

Silicon-Mediated Mitigation of Manganese Stress in *Linum usitatissimum* L.: A Physiological and Morphological Exploration

A. Mohtadi¹  and R. Amiri Fahliyani^{2*} 

Abstract

Environmental stress in plants, particularly from heavy metal presence, poses a significant challenge to their growth. Manganese, an essential micronutrient, can become detrimental when accumulated in soil and plants. To assess the impact of silicon on *Linum usitatissimum* under manganese stress, a factorial experiment was conducted. *Linum usitatissimum* plants were grown in hydroponic culture with four different manganese levels (2, 250, 500 and 1000 μM) along with five silicon treatment levels (0, 0.5, 1, 1.5 and 2 mM). Results revealed that increasing manganese stress levels led to a rise in proline, soluble sugars content, and manganese in roots and shoots, accompanied by a decrease in other studied traits. Notably, the application of 2 mM silicon consistently yielded the highest values across all manganese levels for the examined traits. Silicon application enhanced proline and soluble sugar content in leaves, consequently increasing plant photosynthetic capacity and leading to greater dry weight in roots and shoots under various silicon levels. The use of silicon significantly ameliorated the harmful effects of manganese in *Linum usitatissimum* under manganese stress conditions. Therefore, 2 mM silicon is recommended as a beneficial solution in areas contaminated with this heavy metal, which can lead to the reduction of manganese in the roots and shoots of plants.

Keywords: Dry weight, Heavy metals, Physiological traits, Proline, Stress.

Background and Objective: Oilseeds, crucial for protein and energy, serve diverse purposes from food to industrial applications (Pramanik et al., 2023). *Linum usitatissimum* L., an annual herb, faces heavy metal toxicity affecting plant growth. Environmental pollution, including the accumulation of heavy metals and the pollution of agricultural soils, is one of the most important global issues, which, in addition to reducing the quantity and quality of agricultural products, endangers their sustainability. Manganese (Mn), essential for plants, can turn toxic in excess. Silicon (Si) has been recognized for its role in mitigating biotic and abiotic stress, including heavy metal stress (Shi et al., 2015; Imtiaz et al., 2016) and has beneficial effects on growth and development of many plants. In the Northeast and Northwest of Iran, there are rich soils of manganese and active mines of this element. Also, in the vicinity of metal smelting and refining factories, manganese pollution has been reported, and a wide range of agricultural lands adjacent to them are under the influence

1-?.

2-?.

* Corresponding author, Email: a.mohtadi@yu.ac.ir

of toxic concentrations of this element. This study aimed to externally apply silicon to *Linum usitatissimum* and observe the plant's response to manganese toxicity.

Methods: The experiment employed a factorial design with different Mn (as $MnSO_4$) and Si (as Na_2SiO_3) levels in a soilless cultivation system. Distilled water and quarter-strength Hoagland solution were used for irrigation. Mn and Si treatments were applied from the six-leaf stage for four weeks. Traits were measured post-harvest. Data were tested by analysis of variance (ANOVA) using SAS 9.1 software. All data presented are the mean values. The measurement was done with four replicates. Statistical assays were carried out by ANOVA test and means were compared by the least significant difference (LSD) test.

Results: The results showed that the interaction of Mn and Si stress significantly influenced various traits in *Linum usitatissimum*. Mn stress increased proline and soluble sugar content, while Si application enhanced this effect. Si treatment significantly reduced the Mn concentration in the root and aerial parts of the plant. Treatment with 2 mM Si demonstrated the most significant improvement in physiological and morphological traits.

Conclusions: The study highlights the positive impact of Si on plant characteristics under Mn stress. Si application proved beneficial in reducing Mn absorption and accumulation in aerial organs, offering an effective and economical solution for increased crop production in Mn-stressed environments.

References:

1. Imtiaz, M., Rizwan, M.S., Mushtaq, M.A., Ashraf, M., Shahzad, S.M., Yousaf, B., Saeed, D.A., Rizwan, M., Nawaz, M.A., Mahmood, S., Tu, S., 2016. Silicon occurrence, uptake transport and mechanism of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *J. Environ. Manage.* 183, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>.
2. Pramanik, J., Kumar, A., Prajapati, B., 2023. A review on flaxseeds: Nutritional profile, health benefits, value added products, and toxicity. *eFood* 4(5), e114. <https://doi.org/10.1002/efd2.114>.
3. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., Yu, J., 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Photochemistry* 66(13), 1551–1559. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.05.006>.

کاهش تنش منگنز در گیاه کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) با استفاده از سلیسیم: یک

بررسی فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی

سینا محمدی دوست^۱، احمد مهتدی^{۱*} و رضا امیری فهلیانی^۲

چکیده

یکی از عوامل ایجاد تنش محیطی در گیاهان، حضور فلزات سنگین در محیط کشت آن‌هاست. منگنز به‌عنوان یکی از عناصر غذایی ضروری کم‌مصرف در گیاهان شناخته می‌شود. با این حال، انباشت اضافی منگنز در خاک و گیاهان می‌تواند آثار منفی بر فعالیت‌های گیاهی داشته باشد، که به کاهش جذب عناصر غذایی و در نتیجه، کاهش محصول منجر می‌شود. در این پژوهش، تأثیر سلیسیم بر گیاه کتان روغنی تحت تنش منگنز ارزیابی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. دو عامل اصلی شامل سطوح مختلف منگنز در چهار سطح (۲، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و سلیسیم در پنج سطح (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار) بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در بالاترین سطح تنش منگنز، محتوای پرولین، قندهای محلول و غلظت منگنز در ریشه و اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد به ترتیب افزایش ۱/۵، ۴/۴، ۲/۵ و ۳/۱ برابری یافت. در هر چهار سطح منگنز، بیش‌ترین مقدار ویژگی‌های مورد بررسی از تیمار با کاربرد ۲ میلی‌مولار سلیسیم به دست آمد. استفاده از سلیسیم منجر به افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ و افزایش توان فتوسنتزی گیاه شد. این آثار باعث افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاهان تحت تیمار با سطوح مختلف سلیسیم نسبت به سطح عدم کاربرد سلیسیم گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از سطح دو میلی‌مولار محلول سلیسیم به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر در بهبود آثار مضر منگنز در گیاه کتان روغنی توصیه می‌شود. این اقدام می‌تواند منجر به کاهش میزان منگنز در ریشه و اندام هوایی گیاهان گردد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، تنش، ویژگی‌های فیزیولوژیکی، فلزات سنگین، وزن خشک.

مقدمه

مختلف صنعتی، آرایشی و بهداشتی نیز می‌رسند (Pramanik et

al., 2023). از این رو سلامت و کیفیت مواد خام و محصولات

فرآوری شده آن‌ها یکی از نگرانی‌های عمده سازمان بهداشت

دانه‌های روغنی یکی از مهم‌ترین منابع پروتئین و انرژی شناخته

می‌شوند و علاوه بر مصرف خوراکی، تولیدات آن‌ها به مصارف

۱- فیزیولوژی گیاهی، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- زراعت و اصلاح نباتات، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.mohtadi@yu.ac.ir

را نام برد. بعضی از فلزات مانند کادمیوم، سرب و کروم هیچ نقش زیستی شناخته شده‌ای ندارند، درحالی‌که مس، روی و منگنز در غلظت‌های پایین برای رشد معمولی گیاه مورد نیاز می‌باشند، اما در غلظت‌های بالا سمی هستند (Jan et al., 2019). منگنز یک عنصر ریزمغذی ضروری برای گیاهان است که در ساختار پروتئین‌ها و آنزیم‌های فتو سنتزی در فتو سیستم II و به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های آنتی اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز نقش دارد (Millaleo et al., 2010). میزان اضافی این عنصر برای گیاهان ایجاد سمیت می‌کند. سمیت منگنز باعث کاهش تولید زیست‌توده، کاهش تولیدات فتو سنتزی و افزایش تنش اکسیداتیو می‌شود (Alejandro et al., 2020). در گیاهان برای مقابله با سمیت منگنز، سازوکارهای متفاوتی مانند کلات کردن و انتقال منگنز به حجره‌های درون سلولی مانند واکوئل و همچنین باند شدن منگنز با دیواره سلولی وجود دارد. عدم وجود منگنز برای کلروپلاست خطرناک است زیرا در ساختار فتوسیستم II که الکترون‌ها را برای زنجیره انتقال الکترون فراهم می‌کند، نقش اساسی دارد (Costa et al., 2017).

