University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

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

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8718.2332

Original article

Evaluation of germination characteristics and cadmium tolerance indices in various physalis (Physalis spp.) cultivars

Shima Ramezani[1], Rooholla Moradi[2*], Masoud Alipanah[2], Seyed Masoud Ziaei[2]

1. *Master's Student in Greenhouse Production, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran*

Received 8 January 2025; Revised 2 February 2025; Accepted 4 February 2025

Extended abstract

Introduction

The contamination of water, soil, and air by heavy metals has emerged as a major environmental concern driven by increasing anthropogenic activities. Major sources of heavy metals include urban and industrial wastewater and sludge, excessive chemical inputs, and metal mining activities. Cadmium (Cd) is recognized as one of the most hazardous heavy metals for both plants and humans. The permissible concentration of cadmium in agricultural soils is approximately 1 mg kg^{-1}. Cadmium has a low affinity for binding to soil stabilizing phases, such as oxides and solid organic matter; consequently, it can be readily absorbed by plants and translocated to aerial tissues. Cadmium stress inhibits several physiological and biochemical processes, including chlorophyll biosynthesis, photosynthesis, and nutrient uptake, ultimately leading to reduced plant growth and yield (Li et al., 2023). Cadmium accumulation and tolerance vary significantly among plant species and genotypes. Previous studies have reported a wide range of cadmium uptake and accumulation among different cultivars within the same plant species. Many members of the Solanaceae family, commonly grown in agricultural systems characterized by high inputs of organic and mineral fertilizers, exhibit high cadmium accumulation. Although Solanaceae species are regarded as cadmium-tolerant, their responses to cadmium stress vary among species. Physalis (Physalis spp.) is a member of the Solanaceae family valued for its bioactive compounds and its adaptability to a wide range of growing conditions. Physalis fruit possesses numerous nutritional, medicinal, and industrial benefits. The fruit is a rich source of provitamin A, vitamin C, and contains, to some extent, B-complex vitamins, as well as essential minerals such as phosphorus, potassium, zinc, and iron. Consequently, physalis fruit has attracted considerable attention owing to its high nutritional value, antioxidant capacity, and reported anti-inflammatory and anti-stress properties, along with other medicinal benefits. The strong antioxidant properties of this plant are largely attributed to its high content of dihydroxy withanolides. This study aimed to evaluate the effects of different cadmium concentrations on the germination characteristics of physalis and to determine the relative tolerance and sensitivity of yellow, green, and purple cultivars to cadmium stress.

Materials and methods

The experiment was conducted in 2024 as a factorial arrangement based on a completely randomized design with four replications at the University of Torbat-e Heydarieh. The experimental factors included six cadmium concentrations (0, 60, 120, 240, 500, and 750 µM) and three physalis cultivars (purple, yellow, and green).

* Corresponding author: Rooholla Moradi; E-Mail: r.moradi@torbath.ac.ir

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results showed that the application of low cadmium concentrations significantly increased germination percentage and germination rate, possibly due to stimulation of seed germination. However, higher cadmium concentrations had a negative effect on all germination characteristics of the studied cultivars. Cadmium stress at 500 µM resulted in reductions of 76%, 83%, and 66% in seedling weight compared to non stressed conditions for the purple, yellow, and green cultivars, respectively. In all physalis cultivars, proline content increased with increasing cadmium stress intensity. For instance, at a cadmium concentration of 500 µM, proline content increased by 9%, 17%, and 23% compared to control conditions in the purple, green, and yellow cultivars, respectively. The highest contents of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids were observed in all three cultivars at a cadmium concentration of 60 µM; however, the contents of these photosynthetic pigments decreased significantly with increasing cadmium concentration. The sensitivity to cadmium stress in the purple, green, and yellow cultivars was approximately 16%, 66%, and 71%, respectively. The tolerance index indicated that the purple cultivar exhibited the highest tolerance to cadmium stress (0.049), whereas the yellow cultivar showed the lowest tolerance (0.017).

Conclusion

Overall, the results indicated that all physalis cultivars tolerated cadmium stress up to 500 µM; however, seedling growth was inhibited at concentrations above this level. In terms of tolerance, the purple cultivar was the most tolerant, followed by the green cultivar, while the yellow cultivar exhibited the highest sensitivity to cadmium stress.

Keywords: Chlorophyll, Proline, Stress sensitivity index, Heavy metals, Solanaceae

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8718.2332

مقاله پژوهشی

بررسی خصوصیات جوانه‌زنی و شاخص‌های تحمل به تنش کادمیوم در برخی گونه‌های گیاه فیسالیس (*Physalis* spp.)

شیما رمضانی[1]، روح‌اله مرادی[2*]، مسعود علی‌پناه[2]، سیدمسعود ضیائی[2]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد تولید محصولات گلخانه ای، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت‌حیدریه، تربت‌حیدریه
۲. دانشیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت‌حیدریه، تربت‌حیدریه

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پرولین
سولاناسه
شاخص حساسیت به تنش
فلزات سنگین
کلروفیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کادمیوم بر خصوصیات جوانه‌زنی و آستانه تحمل برخی گونه‌های گیاه فیسالیس به تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۴۰۳ اجرا شد. فاکتور اول شامل ۶ سطح کادمیوم (صفر، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ میکرومولار) و فاکتور دوم شامل سه گونه فیسالیس (بنفش؛ *Physalis ixocarpa*، زرد؛ *Physalis philadelphic* و سبز؛ *Physalis peruviana*) بود. استفاده از کادمیوم در سطوح پایین باعث افزایش معنی‌دار سرعت و درصد جوانه‌زنی شد که می‌تواند به دلیل تحریک جوانه‌زنی در بذر باشد. اما، کاربرد کادمیوم در سطوح بالا تأثیر منفی بر کلیه خصوصیات جوانه‌زنی گونه‌های مورد بررسی داشت. تنش کادمیوم در سه گونه بنفش، زرد و سبز به ترتیب در سطح ۵۰۰ میکرومولار منجر به کاهش ۷۶، ۸۳ و ۶۶ درصدی وزن گیاهچه نسبت به شرایط عدم تنش شد. در تمامی گونه‌های فیسالیس، با افزایش شدت تنش کادمیوم، محتوی پرولین افزایش یافت. به‌طوری‌که در سطح ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم، میزان پرولین نسبت به شرایط مطلوب در گونه‌های بنفش، سبز و زرد به ترتیب ۹، ۱۷ و ۲۳ درصد افزایش یافت. میزان کلروفیل **a، **b** و کارتنوئید در سطح کاربرد ۶۰ میکرومولار کادمیوم بالاترین مقدار را در هر سه گونه دارا بود، ولی، با افزایش غلظت کادمیوم، به‌طور معنی‌داری از محتوی این رنگیزه‌های فتوسنتزی کاسته شد. درصد حساسیت به تنش کادمیوم در گونه‌های بنفش، سبز و زرد به ترتیب حدود ۱۶، ۶۶ و ۷۱ درصد بود. مقایسه شاخص تحمل نشان داد گونه‌های بنفش و زرد به ترتیب بیشترین و کمترین تحمل به تنش کادمیوم را شامل شدند. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که کلیه گونه‌های فیسالیس تا سطح تنش کادمیوم ۵۰۰ میکرومولار را تحمل کردند، اما از این سطح به بالا گیاهچه رشد نکرد. گونه زرد حساس‌ترین، گونهٔ سبز محتمل‌تر از رقم زرد و گونه‌ی بنفش مقاوم ترین گونه به تنش کادمیوم بودند.**

مقدمه

یکی از مشکلاتی که امروزه به دلیل فعالیت‌های انسان در حال افزایش است، آلودگی آب، خاک و هوا با فلزات سنگین است (Wang et al., 2021). منبع اصلی فلزات سنگین پساب و لجن حاصل از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی، نهاده‌های شیمیایی و معادن استخراج فلزات می‌باشد (Sun et al., 2010). کاربرد دراز مدت پساب‌ها و همچنین مصرف غیر اصولی کودهای شیمیایی که عمدتاً برای کشت سبزی و صیفی بکار برده می‌شود، منجر به تجمع فلزات سنگین در آب و خاک و انتقال آن به محصولات زراعی می‌شود (Moloto, 2010). کادمیوم (cd) به‌عنوان یکی از پرخطرترین فلزات سنگین برای انسان و گیاهان شناخته می‌شود (Chen et al., 2021). حد مجاز این عنصر در خاک ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم است (Chavez et al., 2015). کادمیوم در بین فلزات سنگین میل ترکیبی کمی برای اتصال به مواد تثبیت کننده خاک، نظیر اکسیدها و مواد جامد آلی خاک دارد؛ در نتیجه قابلیت جذب این عنصر توسط گیاهان و انتقال به اندام هوایی گیاه زیاد است (Baghai et al., 2018). تنش کادمیوم باعث ممانعت از فرآیندهای فیزیولوژی

* نگارنده پاسخگو: روح اله مرادی. پست الکترونیک: r.moradi@torbath.ac.ir

و بیوشیمیایی گیاه از جمله سنتز کلروفیل، فتوسنتز و جذب عناصر غذایی شده و باعث کاهش رشد و بازدهی در گیاه می‌شود (Yan et al., 2015; Li et al., 2023). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تنش کادمیوم با آزاد سازی رادیکال‌های ازاد باعث تنش اکسیداتیو و کاهش سطح آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی در گوجه فرنگی شد (Hasan et al., 2011; Ahmad et al., 2018; Alves et al., 2020). یی و همکاران (Ye et al., 2020) طی مطالعه اثر کادمیوم در گونه‌های سیب زمینی دریافتند که جذب کادمیوم در گونه‌های مختلف متفاوت بوده است و بیشترین میزان جذب در غده‌ها صورت گرفته است.

