



Investigating the Effect of Silicon on the growth and some physiological parameters of *Brassica napus* L. under arsenic and cadmium stress

Naser Karimi^{1*}, Salimeh Khademi Azam², Zahra Souri³

¹Department of Biology, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: nkarimi@razi.ac.ir

²Department of Biology, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: salimeh.khademi@yahoo.com

³Department of Biology, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: z.souri.razi.ac@gmail.com

Article type:	Abstract
Research article	Silicon, the second most abundant element in soil and earth's crust, can increase plant growth and improve various stresses, including heavy metal stress. To investigate the effect of silicon on some growth and physiological parameters of <i>Brassica napus</i> under arsenic and cadmium stress, two independent experiments were conducted as factorials in a completely randomized design with three replications. In this study, after reaching the four-leaf stage, plants were exposed to arsenic and cadmium treatments at 600 μ M and silicon at concentrations of 0, 0.5, 1, and 2 mM for 14 days. The results showed that applying cadmium and arsenic stress significantly reduced the plant growth parameters and total chlorophyll content. On the other hand, compared to the treatment containing arsenic or cadmium, the application of silicon improved the growth parameters and chlorophyll content. In addition, the application of silicon led to an increase in chlorophyll content and the activity of glutathione S-transferase enzyme in the shoot of the <i>B.napus</i> . The results indicated that the application of silicon can enhance the resistance of <i>Brassica napus</i> by improving growth parameters and boosting the antioxidant defense system, particularly under cadmium stress. Therefore, silicon can be utilized to foster growth and increase the resilience of this plant in heavy metal stress conditions, especially those involving cadmium. As a result, the use of silicon can improve crop production and strengthen plants' resistance to cadmium stress.
Article history Received:09.04.2024 Revised: 09.06.2024 Accepted:14.06.2024 Published:22.09.2024	
Keywords Antioxidant Heavy Metals Resistance Silicon	

Cite this article as:Karimi, N., Khademi Azam, S., Souri, Z. (2024). Investigating the Effect of Silicon on the growth and some physiological parameters of *Brassica napus* L. under arsenic and cadmium stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 19(3): 1-21.





فیزیولوژی محیطی گیاهی

شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۷۶۷۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۶۸۹



بررسی اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر رشد و برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه کلزا تحت تنش آرسنیک و کادمیوم (*Brassica napus L.*)

ناصر کریمی^{۱*}، سلیمه خادمی اعظم^۲، زهرا سوری^۳

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: nkarimi@razi.ac.ir
گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: salimeh.khademi@yahoo.com
گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: z.souri.razi.ac@gmail.com

نوع مقاله:	چکیده
مقاله پژوهشی	سیلیکون به عنوان دومین عنصر فراوان در خاک و پوسته زمین، می‌تواند رشد گیاهان را افزایش داده و موجب بهبود تنش‌های مختلف از جمله تنش فلزات سنگین گردد. به منظور بررسی اثر سیلیکون بر برخی پارامترهای رشد و فیزیولوژیکی گیاه کلزا تحت تنش آرسنیک و کادمیوم دو آزمایش مستقل به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. در این پژوهش گیاهان پس از رسیدن به مرحله‌ی چهار برگی به مدت ۱۴ روز تحت اثر تیمارهای آرسنیک و کادمیوم با غلظت ۶۰۰ میکرو مولار و سیلیکون با غلظت‌های صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار قرار گرفتند. اعمال تنش کادمیوم و آرسنیک به طور معنی داری پارامترهای رشد گیاه و محتوای کلروفیل کل را کاهش داد. از سوی دیگر در مقایسه با تیمار حاوی آرسنیک و یا کادمیوم، کاربرد سیلیکون باعث بهبود پارامترهای رشد و محتوای کلروفیل گردید. همچنین کاربرد سیلیکون منجر به افزایش محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم گلوکاتینون اس- ترانسفراز در بخش هوایی گیاه کلزا شد. نتایج نشان دادند که کاربرد سیلیکون می‌تواند مقاومت گیاه کلزا را از طریق بهبود فاکتورهای رشد و سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی به ویژه تحت تنش کادمیوم بهبود بخشد. بنابراین می‌توان از سیلیکون جهت بهبود رشد و افزایش مقاومت این گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین به ویژه تنش کادمیوم استفاده کرد...
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	
واژه‌های کلیدی:	
آنتی اکسیدان	
فلزات سنگین	
سیلیکون	
مقاومت	

استناد: کریمی، ناصر؛ خادمی اعظم، سلیمه؛ سوری، زهرا (۱۴۰۳). بررسی اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر رشد و برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه کلزا تحت تنش آرسنیک و کادمیوم (*Brassica napus L.*). فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۱۹(۳)، ۲۱-۱.

Doi: 10.83078/iper.2024.1106270

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان

© نویسندهگان.



مقدمه:

امروزه آلودگی خاک توسط فلزات سنگین به یک نگرانی مهم زیست محیطی در بخش کشاورزی تبدیل شده است. زمین‌های کشاورزی که به دلیل تجمع فلزات سنگین آلوده شده‌اند، فعالیت بیولوژیکی خاک، متابولیسم گیاه، تنوع زیستی و سلامت انسان‌ها و حیوانات را تحت تأثیر قرار داده و مشکلات فراوانی را به وجود آورده‌اند (Farooq et al., 2013; 2016). کادمیوم، یک فلز سنگین سمی رایج برای گیاهان است که دارای تحرک بالا و حلالیت قابل توجه در آب می‌باشد (Azam et al., 2021). از علائم سمیت کادمیوم در گیاهان می‌توان به کاهش رشد ریشه و بخش هوایی، اختلال در جذب مواد غذایی، کاهش فتوسنتز، اختلال در تثبیت دی اکسید کربن، تغییر در نفوذپذیری غشای سلول‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌ها اشاره کرد (Azam et al., 2021).

آرسنیک به‌عنوان یک شبه فلز سمی برای انسان، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌شود (Souri et al., 2015; Karimi and Souri, 2017; 2020). هنگامی که گیاهان در معرض بیش از حد آرسنیک، در خاک یا درکشت هیدروپونیک قرار می‌گیرند، علائمی مانند مهار جوانه زنی بذر و رشد گیاهچه، کاهش رشد بخش هوایی و محتوای کلروفیل، تخریب غشای کلروپلاستی، کاهش نرخ فتوسنتز، کاهش توسعه ریشه و اختلال در نمو گیاه ایجاد می‌گردد (Souri et al., 2020; Saleem et al., 2022; Khan et al., 2023).

کلزا (*Brassica napus* L.) گیاهی علفی از خانواده- ی شب بو و دارای دوره‌ی رشد یک ساله می‌باشد. مطالعات قبلی تأثیر گونه‌های براسیکا مانند *B. carinata* و *B. napus* L. در گیاه پالایی فلزات سنگین مانند کادمیوم را تایید کردند. لذا این گیاهان می‌توانند به عنوان گزینه‌های احتمالی برای استخراج گیاهی به

عنوان اصلی‌ترین تکنیک گیاه پالایی در نظر گرفته شوند (Vatehova et al., 2012; Hasanuzzaman et al., 2017).

سیلیکون به‌عنوان یک عنصر مفید می‌تواند به تحمل تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی در گیاهان کمک کند. سیلیکون مقاومت گیاهان به فلزات سنگین مانند آرسنیک و کادمیوم را از طریق برخی مکانیسم‌ها شامل کاهش جذب فلز، فعال کردن سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی و سیگنالینگ هورمونی افزایش می‌دهد (Azam et al., 2021). سیلیکون اگرچه به‌عنوان یک عنصر ضروری برای تمام گیاهان در نظر گرفته نشده اما برای رشد و توسعه‌ی بسیاری از گونه‌های گیاهی مفید می‌باشد (Souri et al., 2021). این عنصر به‌عنوان تعدیل‌کننده‌ی انواع تنش‌ها پیشنهاد شده است که سازش‌های فیزیولوژیک گیاه را در پاسخ به تنش فلزات سنگین افزایش می‌دهد (Pandey et al., 2016). از مکانیسم‌های فرضی برای نقش سیلیکون در ارتباط با کاهش تنش فلزات سنگین می‌توان به کاهش جذب فلزات سنگین، کاهش انتقال از ریشه به بخش هوایی، تحریک آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، سیگنالینگ هورمونی و تغییرات ساختاری در گیاهان اشاره کرد (Emamverdian et al., 2018; Souri et al., 2020). شواهد فراوانی وجود دارد که نشان می‌دهد زمانی که سیلیکون در اختیار گیاهان قرار می‌گیرد، نقش مؤثری در بهبود رشد، تغذیه معدنی و مقاومت در برابر تنش فلزات سنگین دارد (Azam et al., 2021). سیلیکون اثرات سمی فلزات سنگین مانند کادمیوم (Shao et al., 2017)، منگنز (Che et al., 2016)، آرسنیک (Sanglard et al., 2021; Azam et al., 2021) و مس (Mateos-Naranjo et al., 2015) در گیاهان را کاهش می‌دهد. مطالعات