یکی از راهکارهای کاهش آثار زیانبار غلظت‌های بالای فلزات سنگین از جمله منگنز، استفاده از روش‌های صحیح تغذیه معدنی گیاهان است که نقش قابل ملاحظه‌ای در افزایش عملکرد دارند. در همین ارتباط نقش برخی از عناصر مانند سیلیسیم مورد توجه برخی متخصصان تغذیه گیاهی قرار گرفته است (Parveen and Ashraf, 2010). سیلیسیم، به‌عنوان دومین عنصر فراوان در پوسته زمین و خاک وجود دارد، اما برای رشد همه گیاهان ضروری نیست و بیش‌تر گیاهان بدون آن چرخه زندگی خود را کامل می‌کنند (Epstein, 2009). سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر سودمند قادر است رشد گیاه را تحریک نماید و تنش‌های محیطی غیرزنده از قبیل تنش فلزات سنگین، تنش شوری، تنش خشکی، تنش رادیو اکتیو و تنش سرما را کاهش دهد (Imtiaz et al., 2016). این عنصر در خاک به‌دلیل ترکیب با سایر عناصر به شکل سیلیکات و یا اکسید در آمده که نامحلول بوده و گیاهان به آن دسترسی ندارند اما معمولاً در

جهانی است. یکی از گیاهان روغنی و دارویی که در سطح جهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، کتان روغنی یا بزرک می‌باشد. کتان روغنی با نام علمی *Linum usitatissimum L.* گیاهی علفی و یک‌ساله است که به تیره کتان (Linaceae) تعلق دارد (Mohammadi et al., 2019). این محصول برای تولید فیبر، الیاف، روغن و مواد مغذی استفاده می‌شود (Gandova et al., 2023). کشت و تولید کتان روغنی تحت تأثیر تنش‌های زیستی و غیر زیستی متعددی قرار می‌گیرد که از جمله این تنش‌ها می‌توان به تنش فلزات سنگین اشاره نمود.

آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی در جهان می‌باشد که علاوه بر کاهش کمیّت و سلامت محصولات کشاورزی، پایداری تولید آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ali et al., 2014; Qasemzade et al., 2021). فلزات سنگین از دو منبع طبیعی (زمین‌شناسی) و فعالیت‌های انسانی وارد خاک می‌شوند. منابع انسانی تولیدکننده فلزات سنگین شامل فعالیت‌های صنعتی و شهری، استخراج معادن و استفاده از کودهای شیمیایی و سموم هستند (Qasemzade et al., 2021). همچنین امروزه با افزایش نیاز آبی و تقاضای بیش‌تر آب به‌منظور آبیاری در بخش کشاورزی، سبب افزایش روزافزون استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه شده یا خام شهری و صنعتی در بسیاری از کشورهای جهان شده است. فلزات سنگین موجود در این‌گونه آب‌های نامتعارف، یکی از منابع آلودگی آب، خاک و گیاه به‌شمار می‌روند (Shanker et al., 2005; Rang Zan et al., 2020).

سمیت فلزات سنگین در گیاهان سبب بروز اختلالاتی در گیاه شده که در نهایت ممکن است سبب کاهش رشد گیاه گردد. تجمع عناصر سنگین در خاک، به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی، امری تدریجی بوده و غلظت عناصر می‌تواند به سطوحی برسد که امنیت غذایی بشر را تهدید نماید (Kaur and Jhanji, 2016). فلزات سنگین اساساً در خاک انباشته می‌شوند و از طریق ریشه گیاهان به زنجیره‌های غذایی انتقال می‌یابند. از جمله این فلزات می‌توان کادمیوم، سرب، کروم، منگنز و روی

محلول‌های خاک به شکل اسید مونوسیلیکات سیک (H₄SiO₄) در غلظت‌های ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌مولار وجود دارد و گیاهان عنصر را به همین شکل جذب می‌کنند (Hattori et al., 2005).

در شمال شرق و شمال غرب ایران، خاک‌های غنی از منگنز و معادن فعال این عنصر وجود دارند. هم‌چنین در مجاورت کارخانه‌های ذوب و تصفیه فلزات، آلودگی منگنز گزارش شده است که محدوده و سببی از خاک‌های مرتعی و زراعی مجاور آن‌ها تحت تأثیر غلظت‌های سمی این عنصر قرار می‌گیرد (Hashemi et al., 2010; Rang Zan et al., 2020; Qasemzade et al., 2021). تاکنون مطالعات مختلفی در دنیا درباره تأثیر سیلیسیم در کاهش جذب فلزات سنگین در گیاهان مختلف از جمله جو، برنج، ذرت، سورگوم، لوبیا، سویا و خیار انجام شده است (Sahebi et al., 2015; Imtiaz et al., 2016). اما در زمینه تأثیر سیلیسیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهان به‌ویژه گیاهان دارویی-روغنی نظیر گیاه کتان روغنی، در خاک‌های آلوده به منگنز مطالعات چندانی انجام نشده است. لذا هدف از این بررسی، کاربرد خارجی سیلیسیم بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه کتان روغنی تحت تنش سمیت منگنز بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت گلدانی در سال ۱۳۹۷ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج انجام گرفت. بذرهای کتان روغنی از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. عامل اول شامل سطوح مختلف منگنز (به صورت سولفات منگنز MnSO₄ در چهار سطح (۲، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و عامل دوم سیلیسیم (به صورت سدیم متاسیلیکات Na₂SiO₃ در پنج سطح (عدم کاربرد (صفر)، و کاربرد ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم) بود. انتخاب سطوح تیمارها براساس نتایج تحقیقات قبلی در این زمینه صورت گرفت (Shi et al., 2005; Hashemi et al., 2010;).

(Farooq et al., 2013; Ali et al., 2013). دمای اتاق رشد 20 ± 2 درجه سلسیوس در روز و دمای 15 ± 2 درجه سلسیوس در شب و تناوب نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی بود. سیستم کشت بدون خاک با پرلیت، به‌عنوان بستر بی اثر، برای مطالعه اثر سطوح مختلف تنش منگنز بر روی گیاه کتان روغنی با محلول سیلیسیم استفاده شد. واحدهای آزمایش شامل گلدان‌هایی با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر بودند. گلدان‌ها توسط پرلیت که از قبل به دقت چند بار شسته شده بودند، به نحوی پر شدند که سطح پرلیت هر گلدان تا دهانه آن ۵ سانتی‌متر فاصله داشت. بذر کتان روغنی با محلول هیپوکلریت سدیم ۵٪ به مدت پنج دقیقه ضدعفونی شده و کاشت شدند. از مرحله کاشت تا جوانه‌زنی، آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. زمانی که ۵۰ درصد بذرها سبز شدند، گلدان‌ها با یک چهارم غلظت محلول هوگلند آبیاری شدند. با رشد بیش‌تر گیاهچه‌ها، آبیاری با نصف غلظت محلول غذایی محلول هوگلند ادامه یافت. دو هفته پس از استقرار، گیاهان تنک شدند و در هر گلدان ۸ بوته نگه داشته شد. از مرحله شش برگی گیاهان به مدت چهار هفته تحت تیمار سطوح مختلف منگنز و سیلیسیم به صورت محلول قرار گرفتند.

ترکیب محلول تغییر یافته هوگلند مورد استفاده به صورت

زیر بود:

3 mM KNO₃, 2 mM Ca(NO₃)₂, 1 mM NH₄H₂PO₄, 0.5 mM MgSO₄, 25 μM Fe(Na) EDTA, 1 μM KCL, 25 μM H₃BO₃, 2 μM MnSO₄, 2 μM ZnSO₄, 0.1 mM CuSO₄, 0.1 mM (NH₄)₆ MO₇O₂₄

نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی

پس از چهار هفته اعمال تنش منگنز از هر گلدان پنج بوته انتخاب گردید و نمونه‌گیری از برگ‌های بالایی بوته‌ها انجام شد. به منظور جلوگیری از تغییر میزان پروتئین، پروتئین، کلروفیل، کاروتنوئید و قندهای محلول، نمونه‌ها تا زمان آزمایش در دمای ۴۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند.

میلی لیتر اسیدنیتریک به آن افزوده و ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار داده شد. پس از آن به مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده و پس از سرد شدن یک میلی لیتر آب اکسیژنه به آن افزوده شد و مجدد به مدت یک ساعت درون حمام آب گرم گذاشته و در نهایت حجم نمونه با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی لیتر رسانده شد. غلظت منگنز ریشه و اندام هوایی با دستگاه جذب اتمی (مدل Hitachi, Z-2000, Japan) اندازه گیری شد (Heidari Dehno and Mohtadi, 2018).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد و مقایسه میانگین‌ها برای اثرهای اصلی با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد صورت گرفت. برای ویژگی‌هایی که برهم کنش دو عامل معنی دار گردید برش‌دهی بر اساس تنش منگنز و مقایسه میانگین با رویه L.S.Means انجام شد. نمودارها نیز با کمک نرم افزار Excel رسم گردید.

نتایج

محتوای کلروفیل کل برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد برهم کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح پنج درصد بر محتوای کلروفیل کل در کتان روغنی معنی دار است (جدول ۱). با افزایش سطح تنش منگنز، محتوای کلروفیل کل برگ در کتان روغنی کاهش یافت. در هر چهار سطح تنش منگنز، بیشترین محتوای کلروفیل کل برگ (به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۶۸، ۰/۵۳ و ۰/۳۵ میلی گرم بر گرم بافت تر برگ) در تیمار ۲ میلی مولار سیلیسیم و کمترین آن نیز در تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۴، ۰/۳۷ و ۰/۲۴ میلی گرم بر گرم بافت تر برگ) مشاهده می شود (شکل ۱-الف).

