‌باشد، تکنینکی که به جوانه زنی بذور در شرایط مختلف کمک می‌کند (Khaledi *et al*., 2021). قارچ تریکودرما به طور قابل توجهی رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا گیاهی را سرکوب می‌کند و سرعت رشد گیاه را تنظیم می‌کند این قارچ ترکیباتی را آزاد می‌کند که واکنش‌های مقاومت به تنش‌های زنده وغیرزنده را تحریک می‌کند (Hoseini *et al*., 2020).

با توجه به اهمیت گیاه کینوا و مشکلات موجود در زمینهٔ جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های آن (به‌علت حساس و بحرانی بودن این مراحل)، استفاده از تکنیک‌های مختلف پیش‌تیمار بذر در کینوا می‌تواند یکی از راهکارهایی در نظر گرفته شود که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر بهبود جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها در شرایط تنش فلزات سنگین موثر باشد، از این‌رو این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هیدروپرایمینگ، بیوپرایمینگ (قارچ تریکودرما) و پوشش‌دار کردن بذور با نانو کلات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و خواص آنتی-اکسیدانی عصاره برگ کینوا (*Chenopodium quinoa* willd.) تحت تنش کادمیوم انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی بهبود جوانه‌زنی، رشد و خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا (*Chenopodium quinoa* willd.) با کاربرد روش‌های مختلف پیش‌تیمار در شرایط 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 ۱۴۰۲ اجرا گردید. از کلرید کادمیوم ($CdCl_2.7H_2O$) (شرکت سازنده مرک آلمان) برای اعمال تیمارهای تنش کادمیوم استفاده شد. بذور کینوای مورد استفاده در این پژوهش واریته تی‌تی 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. تیمارهای آزمایشی شامل روش‌های پیش‌تیمار در چهار سطح (بدون تیمار، هیدروپرایم، بایوپرایمینگ با تریکودرما و پوشش‌دار کردن بذر با نانو کلات) و غلظت‌های کلرید کادمیوم در چهار سطح (صفر ، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند.

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). برای اعمال هیدروپرایمینگ، بذور به مدت ۱۲ ساعت در آب مقطر در انکوباتور در دمای ۱۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای اعمال بایو پرایمینگ با قارچ تریکودرما (بذر مال کردن)، ابتدا کود بیولوژیک تریکوران پی که حاوی قارچ تریکودرما هارزیانوم (*Trichoderma harzianum*) از شرکت فن‌آوری زیستی طبیعت‌گرا تهیه گردید. سپس مقداری از قارچ تریکودرما هارزیانوم (برحسب مقدار بذر) روی بذرهایی که قبلا به مدت ۴ ساعت خیسانده شده بود اضافه گردید و پس از برهم زدن کامل، درون پارچه‌ای نمناک قرار گرفته و به مدت ۸ ساعت درون انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شد (Reddy, 2013). به‌منظور اعمال پوشش‌دار کردن بذر از نانو کلات تهیه شده از شرکت دانش بنیان تولید نانو کلات‌های خضراء تهران که حاوی عناصر آهن (۸ درصد)، روی (۱/۵ درصد)، منگنز (۱/۵ درصد)، مس (۰/۵ درصد)، مولیبدون (۰/۵ درصد) و بور (۰/۵ درصد) بود، استفاده شد. همچنین از ماده کربوکسی متیل سلولز (Carboxy methyl cellulose) و چسباننده (Binder) استفاده شد (Halmer, 2006). پوشش دار کردن بذر با استفاده از یک دستگاه دست‌ساز انجام گرفت. با پوشش‌دار کردن بذر، وزن بذر کمتر از ۱۰ درصد افزایش یافت (Pedrini *et al*., 2017).

به‌منظور انجام آزمون جوانه‌زنی، ۵۰ عدد بذر کینوا به‌طور تصادفی و در ۴ تکرار به روش روی کاغذ (Top of paper) در داخل پتری‌دیش‌ها قرار داده شد و بر اساس تیمارهای موردنظر، محلول کلرید کادمیوم در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر به پتری دیش‌ها 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 به‌اندازه‌ی 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 (Ellis & Roberts, 1981) و سرعت جوانه‌زنی (Rajpar *et al*., 2006) تعیین شد. همچنین طول گیاهچه با استفاده از خط کش مدرج و وزن خشک گیاهچه با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد.

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 سلسیوس نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش Koa & Chang (۱۹۸۸) استفاده شد. میزان فعالیت آنزیم کاتالاز از روش Aebi (۱۹۸۴) استفاده شد و آنزیم پراکسیداز از روش Maehly (۱۹۵۵) بر پایه تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و آنزیم گایاکول اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز توسط روش Mishra & Kar (۱۹۵۵) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پرولین از روش ناین‌هیدرین اسید استفاده شد (Bates *et al*., 1973). میزان فنل‌کل بر اساس روش فولین-سیوکالته اندازه‌گیری شد (Salmanian *et al*., 2014). برای اندازه‌گیری میزان مالون‌دی‌آلدهید از روش Heath & Packer (۱۹۶۸) استفاده شد. مقدار H_2O_2 بر اساس واکنش H_2O_2 با ید پتاسیم (KI) تعیین شد (Alexieva *et al*., 2001).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.4 انجام گرفت. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

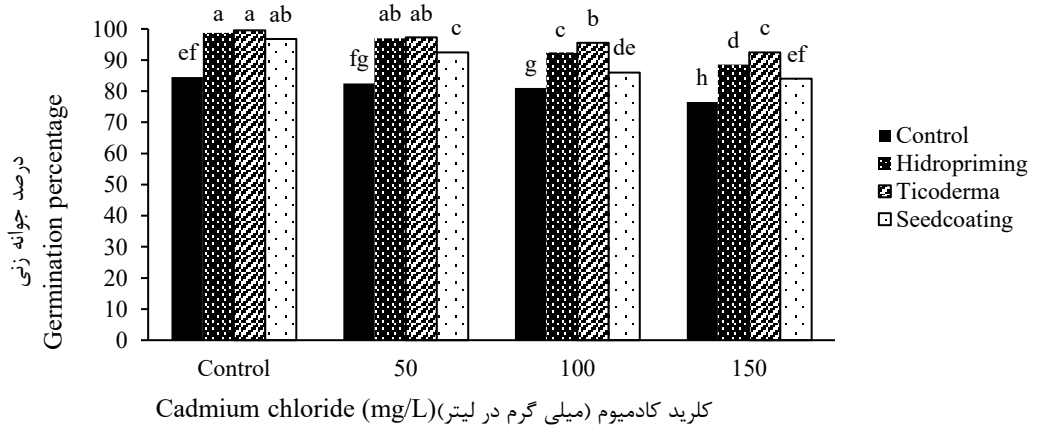
نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج گویای آن است که در شرایط عدم تنش کلرید کادمیوم، پیش‌تیمار آبی سبب شد تا بیشترین درصد جوانه‌زنی بذرها حاصل گردد که اختلاف معنی‌داری با تیمار بیوپرایمینگ و روکش‌دار کردن بذر با نانو کلات

در همین شرایط و با تیمار بیوپرایمینگ و پیش‌تیمار آبی در شرایط تنش ۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت که موجب افزایش درصد جوانه‌زنی ۱۷/۷۵درصدی نسبت به شاهد گردید (شکل ۱). کمترین درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش کلرید کادمیوم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در تیمار بدون پیش تیمار مشاهده شد. بر اساس نتایج این پژوهش درصد جوانه‌زنی بذور کینوا با در غلظت ۱۰۰ و ۱۵۰ کادمیوم کاهش معنی داری داشته است (شکل ۱) که با نتایج Sheikhzadeh و همکاران (۲۰۲۱) روی گیاه گاوزبان (*Borago officinalis*) و Silva و همکاران (۲۰۲۱) روی پنبه (*Gossypium*) مطابقت داشت.