قبلی نشان داد که سیلیکون از طریق کاهش جذب ریشه‌ای، کاهش انتقال از ریشه به بخش هوایی، تعدیل فتوسنتز، تسهیل جذب عناصر معدنی، بیوستتر هورمون‌های گیاهی و القای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی مقاومت گیاه به فلزات سنگین را ممکن می‌سازد (Azam et al., 2021; Saleem et al., 2022; Boorboori, 2023). با توجه به اهمیت کلزا به‌عنوان یک گیاه استراتژیک زراعی و از طرفی کاربرد سیلیکون در افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش فلزات سنگینی مانند آرسنیک و کادمیوم، هدف از انجام این پژوهش بررسی برخی از مکانیسم‌هایی است که به واسطه آن‌ها سیلیکون به گیاه کلزا کمک می‌کند تا تنش آرسنیک و یا کادمیوم را بهتر تحمل کند. لذا در این پژوهش اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر برخی پارامترهای رشد و فیزیولوژیکی گیاه کلزا تحت تنش آرسنیک و کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها:

کشت گلدانی: بذره‌های گیاه کلزا از دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه رازی تهیه گردید. سپس بذرها در گلدان‌های حاوی پرلیت و ماسه (به نسبت دو به یک) کشت داده شدند و در گلخانه‌ی گروه زیست‌شناسی دانشگاه رازی با شرایط محیطی نیمه کنترل شده شامل دمای متناوب ۱۸-۲۵ درجه سانتی‌گراد (شب و روز)، رطوبت نسبی ۴۵ درصد، تناوب نوری ۱۶ ساعت نوری و ۸ ساعت تاریکی و شدت نوری حدود ۱۵۰ میکرو مول فوتون در متر مربع رشد کردند. در ادامه بذرها بعد از جوانه زنی و تشکیل دانه رست، آن‌ها در محیط حاوی محلول غذایی هوگلند

۱۰ درصد قرار گرفتند که دارای ترکیبات: ۰/۵ میلی مولار KNO_3 ، ۰/۷۵ میلی مولار $Ca(NO_3)_2$ ، ۰/۲ میلی مولار $MgSO_4$ ، ۰/۵ میلی مولار KH_2PO_4 ، ۰/۲ میکرومولار $NaMoO_4$ ، ۱ میکرومولار $ZnSO_4$ ، ۰/۵ میکرومولار $CuSO_4$ ، ۲ میکرومولار $MnCl_2$ ، ۱۵ میکرومولار H_3BO_3 ، ۵۰ میکرومولار Fe-EDTA بود (Karimi et al., 2009). پس از رسیدن به مرحله‌ی چهار برگگی، گیاهان در گروه‌های سه گلدانی (سه تکرار) قرار گرفتند که حجم هر گلدان یک لیتر بود. سپس در این مرحله گیاهان به دو گروه مجزا تقسیم شدند. گروه اول دو بار در هفته و به مدت ۱۴ روز تحت اثر تیمارهای مختلف آرسنیک (Na_2HAsO_4) با غلظت‌های صفر و ۶۰۰ میکرومولار و سیلیکون (Na_2SiO_3) با غلظت‌های صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار قرار گرفتند. گروه دوم هم بطور مشابه دو بار در هفته و به مدت ۱۴ روز تحت اثر تیمارهای مختلف کادمیوم ($CdCl_2$) با غلظت‌های صفر و ۶۰۰ میکرومولار و سیلیکون (Na_2SiO_3) با غلظت‌های صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار قرار گرفتند. ترکیبات حاوی آرسنیک، کادمیوم و سیلیکون در غلظت‌های مورد نظر به گلدان‌های یک لیتری حاوی محلول هوگلند و به‌صورت همزمان اضافه شدند. تمامی ترکیبات و نمک‌های مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک و با درصد خلوص بیش از ۹۵ درصد تهیه گردید. دلیل انتخاب ۱۴ روز مدت تیمار، بررسی‌های قبلی نویسندگان مقاله در کارهای مشابه بر روی آرسنیک و کادمیوم (Souri et al., 2020; Azam et al., 2021) و همچنین هدف از تحقیق که بررسی پارامترهای رشد و فیزیولوژیکی در مدت مشابه بود. بعد از اتمام زمان تیمار و برداشت گیاهان، بخش هوایی و ریشه‌ای آنها جدا گردید و برای بررسی پارامترهای رشد، بیوشیمیایی و بررسی غلظت عناصر مورد استفاده قرار گرفت.

کادمیوم از محلول موجود در هر لوله‌ی آزمایش ۱۰ میلی لیتر برداشته شد و غلظت کادمیوم موجود در آن به وسیله‌ی دستگاه طیف سنج جذب اتمی (Shimadzu, 6200) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری آرسنیک نیز به ۱ میلی لیتر، از محلول رقیق شده‌ی هر یک از نمونه‌ها، به ترتیب ۵ میلی لیتر اسید کلریدریک ۱۰ درصد، یدید پتاسیم ۱۰ درصد و اسید آسکوربیک ۵ درصد اضافه گردید. غلظت آرسنیک موجود در نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه طیف سنج جذب اتمی (Shimadzu, 6200) به همراه تولید هیدرید (FIG 100) اندازه‌گیری شد. بر اساس مقدار وزن خشک استفاده شده و میزان حجم نمونه، غلظت فلزات بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک گزارش شد.

اندازه‌گیری محتوای پرولین: برای تعیین میزان پرولین بافت‌های گیاهی از روش (Bates et al., 1973) استفاده شد. به این صورت که به ۰/۵ گرم از نمونه‌های برگ ۱۰ میلی لیتر سولفوسالسیلیک اسید ۳ درصد اضافه گردید و بعد از مدت ۴۸ ساعت، محتوای لوله‌ها صاف شد و برای مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه به یک میلی لیتر از محلول صاف شده‌ی هر نمونه، ۱ میلی لیتر معرف نین هیدرین و ۱ میلی لیتر استیک اسید گلاسیال اضافه شد. لوله‌ها به مدت ۱ ساعت در بن ماری جوشان ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. پس از سرد شدن، به محتوای هر لوله ۲ میلی لیتر تولوئن افزوده شد و محتوایات لوله‌ها با احتیاط مخلوط شدند. پس از مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه از دو فاز تشکیل شده، محلول قرمز بالایی مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر، جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. بر اساس منحنی استاندارد و مقدار وزن خشک استفاده شده و میزان

اندازه‌گیری میزان کلروفیل: برای تعیین میزان کلروفیل در نمونه‌ها از روش Arnon استفاده گردید (Arnon, 1949). به این ترتیب که مقدار ۰/۱۵ گرم از بافت تر برگ هر تیمار در ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد به کمک هاون ساییده شد و سپس صاف گردید. محلول حاصل، به مدت ده دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور و در دمای چهار درجه سانتی گراد ساترفیوژ شد. پس از آن به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر، جذب محلول رویی در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر (OD 663 و OD 645) ثبت گردید. از استون ۸۰ درصد نیز به عنوان بلانک استفاده شد. میزان کلروفیل a، b و کل به کمک فرمول‌های زیر محاسبه گردید:

$$\text{Chl a (mg/g leaf)} = (12.7 \times \text{OD } 663) - (2.6 \times \text{OD } 645) \times \text{ml acetone/mg leaf}$$

$$\text{Chl b (mg/g leaf)} = (22.9 \times \text{OD } 645) - (4.68 \times \text{OD } 663) \times \text{ml acetone/mg leaf}$$

$$\text{Total Chl} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

اندازه‌گیری آرسنیک و کادمیوم: برای اندازه‌گیری غلظت آرسنیک نمونه‌های گیاهی از روش (Meharg and Jardine, 2003) و برای اندازه‌گیری غلظت کادمیوم نمونه‌ها از روش (Shah et al., 2013) استفاده شد. به این ترتیب که به ۰/۵ گرم از نمونه‌های خشک برگ هر نمونه گیاهی ۱ میلی لیتر نیتریک اسید اضافه گردید. بعد از مدت ۲۴ ساعت به محتوایات هر لوله‌ی آزمایش ۱ میلی لیتر پراکسید هیدروژن اضافه شد. لوله‌ها به مدت ۱ ساعت در داخل بن ماری جوشان ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از سرد شدن، محلول نمونه‌ها صاف و با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی لیتر رسید. برای اندازه‌گیری غلظت

حجم نمونه، غلظت پرولین بر حسب میلی گرم / گرم وزن خشک گزارش شد.

H_2O_2 با استفاده از ضریب خاموشی^۱ (EC) $mM^{-1} cm^{-1}$ ۲۸ محاسبه گردید.

اندازه‌گیری محتوای کربوهیدرات‌های محلول: برای اندازه‌گیری فندهای محلول از روش فنول-اسید سولفوریک استفاده شد (Dubois and Gilles, 1956). مطابق این روش ۰/۱ گرم از بافت خشک برگ با ۱۰ میلی لیتر آب مقطر گرم در هاون ساییده شد و با کاغذ صافی صاف گردید. به ۲ میلی لیتر از محلول حاصل، ۵۰ میکرو لیتر فنول ۸۰ درصد و سپس ۵ میلی لیتر سولفوریک اسید غلیظ اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در محیط نگهداری و پس از آن به مدت ۲۰-۱۰ دقیقه در حمام آب گرم ۲۰-۲۵ درجه سانتی-گراد قرار داده شدند. سپس جذب محلول‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر قرائت گردید و بر اساس منحنی استاندارد و مقدار وزن خشک استفاده شده و میزان حجم نمونه، غلظت محتوای کربوهیدرات‌های محلول میلی گرم بر گرم وزن خشک گزارش شد.

اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز: مقدار ۳۵۰ میکرو لیتر از بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (PH=7) را با ۲۰۰ میکرو لیتر محلول گلوکاتایون احیاء ۳/۵ میلی مولار (GSSG) ترکیب کرده و بعد از مخلوط شدن، به محلول به دست آمده ۵۰ میکرو لیتر ۱- کلرو ۲-دی نیترو بنزن ۳۰ میلی مولار (CDNB) و ۵۰ میکرو لیتر عصاره‌ی آنزیمی اضافه شد. سپس تغییرات جذب نمونه‌ها در طول موج ۳۴۰ نانومتر در مدت ۱ دقیقه ثبت گردید. میزان فعالیت ویژه آنزیم، با در نظر گرفتن ضریب خاموشی^۱ ($EC = 9.6 mM^{-1} cm^{-1}$) بر حسب واحد بر میلی گرم پروتئین محاسبه گردید (Souri et al., 2020).

اندازه‌گیری محتوای پراکسید هیدروژن: برای تعیین محتوای پراکسید هیدروژن، از روش Sergiev و همکاران (۱۹۹۷) با اندکی تغییر استفاده شد. ۰/۱۲ گرم از بافت تر برگ با ۳ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد در هاون ساییده شد و عصاره‌ی حاصل در ۱۲۰۰۰ دور، به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس ۰/۵ میلی لیتر از مایع رویی برداشته و به ۰/۵ میلی لیتر بافر فسفات ۰/۲ مولار و ۱ میلی لیتر یدید پتاسیم ۱ مولار اضافه شد. جذب مخلوط ذکر شده توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۳۹۰ نانومتر قرائت شد و در نهایت محتوی

آنالیز آماری داده‌ها: این پژوهش در شرایط گلخانه-ای، به صورت دو آزمایش فاکتوریل جداگانه (آرسنیک و سیلیکون و کادمیوم و سیلیکون) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این تحقیق با استفاده از نرم افزار آماری SPSS صورت گرفت. همچنین برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید. نمودارها نیز توسط نرم افزار Excel ترسیم شد.

نتایج:

اثر سیلیکون در حضور آرسنیک و کادمیوم بر طول و وزن تر بخش هوایی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	طول بخش هوایی
آرسنیک	۱	۰/۶۱۳ ^{**}	۰/۰۵۵ ^{NS}	۱/۰۳۷ ^{**}	۲۳۰/۸۲۶ ^{**}
سیلیکون	۳	۰/۰۴۶ ^{NS}	۰/۰۲۴ ^{NS}	۰/۰۲۷ ^{NS}	۱/۱۴۶ ^{NS}
آرسنیک × سیلیکون	۳	۰/۰۷۸ ^{NS}	۰/۰۰۸ ^{NS}	۰/۱۱۸ ^{NS}	۹/۲۷۷ [*]
خطا	۱۶				
ضریب تغییرات (%)		۲۳/۹	۲۸/۸	۲۱/۵	۱۹/۲

* و ** و *** به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ می باشد. ^{NS} نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار در سطح ۰/۰۵ است

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز واریانس اثر تیمارهای سیلیکون و کادمیوم بر محتوی کلروفیل، کاروتنوئید، طول ریشه و ساقه، وزن تر ریشه و بخش هوایی گیاه کلزا

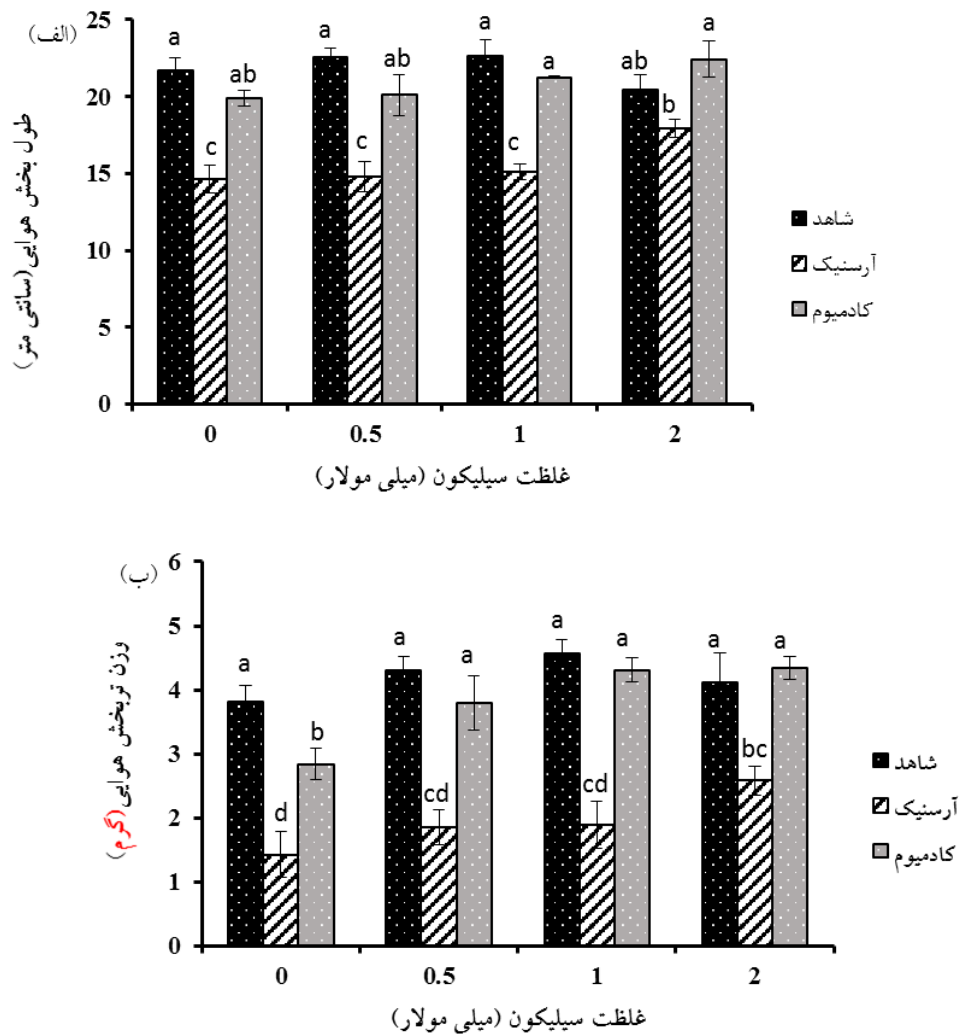
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	طول بخش هوایی
کادمیوم	۱	۰/۲۰۲ ^{NS}	۰/۰۹۲ ^{**}	۰/۵۶۷ ^{**}	۴/۸۴۲ ^{NS}
سیلیکون	۳	۰/۰۵۸ ^{NS}	۰/۰۰۸ ^{NS}	۰/۰۵۶ ^{NS}	۱/۳۶۷ ^{NS}
کادمیوم × سیلیکون	۳	۰/۰۹۷ ^{NS}	۰/۰۳۸ [*]	۰/۲۳۸ [*]	۵/۸۷۸ ^{NS}
خطا	۱۶				
ضریب تغییرات (%)		۲۰/۷	۳۱/۰	۱۹/۸	۸/۰

* و ** و *** به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ می باشد. ^{NS} نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار در سطح ۰/۰۵ است.

گردیده است. در شرایط عدم کاربرد سیلیکون، وزن تر بخش هوایی در حضور کادمیوم و آرسنیک نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی داری پیدا کرد. در شرایط عدم کاربرد سیلیکون و حضور کادمیوم، طول بخش هوایی گیاه بطور معنی داری تحت تاثیر قرار نگرفت که این امر می تواند بیانگر مقاومت نسبی گیاه در مقابله با تنش کادمیوم حتی در شرایط عدم وجود سیلیکون باشد. کاربرد سیلیکون منجر به افزایش طول و وزن تر بخش هوایی در حضور کادمیوم و آرسنیک نسبت به

در حضور کادمیوم از غلظت صفر تا ۲ میلی مولار سیلیکون طول و وزن تر بخش هوایی گیاه افزایش پیدا کرد. به طوریکه در غلظت ۲ میلی مولار سیلیکون، بیشترین افزایش این پارامترها مشاهده شد (شکل ۱). در حضور آرسنیک افزایش سطوح سیلیکون تأثیر مثبتی در میزان طول و وزن تر بخش هوایی داشته و به ویژه در غلظت ۲ میلی مولار منجر به افزایش وزن تر به میزان ۸۰/۸ درصد و افزایش طول بخش هوایی به میزان ۲۲/۵ درصد نسبت به تیمار صفر سیلیکون

تیمار عدم حضور فلز سنگین گردید. همچنین اثر مثبت سیلیکون در افزایش طول و وزن تر بخش هوایی در حضور تنش کادمیوم نسبت به آرسنیک بیشتر بوده است.

