فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۴، فروردین و اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۴ صفحه: ۲۵۵-۲۷۶
https://doi.org/10.22034/14.65.255

مقاله پژوهشی

تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا (*Chenopodium quinoa* willd.)

فاطمه محمودی[۱]، پریسا شیخ‌زاده[۱*]، ناصر زارع[۱]، بهروز اسماعیل‌پور[۲]
[۱] گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۲] گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴)

چکیده
این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد تنظیم‌کننده رشد گیاهی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا رقم تی‌نی کاکا تحت تنش کادمیوم، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل اسید سالیسیلیک در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی‌مولار) و غلظت‌های کادمیوم در چهار سطح (صفر، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. صفات درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی، شاخص عدم قطعیت فرایند جوانه‌زنی، شاخص همزمانی جوانه‌زنی، زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برهمکنش دو عامل تقریباً بر همه صفات معنی‌دار شد به‌طوری‌که کاربرد ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم در شرایط بدون کاربرد اسید سالیسیلیک، درصد جوانه‌زنی را حدود ۲۷/۶۷ درصد، ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی حدود ۱۱/۴۲ درصد، سرعت جوانه‌زنی را ۱۳/۷ درصد، شاخص همزمانی جوانه‌زنی را ۱۷/۶۴ درصد، درصد جوانه‌زنی روزانه را حدود ۳۴/۳۲ درصد، وزن خشک گیاهچه را ۳۵/۴۸ درصد و طول گیاهچه‌های کینوا در حدود ۵۹/۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. اگر چه تنش کادمیوم خصوصیات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌های کینوا را کاهش داد اما در شرایط تنش کادمیوم کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۱۳/۱۷ درصدی درصد جوانه‌زنی، ۵۲/۲۸ درصدی سرعت جوانه‌زنی، ۶/۸۱ تا ۳۵/۷۳ درصدی شاخص Z، ۹۹/۳۳ درصدی وزن خشک و ۷۹/۶۸ تا ۹۱/۶۳ درصدی طول گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین کاهش ۴۲/۹۰ درصدی میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، کاهش ۱۱/۴۲ درصدی میانگین ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی، ۶/۲۸ تا ۳۸/۹۳ درصدی میزان شاخص U توسط تیمار غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک گزارش شد. کاربرد اسید سالیسیلیک در غلظت ۲/۵ میلی‌مولار 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.

واژه‌های کلیدی: ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی، عدم قطعیت، آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، وزن خشک گیاهچه

مقدمه
تنش ناشی از تجمع فلزات سنگین از جمله تنش‌های محیطی

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: sheikhzadehmp@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

به‌شمار می‌رود که گسترش وسیعی در دنیا داشته و اثرات نامطلوبی را در گیاهان تحت تنش دارد. فلزات سنگین تخریب نمی‌شوند و تمایل زیادی به انباشته‌شدن در اندام‌های زیستی دارند. این فلزات چه با مصرف دام‌ها و از طریق ورود به زنجیره غذایی و چه با مصرف مستقیم توسط انسان اثرات مخرب خود را اعمال می‌کنند و از این نظر دارای اثرات زیانبار زیست‌محیطی هستند. گیاهان حتی اگر بتوانند در معرض تنش‌های ناشی از فلزات سنگین زنده هم بمانند ضمن اینکه از جنبه‌های مختلف فیزیولوژیکی، رشدی و نموی تحت تأثیر قرار گرفته، بازده تولید و کیفیت آنها به‌شدت کاهش یافته و مواد تجمع یافته خود را در زنجیره غذایی انسان وارد می‌نمایند (Najafi *et al*., 2015). در میان فلزات سنگین، کادمیوم یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که به روش‌های مختلف، منابع آب و خاک را آلوده می‌نماید و موجب کاهش رشد می‌گردد (Xin *et al*., 2023). همچنین به دلیل حلالیت در آب به‌راحتی توسط پوسته بذر و ریشه گیاه جذب می‌شود و می‌تواند از جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه جلوگیری کند. کادمیوم سرعت جوانه‌زنی بذر را از طریق سازوکارهای مختلف مانند اختلال در جذب آب در دانه‌ها محدود می‌کند که درنهایت دسترسی آب را برای رشد جنین کاهش می‌دهد (Andrade *et al*., 2023). با این حال، تأمین آب تنها محدودیت برای مرحله جوانه‌زنی نیست، بلکه کادمیوم با مهار تحرک نشاسته در آندوسپرم باعث اختلال در انتقال قندها به سمت محور جنینی که این موضوع در نهایت منجر به کمبود عناصر غذایی جنین در حال رشد می‌شود (Shah *et al*., 2023). همچنین کاهش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده مانند اسید فسفاتاز، α–آمیلاز و پروتئاز و تجمع مالون دی‌آلدهید تحت تنش کادمیوم گزارش شده است (Guo *et al*., 2023; Nkwaju *et al*., 2023). کادمیوم از طریق افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژنی (ROS)، فعالیت سامانه دفاعی آنتی‌اکسیدانی را مختل می‌کند (Matengu *et al*., 2021). کاهش جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در اثر تنش کادمیوم در گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) (Nkwaju *et al*., 2023)، کاهو (*Lactuca sativa* L.) (Zhou *et al*., 2023) و هویج (*Daucus carota* L.) (Novak *et al*., 2023) گزارش شده است.

کینوا (*Chenopodium quinoa* Wild.) گیاهی یک‌ساله از خانواده Amaranthaceae بوده که برای چندین هزار سال در آمریکای جنوبی کشت می‌شود. در سال‌های اخیر، کینوا به عنوان یک محصول چند کاربردی (شبه غله، سبزی و علوفه) که می‌تواند در شرایط خاکی و آب و هوایی مختلف رشد کند، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. کینوا همچنین یک محصول غذایی مغذی بدون گلوتن است و محتوای پروتئین آن بیشتر از ذرت، جو و گندم بوده و می‌تواند به عنوان جایگزینی برای پروتئین‌های شیر استفاده شود (Mahdi *et al*., 2021). کینوا به دلیل دارابودن دانه‌های حاوی پروتئین بالا، ویتامین‌ها و مواد معدنی توسط فائو به‌عنوان یکی از محصولات کشاورزی برای امنیت غذایی در قرن آینده انتخاب شده است (Naik *et al*., 2020). گیاه کینوا اگر چه تحمل بالایی به تنش فلزات سنگین مانند کادمیوم و سرب داشته و در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین رشد می‌کند (Iftikhar *et al*., 2021; Abdal *et al*., 2021)، اما وجود کادمیوم برای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های این گیاه نیز مضر است (Radovanovic *et al*., 2020; Mahdi *et al*., 2021; Alghamdi *et al*., 2023; Alharby *et al*., 2022).

از آنجایی که کادمیوم یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در اکوسیستم‌های زراعی امروزی محسوب می‌شود، بنابراین یافتن روش‌هایی برای جلوگیری و یا کاهش اثرات زیان‌بار آن‌ها به‌ویژه در مرحله جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها اهمیت بسیاری دارد. بذرهایی که دارای قدرت بذر بالاتری هستند، با داشتن درصد جوانه‌زنی بالا و تولید گیاهچه‌های قوی و طبیعی می‌توانند تنش‌های محیطی را بهتر تحمل کنند. پیش‌تیمار بذر (Priming) از جمله راهکارهایی است که بذرها در مواجهه با شرایط محیطی، به لحاظ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی آمادگی جوانه‌زنی را به‌دست می‌آورند. با استفاده از این تکنیک می‌توان تأثیر منفی تنش‌های محیطی از جمله تنش فلزات سنگین بر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها را کاهش و حتی تحت این شرایط بهبود بخشید (Silva *et al*., 2021; Remi *et al*., 2021; Matengu *et al*., 2021). برای افزایش میزان جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها تحت تنش‌های محیطی مانند شوری، تنش فلزات سنگین از ترکیبات مختلفی استفاده می‌شود که می‌توان به اسید سالیسیلیک اشاره کرد (Gomaa *et al*., 2023). روش‌های مختلفی برای کاربرد اسید سالیسیلیک در مراحل مختلف رشد گیاه مورد آزمایش قرار گرفته است که شامل پرایمینگ، کاربرد خاکی (ریشه) و محلولپاشی است (Souri and Tohidloo, 2019; Poor *et al*., 2019). کاربرد اسید سالسیلیک باعث کاهش اثرات منفی تنش کادمیوم در سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) (Li *et al*., 2019)، برنج (*Oryza sativa*) (Wang *et al*., 2021)، کاهو (*Lactuca sativa* L.) (Tang *et al*., 2023) و دانه‌های بالک قفقازی (*Pterocarya fraxinifolia*) (Torun *et al*., 2024) شد.