در شرایط بدون تنش کادمیوم، (شکل ۱). افزایش درصد جوانه‌زنی از طریق پیش‌تیمار آبی توسط Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۹) در گل گاوزبان گزارش شده است. پیش‌تیمار با قارچ تریکودرما از طریق سازکارهای مختلفی از جمله تولید آنزیم‌های خارجی سلولی، آنتی‌بیوتیک‌ها و شبه هورمون‌های گیاهی به‌عنوان الیستور موجب بهبود رشد گیاه می‌شود (Khaledi *et al*., 2021). همچنین افزایش درصد جوانه‌زنی توسط پیش‌تیمار آبی و بیوپرایمینگ در بادرنجبویه (*Melissa officinalis*) Khanizadeh و همکاران (۲۰۱۹) بیان شده است.



شکل ۱- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر درصدجوانه‌زنی گیاهچه‌های کینوا
ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

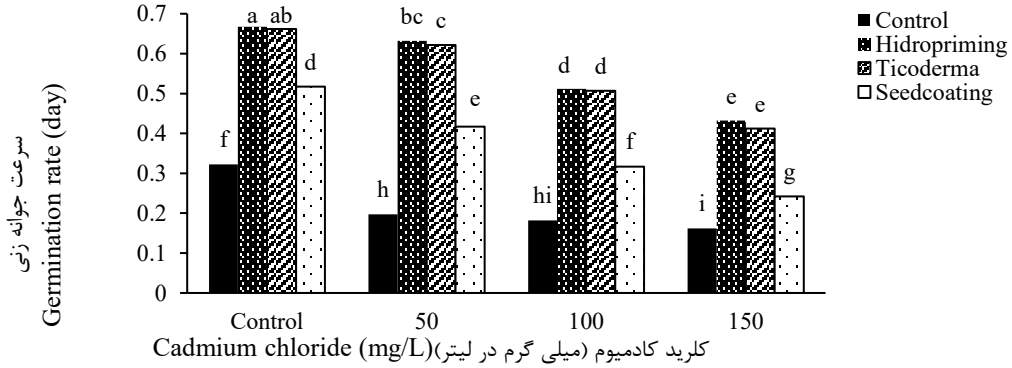
Fig 1- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on the germination percentage of quinoa seedlings
Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

سرعت جوانه‌زنی

با افزایش تنش کادمیوم میانگین سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت بطوری در بین تیمارهای مورد مطالعه کمترین میانگین سرعت جوانه‌زنی با کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم در بذور بدون تیمار مشاهده شد که بطور معنی‌داری کمتر از سایر سطوح تنش کادمیوم (غلظت‌های ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) با پیش تیمارهای مشابه بود و در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم بدون پیش تیمار، ۴۹/۶۸ درصد کمتر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). کاهش جوانه‌زنی بذر ممکن است به اثرات منفی کادمیوم بر جذب و حرکت آب یا تجزیه و یا تغییر در ویژگی‌های نفوذپذیری غشای سلولی مرتبط باشد (Zayneb *et al*., 2015; Salarizadeh *et al*., 2016).

در شرایط تنش ۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم، پیش‌تیمار آبی سبب شد تا میانگین سرعت جوانه‌زنی بذور کینوا به‌طور معنی‌داری نسبت به بذور شاهد افزایش یابد که اختلاف معنی‌داری با بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما نداشت و حدود ۹۷/۱۴ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). که با نتایج Mahmoudi

و همکاران (۲۰۱۹) در گل‌گاوزبان مطابقت دارد. همچنین بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما سبب افزایش سرعت و درصد جوانه‌زنی در زیره سبز شد (Khaledi *et al*., 2021). تحت شرایط تنش کادمیوم (۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و غیر تنش (تیمار شاهد)، کمترین میانگین سرعت جوانه‌زنی بذور در بذور بدون تیمار مشاهده شد (شکل ۲). افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌تواند به‌دلیل تأثیر قارچ تریکودرما در افزایش برخی از هورمون‌ها بخصوص هورمون جیبرلین و تولید و رهاسازی آنزیم آمیلاز باشد (Khaledi *et al*., 2021). افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های تجزیه کننده در بذور تیمار شده باعث افزایش میانگین سرعت جوانه‌زنی بذرهای کینوا می‌شود بطوری که در روش تیمار با پیش‌تیمار آبی آنزیم‌های هیدرولیتی زودتر فعالیت خودشان را آغاز می‌کنند و به‌همین دلیل سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی در این بذرهای کینوا می‌شود (Mahmoudi *et al*., 2019).



شکل ۲- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر سرعت جوانه‌زنی گیاهچه‌های کینوا

ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

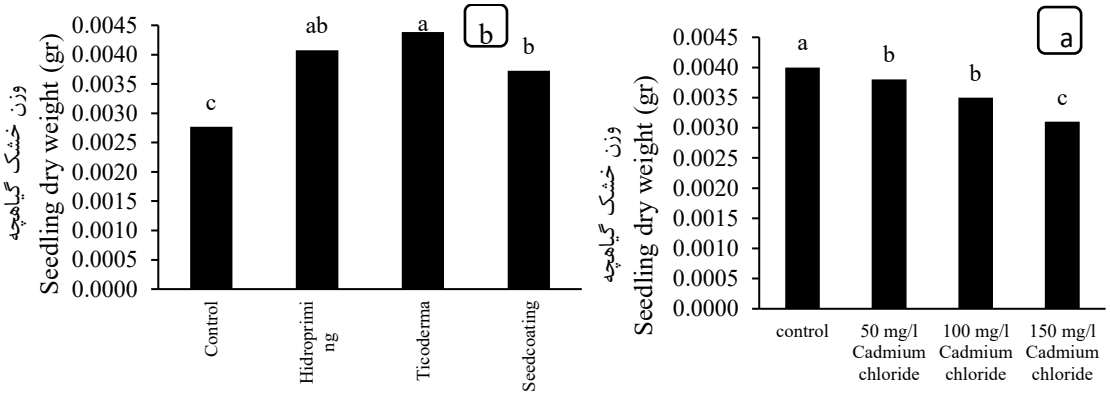
Fig 2- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on the germination rate of quinoa seedlings
Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

وزن خشک گیاهچه

نتایج نشان داد که میانگین وزن خشک گیاهچه با کاربرد غلظت‌های مختلف تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری کمتر از بذور شاهد بدست آمد (شکل ۳a). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین وزن خشک گیاهچه به‌ترتیب در تیمار عدم کاربرد تنش کادمیوم و تیمار کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم مشاهده شد. غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم وزن خشک گیاهچه را ۲۲/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که تحت تنش کادمیوم کاهش قابل توجهی در رشد گیاهان وجود دارد (Panda et al, 2017; Rehman *et al*., 2019). به طور مشابه Amjad و همکاران (۲۰۲۱) 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). میانگین وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذور شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذرهای تیمار شده بود. بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما سبب افزایش ۵۸/۴۸ درصدی وزن خشک گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد گردید که اختلاف معنی‌داری با وزن خشک بذرهای پیش‌تیمار شده با آب نداشت (شکل ۳b).

برتری گیاهچه‌های حاصل از تیمارهای آبی و بیوپرایمینگ از نظر وزن خشک گیاهچه را می‌توان به میانگین سرعت بالای جوانه‌زنی بذر آن‌ها نسبت داد (شکل ۳). به عبارت دیگر، پیش‌تیمار موجب می‌شود تا

بذرهای کینوا در مقایسه با بذرهای بدون پیش تیمار سریع‌تر جوانه‌زده در نتیجه فرصت بیشتری برای رشد گیاهچه خواهند داشت که این امر منجر به افزایش وزن خشک گیاهچه می‌گردد. 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 حالی‌که، تمامی تیمارها در یک زمان مشخص ارزیابی می‌شوند. بنظر می‌رسد علت افزایش وزن و طول گیاهچه‌ها در اثر بیوپرامینگ با قارچ تریکودرما ناشی از تولید ایندول-۳-استیک اسید که پیش‌ماده سنتز اکسین است باشد (Khaledi *et al.*, 2021). که با نتایج Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۹) در گل‌گاوزبان و Khaledi و همکاران (۲۰۲۱) در زیره سبز مطابقت دارد.



