مقاله پژوهشی

# تأثیر سیلیسیوم در کاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از سمیت کادمیوم در گندم در شرایط هیدروپونیک

الهام بهرامی[۱]، رضا خراسانی[۱*]، مهدی طاهری[۲] و امیر فتوت[۱]

[۱] گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، [۲] مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵)

**چکیده**

**بکارگیری سیلیسیوم به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در کاهش جذب کادمیوم و تحت تأثیر قراردادن خسارت‌های اکسیداتیو ناشی از سمیت کادمیوم مورد توجه قرار گرفته است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر حضور و عدم حضور سیلیسیوم (صفر و ۱/۵ میلی‌مول در لیتر) در سطوح مختلف کادمیوم (صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومول بر لیتر) در گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط هیدروپونیک انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم غلظت مالون دی‌آلدئید (MDA) افزایش معنی‌دار پیدا کرد و بکارگیری سیلیسیوم MDA را در مقایسه با گیاهانی که تنها با کادمیوم تیمار شده بودند کاهش داد. نتایج همچنین نشان داد که تنش کادمیوم یک افزایش معنی‌دار در فعالیت‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز در برگ‌ها و ریشه‌های گندم ایجاد کرد. نتایج نشان داد بکارگیری سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، آسکوربیک پراکسیداز را هم در برگ‌ها و هم در ریشه‌ها کاهش داد در حالیکه در فعالیت کاتالاز در برگ‌ها تأثیری نداشت ولی کاتالاز را در ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش داد. با توجه به نتایج فوق به‌نظر می‌رسد بکارگیری سیلیسیوم در شرایط تنش کادمیوم خسارات ناشی از تنش اکسیداتیو در گیاه را بهبود می‌بخشد.**

**کلید واژه: آنزیم آنتی‌اکسیدانت، سیلیسیوم، فلز سنگین، آلودگی**

**مقدمه**

کادمیوم (Cd) یکی از فلزات سنگین ( دانسیته: ۸/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و غیرضروری و به‌شدت سمی است که حتی در غلظت‌های پایین هم برای گیاهان و هم برای حیوانات خطرناک است. خطر سمیت کادمیوم زمانی افزایش می‌یابد که غلظت آن در خاک‌های کشاورزی به دلیل فعالیت‌های صنعتی و انسانی و شهری از قبیل کاربرد کودهای فسفاته، لجن‌های فاضلاب و رسوب کارخانجات فلزی، ایستگاه‌های قدرت (نیرو)، کارخانجات سیمان و ترافیک شهری افزایش می‌یابد (Sanita di toppi and Gabbrielli, 1999; Gallego *et al.*, 2012; Astolfi *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2007; Xin *et al.*, 2017).

اگرچه کادمیوم عنصری غیرضروری برای گیاهان محسوب می‌شود ولی به دلیل تحرک بالایی که در خاک و گیاه دارد به آسانی توسط ریشه‌های گیاه جذب شده و سپس در تمام بافت‌های گیاهی از ریشه تا اندام‌های هوایی تجمع می‌یابد (Mariap.Benavides *et al.*, 2005; Su *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2007). جذب سریع و آسان کادمیوم و تجمع آن در

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: khorasani@um.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

گیاهان علاوه بر کاهش عملکرد و کیفیت محصول غذایی باعث بوجود آمدن مشکلات سلامتی انسان از طریق یک زنجیره غذایی آلوده است (Wu *et al.*, 2007; Xin *et al.*, 2017; Abbas *et al.*, 2017). علاوه بر این تجمع کادمیوم در گیاهان باعث بروز نشانه‌های واضحی در گیاهان از قبیل توقف رشد، کلروز، قهوه‌ای شدن ریشه‌ها و یا مرگ کامل گیاه می‌شود که این آسیب‌های ناشی از سمیت کادمیوم به میزان زیادی به تداخل کادمیوم با یون‌های دیگر ارتباط دارد (Zeng *et al.*, 2011).

تجمع کادمیوم در گیاه باعث اختلالات جدی فیزیولوژیکی شده و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کادمیوم می‌تواند جذب عناصر توسط گیاهان را از طریق اثراتش بر دسترسی عناصر از خاک یا از طریق کاهش در جمعیت میکروب‌های خاک تغییر دهد (Mariap.Benavides *et al.*, 2005). محصولات زراعی که در سطوح بالای کادمیوم رشد می‌کنند اختلالات فیزیولوژیکی زیادی از قبیل کاهش مقدار کلروفیل، نرخ فتوسنتز، کاهش دادن هدایت روزنه‌ای، قند و پروتئین محلول، افزایش تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS)، افزایش آمینواسیدها را نشان می‌دهند (Rizwan *et al.*, 2016a; Sarwar *et al.*, 2015; Ci *et al.*, 2010; Ranieri *et al.*, 2005).

گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) همانند آنیون پراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروژن در شرایط تنش غیرزیستی تولید شده و تجمع یافته‌اند. سطوح زیاد گونه‌های اکسیژن فعال به ساختارهای سلولی و ماکرومولکولی آسیب می‌زنند که باعث مهار فتوسنتز دستگاه فتوسنتز می‌شود. تخریب و تجزیه ارگان‌های سلولی و مولکول‌های زیستی توسط ROS نه تنها بیوماس گیاه بلکه انتقال کادمیوم به بخش‌های هوایی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این تولید و تجمع ROS واکنش‌های دفاعی چندگانه را فعال می‌کند، بنابراین یک نقش مهم را دارا هستند (Sarwar *et al.*, 2015; Taleahmad and Haddad, 2011).

متابولیسم ROS بستگی به عملکردهای مختلف آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی متصل شده دارد از قبیل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز (POD)، کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX). سوپراکسید دیسموتاز، آنیون سوپراکسید را همراه با تشکیل $H_2O_2$ حذف می‌کند و سپس این ترکیب تولیدشده توسط کاتالاز و پراکسیداز سم‌زدایی می‌شود. در چرخه گلوتاتیون – آسکوربات، پراکسیداز آسکوربات، $H_2O_2$ را از طریق آسکوربات به‌عنوان دهنده الکترون کاهش می‌دهد (Taleahmad and Haddad, 2011). به‌طورکلی مطالعات متعددی درباره خسارت اکسیداتیو کادمیوم ناشی از سمیت کادمیوم در گیاهان مختلف صورت گرفته است (Ci *et al.*, 2010; Rizwan *et al.*, 2016a; Shi *et al.*, 2017). پوراکبر و اشرفی (۲۰۱۱) نشان دادند که کادمیوم موجب افزایش فعالیت کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، افزایش پراکسیداسیون لیپیدها، تجمع پراکسید هیدروژن و مرگ سلولی در ذرت شد.

