2026, 15 (1), 37-49 https://doi.org/10.22092/IJSST.2024.365581.1524

Iranian Journal of
Seed Science and Technology

ISSN: 2588-4638

Research Article

Effect of cadmium and salicylic acid on physiological and biochemical traits of Red bean seed Cultivare Sadri (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri)

Maryam Hashemvand[1], Mohammad Sedghi[2*], Raouf Seyed Sharifi[2]

1. Ph.D. Student of Crop Physiology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Professor, Department of Plant Production and Gentics, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Article Information

Received: 24 Apr. 2024
Revised: 24 Jun. 2024
Accepted: 10 Jul. 2024

Keywords:
Antioxidant Enzymes,
Germination Rate,
Heavy metals,
Growth regulators.

Corresponding Author:
m_sedghi@uma.ac.ir

Abstract

In order to investigate the effect of cadmium and salicylic acid on the physiological and biochemical traits of red bean seeds a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design with three replications at the Seed Science and Technology Laboratory of University of Mohaghegh Ardabili in 2023. Experimental treatments included three levels of salicylic acid (0, 50 and 100 mM) and four levels of cadmium (0, 25, 50 and 75 ppm). The results showed that the effect of cadmium and salicylic acid treatments and the effect of the interaction of these two factors on the characteristics of Final Germination Percentage (FGP), Germination Rate (gr), Germination Uniformity (GU), Radicle Length (RL), Radicle fresh and dry weight (RFW and RDW), Radicle cadmium were significant. The highest FGP (99.66%), GR (0.81 seeds per day), RL (14.5 mm), RFW (0.46 gr) and RDW (0.2 gr) observed in the treatment with 100 mM salicylic acid and no application of cadmium. The activity of catalase, peroxidase and superoxide dismutase enzymes increased by 73, 81 and 75%, respectively in the treatment with salicylic acid and without cadmium compared to the control. In general, the use of salicylic acid, by reducing the negative effects of cadmium, improves the physiological traits and the activity of antioxidant enzymes of red bean seeds.

How to cite this paper: Hashemvand, M., Sedghi, M., & Seyed Sharifi, R. (2026). Effect of cadmium and salicylic acid on physiological and biochemical traits of Red bean seed Cultivare Sadri (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri). *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *15*(1), 37-49. https://doi.org/10.22092/IJSST.2024.365581.1524

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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Red bean is one of the most important crops around the world because of its role in human nutrition and global agriculture. It is the main source of protein (5-25%). Bean cultivated area reach to 100 thousand ha in Iran and its production is around 200 thousand tones with mean of 2.58-ton ha^{-1}. Regarding daily increase in contamination of country lands to heavy metals especially cadmium (Cd) and the role of salicylic acid (SA) in mitigating the effects of heavy metals on the other hand, this study conducted to evaluate the effects of these factors on bean seed physiological and biochemical attributes.

Methods

A factorial experiment based on completely randomized design with three replicates was conducted to assess the cadmium and salicylic acid effects on germination and some traits of red bean at the University Of Mohaghegh Ardabili Iran, in 2024. Treatments consisted of cadmium concentrations (0, 25, 50 and 75 ppm) and salicylic acid concentrations (0, 50 and 100 mM). After standard germination test, germination rate (GR) and percent (GP) were calculated using Germin program. Also, seedling weight and length (radicle + plumule) was measured. The activity of antioxidant enzymes including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POX), also measured with a spectrophotometer from seedlings were taken at the 6^{th} day of experiment.

Results

The highest GP (99.66%) and GR (0.81 seed d^{-1}) observed in 100 mM SA without Cd contamination. Although Cd contamination decreased final GP and GR, SA application rebalanced the total GP and GR. The highest values for radicle length, and dry and fresh weights also belonged to 100 mM SA without Cd. With increasing Cd levels, the activity of antioxidant enzymes increased. The highest activity of enzymes observed in 100 mM SA and 75 ppm Cd.

Conclusion

Results showed that common bean seeds can germinate under Cd presence but the rising concentration is the main reason for growth disorders. Cd concentration from 0 to 75 ppm decreased germination traits which mitigated by using SA. This observation revealed that SA application can be an alternative method for improving red bean growth under Cd contaminated soils.

دوره ۱۵، شماره ۱، صفحات ۴۹-۳۷ https://doi.org/10.22092/IJSST.2024.365581.1524

نشریه علوم و فناوری بذر ایران

ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

تاثیر کادمیوم و اسید سالیسیلیک روی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر لوبیا قرمز رقم صدری (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri)

مریم هاشم‌وند[۱]، محمد صدقی[۲*]، رئوف سیدشریفی[۲]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

به‌منظور بررسی تاثیر کادمیوم و اسید سالیسیلیک روی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر لوبیا قرمز آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی علوم بذر دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه سطح اسید سالیسیلیک (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) و چهار سطح کادمیوم (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ پی‌پی‌ام) بود. نتایج نشان داد که تاثیر تیمارهای کادمیوم و اسید سالیسیلیک و تاثیر برهم‌کنش توام این دو عامل بر روی صفات درصد نهایی جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، وزن تر و خشک ریشه‌چه، معنی‌دار بود. بیش‌ترین درصد نهایی جوانه‌زنی (۹۹/۶۶ درصد)، سرعت جوانه‌زنی (۰/۸۱ بذر در روز)، طول ریشه‌چه (۱۴/۵ میلی‌متر)، وزن تر ریشه‌چه (۰/۴۶ گرم) و وزن خشک ریشه‌چه (۰/۲۵ گرم) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میلی‌مولار و عدم کاربرد کادمیوم بود. میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسمیوتاز در تیمار با اسید سالیسیلیک و بدون کادمیوم نسبت به شاهد به ترتیب در حدود ۷۳، ۸۱ و ۷۵ درصد افزایش نشان داد. در کل، استفاده از اسید سالیسیلیک با کاهش اثرات منفی کادمیوم موجب بهبود صفات فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بذرهای لوبیا قرمز می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

واژه‌های کلیدی:
آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان،
سرعت جوانه‌زنی،
فلزات سنگین،
تنظیم کننده رشد.