محتوای نسبی آب برگ

بر اساس اطلاعات به دست آمده از جدول (۱)، اثر تنش منگنز و

برای اندازه گیری محتوای نسبی آب (RWC)، از روش (Mishra and Choudhuri, 1999) استفاده شد. مقدار محتوای نسبی آب برگ‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$(1) \quad \text{محتوای نسبی آب برگ (درصد)} = \frac{Fw - Dw}{Tw - Dw} \times 100$$

که در آن، Fw: وزن تر برگ، DW: وزن خشک برگ و TW: وزن اشباع برگ می باشند.

رنگی‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل کل با روش (Arnon, 1949) و در سه طول موج ۴۷۰، ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر محاسبه شد. محتوای پرولین برگ نمونه‌ها با استفاده از روش (Paquin and Lechasseur, 1979) اندازه گیری شد و میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر قرائت گردید. برای اندازه گیری قندهای محلول از روش (Irgoyen et al., 1992) استفاده شد و میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر قرائت گردید.

محتوای پروتئین برگ با روش (Kar and Mishra, 1976) اندازه گیری شد و میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر قرائت گردید. جهت تعیین سطح برگ در هر گلدان یک بوته را انتخاب و برگ‌های آن شمارش گردید، سپس برگ‌ها شماره گذاری و برای اندازه گیری سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج مدل WINAREA-UT-II استفاده گردید.

اندازه گیری غلظت منگنز (ریشه و اندام هوایی)

بعد از برداشت گیاهان از گلدان‌ها، برای زدودن منگنز چسبیده به ریشه از محلول ۲۰ میلی مولار Na₂EDTA استفاده شد. ریشه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در محلول مذکور قرار داده شد و سپس با آب مقطر کاملاً شسته شدند. اندام هوایی و ریشه هر گیاه در هر کدام از گلدان‌ها، جدا گردید. نمونه‌های برداشت شده به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون خشک شدند. سپس یک گرم از نمونه خشک شده توزین و ۲

جدول ۱. نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر منگنز و سیلیسیم بر کلروفیل کل، محتوای نسبی آب، سطح برگ، پرولین، قندهای محلول و پروتئین در کتان روغنی

Table 1. Analysis of variance of manganese (Mn) and silicon (Si) effects on total chlorophyll, relative water content (RWC), leaf area, proline, soluble sugars and protein of *Linum usitatissimum*.

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	کلروفیل کل Total chlorophyll	محتوای نسبی آب RWC	سطح برگ Leaf area	پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	پروتئین Protein
منگنز Mn	3	1.06**	267.71**	0.26**	1.06**	0.0001**	1.06**
سیلیسیم Si	4	0.17**	189.09**	0.03**	0.17**	0.002**	0.17**
منگنز × سیلیسیم Mn × Si	12	0.01*	23.03**	0.03 ^{ns}	0.01**	0.0003*	0.01 ^{ns}

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار، معنی داری در سطح ۵ درصد و ۱ درصد را نشان می دهد.

*: significant at p = 0.05; **: significant at p = 0.01; ns: not significant.

سطح برگ

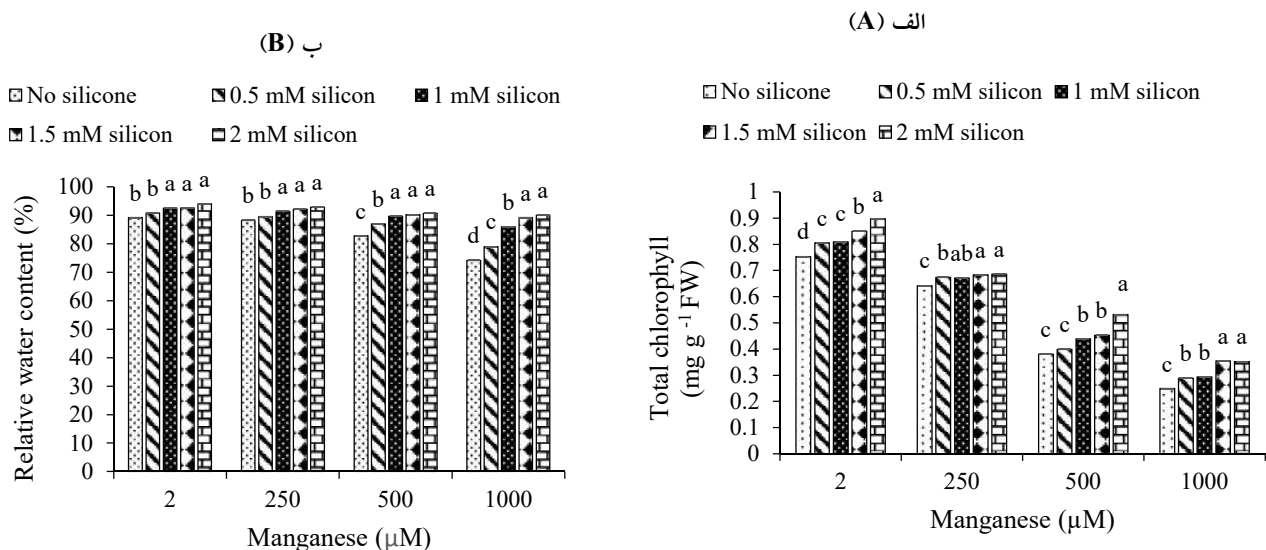
اطلاعات به دست آمده از جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) بیانگر معنی دار بودن اثر تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد و غیر معنی دار بودن برهم کنش این دو عامل بر سطح برگ کتان روغنی است. مقایسه میانگین اثر اصلی تنش منگنز (جدول ۲) حاکی از کاهش شاخص سطح برگ با افزایش شدت تنش می باشد به طوری که کم ترین میزان این صفت (۷۳۲ میلی متر مربع) از تیمار ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز و بیش ترین میزان (۱۷۱۹ میلی متر مربع)، از تیمار ۲ میکرومولار منگنز به دست آمد. مقایسه میانگین اثر اصلی سیلیسیم (جدول ۲) نشان داد بین سطوح سیلیسیم بیش ترین شاخص سطح برگ (۱۳۸۱ میلی متر مربع) از تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم به دست آمد که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها داشت و کم ترین میزان نیز (۹۵۱ میلی متر مربع) از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم به دست آمد.

محتوای پرولین برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان می دهد (جدول ۱) که برهم کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر محتوای پرولین برگ در کتان روغنی معنی دار است. مقایسه میانگین سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز نشان از افزایش محتوای

سیلیسیم و برهم کنش آن ها بر محتوای نسبی آب برگ کتان روغنی در سطح یک درصد معنی دار است. مقایسه میانگین ها نشان داد با افزایش شدت تنش منگنز از ۲ به ۱۰۰۰ میکرومولار، محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت و کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم موجب افزایش این ویژگی گردید. در سطح ۲ میکرومولار منگنز، بیش ترین محتوای نسبی آب برگ (۹۳/۹۹ درصد)، در زمان کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم و کم ترین آن از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم به دست آمد. در سطح ۲۵۰ میکرومولار منگنز نیز بیش ترین محتوای نسبی آب برگ از تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم و کم ترین آن نیز با میانگین ۸۸/۱۹ درصد از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل گردید که تفاوت معنی داری با تیمار کاربرد ۰/۵ میلی مولار سیلیسیم نشان نداد (شکل ۱-ب).

در سطح ۵۰۰ میکرومولار منگنز، تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم از بیش ترین محتوای نسبی آب برگ برخوردار بود که با تیمار عدم کاربرد سیلیسیم که از کم ترین محتوای نسبی آب برگ برخوردار بود اختلاف معنی دار ۴/۱۱ درصدی نشان داد (شکل ۱-ب). در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز نیز بیش ترین محتوای نسبی آب برگ از تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم و کم ترین آن نیز از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل گردید که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها نشان داد (شکل ۱-ب).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر محتوای کلروفیل کل (الف) و محتوای نسبی آب برگ (ب) در کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد.

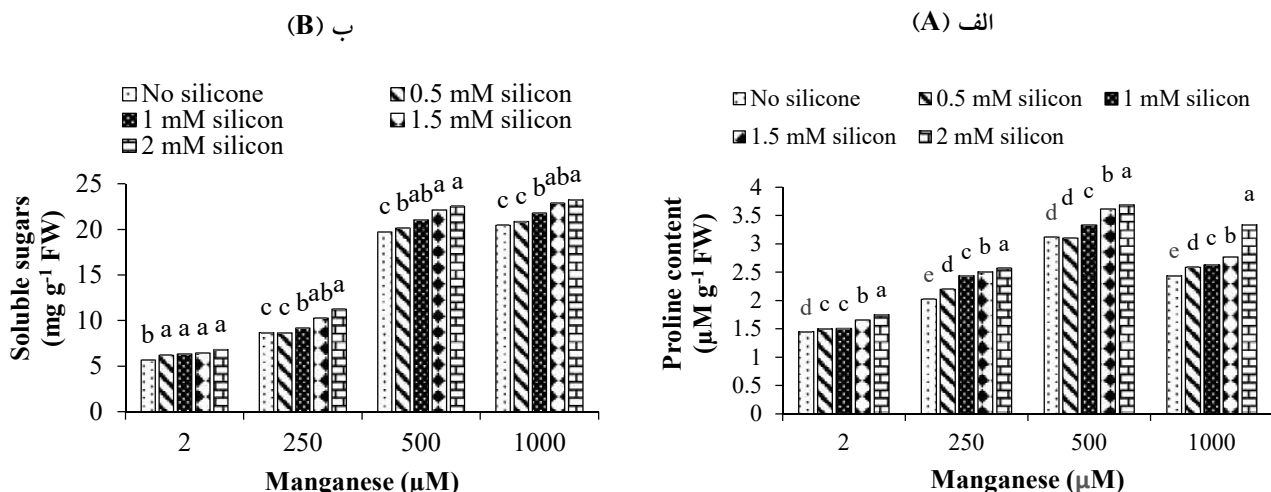
Fig. 1. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on total chlorophyll content (A) and relative water content (B) in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on L.S.Means ($P \leq 0.05$).