سیلیسیوم هرگز به فرم آزاد پیدا نشده است و همیشه با عناصر دیگر ترکیب شده است و معمولاً تشکیل اکسید می‌دهد و به فرم اسید سیلسیک ($Si(oH_4)$) توسط گیاهان جذب شده است. نتایج اثرات سودمند سیلیسیوم در افزایش‌دادن مقاومت گیاهان در تنش‌های زیستی و غیرزیستی در محصولات مختلف به‌طور گسترده‌ای بحث شده است. اثرات مثبت مختلف سیلیسیوم در گیاهان شناسایی شده است. آزمایشات نشان داده که غلات اصلی (برنج، گندم و ...) از بکارگیری سیلیسیوم سود می‌برند. سیلیسیوم رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Adrees *et al.*, 2015). اخیراً گزارش شده است سیلیسیوم در کاهش تنش فلزات سنگین از قبیل کادمیوم، منگنز، مس و کروم مؤثر بوده است (Taleahmad and Haddad, 2011). مکانیسم‌های کاهش سمیت فلزات سنگین ناشی از سیلیسیوم به‌طور عمده شامل مکانیسم‌های داخلی و خارجی هستند از قبیل کاهش دسترسی فلزات سنگین از طریق افزایش‌دادن پ هاش محیط ریشه، کاهش‌دادن جذب فلز، بازدارندگی انتقال ریشه– شاخسار، تحریک آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، ادغام بیشتر فلزات سنگین به واکوئل‌ها یا دیواره‌های سلولی، تعدیل فعالیت ناقل‌های فلزی (Shi *et al.*, 2017). مشخص شده که غلظت کادمیوم شاخسار با میزان

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

تعرق و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت مرتبط است و علاوه بر این سیلیسیوم می‌تواند این دو را تنظیم کند (Naeem *et al.*, 2015). به خوبی ثبت شده است که سیلیسیوم می‌تواند ظرفیت آنتی‌اکسیدان‌های گیاهان را تحت شرایط سمیت کادمیوم افزایش دهد. علاوه بر این مطالعات مختلفی همچنین گزارش داده‌اند که اضافه‌کردن سیلیسیوم فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت تحت شرایط تنش کاهش داد (Shi *et al.*, 2017). به علت تفاوت‌ها بین گونه‌های گیاهی، شرایط آزمایشگاهی و دوره تیمار مطالعات بیشتری لازم است تا اثر سیلیسیوم بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانتی غلات شبیه گندم تحت شرایط سمیت کادمیوم بررسی شود.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با یک رقم گندم (*Triticum aestivum* L.) با غلظت‌های مختلف کادمیوم (صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومول بر لیتر) از منبع نیترات کادمیوم ($Cd(NO_3).4H_2O$) در حضور و عدم حضور سیلیسیوم (صفر، ۱/۵ میلی‌مول بر لیتر) از منبع سیلیکات سدیم ($Na_2O_3Si$) در سه تکرار در سال ۹۴ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد.

**رشد گیاه و تیمارها:** بذرهای گندم با محلول سدیم هیپوکلریت ۲/۶٪ کلراید فعال به‌مدت سه دقیقه استریلیزه شده و سپس به‌طورکامل با آب‌مقطر ۵ تا ۶ بار شسته شده تا کلراید اضافی حذف شود و از بین برود. سپس به‌مدت ۳ روز برای جوانه‌زنی در ۲۳°C روز/ ۲۰°C شب قرار گرفت. پس از جوانه‌زنی به محیط شن ضدعفونی شده و آبیاری شده منتقل داده شد و پس از یک هفته نشاها به مخزن‌های پلاستیکی ۲۰ لیتری پرشده با محلول غذایی هوگلند تغییریافته منتقل شد. محلول غذایی هوگلند به‌طور مرتب هوادهی شده و حاوی ترکیبات ذیل بود: $KH_2PO$ ۰/۵میلی‌مول بر لیتر، $K_2HPO_4$ ۰/۵ میلی‌مول بر لیتر، $MgSO_4.7H_2O$ ۰/۵ میلی‌مول برلیتر، $KNO_3$ ۱ میلی‌مول بر لیتر، $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ ۱ میلی‌مول بر لیتر، KCl ۰/۱۲۵ میلی‌مول بر لیتر و $H_3BO_3$ ۵۰ میلی‌مول بر لیتر، $MnSO_4.H_2O$ ۱۲ میکرومول بر لیتر، $CuSO_4.5H_2O$ ۰/۷ میکرومول بر لیتر، $ZnSO_4.7H_2O$ ۱ میکرومول بر لیتر، $MoO_4.2H_2O$ ۰/۲۵ میکرومول بر لیتر، $Fe_3$-EDTA-Na ۱۰۰ میکرومول بر لیتر.

NaOH یا $HNO_3$ برای تنظیم pH محلول غذایی به ۶ استفاده شد. محلول غذایی در ۱۰ روز اول هر سه روز یکبار تعویض گردید. بعد از ۱۰ روز کشت در حضور سیلیسیوم (صفر، ۱/۵ میلی‌مول بر لیتر) ۱۲ لگن در معرض غلظت‌های مختلف کادمیوم (صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومول بر لیتر) از منبع نیترات کادمیوم $Cd(NO_3).4H_2O$ به‌مدت ۱۱ روز قرار گرفتند.

محلول‌های غذایی هر سه روز یکبار در ۱۰ روز اول (محلول غذایی با سیلیسیوم وقتی لازم بود) و هر دو روز یکبار در طی روزهای باقی مانده تعویض گردید. پس از یک دوره ۲۱ روزه گیاهان برداشت شده و ریشه و شاخسار به‌صورت تفکیک‌شده مورد آزمایش قرار گرفتند.

**وزن خشک اندام هوایی و ریشه:** برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه پس از برداشت، گیاه در دمای ۷۰ درجه سیلسیوس و به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد و وزن خشک اندام هوایی و ریشه تعیین شد.

**غلظت مالون دی‌آلدئید (شاخص سنجش پراکسیداسیون لیپیدها):** برای اندازه‌گیری از روش Hagege و همکاران (۱۹۹۰) غلظت مالون دی‌آلدئید ریشه گندم استفاده گردید. به‌طوری‌که یک میلی‌لیتر تری‌کلرو استیک اسید به ۰/۵ گرم ریشه منجمد هموژنیزه اضافه و پس از افزودن ۱۰ میلی‌لیتر استون به شدت مخلوط و با دور ۴۷۵۰ در دقیقه به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. رسوب کوچک حاصل از سانتریفیوژ با ۵ میلی‌لیتر استون شستشو و پس از ورتکس مجدداً با همان دور به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد، آخرین مرحله چهار مرتبه تکرار شد. سپس به مقدار ۳ میلی‌لیتر اسید فسفریک یک درصد و یک میلی‌لیتر اسید تیوباربیو تیوریک ۰,۶ درصد افزوده و محلول برای مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سیلسیوس قرار گرفت. واکنش با سردکردن سریع لوله‌ها در داخل یخ متوقف شد و مقدار جذب نور توسط محلول در طول‌موج

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

۵۳۲ و ٦٠٠ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج اندازه‌گیری گردید.

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی:** ابتدا ۲/٤۲۳ گرم تریس در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر حل و با HCl غلیظ pH به ۷/۸ رسانده شد. محلول به‌مدت ۲٤ ساعت در یخچال نگهداری و مجدداً pH آن بررسی گردید. سپس ۲۰ میلی‌لیتر گلیسرول اضافه و با آب‌مقطر به حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. به منظور استخراج عصاره آنزیمی ۰/۵گرم نمونه ریشه و برگ پودرشده با ۵ میلی‌لیتر بافر استخراج مخلوط شد. مخلوط بدست آمده ورتکس و به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید و درنهایت فاز بالایی عصاره (سوپرناتانت) به‌عنوان عصاره آنزیمی جدا و برای سنجش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز مورد استفاده قرار گرفت.