با توجه به اهمیت گیاه کینوا، نیاز به انجام تحقیقات بیشتر برای بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های این گیاه در شرایط وجود فلزات سنگین در مراحل اولیه رشد لازم و ضروری به نظر می‌رسد. متأسفانه به دلیل آلودگی خاک‌های کشاورزی برخی مناطق به فلزات سنگین (عباسپور و همکاران، ۱۳۸۴) و نبود تحقیقات کافی در زمینه استفاده از تکنیک‌های بهبوددهنده خصوصیات جوانه‌زنی و رشدی این گیاه تحت تنش فلزات سنگین، سبب شد تا این پژوهش با هدف بررسی بهبود جوانه‌زنی، رشد و خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کینوا با کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش کادمیوم انجام شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل افزودن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی‌مولار) و غلظت‌های کادمیوم در چهار سطح (صفر، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. قبل از اعمال تیمارها، بذرهای کینوا (واریته تی‌تی کاکا با درصد خلوص بذر ۹۹ درصد و قوه نامیه ۹۵ درصد با وزن هزار دانه ۲/۶ گرم تهیه‌شده از شرکت پاکان بذر اصفهان) با هیپوکلرید سدیم دو درصد به‌مدت یک دقیقه ضدعفونی و پس از شستشو با آب‌مقطر روی کاغذ دستمالی پهن شدند تا خشک شوند (Amiryousefi *et al*., 2021). به‌منظور انجام آزمون جوانه‌زنی، ۵۰ عدد بذر کینوا به‌طور تصادفی به روش روی کاغذ (Top of paper) در داخل پتری‌دیش‌ها قرار داده شد. براساس تیمارهای موردنظر، محلول کادمیوم (کادمیوم کلراید $CdCl_2\frac{1}{2}H_2O$ تهیه‌شده از مرک آلمان) در غلظت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به پتری‌دیش‌ها اضافه شدند. برای تیمارهای اضافه‌کردن اسید سالیسیلیک به بستر کاشت، مقدار سه میلی‌لیتر از محلول‌های اسید سالیسیلیک تهیه شده (غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی‌مولار) به پتری‌ها اضافه شدند. برای تیمار شاهد به همان میزان از آب‌مقطر استفاده شد. نمونه‌ها سپس به ژرمیناتوری با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انتقال داده شد و به مدت ۱۰ روز در این شرایط قرار گرفتند. تعداد بذور جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت شمارش و یادداشت شدند. ظهور ریشه‌چه به‌اندازه ۲ میلی‌متر معیاری برای جوانه‌زنی بذرها در نظر گرفته شد (ISTA, 2017). در پایان آزمایش جوانه‌زنی بذر (بعد از ۱۰ روز)، درصد جوانه‌زنی بذر محاسبه و طول و وزن خشک گیاهچه‌ها اندازه‌گیری شد. طول گیاهچه‌های نرمال توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد. جهت تعیین وزن خشک گیاهچه، گیاهچه‌های نرمال از هر تیمار و تکرار به صورت جداگانه در پاکت‌های کاغذی ریخته و در آونی با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا خشک شوند (ISTA, 2017). همچنین صفات درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی (Ellis and Roberts, 1981)، میانگین جوانه‌زنی روزانه، شاخص همزمانی جوانه‌زنی (Hunter *et al*., 1984)، سرعت جوانه‌زنی (Salehzade *et al*., 2009)، زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی (Yari *et al*., 2012)، ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی (Coefficient of variation of germination time)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

جدول ۱- روابط محاسباتی مورد مطالعه در آزمایش

درصد جوانه‌زنی	(Germination percentage)	$GP=N/n_1\times100$	(ISTA, 2017)
میانگین مدت جوانه‌زنی	(Mean Germination Time)	$MGT=\frac{\sum D.n}{\sum n}$	(Ellis and Roberts, 1981)
میانگین جوانه‌زنی روزانه	(Mean Daily Germination)	$MDG=\frac{GP}{D}$	(Hunter *et al.*, 1984)
زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی	(D75)	$D95=t_{i+}\left[\frac{\frac{N}{2}-ni}{nj-ni}\right]\times(tj-ti)$	(Yari *et al.*, 2012)
شاخص همزمانی جوانه‌زنی	(Synchronization Index)	$Z=\frac{\sum_{i=1}^{k} C_{n_i,2}}{C_{\sum n_i,2}}$	(Hunter *et al.*, 1984)
شاخص عدم قطعیت	(Uncertainity index)	$U=-\sum_{i=1}^{k} f_i \log_2 f_i$	(Shannon, 1984)
سرعت جوانه‌زنی	(Germination rate)	$GR=\sum_{i=1}^{n} Si/Di$	(Salehzade *et al.*, 2009)
ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی	Coefficient of variation of germination time)	$CV_t=(\frac{S_t}{\bar{t}})100$	(Maleki *et al.*, 2023)

S_i: تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر شمارش، D_i: تعداد روز تا شمارش nام، n: دفعات شمارش، D: تعداد روزهای سپری‌شده از شروع آزمایش، n تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز، GP درصد جوانه‌زنی، St: تنوع زمان جوانه‌زنی، t: زمان جوانه‌زنی، K: تعداد کل فواصل زمانی است.

و شاخص عدم قطعیت (Uncertainity index) مورد ارزیابی قرار گرفت. روابط محاسباتی شاخص‌های جوانه‌زنی در جدول ۱ آورده شده است.

جهت اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی گیاهچه‌ها، نمونه‌هایی از گیاهچه‌های نرمال ۱۰ روزه به‌صورت تصادفی انتخاب و این نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری خصوصیات بیوشیمیایی و آنزیمی در فریزر با دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش Chang و Kao (۱۹۹۸) استفاده شد. از روش Aebi (۱۹۸۴) جهت تعیین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده و برای آنزیم پراکسیداز از روش Chance و Maely (۱۹۵۵) بر پایه تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن و آنزیم گایاکول اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز توسط روش Kar وMishra (۱۹۷۶) اندازه‌گیری شد.

کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها، پس از اطمینان از نرمال‌بودن آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (Ver 9.4) انجام گرفت. نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی شد. با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، مقایسه میانگین داده‌ها انجام شد. همچنین برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel (2013) استفاده گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی بذر: مطابق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک قرار گرفت. نتایج گویای آن است که در شرایط تنش کادمیوم درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار عدم کاربرد کادمیوم بود اما کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش درصد جوانه‌زنی شد به‌طوری‌که اعمال تنش کادمیوم ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر درصد جوانه‌زنی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (شکل ۱). در شرایط بدون تنش و وجود تنش کادمیوم، با کاربرد اسید سالسیسلیک، درصد جوانه‌زنی افزایش یافت. در این شرایط، در بین تیمارهای اسید سالیسیلیک، کاربرد ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک سبب شد تا بیشترین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

جدول ۲- تجزیه وایانس خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های کینوا تحت تأثیر غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک و تنش کادمیوم

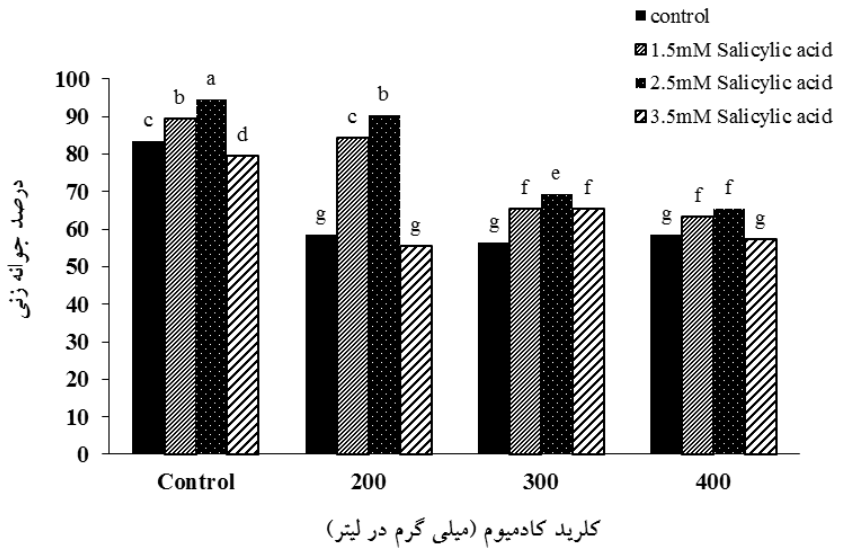
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		درصد جوانه‌زنی	میانگین مدت جوانه‌زنی	ضریب تغییرات زمان جوانه زنی	سرعت جوانه‌زنی	شاخص عدم قطعیت	شاخص همزمانی جوانه‌زنی
تنش کادمیوم (A)	۳	۱۹۳۷ **	۲/۶۵ **	۲۸۲/۲۱ **	۵۵۰/۲۵ **	۱/۴۵ **	۰/۱۱ **
اسید سالیسیلیک (B)	۳	۸۲۳ **	۳/۱۲ **	۱۲۳۱/۵ *	۲۲۴/۳ **	۱/۳۹ **	۰/۰۹ **
(A) × (B)	۹	۳۱۵/۴۴ **	۰/۲۹ **	۱۵۳/۷۷ **	۱۱۷/۱۰۳ **	۰/۱۷ **	۰/۰۱۵ **
خطای آزمایش	۴۸	۵	۰/۰۰۳	۳/۴۲	۰/۷۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱
ضریب تغییرات		۳/۱۴	۲/۴۵	۳/۰۱	۴/۱۷	۲/۵۳	۵/۲

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

ادامه جدول ۲-

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن خشک ریشه‌چه	نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه	زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی	متوسط جوانه‌زنی روزانه	وزن خشک گیاهچه	طول گیاهچه
تنش کادمیوم (A)	۳	۳×۱۰^{-۵} **	۰/۸۰ **	۴/۴۵ **	۹/۸۸**	۳×۱۰^{-۶} **	۳/۵۲**
اسید سالیسیلیک (B)	۳	۳×۱۰^{-۶} **	۰/۲۳ **	۷/۴۶ **	۴/۱۹ **	۳×۱۰^{-۵} **	۴۰/۰۰۳ **
(A) × (B)	۹	۷×۱۰^{-۹} ns	۰/۲۸ **	۰/۴۸ **	۱/۶۱ **	۸×۱۰^{-۸} ns	۰/۲۸ **
خطای آزمایش	۴۸	۷×۱۰^{-۹}	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۷×۱۰^{-۸}	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات		۱۱/۵۱	۷/۴۸	۲/۸۶	۳/۱۴	۱۱/۰۳	۰/۴۶

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



شکل ۱- درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

درصد جوانه‌زنی بذرها حاصل گردد. در شرایط تنش ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، کاربرد ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۱۳/۱۷ درصدی، درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا نسبت به شاهد گردید (شکل ۱). اضافه کردن غلظت‌های ۱/۵ و ۲/۵ اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذور کینوا موجب شد تا درصد جوانه‌زنی بذور هم در شرایط بدون تنش و هم در شرایط تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش یابد. بیشترین درصد جوانه‌زنی در شرایط عدم تنش کادمیوم (تیمار شاهد) مشاهده شد. در بین غلظت‌های مختلف تنش کادمیوم، کمترین درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش کادمیوم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که در این تیمار درصد جوانه‌زنی در حدود ۲۷/۶۷ درصد کمتر از تیمار شاهد بود. بر اساس نتایج این پژوهش درصد جوانه‌زنی بذور کینوا با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافته است اما بین غلظت‌های مختلف کادمیوم از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۱) که با نتایج Sheikhzadeh و همکاران (۲۰۲۱) روی گیاه گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) و Silva و همکاران (۲۰۲۱) روی پنبه مطابقت داشت. Lashkari و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند تأثیر کادمیوم بر جوانه‌زنی به توانایی آن در رسیدن به بافت‌های جنینی در طول غشای بذر بستگی دارد.