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر تنش منگنز و سیلیسیم بر سطح برگ، محتوای پروتئین و طول ریشه در کتان روغنی

Table 2. Mean comparison for the effect of manganese (Mn) and silicon (Si) application on leaf area, protein content and root length in *Linum usitatissimum*.

عامل‌های آزمایش	محتوای پروتئین	طول ریشه (سانتی‌متر)	
Treatment	سطح برگ (میلی‌متر مربع)	Root length (cm)	
سطوح منگنز (میکرومولار)	Leaf area (mm ²)	Protein content (mg g ⁻¹ FW)	
Mn (μM)			
2	1719 ^a	57.88 ^a	15.32 ^a
250	1411 ^b	39.03 ^b	13.21 ^b
500	841 ^c	30.32 ^c	11.34 ^c
1000	732 ^d	15.51 ^d	10.38 ^d
سطوح سیلیسیم (میلی‌مولار)			
Si (mM)			
0	951 ^e	31.82 ^e	9.99 ^d
0.5	1052 ^d	33.57 ^d	11.46 ^c
1	1215 ^c	35.52 ^c	12.07 ^c
1.5	1279 ^b	37.79 ^b	14.15 ^b
2	1381 ^a	39.73 ^a	15.16 ^a

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد می‌باشد.
 In each column and for each factor, means with at least one similar letter are not significantly different based on LSD ($P \leq 0.05$).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر محتوای پرولین (الف) و محتوای قندهای محلول (ب) در کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد.

Fig. 2. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on proline content (A) and soluble sugars content (B) in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on L.S.Means ($P \leq 0.05$).

پرولین برگ در کتان روغنی با افزایش در سطوح تنش وارد شده بر گیاه دارد. کاربرد سیلیسیم بر روند افزایشی پرولین برگ در هر چهار سطح تنش نقش مثبتی نسبت به سطح عدم کاربرد سیلیسیم نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز محتوای پرولین برگ نسبت به سطح ۵۰۰ میکرومولار منگنز کاهش یافت. در هر چهار سطح تنش منگنز بیش‌ترین محتوای پرولین برگ (به ترتیب ۱/۷۵، ۲/۵۶، ۳/۶۸ و ۳/۳۳ میکرومول بر گرم بافت‌تر برگ) در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن نیز از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (به ترتیب ۱/۴۴، ۲/۰۲، ۳/۱۰ و ۲/۴۴ میکرومول بر گرم بافت‌تر برگ) مشاهده می‌شود (شکل ۲-الف).

که با افزایش سطوح تنش منگنز، میزان قندهای محلول برگ افزایش می‌یابد و کاربرد سیلیسیم در مقایسه با شاهد (بدون کاربرد سیلیسیم) تأثیر معنی‌داری در افزایش این صفت در هر یک از سطوح تنش منگنز نشان می‌دهد (شکل ۲-ب). در سطح تیمار ۲ میکرومولار منگنز بیش‌ترین محتوای قندهای محلول برگ با میانگین ۶/۸۳ میلی‌گرم بر گرم بافت‌تر برگ از کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن با میانگین ۵/۶۵ میلی‌گرم بر گرم بافت‌تر برگ از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل گردید که با یکدیگر اختلاف ۱۷/۲۷ درصدی را نشان می‌دهند. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز بیش‌ترین محتوای قندهای محلول برگ به ترتیب با میانگین‌های ۱۱/۲۴، ۲۲/۵۲ و ۲۳/۲۵ میلی‌گرم بر گرم بافت‌تر برگ از کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن به ترتیب با میانگین‌های ۸/۶۸، ۱۹/۷۲ و ۲۰/۴۵ میلی‌گرم بر گرم بافت‌تر برگ از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل گردید که به ترتیب با یکدیگر اختلاف ۲۲/۷۷، ۱۲/۴۳ و ۱۲/۰۴ درصدی نشان می‌دهند (شکل ۲-ب).

محتوای قندهای محلول برگ

اطلاعات حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، حاکی از معنی‌داری بر هم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر محتوای قندهای محلول برگ در سطح پنج درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد

محتوای قندهای محلول برگ

اطلاعات حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، حاکی از معنی‌داری بر هم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر محتوای قندهای محلول برگ در سطح پنج درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد

جدول ۳. نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر منگنز و سیلیسیم بر غلظت منگنز ریشه و اندام هوایی، طول ریشه و اندام هوایی، و وزن خشک ریشه و اندام هوایی در کتان روغنی

Table 3. Analysis of variance of Manganese (Mn) and silicon (Si) effects on root and shoot Manganese, root and shoot length, root and shoot dry weight (DW) of *Linum usitatissimum*.

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	منگنز ریشه Root Mn	منگنز اندام هوایی Shoot Mn	طول ریشه Root length	طول اندام هوایی Shoot length	وزن خشک ریشه Root DW	وزن خشک اندام هوایی Shoot DW
منگنز Mn	3	39774.38**	39419.50**	95.46**	2219.89**	1.23**	1.23**
سیلیسیم Si	4	3440.58**	3492.31**	69.50**	194.10**	0.16**	0.16**
منگنز × سیلیسیم Mn × Si	12	112.32*	102.81*	0.01 ^{ns}	4.82*	0.004**	0.004**

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار، معنی داری در سطح ۵ درصد و ۱ درصد را نشان می دهد.

*: significant at p = 0.05; **: significant at p = 0.01; ns: not significant.

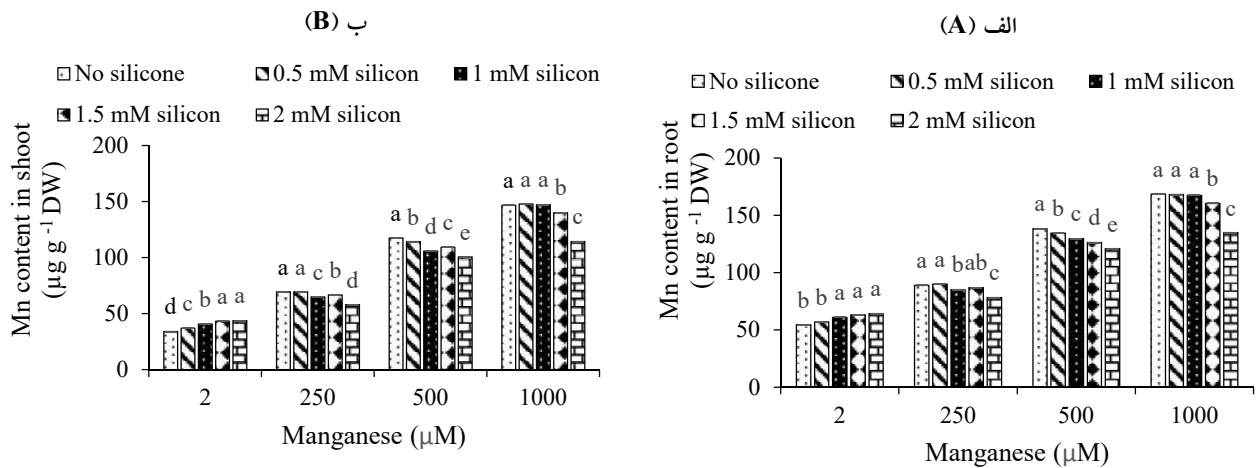
محتوای پروتئین برگ

نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از معنی داری اثر اصلی تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر محتوای پروتئین برگ دارد (جدول ۱). در بین سطوح منگنز، بیشترین محتوای پروتئین (۵۷/۸۸ میلی گرم بر گرم بافت تر برگ) از سطح ۲ میکرومولار منگنز به دست آمد که با سایر تیمارها اختلاف معنی داری را نشان می دهد و کمترین میزان این صفت در زمان کاربرد ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز (۱۵/۵۱ میلی گرم بر گرم بافت تر برگ) به دست آمد که کاهش ۷۷/۲۰ درصدی را نشان می دهد (جدول ۲). در بین سطوح سیلیسیم، کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم باعث افزایش ۱۹/۹۰ درصدی محتوای پروتئین برگ نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۲).