شکل ۳- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و روش‌های مختلف پیش‌تیمار (b) بر وزن خشک گیاهچه‌های کینوا
ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

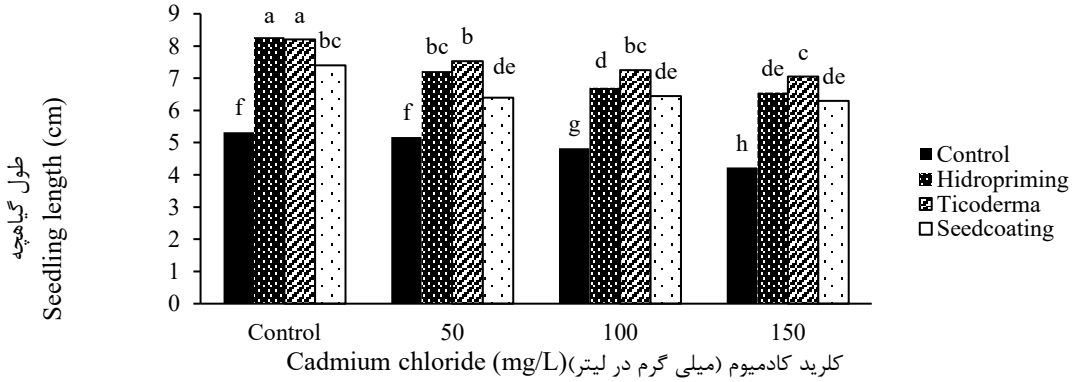
Fig 3- Effect of cadmium stress treatment (a) and different pretreatment methods (b) on dry weight of quinoa seedlings
Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

طول گیاهچه

با کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم، بیشترین طول گیاهچه مربوط به بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما بود که توانست طول گیاهچه را در حدود ۴۵/۴۵ تا ۶۷/۰۶ درصد در همان سطح تنش کادمیوم نسبت به نمونه‌های بدون تیمار افزایش دهد (شکل ۴). کمترین طول گیاهچه کینوا در شرایط بدون تنش کلرید کادمیوم در بذور بدون تیمار شد که در حدود ۲۰/۶۶ درصد کمتر از سایر تیمارها بود (شکل ۴). تنش کادمیوم باعث کاهش طول گیاهچه شد که با نتایج Sheikhzadeh و همکاران (۲۰۲۱) روی گیاه گاوزبان (*Borago officinalis*) و Silva و همکاران (۲۰۲۱) روی پنبه (*Gossypium*) مطابقت داشت. افزایش در شاخص‌ها رشد گیاهان تحت تنش کادمیوم در پاسخ به تیمارها 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 درجاتی از تحمل به تیمارهای کادمیوم را نشان می‌دهد. به دلیل 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). در تمام سطوح تنش کادمیوم (۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در

لیتر) 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 حالی‌که، تمامی تیمارها در یک زمان مشخص ارزیابی می‌شوند. علت افزایش طول گیاهچه‌ها در اثر بیوپرامینگ با قارچ تریکودرما ناشی از تولید ایندول-۳-استیک اسید (پیش‌ماده سنتز اکسین) است (Khaledi *et al.*, 2021) که با نتایج Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۹) در گل‌گاوزبان و Khaledi و همکاران (۲۰۲۱) در زیره سبز مطابقت دارد. در واقع بیشتر بودن طول گیاهچه-های حاصل از بذرهای پیش‌تیمار شده را می‌توان به میانگین سرعت جوانه‌زنی بالاتر این بذرها (شکل ۲) نسبت داد، که این موضوع به خوبی در نتایج حاصل از پژوهش حاضر مشاهده می‌شود. بالا بودن سرعت جوانه-نی در این بذرها منجر گردید تا بذرهای پیش‌تیمار شده جوانه‌زنی سریع داشته و گیاهچه‌های حاصل از این بذرها نیز رشد بیشتر و سریع‌تر داشته و در نتیجه گیاهچه‌های بزرگتری را تولید کنند.



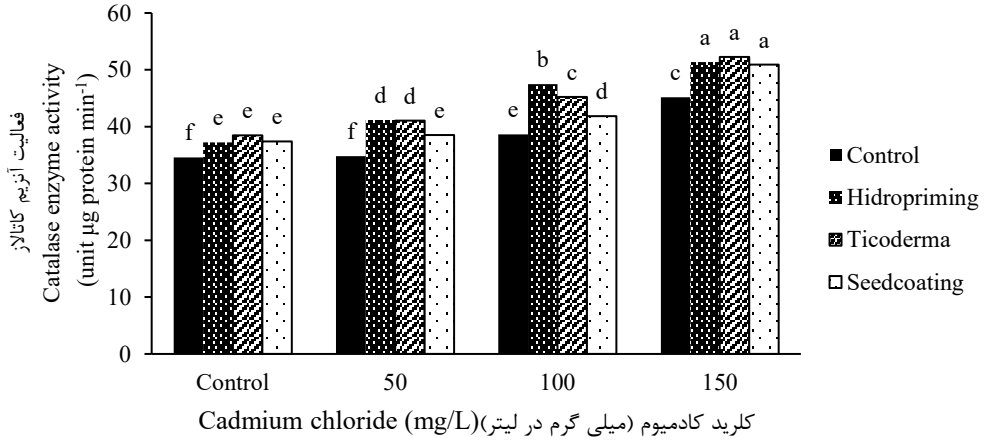
شکل ۴- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر طول گیاهچه‌های کینوا
ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

Fig 4- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on the length of quinoa seedlings
Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

فعالیت آنزیم کاتالاز

استفاده از روش‌های مختلف پیش‌تیمار نمودن بذور کینوا موجب شد تا فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یابد. بطوری‌که در شرایط تنش ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با هیدروپرایمینگ و پوشش دار کردن بذور با نانو کلات نداشت اما حدود ۱۵/۶۲ درصد بیشتر از بذرهای بدون پیش تیمار بود (شکل ۵). کمترین فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط بدون تنش کلرید کادمیوم در گیاهچه‌های حاصل از بذور بدون تیمار مشاهده شد (شکل ۵). فعال شدن بیش از حد ممکن است به دلیل توانایی آن در تبدیل رادیکال‌های سوپر اکسید به H_2O_2 باشد (Rehman *et al.*, 2019). مشابه این یافته‌ها، افزایش فعال‌سازی آنزیم کاتالاز در تنش فلزات سنگین در گیاهان کینوا به خوبی ثبت شده است (Abdal *et al.*, 2021; Iftikhar *et al.*, 2021). (شکل ۵). تریکودرما ازمقاوم‌ترین قارچها در برابر عناصر سنگین به‌ویژه کادمیوم بوده و دارای ظرفیت بالایی در جذب ایـن عنصر در مقادیر بالا می‌باشد. از این رو تعدادی از گونه‌های تریکودرما دارای توانایی پاکسازی محیط‌های آلوده می‌باشد و همچنین برای تجزیه زیستی فلزات سنگین موجود در محیط، به عنوان یک منبع میکروارگانیسمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang & Zhou, 2005). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر بیوپرایمینگ تریکودرما در گیاه گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) (Xian *et al.*, 2009)، لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) (Entesari *et al.*, 2013)، سویا (*Glycine max*)، کلزا (*Brassica napus*) (Rezaloo *et al.*, 2018) و توت فرنگی

Lachinani *et*) (*Fragaria* × *ananassa* Duch.)
al., 2023) گزارش شده است.