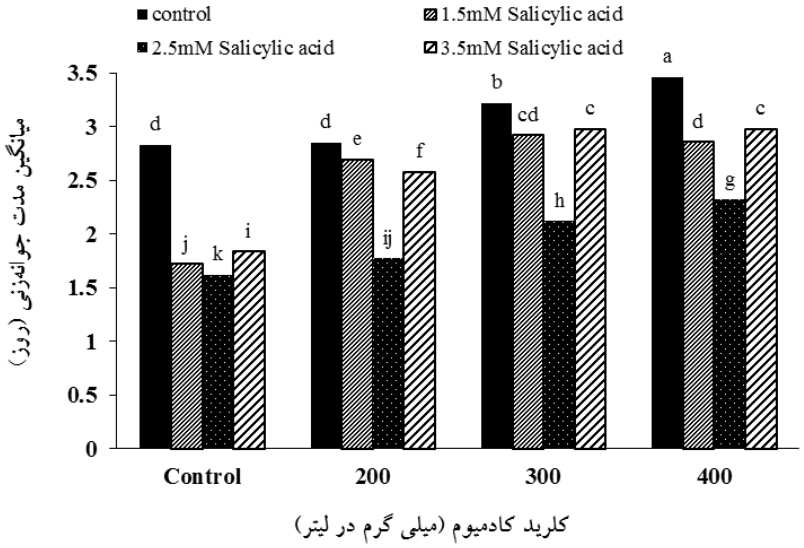
افزایش درصد جوانه‌زنی در تیمار با اسید سالیسیلیک در گیاه کاسنی گزارش شده است (Halemaa *et al*., 2023). با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان چنین استدلال کرد که کاربرد اسید سالیسیلیک سبب بهبود قدرت بذرهای کینوا شده و این امر منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها شده است.

میانگین مدت جوانه‌زنی: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) میانگین مدت جوانه‌زنی بذر به طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و همچنین بر همکنش تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک قرار گرفت. براساس شکل ۲ تنش کادمیوم میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرهای کینوا را افزایش داد اما با کاربرد غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرهای کینوا به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک افزایش داد. در بین تیمارهای مختلف، بیشترین میانگین مدت زمان جوانه‌زنی مربوط به تیمار شاهد در شرایط تنش کادمیوم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک، اضافه کردن ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا، موجب کاهش بیشتر میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرها گردید که به‌طور معنی‌داری کمتر از میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرها در سایر تیمارهای مورد مطالعه بود (شکل ۲). در بین تیمارهای مورد مطالعه، کمترین میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذرهای کینوا در شرایط بدون تنش کادمیوم با کاربرد ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بود که به طور معنی‌داری کمتر از تیمار شاهد و سایر تیمارهای کاربرد اسید سالیسیلیک بود (شکل ۲). Anwar و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که سمیت کادمیوم در جوانه‌زنی گیاهچه‌های سورگوم علوفه‌ای فعالیت آنزیم هیدرولیز را مختل می‌کند و تأثیر منفی بر انتقال ترکیبات ذخیره‌ای هیدرولیزشده به‌سمت محور جنینی در حال رشد دارد و در نتیجه باعث افزایش میانگین مدت جوانه‌زنی می‌شود. افزایش میانگین مدت جوانه‌زنی بذر توسط کادمیوم در گیاهان شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) (Zayneb *et al*., 2015) و زیره سبز (*Cuminum cyminum*) (Salarizadeh *et al*., 2016) نشان داده شده است. در واقع سرعت جوانه‌زنی رابطه معکوسی با میانگین مدت زمان جوانه‌زنی دارد، به‌نحوی‌که هر چه سرعت جوانه‌زنی افزایش یابد مدت زمان لازم برای جوانه‌زدن بذر نیز کاهش پیدا می‌کند. میانگین مدت جوانه‌زنی همچنین با کیفیت توده بذری رابطه عکس دارد، بنابراین هر چه میانگین مدت جوانه‌زنی بذر کمتر باشد، نمونه بذری از کیفیت بیشتری برخوردار است. می‌توان بیان نمود که اسید سالیسیلیک با بهبود فرایند جوانه‌زنی موجب افزایش درصد جوانه‌زنی (شکل ۱) و کاهش میانگین مدت زمان جوانه‌زنی (شکل ۲) گردید. این موضوع نشان‌دهنده افزایش قدرت بذر کینوا با کاربرد اسید سالیسیلیک است.

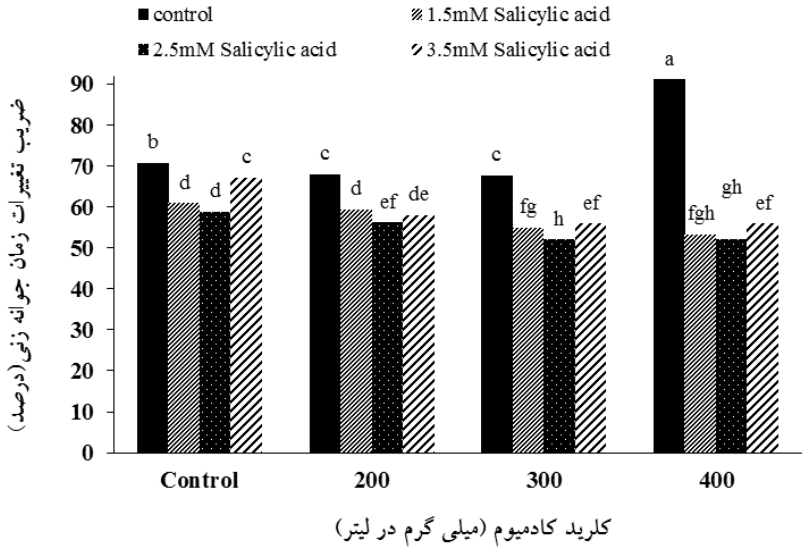
ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی (CVt): ارزیابی نتایج

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



شکل ۲- میانگین مدت جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.



شکل ۳- ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که صفت ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در بـذرهای کینوا تنش کادمیوم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافت به‌طوری‌که بیشترین ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در تنش کادمیوم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در تیمار شاهد اسید سالیسیلیک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. کاربرد ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم سبب شد تا ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در مقایسه با تیمار شاهد در حدود ۷۵/۲۳ درصد افزایش یابد. همچنین در تنش کادمیوم ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در تیمار شاهد اسید سالیسیلیک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در تمام سطوح تنش کادمیوم،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

تیمارهای ۱/۵ و ۳/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک میزان ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی افزایش یافته است اما در کاربرد تیمار ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک میزان این شاخص نسبت به دو تیمار دیگر کاهش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که تنش کادمیوم از طریق کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی باعث افزایش ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در بذور کینوا می‌شود. زمانی که تعداد بذور بیشتری در زمان کوتاه‌تری جوانه بزنند میزان این ضریب کاهش می‌یابد (Tavoosi *et al*., 2021). در مقابل تیمار اسید سالیسیلیک در تمام سطوح کادمیوم نسبت به تیمار شاهد، موجب کاهش ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در بذور کینوا شد به‌طوری‌که در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک، کمترین میانگین ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی در کاربرد تیمار ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل شد (شکل ۳). ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی با سرعت جوانه‌زنی رابطه عکس دارد. بنابراین هر چه سرعت جوانه‌زنی بیشتر باشد ضریب تغییرات زمان جوانه‌زنی کمتر خواهد بود (Tavoosi *et al*., 2021).

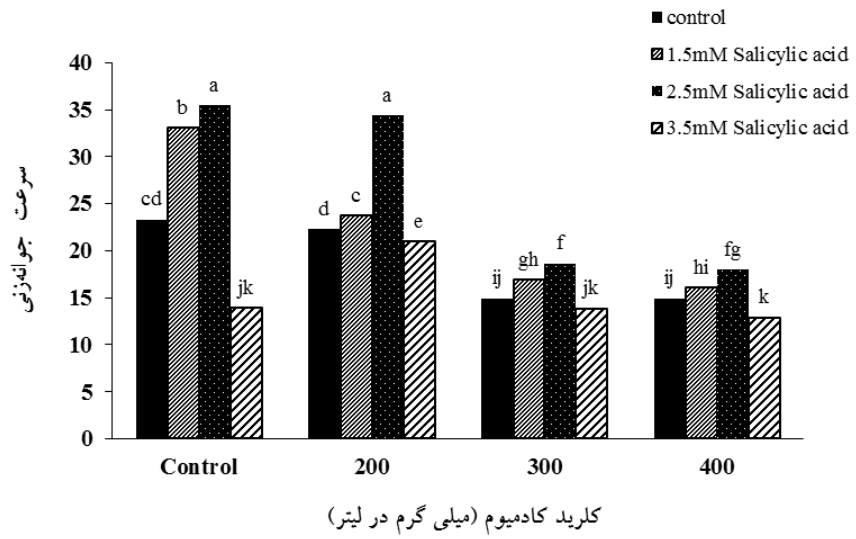
سرعت جوانه‌زنی: بررسی نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم و اسید سالیسیلیک همچنین اثر متقابل آن‌ها بر سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار است (جدول ۲). کمترین سرعت جوانه‌زنی در تیمار تنش کادمیوم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در تیمار ۳/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت و حدود ۱۳/۷ درصد نسبت به تیمار شاهد و ۲۸/۴۱ درصد نسبت به تنش ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر کمتر بود (شکل ۴). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که سرعت جوانه‌زنی در تیمارهای کاربرد اسید سالیسیلیک به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار عدم کاربرد بود (شکل ۴). بیشترین سرعت جوانه‌زنی بذرهای کینوا زمانی حاصل شد که بذرها با غلظت ۲/۵ میل‌مولار اسید سالیسیلیک در شرایط تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر تیمار شده بودند که اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد کادمیوم نداشت. اضافه‌کردن ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا سبب شد تا سرعت جوانه‌زنی در مقایسه با تیمار شاهد ۵۲/۲۸ درصد افزایش داشته است (شکل ۴). در راستای مطالعه حاضر، Abdal و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که رشد گیاه کینوا تحت تنش کادمیوم کاهش یافته است، اما افزودن NaCl به محلول غذایی اثرات منفی کادمیوم را کاهش می‌دهد. در واقع چنین به‌نظر می‌رسد که اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا سبب شده تا با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتی، فرایند جوانه‌زنی بهبود یافته و باعث افزایش درصد جوانه‌زنی (شکل ۱) شود که در نتیجه، منجر به بهبود سرعت جوانه‌زنی گردید. به عبارتی بذرهای تیمارشده به واسطه تجزیه سریع‌تر مواد ذخیره‌ای به‌طور همزمان جوانه می‌زنند. گزارش Rehman و همکاران (۲۰۱۹) نیز حاکی از آن است که خیساندن بذر کنوکارپوس (*Conocarpus erectus* L.) باعث افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر، کاهش متوسط مدت جوانه‌زنی شد و همچنین پیری بذر را کاهش داد.