تجمع و تحمل کادمیوم به طور قابل توجهی در بین گونه‌هایی گیاهی و ژنوتیپ‌های آنها متفاوت است (Amirmoradi et al., 2017; Heydari et al., 2023). در مطالعات مختلف دامنه متفاوتی از جذب و تجمع کادمیوم در بین گونه‌های گوناگون یک گونه گیاهی مشاهده شده است. به طور مثال، در گونه‌های مختلف گندم (Liu et al., 2015)، سویا (Ahsan et al., 2012) و ذرت (Ma et al., 2021) مقادیر مختلفی از تجمع کادمیوم مشاهده شد. با توجه به سطح انباشت کادمیوم، کابوی و همکاران (Kuboi et al.,1986) سه دسته کلی از خانواده‌های گیاهی را شناسایی کردند که شامل انباشته کننده‌های پایین (باقلاییان) تجمع کننده‌های متوسط (گندمیان ، سوسنیان ، کدوییان و چتریان) و تجمع‌کننده‌های بالا (بادنجانیان ، اسفناجیان ، شب‌بویان و کاسنیان). بسیاری از گیاهان خانواده سیب زمینی با تجمع بالای کادمیوم، گیاهانی هستند که در مناطق حساس کشاورزی با ورودی بالایی از کودهای آلی و معدنی رشد می‌کنند. با این که، گزارش شده است که گیاهان خانواده سیب زمینی یکی از مقاوم‌ترین گیاهان نسبت به تنش کادمیوم هستند، واکنش گیاهان مختلف این خانواده به تنش کادمیوم متفاوت است. به عنوان مثال، در مطالعات متعدد بر گونه‌های گیاه گوجه فرنگی مشخص شد که تنش کادمیوم باعث روند کاهشی قابل توجه در صفات مورفولوژی این گیاه در ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم شد (Zhao et al., 2015؛ Hussain et al., 2015؛ Alcantara et al., 2021). اما گیاه بادمجان تا سطح ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم تاثیری از تنش کادمیوم نپذیرفت (Filippone et al., 2022). این حد در گیاهان خانواده Lamiaceae بسیار پایین‌تر است به طور مثال حد تحمل گیاه بادرنجبویه بین ۰/۵ تا یک میکرومولار است (Heydari et al., 2021). از طرفی، گونه‌های یک گونه نیز می‌توانند دامنه واکنش متفاوتی به تنش کادمیوم نشان دهند. به‌طوری‌که مطالعه آلکانترا و همکارانش (Alcantara et al., 2021) بر روی گونه‌های گوجه فرنگی تایید نمود که با افزایش سطح کادمیوم به دلیل وجود رنگدانه‌های متفاوت و تأثیر آنها به تنش‌های محیطی، گونه‌های مختلف این محصول‌ها دامنه حساسیت متفاوتی نسبت به تنش کادمیوم نشان دادند.

فیسالیس (*Physalis spp.*) یکی از گیاهان خانواده سیب زمینی است که به دلیل ترکیبات زیست فعال، پتانسل برای کشت گسترده و قابلیت تولید در تمام جهان مورد توجه است (Svobodová et al., 2018). میوه فیسالیس از جنبه خوراکی، دارویی و صنعتی فواید زیادی دارد (Álvarez-Flórez et al.,2017). این محصول، منبع بسیار خوبی برای پیش ساز ویتامین آ، ویتامین ث، آهن و تا حدی ویتامین B کمپلکس (Ezzat et al., 2024) و سرشار از عناصر معدنی فسفر، آهن، پتاسیم و روی است (Rosa et al., 2023). لذا، این میوه به دلیل وجود خواص تغذیه‌ای مربوط به محتوای ویتامین، مواد معدنی و آنتی اکسیدانی زیاد و همچنین خواص ضد التهابی و ضد تنش و دیگر خواص دارویی به شدت مورد توجه قرار گرفته است (Martínez et al., 2010). این گیاه به دلیل داشتن مواد موثره دی‌هیدروکسی‌فوزالین دارای خاصیت آنتی‌اکسیدان بالایی است (Shang et al., 2011). تا کنون ۱۳۰ گونه از فیسالیس در جهان شناخته شده است (Singh et al.,2014) گونه‌هایی فیسالیس بنفش (*Physalis ixocarpa*)، فیسالیس سبز (*Physalis philadelphica*) و فیسالیس زرد (*Physalis peruviana*) هر سه بومی مکزیک هستند گیاهانی علفی، نیمه بوته‌ای، راست قامت و چند ساله در مناطق نیمه گرمسیری، تا ارتفاع ۰/۶ تا ۰.۹ متر و در برخی موارد تا ۱/۸ متر رشد می‌کند. میوه آنها به شکل تخم مرغی و قطر بین ۱/۲۵ تا ۲/۵۰ سانتی‌متر و وزن ۴ تا ۱۰ گرم است که در داخل حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ دانه کوچک قرار داردکه در طب سنتی مصارف زیادی دارند (Arrieta-Baez et al., 2011؛ Puente et al., 2011؛ Zhang et al., 2016؛ Nakano et al.,2023). میوه‌های این گونه‌های از نظر رنگ، مزه، محتوای ویتامین‌ها، مواد معدنی، ترکیبات فنلی، متابولیت‌های ثانویه مانند فیسالین‌ها و استروئیدها (لاکتون‌های استروئیدی) متفاوت هستند (García-

نسخه پیش از انتشار

Mendieta et al., 2012; González-Chavira et al., 2019; Maldonado et al., 2011).

گیاه فیسالیس به دلیل ارزش اقتصادی بالا و تقاضای بالای بازار جهانی امروزه موردتوجه تولیدکننده‌های گلخانه‌ای قرار گرفته است. از سال ۱۳۹۰، حدود ۸۰۰۰ گلخانه در تهران و اطراف آن زیر کشت فیسالیس قرار گرفته است (Omidbaigi et al., 2010). علاوه بر این، با توجه به بحث کمبود آب و از طرفی تقاضا به استفاده از آب فاضلاب در کشاورزی و وجود فلزات سنگین در این آب‌ها به‌ویژه کادمیوم، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش کادمیوم بر خصوصیات جوانه‌زنی فیسالیس و تعیین میزان مقاومت و حساسیت گونه‌های زرد، سبز و بنفش آن به تنش کادمیوم اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به دلیل نبودن منابع کافی از تأثیر کادمیوم و میزان اثرگذاری آن بر فیسالیس برای ارزیابی آستانه تحمل گونه‌های مختلف این گیاه به تنش کادمیوم آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه دانشگاه تربت‌حیدریه انجام شد. فاکتور اول آزمایش شامل ۷ سطح کادمیوم (۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و فاکتور دوم شامل سه گونه فیسالیس (بنفش؛ *Physalis ixocarpa*، زرد؛ *Physalis philadelphic* و سبز؛ *Physalis peruviana*) بود. بذرها از شرکت گلسارگردن تهیه شد و نمونه‌های گیاهچه با عکس‌های موجود از گونه‌های مورداستفاده مطابقت داده شد. برای تهیه تیمار تنش کادمیوم از سولفات کادمیوم ($CdSO_4$) استفاده شد. هیچ جوانه‌زنی در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار کادمیوم انجام نشد؛ بنابراین، تجزیه آماری با ۶ سطح کادمیوم انجام شد.

ابتدا بذرها به‌وسیله هیپوکلرید سدیم ۵ درصد به مدت ۶۰ ثانیه ضد عفونی گردید. سپس با آب مقطر سه مرتبه شستشو داده شد. پس از آن، از هر تیمار، ۳۰ عدد بذر در پتری‌دیش روی کاغذ صافی واتمن قرار داده و پنج میلی‌لیتر از محلول سولفات کادمیوم مربوط به هر غلظت به پتری دیش‌ها اضافه شد. پتری دیش‌ها به درون ژرمیناتور با یک دوره دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت در روشنایی و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت در تاریکی، با رطوبت نسبی ۴۵ درصد، منتقل شدند. بعد از پانزده روز صفات زیر مورد بررسی قرار گرفت:

درصد جوانه‌زنی طبق معادله زیر محاسبه شد.

$$GC\ (\%) = \left(\frac{GS}{TS}\right) \times 100 \qquad [۱]$$

در این معادله، GC، GS و TS به ترتیب نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی، تعداد کل بذر جوانه‌زده در انتهای آزمایش و تعداد کل بذر کشت شده در هر پتری‌دیش هستند (Ikic et al., 2012).

سرعت جوانه‌زنی طبق معادله زیر محاسبه شد.

$$R_s = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{D_i} \qquad [۲]$$

در این معادله، RS: سرعت جوانه‌زنی (تعداد بذر در روز)، Si: تعداد بذر جوانه‌زده در هر شمارش، Di تعداد روز در هر شمارش تا شمارش n ام بود (Ikic et al., 2012).