نویسنده مسئول:
m_sedghi@uma.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
Hashemvand, M., Sedghi, M., & Seyed Sharifi, R. (2026). Effect of cadmium and salicylic acid on physiological and biochemical traits of Red bean seed Cultivare Sadri (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri). *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *15*(1), 37-49. https://doi.org/10.22092/IJSST.2024.365581.1524

مقدمه

لوبیا قرمز به دلیل اهمیت بالایی که در تغذیه انسان و کشاورزی امروزی دارد، از گیاهان بسیار مهم در جهان به‌شمار می‌رود (Majnoun Hosseini, 2015). دانه لوبیای قرمز یکی از منابع مهم پروتئینی (۵ تا ۲۵ درصد) است (Hungria et al., 2000). سطح زیرکشت لوبیا در ایران بالغ بر ۱۰۰ هزار هکتار و تولید آن بیش از ۲۰۰ هزار تن با عملکرد ۲/۵۸ تن در هکتار بوده است. مهم‌ترین استان‌های تولید کننده لوبیا در ایران، فارس، لرستان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری، زنجان و آذربایجان شرقی است (Hedayatipour et al., 2017). فلزات سنگین باعث کاهش کیفیت و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شوند و پایداری تولیدات کشاورزی و سلامتی موجودات زنده به‌ویژه انسان را به خطر می‌اندازند (Daneshfar et al., 2018). فلزات سنگین توسط سیستم ریشه و فرآیندهای حمل و نقل غیر فعال و فعال جذب گیاهان می‌شوند و از طریق آوند چوبی به قسمت‌های هوایی انتقال می‌یابند که این امر به نوبه خود بر سوخت و ساز و رشد گیاهان تاثیر می‌گذارد (Kushwaha et al., 2015). کادمیوم از جمله فلزات سنگینی است که از راه‌های مختلفی مثل استفاده از آفت‌کش‌ها وارد خاک و سیستم‌های زراعی می‌شود. این فلز یک عنصر غیرضروری برای گیاهان محسوب می‌شود و هیچ‌گونه عملکرد بیولوژیکی شناخته شده‌ای به جز انفجار اکسایشی ندارد (Shaari et al., 2024). جذب زیاد کادمیوم توسط گیاهان از فرآیندهای فیزیولوژیکی مثل فتوسنتز و تجمع عناصر غذایی جلوگیری می‌کند که این امر می‌تواند در نهایت موجب مرگ گیاه شود (Hossain et al., 2010). در واقع علت اثرات سمی کادمیوم، اختلال در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی از جمله تقسیم سلولی، جذب و انتقال آب، ریز مغذی‌ها و درشت مغذی‌ها، تبادل گاز و تثبیت نیتروژن است (Chen et al., 2011; Barbosa et al., 2010). با این حال، گیاهان دارای مکانیسم متحمل به کادمیوم، از جمله جذب کادمیوم محدود، کاهش جابجایی ریشه به ساقه، فعالیت آنزیمهای تقویت شده آنتی‌اکسیدان و افزایش تولید فیتوکلاتین‌ها هستند (Shiyu et al., 2020). اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک ترکیب فنلی شناخته شده است که اثرات مخرب ناشی از تنش‌های محیطی را کاهش می‌دهد و نقش مهمی در تعدیل ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاهان دارد (Hayat et al., 2010). اسید سالیسیلیک یک تنظیم‌کننده درون‌زای رشد گیاه است و به عنوان یک سیگنال در القای پاسخ ویژه گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل می‌کند (Urmi et al. 2023).

باتوجه به گسترش روزافزون آلودگی خاک‌های کشور به فلزات سنگین به ویژه کادمیوم و از طرفی به دلیل نقشی که اسید سالیسیلیک در تعدیل یا کاهش اثرات ناشی از فلزات سنگین دارد، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تاثیر این عوامل بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر لوبیا قرمز انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تاثیر کادمیوم و اسید سالیسیلیک روی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر لوبیا قرمز (رقم صدری تولید ۱۴۰۱ و تهیه شده از مرکز تحقیقات لوبیا در شهرستان خمین استان مرکزی) آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل غلظت‌های مختلف کادمیوم (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ پی‌پی‌ام) و محلول اسید سالیسیلیک در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) بود. ابتدا ۲۵ عدد بذر در داخل پتری دیش به قطر ۹ سانتی متر بین کاغذ صافی قرار داده شد (Amini et al., 2016). سپس، اسید سالیسیلیک و محلول کادمیوم (اکسید کادمیوم، مرک آلمان) با غلظت‌های ذکر شده به‌طور مستقیم هم‌زمان به مقدار ۵+۵ میلی‌لیتر (به ترتیب از محلول اسید سالیسیلیک و کادمیوم) به محیط کشت اضافه شد و ظروف کشت به مدت روز ۹ در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در داخل ژرمیناتور قرار گرفت (ISTA, 2017). یک روز بعد از کشت، شمارش بذرها به‌صورت روزانه آغاز گردید و تا ثابت شدن جوانه‌زنی ادامه پیدا کرد. رطوبت تبخیر شده محیط کشت طی مدت آزمایش در تمام پتری‌دیش‌ها با آب مقطر و با حجم یکسان جایگزین شد. صفت یکنواختی جوانه‌زنی، درصد و سرعت جوانه‌زنی با استفاده از برنامه Germin محاسبه شد (Soltani et al., 2001). برای محاسبه سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی با استفاده از این برنامه، ابتدا منحنی

جوانه‌زنی تجمعی هر تکرار در مقابل زمان (بر حسب ساعت) رسم و سپس با استفاده از روش درون‌یابی خطی مدت زمان از کاشت تا زمانی که ۱۰ درصد و ۹۰ درصد جوانه‌زنی اتفاق بیفتد، محاسبه شد. این زمان‌ها به‌ترتیب به‌صورت D10 تا D90 نشان داده می‌شود. سرعت جوانه‌زنی D50 معادل عکس زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی است و یکنواختی جوانه‌زنی یعنی تفاضل زمان رسیدن از ۱۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی به ۹۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (D90-D10). هرچه عدد یکنواختی جوانه‌زنی کمتر باشد، یکنواختی بیشتر است (Soltani et al., 2001). وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با خط‌کش مدرج میلی‌متری اندازه‌گیری شد. برای خشک کردن گیاهچه‌ها از آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت استفاده شد و بعد از بیرون آوردن نمونه‌ها، بلافاصله وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه اندازه‌گیری شد.