شاخص عدم قطعیت فرایند جوانه‌زنی (شاخص U): نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک بر شاخص U معنی‌دار بود.

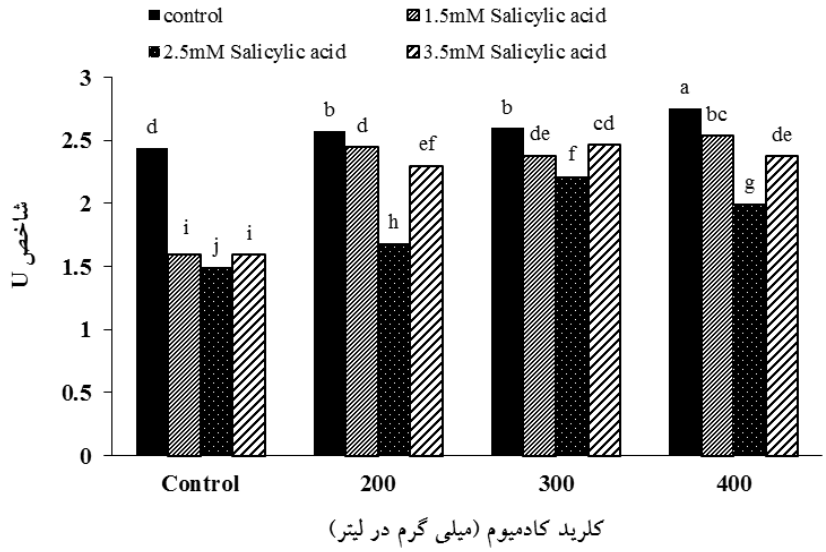
شاخص U، ناهمگونی فرآیند جوانه‌زنی بذر را توصیف می‌کند، از این رو، مقادیر شاخص بالاتر نشان‌دهنده هماهنگی کمتر جوانه‌زنی است (Regnier, 2020). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با کاربرد غلظت‌های مختلف کادمیوم، شاخص U افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در شرایط تنش شدید کادمیوم (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) شاخص عدم قطعیت بیشترین مقدار را دارا بود که این موضوع به معنای همزمانی کمتر است که احتمالاً به دلیل جوانه‌زنی کم در طول دوره جوانه‌زنی است که با نتایج Regnier (۲۰۲۰) در گیاه دارویی سنا (*Cassia ferruginea*) مطابقت دارد. در شرایط بدون تنش و کاربرد غلظت‌های مختلف کادمیوم، کاربرد غلظت‌های مختلف اسید سالیسیک سبب شد تا شاخص عدم قطعیت جوانه‌زنی بذر کاهش یابد. در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک، غلظت ۲/۵ میلی‌مولار بیشترین تأثیر را در کاهش شاخص عدم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



شکل ۴- سرعت جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

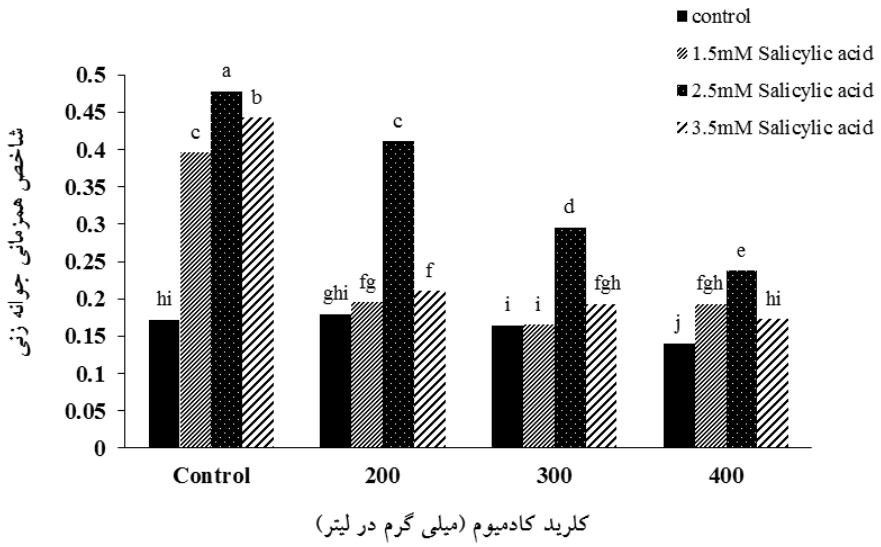


شکل ۵- شاخص U بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

قطعیت جوانه‌زنی داشت که حدود ۶/۲۸ تا ۳۸/۹۳ درصد میزان این شاخص را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۵). با توجه به نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا منجر به افزایش سرعت جوانه‌زنی (شکل ۴) شده، که همین امر منجر به کاهش شاخص U می‌شود.

شاخص همزمانی جوانه‌زنی (شاخص Z): با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها می‌توان اظهار داشت که شاخص همزمانی جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲). شاخص Z مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ارزیابی میزان همزمانی جوانه‌زنی بذرهای کینوا را نشان می‌دهد. هنگامی که جوانه‌زنی همه بذرها در یک زمان انجام می‌شود شاخص Z برابر با عدد یک و زمانی که

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

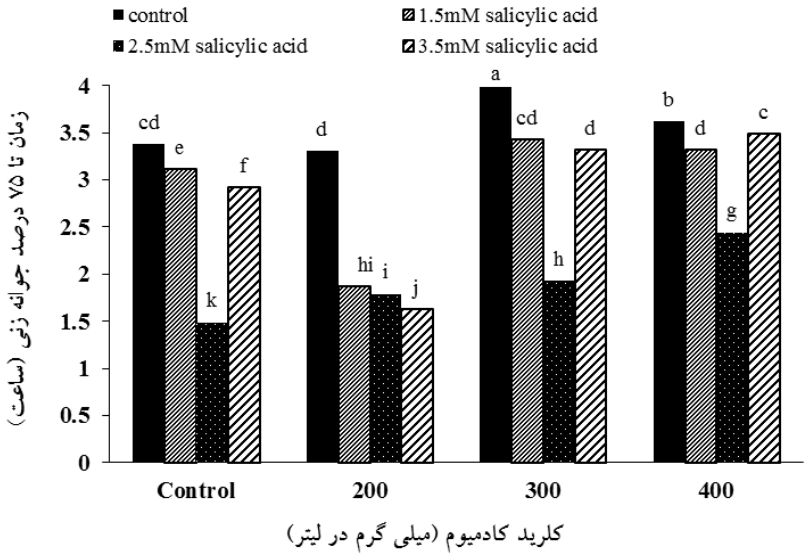


شکل ۶- شاخص همزمانی جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

حداقل دو بذر می‌توانند در یک زمان شروع به جوانه زدن کنند، Z برابر با صفر است. شاخص Z درجه همپوشانی بین جوانه‌زنی بذر را نشان می‌دهد (Guragain *et al*., 2023). میانگین شاخص همزمانی جوانه‌زنی با افزایش تنش کادمیوم به طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین شاخص همزمانی جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش کادمیوم مشاهده شد (شکل ۶). بنابراین تنش کادمیوم از طریق کاهش فعالیت آنزیم هیدرولاز موجب کاهش درصد و میانگین سرعت جوانه‌زنی و در نتیجه کاهش شاخص Z می‌شود. کاربرد تیمارهای مختلف اسید سالیسیلیک به‌طور معنی‌داری در تمام سطوح تنش کادمیوم شاخص همزمانی جوانه‌زنی را افزایش داد به‌طوری‌که بیشترین شاخص همزمانی جوانه‌زنی در تیمار ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد و سایر تیمارهای مورد مطالعه بود. در شرایط بدون تنش و شرایط اعمال غلظت‌های مختلف کادمیوم، کاربرد ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک موجب شد تا میزان شاخص همزمانی جوانه‌زنی در حدود ۳۸/۳۷ تا ۷۶/۸۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یابد (شکل ۶). تیمار اسید سالیسیلک با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده، فرایند جوانه‌زنی را از طریق افزایش سرعت جوانه‌زنی افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش شاخص همزمانی جوانه‌زنی بذرهای کینوا (Z) گردید. نتایج این پژوهش با نتایج Maleki و همکاران (*et al*., 2023) در تیره شب‌بو مطابقت دارد که همزمانی جوانه‌زنی را با خواب فیزیولوژیکی پیش‌بینی می‌کند، که یک روش مفید برای تعیین کمی راهبردهای جوانه‌زنی و پویایی بذر است.

زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی: ارزیابی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که صفت زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲). تنش کادمیوم زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی را افزایش داد. در مقایسه، با کاربرد غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک زمان لازم برای رسیدن به ۷۵ درصد جوانه‌زنی نسبت به تیمار عدم کاربرد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کمترین زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی در شرایط عدم تنش کادمیوم مشاهده شد که به ترتیب کاهش ۱۵/۰۷ و ۶/۶۲ درصدی نسبت به تنش ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر را نشان داد (شکل ۷). در تمام سطوح تنش کادمیوم در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلک (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی‌مولار) کمترین زمان لازم برای رسیدن به ۷۵ درصد جوانه‌زنی در تیمار ۲/۵