وزن ساقه‌چه، ریشه‌چه و گیاهچه با ترازو بادقت ۰/۰۰۰۱گرم در روز پانزدهم اندازه‌گیری شد. طول ساقه‌چه و ریشه‌چه با استفاده از خط‌کش در روز پانزدهم اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری مقدار پرولین، ۱۰۰ میلی‌گرم گیاهچه به همراه ۱ میلی‌لیتر سولفوریک اسید ۱ نرمال هموژنیزه شد. عصاره به‌دست‌آمده در سانتریفیوژ در دور ۳۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه قرار داده شد. از عصاره به‌دست‌آمده ۰/۲ میلی‌لیتر با ۰/۲ میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین و ۰/۲ میلی‌لیتر اسید استیک داخل میکروتیوب ریخته و داخل دستگاه بن‌ماری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. سپس میکروتیوب‌ها را به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر نگهداری شد. در مرحله بعد ۰/۶ میلی‌لیتر تولوئن به آن اضافه کرده به مدت ۲۰ دقیقه شیکر ورتکس قرار گرفت. با استفاده از میکروپیپت فاز شفاف رویی به داخل کوت اسپکتوفتومتر (مدل LAXCO Alphol 506) منتقل شده و در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. در نهایت میزان پرولین بر اساس نمودار استاندارد پرولین بر حسب میکرومول بر گرم وزن تازه برگ به دست آمد (Bates et al., 1973).

اندازه‌گیری کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید به روش اسپکتوفتومتری بود. بدین منظور، ۰/۲ گرم گیاهچه را به همراه ۴ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژنایز شد. عصاره به‌دست‌آمده را سانتریفیوژ کرده و عصاره به‌دست‌آمده را در سه طول‌موج ۶۶۴ (کلروفیل a)، ۶۴۷ (کلروفیل b) و ۴۷۰

نسخه پیش از انتشار

(کارتنوئید) با دستگاه اسپکتوفتومتر اندازه‌گیری شد و با استفاده از معادلات زیر میزان آنها محاسبه شد.

$$Chl_a = 15.65A664 - 7.34A647 \quad [۳]$$

$$Chl_b = 27.05A647 - 11.21A664 \quad [۴]$$

$$Car = \frac{1000A470 - 286Chla - 129.2Chlb}{245} \quad [۵]$$

که در آن Chl_a: کلروفیل a ، Chl_b: کلروفیل b، A: میزان جذب و Car: کارتنوئید کل هستند (Shameh et al., 2019).

شاخص‌های تحمل به تنش با توجه به وزن گیاهچه با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (Fischer and Maurer., 1978; Fernandez, 1992; Mousavi et al., 2008):

شاخص حساسیت به تنش:

$$SSI = 1 - \frac{(\frac{Y_S}{Y_P})}{SI} \quad [۶]$$

شاخص تحمل:

$$SI = 1 - (\frac{\overline{Y_S}}{\overline{Y_P}}) \quad [۷]$$

شاخص تحمل به تنش:

$$STI = \frac{(Y_P)(Y_S)}{\overline{Y_S^2}} \quad [۸]$$

شاخص درصد حساسیت به تنش:

$$SSPI = [\frac{Y_P - Y_S}{2(\overline{Y_P})}] \quad [۹]$$

در روابط فوق Ys عملکرد (وزن گیاهچه) در شرایط تنش (سطح ۵۰۰ میکرومولار)، Yp عملکرد در شرایط عدم تنش، $\overline{Y_S}$ میانگین عملکرد گونه‌های در شرایط تنش و $\overline{Y_P}$ میانگین عملکرد گونه‌های در شرایط عدم تنش می‌باشد.

داده‌های حاصل از آزمایش بر اساس طرح آماری مورداستفاده، توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند و از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد جهت مقایسه میانگین استفاده شد. مقایسه میانگین به‌صورت برش‌دهی انجام شد. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تنش کادمیوم ($p>0.01$)، گونه‌های فیسالیس ($p>0.01$) و برهم‌کنش آنها ($p>0.01$) بر درصد جوانه‌زنی معنی‌دار بود (جدول ۱).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین تمامی سطوح تنش کادمیوم به جز تیمار ۶۰ میکرومولار باعث کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی در سه گونه فیسالیس شد (جدول ۲). در گونه بنفش، بیشترین درصد جوانه‌زنی در تنش کادمیوم ۶۰ میکرومولار مشاهده شد. کاربرد ۶۰ میکرومولار کادمیوم نه تنها تأثیر منفی بر درصد جوانه‌زنی رقم بنفش نداشت بلکه آن را نسبت به شرایط عدم تنش حدود ۳/۵ درصد بهبود بخشید. کمترین درصد جوانه‌زنی در گونه بنفش در ۱۲۰، ۲۴۰ و ۵۰۰ کادمیوم بود. که تنش کادمیوم در تیمارها این سطوح به ترتیب باعث کاهش حدود۱۰، ۷ و ۶ درصدی، درصد جوانه‌زنی در گونه بنفش گردید (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گونه سبز، بیشترین درصد جوانه‌زنی با اختلاف معنی‌دار در عدم استفاده از کادمیوم بود و کلیه سطوح تنش منجر به کاهش درصد جوانه‌زنی نسبت به شاهد شدند (جدول ۲). در این گونه، کمترین درصد جوانه‌زنی معنی‌دار در تیمار ۷۵۰ میکرومولار بود که کاهش ۳۷ درصدی نسبت به عدم تنش مشاهده شد.

در گونه زرد، تیمار شاهد و ۶۰ میکرومولار (۱۰۰ درصد) بدون اختلاف معنی‌دار بیشترین درصد جوانه‌زنی را دارا بودند (جدول ۲). کمترین درصد جوانه‌زنی در این گونه در تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد که نسبت به عدم تنش کاهش ۱۴/۸۹درصدی داشت.

در تیمار ۵۰۰ میکرومولار در گونه‌های بنفش، سبز و زرد به ترتیب شاهد کاهش، ۶/۶۷، ۲۵/۴۲، ۱۶/۶۷ درصدی میزان جوانه‌زنی نسبت به شاهد بودیم. تنش کادمیوم در تیمار ۵۰۰ میکرومولار در گونه بنفش کمترین تأثیر بر درصد جوانه‌زنی مشاهده شد.

سرعت جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس تایید نمود که اثرات تنش کادمیوم، گونه‌های فیسالیس و برهم‌کنش آنها ($p>0/01$) بر سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار بود (جدول ۱).

در هر سه گونه فیسالیس بنفش، سبز و زرد افزایش شدت تنش کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی شد (جدول ۲). به‌طوری‌که به‌عنوان‌مثال در سه گونه بنفش، سبز و زرد کاربرد ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۲۱، ۴۱ و ۱۵ درصدی سرعت جوانه‌زنی نسبت به شاهد شد. در گونه فیسالیس بنفش، تیمار ۱۲۰ میکرومولار کادمیوم

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش کادمیوم بر خصوصیات جوانه‌زنی سه گونه مختلف گیاه فیسالیس

Table 1. Results of Analysis of Variance (Mean Squares) for the Effect of Cadmium Stress on Germination Characteristics of Different Species of Physalis

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	وزن گیاهچه Seedling weight	وزن ساقه‌چه Hypocotyl weight	وزن ریشه‌چه Radicle Weight	طول ساقه‌چه Hypo length	طول ریشه‌چه Radicle length
گونه Species (E)	2	376.58**	5.92**	0.00075**	0.0002**	0.0001**	0.891**	4.77**
تنش Stress (S)	5	338.62**	1.35**	0.001**	0.0004**	0.0001**	13.8**	14.16**
تنش× گونه E×S	10	116.40**	0.815**	0.0001**	0.00004**	0.00002**	0.197**	0.463**
خطا Error	54	7.53	0.055	0.0000001	0.0000001	0.00000002	0.0021	0.005
C.V (%)	-	*3.008*	*9.75*	*4.007*	*5.76*	*3.98*	*3.17*	*4.29*

ns، *و**به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱٪

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

جدول ۲. مقایسه میانگین برهم‌کنش گونه و تنش کادمیوم بر خصوصیات جوانه‌زنی گیاه فیسالیس

Table 2. Comparison of Means for the Interaction of species and Cd Stress on Germination Characteristics of Physalis