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز:** فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با روش Dhindsa و همکاران (۱۹۸۱) به شرح زیر اندازه‌گیری شد. مقدار ۵۰ میکرولیتر از عصاره ریشه و برگ به سه میلی‌لیتر مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷/۸)، ریبوفلاوین ۱/۳ میکرومولار، EDTA ۷۵ نانومولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار و نیتروبلو تترازولیوم ٦۳ میکرومولار (NBT) اضافه گردید. مخلوط در شرایط نوری ۵۰۰۰ لوکس به‌مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد و شدت جذب نور در طول‌موج ٥٦۰ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج خوانده شد (یک واحد استاندارد فعالیت SOD به‌عنوان مقداری از آنزیم که برای مهار ۵۰ درصد کاهش NBT نیاز است تعریف می‌شود).

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز:** برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز از روش Scebba و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد. کوت شاهد دارای سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار (pH=۷) و پنج میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ و کوت نمونه دارای سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار، ۵ میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. مقدار فعالیت در طول‌موج ۲٤۰ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج تعیین شد.

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز:** فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به روش Nakano و Asada (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد. سه میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷) شامل EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و آسکوربات سدیم ۰/۱ میلی‌مولار، ۲۰۰ میکرولیتر آب اکسیژنه و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره حاوی آنزیم بود. پس از اضافه‌کردن عصاره آنزیمی مخلوط واکنش تکان داده و بلافاصله شدت کاهش جذب نوری مخلوط واکنش در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر به‌مدت ۵ دقیقه توسط دستگاه طیف‌سنج خوانده شد. لازم به ذکر است نحوه فعالیت آنزیم براساس تبدیل آسکوربات به منوهیدرو آسکوربات در حضور پراکسید هیدروژن و توسط آنزیم آسکوربات پراکسیداز انجام می‌شود.

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز:** برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش Maehly (۱۹٥٤) استفاده شد. کوت شاهد دارای سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار (pH=۷) و ۱۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ و سه میکرولیتر محلول گایوکل (Gayocol) ۰/۲ مولار و کوت نمونه دارای سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار (pH=۷) و ۱۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۰٪، سه میکرولیتر محلول گایوکل ۰/۲ مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. شدت جذب نور در طول‌موج ٤۷۰ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج تعیین شد.

**اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در شاخسار گندم:** به منظور اندازه‌گیری غلظت کادمیوم، پس از خشک و آسیاب‌کردن شاخساره، یک گرم از پودر آن در لوله هضم ریخته و مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱:۱ به آن اضافه شد. سپس به‌مدت ۱۵ دقیقه و در دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱:۱ به آن اضافه نموده و مجدداً به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ٦۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد تا حجم محلول حاصل به ۵ میلی‌لیتر کاهش یابد. سپس ۲ میلی‌لیتر آب‌مقطر و ۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ به آن اضافه شد. پس از پایان مراحل هضم، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ به آن اضافه شده و به‌مدت ۱۵ دقیقه بدون جوشش حرارت داده شد. با سردشدن بالن، عصاره حاصل را از کاغذ

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

صافی واتمن ٤٢ عبور داده و غلظت کادمیوم در عصاره صاف‌شده با دستگاه جذب اتمی خوانده شد (Soon and Abbud, 1993).

**تجزیه آماری:** داده های بدست آمده با نرم‌افزار SAS (Ver.9.0) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح ۵ درصد انجام و شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel (Ver 2016) رسم گردید.

## نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی کادمیوم و سیلیسیوم بر وزن خشک شاخسار در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید و اثرات متقابل این دو بر وزن خشک شاخسار در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. نتایج نشان داد اثرات اصلی و متقابل سیلیسیوم و کادمیوم بر وزن خشک ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثرات اصلی و متقابل سیلیسیوم و کادمیوم بر غلظت کادمیوم در ریشه و شاخسار معنی‌دار گردید. در صفات مربوط به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی اثر اصلی کادمیوم در تمام آنزیم‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی سیلیسیوم در سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز معنی‌دار بود و در کاتالاز معنی‌دار نبود. همچنین نتایج نشان داد اثرات متقابل این دو در سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار گردید و در کاتالاز و پراکسیداز معنی‌دار نشد (جدول ۱).

**وزن خشک:** با توجه به نتایج بدست آمده سمیت کادمیوم باعث کاهش وزن خشک ریشه و شاخسار گردید (جدول ۲). با افزایش غلظت کادمیوم به ۵۰ میکرومولار وزن خشک ریشه و شاخسار به‌ترتیب ۳۰ و۳۳ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت و از نظر آماری کاهش وزن خشک شاخسار و ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). همچنین نتایج نشان داد در شرایط سمیت کادمیوم بکارگیری سیلیسیوم به‌طور متوسط باعث افزایش وزن خشک ریشه و شاخسار به‌ترتیب به میزان ۱۳٪ و ۳۳٪ شد.

**کادمیوم شاخساره:** با افزایش غلظت کادمیوم از صفر تا ۵۰ میکرومولار در محلول غذایی غلظت کادمیوم در شاخساره گندم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۳). تجمع کادمیوم در شاخساره گندم با افزایش غلظت از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار از۹ به ٤٥ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت و این افزایش از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. نتایج نشان داد گیاهانی که در محلول غذایی سیلیسیوم دریافت کرده بودند تجمع کمتری از کادمیوم را در بخش هوایی خود داشتند. به‌طور مثال با افزایش غلظت کادمیوم از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار، بکارگیری سیلیسیوم تجمع کادمیوم را به‌طور متوسط تقریباً ٢٤ درصد کاهش داد.

**فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD):** نتایج نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم از صفر تا ۵۰ میکرومولار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در ریشه و شاخسار افزایش یافت. تأثیر کادمیوم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ریشه در مقایسه با شاخساره بیشتر بود. بطوریکه با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۵۰ میکرومولار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در ریشه از ۳/۹۳ به ۱۰۵/٤٤ واحد استاندارد در میلی‌گرم پروتئین رسید (شکل ۱) در حالیکه در شاخسار با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۵۰ میکرومولار ۱۱/۲٤ به ٤٨/٧٧ واحد استاندارد در میلی‌گرم پروتئین رسید (شکل ۱). در حضور سیلیسیوم فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز چه در ریشه و چه در شاخسار کاهش یافت. به‌عنوان مثال با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۵۰ میکرومولار در حضور سیلیسیوم فعالیت سوپراکسید دیسموتاز از ٤٨/٧ به ۳۳/۱۵ واحد استاندارد در میلی‌گرم پروتئین در شاخسار رسید که این میزان در مقایسه با شرایطی که سیلیسیوم دریافت نکرده بودند به‌طور متوسط ٤٥ درصد کاهش را نشان داد.

**فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT):** با توجه به نتایج بدست آمده فعالیت آنزیم کاتالاز هم در ریشه و هم در شاخساره تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم قرار گرفت. بطوریکه با افزایش غلظت کادمیوم محیط از صفر به ۵۰ میکرومولار، فعالیت این آنزیم در ریشه افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۲).