غلظت منگنز ریشه

بر اساس اطلاعات به دست آمده از جدول (۳)، اثر تنش منگنز و سیلیسیم و برهم کنش آن ها بر غلظت منگنز ریشه کتان روغنی در سطح پنج درصد معنی دار است. نتایج مقایسه میانگین ها (شکل ۳-الف) نشان داد با افزایش شدت تنش منگنز از ۲ به ۱۰۰۰ میکرومولار، بر غلظت منگنز ریشه افزوده شد. در سطح ۲ میکرومولار منگنز کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم موجب

افزایش این صفت گردید اما در سطوح بالاتر منگنز، با کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم از غلظت منگنز در ریشه کاسته شد. در زمان کاربرد ۲ میکرومولار منگنز، بیشترین غلظت منگنز ریشه (۶۴/۱۸ میکروگرم بر گرم) از تیمار ۲ میلی مولار سیلیسیم و کمترین آن (۵۴/۳۷ میکروگرم بر گرم) از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم به دست آمد. در زمان کاربرد ۲۵۰ میکرومولار منگنز، بیشترین غلظت منگنز از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم و کمترین آن با میانگین ۷۸/۲۵ میکروگرم بر گرم از تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم حاصل گردید که موجب کاهش ۱۳/۵۷ درصدی نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد (شکل ۳-الف). در سطح ۵۰۰ میکرومولار منگنز، تیمار عدم کاربرد سیلیسیم از بیشترین غلظت منگنز ریشه برخوردار بود که با تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم که از کمترین غلظت منگنز ریشه برخوردار بود اختلاف ۱۰/۶۳ درصدی نشان داد. در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز نیز بیشترین غلظت منگنز ریشه از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم و کمترین آن با میانگین ۱۳۴/۷۵ میکروگرم بر گرم از تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم حاصل گردید که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها نشان داد (شکل ۳-الف).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر غلظت منگنز ریشه (الف) و منگنز اندام هوایی (ب) در کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد.

Fig. 3. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on manganese (Mn) content in root (A) and Mn content in shoot (B) in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on L.S.Means ($P \leq 0.05$).

طول ریشه

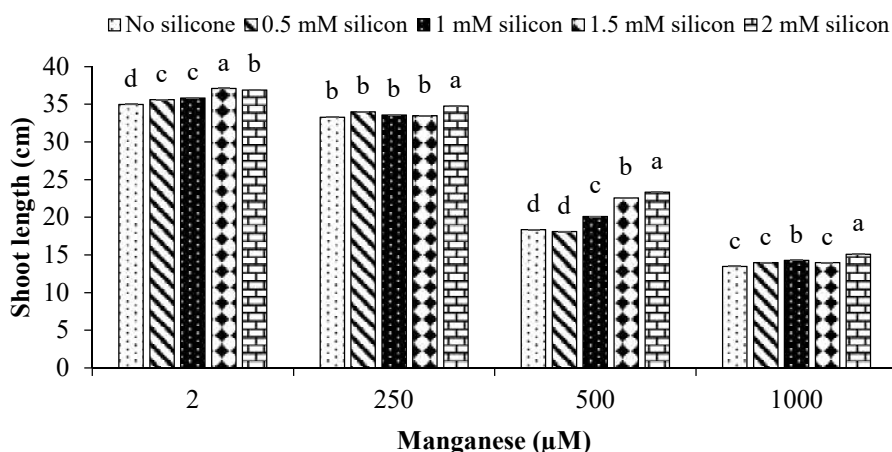
نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از معنی‌داری اثر اصلی تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر طول ریشه کتان روغنی است (جدول ۳). در مقایسه میانگین اثر اصلی تنش منگنز بیش‌ترین طول ریشه از سطح ۲ میکرومولار منگنز به‌دست آمد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری نشان داد و کم‌ترین میزان این صفت نیز در زمان کاربرد ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز به‌دست آمد که موجب کاهش ۳۲/۲۴ درصدی طول ریشه گردید (جدول ۲). در بین سطوح سیلیسیم، کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم باعث افزایش ۵۱/۷۵ درصدی طول ریشه نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۲).

طول اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۳) برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح پنج درصد بر طول اندام هوایی در کتان روغنی معنی‌دار گردید. مقایسه میانگین طول اندام هوایی در سطوح مختلف سیلیکون در هر سطح از تنش منگنز، نشان از

غلظت منگنز اندام هوایی

نتایج نشان داد که برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر غلظت منگنز اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش در سطوح تنش منگنز، میزان منگنز اندام هوایی افزایش یافت. کاربرد سیلیسیم در مقایسه با شاهد (بدون کاربرد سیلیسیم) در سطح ۲ میکرومولار منگنز تأثیر معنی‌داری در افزایش این صفت نشان داد اما در سایر سطوح منگنز موجب کاهش این صفت شد (شکل ۳-ب). در سطح ۲ میکرومولار منگنز بیش‌ترین غلظت منگنز اندام هوایی با میانگین ۴۳/۸۷ میکروگرم بر گرم از کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن با میانگین ۳۴/۱۵ میکروگرم بر گرم از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل گردید. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌مولار منگنز بیش‌ترین غلظت منگنز اندام هوایی به‌ترتیب با میانگین‌های ۶۹/۵۶، ۱۱۷/۵۶ و ۱۴۶/۶۲ میکروگرم بر گرم از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم و کم‌ترین آن به‌ترتیب با میانگین‌های ۵۸، ۱۱۴/۵۰ و ۱۰۰/۵۶ میکروگرم بر گرم از تیمار کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم حاصل گردید (شکل ۳-ب).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر طول اندام هوایی کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد.

Fig. 4. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on shoot length in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on L.S.Means ($P \leq 0.05$).

به تیمار کاربرد ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیم که از کم‌ترین وزن خشک ریشه برخوردار بود شد و بین تیمارهای عدم کاربرد سیلیسیم، کاربرد ۵/۰ و ۱ میلی‌مولار سیلیسیم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵-الف). در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار تنش منگنز، بیش‌ترین وزن خشک ریشه به ترتیب با میانگین‌های ۰/۳۴، ۰/۵۵، ۰/۲۰ گرم بر بوته در شرایط کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن نیز به ترتیب با میانگین‌های ۰/۴۸، ۰/۲۷ و ۰/۱۳ گرم بر بوته در شرایط عدم کاربرد سیلیسیم حاصل شد (شکل ۵-الف).

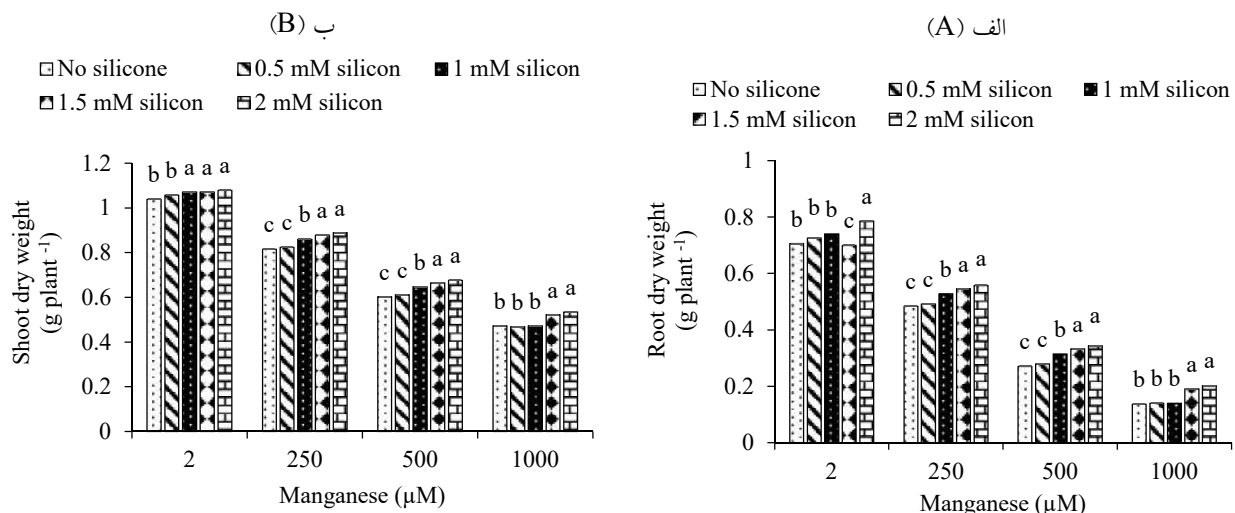
وزن خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۳) برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی کتان روغنی معنی‌دار گردید. مقایسه میانگین‌ها نشان از کاهش وزن خشک اندام هوایی کتان روغنی با افزایش تنش منگنز وارد شده بر گیاه دارد. در هر چهار سطح منگنز بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی از تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن از تیمار عدم کاربرد سیلیسیم حاصل شد (شکل ۵-ب).