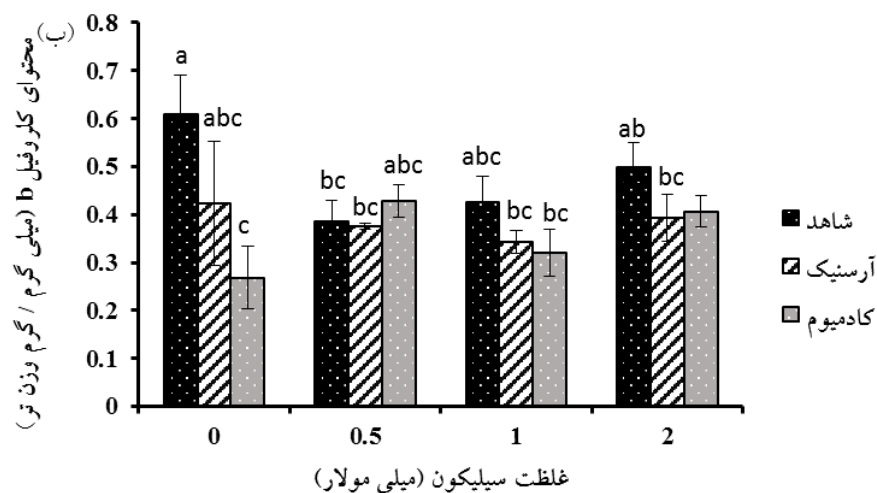
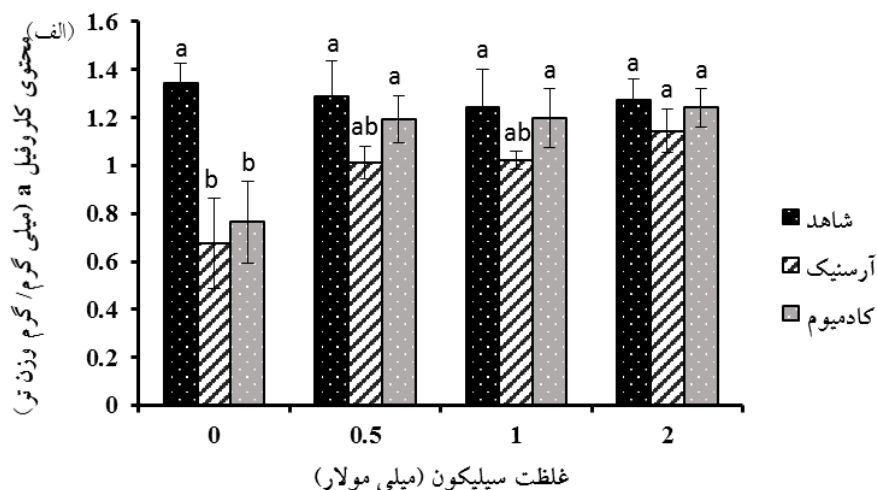


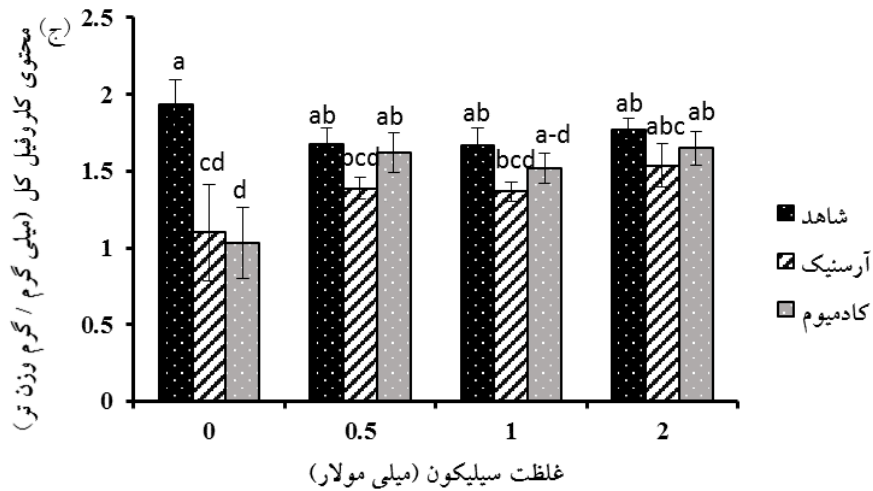
شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار)، ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بر میزان طول بخش هوایی (الف) و وزن تر بخش هوایی (ب) گیاه کلزا. حروف مشابه در هر ستون بیانگر معنی‌دار نبودن تفاوت‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

کاربرد سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک (با میانگین ۱/۰۹۹ میلی گرم بر گرم وزن تر گیاه) افزایش نشان داد. در شرایط عدم کاربرد سیلیکون نیز، محتوای کلروفیل در حضور آرسنیک و کادمیوم نسبت به تیمار عدم حضور فلز به طور معنی‌داری کاهش داشته است. در غلظت ۲ میلی مولار سیلیکون میزان کلروفیل گیاه در تیمار کادمیوم میزان بیشتری را نسبت به تیمار آرسنیک به خود اختصاص داد (شکل ۲ الف، ب، ج).

اثر سیلیکون در حضور آرسنیک و کادمیوم بر محتوای کلروفیل:

با افزایش سطوح سیلیکون محتوای کلروفیل a، b و کل در گیاه کلزا در شرایط تنش کادمیوم افزایش یافت، به‌طوری‌که بالاترین محتوای آن در غلظت ۲ میلی مولار سیلیکون مشاهده شد. محتوای کلروفیل کل در تیمار ۲ میلی مولار سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک (با میانگین ۱/۵۹۶ میلی گرم بر گرم وزن تر گیاه)، ۳۹/۷۶ درصد نسبت به شرایط عدم



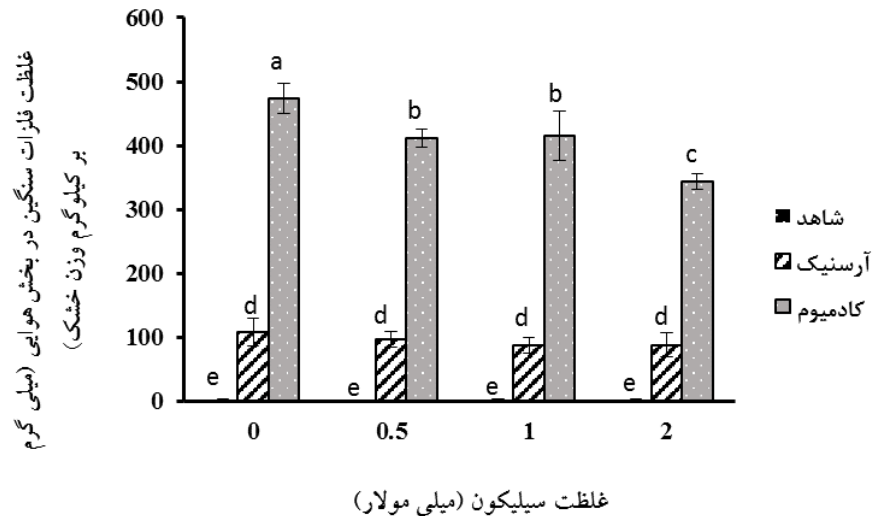


شکل ۲- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار)، ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بر محتوای کلروفیل a (الف)، کلروفیل b (ب) و کلروفیل کل (ج) کلزا. حروف مشابه در هر ستون بیانگر معنی دار نبودن تفاوت‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

در غلظت‌های مختلف تأثیر معنی داری بر کاهش میزان انباشت فلزات سنگین به ویژه آرسنیک نداشت، اما در حضور کادمیوم با افزایش غلظت سیلیکون، میزان انباشت کادمیوم بخش هوایی کاهش یافت. در تیمار ۲ میلی مولار سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم، کاربرد سیلیکون باعث کاهش ۲۷ درصدی نسبت به تیمار فاقد سیلیکون بود (شکل ۳).

اثر سیلیکون در حضور آرسنیک و کادمیوم بر میزان انباشت آرسنیک و کادمیوم بخش هوایی:

در عدم حضور سیلیکون و در سطوح تیمار ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و کادمیوم، میزان انباشت آرسنیک و کادمیوم به ترتیب ۳۳ و ۱۴۵ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش پیدا کرده که در مورد کادمیوم این افزایش به مراتب بیشتر بوده است. کاربرد سیلیکون



شکل ۳- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار)، ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بر میزان انباشت فلزات سنگین بخش هوایی گیاه کلزا. حروف مشابه در هر ستون بیانگر معنی‌دار نبودن تفاوت‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

اثر سیلیکون در حضور آرسنیک و کادمیوم بر محتوای کربوهیدرات محلول و پرولین:

جدول ۳ - نتایج حاصل از آنالیز واریانس اثر تیمارهای سیلیکون و آرسنیک بر محتوای کربوهیدرات، پروتئین، پرولین، پراکسید هیدروژن، گلوکاتایون ترانسفراز در بخش هوایی گیاه کلزا

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			ضریب تغییرات (%)
		کربوهیدرات	پرولین	پراکسید هیدروژن	
آرسنیک	۱	۷/۷۷۷***	۱۶/۵۷۵**	۱۲۸/۸۴۰***	۲۰۱۳۶۲/۷۲۲***
سیلیکون	۳	۰/۲۵۹ ^{ns}	۱/۰۳۲ ^{ns}	۱/۹۸۰ ^{ns}	۱۲۳۳۵/۰۷۶*
آرسنیک × سیلیکون	۳	۰/۶۴۴ ^{ns}	۰/۶۹۶ ^{ns}	۱/۳۹۳ ^{ns}	۷۳۳۷/۰۸ ^{ns}
خطا	۱۶				
		۳۴/۷	۳۵/۲	۵۳/۰	۷۱/۹

* و ** و *** به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ می‌باشد. ^{ns} نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است.