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

**جدول ۱- تجزیه واریانس سطوح مختلف کادمیوم و سیلیسیوم بر صفات مورد مطالعه گندم**

| S.OV | درجه آزادی | وزن خشک ریشه | وزن خشک شاخساره | نسبت شاخساره به ریشه | غلظت سیلیسیوم در ریشه | غلظت سیلیسیوم در شاخساره |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کادمیوم | ۲ | ۰/۳۸** | ۰/۹٤** | ۰/۳۵** | ۰/٦۱** | ۱/۵۱** |
| سیلیسیوم | ۱ | ۰/۰٦** | ۱/۳۰** | ۰/۳۰$^{n.s}$ | ۰/۵۹** | ۱/۰۲** |
| کادمیوم × سیلیسیوم | ۲ | ۰/۰۳** | ۰/٤* | ۰/۲۸* | ۰/۰٤** | ۰/۱۳** |
| خطا | ۱۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰٤ | ۰/۰۰٤ |
| ضریب تغییرات | | ۳/۹ | ٦/٦ | ۱۰/۱٦ | ۱۳/۱٦ | ۱۰/۱۷ |

**$^{ns}$ غیرمعنی‌دار، $^{**}$ معنی‌دار در سطح یک درصد، $^{*}$ معنی‌دار در سطح پنج درصد**

**جدول ۲- اثر تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیسیوم بر میانگین وزن خشک ریشه و شاخساره و نسبت شاخساره به ریشه**

| نسبت شاخسار/ ریشه | وزن خشک شاخسار | وزن خشک ریشه | کادمیوم | سیلیسیوم |
|---|---|---|---|---|
| | گرم | | میکرومول بر لیتر | میلی‌مول بر لیتر |
| ۲/۱۰ | ۲/۷۲$^{b}$ | ۱/۵۸$^{b}$ | ۰ | ۰ |
| ۲/۱۰$^{a}$ | ۳/۰۷$^{a}$ | ۱/۷۳$^{a}$ | ۰ | ۱/۵ |
| ۱/٦۲$^{b}$ | ۱/۹۷$^{c}$ | ۱/۲۸$^{c}$ | ۱۰ | ۰ |
| ۱/٦٤$^{b}$ | ۲/٦۰$^{b}$ | ۱/۵۳$^{b}$ | ۱۰ | ۱/۵ |
| ۱/۵٦$^{b}$ | ۱/۸۳$^{c}$ | ۱/۱۲$^{d}$ | ۵۰ | ۰ |
| ۲/۳۲$^{a}$ | ۲/٤۷$^{b}$ | ۱/۱۷$^{d}$ | ۵۰ | ۱/۵ |

**در هر ستون حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد و آزمون LSD است.**

**جدول ۳- اثرتیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیسیوم برغلظت کادمیوم شاخساره**

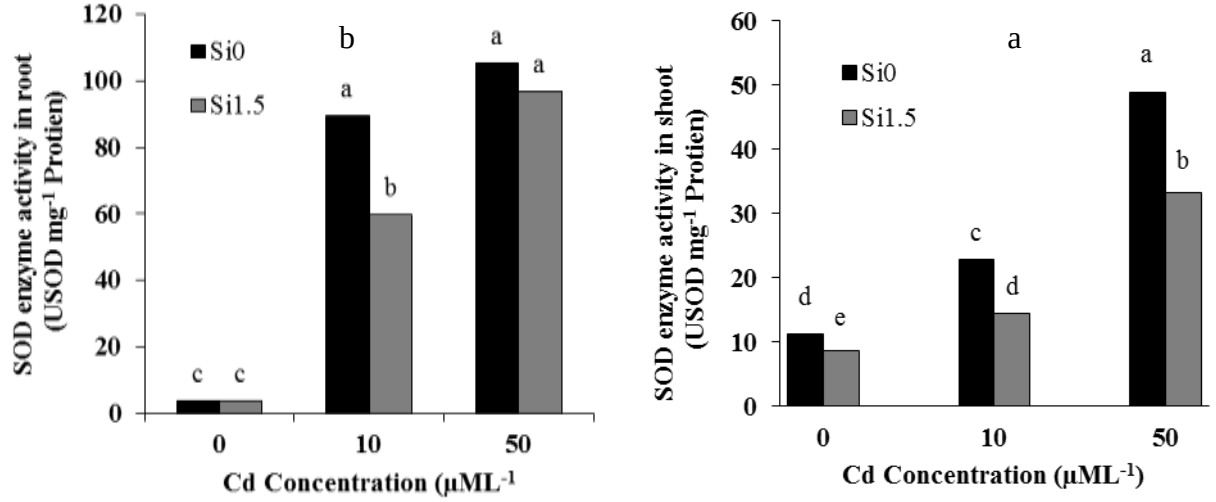
| سیلیسیوم میلی‌مول بر لیتر | کادمیوم میکرومول بر لیتر | غلظت کادمیوم شاخساره میلی‌گرم بر کیلوگرم |
|---|---|---|
| ۰ | ۰ | ۰/۱۵$^{d}$ |
| ۱/۵ | ۰ | ۰/۰۹$^{d}$ |
| ۰ | ۱۰ | ۹$^{c}$ |
| ۱/۵ | ۱۰ | ٦/۵$^{c}$ |
| ۰ | ۵۰ | ٤۵$^{a}$ |
| ۱/۵ | ۵۰ | ۳۵/۷$^{d}$ |

**در هر ستون حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد و آزمون LSD است.**

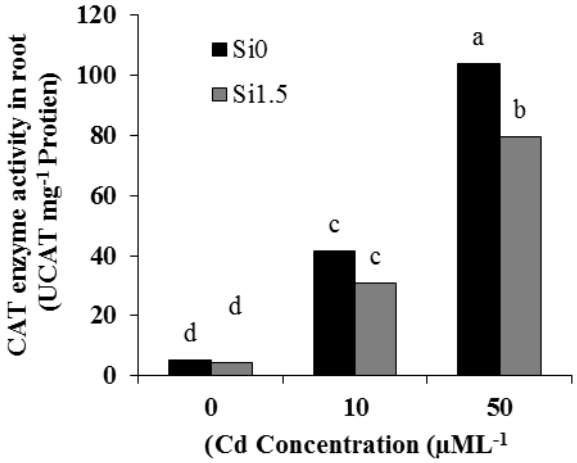
در سطح ۱۰ و ۵۰ میکرومولار با افزودن سیلیسیوم به محیط فعالیت آنزیم در ریشه کاهش یافت. در سطح صفر کادمیوم، افزودن سیلیسیوم به محلول غذایی تأثیری در فعالیت آنزیم کاتالاز در ریشه نداشت. فعالیت آنزیم کاتالاز در شاخسار با فعالیت این آنزیم در ریشه متفاوت بود. در شاخسار با افزایش غلظت کادمیوم در محلول غذایی از صفر تا ۵۰ میکرومولار

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]




**شکل ۱- برهمکنش سیلیسیوم و کادمیوم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شاخسار (a) و ریشه (b). ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

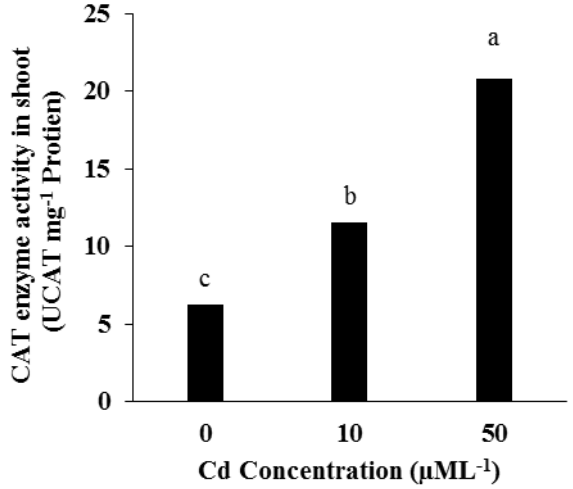



**شکل ۲- برهمکنش سیلیسیوم و کادمیوم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در ریشه. ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