شکل ۵-تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه‌های کینوا. ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

Fig 5- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on catalase activity of quinoa seedlings. Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

فعالیت آنزیم پراکسیداز

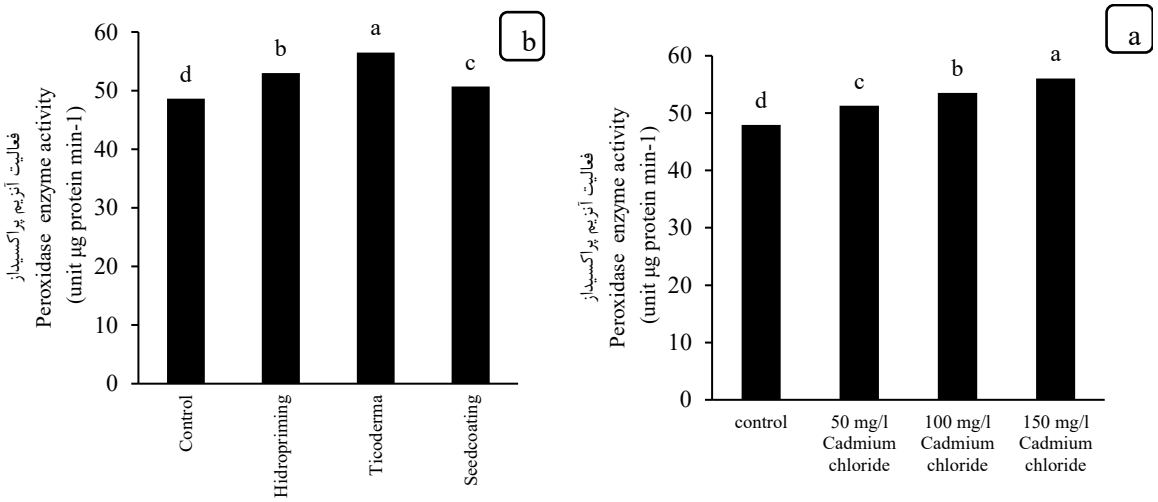
نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم پراکسیداز با کاربرد غلظت‌های مختلف تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری بیشتر از بذور شاهد بدست آمد (شکل ۶a). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌ترتیب در تیمار کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی-گرم در لیتر تنش کادمیوم و تیمار عدم کاربرد تنش کادمیوم مشاهده شد. غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۴/۱۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. مشابه این یافته‌ها، افزایش فعال‌سازی آنزیم پراکسیداز در تنش زیر فلزات گیاهان 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 پراکسیداز به دست می‌آید (Amjad *et al*., 2021). تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم و آسیب غشا در بسیاری از گیاهان مشاهده شده است (Murtaza *et al*., Rasafi *et al*., 2021 ;2019).

میانگین فعالیت آنزیم پراکسیداز حاصل از بذور شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های حاصل از بذرهای بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما بود. بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما سبب افزایش ۱۶/۸۷ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۶b). به‌نحوی‌که بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌ها در بذرهای بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های حاصل از سایر غلظت‌ها داشت (شکل ۶b). افزایش فعالیت بسیاری از آنزیم های آنتی اکسیدانی، SOD، APX و CAT توسط بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما در ذرت شیرین (*Zea mays* *convar. saccharata* var. *rugosa*)، چغندرقند (*Beta vulgaris*) و گندم (*Triticum aestivum*) گزارش شده است (Rezaloo *et al*., 2018).

فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز

با کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم، بیشترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در تیمار هیدروپرایمینگ مشاهده شد. تنش کادمیوم (غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) باعث افزایش معنی‌دار فعالیت

آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در حدود ۳۷/۹۷ درصد نسبت به تنش کادمیوم صفر شد (شکل ۷). بنابراین، می‌توان استنباط کرد که هر سه آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی-فنل‌اکسیداز 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).



شکل ۶- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و روش‌های مختلف پیش‌تیمار (b) بر فعالیت آنزیم پراکسیداز. ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

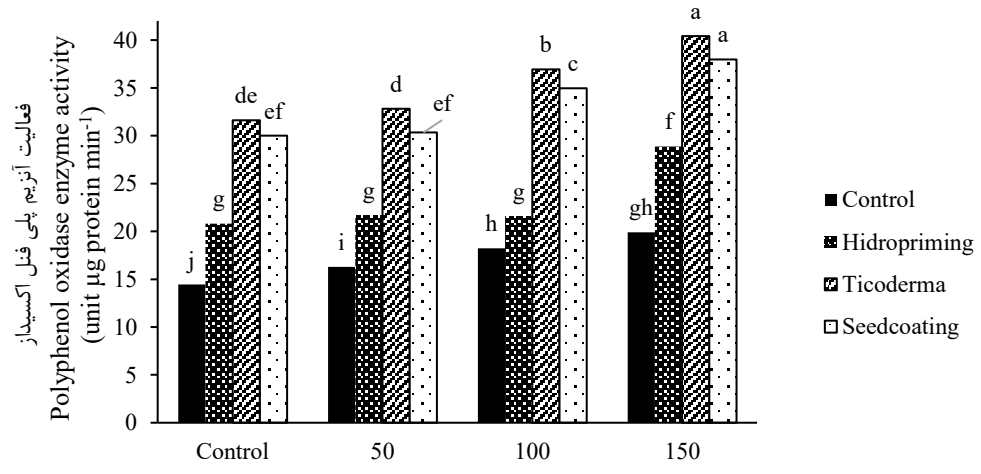
Fig 6- The effect of cadmium stress treatment (a) and different pretreatment methods (b) on Peroxidase enzyme activity .Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

افزایش‌های مشابهی در فعالیت این آنزیم‌ها نیز تحت تنش کادمیوم هم در آزمایش‌های خاک و هم در کشت هیدروپونیک در کینوا (Amjad *et al*., 2021; Abdal *et al*., 2021; Iftikhar *et al*., 2021) و همچنین گیاهان دیگر مشاهده شد (Rehman *et al*., 2019). شرایط تنش از جمله تنش کادمیوم باعث عدم تعادل یونی می‌شود که تولید گونه های اکسیژن فعال (ROS) را تحریک می‌کند که منجر به اختلال در غشای سلول و اندامک می‌شود که فعالیت متابولیکی سلول را از طریق تغییر سیگنالینگ مولکولی، تنظیم اسمزی و تولید متابولیت های ثانویه تغییر می‌دهد. 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 می‌شود و اثرات مخرب ROS را خنثی می‌کند (Ullah *et al*., 2019). در شرایط تنش کلرید کادمیوم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز با پوشش دار کردن بذور با نانو کلات و بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما حاصل گردید بطوری که در همین شرایط تنش، پوشش دار کردن بذور با نانو کلات و بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز را به ترتیب ۲۶/۵۵ و ۲۷/۷۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۷). هنگامی که گیاهان در معرض تنش قرار می‌گیرند سطوح انواع اکسیژن فعال در آنها افزایش می-یابد و به‌دنبال آن بیان ژن‌های آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها برای حذف انواع اکسیژن فعال زیاد شده و سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی بهبود یافته و باعث افزایش تحمل به تنش در گیاه می‌گردد (Amani *et al*., 2023). افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*) گزارش شده است (Amani *et al*., 2023) و این همان خصوصیت القای مقاومتی است که توسط این آنتاگونیست اتفاق می‌افتد.

پرولین

بیشترین محتوای پرولین در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کلریدکادمیوم مشاهده شد و حدود ۲۵/۱۷

درصد بیشتر از تیمار شاهد بود، اما با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل a ۸). افزایش محتوای پرولین ممکن است به این دلیل باشد که برخی از اسیدهای آمینه در شرایط تنش فلزات سنگین نقش مهمی دارند، مانند پرولین (Hayat *et al.*, 2012)، هیستیدین و سیستئین (Ghori *et al.*, 2019)، بنابراین تجمع بیشتر اسیدهای آمینه آزاد افزایش می‌یابد. در جوانه زدن نهال‌ها با تثبیت تنظیم اسمزی، کیلاسیون فلزی و مسیرهای انتقال سیگنال، نشانه سازگاری گیاه با شرایط تنش است.