گونه species	تنش Stress	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	وزن گیاهچه Seedling weight	وزن ساقه‌چه Hypocotyl weight	وزن ریشه‌چه Radicle Weigh	طول ساقه‌چه Hypocotyl length	طول ریشه‌چه Radicle length
	µmol.l^{-1}	%	Seed.day^{-1}	----------	mg FW	----------	---------- cm ----------	
بنفش *P. ixocarpa*	0	95.00^{ab}	2.72^{b}	0.052^{a}	0.031^{a}	0.021^{a}	2.95^{a}	5.25^{a}
	60	98.33^{a}	2.80^{b}	0.044^{b}	0.025^{b}	0.019^{a}	2.57^{b}	5.03^{b}
	120	86.00^{c}	3.65^{a}	0.024^{c}	0.013^{c}	0.011^{b}	2.15^{c}	3.87^{c}
	240	88.33^{c}	2.32^{c}	0.022^{c}	0.012^{c}	0.01^{b}	1.88^{d}	2.17^{d}
	500	88.66^{c}	2.14^{d}	0.012^{d}	0.007^{d}	0.005^{c}	1.13^{e}	1.90^{e}
	750	83.33^{d}	2.18^{d}	0.0004^{e}	0^{e}	0.0004^{d}	0^{f}	0.631^{f}
سبز *P. peruviana*	0	98.33^{a}	2.63^{a}	0.03^{a}	0.016^{a}	0.014^{a}	3.63^{a}	2.88^{a}
	60	96.33^{a}	2.17^{b}	0.022^{b}	0.013^{a}	0.009^{b}	2.94^{b}	2.04^{b}
	120	96.66^{a}	2.17^{b}	0.013^{c}	0.008^{b}	0.005^{c}	1.54^{c}	1.35^{c}
	240	91.66^{b}	1.97^{c}	0.011^{c}	0.008^{b}	0.003^{c}	0.793^{d}	0.859^{d}
	500	73.33^{c}	1.53^{d}	0.005^{d}	0.003^{c}	0.002^{c}	0.250^{e}	0.533^{e}
	750	61.66^{d}	1.28^{e}	0.0003^{e}	0^{d}	0.0003^{d}	0^{f}	0.333^{f}
زرد *P. philadelphic*	0	100^{a}	2.33^{a}	0.027^{a}	0.016^{a}	0.011^{a}	3.20^{a}	3.65^{a}
	60	100^{a}	2.33^{a}	0.022^{b}	0.014^{a}	0.008^{b}	3.18^{a}	2.15^{b}
	120	96.66^{b}	2.11^{b}	0.015^{c}	0.009^{b}	0.006^{b}	1.94^{b}	0.783^{c}
	240	96.66^{b}	2.08^{b}	0.007^{d}	0.001^{d}	0.006^{b}	0.290^{c}	0.473^{d}
	500	90.33^{c}	1.96^{c}	0.009^{d}	0.005^{c}	0.004^{b}	0.220^{c}	0.383^{e}
	750	85.11^{d}	1.93^{c}	0.0009^{e}	0^{e}	0.0009^{c}	0^{d}	0.260^{e}

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

In each column based on slicing method, means with same letters are not significantly different according to LSD test ($p< 0.05$)

باعث افزایش معنی‌دار (۳۴/۱۹ درصدی) سرعت جوانه‌زنی نسبت به عدم تنش گردیده که بالاترین سرعت جوانه‌زنی در این تیمار مشاهده شد. کمترین میزان سرعت جوانه‌زنی در فیسالیس گونه بنفش بدون اختلاف معنی‌دار تیمارهای ۵۰۰ و ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد که باعث افزایش حدود ۲۱ و ۱۹ درصدی سرعت جوانه‌زنی نسبت به شاهد گردید.

نتایج نشان داد تیمار عدم تنش کادمیوم با اختلاف معنی‌داری نسبت به دیگر تیمارها بیشترین میزان سرعت جوانه‌زنی را در گونه سبز فیسالیس داشت. تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم کمترین میزان سرعت جوانه‌زنی را در گونه سبز نشان داد که این تیمار باعث کاهش ۵۱ درصدی سرعت جوانه‌زنی نسبت به شاهد گردید.

عدم استفاده از کادمیوم و استفاده از کادمیوم ۶۰ میکرومولار بدون اختلاف معنی‌دار بیشترین میزان سرعت جوانه‌زنی را در گونه زرد داشت. تنش ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم باعث کاهش ۱۷ درصدی سرعت جوانه‌زنی در گونه زرد نسبت به شاهد گردید که این تیمار کمترین میزان سرعت جوانه‌زنی را در گونه زرد داشت.

در اکثر سطوح تنش کادمیوم، سرعت جوانه‌زنی گونه بنفش بیشتر از گونه زرد و آن هم بیشتر از گونه سبز بود.

وزن گیاهچه

نتایج نشان داد تأثیر تنش کادمیوم، گونه‌های فیسالیس و برهم‌کنش آنها بر وزن گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

در کلیه گونه‌های بنفش، سبز و زرد فیسالیس تنش کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار وزن گیاهچه گردید (جدول ۲). در گونه بنفش، بیشترین میزان وزن گیاهچه در شرایط عدم استفاده از کادمیوم بود. تیمار ۷۵۰ میکرومولار باعث کاهش ۹۹/۹ درصدی وزن گیاهچه گونه بنفش نسبت به شاهد شد. به‌طوری‌که، این تیمار کمترین میزان وزن گیاهچه را دارا بود.

نتایج نشان داد در گونه سبز، بیشترین میزان وزن گیاهچه در شرایط عدم تنش مشاهده شد. کمترین میزان وزن گیاهچه در این با اختلاف معنی‌دار در تیمار ۷۵۰ میکرومولار بود که باعث کاهش ۹۹ درصدی نسبت به عدم تنش گردید.

در گونه زرد نیز با افزایش سطوح تنش کادمیوم میزان وزن گیاهچه کاهش معنی‌داری نشان داد. به‌طوری‌که بیشترین میزان وزن گیاهچه در گونه زرد در تیمار شاهد مشاهده شد. در گونه زرد شرایط تنش ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم کمترین میزان وزن گیاهچه را داشت به‌طوری‌که این تنش باعث کاهش ۹۹/۶ درصدی وزن گیاهچه نسبت به عدم استفاده از کادمیوم را نشان داد. در سه گونه بنفش، سبز و زرد فیسالیس تنش ۵۰۰ میکرومولار به ترتیب باعث کاهش حدود ۷۶، ۸۳ و ۶۶ درصدی وزن گیاهچه گردیدند.

وزن ساقه‌چه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش کادمیوم ($p\leq0.01$)، گونه‌های فیسالیس ($p\leq0.01$) و برهم‌کنش آنها ($p\leq0.01$) بر میزان وزن ساقه‌چه گیاه فیسالیس معنی‌دار بود (جدول ۱).

نتایج نشان داد در تمامی گونه‌های فیسالیس، تنش کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار وزن ساقه‌چه نسبت به شرایط عدم تنش گردید (جدول ۲). در فیسالیس بنفش، کمترین میزان وزن ساقه‌چه با اختلاف معنی‌داری با دیگر تیمارها در تیمار شاهد بود. تنش ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم منجر به عدم رشد یا به عبارتی کاهش ۱۰۰ درصدی وزن ساقه‌چه در گونه بنفش فیسالیس شد. صرف‌نظر از سطح ۷۵۰ میکرومولار، کمترین میزان وزن ساقه‌چه در فیسالیس بنفش در زمان استفاده از ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم بوده که باعث کاهش ۷۷ درصدی نسبت به عدم تنش شد. در گونه سبز، وزن ساقه‌چه در شرایط عدم تنش و تنش ۶۰ میکرومولار بدون اختلاف معنی‌داری بالاترین میزان را دارا بودند. در این گونه، استفاده از ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم باعث صفرشدن وزن ساقه‌چه گردید. در فیسالیس سبز، در تیمار ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم پایین‌ترین میزان این صفت مشاهده شد که این تیمار باعث کاهش ۸۱ درصدی وزن ساقه‌چه نسبت به عدم تنش گردید.

بیشترین میزان وزن ساقه‌چه گونه فیسالیس زرد نیز در تیمارهای صفر و ۶۰ میکرومولار کادمیوم بدون اختلاف معنی‌دار حاصل شد. کمترین میزان وزن ساقه‌چه این گونه در سطح تنش ۵۰۰ میکرومولار بود که باعث کاهش ۶۸ درصدی وزن ساقه‌چه نسبت به تیمار شاهد گردید. تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم باعث کاهش ۱۰۰ درصدی وزن ساقه‌چه نسبت به عدم تنش در گونه زرد گردید.

نسخه پیش از انتشار

وزن ریشه‌چه

وزن ریشه‌چه نیز به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تنش کادمیوم ($p\leq0.01$)، گونه‌های فیسالیس ($p\leq0.01$) و برهم‌کنش آنها ($p\leq0.01$) قرار گرفت (جدول ۱).

در هر سه گونه فیسالیس بنفش، سبز و زرد وزن ریشه‌چه با افزایش غلظت تیمارهای کادمیوم کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). در گونه فیسالیس بنفش، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای صفر و ۶۰ میکرومولار از نظر وزن ریشه‌چه مشاهده نشد. در تیمار ۷۵۰میکرومولار تنش کمترین میزان وزن ریشه‌چه در گونه بنفش مشاهده شد به‌طوری‌که این تیمار باعث کاهش ۹۸ درصدی وزن ریشه‌چه نسبت به عدم استفاده از تنش شد. در گونه‌های فیسالیس سبز و زرد بیشترین وزن ریشه‌چه در تیمار عدم تنش مشاهده شد.

تیمارهای ۱۲۰، ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار در وزن ریشه‌چه در گونه سبز اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند. کمترین میزان وزن ریشه‌چه در گونه سبز تنش ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم بود این تیمار باعث کاهش ۹۷ درصدی وزن ریشه‌چه نسبت به تیمار شاهد در گونه سبز شد.