جدول ۴- نتایج حاصل از آنالیز واریانس اثر تیمارهای سیلیکون و کادمیوم بر محتوای کربوهیدرات، پروتئین، پرولین، پراکسید هیدروژن، گلوکاتایون ترانسفراز در بخش هوایی گیاه کلزا

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			ضریب تغییرات (%)
		کربوهیدرات	پروتئین	پرولین	
کادمیوم	۱	۲۶/۱۴۸***	۱۰/۵۰۷ ^{ns}	۹۹/۷۹۲***	۲۵۰/۸۱۵***
سیلیکون	۳	۰/۵۲۰ ^{ns}	۱۶/۹۸۴*	۱۴/۲۶۳***	۱۶/۳۷۲*
کادمیوم × سیلیکون	۳	۱/۵۴۰ ^{ns}	۴/۹۵۴ ^{ns}	۵/۲۶۱**	۶/۱۳۱ ^{ns}
خطا	۱۶				
		۴۸/۹	۵۳/۰	۴۲/۸	۷۳/۵

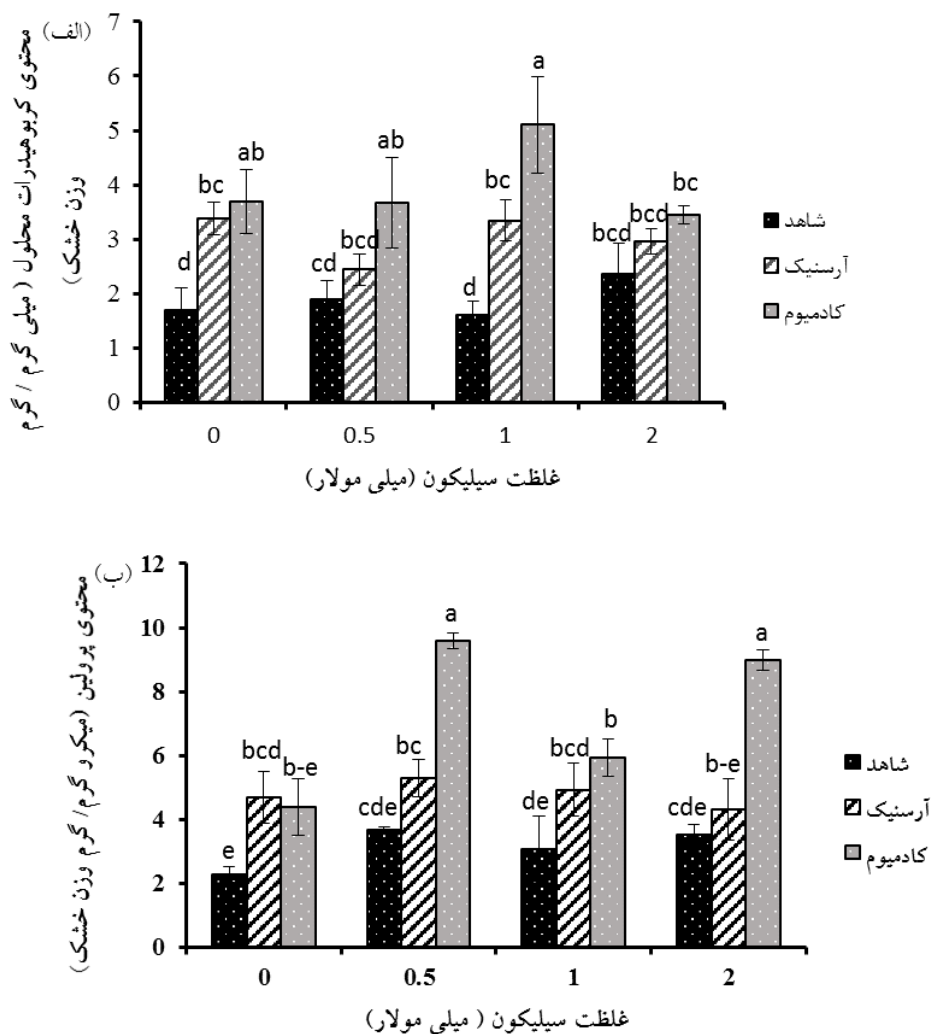
* و ** و *** به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ می‌باشد. ^{ns} نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است.

در حضور آرسنیک و کادمیوم نسبت به تیمار عدم حضور فلز افزایش داشته و این افزایش معنی‌دار بوده

با توجه به نتایج حاصل از شکل ۴-الف در شرایط عدم کاربرد سیلیکون، محتوای کربوهیدرات محلول

میکرومولار آرسنیک و کادمیوم، افزایش یافت، اگرچه افزایش پرولین تحت تنش کادمیوم به طور معنی داری بیشتر از آرسنیک بود. همچنین در حضور کادمیوم با افزایش غلظت سیلیکون، محتوای پرولین گیاه نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیکون به طور معنی داری افزایش یافت. به طوریکه بیشترین محتوای پرولین در تیمار ۰/۵ میلی مولار سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم حاصل شد (شکل ۴ ب).

است. در حضور کادمیوم با افزایش غلظت سیلیکون در سطح ۱ میلی مولار، محتوای کربوهیدرات محلول افزایش یافته به طوری که بالاترین محتوای کربوهیدرات محلول گیاه با میانگین ۵/۱ میلی گرم بر گرم وزن خشک در تیمار ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم به همراه ۱ میلی مولار سیلیکون مشاهده شد. محتوای کربوهیدرات در غلظت ۲ میلی مولار سیلیکون نسبت به تیمار قبل ۳۲/۵ درصد کاهش نشان داد. محتوای پرولین در بخش هوایی گیاه کلزا با اعمال تیمار ۶۰۰

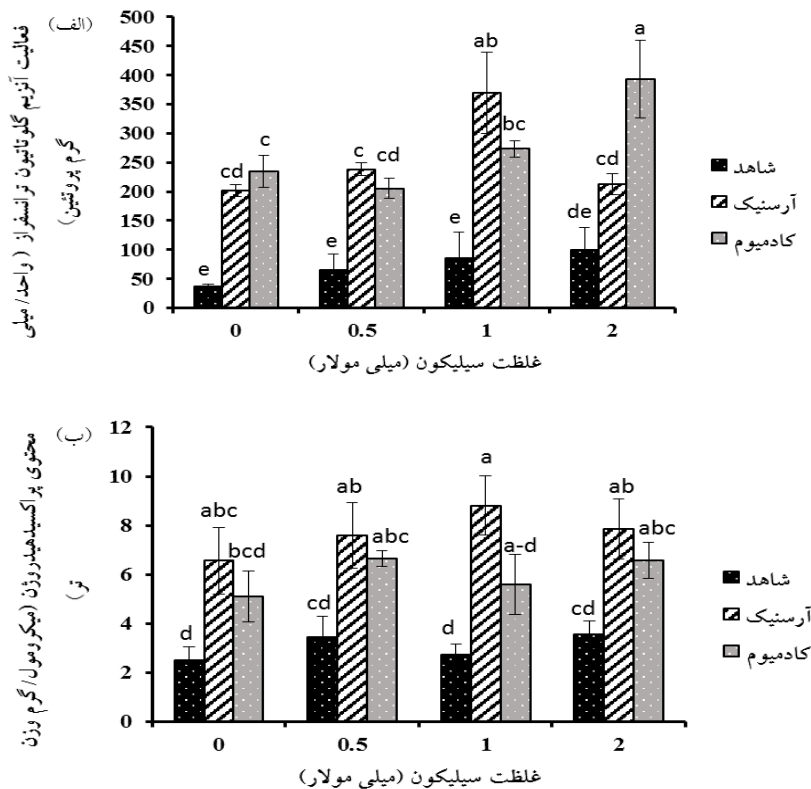


شکل ۴- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار)، ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بر محتوای کربوهیدرات محلول (الف) و پرولین (ب) بخش هوایی گیاه کلزا. حروف مشابه در هر ستون بیانگر معنی دار نبودن تفاوت‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

آرسنیک و کادمیوم نسبت به تیمار عدم حضور فلز، افزایش در میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز مشاهده شد.

اعمال تیمارهای آرسنیک و کادمیوم باعث افزایش معنی‌دار پراکسید هیدروژن در گیاه کلزا شد. همزمان با افزایش سطوح سیلیکون، محتوای پراکسید هیدروژن در بخش هوایی گیاه افزایش پیدا کرد (شکل ۵-ب). بیشترین محتوای پراکسید هیدروژن در تیمار ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۲ میلی‌مولار سیلیکون مشاهده شد که میزان پراکسید هیدروژن در حضور تنش آرسنیک نسبت به کادمیوم در گیاه بیشتر بود.