کاهش طول اندام هوایی کتان روغنی با افزایش در سطوح تنش وارد شده بر گیاه دارد. در سطح ۲ میکرومولار منگنز بیش‌ترین طول اندام هوایی از تیمار ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیم حاصل شد که موجب افزایش ۶/۰۳ درصدی طول اندام هوایی نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز بیش‌ترین طول اندام هوایی (به ترتیب ۳۴/۷۳، ۲۳/۳۳ و ۱۵/۰۷ سانتی‌متر) در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن نیز در تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (به ترتیب ۳۳/۲۸، ۱۸/۳۶ و ۱۳/۴۶ سانتی‌متر) مشاهده شد (شکل ۴).

وزن خشک ریشه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان از معنی‌داری برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر وزن خشک ریشه کتان روغنی در سطح یک درصد دارد (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش سطوح تنش منگنز، از وزن خشک ریشه کتان روغنی کاسته شد اما کاربرد سیلیسیم موجب افزایش وزن خشک ریشه نسبت به سطح عدم کاربرد سیلیسیم شد. در سطح ۲ میکرومولار منگنز، کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم موجب افزایش ۱۳/۰۴ درصدی وزن خشک ریشه کتان روغنی نسبت



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر وزن خشک ریشه (الف) و بر وزن خشک اندام هوایی (ب) در کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد.

Fig. 5. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on root dry weight (A) and shoot dry weight (B) in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on L.S.Means ($P \leq 0.05$).

رنگیزه‌ها نسبت داد (Rezai and Farboodnia, 2008). هم‌چنین، تنش منگنز با افزایش میزان گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان موجب کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژن به عنوان عامل مخرب رنگدانه‌ها و دیگر ماکرومولکول‌های زیستی در گیاهان عمل می‌کنند (Yang et al., 2008). با مطالعه گیاه شاهی، مشخص شد که کاربرد سطوح بالای منگنز موجب کاهش محتوای کلروفیل a, b و کل گرید (Hashemi et al., 2010).

سیلیسیم باعث افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود. با توجه به این‌که قسمت اعظم کلروفیل برگ در کلروپلاست قرار دارد، سیلیسیم با حفظ انسجام کلروپلاست‌ها و به‌خصوص گرانا، باعث حفظ کلروفیل در آن‌ها می‌شود. سیلیسیم با افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش اکسیداسیون در غشای تیلاکوئیدی شده و در نتیجه باعث افزایش کلروفیل a و b می‌شود (Ahmad et al., 2007).

سیلیسیم با افزایش جذب نیتروژن که یک عنصر ضروری در تشکیل مولکول‌های کلروفیل است باعث افزایش میزان

بحث

فتوسنتز یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فعالیت فیزیولوژیک گیاه است که وابسته به محتوای کلروفیل در گیاه می‌باشد. کلروفیل‌ها از جمله عمده‌ترین ماکرومولکول‌ها هستند که در تنش‌های محیطی از جمله فلزات سنگین، آسیب می‌بینند. عناصر سنگین با تأثیر بر میزان فتوسنتز و کاهش میزان کلروفیل در گیاه باعث کاهش عملکرد گیاه شده و آثار منفی و مخربی را در گیاه بجای می‌گذارند (Ghori et al., 2019).

مقدار کلروفیل کل در گیاه، تحت تأثیر سمیت منگنز کاهش می‌یابد. اولین نشانه واضح سمیت منگنز در گیاهان کلروز برگ‌ها است. هم‌چنین غلظت‌های بالای منگنز در بافت برگ به‌طور غیرمستقیم از طریق اختلال در فرآیند متابولیک گیاه بر روی محتوای کلروفیل تأثیر می‌گذارد (Millaleo et al., 2010). کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان تحت تنش منگنز را می‌توان به اثر بازدارندگی این فلز سنگین بر جذب منیزیم، کلسیم و آهن در اثر تجمع منگنز در بافت‌های گیاهی و هم‌چنین مهار آنزیم‌های گروه سولفیدریل دخیل در مسیر بیوسنتز

کلروفیل a و b می‌شود (Watanabe et al., 2001). اثر مثبت سیلیسیم بر میزان کلروفیل، جلوگیری از آسیب فراساخت کلروپلاست‌ها در شرایط تنش است (Liang et al., 2007). کاهش کلروفیل کل در اثر تنش گیاه رز و جبران و افزایش کلروفیل در اثر مصرف سیلیکات کلسیم نیز گزارش شده است (Locarno et al., 2011).

محتوای نسبی آب برگ، یکی از ویژگی‌های مؤثر در تداوم رشد گیاهان تحت شرایط تنش است و مقدار بیش‌تر آن می‌تواند عامل استمرار رشد در شرایط تنش باشد. بنابراین چنانچه محتوای نسبی آب برگ زیاد باشد، گیاه آماس سلولی خود را حفظ کرده و رشد آن تداوم می‌یابد. فلزات سنگین باعث کاهش شدید آب در ساقه‌ها از طریق محدود کردن حرکت آب از ریشه‌ها به بخش‌های هوایی در گیاهان می‌شوند (Sathish et al., 2015). آثار سمی فلزات سنگین بر عملکرد روزه‌ها، حرکت آب از طریق آپوپلاست و سیمپلاست و جذب آب مشاهده شده است (Barceló and Poschenrieder, 1990). در گیاه شاهی مشخص شده است با افزایش منگنز محتوای نسبی آب بافت کاهش می‌یابد. در سلول‌های برگ سمیت فلزات سنگین می‌تواند نفوذپذیری غشا پلاسمایی را تحت تأثیر قرار دهد که سبب کاهش محتوای آب بافت می‌شود. به‌ویژه در مورد غلظت بالای منگنز که تأثیر آن در برهم‌کنش با تعادل آبی گزارش شده است (Hashemi et al., 2010). رسوب کریستال‌های سیلیکات در سلول‌های اپیدرم سبب استحکام برگ‌ها و کاهش از دست رفتن آب از طریق کوتیکول می‌شود، در نتیجه سیلیسیم می‌تواند در شرایط تنش که رشد گیاه تحت تأثیر کاهش آب سلول قرار می‌گیرد، مفید باشد (Liang et al., 2007).

مقادیر زیاد منگنز در خاک می‌تواند به‌شدت برای گیاهان سمی باشد و باعث کاهش سطح برگ شود. زمانی که گیاهان تحت تنش فلزات سنگین قرار می‌گیرند در ثانیه‌ها یا دقیق اولیه، سلول‌ها آب خود را از دست داده و چروکیده می‌شوند. این امر سبب کاهش سرعت رشد برگ شده و سطح برگ

کاهش می‌یابد (Sathish et al., 2015). سیلیسیم در متابولیسم دیواره سلولی و گسترش و بزرگ شدن سلول نقش دارد و با افزایش کشیدگی سلول‌های برگ و افزایش انتقال آب به سلول‌های برگ، زمینه را برای گسترش سطح برگ فراهم می‌کند. این عنصر با افزایش کارایی مصرف آب و بهبود محتوای نسبی آب برگ باعث افزایش فشار تورژسانس و افزایش اندازه برگ می‌شود (Ma and Yamaji, 2006). در تحقیق حاضر نیز به‌نظر می‌رسد با توجه به این که سیلیسیم موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ شده است، در نتیجه به‌دنبال آن سطح برگ نیز افزایش یافته است.

پرولین آزاد اغلب به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی در نظر گرفته می‌شود و یک آمینو اسید با بیش‌ترین قابلیت حل شدن در آب می‌باشد که ممکن است آبیگری سلول‌های گیاهی و بافت‌ها را بهبود بخشد و مانع از دست رفتن آب برگ‌ها تحت شرایط تنش فلزات سنگین شود (Zengin and Kirbag, 2007). تولید پرولین یکی از سازوکارهای مهم سمیت‌زدایی فلزات سنگین سمی در بیش‌تر گیاهان است. تجمع پرولین در گیاهچه‌های قرار گرفته در معرض تنش فلزات سنگین از جمله منگنز موجب کاهش آسیب به غشاء و پروتئین‌ها می‌شود. زمانی که گیاهان در معرض تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرند، میزان پرولین آن‌ها افزایش می‌یابد تا ساختارهای سلولی و آنزیمی را در برابر فاکتورهای تنش‌زا حفاظت نماید (Ábrahám et al., 2003). تجمع پرولین در گیاهان تحت تنش با کاهش خسارت در غشای سلولی و پروتئین‌ها همراه می‌باشد، که می‌تواند ناشی از ممانعت پرولین از پراکسیداسیون لیپیدها و فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن باشد. سیلیسیم از طریق افزایش محتوای آب نسبی برگ و جذب نیتروژن و در نتیجه تأمین کربن مورد نیاز برای ساخت پرولین، باعث افزایش میزان پرولین گیاه می‌شود (Marschner, 2012).