کمترین میزان وزن ریشه‌چه در گونه زرد در تنش ۷۵۰ میکرومولار مشاهده شد به‌طوری‌که این تنش حدود ۹۱درصد نسبت به عدم تنش کاهش یافت. تنش ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۷۶، ۸۵ و ۶۳ درصدی وزن ریشه‌چه در سه گونه بنفش، سبز و زرد فیسالیس شد.

طول ساقه‌چه

طول ساقه‌چه در سطح احتمال یک درصد تحت‌تأثیر تنش کادمیوم، گونه‌های فیسالیس و برهم‌کنش آنها قرار گرفت (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در کلیه گونه‌های فیسالیس، اعمال تنش کادمیوم منجر به کاهش معنی‌دار طول ساقه‌چه نسبت به شرایط عدم تنش شد (جدول ۲). در گونه بنفش بیشترین میزان طول ساقه‌چه در شرایط عدم تنش کادمیوم مشاهده شد. در گونه بنفش تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم طول ساقه‌چه صفر بود. کاهش ۶۱ درصدی طول ساقه‌چه در گونه بنفش در تیمار ۵۰۰ مشاهده شد.

گونه سبز فیسالیس، در تیمار شاهد بیشترین میزان طول ساقه‌چه را داشت. بیشترین کاهش طول ساقه‌چه در گونه سبز در تیمار ۵۰۰ میکرومولار بود. تیمارهای ۵۰۰ و ۷۵۰ میکرومولار به ترتیب باعث کاهش ۹۳ و ۱۰۰درصدی طول ساقه‌چه در گونه سبز شد.

بیشترین طول ساقه‌چه در گونه زرد بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای صفر و ۶۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد. در تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم در گونه زرد طول ساقه‌چه صفر بود. تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار در گونه زرد باعث کاهش ۹۰ درصدی طول ساقه‌چه نسبت به شرایط نرمال شدند.

طول ریشه‌چه

باتوجه‌به نتایج تجزیه واریانس اثر تنش ($p\leq0.01$)، گونه فیسالیس ($p\leq0.01$) و برهم‌کنش آنها ($p\leq0.01$) بر طول ریشه‌چه تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۱).

تنش کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار طول ریشه‌چه در گونه‌های مختلف فیسالیس شد (جدول ۲). تیمار شاهد در هر سه گونه فیسالیس بنفش، سبز و زرد بیشترین طول ریشه‌چه را داشتند. کمترین طول ریشه‌چه در گونه بنفش با اختلاف معنی‌دار با دیگر تیمارها در تیمار ۷۵۰ میکرومولار مشاهده شد به‌طوری‌که طول ریشه‌چه این تیمار ۸۸ درصد بیشتر از عدم تنش کادمیوم بود. در فیسالیس سبز، تیمار ۷۵۰ میکرومولار کادمیوم باعث کاهش ۸۸ درصدی طول ریشه‌چه شد که این میزان بیشتر کاهش طول ریشه‌چه را نسبت به شرایط نرمال نشان داد. تیمارهای ۵۰۰ و ۷۵۰ میکرومولار بدون اختلاف معنی‌دار کمترین طول ریشه‌چه را در گونه زرد داشت. تیمارهای ۵۰۰ و ۷۵۰ میکرومولار باعث کاهش ۸۹ و ۹۲ درصدی طول ریشه‌چه نسبت به عدم تنش در گونه زرد شدند.

میزان پرولین گیاهچه

اثر تنش کادمیوم، گونه‌های فیسالیس و برهم‌کنش آنها بر میزان پرولین گیاهچه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

در تمامی گونه‌های فیسالیس افزایش تنش کادمیوم باعث افزایش معنی‌دار پرولین گیاهچه گردید (جدول ۴). در گونه بنفش، بیشترین میزان پرولین گیاهچه بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار به ترتیب به میزان ۲۴/۵۲ و ۲۲/۶۴ میکروگرم در گرم وزن تر گیاهچه مشاهده شد. تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم باعث افزایش ۹۶۶ و ۸۸۴ درصدی میزان پرولین در گونه فیسالیس بنفش

نسخه پیش از انتشار

نسبت به شرایط مطلوب شد. در گونه‌های بنفش و سبز تیمارهای ۶۰ و ۱۲۰ میکرومولار کادمیوم تأثیر معنی‌داری بر میزان پرولین نسبت به شاهد نداشتند.

بیشترین میزان پرولین در گونه سبز فیسالیس در تیمار ۵۰۰ میکرومولار مشاهده شد به‌طوری‌که این تیمار باعث افزایش ۱۷/۵برابری میزان پرولین در گونه بنفش نسبت به شاهد گردید.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش کادمیوم بر خصوصیات بیوشیمیایی گونه‌های مختلف گیاه فیسالیس

Table 3. Results of Analysis of Variance (Mean Squares) for the Effect of Cadmium Stress on Biochemical Characteristics of Different species of Physalis

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	پرولین Proline	کلروفیلa Chlorophyll a	کلروفیلb Chlorophyll b	کارتنوئید Cartenoied
Species (E)	گونه	2	828.6**	0.096**	0.002**	0.023**
Stress (S)	تنش	4	3249**	0.166**	0.015**	0.010**
E×S	تنش× گونه	8	168.1**	0.021**	0.001**	0.001**
Error	خطا	45	0.089	0.0004	0.000009	0.00002
C.V (%)	ضریب تغییرات	-	*1.55*	*9.51*	*5.93*	*8.65*

ns، *و**به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱٪

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

جدول ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش گونه و تنش بر برخی خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه تعدادی از گونه‌های فیسالیس

Table 4. Comparison of means for the interaction of species and stress on some biochemical characteristics of Physalis

گونه Species	تنش Stress	پرولین Proline	کلروفیل a Cha	کلروفیل b Chb	کارتنوئید Cartenoied
	µmol.l^{-1}	µg.g FW^{-1}	----------mg. mg FW^{-1}----------		
بنفش *P. ixocarpa*	0	2.31^{b}	3.71^{b}	0.63^{b}	1.16^{a}
	60	2.65^{b}	4.33^{a}	0.91^{a}	1.23^{a}
	120	5.57^{b}	3.31^{b}	0.57^{c}	1.00^{b}
	240	22.64^{a}	2.64^{c}	0.54^{c}	0.94^{bc}
	500	24.52^{a}	2.52^{c}	0.51^{c}	0.93^{bc}
	750	-	-	-	-
سبز *P. peruviana*	0	2.34^{c}	2.16^{a}	0.75^{b}	0.56^{b}
	60	3.15^{c}	2.22^{a}	1.74^{a}	0.72^{a}
	120	8.47^{c}	2.02^{b}	0.52^{c}	0.17^{c}
	240	28.23^{b}	1.96^{b}	0.34^{d}	0.13^{c}
	500	41.15^{a}	1.11^{c}	0.24^{d}	0.14^{c}
	750	-	-	-	-
زرد *P. philadelphic*	0	2.44^{d}	3.23^{a}	0.80^{b}	0.97^{a}
	60	3.42^{d}	3.26^{a}	1.03^{a}	0.95^{a}
	120	12.17^{c}	3.10^{a}	0.70^{c}	0.49^{b}
	240	45.49^{b}	2.11^{b}	0.62^{c}	0.22^{c}
	500	58.25^{a}	1.97^{b}	0.31^{d}	0.17^{c}
	750	-	-	-	-

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

In each column based on slicing method, means with same letters are not significantly different according to LSD test (p<0.05)

نسخه پیش از انتشار

در گونه زرد، بیشترین افزایش میزان پرولین (۵۸/۲۵ میکروگرم در گرم وزن تر گیاهچه) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار مشاهده شد. تیمار ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم در گونه زرد باعث افزایش ۲۳/۸۷ برابری میزان پرولین شد. کمترین میزان پرولین در گونه زرد در تیمارهای صفر و۶۰ میکرومولار مشاهده شد.

میزان کلروفیل a

نتایج نشان داد که میزان کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد، تحت‌تأثیر تنش کادمیوم، گونه‌های فیسالیس و برهم‌کنش آنها قرار گرفت (جدول ۳).

در گونه بنفش، بیشترین میزان کلروفیل a در تیمار ۶۰ میکرومولار مشاهده شد که این تیمار باعث افزایش ۱۶ درصدی کلروفیل a در این گونه نسبت به شاهد شد (جدول ۴). کمترین میزان کلروفیل a در فیسالیس بنفش بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای ۵۰۰ و ۲۴۰ میکرومولار مشاهده شد به‌طوری‌که این تیمارها به ترتیب باعث کاهش حدود ۲۸ و ۳۲ درصدی نسبت به عدم استفاده از کادمیوم شد.

بیشترین میزان کلروفیل a در فیسالیس سبز بدون اختلاف معنی‌دار در دو تیمار شاهد و ۶۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد. کلروفیل a فیسالیس گونه سبز در تیمار ۵۰۰ میکرومولار کمترین میزان را داشت به‌طوری‌که این تیمار باعث کاهش ۴۸درصدی کلروفیل a نسبت به تیمار شاهد شد.

در گونه زرد کلروفیل a در تیمارهای صفر، ۶۰ و ۱۲۰ میکرومولار بدون اختلاف معنی‌دار بالاترین سطح را داشت. کمترین میزان کلروفیل a در گونه زرد در تیمارهای ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار بدون اختلاف معنی‌دار بود. تیمارهای ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار باعث کاهش ۳۴/۶ و ۳۹ درصدی کلروفیل a در گونه زرد شد.