اثر سیلیکون در حضور آرسنیک و کادمیوم بر فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز و محتوای پراکسید هیدروژن بیشترین میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز متعلق به تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بوده است (شکل ۵-الف). میزان فعالیت آنزیم در حضور آرسنیک با افزایش سطوح سیلیکون تا سطح ۱ میلی‌مولار افزایش پیدا کرد، درحالی‌که فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز در غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیکون به میزان ۴۲/۳ درصد نسبت به تیمار قبل کاهش یافت. همچنین در تیمار صفر سیلیکون، درحضور



شکل ۵- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار)، ۶۰۰ میکرومولار آرسنیک و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بر محتوای گلوکاتایون ترانسفراز (الف) و پراکسید هیدروژن (ب) گیاه کلزا. حروف مشابه در هر ستون بیانگر معنی‌دار نبودن تفاوت‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

بحث:

سنگین در بخش‌های گوناگون گیاه باشد، در نتیجه غلظت فلز سنگین به صورت یون آزاد کاهش پیدا کرده و زیست توده و رشد گیاه افزایش پیدا می‌کند (Adrees et al., 2015). افزایش طول و وزن تر بخش هوایی در حضور آرسنیک و کادمیوم همسو با افزایش غلظت سیلیکون در گیاه کلزا می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت سیلیکون بر میزان فتوسنتز از طریق افزایش کلروفیل‌ها و متعاقب آن افزایش در رشد و عملکرد این گیاه باشد. افزایش در وزن تر گیاه *Brassica juncea* L. تحت تنش کروم (Ashfaque et al., 2017) و افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ها در *Isatis cappadocica* تحت تنش کادمیوم (Azam et al., 2021) با کاربرد سیلیکون گزارش شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط عدم حضور سیلیکون، محتوای کلروفیل در گیاه کلزا در حضور تنش آرسنیک و کادمیوم کاهش پیدا کرده است. فلزات سنگین به وسیله مهار آنزیم‌های گاما آمینو لوالونیک اسید دهیدروژناز و پروتوکلروفیلد ردوکتاز سبب کاهش بیوسنتز کلروفیل می‌شوند (Azam et al., 2021). از علل دیگر کاهش کلروفیل در شرایط تنش فلزات سنگین، تغییر مسیر متابولیسمی به سمت تولید پرولین است، زیرا گلوتامات به عنوان پیش‌ساز مشترک سنتز کلروفیل و پرولین در مسیر بیوسنتز پرولین به کار می‌رود (Souri et al., 2021). در نتیجه کاهش محتوای کلروفیل در گیاه کلزا می‌تواند به دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های ذکر شده باشد. از سوی دیگر افزایش میزان پرولین که در شرایط عدم حضور سیلیکون و در حضور آرسنیک و کادمیوم در این گیاه مشاهده می‌شود، تأییدی بر تغییر مسیر گلوتامات به سمت تولید بیشتر پرولین است. همچنین مشخص شده است که تنش فلزات سنگین مانند کادمیوم و آرسنیک موجب افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز و تجزیه کلروفیل در گیاهان تحت تنش می‌شود

رشد گیاهان در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین منجر به تغییر در مسیرهای متابولیسمی، تنش اکسیداتیو، و در نتیجه کاهش رشد در گیاهان می‌گردد (Imtiaz et al., 2016). مطالعات نشان داده‌اند که سیلیکون نقش اساسی را در بهبود مقاومت به تنش در گیاهان از طریق تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کلاته کردن، رسوب و تشکیل کمپلس با فلزات، کده بندی، تغییرات ساختاری در گیاهان و تنظیم ژن‌های انتقال دهنده فلزات ایفا می‌کند (Imtiaz et al., 2016). سیلیکون می‌تواند از طریق بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدان، سمیت کادمیوم را در گیاهان کاهش دهد (Azam et al., 2021).

در این تحقیق در مقایسه با گیاه شاهد، پارامترهای رشد شامل طول و وزن تر بخش هوایی در حضور آرسنیک و کادمیوم روند کاهشی داشتند. فلزات سنگین به دلیل واکنش‌پذیری و توان الکترون‌خواهی بالایی که دارند، موجب ایجاد اختلال در ساختار پروتئین، چربی، تیلاکوئید و ساختار سلولی می‌شوند که به مهار رشد گیاه منتهی می‌شود (Azam et al., 2021). از دلایل موجود برای کاهش زیست توده گیاه تحت تنش فلزات سنگین و شبه فلزاتی مانند آرسنیک می‌توان به کاهش آب سلول، کاهش کشسانی دیواره‌ی سلولی و کاهش جذب عناصر غذایی مانند کلسیم، آهن، پتاسیم و منیزیم اشاره کرد (Pandey et al., 2016). تنش اکسیداتیو و تجمع بیش از حد H_2O_2 نیز سبب عدم تعادل ردوکس سلولی و اختلال در سیگنالینگ فرآیندهایی می‌شود که در نهایت منجر به مهار رشد و آسیب سلولی خواهد شد (Liu et al., 2021; Azam et al., 2013). کاربرد سیلیکون تحت تنش فلزات از ساختار گیاه محافظت می‌کند که ممکن است به دلیل جداسازی و یا کلاته شدن فلزات

بود. یکی از دلایل انباشت بیشتر کادمیوم نسبت به آرسنیک، می‌تواند به تحرک بیشتر فلز کادمیوم در خاک برگردد که در صورت حضور در محیط ریشه به راحتی جذب گیاه شده و به اندام‌های هوایی گیاه انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است که میزان انباشت کادمیوم به گونه گیاهی نیز بستگی دارد، به نحوی که مطالعات نشان داده‌اند گیاهان خانواده شب‌بو توانایی بالایی در انباشت کادمیوم دارند (Babula et al., 2009). نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که به-کارگیری سیلیکون در محیط رشد گیاه کلزا که تحت تنش کادمیوم قرار داشت، منجر به کاهش انباشت کادمیوم در مقایسه با شرایط عدم حضور سیلیکون شد. مشخص شده است که اثر سیلیکون بر انباشت کادمیوم نیز در گیاهان مختلف متفاوت است و مرتبط با رقم، گونه خاص و تفاوت در غلظت هر دو عنصر در محلول غذایی گیاهان می‌باشد (Vaculík et al., 2009). به نظر می‌رسد که نقش سیلیکون در افزایش مقاومت در برابر تنش فلزات سنگین، به رسوب آن در دیواره سلولی ریشه‌ها، برگ‌ها و ساقه‌ها مربوط می‌شود که انتقال فلزات سنگین مانند کادمیوم در بدنه گیاه را با اختلال مواجه می‌کند. به طور خاص، رسوب آن در ریشه‌ها موجب کاهش جذب و انتقال فلزات سنگین می‌شود (Ma and Yamaji, 2008). همچنین سیلیکون می‌تواند در دیواره سلولی از طریق ایجاد کمپلکس با لیگنین، تجمع پیدا کند و اتصال فلز سنگین و انباشت آن را در آپوپلاست افزایش دهد و در نهایت انتقال یون‌ها را از ریشه‌ها به اندام‌های هوایی کاهش دهد (Emamverdian et al., 2018). همسو با این تحقیق، کاهش غلظت کادمیوم در بخش هوایی گیاهان گندم (Wu et al., 2019) و کاهش غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاهان برنج با کاربرد سیلیکون (Guntzer et al., 2012) مشاهده شده است.

(Saleem et al., 2022). در تحقیق حاضر افزایش محتوای کلروفیل همزمان با کاربرد سیلیکون در شرایط تنش آرسنیک و کادمیوم، می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت سیلیکون بر محتوای کلروفیل از طریق رسوب آن در پهنک برگ، تأثیر بر ساختار کلروپلاست و نیز افزایش مساحت سطح برگ باشد که سبب ارتقای توانایی گیاه در استفاده از نور می‌شود. همچنین سیلیکون از طریق کاهش انباشت آرسنیک و کادمیوم در بخش هوایی گیاه کلزا و تحریک سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش اثرات سمی این فلزات سنگین در تشکیل کلوفیل می‌شود و از تجزیه کلروفیل جلوگیری می‌کند (Azam et al., 2021). همچنین بر اساس مطالعات قبلی، کاربرد سیلیکون محتوای کلروفیل گیاهان برنج، لوبیا، و جو تحت تنش آلومینیوم، کروم و آرسنیک (Souri et al., 2021) و گیاه برنج تحت تنش کادمیوم را افزایش داده است (Huang et al., 2018).

مهار انباشت رنگیزه‌های فتوسنتزی در پاسخ به تنش فلز سنگین ممکن است نتیجه پراکسیداسیون غشاء کلروپلاست از طریق افزایش میزان تولید ROS از جمله H_2O_2 باشد (Souri et al., 2020)، که این مشاهدات در توافق با نتایج پژوهش ما در ارتباط با افزایش میزان H_2O_2 و به دنبال آن کاهش محتوای کلروفیل تحت تنش آرسنیک و کادمیوم (بدون حضور سیلیکون) نسبت به تیمار شاهد (عدم حضور سیلیکون، آرسنیک و کادمیوم) در گیاه کلزا می‌باشد. همچنین Ghori et al., 2019 گزارش کرده‌اند که غلظت بالای کادمیوم منجر به کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاه *Alternanthera bettzickiana* شده است، که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. در پژوهش حاضر، در شرایط عدم کاربرد سیلیکون افزایش میزان انباشت کادمیوم در گیاه کلزا بسیار بیشتر از افزایش میزان انباشت آرسنیک نسبت به تیمار شاهد

کادمیوم را با افزایش تجمع پرولین در یونجه کاهش داد (Kabir et al., 2016) که با نتایج به دست آمده از این تحقیق همخوانی دارد.