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

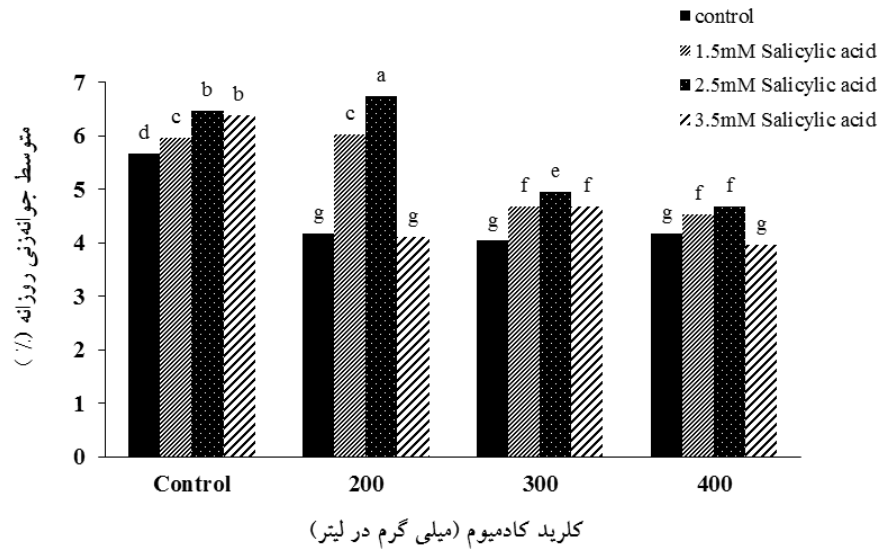


شکل ۷- زمان تا ۷۵ درصد جوانه‌زنی بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که زمان لازم برای رسیدن به ۷۵ درصد جوانه‌زنی را در حدود ۵۵/۹۱ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۷). چنانچه جذب آب دچار اختلال شود و یا به کندی صورت گیرد، فعالیت‌های داخل بذر نیز به کندی صورت گرفته و مدت زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و به‌عبارت دیگر سرعت جوانه‌زنی کاهش و زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی افزایش می‌یابد (Tavoosi *et al.*, 2021). Ghaderi و Aliloo (۲۰۲۳) کاهش زمان لازم برای رسیدن به ۷۵ درصد جوانه‌زنی در تیمار با اسید سالیسیلیک در گیاه کلزا را گزارش کردند. به‌نظر می‌رسد کاربرد اسید سالیسیلیک از طریق افزایش سرعت جوانه‌زنی (شکل ۴) و کوتاه‌شدن متوسط زمان جوانه‌زنی (شکل ۲) منجر به کاهش زمان لازم برای رسیدن به ۹۰ درصد جوانه‌زنی گردید (شکل ۷). درواقع هر چه این زمان کوتاه‌تر باشد، سرعت جوانه‌زنی نیز بالاتر خواهد بود. جوانه‌زنی از مهمترین و حساس‌ترین مراحل رشدی محصولات زراعی است یکنواختی و درصد جوانه‌زنی و سبز شدن بذر می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد و کیفیت محصول داشته باشد (Najafi *et al.*, 2015).

متوسط جوانه‌زنی روزانه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک بر متوسط جوانه‌زنی روزانه معنی‌دار بود. میانگین جوانه‌زنی روزانه با افزایش شدت تنش کادمیوم کاهش و با کاربرد اسید سالیسیلیک افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین درصد جوانه‌زنی روزانه در شرایط بدون تنش کادمیوم مشاهده شد (شکل ۸). کمترین درصد جوانه‌زنی روزانه (۳/۹۶ درصد) در تنش کادمیوم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در تیمار ۳/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که حدود ۳۴/۳۲ درصد کمتر از سایر تیمارها بود اما اختلاف معنی‌داری با تنش ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نداشت (شکل ۸). در تمام سطوح کادمیوم، بیشترین متوسط جوانه‌زنی روزانه با اضافه کردن ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا بدست آمد که در تیمارهای کاربرد ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشت (شکل ۸). تجمع کادمیوم در سلول و در نتیجه تمایل ترکیبی آن با گروه سولفیدریل پروتئین‌ها می‌تواند باعث کاهش در سنتز و تولید پروتئین‌های ساختمانی و در نتیجه باعث کاهش متوسط جوانه‌زنی روزانه شود (Gomaa *et al.*, 2023) که با نتایج Bamagoos و همکاران (۲۰۲۲) در کینوا تحت تنش کادمیوم مطابقت دارد. با

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

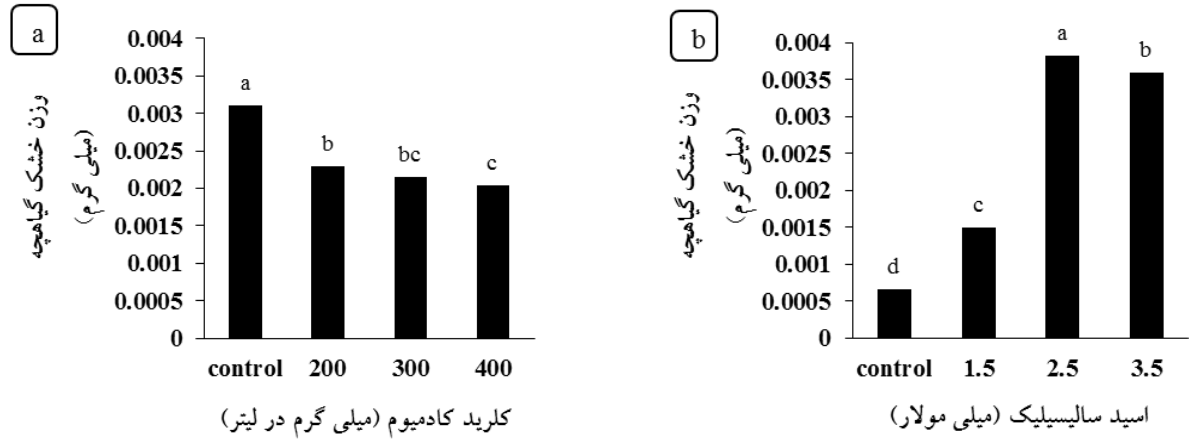


شکل ۸- متوسط جوانه‌زنی روزانه بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که اضافه کردن ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا سبب تقویت درصد جوانه‌زنی (شکل ۱) و در نهایت افزایش متوسط جوانه‌زنی روزانه شده است. به نظر می‌رسد اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا از طریق افزایش سرعت جوانه‌زنی این بذرها (شکل ۴) منجر به افزایش متوسط جوانه‌زنی روزانه می‌شود. در این راستا کاربرد اسید سالیسیلیک در گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) منجر به افزایش جوانه‌زنی روزانه بذر گردید که با نتایج بدست آمده در این پژوهش همخوانی دارد (Matengu *et al*., 2021).

وزن خشک گیاهچه: براساس نتایج جدول ۲، وزن خشک گیاهچه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک قرار گرفت درحالی‌که اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای این صفت معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که میانگین وزن خشک گیاهچه با کاربرد غلظت‌های مختلف تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری کمتر از بذور شاهد بدست آمد (شکل ۹a). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین وزن خشک گیاهچه به‌ترتیب در تیمار عدم کاربرد تنش کادمیوم و تیمار کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نداشت. غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم وزن خشک گیاهچه را در حدود ۳۵/۴۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۹a). بسیاری از محققان گزارش کردند که تحت تنش کادمیوم کاهش قابل توجهی در رشد گیاهان وجود دارد (Panda *et al*., 2017; Rehman *et al*., 2019). براساس نتایج شکل ۹b، میانگین وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذور شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذرهای تیمارشده با غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بود. کاربرد اسید سالیسیلیک تا غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سبب افزایش ۹۹/۳۳ درصدی وزن خشک گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد گردید. به‌نحوی‌که بیشترین وزن خشک گیاهچه‌ها با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از سایر غلظت‌ها داشت (شکل ۹b). برتری گیاهچه‌های حاصل از تیمارهای کاربرد اسید سالیسیلیک از نظر وزن خشک گیاهچه را می‌توان به میانگین سرعت بالای جوانه‌زنی بذر آن‌ها نسبت داد (شکل ۴). به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک موجب می‌شود تا بذرهای کینوا سریع‌تر در مقایسه با تیمار عدم کاربرد جوانه‌زده در نتیجه فرصت بیشتری برای رشد گیاهچه خواهد داشت که

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



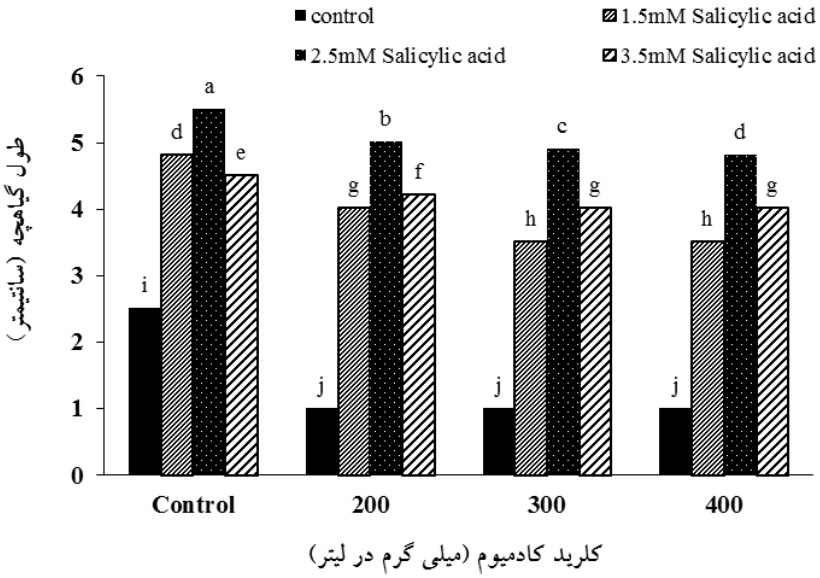
شکل ۹- وزن خشک گیاهچه‌های کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم (a) و اسید سالیسیلیک (b). میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

این امر منجر به افزایش وزن خشک گیاهچه می‌گردد. افزایش شاخص‌های رشدی گیاهچه مانند طول و وزن گیاهچه ارتباط بسیار نزدیکی با سرعت جوانه‌زنی دارند. زیرا، اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذور کینوا موجب می‌شود که بذور زودتر جوانه‌زده و گیاهچه بزرگتری را ایجاد می‌کنند. روند بهبود در وزن خشک ریشه‌چه (۷۴/۱ درصد) و وزن خشک گیاهچه (۶۰ درصد) در تیمار با اسید سالیسیلیک در نتایج Ghaderi و Aliloo (۲۰۲۳) در گیاه کلزا گزارش شده است.