شکل ۷- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز.
ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

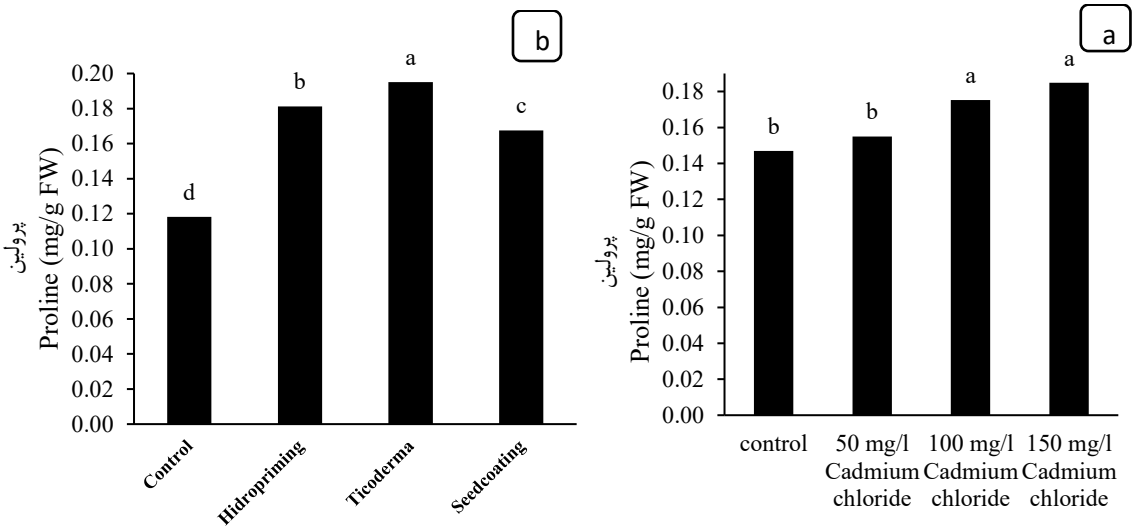
Fig 7- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on Polyphenol oxidase enzyme activity of quinoa seedlings .Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

Anwar و همکاران (۲۰۱۹) افزایش برخی از اسیدهای آمینه خاص مانند اسید آسپارتیک، آسپاراژین، پرولین، لوسین، ایزولوسین، متیونین و والین را در ماش در شرایط تنش کادمیوم نسبت به شاهد گزارش کردند. نتایج ما همچنین روند مشابهی را نشان داد زیرا اسیدهای آمینه آزاد کل افزایش قابل توجهی با زمان پس از اعمال تنش کادمیوم به نمایش گذاشته شدند. بیشترین میانگین محتوای پرولین حاصل از بذور شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از محتوای پرولین گیاهچه‌های حاصل از بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما بود. بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما سبب افزایش ۶۵/۲۵ درصدی محتوای پرولین گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل b ۸). انباشت پرولین نقش بسیار موثری در تطابق و سازگاری گیاه با شرایط تنش، در تنظیم اسمز درون سلولی، پایدار کردن ساختار پروتئین و غشاء سلولی، جارو کردن گونه های اکسیژن رادیکال، تنظیم pH سلولی و واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء دارد و ارتباط مستقیمی با سیستم‌های دفاعی گیاه در برابر پاتوژن‌ها و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانتی دارد (Saadat & Ehteshami, 2015). افزایش میزان پرولین در اثر بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما در گوجه‌فرنگی گزارش شده است (Małolepsza *et al.*, 2017).

فنل کل

در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین محتوای فنل کل با کاربرد غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید کادمیوم در بذور پیش‌تیمار شده با آب مشاهده شد که با نتایج Omidi & Mansouri (۲۰۲۲) در کینوا در اثر پیش‌تیمار آبی مطابقت دارد اما اختلاف معنی‌داری با بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما نداشت (شکل ۹). افزایش محتوای فنل کل در اثر تنش کادمیوم در سویا

گزارش شده است که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Hashemi & Mohamadhasani, 2019). درسلول های گیاهی معمولاً ترکیبات فیتوفنولیک بخصوص پلی‌فنل‌ها در کاهش سمزدایی پراکسید هیدروژن بسیار کارا عمل کرده و به‌عنوان سیستم پشتیبان چرخه آسکوربات-گلوتاتیون در دفع رادیکال‌های H_2O_2 شرکت می‌کنند (Hashemi & Mohamadhasani, 2019).



شکل ۸- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و روش‌های مختلف پیش‌تیمار (b) بر پرولین گیاهچه‌های کینوا. ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

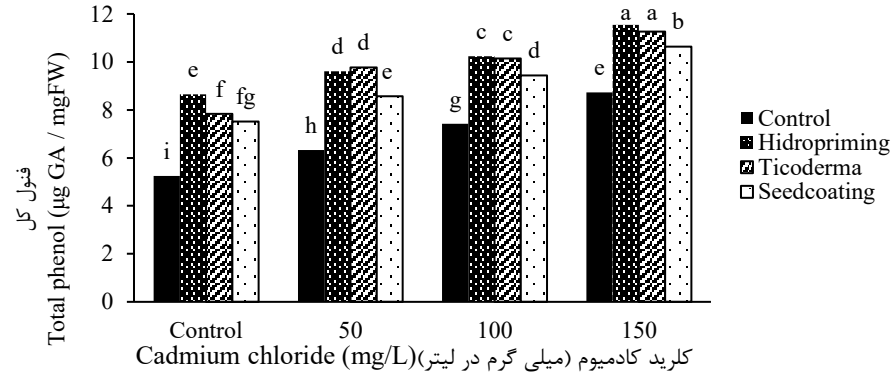
Fig 8- The effect of cadmium stress treatment (a) and different pretreatment methods (b) on Proline of quinoa seedlings. Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

از آنجایی فنل محلول در آب است بنابراین پیش-تیمار آبی موجب افزایش محتوای فنل کل شد (Mansouri & Omidi, 2022). از جمله مهمترین سازوکار کنترل زیستی توسط قارچ *Trichoderma* تحریک سیستم دفاعی گیاه از جمله سنتز و ترشح مواد فنلی، پروتئین‌های مرتبط با بیماریزایی و افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز است که نوعی مقاومت سیستمیک را موجب می‌شود (Sanei & Razavi, 2020). افزایش میزان فنل کل در تیمار قارچ تریکودرما در ریحان مشاهده شده است (Sanei & Razavi, 2020) که با نتایج پژوهش ما همسو می‌باشد. بطور کلی در تنش ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، هیدروپرایمینگ و بیوپرایمینگ محتوای فنل کل را به-ترتیب ۲۱/۸۷ درصد و ۲۸/۸۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل۹). بین محتوای پلی‌فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی رابطه‌ای خطی برقرار است و با افزایش محتوای پلی‌فنل کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (شکل‌های ۵، ۶ و ۷) در کینوا افزایش می‌یابد (Rasekhi Kazeruni *et al*., 2021). وجود این ارتباط قوی بین محتوای پلی‌فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، حاکی از آن است که محتوای پلی -فنل کل، شاخص پیش‌بینی کننده مناسبی برای ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کینوا در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. کینوا به واسطه وجود ترکیبات فنلی، دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی می‌باشند که خطر ابتلا به آن دسته از بیماری‌ها را که با افزایش رادیکال‌های آزاد ارتباط مستقیم دارند، کاهش می‌دهد (Rasekhi Kazeruni *et al*., 2021).