همچنین نتایج این پژوهش افزایش قندهای محلول در اثر تنش آرسنیک و کادمیوم در گیاه کلزا را نشان داد. گیاهان تحت تنش پتانسیل اسمزی را از طریق تجمع آمینواسیدها، پرولین، پروتئین و قند محلول کاهش می‌دهند. این اسمولیت‌ها فشار اسمزی سیتوپلاسم را افزایش داده و جریان آب را در اندام‌ها و بافت‌های گیاهی بالا می‌برند (Ghafiyehsanj et al., 2013)، در نتیجه افزایش محتوای قندهای محلول مکانیسمی برای حفظ شرایط اسمزی مطلوب و حفاظت از غشاء و بیومولکول‌ها در مقابل تنش اکسیداتیو فراهم می‌کند (Choudhury et al., 2010). علاوه بر این انباشت قندهای محلول در شرایط تنش، نقش‌های فیزیولوژیک مهمی را از نظر تأمین انرژی و جلوگیری از مرگ حتمی سلول ایفا می‌کند (Souri et al., 2020). همچنین افزایش اسمولیت‌ها بخصوص در سلول‌های گیاهان تحت تنش فلزات سنگین به انتقال و انباشت این ترکیبات در واکوئل منتهی می‌شود که به‌عنوان کلاته‌کننده فلز سنگین در این اندامک عمل می‌کنند و تحمل گیاه در برابر استرس را افزایش می‌دهند (Choudhury et al., 2010; Azam et al., 2021). سیلیکون در شرایط تنش فلزات سنگین، فرآیندهای متابولیک و متابولیسم را در حد مطلوب نگه داشته و با افزایش کربوهیدرات، گیاهان را از تخریب اکسیداتیو محافظت کرده و سبب بقای ساختار پروتئین نیز خواهد شد. همچنین اثر تقویت سیلیکون بر بیوستز کربوهیدرات، به ویژه قندهای محلول، به عنوان اصل اسمولیت سازگار در برخی از گیاهانی که تحت شرایط تنش قرار دارند، در نظر گرفته می‌شود (Hassanein et al., 2012). این دلایل می‌تواند افزایش محتوای قندهای محلول در تیمار

نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط تنش کادمیوم با افزایش غلظت سیلیکون (به جز غلظت ۱ میلی مولار) محتوای پرولین گیاه افزایش پیدا کرده است. تجمع پرولین در شرایط تنش، ممکن است به دلیل کاهش اکسیداسیون پرولین یا تحریک سنتز آن از گلوتامات یا افزایش فعالیت آنزیم پروتئیناز باشد، پرولین نقش محافظت‌کنندگی آنزیم‌های سیتوسولی (حفاظت از آنزیم کربوکسیلاز) و ساختار سلولی را برعهده دارد، از این‌رو در شرایط تنش در سلول انباشته می‌شود (Akbari Mogadam, 2012). افزایش محتوای پرولین در نشاء‌های برنج تحت تیمار آرسنیک نیز گزارش شده است (Choudhury et al., 2011). نقش پرولین در هنگام تنش جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها، جلوگیری از تجزیه ماکرومولکول‌ها، دخالت در حفظ استحکام دیواره سلولی و پاکسازی رادیکال‌های آزاد تولیدی تحت تنش در گیاه است. به‌نظر می‌رسد سیلیکون با افزایش پرولین این تأثیر را شدت می‌بخشد و به افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش کمک می‌کند (Azam et al., 2021). سایر مطالعات نیز نشان داده است که تیمار گیاه با سیلیکون ممکن است به طور مستقیم و یا غیر مستقیم باعث القای ژن‌های مسیر بیوستز پرولین شده و یا آن که فعالیت آنزیم‌های مسیر بیوستز آنها را افزایش داده باشد (Kauss et al., 2003). از طرفی دلیل احتمالی کاهش میزان پرولین در غلظت ۱ میلی‌مولار سیلیکون احتمالاً به دلیل سنتز آنزیم‌هایی مانند گلوکاتایون ترانسفراز می‌باشد که از گلوکاتایون به عنوان سوستر استفاده می‌کند و برای سنتز گلوکاتایون از گلوتامات استفاده می‌شود، بنابراین تشکیل پرولین از طریق مسیر گلوتامات کاهش می‌یابد که افزایش میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ترانسفراز در غلظت ۱ میلی مولار سیلیکون در حضور کادمیوم در گیاه کلزا در تأیید این نتایج بود. در مطالعه‌ی دیگری سیلیکون سمیت

کادمیوم (Shi et al., 2010) و کاهش آنزیم‌های آنتی اکسیدان در رقم حساس به منگنز در گیاه برنج (Li et al., 2012) با کاربرد سیلیکون گزارش شده است که با نتایج حاصل از این پژوهش همخوانی دارد. در این پژوهش در حضور تنش آرسنیک و کادمیوم افزایش محتوای پراکسید هیدروژن در گیاه کلزا مشاهده شد. تنش فلزات سنگین به علت افزایش تولید انواع ROS از جمله H_2O_2 منجر به تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌گردد (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013). برخی از محققین معتقدند که H_2O_2 با ایجاد تحمل در غلظت کم در سازگاری به تنش کمک می‌کند، در حالی که در غلظت بالا سبب آسیب سلولی و منجر به مرگ سلول شود (Stone and Yang, 2006). افزایش محتوای H_2O_2 در حضور سیلیکون در پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی القاء شده توسط سیلیکون و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی باشد.

نتیجه گیری نهایی:

به طور کلی در این تحقیق سمیت کادمیوم و آرسنیک (در غلظت ۶۰۰ میکرومولار) منجر به کاهش پارامتر های رشد و محتوای کلروفیل کل در گیاه کلزا گردید. از سوی دیگر کاربرد سیلیکون با کاهش انباشت کادمیوم، افزایش ترکیبات محافظ مانند پرولین، کربوهیدرات و فعالیت آنزیم گلوکاتایون اس - ترانسفراز، توانست سمیت فلزات سنگین به ویژه کادمیوم را کاهش داده و در نهایت منجر به افزایش مقاومت گیاه کلزا در مقابل تنش کادمیوم گردید.

کادمیوم و در غلظت ۱ میلی مولار سیلیکون در گیاه کلزا را توجیه کند. در تایید نتایج حاصل از این پژوهش، کاربرد سیلیکون سبب افزایش محتوای قند-های محلول در باقلای سبز (*Vicia faba* L.) (Abu-Muriefah, 2015) و افزایش محتوای قندهای محلول تحت تنش کادمیوم در برنج نیز (Verma and Dubey, 2001) شده است.

نتایج این تحقیق نشان داد که در نبود سیلیکون تنش آرسنیک و کادمیوم توانسته میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون اس - ترانسفراز را افزایش دهد. آنزیم گلوکاتایون اس - ترانسفراز می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدی غشاء و همچنین تخریب اکسیداتیو DNA را از طریق ترکیب آنها با گلوکاتایون حذف کند و می‌تواند سلول‌ها / ارگانیسم‌ها را از آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین محافظت کند (Dixit et al., 2011). افزایش فعالیت آنزیم گلوکاتایون اس - ترانسفراز در برنج تحت تنش کادمیوم مشاهده شد (Zhao et al., 2009) که همسو با نتایج حاصل از این تحقیق می‌باشد. در این مطالعه بیشترین میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون اس - ترانسفراز در تیمار ۲ میلی مولار سیلیکون و ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد. تغییرات در فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در حضور سیلیکون ممکن است ناشی از تفاوت در گونه‌های گیاهی، سن، مدت زمان تیمار و شرایط آزمایشگاهی باشد. تحریک فعالیت آنتی اکسیدان‌های آنزیمی مانند گلوکاتایون اس - ترانسفراز یکی از مکانیسم‌های مهم سیلیکون برای کاهش اثرات تنش فلزات سنگین در گیاهان است که از این طریق می‌تواند به طور موثری از سلول‌های گیاهی در برابر تنش اکسیداتیو محافظت کند و رادیکال‌های آزاد ایجاد شده را پاکسازی کند (Emamverdian et al., 2018; Hasanuzzaman et al., 2017). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان در بادام زمینی تحت سمیت