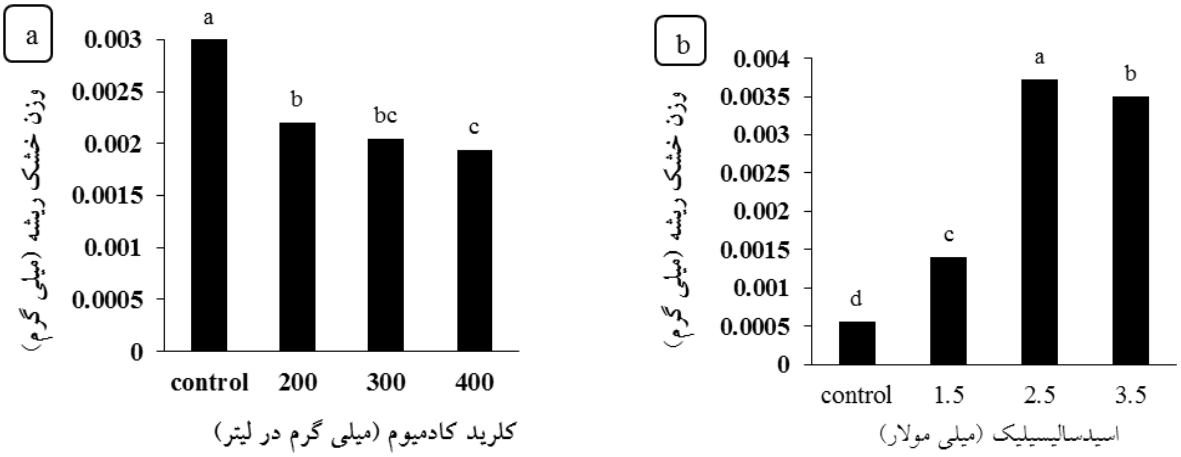
طول گیاهچه: طول گیاهچه‌ها به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم و اسید سالیسیلیک قرار گرفت همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار طول گیاهچه‌های کینوا در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۱۰). در بین تیمارهای مورد مطالعه کمترین طول گیاهچه با کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با غلظت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت. کاهش طول گیاهچه در اثر تنش کادمیوم با نتایج کحققان قبلی (Sheikhzadeh *et al.*, 2021) روی گیاه گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) و روی پنبه (*Gossypium*) (Silva *et al.*, 2021) مطابقت داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که طول گیاهچه درجاتی از تحمل به تیمارهای کادمیوم را نشان می‌دهد. با کاربرد غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک طول گیاهچه‌های حاصل از بذرهای کینوا به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار عدم کاربرد افزایش یافت. در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بیشترین طول گیاهچه با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل گردید که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارهای مورد مطالعه بود. در شرایط ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، کاربرد غلظت‌های ۱/۵ تا ۳/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک سبب شد تا طول گیاهچه‌های کینوا بین ۷۹/۶۸ تا ۹۱/۶۳ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد افزایش یابد (شکل ۱۰). اضافه‌کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها را با تعدیل اثر تنش‌ها بهبود می‌بخشد (Zhu *et al.*, 2021). در واقع بیشتربودن طول گیاهچه‌های حاصل از بذرهای تیمارشده با اسید سالیسیلیک را می‌توان به سرعت جوانه‌زنی بالاتر این بذرها (شکل ۴) نسبت داد، که این موضوع به خوبی در نتایج حاصل از پژوهش حاضر مشاهده می‌شود. بالا بودن سرعت جوانه‌نی در این بذرها منجر گردید تا بذرهای تیمارشده جوانه‌زنی سریع داشته و گیاهچه‌های حاصل از این بذرها نیز رشد بیشتر و سریع‌تر داشته و در نتیجه گیاهچه‌های بزرگتری را تولید کنند (شکل ۱۰).

وزن خشک ریشه‌چه: براساس نتایج جدول ۲، وزن خشک ریشه‌چه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های تنش کادمیوم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



شکل ۱۰- میانگین طول گیاهچه بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

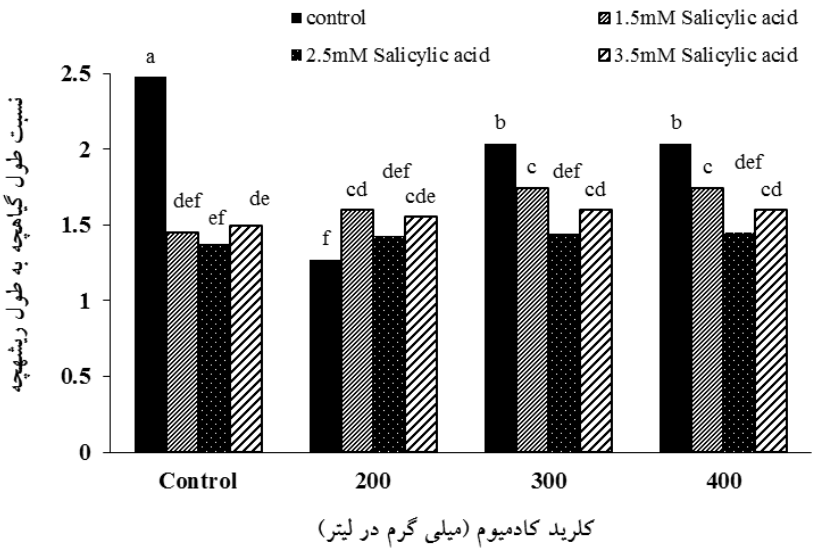


شکل ۱۱- وزن خشک ریشه‌چه تحت تأثیر تنش کادمیوم (a) و اسید سالیسیلیک (b). میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

و اسید سالیسیلیک قرار گرفت درحالی‌که برهم‌کنش تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای این صفت معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که میانگین وزن خشک ریشه‌چه با کاربرد غلظت‌های مختلف تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری کمتر از بذور شاهد به دست آمد (شکل ۱۱a). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین وزن خشک ریشه‌چه به‌ترتیب در تیمار عدم کاربرد تنش کادمیوم و تیمار کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم مشاهده شد. بسیاری از محققان گزارش کردند که تحت تنش کادمیوم کاهش قابل توجهی در رشد گیاهان وجود دارد (Panda *et al.*, 2017; Rehman *et al.*, 2019). براساس نتایج شکل ۱۱b، میانگین وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذور شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از وزن خشک گیاهچه‌های حاصل از بذرهای تیمارشده با غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بود. روند بهبود در وزن خشک ریشه‌چه (۷۴/۱ درصد) و وزن خشک گیاهچه (۶۰ درصد) در تیمار با اسید سالیسیلیک در نتایج مطالعه در گیاه کلزا گزارش شده است

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



شکل ۱۲- میانگین نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه بذرهای کینوا تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

(Ghaderi and Aliloo, 2023). اسید سالیسیلیک موجب می‌شود تا بذرهای کینوا سریع‌تر در مقایسه با تیمار عدم کاربرد جوانه‌زده در نتیجه فرصت بیشتری برای رشد گیاهچه خواهد داشت که این امر منجر به افزایش وزن خشک گیاهچه می‌گردد. افزایش شاخص‌های رشدی گیاهچه مانند طول و وزن گیاهچه ارتباط بسیار نزدیکی با سرعت جوانه‌زنی دارند. زیرا، اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذور کینوا موجب می‌شود که بذور زودتر جوانه‌زده و گیاهچه بزرگتری را ایجاد می‌کنند.

نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه: نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم و اسید سالیسیلیک قرار گرفت. همچنین برهم‌کنش تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه در شرایط بدون تنش کادمیوم در تیمار شاهد اسید سالیسیلیک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. با کاربرد غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم کمترین نسبت طول گیاهچه به ریشه‌چه در تیمار شاهد مشاهده شد. بین غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱۲).

کاهش طول گیاهچه در اثر تنش کادمیوم با نتایج مطالعه در گیاه گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) (Sheikhzadeh *et al*., 2021) و Silva و همکاران (۲۰۲۱) در پنبه (*Gossypium*) مطابقت داشت. اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها را با تعدیل اثر تنش‌ها بهبود می‌بخشد (Zhu *et al*., 2021).

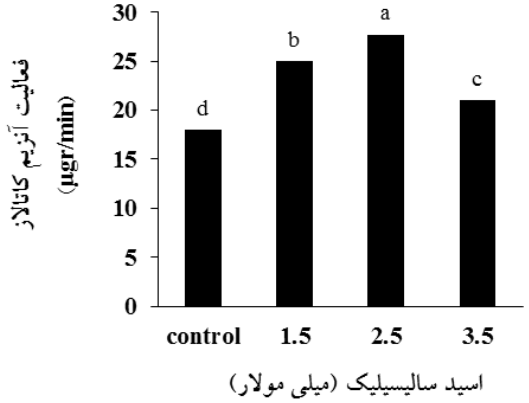
فعالیت آنزیم کاتالاز: بر اساس نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر اثر ساده اسید سالیسیلیک قرار گرفت اما اثر تنش کادمیوم و اثر متقابل کادمیوم × اسید سالیسیلیک معنی‌دار نشد. اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت بذرهای کینوا موجب شد تا فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی‌داری افزایش یابد. به‌طوری‌که بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در کاربرد تیمار ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. کاربرد تیمار ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک فعالیت آنزیم کاتالاز را نسبت به تیمار شاهد در حدود ۵۳/۸۷ درصد افزایش داد (شکل ۱۳). Pai و Sharma (۲۰۲۳) در برنج افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را در اثر تیمار با اسید سالیسیلیک نشان دادند. در این پژوهش تیمار اسید سالیسیلیک باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شده به

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

جدول ۳- تجزیه واریانس اثرات تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گیاهچه‌های کینوا

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		فعالیت کاتالاز	فعالیت پراکسیداز	فعالیت پلی‌فنل اکسیداز
تنش کادمیوم (A)	۳	۴/۶۵ ns	۲۱/۱۲ **	۱۹/۶۵ **
اسید سالیسیلیک (B)	۳	۲۹۱/۲۸ **	۵۴۴/۸ **	۵۵/۷۵ **
(A) × (B)	۹	۳/۱۲ ns	۰/۴۴ ns	۱/۴۱ **
خطای آزمایش	۴۸	۴/۰۱	۰/۸۳	۰/۳۹
ضریب تغییرات		۸/۷۵	۲/۰۶	۴/۵