به منظور تعیین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در لوبیا، گیاهچه‌ها در داخل ژرمیناتور در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در پتری دیش رشد داده شدند و در روز ششم از هر تیمار چند گیاهچه به تصادف انتخاب و پس از قرار دادن در فویل آلومینیومی، تا زمان استخراج عصاره آنزیمی به فریزر با دمای ۷۰±۲- درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. جهت استخراج عصاره آنزیمی، ۰/۵ گرم نمونه از هر تیمار توزین و در داخلی هاون چینی (که از قبل در یخچال نگهداری شده بود) با استفاده از نیتروژن مایع هموژن گردید و پس از آن ۵ میلی‌لیتر از بافر فسفات سرد (pH=۷) حاوی ۰/۵ میلی‌مولار اتیلن دی آمین ترا استیک اسید (EDTA) به هاون اضافه شد. سپس، هموژن‌ها به اپندورف‌های ۲ میلی‌متری منتقل شدند و در ۱۵۰۰۰ rpm با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفوژ شدند. شناور رویی حاصل به سه قسمت تقسیم شد تا از اثر مضر انجماد و ذوب متوالی نمونه‌ها پیشگیری شود و سپس، تا زمان اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در دمای ۲۰- درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شد (Sairam et al., 2002).

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش ابی (Aebi, 1984) اندازه‌گیری گردید. مواد شیمیایی مورد نیاز شامل ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۷/۵ میلی‌مولار، ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷) و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود که حجم نمونه‌ها با افزودن آب مقطر به ۳ میلی‌لیتر رسانده شد. با افزودن پراکسید هیدروژن واکنش شروع گردید و تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت شد. محلول جذب زمینه برای دستگاه شامل تمام موارد استفاده شده به جز عصاره آنزیمی استخراج شده بود. میزان پراکسید هیدروژن تجزیه شده با استفاده از ضریب خاموشی (ε= 39/4 $\mu M^{-1}c^{-1}m$) محاسبه و فعالیت آنزیم کاتالاز براساس واحد میلی‌گرم بر پروتئین بیان گردید (رابطه ۱):

$$(Unit.mg^{-1}) = \frac{CAT/min}{39.4}$$ رابطه ۱

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز

میزان سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز طبق روش همدا و کلاین (Hemeda & Klein, 1990) انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۲۵۰ میکرولیتر گایاکول ۱۰ میلی‌مولار محلول در آب دوبار تقطیر شده، ۳۴ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۴۶۷ میکرولیتر آب دو بار تقطیر استریل شده و ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم پراکسیداز بر حسب واحد میلی گرم بر پروتئین در دقیقه گزارش شد (رابطه ۲):

$$(Unit.mg^{-1}) = \frac{POD/min}{13.3}$$ رابطه ۲

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسمیوتاز

سنجش آنزیم ذکر شده به روش جیانوپلتیس و رایس (Giannopolitis & Ries, 1977) انجام گردید. اساس سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسمیوتاز مهار واکنش رادیکال سوپراکسید با نیتروبلوتترازولیوم و ممانعت از تشکیل سوپراکسید- نیتروبلوتترازولیوم توسط آنزیم مذکور است. نمونه بلانک به مدت ۱۵ دقیقه در تاریکی قرار گرفت و نمونه‌های شاهد و عصاره آنزیمی در محفظه نوری با دو لامپ فلورسنت W20 به مدت ۱۵ دقیقه و ۱۰۰ دور در دقیقه برروی شیکر گذاشته شد. سپس، جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر ثبت شد. تفاوت بین جذب هر عصاره در مدت زمان روشنایی ۱۵ دقیقه و جذب عصاره آنزیمی

در همان مدت زمان روشنایی در واقع نشان‌دهنده باز داشتن واکنش خود به خودی و تشکیل فورمازان توسط سوپراکسید دیسمیوتاز است (رابطه ۳):

رابطه ۳

$$100\text{-}[OD\ control - OD] / OD\ control \times 100/50 = (Unit.\ mg^{-1})$$

داده‌ها پس از جمع‌آوری توسط نرم‌افزار SPSS از نظر نرمال بودن توزیع، مورد بررسی قرار گرفتند. سپس، توسط نرم‌افزاز SAS9.1 تجزیه واریانس شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام شد. رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Excel 2010 صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

درصد نهایی جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی

نتایج طبق جدول تجزیه واریانس اثرات ساده اسید سالسیلیک و کادمیوم و برهم‌کنش آن‌ها روی درصد نهایی جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج اثر متقابل اسید سالسیلیک و کادمیوم نشان داد که بیش‌ترین درصد نهایی جوانه‌زنی (۹۹/۶۶ درصد) و سرعت جوانه‌زنی (۰/۸۱ بذر در روز) در تیمار اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میلی‌مولار و عدم کاربرد کادمیوم و کم‌ترین درصد نهایی جوانه‌زنی (۶۳/۶۷ درصد) و سرعت جوانه‌زنی (۰/۱۱ بذر در روز) در تیمار با کادمیوم ۷۵ پی‌پی‌ام و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک بود (شکل ۱ A و B). کادمیوم، درصد نهایی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی را کاهش داد که این کاهش با افزایش میزان غلظت کادمیوم بیش‌تر شد. هم‌چنین، بیش‌ترین مقدار یکنواختی جوانه‌زنی (۵/۴۳) مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و کادمیوم ۷۵ پی‌پی‌ام بود، در حالی که کمترین مقدار یکنواختی جوانه‌زنی (۰/۹۱) در عدم کاربرد کادمیوم و اسید سالیسیلیک مشاهده شد (شکل ۱ C).