References

- Abu-Muriefah, S. S. (2015). Effects of silicon on membrane characteristics, photosynthetic pigments, antioxidative ability, and mineral element contents of faba bean (*Vicia faba* L.) plants grown under Cd and Pb stress. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*. 2(6):1-17.
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, 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.
- Akbari Mogadam, R. (2012). Dry matter partitioning and wheat varieties morphological reaction under drought conditions at different growth stages. PhD. Thesis, Zabol Agriculture University, Zabol, Iran.
- Ali, H., Khan, E. and Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*. 91(7): 869-881.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24(1): 1-15.
- Ashfaq, F., Inam, A., Iqbal, S. and Sahay, S. (2017). Response of silicon on metal accumulation, photosynthetic inhibition and oxidative stress in chromium-induced mustard (*Brassica juncea* L.). *South African Journal of Botany*. 111: 153-160.
- Azam, S. K., Karimi, N., Souri, Z. and Vaculik, M. (2021). Multiple effects of silicon on alleviation of arsenic and cadmium toxicity in hyperaccumulator *Isatis cappadocica* Desv. *Plant Physiology and Biochemistry*. 168:177-187.
- Babula, P., Ryant, P., Adam, V., Zehnalek, J., Havel, L. and Kizek, R. (2009). The role of sulphur in cadmium (II) ions detoxification demonstrated in in vitro model: *Dionaea muscipula* Ell. *Environmental Chemistry Letters*. 7: 353-361.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39: 205-207.
- Bharwana, S. A., Ali, S., Farooq, M. A., Iqbal, N., Abbas, F. and Ahmad, M. S. A. (2013). Alleviation of lead toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes suppressed lead uptake and oxidative stress in cotton. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*. 4(4): 1-11.
- Boorboori, M. R. (2023). Investigating the role of silicon in reducing the risk of arsenic, cadmium, drought and salinity stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 1-18.
- Che, J., Yamaji, N., Shao, J. F., Ma, J. F. and Shen, R. F. (2016). Silicon decreases both uptake and root-to-shoot translocation of manganese in rice. *Journal of Experimental Botany*. 67(5): 1535-1544.
- Choudhury, B., Chowdhury, S. and Biswas, A. K. (2011). Regulation of growth and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) by arsenic and its possible reversal by phosphate. *Journal of Plant Interactions*. 6(1): 15-24
- Choudhury, B., Mitra, S. and Biswas, A. K. (2010). Regulation of sugar metabolism in rice seedling under arsenate toxicity and its improvement by phosphate. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 16: 59-68.
- Dixit, P., Mukherjee, P. K., Ramachandran, V. and Eapen, S. (2011). Glutathione transferase from *Trichoderma virens* enhances cadmium tolerance without enhancing its accumulation in transgenic *Nicotiana tabacum*. *Plos One*. 6(1): 1-15.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T. and Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*. 28(3): 350-356
- Emamverdian, A., Ding, Y., Xie, Y. and Sangari, S. (2018). Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants. *BioMed Research International*. 2018: 1-10.

- Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K. and Iqbal, Z. (2013). Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 96: 242-249.
- Farooq, M. A., Detterbeck, A., Clemens, S. and Dietz, K. J. (2016). Silicon-induced reversibility of cadmium toxicity in rice. *Journal of Experimental Botany*. 67(11): 3573-3585.
- Feng, J., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Yang, F. and Xu, H. (2010). Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Scientia Horticulturae*. 123(4): 521-530.
- Ghafiyehsanj, E., Dilmaghani, K. and Hekmat Shoar, H. (2013). The effects of salicylic acid on some of biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Annals of Biological Research*. 4(6): 242-248.
- Ghori, N. H., Ghori, T., Hayat, M. Q., Imadi, S. R., Gul, A., Altay, V. and Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 16: 1807-1828.
- Guntzer, F., Keller, C. and Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 32: 201-213.
- Hassanein, R. A., Hashem, H. A. and Khalil, R. R. (2012). Stigmasterol treatment increases salt stress tolerance of faba bean plants by enhancing antioxidant systems. *Plant Osmics*. 5(5): 476-485.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I. and Fujita, M. (2017). Exogenous silicon attenuates cadmium-induced oxidative stress in *Brassica napus* L. by modulating AsA-GSH pathway and glyoxalase system. *Frontiers in Plant Science*. 8:1-9.
- Huang, F., Wen, X. H., Cai, Y. X. and Cai, K. Z. (2018). Silicon-mediated enhancement of heavy metal tolerance in rice at different growth stages. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15 (10):1-16.
- Imtiaz, M., Rizwan, M. S., Mushtaq, M. A., Ashraf, M., Shahzad, S. M., Yousaf, B. and Tu, S. (2016). Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. *Journal of Environmental Management*. 183: 521-529.
- Kabir, A. H., Hossain, M. M., Khatun, M. A., Mandal, A. and Haider, S. A. (2016). Role of silicon counteracting cadmium toxicity in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*. 7:1-12.
- Karimi, N., Ghaderian, S. M., Raab, A., Feldmann, J. and Meharg, A. A. (2009). An arsenic accumulating, hyper-tolerant brassica, *Isatis cappadocica* Desv. *New Phytologist*. 184: 41-47.
- Karimi, N. and Souri, Z. (2015). Effect of phosphorus on arsenic accumulation and detoxification in arsenic hyperaccumulator, *Isatis cappadocica*. *Journal of Plant Growth Regulation*. 34: 88-95.
- Kauss, H., Seehaus, K., Franke, R., Gilbert, S., Dietrich, R. A. and Kröger, N. (2003). Silica deposition by a strongly cationic proline rich protein from systemically resistant cucumber plants. *The Plant Journal*. 33(1): 87-95.
- Khan, E., Panthri, M., Pandey, C., Sahay, S. and Gupta, M. (2023). Silicon modulates expression of PIN genes and genotoxicity during arsenic stress in rice (*Oryza sativa*). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23: 1660-1677.
- Li, L., Zheng, C., Fu, Y., Wu, D., Yang, X. and Shen, H. (2012). Silicate-mediated alleviation of Pb toxicity in banana grown in Pb-contaminated soil. *Biological Trace Element Research*. 145: 101-108.
- Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y. and Chai, T. (2013). Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 68: 1-7.

- Ma, J. F. and Yamaji, N. (2008). Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular life Sciences*. 65: 3049-3057.
- Mateos-Naranjo, E., Galle, A., Florez-Sarasa, I., Perdomo, J. A., Galmes, J., Ribas-Carbo, M. and Flexas, J. (2015.) Assessment of the role of silicon in the Cu-tolerance of the C4 grass *Spartina densiflora*. *Journal of Plant Physiology*. 178: 74–83.
- Meharg, A. A. and Jardine, L. (2003). Arsenite transport in to paddy rice (*Oryza sativa*) roots. *New Phytologist*. 157(1): 39-44.
- Pandey, C., Khan, E., Panthri, M., Tripathi, R. D. and Gupta, M. (2016). Impact of silicon on Indian mustard (*Brassica juncea* L.) root traits by regulating growth parameters. cellular antioxidants and stress modulators under arsenic stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 104: 216-225.
- Saleem, M. H., Mfarrej, M. F. B., Alatawi, A., Mumtaz, S., Imran, M., Ashraf, M. A., Rizwan, M., Usman, K., Ahmad, P. and Ali, S. (2023) Silicon enhances morpho–physio–biochemical responses in arsenic stressed spinach (*Spinacia oleracea* L.) by minimizing its uptake. *Journal of Plant Growth Regulation*. 42(3): 2053-2072.
- Sanglard, L., Martins, S. C., Detmann, K. C., Silva, P. E., Lavinsky, A. O., Silva, M. M., Detmann, E., Araujo, W. L. and DaMatta, F. M. (2014). Silicon nutrition alleviates the negative impacts of arsenic on the photosynthetic apparatus of rice leaves: an analysis of the key limitations of photosynthesis. *Physiologia Plantarum*. 152(2): 355-366
- Sergiev, I., Alexieva, V. and Karanov, E. (1997) Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*. 51(3): 121-124.
- Shah, A., Niaz, A., Ullah, N., Rehman, A., Akhlaq, M., Zakir, M. and Suleman Khan, M. (2013). Comparative study of heavy metals in soil and selected medicinal plants. *Journal of Chemistry*. 2013:1-5.
- Shao, J. F, Che, J., Yamaji, N., Shen, R. F. And Ma, J. F. (2017). Silicon reduces cadmium accumulation by suppressing expression of transporter genes involved in cadmium uptake and translocation in rice. *Journal of Experimental Botany*. 68(20):5641-5651.
- Shi, G., Cai, Q., Liu, C. and Wu, L. (2010). Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. *Plant Growth Regulation*. 61: 45-52.
- Souri, Z., Karimi, N., Farooq, M. A. and Sandalio, L, M. (2020). Nitric oxide improves tolerance to arsenic stress in *Isatis cappadocica* Desv. Shoots by enhancing antioxidant defenses. *Chemosphere*. 239: 124523.
- Souri, Z., Karimi, N. and Sandalio, L. M. (2017). Arsenic hyperaccumulation strategies: an overview. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 5:1-8.
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N. and Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*. 40: 906-925.
- Stone, J. R. and Yang, S. (2006). Hydrogen peroxide: a signaling messenger. *Antioxidants & Redox Signaling*. 8(3-4): 243-270.
- Tripathi, P., Tripathi, R. D., Pratap, S. R., Dwivedi, S., Goutam, D., Shri, M., Trivedi, P. K. and Chakrabarty, D. (2013). Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. *Ecological Engineering*. 52: 96–103.
- Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E. and Lichtscheidl, I. (2009). Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. *Environmental and Experimental Botany*. 67(1): 52-58.
- Vatehova, Z., Kollarová, K., Zelko, I., Richterova-Kucerova, D., Bujdos, M. and Liskova, D. (2012). Interaction of silicon and cadmium in *Brassica juncea* and *Brassica napus*. *Biologia*. 67: 498-504.
- Verma, S. and Dubey, R. S. (2001). Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. *Biologia Plantarum*. 44: 117-123.

- Wu, J., Mock, H. P., Giehl, R. F., Pitann, B. and Mühling, K. H. (2019). Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants. *Journal of Hazardous Materials*. 364: 581-590.
- Zhao, F. Y., Liu, W. and Zhang, S. Y. (2009). Different responses of plant growth and antioxidant system to combination of cadmium and heat stress in transgenic and non-transgenic rice. *Journal of Integrative Plant Biology*. 51(10): 942-950