مالون دی آلدهید

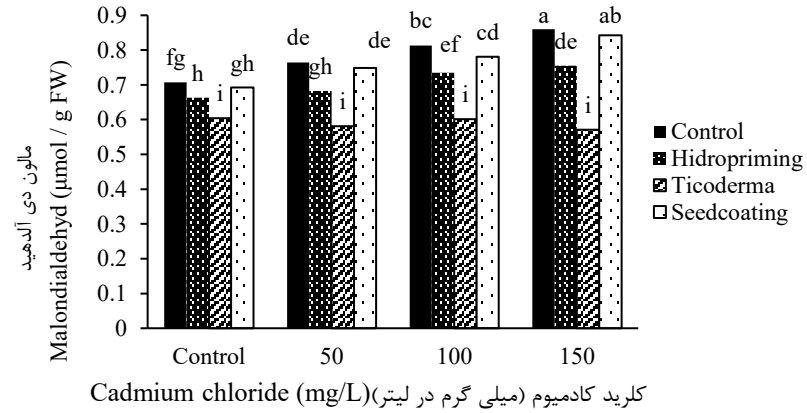
بیشترین میزان مالون‌دی‌آلدهید در شرایط تنش کلرید کادمیوم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر، در گیاهچه‌های حاصل از بذور بدون تیمار مشاهده شد که که حدود ۴۹/۱۲ درصد بیشتر از سایر تیمارها بود که مطابق با نتایج Zhao و همکاران (۲۰۲۱) در رازیانه بود (شکل ۱۰). نتایج ما در مورد افزایش غلظت مالون‌دی‌آلدهید مطابق با مطالعه Kutrowska و همکاران (۲۰۱۷) روی کلم و Jiajia و همکاران (۲۰۱۶) روی ذرت در پاسخ به تنش

کادمیوم بود. محتوای مالون‌دی‌آلدهید که نشانگر اکسیداسیون چربی‌ها در اندامک‌های سلولی است (Chen *et al.*, 2018)، معمولاً در پاسخ به محرک‌های خارجی مختلف تولید می‌شود. همچنین کمترین میزان مالون‌دی‌آلدهید در تیمار بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما در شرایط تنش کلرید کادمیوم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با شرایط تنش کلرید کادمیوم صفر، ۵۰ و ۱۰۰ نداشت (شکل ۱۰).



شکل ۹- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر فنل کل گیاهچه‌های کینوا . ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

Fig 9- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on Total phenol of quinoa seedlings .Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)



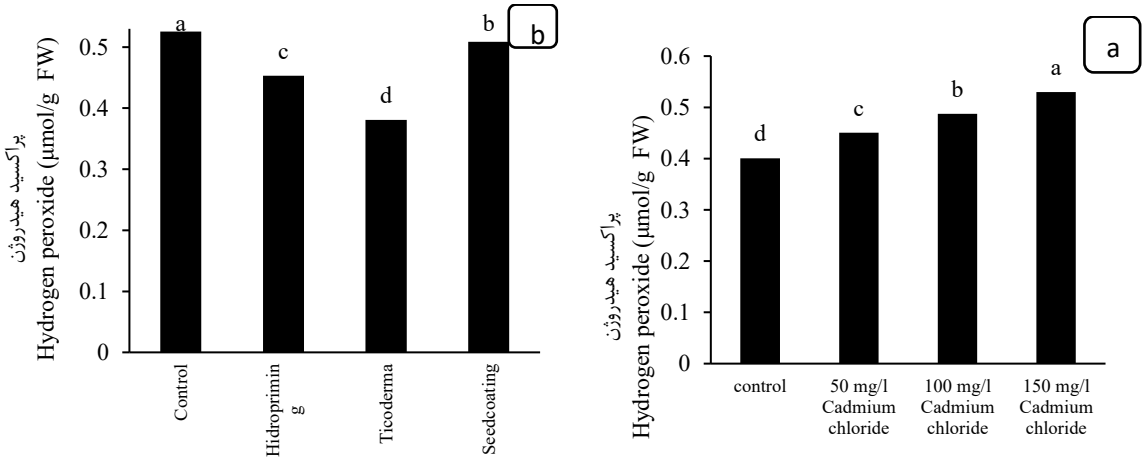
شکل ۱۰- تأثیر روش‌های مختلف پیش‌تیمار و تنش کادمیوم بر مالون دی آلدهید گیاهچه‌های کینوا. ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

Fig 10- The effect of different pretreatment methods and cadmium stress on Malondialdehyde of quinoa seedlings. Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

پراکسید هیدروژن

در مطالعه حاضر، کادمیوم باعث تولید بیش از حد ROS مانند H_2O_2 و ایجاد تنش اکسیداتیو در کینوا شد. به‌طوری که با افزایش تنش کلریدکادمیوم از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر محتوای H_2O_2 به‌طور معنی‌داری در حدود ۱۲/۵ تا ۳۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (شکل ۱۱a). 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). یک اثر غیرمستقیم گیاهان تنش کادمیوم، تولید ROS است (Bamagoos *et al.*, 2022; Maghsoudi *et al.*, 2021). رادیکال‌های ROS اصلی که برای گیاهان مضر هستند عبارتند از: اکسیژن منفرد (O_2)، سوپر اکسید (O_2^-)، H_2O_2 و هیدروکسیل (HO). این ROS اثرات نامطلوبی بر روی

ماکرو مولکول‌ها مانند لیپیدها، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای نوکلئیک دارند. تولید بیش از حد ROS، به‌عنوان مثال، H_2O_2، باعث پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش پایداری غشای سلولی شد. امجد و همکاران (Amjad *et al*., 2022) دریافتند که سطوح کادمیم خاک بالاتر از ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث تنش اکسیداتیو شدید در کینوا شد. همچنین افزایش سطوح کادمیوم از ۵۰ به ۲۰۰ میکرومولار باعث تنش اکسیداتیو شدید شد (Abdal *et al*., 2021). بسیاری از محققان مشاهده کرده‌اند که تنش کادمیوم باعث تنش اکسیداتیو در گیاهانی غیر از کینوا نیز می‌شود (Rehman *et al*., 2019). کمترین میانگین H_2O_2 مربوط به گیاهچه‌های حاصل از بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما بود. بطوری که از بذور شاهد بطوری که بیوپرایمینگ با قارچ تریکودرما سبب کاهش ۳۶/۸۴ درصدی H_2O_2 گیاهچه‌های کینوا نسبت به گیاهچه‌های حاصل از بدور بدون تیمار بود (شکل ۱۱b).



شکل ۱۱- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و روش‌های مختلف پیش‌تیمار (b) بر پراکسید هیدروژن گیاهچه‌های کینوا. ستون‌های با حروف مشابه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند (دانکن ۱درصد)

Fig 11- The effect of cadmium stress treatment (a) and different pretreatment methods (b) on Hydrogen peroxide of quinoa seedlings. Columns with the same letters do not have a significant statistical difference (Duncan 1%)

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر نشان داد که پیش‌تیمار بذر احتمالا از طریق بهبود فعالیت آنتی اکسیدانی (برخی آنزیم‌ها و ترکیبات انتی اکسیدانی) کینوا، موجب افزایش معنی‌دار درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر و افزایش طول و وزن خشک گیاهچه‌های کینوا گردید. در بین روش‌های مورد استفاده، بیشترین شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در پیش‌تیمار آبی و بیوپرایمینگ حاصل شد. تیمار نمودن بذرها با افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنول‌اکسیداز موجب کاهش و جلوگیری از خسارات وارده توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن شده که این امر خود منجر به بهبود خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها گردیده است. انجام بیوپرایمینگ بذر با قارچ تریکودرما در سطوح مختلف تنش کادمیوم از راه افزایش توان بذر و گیاهچه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی از تأثیر منفی تنش کادمیوم کاسته و موجب بهبود ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها شد. اما در بسیاری موارد هیدروپرایمینگ تفاوت معنی داری با بیوپرامینگ ندارد و در بعضی موارد بهتر عمل کرده است. بنابراین پیش‌تیمار آبی روشی ساده و مقرون به‌صرفه بوده و در عین سادگی و عدم نیاز به دانش فنی پیچیده، به آسانی می‌تواند توسط کشاورزان اجرا گردد. بنابراین این روش جهت بهبود جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و افزایش کیفیت و قدرت بذور کینوا توصیه می‌شود.