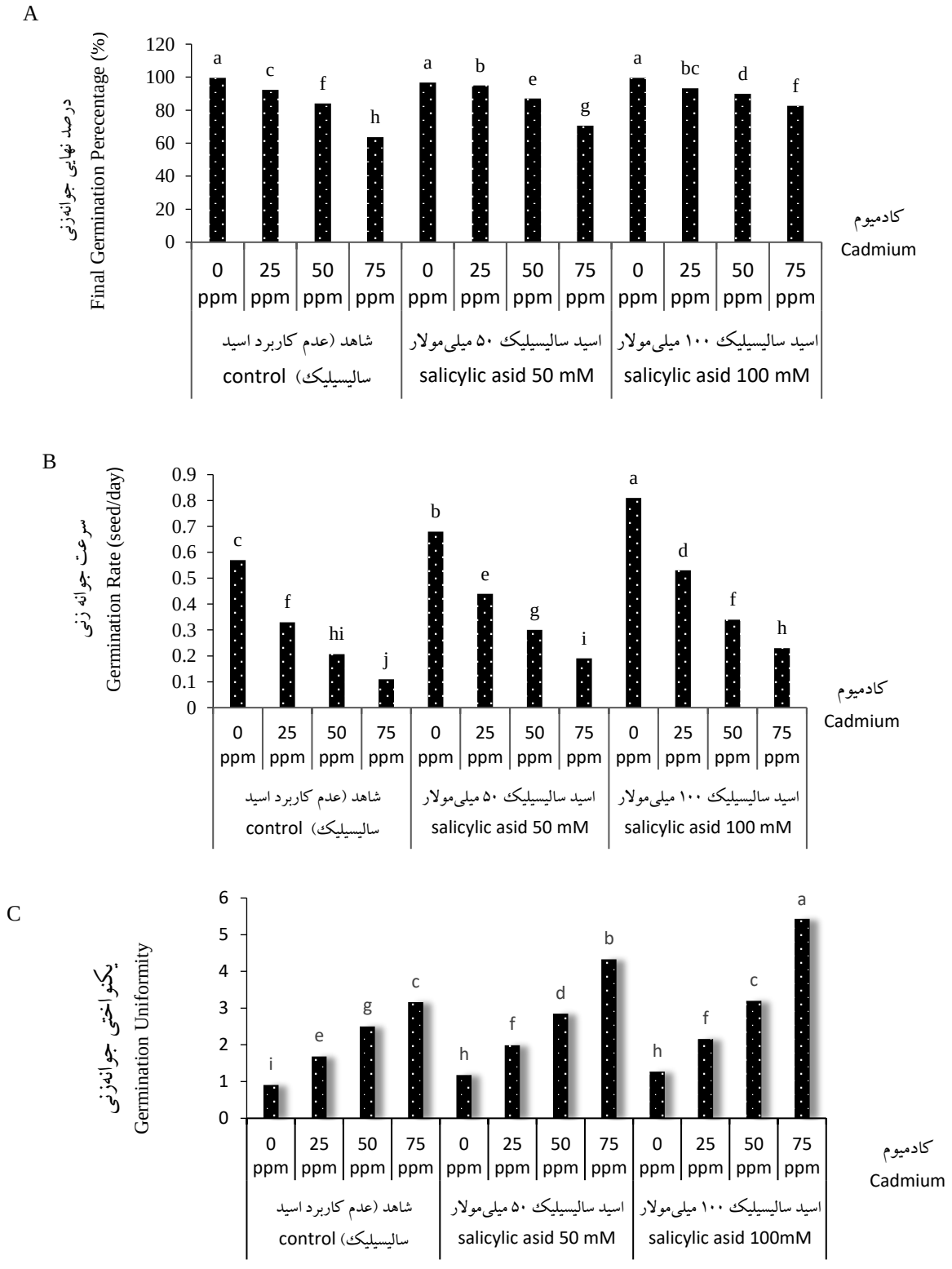
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر اسید سالیسیلیک و کادمیوم روی صفات مورد مطالعه در لوبیا قرمز

Tabel 1- Analysis of variance for the effect of Salicylic acid and Cadmium on studied traits in Red Bean

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی D.F.	درصد نهایی جوانه‌زنی Final Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	یکنواختی جوانه‌زنی Germination Uniformity	طول ریشه‌چه Radicle length	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh Weight	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight
اسید سالیسیلیک Salicylic acid (SA)	2	126.7**	0.09**	2.7**	17.4**	0.02**	0.01**
کادمیوم Cadmium (C)	3	1240.02**	0.44**	16.7**	196.3**	0.14**	0.12**
SA×C	6	60.8**	0.002**	0.5**	2.2**	0.007**	0.001**
خطا Error (E)	24	1.05	0.0002	0.01	0.03	0.0003	0.00005
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		1.16	3.9	4.97	3.05	6.4	7.3

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** the significant differences 1 percent probability levels.



شکل۱- مقایسه میانگین اثر متقابل اسید سالیسیلیک و کادمیوم روی صفت درصد نهایی جوانه‌زنی (A)، سرعت جوانه‌زنی (B) و یکنواختی جوانه‌زنی (C) در لوبیا قرمز.
حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است.

Figure 1- Mean Comparison for the interaction effect of Salicylic acid and Cadmium on Final germination percentage (A), Germination rate (B) and germination uniformity (C) in Red Bean. The different letters in each column indicate significant differences at 1% probability level.