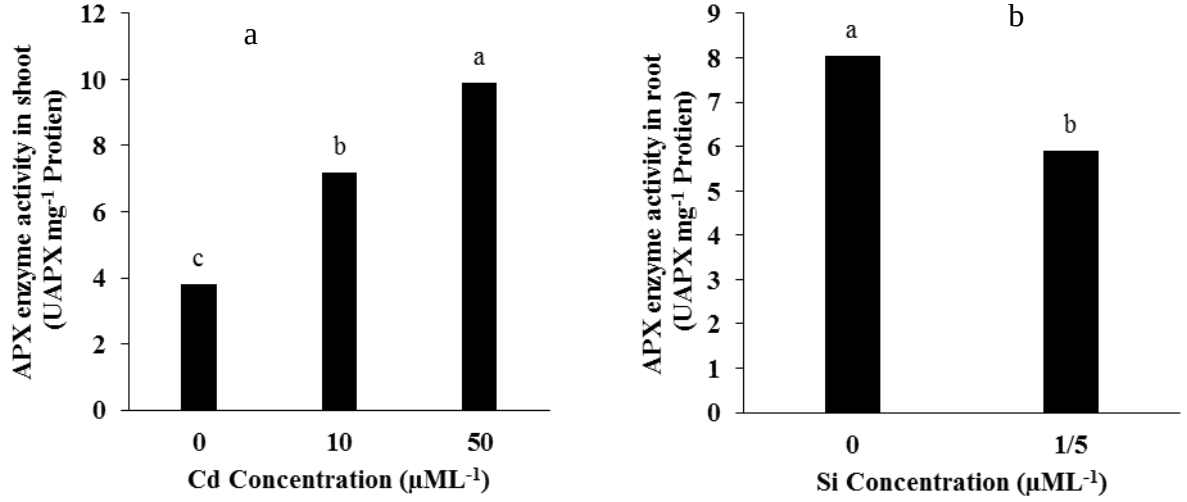
فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یافت و این در حالی بود که افزودن سیلیسیوم به محلول غذایی در حضور کادمیوم تأثیری بر فعالیت آنزیم کاتالاز در شاخسار نداشت (شکل ۳).

**فعالیت آنزیم آسکوربیک پراکسیداز** (APX): نتایج نشان داد فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با افزایش غلظت کادمیوم در محلول غذایی در ریشه افزایش یافت بطوریکه با افزایش غلظت کادمیوم از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار فعالیت آنزیم از ۷/۲ به ۹/۹۱ افزایش یافت (شکل ٤). همچنین نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم در حضور سیلیسیوم در ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت بطوریکه در حضور ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیوم فعالیت آنزیم به میزان ۲٦ درصد نسبت به عدم وجود سیلیسیوم کاهش یافت (شکل ٤). نتایج نشان داد در شاخساره با افزایش غلظت کادمیوم در محلول غذایی از صفر به ۵۰ میکرومولار فعالیت آنزیم APX از ۲/۳۷ به ۱۱/۱۲ رسید. با افزایش غلظت کادمیوم از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار فعالیت آنزیم APX به میزان ٦۵ درصد افزایش یافت. همچنین

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]




**شکل ۳- تأثیر کادمیوم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در شاخسار. ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

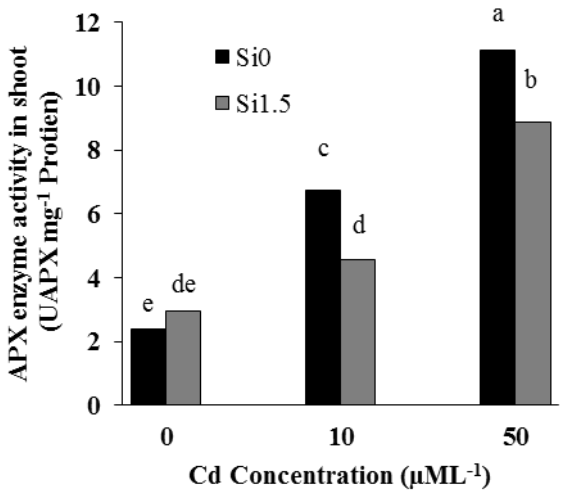



**شکل ٤- تأثیر کادمیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شاخساره (a) تأثیر سیلیسیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ریشه (b). ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

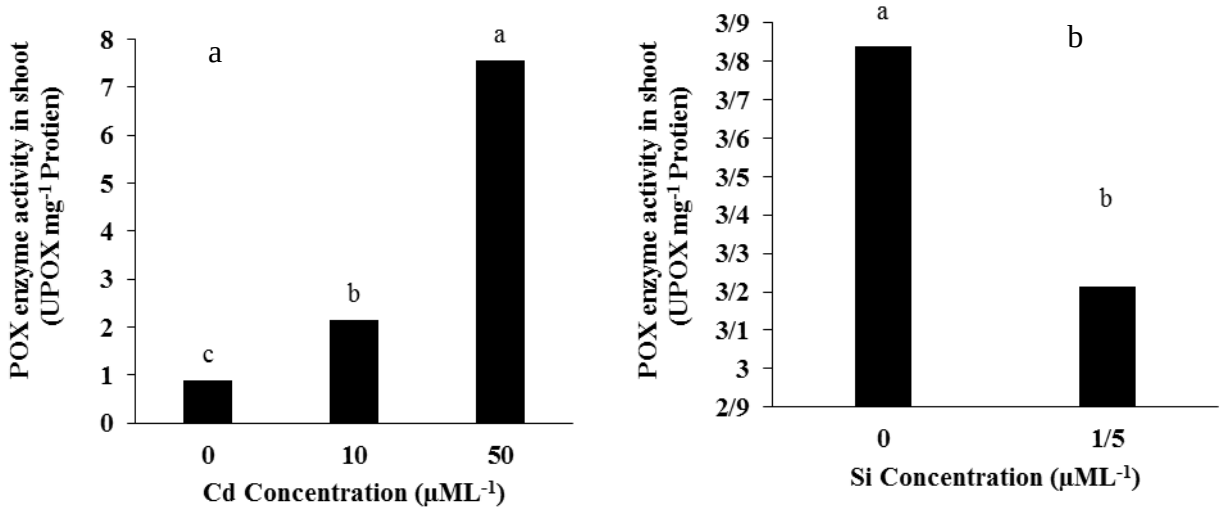
نتایج نشان داد افزودن سیلیسیوم به محلول غذایی در حضور کادمیوم فعالیت آنزیم آسکوربیک پراکسیداز را کاهش داد بطوریکه در حضور سیلیسیوم در سطح ۵۰ میکرومولار کادمیوم فعالیت آسکوربیک پراکسیداز از ۱۱/۱۲ به ۸/۸۸ کاهش یافت (شکل ۵).