References

Abdal, N., Abbas, G., Asad, S.A., Ghfar, A.A., Shah, G.M., Rizwan, M., Ali, S. & Shahbaz, M. (2021). Salinity mitigates cadmium-induced phytotoxicity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) by limiting the Cd uptake and improved responses to oxidative stress: Implications for phytoremediation. *Environmental Geochemistry and Health*. 45(1):171-185. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01082-y

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. Https://doi.org/10.3390/plants10122802

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

Alexieva, V., Sergei, I., Mapelli, S. & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant Cell Environment*. 24: 1337- 1344. Https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x

Alghamdi SA, Alharby HF, Abbas G, Al-Solami HM, Younas A, Aldehri M, Alabdallah NM, & Chen Y. (2023). Salicylic Acid- and Potassium-Enhanced Resilience of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) against Salinity and Cadmium Stress through Mitigating Ionic and Oxidative Stress. *Plants*. 2023; 12(19):3450. Https://doi.org/10.3390/plants12193450

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. Https://doi.org/10.3390/toxics10040169

Amani, M., Alizadeh-Salteh, S., Sabzi nojadeh, M., & Younessi Hamzekhanlu, M. (2023). The effect of Trichoderma harzianum on the antioxidative traits of *Ocimum basilicum* L. under different irrigation regimes. *Journal of Crops Improvement*, 25(3), 719-735. Https://doi.org/10.22059/jci.2023.345935.2730. (In Persian)

Amerian, M., Khoramivafa, M. & Rabani, B. A. (2023). Effect of Selenium and Humic Acid on Germination and Some Morphological Characteristics of Quinoa under Drought and Salinity Stress. *Journal of Vegetables Sciences*, *6*(12), 1-16. Https://doi10.22034/iuvs.2022.537591.1177(In Persian)

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*(1), 107-126. Https://doi.org/10.22108/ijpb.2021.125105.1227. (In Persian)

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 phyto-remediation and human health. *Environmental Geochemistry and Health*. 44, 1487–1500. Https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0.

Angeli, V., Miguel Silva, P., Crispim Massuela, D., Khan, M.W., Hamar, A., Khajehei, F., Graeff-Hönninger, 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. Https://doi.org/10.3390/foods9020216

Anwar, S., Shafiq Zaib-un, F., Muhammad, U., Ashraf, Y., & Ali, N. (2021). Effect of cadmium stress on seed germination, plant growth, and hydrolyzing enzyme activities in mungbean seedlings. *Journal of Seed Science,* 43: e202143042,2317-1545v43256006. https://doi.org/10.1590/2317-1545v43256006

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(2):68. Https://doi.org/10.3390/toxics10020068

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 39: 205-207. Https://doi.org/10.1007/BF00018060

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 Regul*. 25 (1): 11-15. Https://doi.org/10.1023/A:1005903403926

Chen, H., Zhang, Q., Cai, H., Zhou, W., & Xu, F. (2018). H_2 O_2 mediates nitrate-induced iron chlorosis by regulating iron homeostasis in rice. Plant, *Cell and Environment publishes original research*. 41(4):767-781. https://doi.org/10.1111/pce.13145

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. Https://doi.org/10.3390/ijerph16091624

Ellis, R.H. & Roberts, E.H. (1981). The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*. 9: 373-409.

Entesari, M., Sharifzadeh, F., Dashtaki, M., & Ahmadzadeh, M. (2013). Effects of Biopriming on the Germination Traits, Physiological Characteristics, Antioxidant Enzymes and Control of Rhizoctonia solani of a Bean Cultivar (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Field Crop Science, 44(1), 35-45. Https://doi.org/10.22059/ijfcs.2013.30482 (In Persian)

Esmaielpour, B., Bahadori, S. & Khoramdel, S. (2020). Effects of Polyamines on Seed Germination Characteristics of Okra (Abelmoschus esculentus L. Basenti) under Different Time and Temperatures. *Journal of Vegetables Sciences*, *3*(6), 135-146. Https://doi.org/10.22034/iuvs.2020.72727.1019(In Persian)

Farzaneh, S., Shamloeian, M., Seyed Sharif, R., & Kadihodad, S. K. (2019). Effect of seed coating with organic fertilizer on emergence and growth of sugar beet seedlings. *Journal of Crops Improvement*, *21*(1), 43-59. Https://doi.org/10.22059/jci.2018.265951.2085(In Persian)

Ghori, N.H., Ghori, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 16(3): 1807-1828. Https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8

Halmer, P. (2006). Seed technology and seed enhancement. In XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: International Symposium on Seed Enhancement and Seedling Production, 771, 17-26. Https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.771.1

Hashemi, S., & Mohamadhasani, F. (2019). Study of physiological and biochemical parameters of some soybean (*Glycine max*) varieties (Telar, DPX, Caspian) under cadmium stress. *Applied Biology*, 32(3), 159-173. Https://doi.org/10.22051/jab.2020.4421

Hayat, S.; Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012).

Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. 7(11); 1456-1466. Https://doi.org/ 10.4161/psb.21949.

Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts, kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Biochemistry Biopsy*. 125: 189-198. Https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Hoseini, A., Moradi, b., & Balouchi, H. (2020). The effects of bio-priming on some of germination index of Faridan accession of *Pimpinella anisum* L. under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *9*(1), 1-13. Https://doi.org/10.22034/ijsst.2020.114533.1109

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. Https://doi.org/10.3390/plants10112258

Iftikhar, A., Abbas, G., Saqib, M., Shabbir, A., Amjad, M., Shahid, M., Ahmad, I., Iqbal, S., and 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

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. Https://doi.org/10.3390/plants9111575

Jiajia, X., Ningning, L., Li, Q., Ji-xiu, W., Li, Z., & Guozhu, Y. (2016). Effects of Cd Stress on Antioxidant Enzyme Activity of Sonchus asper L. Hill. and Zea mays L. in Intercropping System. Https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0

Kar, M., and D. Mishra. (1976) Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, 57 (2): 315-319. Https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315

Khaledi, N., Dehshiri, A., & Hassani, F. (2021). Effects of seed biopriming with fungus Trichoderma harzianum on secondary metabolites production in cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *37*(3), 513-529. Https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.352573.2897(In Persian)

Khanizadeh, P., Hatami, M., Abtahi, F. S., & Hosseini, N. (2019). Stimulatory effect of Pseudomonas fluorescens and P. putida bacteria on germination features and growth of lemon balm (*Melissa officinalis*). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology*), 32(3), 558-569. Https://doi.org/20.1001.1.23832592.1398.32.3.18.5

Kutrowska, A., Małecka, A., Piechalak, A., Masiakowski, W., Han´c, A., Barałkiewicz, D., Andrzejewska, B., Zbierska, J., Tomaszewska, B. (2017). Effects of binary metal combinations on zinc, copper, cadmium and lead uptake and distribution in *Brassica juncea*. *The Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 44, 32–39. Https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2017.05.007

Lachinani, A., Tabatabaei, S. J., Bostani, A., Abdossi, V., & Rezaee, S. (2023). Effect of mycorrhiza fungi, *Trichoderma* and selenium on the crop yield and antioxidant enzyme activity of strawberry. *Crop Science Research in Arid Regions*, 4(2), 475-485. Http://jast.modares.ac.ir/article-23-46244-en.html

Maely, A.C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods Enzymol*. 2: 764-775. Https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14