در تحقیق حاضر، اسید سالیسیلیک تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش جوانه‌زنی لوبیا قرمز گذاشته است. اگرچه کادمیوم باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی و درصد نهایی جوانه‌زنی می‌شود، ولی تیمار با اسید سالیسیلیک باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی و درصد نهایی جوانه‌زنی شد. پژوهشگران نشان دادند که در شرایط وجود تنش فلزات سنگین، اسید سالیسیلیک موجب بهبود میزان جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها می‌شود (Kumari et al., 2018). نقش اسید سالیسیلیک در کاهش تنش و بهبود رشد گیاه، به خاصیت هورمونی و آنتی اکسیدانی و تاثیر آن روی تولید اسمولیت‌های آلی و تنظیم اسمزی نسبت داده شده است (Moradi &Pourghasemian, 2018). افزایش درصد جوانه‌زنی در تیمار با اسید سالیسیلیک در گیاه کاسنی گزارش شده است (Haleema et al., 2023).

اسید سالیسیلیک نقش مهمی در تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان به شرایط تنش دارد و مقاومت گیاه را در برابر شرایط نامساعد محیطی بهبود می‌بخشد (Farhadi & Ghassemi-Golezani, 2020). گزارش‌های متعددی نشان داده‌اند که اسید سالیسیلیک منجر به بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی به‌ویژه در شرایط تنش خواهد شد (Arbaoui et al., 2015). دلیل این امر این است که اسید سالیسیلیک باعث افزایش سطح برخی از هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و سایتوکینین‌ها می‌شود (Shakirova & Sahabutdinova, 2003). یکی از دلایل کاهش سرعت جوانه‌زنی تحت تنش کادمیوم آن است که این عنصر سمی، غشای سلولی را تخریب می‌کند و در نتیجه محتویات سلول به بیرون تراوش می‌کند و جوانه‌زنی و رشد گیاهچه کاهش می‌یابد (Sanchez-chardi et al., 2009). در تحقیق دیگری بیان شده که کادمیوم سرعت جوانه‌زنی را در بذرهای لوبیا کاهش می‌دهد (Bahmani et al., 2012). Tavili et al. (2012) اثر اسید سالیسیلیک را بر جوانه‌زنی بذر جارو علفی در شرایط تنش کادمیوم بررسی کردند، نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که اسید سالیسیلیک نقشی کلیدی در کاهش تنش ناشی از کادمیوم بر جوانه زنی و رشد گیاهچه های جارو علفی ایفا می کند که همسو با نتایج این تحقیق می‌باشد.

طول ریشه‌چه

طبق جدول تجزیه واریانس، اثرات ساده اسید سالسیلیک و کادمیوم و برهم‌کنش آن‌ها روی طول ریشه‌چه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج اثر متقابل اسید سالسیلیک و کادمیوم نشان داد که بیش‌ترین طول ریشه‌چه (۱۴/۵ میلی‌متر) مربوط به تیمار با اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میلی‌مولار و عدم کاربرد کادمیوم و کم‌ترین (۱/۱۳ میلی‌متر) مقدار این صفت در تیمار بدون اسید سالیسیلیک و کادمیوم ۷۵ پی‌پی‌ام مشاهده شد (جدول ۲). طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در این آزمایش اسید سالیسیلیک باعث افزایش طول ریشه‌چه گردید، ولی کادمیوم باعث کاهش طول ریشه‌چه در گیاه لوبیا قرمز شد و این کاهش با افزایش میزان غلظت کادمیوم شدت یافت. دانشمند و همکاران (Daneshmand et al., 2010) گزارش کردند که ریشه‌چه مرکز اصلی تجمع کادمیوم است، زیرا کادمیوم ابتدا در ریشه‌چه تجمع می‌یابد. یون کادمیوم از تقسیم سلولی جلوگیری می‌کند و مانع رشد سلول‌های ناحیه مریستمی ریشه‌چه می‌شود. وانگسترند و بوران (Wangstrand & Born, 2007) مشاهده کردند که کادمیوم تمایز زودرس و چوبی شدن دیواره سلولی واقع در منطقه رشد طولی ریشه‌چه را تحریک می‌کند و مانع رشد آن می‌شود. در نهایت، کاهش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک توسط آلاینده‌های سنگین موجب مهار و بازدارندگی انتقال مواد غذایی به ریشه‌چه و در نهایت، موجب کاهش رشد ریشه‌چه می‌شود (Kabir *et al.*, 2008; Mahmood et al., 2006). کونات و همکاران (Konate et al., 2017) بیان کردند که کادمیوم طول ریشه‌چه گیاهچه گندم را کاهش می‌دهد. فلزات سنگین از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال با ممانعت از فتوسنتز و تنفس سلولی بر رشد و نمو گیاهان تاثیر می‌گذارد (Ashfaque et al., 2016). کادمیوم با کاهش فعالیت هورمون سایتوکینین تاثیر به‌سزایی در سرکوب تکثیر سلول و رشد گیاه دارد (Mok, 2019). کاهش رشد شاید به‌دلیل از بین رفتن آماس سلول و کاهش در فعالیت‌های میتوزی و مهار طویل شدن سلول‌های گیاهی باشد.