میزان کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس نشان داد میزان کلروفیل b در بوته تحت‌تأثیر تنش ($P\leq0.01$)، گونه‌های فیسالیس ($P\leq0.01$) و برهم‌کنش آنها ($P\leq0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳).

در تمامی گونه‌های فیسالیس، تیمار ۶۰ میکرومولار کادمیوم باعث افزایش کلروفیل b نسبت به عدم تنش شد (جدول ۴). کلروفیل b در گونه بنفش (۰/۹۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر گیاهچه) در تیمار ۶۰ میکرومولار بالاترین سطح را داشت. این تیمار باعث افزایش ۴۴ درصدی کلروفیل b در گونه بنفش نسبت به شاهد شد. در گونه بنفش افزایش کادمیوم در تیمارهای ۱۲۰، ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار (به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۵۴ و ۰/۵۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر گیاهچه) تأثیر معنی‌داری بر کاهش میزان کلروفیل b نداشت.

بیشترین میزان کلروفیل b در گونه سبز در تیمار ۶۰ میکرومولار کادمیوم بود. تیمار ۶۰ میکرومولار تنش کادمیوم باعث افزایش ۱۳۲درصدی میزان کلروفیل b نسبت به شاهد گردید. کمترین میزان کلروفیل b در گونه سبز بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار مشاهده شد به‌طوری‌که این تیمارها باعث کاهش ۵۴ و ۶۸ درصدی کلروفیل b نسبت به عدم تنش شد.

در گونه زرد، تیمار ۶۰ میکرومولار باعث افزایش ۲۸ درصدی کلروفیل b نسبت به شاهد گردید که این تیمار بالاترین میزان کلروفیل b در این گونه را دارا بود. قرارگیری بذر در معرض ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم در گونه زرد باعث کاهش ۶۱ درصدی کلروفیل b نسبت به عدم تنش شد. به‌طوری‌که کمترین میزان کلروفیل b در گونه زرد (۰/۳۱میلی‌گرم در گرم وزن تر گیاهچه) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار مشاهده شد.

محتوی کارتنوئید

نتایج تجزیه واریانس نشان داد محتوی کارتنوئید تحت‌تأثیر تنش کادمیوم ($P\leq0.01$)، گونه‌های فیسالیس ($P\leq0.01$) و برهم‌کنش آنها ($P\leq0.01$) قرار گرفت (جدول ۳).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در گونه بنفش، بیشترین میزان کارتنوئید بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای صفر و ۶۰ میکرومولار مشاهده شد (جدول ۴). کمترین میزان کارتنوئید در گونه بنفش در تیمارهای ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار بود به‌طوری‌که این تیمارها باعث کاهش ۱۸ و ۱۹ درصدی میزان کارتنوئید گردید.

در گونه سبز، بالاترین میزان کارتنوئید در تیمار ۶۰ میکرومولار مشاهده شد. تیمار ۶۰ میکرومولار باعث افزایش ۲۸/۵۷ درصدی نسبت به عدم تنش گردید. پایین ترین میزان کارتنوئید در گونه سبز بدون اختلاف معنی‌دار در تیمارهای ۱۲۰، ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار مشاهده شد که این تیمارها به ترتیب باعث کاهش ۶۹، ۷۶ و ۷۵ درصدی میزان کارتنوئید نسبت به شرایط مطلوب گردید.

نسخه پیش از انتشار

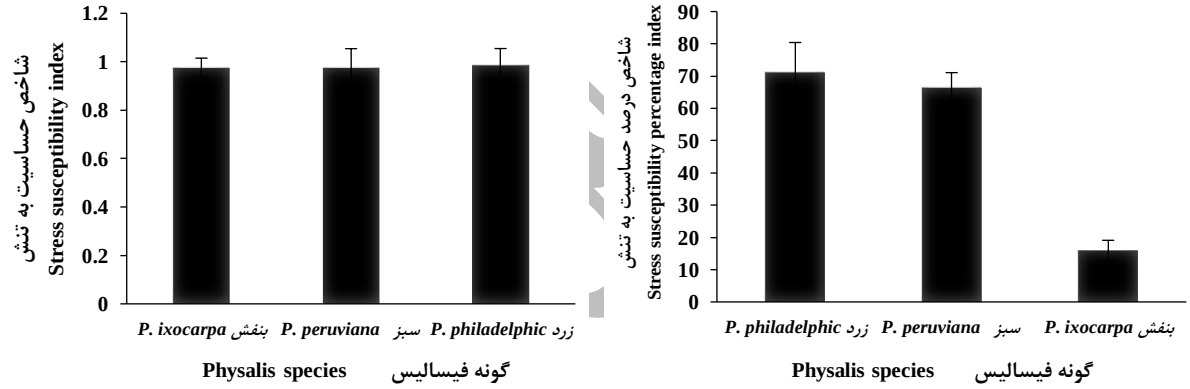
در گونه زرد، در تیمارهای شاهد و ۶۰ میکرومولار کادمیوم بیشترین میزان کارتنوئید (۰/۹۷ و ۰/۹۵ میلی‌گرم در گرم) را داشت. در گونه زرد کمترین میزان کارتنوئید در تیمارهای ۲۴۰ و ۵۰۰ میکرومولار بود به‌طوری‌که این تیمارها باعث کاهش ۷۷ و ۸۲ درصدی میزان کارتنوئید نسبت به شاهد شد.

شاخص حساسیت به تنش (SSI) و درصد شاخص حساسیت به تنش (SSPI)

در این آزمایش نتایج SSI نشان داد گونه‌های سبز و بنفش فیسالیس بدون اختلاف قابل توجهی حساسیت کمتری نسبت به گونه زرد به تنش کادمیوم دارا بودند (شکل ۱). از لحاظ درصد حساسیت به تنش کادمیوم نیز نتایج نشان داد که کمترین درصد حساسیت به تنش کادمیوم در گونه بنفش مشاهده شد. درصد حساسیت به تنش در گونه زرد و سبز به طور قابل توجهی بیشتر از گونه بنفش بود. به عبارتی، گونه سبز بیشترین درصد حساسیت به تنش کادمیوم را دارا بود.

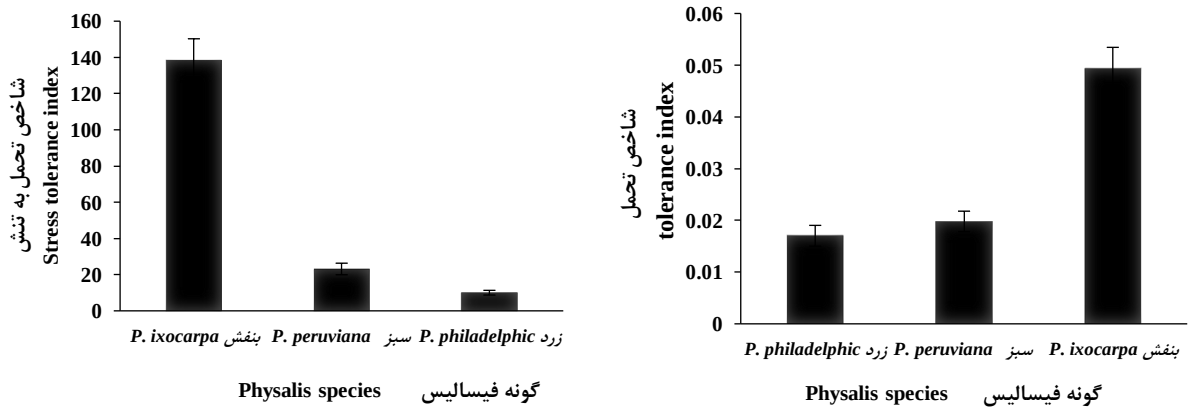
شاخص تحمل (TOL) و شاخص تحمل به تنش (STI)

مقایسه شاخص TOL نشان داد که گونه بنفش با بیشترین مقدار و گونه زرد با کمترین مقدار به ترتیب بیشترین و کمترین تحمل به تنش کادمیوم را شامل شدند (شکل ۲). اختلاف معنی‌داری از این نظر بین گونه سبز و زرد مشاهده نشد. بر اساس شاخص STI، گونه بنفش با عدد ۱۳۸/۷ متحمل‌ترین گونه به تنش کادمیوم بود. میزان شاخص STI در گونه سبز و زرد به ترتیب ۲۳/۱۳ و ۱۰/۰۳ بود. به عبارتی، گونه زرد بر اساس شاخص STI کمترین میزان تحمل به تنش کادمیوم را دارا بود.