**فعالیت آنزیم پراکسیداز (POX):** نتایج نشان داد فعالیت آنزیم پراکسیداز در شاخساره با افزایش غلظت کادمیوم در محلول غذایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، بطوریکه با افزایش غلظت کادمیوم از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار فعالیت آنزیم از ۲/۱٤ به ۷/۵۵ رسید (شکل ٦). همچنین نتایج نشان داد فعالیت آنزیم در حضور سیلیسیوم نسبت به شرایط بدون سیلیسیوم در شاخساره کاهش معنی‌داری نشان داد (شکل ٦). فعالیت آنزیم پراکسیداز در ریشه گندم با افزایش غلظت کادمیوم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت بطوریکه با افزایش غلظت از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار فعالیت آنزیم از ٤۰ به ۷۸/۳۳ رسید. فعالیت آنزیم در حضور سیلیسیوم با افزایش غلظت

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]




**شکل ۵- برهمکنش سیلیسیوم و کادمیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در شاخساره. ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**




**شکل ٦- تأثیر کادمیوم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز شاخساره (a) تأثیر سیلیسیوم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز شاخساره (b). ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

کادمیوم در ریشه کاهش یافت بطوریکه فعالیت آنزیم در تیمار ۱۰ میکرومولار در حضور سیلیسیوم ۳۰ و در عدم حضور سیلیسیوم به ٤٠ افزایش یافت (شکل ۷).

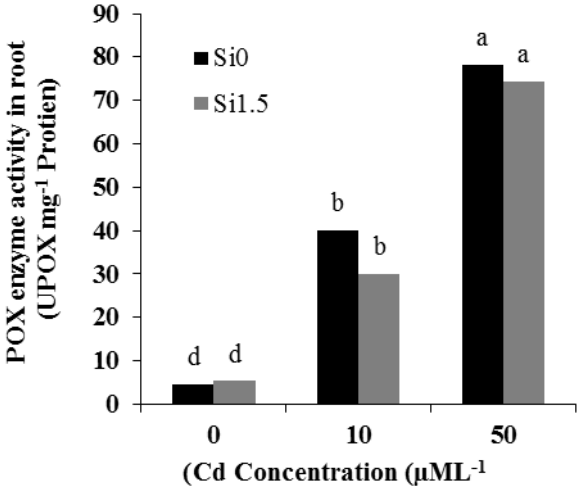
**غلظت مالون دی‌آلدئید ریشه (MDA):** غلظت مالون دی‌آلدئید با افزایش سطوح کادمیوم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بطوریکه با افزایش سطح کادمیوم در محلول غذایی از ۱۰ به ۵۰ میکرومولار غلظت مالون دی‌آلدئید به میزان ۵۱ درصد افزایش یافت. تأثیر حضورسیلیسیوم در سطوح مختلف کادمیوم بر غلظت مالون دی‌آلدئید به گونه‌ای بود که با افزایش سطح کادمیوم غلظت مالون دی‌آلدئید در حضور سیلیسیوم کاهش یافت بطوریکه بیشترین کاهش غلظت در بالاترین سطح کادمیوم یعنی ۵۰ میکرومولار به میزان ۳۹ درصد نسبت به سطح ۱۰ میکرومولار کادمیوم بود (شکل ۸).

## بحث

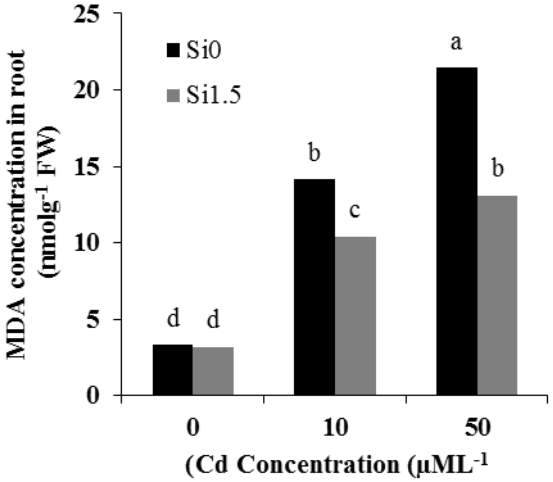
خطر انباشتگی کادمیوم در محصولات کشاورزی که در سطوح

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]




**شکل ۷- برهمکنش سیلیسیوم و کادمیوم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز در ریشه. ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**




**شکل ۸- برهمکنش سیلیسیوم و کادمیوم بر مالون دی‌آلدئید در ریشه. ستون‌های با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد ندارند.**

بالای کادمیوم رشد می‌کنند یکی از مسائل مهمی است که زنجیره غذایی مصرف‌کننده را تهدید می‌کند. مصرف گیاهان رشد کرده در خاک‌های آلوده به کادمیوم اجازه ورود کادمیوم را به زنجیره غذایی می‌دهد و متعاقباً خطرات جدی را برای سلامت انسان و حیوانات ایجاد می‌کند. کادمیوم جذب‌شده توسط ریشه به شاخسار انتقال داده می‌شود و باعث بروز اختلال در فرآیندهای فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاه از قبیل کاهش میزان کلروفیل، کاهش فتوسنتز، اختلال در متابولیسم عناصر غذایی شود، که به‌نظر می‌رسد کاهش وزن خشک گیاه در تحقیق حاضر به دلیل عوامل فوق باشد. سمیت کادمیوم علاوه بر اینکه برای مصرف‌کننده خطراتی را به همراه دارد در داخل گیاه نیز تولید گونه‌های اکسیژن فعال که عامل تنش اکسیداتیو هستند را افزایش می‌دهد که این می‌تواند باعث کاهش رشد گیاه، بیوماس و عملکرد دانه باشد. استراتژی‌های متعددی جهت کاهش جذب کادمیوم و کاهش اثرات زیانبار آن در گیاه وجود دارد. کاربرد سیلیسیوم به‌عنوان عنصری سودمند

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

برای محصولات زراعی که کاهش تنش‌های غیرزیستی از قبیل تنش کادمیوم را در بسیاری از گیاهان نشان داده است، به‌عنوان عاملی مؤثر در کاهش جذب کادمیوم توسط گیاه است (Rizwan *et al.*, 2016b). Shi و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند در شرایط سمیت کادمیوم بکارگیری سیلیسیوم تجمع کادمیوم را هم در ریشه و هم در شاخسار کاهش داد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بکارگیری سیلیسیوم در شرایط سمیت کادمیوم تجمع کادمیوم را در شاخسارهای گندم کاهش داد. مطالعات متعددی در مورد اثرات مثبت سیلیسیوم در کاهش غلظت و انتقال کادمیوم از ریشه به شاخسارها در گندم و گیاهان مختلف از قبیل ذرت و برنج گزارش شده است (Zhang *et al.*, 2008; Vaculik *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2015). این نتایج می‌تواند اینگونه توضیح داده شود که سیلیسیوم از طریق مکانیسم کمپلکس‌کردن کادمیوم (ماتریکس هموسلولزی سیلیسیوم) و متعاقباً رسوب همزمان مانع جذب کادمیوم می‌شود. همچنین سیلیسیوم از طریق تغییر در فعالیت‌های ناقل‌های فلزی جذب کادمیوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Greger *et al.*, 2016). Greger و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که کاهش سمیت کادمیوم از طریق سیلیسیوم در گندم، به کاهش جذب کادمیوم از طریق تنظیم- پایین HMA2 (ATPase 2 فلز سنگین) و LCT1 (Low affinity cation transporter 1) و القای سنتز فیتوکلاتین‌ها و انتقال آهن از طریق تنظیم- بالا سنتز فیتوکلاتین ۱ و ناقل تنظیم‌شده – آهن (IRT1) به‌ترتیب مرتبط بوده است.