با کاهش انتقال آب به برگ‌ها به دنبال تجمع منگنز در سلول‌ها، محتوای قندهای محلول در گیاه افزایش می‌یابد. این پدیده احتمالاً مکانیسم سازشی گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی در شرایط سمیت با منگنز است. از عوامل دیگر افزایش قندهای

محلول می‌توان به افزایش آنزیم‌های تجزیه‌کننده قندهای غیرمحلول مانند سلولوز و همچنین کاهش مصرف قندهای محلول در نتیجه کاهش فرآیندهای آنابولیکی در شرایط تنش، اشاره کرد (Aghili et al., 2009). نتایج حاصل از پژوهشی در اندازه‌گیری میزان قندهای محلول گیاه شاهی نشان داد که افزایش غلظت منگنز در محیط کشت باعث افزایش میزان قندهای محلول ریشه و اندام هوایی در تمام تیمارها می‌شود. این افزایش در غلظت‌های ۵۰۰ و ۸۰۰ میلی‌مولار منگنز در اندام‌های هوایی بیش‌تر بوده و به ترتیب ۴/۲۳ و ۵/۳۸ برابر مقدار آن در شاهد بود (Hashemi et al., 2010). به نظر می‌رسد گیاه کتان روغنی تا حدودی توانسته با افزایش میزان قندهای محلول در شرایط تنش منگنز، سبب تنظیم اسمزی شود. افزایش میزان قندهای محلول نقش مهمی در بهبود وضعیت آب برگ در القای تحمل به تنش ایفا می‌کند (Ali et al., 2014). سیلیسیم با افزایش کربوهیدرات‌ها در شرایط تنش، گیاهان را از تخریب اکسیداتیو محافظت نموده و باعث بقای ساختار پروتئین‌ها می‌شود (Verma and Dubey, 2001).

غلظت پروتئین‌های محلول در اثر تنش فلزات سنگین به علت افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین‌ها، کاهش سنتز پروتئین، و تجمع آمینواسید پرولین، کاهش می‌یابد. در شرایط تنش، پروتئین‌های استرومای کلروپلاست به‌ویژه آنزیم رویسکو به‌وسیله رادیکال‌های فعال اکسیژن به‌صورت غیرآنزیمی تخریب می‌شوند. نشان داده شده که در برگ‌های گندم در شرایط تنش منگنز بین میزان کاهش پروتئین و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین رابطه مستقیمی وجود دارد (Aghili et al., 2009). رادیکال‌های آزاد تولید شده طی تنش به‌علت میل ترکیبی زیادی که با پروتئین‌ها و لیپیدها دارند، باعث تخریب غشاء سلولی، اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌های سلول‌ها می‌شوند. کاهش در میزان پروتئین تحت تنش منگنز در شاهی گزارش شده است (Hashemi et al., 2010). تیمار سیلیسیم سبب افزایش لیگنین، سلولز و پروتئین می‌شود. در پژوهش حاضر در شرایط کاربرد سیلیسیم، محتوای پروتئین محلول برگ

به نسبت عدم کاربرد افزایش پیدا کرده است.

پتانسیل سمیت فلزات سنگین در محیط، بستگی به غلظت آن‌ها در محلول خاک دارد. هرچه غلظت فلز در فاز محلول بیش‌تر باشد جذب آن توسط گیاه بیش‌تر خواهد بود. تجمع منگنز به میزان زیاد در ریشه‌ها می‌تواند یک نکته مثبت تلقی شود چون این امر احتمالاً مانعی برای انتقال بیش‌تر آن به اندام‌های هوایی و بخش‌هایی از گیاه است که استفاده غذایی دارد. به احتمال زیاد یکی از مهم‌ترین دلایل تجمع بیش‌تر منگنز در ریشه گیاهان مورد بررسی در این پژوهش در مقایسه با اندام هوایی کتان روغنی، ورود این عنصر در فضای آپوپلاستی ریشه است که به‌راحتی به‌همراه محلول غذایی و بدون مواجه شدن با سد حلقه کاسپاری تا نزدیکی لایه آندودرم در عمق بافت ریشه نفوذ می‌کند و با شستشوی سطحی نیز برطرف نمی‌شود.

در بیش‌تر گیاهان میزان انباشت فلزات سنگین در ریشه بیش‌تر از اندام‌های هوایی است. برخی از پژوهشگران معتقدند که به دلیل سمیت غلظت بالای منگنز برای سیتوسول در فرم آزاد، سلول‌های گیاهی تلاش می‌کنند با استفاده از راهکارهایی نظیر اتصال آن به دیواره سلولی، ذخیره نمودن در واکوئل و کلاته نمودن توسط فیتوکلاتین، این عنصر را در ریشه تثبیت نموده و بدین شکل از سمیت آن بکاهند. در پژوهشی در گیاه شاهی مشخص شد در مقادیر کم منگنز میزان این عنصر در ریشه بیش‌تر از اندام‌های هوایی بود. اما با بیش‌تر شدن میزان این عنصر در محیط، مقدار بیش‌تری از منگنز به اندام‌های هوایی انتقال یافته و میزان بیش‌تری از این عنصر در بخش‌های فوقانی گیاهچه‌های شاهی تجمع یافت که حکایت از عدم توانایی گیاهچه‌های شاهی در ممانعت از انتقال به اندام‌های فوقانی داشت (Hashemi et al., 2010).

سیلیسیم موجب افزایش تحمل گیاه خیار به تنش منگنز گردید که این نتیجه ناشی از اتصال قوی منگنز به دیواره سلولی و کاهش در مقدار منگنز سیمپلاستی می‌باشد. همچنین سیلیسیم از طریق تشکیل کمپلکس با آلومینیوم در محیط و یا در ریشه باعث مهار نفوذ این فلز در غلظت بالا به گیاه می‌گردد (Mishra

et al., 2006). در پژوهش حاضر به نظر می‌رسد در سطح ۲ میکرومولار منگنز که اثر سمی بر گیاه نداشته و احتمالاً گیاه به منگنز نیاز داشته است، سیلیسیم موجب افزایش آن گردیده است اما با افزایش غلظت منگنز و آثار سمی که بر گیاه داشته است، سیلیسیم موجب کاهش آن در گیاه شده است.

بیان شده که حضور فلزات سنگین در خاک بر خواص رویشی گیاهان آثار منفی می‌گذارد و در اثر وجود منگنز اتساع سلولی از بین می‌رود که نتیجه آن کاهش رشد شاخساره گیاهان است. گزارش شده که به علت وجود فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه، در سوخت‌وساز سلول‌های این بخش اختلال ایجاد شده و به همین علت، ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد (Shanker et al., 2005). بر اساس پژوهشی، سیلیسیم باعث افزایش رشد رویشی و افزایش تولید ماده خشک در گیاه برنج شده و تعرق این گیاه را کاهش داد (Agarie et al., 1992). در بررسی رشد گندم با کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش رطوبتی، گزارش شده که با کاربرد سیلیسیم ارتفاع بوته افزایش پیدا می‌کند (Ahmad et al., 2007).

فلزات سنگین از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کنند. کاهش در وزن ممکن است در ارتباط با سمیت فلزات سنگین باشد. افزودن سیلیسیم به محیط رشد ریشه یا محلول‌پاشی برگی سبب افزایش سطح و میزان ریشه‌های موئین می‌شود. در نتیجه، می‌توان انتظار افزایش وزن تر و خشک ریشه‌ها را داشت. علاوه بر این، میزان فتوسنتز، وزن تر برگ، ساقه و به‌طور کلی میزان عملکرد اندام‌های هوایی گیاهانی که تحت تیمار سیلیسیم قرار گرفتند، بیش‌تر است. تحقیقات نشان داده است که سیلیسیم نقش مهمی در رشد ریشه‌ها و حرکت آب به طرف ریشه‌ها از ریزوسفر خاک دارد که می‌تواند سبب افزایش میزان وزن تر و خشک ریشه‌ها شود (Lux et al., 2002; Hattori et al., 2005).

منابع مورد استفاده

نتیجه‌گیری

فلزات سنگین به‌عنوان یکی از آلاینده‌های محیط زیست، حتی در غلظت‌های کم، می‌توانند آثار فیزیولوژیکی خاص خود را بر روی موجودات زنده اعمال کنند. در این پژوهش، تأثیر منگنز به‌عنوان یک فلز سنگین بر گیاه کتان روغنی تحت شرایط تنش سمیت منگنز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح منگنز، غلظت منگنز ریشه و اندام هوایی افزایش یافت. کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش منگنز باعث بهبود شرایط محیطی گیاه کتان روغنی شد. این آثار موجب کاهش جذب منگنز در سطوح بالای تنش و کاهش انباشتگی آن در اندام هوایی گیاهان گردید. در شرایط تنش منگنز، محتوای پرولین و قندهای محلول برگ افزایش یافتند، که ممکن است نشانه‌ای از سازوکار دفاعی گیاه در مقابل تنش باشد. گیاه کتان روغنی در شرایط تنش منگنز از سازوکارهای متفاوتی برای مقابله با پیامدهای منفی ناشی از این فلز سنگین استفاده می‌کند. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار کاربرد ۲ میلی‌مولار محلول سیلیسیم نسبت به سایر تیمارها، بیش‌ترین تأثیر را بر بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی داشت. بنابراین، کاربرد سیلیسیم در شرایط الودگی به منگنز می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای افزایش تولید محصول در محیط‌های کشت مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه باسوج به‌خاطر حمایت مالی پژوهش حاضر قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

1. Ábrahám, E., Rigó, G., Székely, G., Nagy, R., Konecz, C., Szabados, L., 2003. Light-dependent induction of proline biosynthesis by abscisic acid and salt stress is inhibited by brassinosteroid in Arabidopsis. *Plant Mol. Biol.* 51(3), 363–

372. <https://doi.org/10.1023/A:1022043000516>.