شکل ۱. شاخص‌های حساسیت به تنش (SSI) و درصد حساسیت به تنش (SSPI) کادمیوم در برخی از گونه‌های فیسالیس

Fig. 1. Stress Susceptibility Index (SSI) and Stress Susceptibility Percentage Index (SSPI) in some Physalis Species under cadmium stress



شکل ۲. شاخص تحمل (TOL) و شاخص تحمل به تنش (STI) کادمیوم در برخی از گونه‌های فیسالیس

Fig. 2. Tolerance index (TOL) and tolerance index to cadmium stress (STI) in different Physalis Species

بحث

نتایج تحقیق نشان داد تنش کادمیوم در سطوح پایین نه تنها اثر منفی بر صفات سرعت و درصد جوانه‌زنی و وزن ریشه‌چه نداشت بلکه باعث افزایش آنها شد (جدول ۲). در مطالعات دیگری نیز تایید شده است که کاربرد سطوح پایین عناصر سنگین می‌تواند باعث افزایش برخی صفات جوانه‌زنی شود (Shankar, 2020; Alves et al., 2020; Sun et al., 2021). کاهش جوانه‌زنی بذر توسط کادمیوم در گیاهان شنبلیله (Salarizadeh et al., 2016) و سبز زیره (Zayneb et al., 2015) نشان داده شده است. جوانه‌زنی از مهمترین و حساسترین مراحل رشدی محصولات زراعی است. یکنواختی و درصد سبز شدن بذر میتواند تأثیر زیادی بر عملکرد و کیفیت محصول داشته باشد (Shahrousvand, 2010). به نظر می‌رسد سطوح پایین کادمیوم باعث تحریک جوانه‌زنی بذر می‌شود (Liu et al., 2013). در غلظت‌های پایین، کادمیوم می‌تواند به عنوان یک محرک تنش اکسیداتیو عمل کند که ممکن است منجر به افزایش تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود مقاومت گیاهان در برابر شرایط نامساعد شود (Zulfiqar et al., 2022). کادمیوم ممکن است بر روی تولید و فعالیت هورمون‌های گیاهی مانند جیبرلین، اکسین‌ها و سیتوکینین‌ها تأثیر بگذارد. این هورمون‌ها نقش مهمی در جوانه‌زنی و رشد گیاهان دارند (Zulfiqar et al., 2022). در برخی موارد، کادمیوم ممکن است به جذب بهتر برخی عناصر مغذی کمک کند، که می‌تواند تأثیر مثبتی بر روی رشد گیاهچه داشته باشد (Zulfiqar et al., 2022). در مطالعه اسپلانی و فلاح (Esplani and Fallah., 2015) بر روی ریحان و زنیان درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی ریحان و زنیان تحت غلظت‌های اولیه کادمیوم نسبت به شاهد برتری نشان دادند، که افزایش در سرعت جوانه‌زنی منجر به افزایش رشد اولیه و طویل شدن ریشه‌چه و ساقه‌چه شد. اما تنش کادمیوم در سطوح بالا باعث کاهش معنی‌دار خصوصیات جوانه‌زنی در هر سه گونه فیسالیس گردید (جدول ۲). به نظر می‌رسد که وجود فلز سنگین کادمیوم می‌تواند به واسطه منفی‌تر کردن پتانسیل اسمزی محلول، در جذب آب توسط بذر اختلال ایجاد کرده و درصد جوانه‌زنی را کاهش دهد. چرا که در شرایط تنش میزان ABA در بافت‌های گیاه افزایش یافته و این امر در ممانعت از جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه موثر است (Baruah et al., 2019). یکی از دلایل احتمالی کاهش رشد گیاهچه تحت تنش کادمیوم را می‌توان به تغییرات هورمونی نسبت داد، چرا که تنش کادمیوم با القای محدودیت آب در بستر بذر با افزایش اسید آبسیزیک، مانع از جوانه‌زنی بذر و رشد مطلوب گیاهچه‌ها در مراحل ابتدایی رشد می‌شود (Taiz et al., 2015).به نظر می‌رسد تنش کادمیوم باعث تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند پراکسید هیدروژن (Hydrogen peroxide) و رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود (Mehrab et al., 2021). این گونه‌ها در غلظت‌های بالا می‌توانند به پروتئین‌ها، لیپیدها و DNA آسیب برسانند و در نهایت منجر به کاهش جوانه‌زنی بذرها شوند. گیاهان معمولاً در پاسخ به تنش اکسیداتیو آنتی‌اکسیدان‌هایی تولید می‌کنند. با این حال، به نظر می رسد کادمیوم می‌تواند تولید این ترکیبات را کاهش دهد و به این ترتیب حساسیت گیاه به تنش‌ها افزایش یابد (Malik et al., 2022). کادمیوم در گیاهان باعث پراکسیداسیون لیپیدها در غشاهای سلول می‌شود که این امر باعث ازبین رفتن یکپارچگی سلول و مرگ آن می‌شود (Gallego and Benavides. 2019).

میزان کلروفیل a، b و کارتنوئید در این پژوهش در غلظت‌های بالای کادمیوم کاهش یافت (جدول ۲). کادمیوم می‌تواند به طور مستقیم بر آنزیم‌های سنتز کلروفیل تأثیر بگذارد و با اختلال در فعالیت آن‌ها، تولید کلروفیل را کاهش دهد. این تأثیرات می‌توانند به کاهش کارایی فتوسنتز و در نتیجه به کاهش رشد و عملکرد گیاه منجر شوند (Jali et al., 2014). کادمیوم به غشاهای تیلاکوئیدی کلروپلاست آسیب می‌زند و ظرفیت فتوسنتزی را به شدت کاهش داده و رشد گیاه را متوقف می‌سازد (Jianpeng et al., 2010). آسیب به سلول‌ها و روزنه‌ها، فتوسنتز و رشد را کاهش می‌دهد (Dobrikova et al., 2019). کادمیوم با مهار فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین از جمله روبیسکو و زنجیره انتقال الکترون و انجم و همکاران (Anjum et al., 2017) طی بررسی تاثیرات کادمیوم بر عملکرد دو گونه گیاه ذرت

نسخه پیش از انتشار

دریافتند افزایش کادمیوم سبب کاهش محسوس محتوای کلروفیل شد.

نتایج اخیر نشان داد در تنش بالا کادمیوم میزان پرولین تا حد زیادی افزایش یافت (جدول ۳). در گونه‌های بنفش، سبز و زرد به ترتیب در تنش ۵۰۰ میکرومولار باعث افزایش ۱۰، ۱۷ و ۲۴ درصدی میزان پرولین شد که این نتایج با نتایج سایر محققان همخوانی دارد (Heidari et al., 2021). پرولین یکی از متابولیت‌های اصلی است که در پاسخ به تنش‌های محیطی مانند تنش کادمیوم تولید می‌شود. این اسید آمینه به عنوان یک اسمولیت (تنظیم‌کننده فشار اسمزی) عمل می‌کند و باعث تثبیت ساختار پروتئین‌ها و غشاها می‌شود و به جوانه‌زنی و بقای بذرها کمک می‌کند (Szepesi and Szollosi, 2018). تجمع پرولین در گیاه موجب کاهش آسیب به غشا و پروتئین‌ها می‌گردد .پرولین علاوه بر تنظیم اسمزی، در تنظیم pH سلول وتنظیم اکسیداسیون و احیا، منبع کربن و نیتروژن احیا شده نیز شرکت دارد. در آرابیدوپسیس افزایش غلظت پرولین و گلوتاتیون در اثر افزایش غلظت کادمیوم گزارش گردیده است (Xu et al., 2012) که با نتایج این تحقیق همراستا می‌باشد.

باتوجه به نتایج این پژوهش بیشترین تحمل تنش در گونه بنفش فیسالیس بود. این موضوع احتمالا می‌تواند به دلیل بالاتر بودن فعالیت و خواص آنتی اکسیدانی بالاتر این گونه نسبت به دو گونه دیگر باشد (González-Pérez and Guerrero-Beltrán, 2021). گونه بنفش ممکن است دارای غلظت بالاتری از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند فلاونوئیدها و ویتامین‌ها نیز باشد که به کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم کمک می‌کند. این ترکیبات می‌توانند به خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش آسیب‌های سلولی کمک کنند (Farid et al., 2013). تفاوت واکنش گونه‌های مختلف کادمیوم به نظر می‌رسد ناشی از مکانیسم‌های مورفولوزیک و فیزیولوژیک گونه‌های متفاوت باشد. ممکن است گونه بنفش دارای مکانیسم‌های خاصی در سطح سلولی باشد که جذب کادمیوم را کاهش می‌دهد یا آن را به اندامک‌های خاصی هدایت می‌کند که کمترین آسیب را به سلول وارد کند. این مکانیسم‌ها می‌توانند شامل پروتئین‌های انتقال‌دهنده‌ی انتخابی، دیواره سلولی با نفوذپذیری کمتر به کادمیوم یا وجود ترکیباتی که با کادمیوم کمپلکس تشکیل می‌دهند، باشند (Thévenod et al., 2019). همچنین، گونه بنفش ممکن است دارای فعالیت بالاتری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز باشد. این آنزیم‌ها در کاهش استرس اکسیداتیو ناشی از کادمیوم نقش مهمی دارند (Hassan et al., 2005). از طرف دیگر، در مرحله جوانه‌زنی، ممکن است ژن‌های خاصی در گونه بنفش فعال شوند که به گیاه امکان می‌دهد تا با استرس کادمیوم مقابله کند. این ژن‌ها ممکن است کدکننده‌ی پروتئین‌های محافظتی، آنزیم‌های سم‌زدایی یا عوامل تنظیم‌کننده‌ی رشد باشند (Gallego et al., 2012). برخی ترکیبات طبیعی مانند گلوتاتیون، فیتوکلاتین‌ها و بتائین نیز می‌توانند به عنوان عوامل محافظتی در برابر سمیت کادمیوم عمل کنند (Badawy et al., 2024) که ممکن است گونه بنفش حاوی مقادیر بیشتری از این ترکیبات باشد. هر چه مقادیر شاخص حساسیت به تنش کوچک‌تر باشد نشان دهنده تحمل بیشتر ژنوتیپ به شرایط تنش است (Sediq et al., 2017).