Maghsoudi, K., Ashrafi Dehkordi, E., & Mazloumi, S. M. (2021). The Role of Brassinosteroids and Salicylic Acid on Spinach Growth and Cadmium Accumulation under Cadmium Stress. *Journal of Vegetables Sciences*, *4*(8), 15-33. Https://doi.org/10.22034/iuvs.2021.139084.1125(In Persian)

Mahdi. I, Fahsi, N., Hafidi, M., Benjelloun, S., Allaoui, A., & Biskri, L. (2021). Rhizospheric Phosphate-Solubilizing *Bacillus atrophaeus* GQJK17 S8 Increases Quinoa Seedling, Withstands Heavy Metals, and Mitigates Salt Stress. *Sustainability*. 2021; 13(6):3307. Https://doi.org/10.3390/su13063307

Mahmoudi F, Sheikhzadeh Mosaddegh P, Zare. N, & Esmaielpour, B. (2019b). The effect of hormone and hydro priming on seed germination, growth and biochemical properties of borage seedling (*Borago officinalis* L.). *Plant Process and Function*; 7 (27):165-180. Https://jispp.iut.ac.ir/article-1-703-fa.html(In Persian)

Mahmoudi, F., Sheikhzadeh Mosaddegh, P., Zare, N., & Esmaielpour, B. (2019a). 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(1), 23-42. Https://doi.org/10.22108/ijpb.2019.111889.1104(In Persian)

Mahmoudi, F., Sheikhzadeh, P., Zare, N., & Esmaielpour, B. (2024). Effect of seed pretreatment with salicylic acid on seed germination, growth and biochemical indices of quinoa seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) under cadmium stress. *Iranian Journal of Plant Biology*, (15),1 - 26. Https://doi.org/10.22108/ijpb.2024.138548.1330 (In Persian)

Mallamaci R, Storelli MM, Barbarossa A, Messina G, Valenzano A, & Meleleo D. (2023). Potential Protective Effects of Spirulina (*Spirulina platensis*) against In Vitro Toxicity Induced by Heavy Metals (Cadmium, Mercury, and Lead) on SH-SY5Y Neuroblastoma Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(23):17076. Https://doi.org/10.3390/ijms242317076

Małolepsza, U., J. Nawrocka, & M. Szczech. (2017). Trichoderma virens 106 inoculation stimulates defence enzyme activities and enhances phenolic levels in tomato plants leading to lowered Rhizoctoniasolani infection. *Biocontrol. science technol*. 27: 180–199. https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1264570

Mansouri A, & Omidi H. (2022). Effect of priming and seed age on germination, photosynthetic pigments, and biochemical content of Quinoa seedling. *Plant Process and Function* 2022; 11 (50) : 15. Http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1813-en.html (In Persian)

Marković K, Milačič R, Heath E, Maršić NK, Pintar M, & Ščančar J. (2023). The Study of the Uptake of Chromium, Zinc, Cadmium and Lead from Spiked Nutrient Solution in Tomato Plants. *Proceedings*. 92(1):69. Https://doi.org/10.3390/proceedings2023092069

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 Https://doi.org/10.1007/s11356-018-3605-7

Novák M, Zemanová V, Lhotská M, Pavlík M, Klement A, Hnilička F, & Pavlíková, D. (2023). Response of Carrot (*Daucus carota* L.) to Multi-Contaminated Soil from Historic Mining and Smelting Activities. *International Journal of Molecular Sciences*. 24(24):17345. Https://doi.org/10.3390/ijms242417345

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. Https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.09.007

Pedrini, S., Merritt, D. J., Stevens, J. & Dixon, K. (2017). Seed coating: science or marketing spin?. Trends in Plant Science, 22(2), 106-116. Https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.11.002

Radovanovic V, Djekic I, & Zarkovic B. (2020). Characteristics of Cadmium and Lead Accumulation and Transfer by Chenopodium Quinoa Will. *Sustainability*. 12(9):3789. Https://doi.org/10.3390/su12093789

Rajpar. I., Khanif, Y.M. & Memon. A.A. (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. Https://doi.org/10.3923/ijar.2006.259.264

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 in Environmental Science and Technology*, 52, 1–52. Https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835435

Rasekhi Kazeruni, A., Zamani, M. R., Heidaryan naeini, F., Rasekhi Kazeruni, A., Mansoorian, A. R., & salami, S. (2021). Evaluation of molecular and biochemical properties in quinoa varieties. *Cellular and Molecular Research (Iranian Journal of Biology)*, 34(3), 299-312. Https://doi.org/20.1001.1.23832738.1400.34.3.7.8

Reddy, P.P. (2013). Bio-priming of seeds. In: Reddy PP, editor. Recent Advances in Crop Protection. India, Springer, p 83-90. Https://doi.org/10.1007/978-81-322-0723-8

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 stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 171, 146–153. Https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077

Rezaloo, Z., tohidloo, G., shahbazi, S., & Askari, H. (2018). Effects of Biopriming with Trichoderma Fungi on Germination and Some Vegetative Characteristics of Soybean and Canola. 14(1), 39-48. Https://doi.org/10.22034/ijsst.2018.121197.1182(In Persian)

Saadat, F., & Ehteshami, S. M. (2015). Effect of seed coating with micronutrients on some germination and vigor characteristics of marigold (*Calendula officinalis*). *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 2(2), 29-40. Https://doi.org/20.1001.1.24763780.1394.2.2.3.2(In Persian)

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. Https://doi.org/20.1001.1.15625540.1398.21.4.5.1 (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. Https://doi.org/10.22092/jmpb.2016.108919 (In Persian)

Salmanian S, Sadeghi Mahoonak A, Alami M, & Ghorbani M. (2014). Evaluation of Total Phenolic, Flavonoid, Anthocyanin Compounds, Antibacterial and Antioxidant Activity of Hawthorn (*Crataegus Elbursensis*) *Fruit Acetonic Extract. JRUMS* 2014; 13 (1):53-66. Https://doi.org/20.1001.1.17353165.1393.13.1.3.4 (In Persian)

Sanei, S. J., & Razavi, S. E. (2020). Growth responses of basil (*Ocimum basilicum* L.) to Trichoderma spp. and its influence in control and eliciting plant defense responses against Rhizoctonia solani. Biological control of pests and plant, 8(2), 27-38. Https://doi.org/10.22059/jbioc.2018.238913.208 (In Persian)

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(1), 18–28. 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 Biología*, 43:111-116. Http://doi.org/10.6018/analesbio.43.11

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 the sodA gene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174: 197-207. Http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.074.

Wang M., & Zhou, Q. (2005). Single and joint toxicity of chlorimuron-ethyl, cadmium, and copper acting on wheat Triticum aestivum. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60: 169–175. Http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.012

Xian, L., Zh. Yan, G. Zeng-gui, Zh. Jing-hua and G. Pei-lei. (2009). Study of Defensive Enzyme in Tomato Induced by Trichoderma REMI Transformants. *Northern Horticulture*, 73: 237-244.

Xin, Y., Liu, M., Wei, L., Gao, Y., Ruan, Y., Wang, Q., & Zhang, Z. (2023). Changes in Soil Chemical Properties and Rhizosphere Bacterial Community Induced by Soil Amendments Associated with Reduction in Cadmium Accumulation by Rice. *Agronomy*. 2023; 13(12):3051. Https://doi.org/10.3390/agronomy13123051

Zayneb, C., Bassem, K., Zeineb, K., Grubb, CD., Noureddine, D., Hafedh, M., & Amine, E. (2015). Physiological responses of fenugreek seedlings and plants treated with cadmium. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 10679-10689 Http:// doi.org/10.1007/s11356-015-4270-8

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 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*, 10;11(1):9913. Https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0

Zhou L, Zhou L, Wu H, Kong L, Li J, Qiao J, & Chen L. (2023). Analysis of Cadmium Contamination in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Using Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Sensors*. 23(23):9562. Https://doi.org/10.3390/s23239562.