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

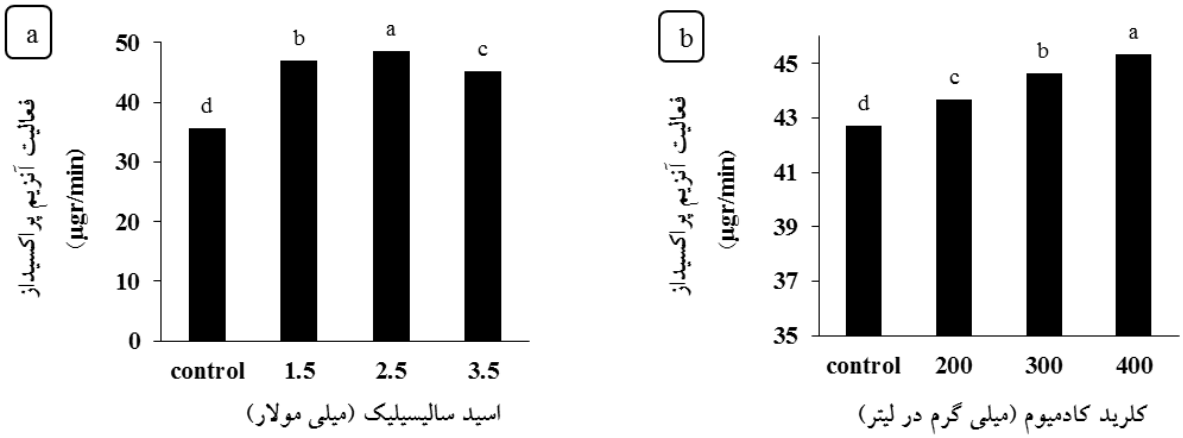


شکل ۱۳- تأثیر تیمار اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه‌های کینوا. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

نظر می‌رسد که این آنزیم در طی تیمار در سیتوزول سلولی تجمع پیدا می‌کند که این مرحله همزمان با توازن پراکسید هیدروژن است که باعث تجمع کاتالاز می‌شود (Zhu *et al.*, 2021).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: براساس نتایج جدول ۳، فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک قرار گرفت درحالی‌که اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم پراکسیداز با کاربرد غلظت‌های مختلف کادمیوم به‌طور معنی‌داری بیشتر از بذور شاهد بدست آمد (شکل ۱۴a). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌ترتیب در تیمارهای کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم و تیمار عدم کاربرد تنش کادمیوم مشاهده شد. غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنش کادمیوم فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۶/۱۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. افزایش فعال‌سازی آنزیم پراکسیداز در تنش فلزات در کینوا گزارش شده است که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Abdal *et al.*, 2021; Iftikhar *et al.*, 2021). میانگین فعالیت آنزیم پراکسیداز حاصل از تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های حاصل از تیمارهای کاربرد غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بود. کاربرد اسید سالیسیلیک تا غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سبب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های کینوا نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۱۴b). به‌نحوی‌که بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌ها با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک (۳۶/۴۶

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



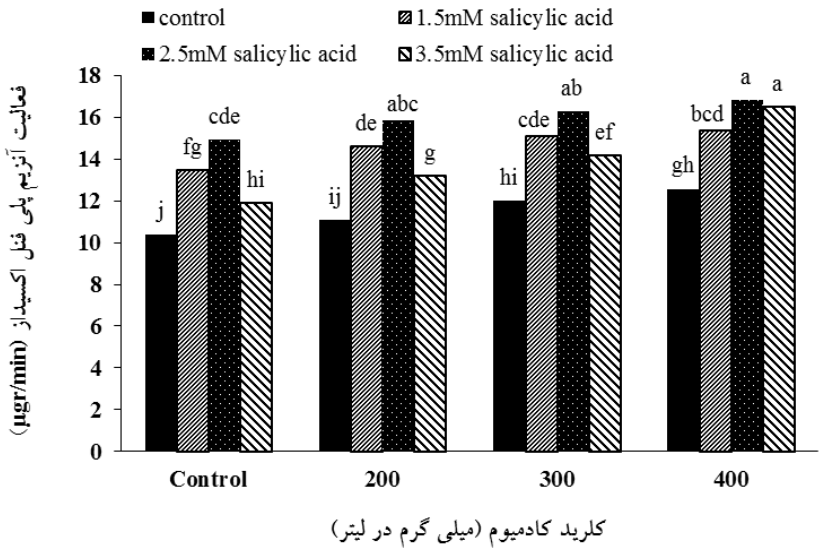
شکل ۱۴- تأثیر تیمار تنش کادمیوم (a) و اسید سالیسیلیک (b) بر فعالیت آنزیم پراکسیداز. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

درصدی) بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های حاصل از سایر غلظت‌ها داشت (شکل ۱۴b). افزایش فعالیت بسیاری از آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مانند، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات توسط اسید سالیسیلیک نیز نشان داده شده است (Jini and Joseph, 2017; Tavoosi *et al*., 2021).

فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان دادند که فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت‌های تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک قرار گرفت. همچنین اثر متقابل تنش کادمیوم × اسید سالیسیلیک برای این صفت معنی‌دار بود. کاربرد غلظت‌های مختلف کادمیوم و اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۱۵). به‌طوری‌که در بین غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بیشترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل گردید. در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز با کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با غلظت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم نداشت. در شرایط ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم، کاربرد غلظت‌های ۱/۵ تا ۳/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز را بین ۲۲/۰۳ تا ۳۳/۴۹ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک افزایش داد (شکل ۱۵). شرایط تنش از جمله تنش کادمیوم باعث عدم تعادل یونی می‌شود که تولید گونه‌های 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 متابولیت‌های ثانویه تغییر می‌دهد. سیستم دفاعی گیاه از طریق پاسخ آنتی‌اکسیدانی، که از اجزای آنتی‌اکسیدانی تشکیل شده است، برای مقابله با ROS تولید می‌شود و اثرات مخرب ROS را خنثی می‌کند (Ullah *et al*., 2019). بنابراین، می‌توان استنباط کرد که هر سه آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز نقش مهمی در سم‌زدایی و کاهش آسیب سلولی حاصل در گیاهچه‌های تحت تنش کادمیوم دارند (Abdal *et al*., 2021; Kwon *et al*., 2023). افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز در تیمار با اسید سالیسیلیک در ذرت (Pruthvi Krishna *et al*., 2023) و مریم گلی (Kwon *et al*., 2023) گزارش شده است. اسید سالیسیلیک به عنوان یک مولکول پیام‌رسان از طریق مهار فعالیت آنزیم کاتالاز باعث تغییر سامانه آنتی‌اکسیدانی می‌گردد (Pruthvi Krishna *et al*., 2023).

همبستگی وزن خشک گیاهچه با آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت: نتایج همبستگی وزن خشک گیاهچه با آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (جدول ۴) نشان داد که وزن خشک

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]



شکل ۱۵- فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز تحت تأثیر تنش کادمیوم و اسید سالیسیلیک. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ ٪ هستند.

جدول ۴- همبستگی وزن خشک گیاهچه با آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی

	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)
(۱) وزن خشک گیاهچه	۱			
(۲) کاتالاز	۰/۴۷**	۱		
(۳) پراکسیداز	۰/۶۰**	۰/۷۷**	۱	
(۴) پلی‌فنل اکسیداز	۰/۴۲**	۰/۷۳**	۰/۸۷**	۱

Pearson Correlation between seedling dry weight and enzymatic antioxidants (n = 64)

گیاهچه با فعالیت آنزیم‌ها همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد. با افزایش وزن خشک گیاهچه، فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز افزایش می‌یابد. همچنین آنزیم کاتالاز با آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد و آنزیم پراکسیداز با آنزیم پلی‌فنل اکسیداز نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت (جدول ۴).

نتیجه‌گیری

در مجموع، پژوهش حاضر نشان داد که علی‌رغم اثر منفی کادمیوم بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه افزودن اسید سالیسیلیک از طریق بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، موجب افزایش معنی‌دار درصد و میانگین سرعت جوانه‌زنی بذر، کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی و افزایش طول و وزن خشک گیاهچه‌های کینوا گردید. در بین غلظت‌های اسید سالیسیلیک مورد استفاده، بیشترین شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل شد. افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی طی جوانه‌زنی، باعث بهبود شرایط جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه‌ها می‌شود. به‌نظر می‌رسد اضافه کردن اسید سالیسیلیک به بستر کشت، با افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنول اکسیداز موجب کاهش و جلوگیری از خسارات وارده توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن شده که این امر خود بهبود خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها را به‌همراه دارد.

سپاسگزاری

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

بدین وسیله از زحمات اساتید راهنما و مشاور و حمایت مالی
دانشگاه محقق اردبیلی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

منابع

عباسپور، علی، کلباسی، محمود، حاج رسولی‌ها، شاپور، و گلچین، احمد (۱۳۸۴). بررسی آلودگی برخی خاک‌های کشاورزی ایران به کادمیوم و سرب. نهمین کنگره علوم خاک ایران، تهران. https://civilica.com/doc/11294

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 ox-idative stress: Implications for phytoremediation. *Environmental Geochemistry and Health*, *45*(1), 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

Alghamdi, S. A., Alharby, H. F., Abbas, G., Al-Solami, H. M., Younas, A., Aldehri, M., Alabdallah, N. M., & 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*, *12*(19), 3450. https://doi.org/10.3390/plants12193450

Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., & Abbas, G. (2022). Potassium and silicon synergistically increase cadmium and lead tolerance and phytostabilization by quinoa through modulation of physiological and biochemical attributes. *Toxics*, *10*(4), 169. https://doi.org/10.3390/toxics10040169

Amiryousefi, M., Tadayon, M. R., & Ebrahimi, R. (2021). Effect of nitrogenous and phosphorus biofertilizers on seed germination and some biochemical characteristics of two quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress. *Iranian Journal of Plant Biology*, *13*(1), 107-126. https://doi.org/10.22108/ijpb.2021.125105.1227

Andrade, V. L., Ribeiro, I., Dos Santos, A. P. M., Aschner, M., & Mateus, M. L. (2023). Metals in Cow Milk and Soy Beverages: Is There a Concern? *Toxics*, *11*(12), 1013. https://doi.org/10.3390/toxics11121013

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

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

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

Chang, C. J, & Kao, C. H. (1998). H_2O_2 metabolism during senescence of rice leaves: Changes in enzyme activities in light and darkness. *Plant Growth Regulation*, *25*(1), 11-15. https://doi.org/10.1023/A:1005903403926

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

Ghaderi, M, & Aliloo, A. A. (2023). Improving activity of antioxidant enzymes and vigor in rapeseed by salicylic acid and gum arabic seed priming. *Plant Process and Function*, *12*(54), 123-138. https://doi.org/20.1001. 1.23222727.1402.12.54.8.8