وزن تر و خشک ریشه‌چه

طبق جدول تجزیه واریانس، اثرات ساده اسید سالیسیلیک و

کادمیوم و برهم‌کنش آن‌ها روی وزن تر و خشک ریشه‌چه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج اثر متقابل اسید سالیسیلیک و کادمیوم نشان داد که بیش‌ترین وزن تر ریشه‌چه (۰/۴۶ گرم) و وزن خشک ریشه‌چه (۰/۲ گرم) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میلی‌مولار و عدم کاربرد کادمیوم بود و کم‌ترین وزن تر ریشه‌چه (۰/۰۳ گرم) و وزن خشک ریشه‌چه (۰/۰۲ گرم) در تیمار بدون اسید سالیسیلیک و کادمیوم ۷۵ پی‌پی‌ام دیده شد. طبق نتایج به‌دست آمده، با افزایش میزان کادمیوم، وزن خشک ریشه‌چه کاهش یافت و با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک وزن خشک ریشه‌چه افزایش یافت. از نتایج به‌دست آمده می‌توان استنباط کرد که اسید سالیسیلیک باعث بهبود و افزایش وزن خشک در لوبیا گردید و فلز کادمیوم تاثیر عکس داشت و باعث کاهش وزن خشک ریشه‌چه شد. Faizan et al. (2011) نشان دادند که کاهش وزن خشک در شرایط تنش کادمیوم ناشی از کاهش جذب آب و کاهش جذب عناصر ضروری توسط بذر یا گیاه است. در گزارشی Ahmad et al. (2011) اظهار داشتند که کادمیوم موجب کاهش وزن تر ریشه‌چه در گیاه خردل شد که این بازدارنگی و مهار رشد به‌دلیل کاهش فتوسنتز توسط کادمیوم می‌باشد. کاهش وزن ریشه‌چه می‌تواند به علت اثرات منفی کادمیوم بر روی مکانیسم تولید انرژی در میتوکندری‌ها و کلروپلاست‌ها باشد (Talatam & Parida, 2009). کاهش وزن خشک اندام‌های گیاهی نشان‌دهنده کاهش جذب مواد غذایی و اختلال در انتقال ترکیبات ضروری از ریشه‌ها به اندام هوایی است (Mousavi et al., 2020). گزارش شده است که کاربرد کادمیوم، باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و طول ریشه و ساقه ذرت (*Zea mays* L.) شد، ولی اسید سالیسیلیک این کاهش را در اجزای گیاه بهبود بخشید و اثرات تنش را تخفیف داد (Rao et al., 2012).

فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسمیوتاز

جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده اسید سالیسیلیک و کادمیوم و برهم‌کنش آن‌ها روی فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسمیوتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج اثر متقابل اسید سالیسیلیک و کادمیوم نیز نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۱۶۲/۶۶واحد میلی‌گرم بر پروتئین)، پراکسیداز (۸۳/۳۳ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) و سوپراکسید دیسمیوتاز (۹۸/۳۳ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میلی‌مولار و کادمیوم ۷۵ پی‌پی‌ام و کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۴۴/۶۶ واحد میلی‌گرم بر پروتئین)، پراکسیداز (۱۵/۶۶ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) و سوپراکسید دیسمیوتاز (۲۵ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) مربوط به تیمار بدون اسید سالیسیلیک و عدم کاربرد کادمیوم بود (جدول ۲). براساس نتایج پژوهش حاضر، با افزایش سطوح کادمیوم میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسمیوتاز افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد که با افزایش غلظت کادمیوم میزان تولید گونه‌های فعال اکسیژن تشدید و گیاه برای مبارزه با آن، القای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را ارتقا داده است. میزان تخریب سلول‌های تحت تنش فلزات سنگین به میزان تولید گونه‌های فعال اکسیژن و کارآیی مکانیسم‌های سم‌زدایی در گیاهان مرتبط است. در پژوهش حاضر، اسید سالیسیلیک موجب افزایش آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسمیوتاز شد. در واقع این احتمال وجود دارد که تحمل گیاه بر اثر تنش ناشی از کادمیوم تحت تاثیر اسید سالیسیلیک به افزایش فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان نسبت داده شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک از گیاه در برابر تنش عناصر سنگین محافظت و از طریق جذب و یا تجمع این عناصر در اندامک‌های گیاه، تقویت سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی و حذف گونه‌های فعال اکسیژن، نقش محوری ایفا می‌کند (Wang et al., 2019). آنزیم کاتالاز و پراکسیداز نقش مهمی درسم‌زدایی H_2O_2 و ترمیم آسیب سلولی حاصل در گیاهان تحت تنش کادمیوم دارند (Abdal et al., 2021). تنش کادمیوم به طرز متفاوتی فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را تغییر داد (Kamalvand et al., 2021). افزایش فعال‌سازی آنزیم کاتالاز در تنش فلزات در گیاه کینوا به خوبی ثبت شده است (Abdal et al., 2021). تحقیق‌ها نشان داده است که کادمیوم باعث افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود (Aghaei et al., 2019).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر اسید سالیسیلیک و کادمیوم روی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در لوبیا قرمز

Tabel 2- Analysis of variance for the effect of Salicylic acid and Cadmium on antioxidant enzymes in Red Bean

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی D.F.	کاتالاز Catalase	پراکسیداز Peroxidase	سوپراکسید دیسمیوتاز Superoxide dismutase
اسید سالیسیلیک Salicylic acid (SA)	2	19063.3**	1335.08**	8921.7**
کادمیوم Cadmium (C)	3	15376.3**	3431**	4090.7**
SA×C	6	53.4**	26.4**	50.37**
خطا Error (E)	24	9.19	5.72	9.8
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		3.3	5.6	5.5

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** the significant differences at 1 percent probability levels.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل اسید سالیسیلیک و کادمیوم روی صفات مطالعه شده در لوبیای قرمز

Tabel 3- Mean Comparison on interaction effect of Salicylic acid and Cadmium for studied traits in Red Bean

اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)	کادمیوم Cadmium (ppm)	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh Weight (g)	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight (g)	طول ریشه‌چه Radicle length (mm)	کاتالاز Catalase (unit mg^{-1} protein	پراکسیداز Peroxidase (unit mg^{-1} protein)	سوپراکسید دیسمیوتاز Superoxide dismutase (unit mg^{-1} protein
0	0	22 c	0.12 c	9.78 c	42.66 j	15.66 g	25 h
	25	0.15 e	0.08 e	5.1 f	52.33 i	23.66 f	32.66 g
	50	0.09 g	0.05 f	2.2 h	96.33 f	33 e	52 d
	75	0.03 i	0.02 g	1.13 j	127 c	54.66 c	64.33 C
50	0	0.36 b	0.18 b	12.46 b	54.66 i	23 f	37.33 fg
	25	0.19 d	0.11 d	6.16 e	64.66 h	35 e	41 ef
	50	0.12 f	0.07 e	3.68 g	102 e	45.33 d	65 c
	75	0.04 i	0.02 g	1.86 i	142.33 b	68.33 b	81.33 b
100	0	0.46 a	0.25 a	14.5 a	61.33 h	31.33 e	45.66 e
	25	0.203 cd	0.13 c	7.5 d	78.33 g	41.66 d	52.66 d
	50	0.15 e	0.08 e	3.66 g	116.66 d	55 c	85.33 b
	75	0.06 h	0.04 f	2.1 hi	162.66 a	83.33 a	98.33 a

حروف متفاوت در هر ستون نشاندهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The different letters in each column indicate significant difference at 5% probability level.