**دفاع آنتی‌اکسیدانی تحت تنش کادمیوم:** گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) از قبیل سوپراکسید ($O^{-}_{2}$)، رادیکال هیدروکسیل (OH) و $H_2O_2$ به‌طور معمول در طی متابولیسم هوازی تولید می‌شوند. وقتی گیاهان در معرض تنش‌های غیرزیستی از قبیل تنش فلزات سنگین، تنش خشکی یا تنش شوری قرار می‌گیرند تولید گونه‌های اکسیژن فعال ممکن است به شدت افزایش یابد (Mittler *et al.*, 2004). پراکسیداسیون چربی‌های غشاء ناشی از گونه‌های اکسیژن فعال، اکسیداسیون پروتئین‌ها، ممانعت آنزیمی و آسیب DNA و RNA باعث می‌شود شرایط تغذیه‌ای نامتعادل شده و رشد گیاه غیرعادی گردد (Mittler *et al.*, 2002). تولید افزایش‌یافته گونه‌های اکسیژن فعال منجر به افزایش MDA و سطوح $H_2O_2$ که به ترتیب محصول پراکسیداسیون چربی‌ها و اکسیداسیون بافت هستند. بنابراین، غلظت‌های MDA و $H_2O_2$ ممکن است به‌عنوان نشانگرهای مهمی برای ارزیابی درجه تنش اکسیداتیو در نظر گرفته شوند (Wu *et al.*, 2017). در این مطالعه، یک افزایش معنی‌دار در MDA در ریشه‌های گندم تحت تنش کادمیوم مشاهده شد. علاوه بر این، بکارگیری سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری MDA را در مقایسه با گیاهانی که تنها با کادمیوم تیمار شده بودند، کاهش داد (شکل ۸). یک نتیجه مشابه توسط Wu و همکاران (۲۰۱۵) گزارش شده است که واکنش گوجه‌فرنگی و خیار را به تنش کادمیوم، بررسی کردند. این یافته‌ها پیشنهاد می‌کند که بکارگیری سیلیسیوم ممکن است در حذف سمیت کادمیوم از طریق کاهش تنش اکسیداتیو در برگ‌ها مشارکت داشته باشد. برای حذف ROS زیادی در سلول‌ها، گیاهان شامل کمپلکسی از سیستم‌های دفاعی از قبیل آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی از قبیل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز (POD)، کاتالاز (CAT) و آسکوربات پراکسیداز (APX) و آنتی‌اکسیدانت‌های غیرآنزیمی از قبیل گلوتاتیون و آسکوربیک اکسیداز هستند (Sharma and Dietz, 2009). سوپراکسید دیسموتاز یک آنزیم مرکزی است که رادیکال‌های سوپراکسید را به $H_2O_2$ و اکسیژن مولکولی تبدیل می‌کند. پراکسیداز و کاتالاز هر دو آنزیم‌های مهمی هستند که $H_2O_2$ زیادی را از طریق کاتالیزکردن به آب و مولکول اکسیژن تجزیه می‌کنند (Moller *et al.*, 2007). در این مطالعه تنش کادمیوم یک افزایش معنی‌دار در فعالیت‌های SOD، POD و CAT در برگ‌ها و ریشه‌های گندم ایجاد کرد (شکل‌های ۱، ۷ و ۲). این افزایش در فعالیت‌های آنزیمی ممکن است به دلیل اینترکشن مستقیم بین کادمیوم و پروتئین‌ها باشد که مانع سنتز آنزیمی و فقدان عملکرد آنزیمی شود همان‌طور که Sharma و Dietz (۲۰۰۹) پیشنهاد دادند. کاربرد بیرونی سیلیسیوم به‌طور

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

معنی‌داری فعالیت‌های SOD، POD و APX را هم در برگ‌ها و هم در ریشه‌ها کاهش داد و در حالیکه در فعالیت کاتالاز در برگ‌ها تأثیری نداشت و کاتالاز را در ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش داد. نتایج نشان داد که سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را کاهش داد که این حذف $H_2O_2$ را تسریع کرد و تجزیه گونه‌های اکسیژن فعال ناشی از تنش کادمیوم را افزایش داد. نتایج مشابهی در مطالعات قبلی در محصولات مختلف گزارش شده است که حاکی از اثرات مثبت سیلیسیوم در کاهش سمیت کادمیوم در محصولاتی از قبیل برنج، کاهو چینی، رامی است (Tang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017).

## نتیجه‌گیری

غلظت کادمیوم یکی از عوامل مهم در کاهش عملکرد گندم و ارزش تغذیه‌ای آن است. نتایج این مطالعه به خوبی نشان داد که بکارگیری سیلیسیوم در کاهش تنش ناشی از کادمیوم مؤثر است. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش غلظت کادمیوم در محیط رشد، فعالیت آنزیم‌های SOD، POD و CAT را به‌طور معنی‌داری در برگ‌ها و ریشه‌های گندم افزایش داد و بکارگیری سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری فعالیت آنزیم‌های SOD، POD و APX را هم در برگ‌ها و هم در ریشه‌ها کاهش داد در حالیکه در فعالیت کاتالاز در برگ‌ها تأثیری نداشت ولی کاتالاز را در ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش داد. با توجه به نتایج فوق به‌نظر می‌رسد بکارگیری سیلیسیوم در شرایط تنش کادمیوم خسارات ناشی از تنش اکسیداتیو در گیاه را بهبود می‌بخشد.

## منابع


Abbas, T., Rizwan, M., Ali, Sh., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J. and Ok, Y. S. (2017) Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. Ecotoxcology and Environmental Safety 140: 37-47.

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. F. and Irshad, M. K. (2015) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety 119: 186-197.

Astolfi, S., Zuchi, S., Neumann, G., Cesco, S., Sanita di Toppi, L. and Pinton, R. (2012) Response of barley plants to Fe deficiency and Cd contamination as affected by S starvation. Journal of Experimental Botany 63: 1241-1250.

Benavides, M. P., Gallego, S. M. and Tomaro, M. L. (2005) Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology 17: 21-34.

Ci, D., Jiang, D., Wollenweber, B., Dai, T., Jing, Q. and Cao, W. (2010) Cadmium stress in wheat seedlings: growth, cadmium accumulation and photosynthesis. Acta Physiologiae Plantarum 32: 365-373.

Dhindsa, R. H., Plumb–Dhindsa, P. and Thorpe, T. A. (1981) Leaf senescence correlated with increased level of membrane permeability, lipid peroxidation and decreased level of SOD and CAT. Journal Experimental Botany 32: 93-101.

Gallego, S. M., Pena, L. B., Barcia, R. A., Azpilicueta, C. E., Iannone, M. F., Rosales, E. P., Zawoznik, M. S., Groppa, M. D. and Benavides, M. P. (2012) Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight in to regulatory mechanisms. Environmental Experimental Botany 83: 33-46.

Greger, M., Kabir, A. H., Landberg, T., Maity, P. J. and Lindberg, S. (2016) Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat. Environmental Pollution 211: 90-97.