2. Agarie, S., Agata, W. Kubota, F. Kaufmann, P.B., 1992. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants I. Effects of silicon and shading treatments. *Jpn. J. Crop Sci.* 61(2), 200–206. <https://doi.org/10.1626/jcs.61.200>.
3. Aghili, F., Khoshgoftarmansh, A.H., Afyuni, M., Schulin, R., 2009. Health risks of heavy metals through consumption of greenhouse vegetables grown in central Iran. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 15(5), 999–1015. <https://doi.org/10.1080/10807030903153337>.
4. Ahmad, F., Rahmatullah, Aziz, T., Maqsood, M.A., Tahir, M.A., Kanwal, S., 2007. Effect of silicon application on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth under water deficiency stress. *Emir. J. Food Agric.* 19(2), 1–7. DOI:10.9755/EJFA.V12I1.5170.
5. Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E., 2020. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Front. Plant Sci.* 11, 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>.
6. Ali, S., Farooq, M.A., Yasmeen, T., Hussain, S., Arif, M.S., Abbas, F., Bharwana, S.A., Zahang, G., 2013. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 89, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.11.015>.
7. Ali, B., Gill, R.A., Yang, S., Gill, M.B., Ali, S., Rafiq, M.T., Zhou, W., 2014. Hydrogen sulfide alleviates cadmium-induced morpho-physiological and ultrastructural changes in *Brassica napus*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 110, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.08.027>.
8. Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase (*Beta vulgaris*). *Plant Physiol.* 24, 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>.
9. Barceló, J., Poshenrieder, C.H., 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. *J. Plant Nutr.* 13, 1–37. <https://doi.org/10.1080/01904169009364057>.
10. Costa, G.B., Simioni, C., Ramlov, F., Maraschin, M., Chow, F., Bouzon, Z.L., Schmidt, E.C. 2017. Effects of manganese on the physiology and ultrastructure of *Sargassum cymosum*. *Environ. Exp. Bot.* 133, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.007>.
11. Epstein, E., 2009. Silicon: Its manifold roles in plants. *Ann. Appl. Biol.* 155, 155–160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>.
12. Farooq, M.A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K., Iqbal, Z., 2013. Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 96, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.07.006>.
13. Gandova, V., Teneva, O., Petkova, Z., Iliev, I., Stoyanova, A., 2023. Lipid composition and physicochemical parameters of flaxseed oil (*Linum usitatissimum* L.) from Bulgaria. *Appl. Sci.* 13(18), 10141. <https://doi.org/10.3390/app131810141>.
14. Ghori, N.H., Ghori, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., Ozturk, M., 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *Int. J. Sci. Environ. Technol.* 16, 1807–1828. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8>.
15. Hashemi, S., Asrar, Z., Pourseyedi, S., 2010. The effect of manganese on growth and some physiological and biochemical parameters of *Lepidium sativum* L. Iran. *J. Plant Physiol.* 2(5), 1–12. (In Persian with English abstract)
16. Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H. An, P., Morita, S., Luxova, M., Lux, A., 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiol. Plant.* 123, 459–466. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>.
17. Heidari Dehno, A., Mohtadi, A., 2018. The effect of different iron concentrations on lead accumulation in hydroponically grown *Matthiola flavida* Boiss. *Ecol. Res.* 33, 757–765. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1558-4>.
18. Imtiaz, M., Rizwan, M.S., Mushtaq, M.A., Ashraf, M., Shahzad, S.M., Yousaf, B., Saeed, D.A., Rizwan, M., Nawaz, M.A., Mahmood, S., Tu, S., 2016. Silicon occurrence, uptake transport and mechanism of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *J. Environ. Manage.* 183, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>.
19. Irigoyen, J.J., Emerich, D.W., Sanchez-Diaz, M., 1992. Water stress induced change in concentrations of proline and total soluble sugars in modulated alfalfa (*Medicago sativa*) plant. *Physiol. Plant.* 84, 55–60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>.
20. Jan, M., Shah, G., Masood, S., Shinwari, K.I., Hameed, R., Rha, E.S., Jamil, M., 2019. *Bacillus cereus* enhanced phytoremediation ability of rice seedlings under cadmium toxicity. *BioMed Res. Int.* 8134651. <https://doi.org/10.1155/2019/8134651>.
21. Kar, M., Mishra, D., 1976. Catalase, peroxides and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiol.* 57(2), 315–319. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315>.
22. Kaur, N., Jhanji, S., 2016. Effect of soil cadmium on growth, photosynthesis and quality of *Raphanus sativus* and

Lactuca sativa. J. Environ. Biol. 37(5), 993–997.

23. Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., Christie, P., 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. Environ. Pollut. 147, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>.
24. Locarno, M., Fochi, C.G., Paiva, P., 2011. Influence of silicate fertilization on chlorophylls of rose leaves. Ciênc. Agrotec. 35, 287–290. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000200008>.
25. Lux, A., Luxová, M., Hattori, T., Inanaga, S., Sugimoto, Y., 2002. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. Physiol. Plant. 115(1), 87–92. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1150110.x>.
26. Ma, J.F., Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends Plant Sci. 11(8), 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.
27. Marschner, H., 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants, Third ed. Academic Press, New York.
28. Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A.G., Mora, M.L., Alberdi, M., 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanism. J. Soil Sci. Plant Nutr. 10(4), 470–481. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>.
29. Mishra, A., Choudhuri, M.A., 1999. Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. Biol. Plant. 42, 409–415. <https://doi.org/10.1023/A:1002469303670>.
30. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. Plant Physiol. Biochem. 44, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.01.007>.
31. Mohammadi, S., Mohtadi, A., Movahhedi Dehnavi, M., 2019. The effect of different iron concentrations on growth and elements uptake of flax (*Linum usitatissimum* L.) under salinity stress. J. Plant Process Function 8(32), 463–478. (In Persian with English abstract)
32. Paquin, R., Lechasseur, P., 1979. Observations on measurement method of free proline in extracts from plants. Canad. J. Bot. 57, 1851–1854. <https://doi.org/10.1139/b79-233>.
33. Parveen, N., Ashraf, M., 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. Pak. J. Bot. 42(3), 1675–1684.
34. Pramanik, J., Kumar, A., Prajapati, B., 2023. A review on flaxseeds: Nutritional profile, health benefits, value added products, and toxicity. eFood 4(5), e114. <https://doi.org/10.1002/efd2.114>.
35. Ghasemzade, A., Karimi, A., Ziyae, A., Fotovat, A., 2021. Pollution assessment and source of selected heavy metals in agricultural soils, Southern Sabzevar, Northeastern Iran. J. Soil Management Sustainable Production, 11(1), 1–26. doi: 10.22069/ejsms.2021.17932.1943. (In Persian with English abstract)
36. Rang Zan, N., Golsoltani, M., Iajmirorak Nejati, M., 2020. Chemical fractionation of iron and manganese in soil adjacent to Khuzestan Steel Company. Iranian J. Soil Res. 33(4), 541–557. doi: 10.22092/ijsr.2019.126876.459. (In Persian with English abstract)
37. Rezai, K., Farboodnia, T., 2008. The response of pea plant (*Pisum sativum*) to manganese toxicity in solution culture. Agric. J. 3(3), 248–251.
38. Sahebi, M., Hanafi, M.M., Siti Nor Akmar, A., Rafii, M.Y., Azizi, P., Tengoua, F.F., Nurul Mayzaitul Azwa, J., Shabanimofrad, M., 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. Biomed Res. Int. 2015, 396010. <https://doi.org/10.1155/2015/396010>.
39. Sathish, T., Vinithkumar, N.V., Dharani, G., Kirubakaran, R., 2015. Efficacy of mangrove leaf powder for bioremediation of chromium (VI) from aqueous solutions: kinetic and thermodynamic evaluation. Appl. Water Sci. 5, 153–160. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0174-x>.
40. Shanker, A., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., Avudainayagam, S., 2005. Chromium toxicity in plants. Environ. Int. 31, 739–751. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.003>.
41. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., Yu, J., 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. Photochemistry 66(13), 1551–1559. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.05.006>.
42. Verma, S., Dubey, R., 2001. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. Biol. Plant. 44, 117–123. <https://doi.org/10.1023/A:1017938809311>.
43. Watanabe, S., Fujiwara, T., Yoneyama, T., Hayashi, H., 2001. Effects of silicon nutrition on metabolism and translocation of nutrients in rice plants. In: Horst, W.J., et al. (Eds.), Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences. Springer, Dordrecht, pp. 174–175. https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X_84.
44. Yang, S.X., Deng, H., Li, M.S., 2008. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima*

superba. Plant Soil Environ. 54(10), 441–446. DOI: 10.17221/401-PSE.

45. Zengin, F.K., Kirbag, S., 2007. Effects of copper on chlorophyll, proline, protein and abscisic acid level of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings. J. Environ. Biol. 28(3), 561–566.

نسخه پیش از انتشار