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشـــان داد که تنش فلز کادمیوم می‌تواند اجازه جوانه زدن به گیاه را بدهد، ولی با افزایش غلظت آن در رشـــد و نمو گیاهچه اختلال ایجاد می‌شـود و موجب توقف رشـد ریشـه‌چه و ســـاقچه بذر لوبیا می‌گردد. نتایج حاصـــل از تجزیه واریانس و مقایســـه میانگین صـــفات مختلف تحت تنش کادمیوم و اســـید سالیسیلیک نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم تا ۷۵ پی‌پی‌ام صـــفات جوانه‌زنی کاهش پیدا کرد و با افزایش غلظت اســـید سـالیسـیلیک صـفات جوانه‌زنی بهبود یافت که این امر نشـان‌دهنده تاثیر مفید اسـید سـالیسـیلیک در کاهش اثرات تنش فلزات سـنگین است که باعث بهبود رشد در بذر لوبیا قرمز گردید.

تعارض منافع

نویسـندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافعی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

Reference

Abdal, N., Abbas, G., Asad, S. A., Ghfar, A. A., Shah, G. M., Rizwan, M., Ali, S., & Shahbaz, M. (2023). Salinity mitigates cadmium-induced phytotoxicity in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*.) by limiting the Cd uptake and improving responses to oxidative stress: Implications for phytoremediation. Environmental Geochemistry and Health, 45, 171–185. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01082-y

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

Aghaei, K., Rahkhosravani, B., Moghanlu, L., & Ghotbi Ravandi, A. A. (2019). Analysis of cadmium accumulation and its effects on some biochemical and physiological characters of basil plants. *Plant Process and Function*, 8(33), 107–122. (In Persian)

Ahmad, P., Nabi, G., & Ashraf, M. (2011). Cadmium-induced oxidative damage in mustard (Brassica juncea L. Czern. & Coss.) plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany*, 77(1), 36–44. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.05.003

Amini, F., Balouchi, H., Movahhedi Dehnavi, M., & Attarzadeh, M. (2016). Effects of different concentrations of heavy metals application on germination indices and seed vigor of Pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 3(2), 95–105. (In Persian)

Arbaoui, M., Yahia, N., & Belkhodja, M. (2015). Germination of the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in response to salt stress combined with hormones. *International Journal of Agronomy & Agricultural Research*, *7*(3), 14–24.

Ashfaque, F., Inam, A., Sahay, S., & Iqbal, S. (2016). Influence of heavy metal toxicity on plant growth, metabolism and its alleviation by phytoremediation – A promising technology. Journal of Agriculture and Ecology Research International, 6(2), 1–19. https://doi.org/10.9734/JAERI/2016/23543

Bahmani, R., Hemati, M., Habibi, D., & Forozesh, P. (2012). Evaluation of germination, root and shoot growth under cadmium stress for different bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agriculture and Plant Breeding*, *8*(4), 145–154. (In Persian)

Barbosa, J. S., Cabral, T. M., Ferreira, D. N., Agnez-Lima, L. F., & de Medeiros, S. B. (2010). Genotoxicity assessment in aquatic environment impacted by the presence of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *73*(3), 320–325. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.10.008

Chen, X., Wang, J., Shi, Y., Zhao, M. Q., & Chi, G. Y. (2011). Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard. *Botanical Studies*, 52(1), 41–46.

Daneshfar, A. H., AliAsgharzad, N., Ostan, S., & Khoshroo, B. (2018). The role of Rhizophagus irregularis to alleviate Pb absorption by sunflower. *Journal of Agricultural Sciences and Sustainable Production*, *28*(1), 37–50. (In Persian)

Daneshmand, F., Arvin, M. J., & Manuchehry Kalantari, K. H. (2010). Acetylsalicylic acid (Aspirin) induces salinity and osmotic tolerance in Solanum acaule in vitro. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, *6*(1), 92–99.

Dinakar, N., Nagajyothi, P. C., Suresh, S., Damodharam, T., & Suresh, C. (2009). Cadmium induced changes on proline, antioxidant enzymes, nitrate and nitrite reductases in Arachis hypogaea L. *Journal of Environmental Biology*, *30*(2), 289–294.

Faizan, S., Kausar, S., & Perveen, R. (2011). Varietal differences for cadmium-induced seedling mortality, foliar toxicity symptoms, plant growth, proline and nitrate reductase activity in chickpea (*Cicer arietinum* L). *Biological Medicine*, *3*(2), 196–206.

Farhadi, N., & Ghassemi-Golezani, K. (2020). Physiological changes of *Mentha pulegium* in response to exogenous salicylic acid under salinity. *Scientia Horticulturae*, *267*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109347

Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, *59*(2), 309–314. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309

Haleema, S., Muhammad, Sh., Aysha, K., & Muhammad, F. (2023). Interactive effect of salicylic acid and ascorbic acid on gaseous exchange and mineral nutrients of chicory (*Cichorium intybus* L.) under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*, *55*(6), 1999–2012.

Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2010). Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: a review. *Environmental and Experimental Botany*, *68*(1), 14–25. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.08.005

Hedayatipour, A., Ghdiri, A., Kikhaei, F., & Sadeghi, S. (2017). Comparison of bean cultivation methods using micro tip irrigation method. *Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Final Report, No.* 55473. (In Persian)

Hemeda, H. M., & Klein, B. P. (1990). Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetable extracts. *Journal of Food Science*, *55*(1), 184–185.