Hagege, D., Andre Nouvelot, J. B. and Gaspar, T. (1990) Malondialdehyde titration with thiobarbiturate in plant extracts: Avoidance of pigment interference. Phytochemical Analysis 1: 86-89.

Liang, Y., Wong, J. W. C. and Wei, L. (2005) Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere 58: 475-483.

Maehly, A. C. (1954) Determination of peroxidase activity. Methods of Biochemical Analysis 1: 385-386.

Mittler, R. (2002) Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in Plant Science 7: 405-410.

Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. and Van Breusegem, F. (2004) Reactive oxygen gene network of plants. Trends in Plant Science 9: 490-498.

Moller, I. M., Jensen, P. E. and Hansson, A. (2007) Oxidative modifications to cellular components in plants. Annual Review of Plant Biology 58: 459-481.


[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

Naeem, A., Ghafoor, A. and Farooq, M. (2015) Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars. Journal of Science of Food and Agriculture 95: 2467-2472.

Nakano, Y. and Asada, K. (1987) Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. Plant and Cell Physiology 28: 131-140.

Pourakbar, L. and Ashrafi, R. (2011) Effect of cadmium on hydrogen peroxide production and activity of some antioxidant enzymes in corn (*Zea mays L.*). Tarbiat Moallem University of Science 9: 484-473.

Ranieri, A., Castagna, A., Scebba, F., Careri, M., Zagnoni, I., Predieri, G., Pagliari, M. and Sanita di toppi, L. (2005) Oxidative stress and phytochelatin characterisation in bread wheat exposed to cadmium excess. Plant Physiology and Biochemistry 43: 45-54.

Rizwan, M., Ali, Sh., Abbas, T., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., Al-Wabel, M. I. and Ok, Y. S. (2016a) Cadmium minimization in wheat: A critical review. Ecotoxcology and Environmental Safety 130: 43-53.

Rizwan, M., Meunier, J. D., Davidian, J. C., Pokrovsky, O. S., Bovet, N. and Keller, C. (2016b) Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics. Environmental Science and Pollution Research 3: 1414-1427.

Sanita di toppi, L. and Gabbrielli, R. (1999) Response to cadmium in higher plants. Environmental Experimental Botany 41: 105-130.

Sarwar, N., Ishaq, W., Farid, Gh., Shaheen, M. R., Imran, M., Geng, M. and Hussain, S. (2015) Zinc–cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition. Ecotoxcology and Environmental Safety 122: 528-536.

Scebba, F., Sebastiani, L. and Vitagliano, C. (1998) Changes in activity of antioxidative enzymes in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings under cold acclimation. Physiologia Plantarum 104: 747-752.

Sharma, S. S. and Dietz, K. J. (2009) The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. Trends in Plant Science 14: 43-50.

Shi, X., Zhang, Ch., Wang, H. and Zhang, F. (2005) Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. Plant and Soil 272: 53-60.

Shi, Zh., Suqin Y., Dan, H., Zhen, Z., Li, X., Liu, Y. and Zhang, B. (2017) Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity. Environmental Science and Pollution Research 25: 7638-7646.

Soon, Y. K. and Abboud, S. (1993) Cadmium, chromium, lead and nickel. Soil Sampling and Methods of Analysis 101-108.

Su, Y., Liu, J., Lu, Z., Wang, X., Zhang, Zh. and Shi, G. (2014) Effects of iron deficiency on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in peanut roots in relation to its translocation. Environmental Experimental Botany 97: 40-48.

Tale Ahmad, S. and Haddad, R. (2011) Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding 47: 17-27.

Tang, H., Liu, Y., Gong, X., Zeng, G., Zheng, B., Wang, D., Sun, Z., Zhou, L. and Zeng, X. (2015) Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) under cadmium stress. Environmental Science and Pollution Research 22: 9999-10008.

Vaculik, M., Landberg, T., Greger, M., Luxova, M., Stolarikova, M. and Lux, A. (2012) Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize. Annals of Botany 110: 433-443.

Wang, S., Wang, F. and Gao, S. (2015) Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. Environmental Science and Pollution Research 22: 2837-2845.

Wu, F., Zhang, G., Dominy, P., Wu, H. and Bachir, D. M. L. (2007) Differences in yield components and kernel Cd accumulation in response to Cd toxicity in four barley genotypes. Chemosphere 70: 83-92.

Wu, J., Guo, J., Hu, Y. and Gong, H. (2015) Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. Frontiers in Plant Science 6: 453.

Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., Li, H., Wen, D. and Huang, Y. (2017) Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. chinensis var. utilis) under cadmium stress. Environmental and Experimental Botany 133: 1-11.

Wu, Z., Zhao, X., Sun, X., Tan, Q., Tang, Y., Nie, Z. and Hu, C. (2015) Xylem transport and gene expression play decisive roles in cadmium accumulation in shoots of two oilseed rape cultivars (*Brassica napus*). Chemosphere 119: 1217-1223.

Xin, J., Zhao, X., Tan, Q., Sun, X. and Hu, Ch. (2017) Comparison of cadmium absorption, translocation, subcellular distribution and chemical forms between two radish cultivars (*Raphanus sativus L.*). Ecotoxcology and Environmental Safety 145: 258-265.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

Zeng, F. R., Zhao, F. S., Qiu, B. Y., Ouyang, Y. N., Wu, F. B. and Zhang, G. P. (2011) Alleviation of chromium toxicity by silicon addition in rice plants. Agricultural Sciences in China 10: 1188-1196.

Zeng, L., Zhu, T., Gao, Y., Wang, Y., Ning, Ch., Bjorn, L. O., Chen, D. and Li, Sh. (2017) Effects of Ca addition on the uptake, translocation, and distribution of Cd in *Arabidopsis thaliana*. Ecotoxcology and Environmental Safety 139: 228-237.

Zhang, Ch., Wang, L., Nie, Q., Zhang, W. and Zhang, F. (2008) Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Environental Experimental Botany 62: 300-307.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]

# The effect of silicon on reducing oxidative damage caused by cadmium in wheat in hydroponic conditions

**Elham Bahrami[1] , Reza Khorassani*[1], Mehdi Taheri[2], Amir Fotovat[1]**

**[1] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.**
**[2] Zanjan Province Agricultural and Natural Resources Research Center. Zanjan, Iran.**
**(Received: 04/07/2020, Accepted: 06/10/2020)**

## Abstract

The use of silicon has been considered as an effective strategy in reduce of cd uptake and affecting the oxidative damage caused by cd toxicity. The aim of this study was to investigate the effect of the presence silicon (0.1 mM/L) and different levels of cadmium (0.10, 50 µmol/L) in wheat plants under hydroponic conditions. The results showed that increasing the concentration of cd increased the concentration of malondialdehyde (MDA) significantly and reduced MDA compared to plants treated only with cd. The results also showed that cd stress caused significant decrease in superoxide dismotase (SOD), polyphenoloxidase. (POD), and Catalase (CAT) activity in wheat leaves and roots. The results showed that the use of silicon significantly increased the activity of SOD, POD, APX enzymes in both leaves and roots, while it had no effect on CAT activity in leaves, but significantly increased catalase in roots. The results demonstrated that the use of silicon in cd stress conditions improves the damage caused by oxidative stress in the plant.

**Keywords:** Antioxidant enzymes, Silicon, Heavy metal, Pollution

Corresponding author, Email: khorasani@um.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.13.3 ]