Gomaa, M., Nassar, M., Abd El-Aal, A., & Elaodn, M. (2023). Response of stevia to salicylic acid, salinity remediator and plant density under soil as affected by salinity. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, *28*(4), 808-821. https://doi.org/ 10.21608/jalexu.2023.245608.1163

Guo, H., Deng, M., Yu, F., Li, H., Cao, Z., Zeng, Q., Chen, Z., Luo, H., & Tang, B. (2023). Phenotypic and proteomic insights into differential cadmium accumulation in maize kernels. *Genes*, *14*(12), 2204. https://doi.org/10.3390/genes14122204

Guragain, R., Baniya, H. B., Guragain, D., Pradhan, S., & Subedi, D. (2023). From seed to sprout: Unveiling the potential of non-thermal plasma for optimizing cucumber growth. *Heliyon*, 9(11), e21460. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21460

Halemaa, 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. https://doi.org/10.30848/PJB2023-6(22)

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

Iftikhar, A., Abbas, G., Saqib, M., Shabbir, A., Amjad, M., Shahid, M., Ahmad, I., Iqbal, S., & Qaisrani, S. A. (2021). Salinity modulates lead (Pb) tolerance and phytoremediation potential of quinoa: A multivariate comparison of

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

physiological and biochemical attributes. *Environmental Geochemistry and Health*, *44*, 257-272. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00937-8

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

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

Kar, M, & Mishra, D. (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

Kwon, E. H., Adhikari, A., Imran, M., Lee, D. S., Lee, C. Y., Kang, S. M., & Lee, I. J. (2023) Exogenous SA applications alleviate salinity stress via physiological and biochemical changes in St John's wort plants. *Plants*, *12*(2), 310. https://doi.org/10.3390/plants12020310

Lashkari Sanami, N., Ghorbani, J., Hodjati, S. M., Vahabzadeh Kebria, G., & Motesharezadeh, B. (2022). Seed germination of plants grown in coal mine wastes in response to copper, lead, and cadmium stress. *Environmental Sciences*, *20*(1), 179-198. https://doi.org/10.52547/envs.2021.1041

Li, Q., Wang, G., Wang, Y., Yang, D., Guan, C., & Ji, J. (2019). Foliar application of salicylic acid alleviate the cadmium toxicity by modulation the reactive oxygen species in potato. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 172*, 317-325. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv. 2019.01.078

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*, *13*(6), 3307. https://doi.org/10.3390/su13063307

Maleki, K., Maleki, K., Soltani, E., Oveisi, M., & Gonzalez-Andujar, J. L. (2023). A model for changes in germination synchrony and its implements to study weed population dynamics: A case study of brassicaceae. *Plants, 12*, 233. https://doi.org/10.3390/ plants12020233

Matengu, T., Makaza, W., Ngadze, E., Rugare, J. T., Upenyu, M., & Gasura, E. (2021). Role of salicylic acid in disease resistance against Alternaria spp in tomatoes (*Solanum esculentum* L.). *Journal of Current Opinion in Crop Science*, *2*(4), 391-401. https://doi.org/10.62773/jcocs.v2i4.121

Naik, S., Paramesh, R., Siddaraju, R., & Ravi Shankar, P. (2020). Studies on growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *International Journal of Chemical Studies, 8*(1), 393-397. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1f.8278

Najafi, Gh., Khomari, S., & Javadi, A. (2015). Germination response of canola seeds to seed vigor changes and hydro-priming. *Seed Science Research*, *45*(4), 55-70. https://doi.org/20.1001.1.22520961.1394.5.17.6.9

Nkwaju, R. Y., Nouping, J. N. F., Bachirou, S., Abo, T. M., Deutou, J. G. N., & Djobo, J. N. Y. (2023). Effective stabilization of cadmium and copper in iron-rich laterite-based geopolymers and influence on physical properties. *Materials, 16*(24), 7605. https://doi.org/10.3390/ma16247605

Novak, M., Zemanova, V., Lhotska, M., Pavlik, M., Klement, A., Hnilicka, F., & Pavlikova, 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

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

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

Poor, P., Patyi, G., & Takacs, Z. (2019). Salicylic acid-induced ROS production by mitochondrial electron transport chain depends on the activity of mitochondrial hexokinases in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal Plant Reserch*, *132*, 273-283. https://doi.org/10.1007/s10265-019-01085-y

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

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

Regnier, R. (2020). influence of mechanical scarification and open-field sowing procedure over *Cassia ferruginea* germination process. *Journal of Horticulture and Plant Research, 9*, 30-38. https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/JHPR.9.30

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

Remi, Ch., Arindam, B., Pantamit, S., Hayat, U., & Avishek, D. (2021). Foliar application and seed priming of salicylic

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

acid affect growth, fruit yield, and quality of grape tomato under drought stress. *Scientia Horticulturae, 280*, 109904. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109904

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

Salehzade, H. M., Izadkhah Shishvan, M., Chiyasi, F., Forouzin, A., & Abbasi, A. (2009). Effect of seed priming on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Research Journal of Biological Sciences, 4*(5), 629-631. https://doi.org/10.36478/rjbsci.2009.629.631

Shah, G. M., Farooq, U., Shabbir, Z., Guo, J., Dong, R., Bakhat, H. F., Wakeel, M., Siddique, A., & Shahid, N. (2023). Impact of cadmium contamination on fertilizer value and associated health risks in different soil types following anaerobic digestate application. *Toxics, 1*(12), 1008. https://doi.org/10.3390/toxics11121008

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

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27*, 379423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Silva, P., Guilherme, M., Guilherme, L., Santos-Oliveira, J., & da Silva, E. (2021). Evaluation of seed germination development and initial growth of cotton plants exposed to cadmium. *Anales de Biologia, 43*, 111-116. https://doi.org/10.6018/analesbio.43.11

Souri, M. K, & Tohidloo, G. (2019). Effectiveness of different methods of salicylic acid application on growth characteristics of tomato seedlings under salinity. *Chemestery Biology Technology Agric, 6*, 26. https://doi.org/10.1186/s40538-019-0169-9

Tang, W., Liang, L., Xie, Y., Li, X., Lin, L., Huang, Z., Sun, B., Sun, G., Tu, L., Li, H., & Tang, Y. (2023). Foliar application of salicylic acid inhibits the cadmium uptake and accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) Front. *Plant Science, 14*, 1200106. https://doi.org/ 10.3389/fpls.2023.1200106

Tavoosi, M., Anafjeh, Z., & Mahdavi Majd, J. (2021). Effect of different salinity levels on germination indices of 20 new quinoa genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(3), 837-847. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2987.1772

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

Ullah, I., Al-Johny, B. O., Al-Ghamdi, K. M., Al-Zahrani, H. A. A., Anwar, Y., Firoz, A., Al-Kenani, N., & Almatry, M. A. A. (2019). Endophytic bacteria isolated from *Solanum nigrum* L., alleviate cadmium (Cd) stress response by their antioxidant potentials, including SOD synthesis by sodA gene. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 174*, 197-207. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.074

Wang, F., Tan, H., Zhang, Y., Huang, L., Bao, H., & Ding, Y. (2021). Salicylic acid application alleviates cadmium accumulation in brown rice by modulating its shoot to grain translocation in rice. *Chemosphere, 263*, 128034. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128034

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, 13*(12), 3051. https://doi.org/10.3390/agronomy13123051

Yari, L., Zareyan, A., Sheidaie, S., & Khazaei, F. (2012). Influence of high and low temperature treatments on seed germination and seedling vigor of rice (*Oryza sativa* L.). *World Applied Sciences Journal, 16*(7), 1015-1018.

Zayneb, C., Bassem, K., Zeineb, K., Grubb, C. D., 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. https://doi.org/ org/10.1007/s11356-015-4270-8

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

Zhu, Z., Sami, A., Xu, Q., Wu, L. L., Zheng, W. Y., Chen, Z. P., Jin, X. Z., Zhang, H., Li, Y., & Yu, Y. (2021). Effects of seed priming treatments on the germination and development of two rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties under the co-influence of low temperature and drought. *PloS One, 16*, e0257236. https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0257236

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]

Improvement of germination, growth and biochemical characteristics of quinoa seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) using salicylic acid under cadmium stress conditions

Fatemeh Mahmoudi[1], Parisa Sheikhzadeh[1*], Nasser Zare[1], Behroz Esmailpour[2]

[1] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2] Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: 2024/08/01, Accepted: 2024/09/14)

Abstract

This research was aimed at evaluating the effects of salicylic acid (SA) on seed germination and growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) seedlings under cadmium (Cd) stress. Factorially in the form of a completely randomized design in four replications in the Seed Science and Technology Laboratory of Mohaghegh Ardabili University in the year 2022. The experimental treatments included SA at four levels (0, 1.5, 2.5, and 3.5 mM) and Cd at four levels (0, 200, 300, and 400 mg/liter). Characteristics of germination percentage (GP), average germination duration (AGD), germination speed (GS), average daily germination (ADG), coefficient of variation of germination time (CVT), index of uncertainty of germination process (UGP), index of germination simultaneity (IGS), time to 75% germination (TG), and Anti-Enzymatic oxidants were evaluated. The results showed that the interaction of two factors was significant on almost all traits, so that with the application of 400 mg/liter of Cd in the conditions without the application of SA, the percentage of germination was about 27.67%, the coefficient of variation of germination time was about 42 11.0%, germination speed was 13.7%, germination synchronicity index 17.64%, daily germination percentage 34.32%, seedling dry weight 35.48% and quinoa seedling length 59.76% compared to the control treatment decreased. Although cadmium stress reduced the characteristics of seed germination and the growth of quinoa seedlings, under cadmium stress, the application of a 2.5 mM concentration of salicylic acid increased the germination percentage by 13.17% and the germination rate by 52.28%, 6.81 to 73. 35.0% Z index, 99.33% dry weight, and 79.68 to 91.63% length of quinoa seedlings were observed. Also, 42.90% decrease in average germination time, 11.42% decrease in average germination time coefficient, and 6.28 to 38.93% U index were reported by treatment with 2.5 mM concentration of salicylic acid. . The use of salicylic acid at a concentration of 2.5 mM in different levels of cadmium stress reduces the negative effect of cadmium stress by increasing the strength of seeds and seedlings, increasing the activity of antioxidant enzymes, and improving the characteristics of germination and seedling growth.

Keywords: Coefficient of variation of germination time, Uncertainty, Enzymatic antioxidants, Seedling dry weight

Corresponding author, Email: sheikhzadehmp@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.65.255]