Hossain, M. A., Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2010). Upregulation of antioxidant and glyoxalase systems by exogenous glycinebetaine and proline in mung bean confers tolerance to cadmium stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants, 16*(3), 259–272.

Hungria, M., Andrade, D. S., Chueire, L. M. O., Probanza, A., Guttierrez-Manero, F. J., & Megias, M. (2000). Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil. *Soil Biology and Biochemistry, 32*(11–12), 1515–1528. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00135-7

ISTA. (2017). International Rules for Seed Testing. *International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.* https://www.ingentaconnect.com/content/ista/rules

Kabir, M., Iqbal, M. Z., Shafiq, M., & Farooqi, Z. R. (2008). Reduction in germination and seedling growth of *Thespesia populnea* L. caused by lead and cadmium treatments. *Pakistan Journal of Botany, 40*(6), 2419–2426.

Kamalvand, A., Hosseini Sarghein, S., & Karamian, R. (2021). Impact of cadmium stress on growth and physiological responses of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Plant Physiology and Breeding, 11*(2), 51–65. (In Persian)

Konate, A., He, X., Zhang, Z., Ma, Y., & Zhang, P. (2017). Magnetic (Fe3O4) nanoparticles reduce heavy metals uptake and mitigate their toxicity in wheat seedlings. *Sustainability, 9*(5), 790. https://doi.org/10.3390/su9050790

Kumari, A., Pandey, N., & Pandey-Rai, S. (2018). Exogenous salicylic acid-mediated modulation of arsenic stress tolerance with enhanced accumulation of secondary metabolites and improved size of glandular trichomes in (*Artemisia annua* L.). *Protoplasma, 255*(1), 139–152. https://doi.org/10.1007/s00709-017-1168-7

Kushwaha, A., Rani, R., Kumar, S., & Gautam, A. (2015). Heavy metal detoxification and tolerance mechanisms in plants: implications for phytoremediation. *Environmental Reviews, 24*(1), 39–51. https://doi.org/10.1139/er-2015-0005

Mahmood, Q., Hassan, M. J., Zhu, Z., & Ahmad, B. (2006). Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. *Caspian Journal of Environmental Sciences, 4*(1), 1–8.

Majnoun Hosseini, N. (2015). Grain legume production. *Jahad Daneshghahi Press, Tehran, Iran,* pp. 283.

Mok, M. (2019). Cytokinins and plant development - An overview. 3rd ed. *Cytokinins Book, Imprint CRC.*

Moradi, R., & Pourghasemian, N. (2018). Effect of salicylic acid application on mitigating impacts of drought stress in marigold (*Calendula officinalis* L.). *Water and Soil Science, 28*(2), 15–28. (In Persian)

Mousavi, S. A., Oveysi, M., & Iranbakhsh, A. (2020). The effects of lead and cadmium contamination on seed germination of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Iranian Journal of Dynamic Agriculture, 14*(3), 217–229. (In Persian)

Rao, S. R., Qayyum, A., Razzaq, A., Ahmad, M., Mahmood, I., & Sher, A. (2012). Role of foliar application of salicylic acid and L-tryptophan in drought tolerance of maize. *Journal of Animal and Plant Sciences, 22*(3), 768–772.

Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long-term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science, 163(5),* 1037–1046.

Sanchez-Chardi, A., Ribeiro, C. A. O., & Nadal, J. (2009). Metals in liver and kidneys and the effects of chronic exposure to pyrite mine pollution in the shrew Crocidura russula inhabiting the protected wetland of Doñana. *Chemosphere, 76*(3), 387–394. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.005

Shaaria, N. E. M., Tajudin, M. T. F. M., Khandaker, M. M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Abdullah, U. A., & Mohd, K. S. (2024). Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. *Brazilian Journal of Biology, 84,* 1–17.

Shiyu, Q. I. N., Hongen, L. I. U., Zhaojun, N. I. E., Rengel, Z., Wei, G. A. O., Chang, L. I., & Peng, Z. H. A. O. (2020). Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere, 30*(2), 168–180.

Shakirova, F. M., & Sahabutdinova, D. R. (2003). Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Science, 164*(3), 317–322.

Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E., & Latifi, N. (2001). Genetic variation for and interrelationships among seed vigor traits in wheat from the Caspian Sea coasts of Iran. *Seed Science and Technology, 29*(3), 653–662. (In Persian)

Talatam, S., & Parida, B. (2009). Crop growth as influenced by zinc and organic matter in cadmium-rich polluted soils. Proceedings of the International *Plant Nutrition Colloquium XVI, 4–13 August, California, USA.*

Tasgin, E., Atic, O., & Nalbantoglu, B. (2003). Effect of salicylic acid on freezing tolerance in winter wheat leaves. *Plant Growth Regulation, 41*(3), 231–236.

Tavili, A., Saberi, M., Shahriari, A., & Heidari, M. (2012). Salicylic acid effect on Bromus tomentellus germination and initial growth properties under cadmium stress. Journal of Plant Research *(Iranian Journal of Biology)*, *26*(2), 208–2016. (In Persian)

Urmi, T. A., Islam, M. M., Zumur, K. N., Abedin, M. A., Haque, M. M., Siddiqui, **M. H., Murata, Y., & Haque, M. A. (2023).** Combined effects of salicylic acid and proline mitigate drought stress in rice (*Oryza sativa L.*) through the modulation of physiological attributes and antioxidant enzymes. *Antioxidants*, *12*(7), 1438. https://doi.org/10.3390/antiox12071438

Wang, Y. Y., Wang, Y., Li, G. Z., & Hao, L. (2019). Salicylic acid-altering Arabidopsis plant response to cadmium exposure: underlying mechanisms affecting antioxidation and photosynthesis-related processes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *169*, 645–653. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.102

Wangstrand, H., Eriksson, J., & Born, I. O. (2007). Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, *26(*3), 209–214. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.001