نتیجه‌گیری نهایی

استفاده از کادمیوم در سطوح بالا باعث کاهش معنی‌دار صفات مورد بررسی در هر سه گونه فیسالیس شد. یافته‌ها نشان می‌دهد گونه بنفش مقاومت بالاتری نسبت به دو گونه دیگر دارد. همچنین بیشترین حساسیت در ارقام مورد بررسی در گونه زرد مشاهده شد.

نسخه پیش از انتشار

منابع

Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Alam, P., 2018. Exogenous application of nitric oxide modulates osmolyte metabolism, antioxidants, enzymes of ascorbate–glutathione cycle and promotes growth under cadmium stress in tomato. Protoplasma. 255, 79–93. https://doi.org/10.1007/s00709-017-1132-x

Ahsan, N., Nakamura, T., Komatsu, S., 2012. Differential responses of microsomal proteins and metabolites in two contrasting cadmium-accumulating soybean cultivars under

cadmium stress. Amino Acids. 42, 317–327. https://doi.org/10.1007/s00726-010-0809-7

Alcantara, B.K., Carvalho, M.E.A., Gaziola, S.A., Borges, K.L.R., Piotto, F.A., Jacomino, A.P., Azevedo, R.A., 2021. Tolerance of tomato to cadmium-induced stress: Analyzing species with different fruit colors. Environmental Science and Pollution Research. 28, 26172–26181. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13553-x

Álvarez-Flórez, F., López-Cristoffanini, C., Jáuregui, O., Melgarejo, L.M., López-Carbonell, M., 2017. Changes in ABA, IAA and JA levels during calyx, fruit and leaf development in cape gooseberry plants (*Physalis peruviana* L.). Plant Physiology and Biochemistry. 115, 174–182. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.024

Alves, L.R., Prado, E.R., de Oliveira, R., Santos, E.F., Lemos de Souza, I., Dos Reis, A.R., Azevedo, R.A., & Gratão, P.L., 2020. Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. Ecotoxicology. 29, 594–606. https://doi.org/10.1007/s10646-020-02208-1

Amirmoradi, S., Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Danesh, S., Fotovat, A., 2017. Effect of cadmium and lead on quantitative and essential oil traits of peppermint (*Mentha piperita* L.). Journal of Agroecology. 9(1), 142–157. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/jag.v9i1.51330

Anjum, S.A., Ashraf, U., Khan, I., Tanveer, M., Shahid, M., Shakoor, A., Wang, L., 2017. Phytotoxicity of chromium in maize: Oxidative damage, osmolyte accumulation, antioxidative defense and chromium uptake. Pedosphere. 27, 262–273. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60315-1

Arrieta-Baez, D., Quezada-Huerta, C., Rojas-Torres, G.S., Perea-Flores, M.J., Mendoza-León, H.F., Gómez-Patiño, M.B., 2024. Structural studies of Mexican husk tomato (Physalis ixocarpa) fruit cutin. Molecules. 29, 184. https://doi.org/10.3390/molecules29010184

Asghari, A., Tajick Ghanbary, M. A., Bakhshi, M., Babaeizad, V., 2023. Bioactive potential and GC–MS fingerprinting of extracts from endophytic fungi associated with seeds of some medicinal plants. Mycologia Iranica. 10(1), 55–67. [In Persian].

Badawy, A.A., Alamri, A.A., Hussein, H.A.A., Salem, N.F., Mashlawi, A.M., Kenawy, S.K., El-Shabasy, A., 2024. Glycine betaine mitigates heavy metal toxicity in *Beta vulgaris* L.: An antioxidant-driven approach. Agronomy. 14, 797. https://doi.org/10.3390/agronomy14040797

Baghaie, A.H., 2018. Interaction effect of municipal waste compost and pistachio residues biochar on decreasing cadmium stress in shallot. Journal of Health and Hygiene. 9(3), 277–290. [In Persian].

Baruah, N., Mondal, S.C., Farooq, M., Gogoi, N., 2019. Influence of heavy metals on seed germination and seedling growth of wheat, pea, and tomato. Water, Air, & Soil Pollution. 230, 1–15. https://doi.org/10.1007/s11270-019-4329-0

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

Chen, Z., Lu, Z., Zhang, Y., Li, B., Chen, C., Shen, K., 2021. Effects of biochars combined with ferrous sulfate and pig manure on cadmium bioavailability and phytotoxicity in wheat grown in alkaline contaminated soil. Science of the Total Environment. 753, 141832. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141832

Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., 2019. Damage and protection of the photosynthetic apparatus under cadmium stress. In: Hasanuzzaman, M., Narasimha Vara Prasad, M., Fujita, M. (eds.), Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants. Academic Press, pp. 275–298. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00011-5

Ezzat, S.M., Salama, M.M., 2024. Physalis peruviana fruit bioactive compounds. In: Fawzy Ramadan, M. (ed.), Handbook of Goldenberry (*Physalis peruviana*). Elsevier, pp. 209–215. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15433-1.00022-4

Farid, M., Shakoor, M.B., Ehsan, S., Ali, S., Zubair, M., Hanif, M.S., 2013. Morphological, physiological and biochemical responses of different plant species to cadmium stress. International Journal of Chemical and Biochemical Sciences. 3, 53–60.

Gallego, S.M., Peña, L.B., Barcia, R.A., Azpilicueta, C.E., Iannone, M.F., Rosales, E.P.,

Zawoznik, M.S., Groppa, M.D., Benavides, M.P., 2012. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. Environmental and Experimental Botany. 83, 33–46. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006

Heydari, M., Esmailzadeh Bahabadi, S., Sangtrash, A., 2021. Effect of salicylic acid on physiological and biochemical traits of lemon balm under cadmium stress. Iranian Journal of Plant Biology. 34, 646–657. [In Persian].

Heydari, M., Mohajal Kazemi, M., Nosrati, A., Kolahi, M., Kozafi, A., 2023. Evaluation of cadmium accumulation and micronutrient uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) under cadmium chloride stress. Food Science and Nutrition. 21, 1–12. [In Persian].

Hussain, M.M., Saeed, A., Khan, A.A., Javid, S., Fatima, B., 2015. Differential responses of one hundred tomato genotypes grown under cadmium stress. Genetics and Molecular Research. 14, 13162–13171. https://doi.org/10.4238/2015.October.26.12

Kuboi, T., Noguchi, A., Yazaki, J., 1986. Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. Plant and Soil. 92, 405–415. https://doi.org/10.1007/BF02372488

Li, S., Wang, H.Y., Zhang, Y., Huang, J., Chen, Z., Shen, R.F., Zhu, X.F., 2023. Auxin involvement in cadmium accumulation in rice through nitric oxide production and cell wall binding capacity. Science of the Total Environment. 904, 166644. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166644

Omidbaigi, R., 2010. Production and Processing of Medicinal Plants. Astan Quds Razavi Press, Mashhad. [In Persian].

Salarizadeh, S., Kavousi, H.R., Pourseyadi, S., 2016. Effect of cadmium on germination traits and biochemical parameters of two Iranian ecotypes of cumin (*Cuminum cyminum* L.). Journal of Medicinal Plants and By-products. 5, 15–22. [In Persian].

Shahrousvand, S., 2010. Effects of hormonal priming by gibberellic acid and salicylic acid on seed development and seedling physiological quality of carrot cultivars. MSc Thesis, Lorestan University, Iran. [In Persian].

Shameh, S., Al-Momany, A., & Al-Dakheel, A., 2019. Methods for determination of photosynthetic pigments in plant leaves. Journal of Plant Science. 14(3), 45–52.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., Murphy, A., 2015. Plant Physiology and Development. Sinauer Associates.

Xu, J., Zhu, Y., Ge, Q., Li, Y., Sun, J., Zhang, Y., Liu, X., 2012. Comparative physiological responses of *Solanum nigrum* and *Solanum torvum* to cadmium stress. New Phytologist. 196, 125–138. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04236.x

Ye, Y., Dong, W., Luo, Y., Fan, T., Xiong, X., Sun, L., Hu, X., 2020. Species diversity and organ differences of cadmium accumulation in potato allow potential Cd-safe staple food production. Science of the Total Environment. 711, 134534. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134534

Zhao, S.P., Zhang, Y.Z., Zhang, Q., Wang, G. J., Ye, X.Z., 2015. Differential responses of two tomato species to cadmium stress. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers. 21, 1261–1268. https://doi.org/10.11674/zwyf.2015.0520

Zulfiqar, U., Ayub, A., Hussain, S., Waraich, E.A., El-Esawi, M.A., Ishfaq, M., Ahmad, M., Ali, N., Maqsood, M.F., 2022. Cadmium toxicity in plants: Recent progress on morpho-physiological effects and remediation strategies. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 22, 212–269. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00710-3