



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

S. Mohammadidust¹, A. Mohtadi^{1*}  and R. Amiri Fahliyani² 

(Received: 20 November 2023; Accepted: 11 February 2024)

Abstract

Environmental stress in plants, particularly due to 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 linseed (*Linum usitatissimum* L.) under manganese stress, a factorial experiment was conducted. Linseed 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 the root and shoot, 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 sugars content in leaves, consequently increasing plant photosynthetic capacity and leading to greater root and shoot dry weights under various silicon levels. The use of silicon significantly ameliorated the harmful effects of manganese in linseed under manganese stress conditions. Therefore, 2 mM silicon is recommended as a beneficial solution in areas contaminated with manganese, which can lead to the reduction of this heavy metal in the root and shoot 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). Linseed (*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., 205; 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. Moreover, 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 of toxic concentrations of this element. This study aimed to externally apply silicon to

1- Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran.

2- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

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

linseed 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 culture of linseed. 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. Several physiological and biochemical traits were measured post-harvest. Statistical assays were carried out by ANOVA test and means were compared by the least significant difference (LSD) test using SAS 9.1 software.

Results: The results revealed that an increment in the Mn stress level increased proline, soluble sugars content, and manganese in the root and shoot, accompanied by a decrease in other studied traits. The interaction of Mn and Si stresses significantly influenced various traits in linseed. The Mn stress increased proline and soluble sugars content, while Si application enhanced this effect. The Si treatment significantly reduced the Mn concentration in the root and aerial parts of the plant. The application of 2 mM silicon consistently yielded the highest values of examined traits across all manganese levels. Silicon application enhanced proline and soluble sugars content in leaves, consequently increasing plant photosynthetic capacity and leading to greater root and shoot dry weights under various silicon levels. As a result, treatment with 2 mM Si demonstrated the most significant improvement in physiological and morphological traits. The use of silicon significantly ameliorated the harmful effects of manganese in linseed under manganese stress conditions.

Conclusions: The study highlights the positive impact of Si on plant characteristics under Mn stress. The 2 mM silicon is recommended as a beneficial solution in areas contaminated with manganese. The 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 سیلیسیم: یک بررسی فیزیولوژیک و مورفولوژیک

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲)

چکیده

یکی از عوامل ایجاد تنش محیطی در گیاهان، حضور فلزات سنگین در محیط کشت آن‌هاست. منگنز به عنوان یکی از عناصر غذایی ضروری کم مصرف 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 سیلیسیم بر گیاه کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) 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 (۰، 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 شاخساره 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 کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم به دست آمد. استفاده از سیلیسیم منجر به افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ و افزایش توان فتوسنتزی گیاه شد. این آثار باعث افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره گیاهان تحت تیمار با سطوح مختلف سیلیسیم نسبت به سطح بدون کاربرد سیلیسیم گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از سطح دو میلی‌مولار سیلیسیم به عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر در بهبود آثار مضر منگنز در گیاه کتان روغنی پیشنهاد می‌شود. این اقدام می‌تواند منجر به کاهش میزان منگنز در ریشه و شاخساره گیاهان گردد.

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

مقدمه

مصارف مختلف صنعتی، آرایشی و بهداشتی نیز می‌رسند

(Pramanik et al., 2023). از این رو سلامت و کیفیت مواد خام و محصولات فرآوری‌شده آن‌ها یکی از نگرانی‌های عمده

دانه‌های روغنی یکی از مهم‌ترین منابع پروتئین و انرژی شناخته می‌شوند و علاوه بر مصرف خوراکی، تولیدات آن‌ها به

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

این فلزات می‌توان کادمیوم، سرب، کروم، منگنز و روی را نام برد. برخی از فلزات مانند کادمیوم، سرب و کروم هیچ نقش زیستی شناخته‌شده‌ای ندارند. درحالی‌که مس، روی و منگنز در غلظت‌های کم برای رشد معمولی گیاه مورد نیاز بوده و در غلظت‌های زیاد سمی هستند (Jan et al., 2019). منگنز یک عنصر ریزمغذی ضروری برای گیاهان است که در ساختار پروتئین‌ها و آنزیم‌های فتوسنتزی در فتوسیستم 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 فتوسنتزی 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 اتصال منگنز با دیواره سلولی وجود دارد. نبود 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 زیاد فلزات سنگین از جمله منگنز، استفاده از روش‌های مناسب تغذیه معدنی گیاهان است که نقش چشم‌گیری 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 نبوده 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 مانند تنش فلزات سنگین، تنش شوری، تنش خشکی، تنش رادیواکتیو 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

سازمان بهداشت جهانی است. یکی از گیاهان روغنی و دارویی که در سطح جهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، کتان روغنی یا بزرک است. 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 غیرزیستی 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 است که علاوه بر کاهش کمیت 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 افزایش نیاز آبی و تقاضای بیش‌تر آب به‌منظور آبیاری در بخش کشاورزی، سبب افزایش روزافزون استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه‌شده 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 نارسایی‌هایی در گیاه شده که در نهایت ممکن است سبب کاهش رشد گیاه گردد. تجمع عناصر سنگین در خاک، به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی، فرایندی 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 شده و از راه ریشه گیاهان به زنجیره‌های غذایی انتقال می‌یابند. از جمله

al., 2005; Hashemi et al., 2010; Farooq et al., 2013; Ali et al., 2013). دمای اتافک رشد 20 ± 2 درجه سلسیوس در روز و 15 ± 2 درجه سلسیوس در شب و تناوب نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی بود. سیستم کشت بدون خاک با اندازه متوسط پرلیت متوسط، به عنوان بستر بی اثر، استفاده شد. واحدهای آزمایش شامل گلدان‌هایی با قطر ۱۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر بودند. گلدان‌ها توسط پرلیت که از قبل به دقت چند بار شسته شده بودند، به گونه‌ای 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 هر چهار روز یک‌بار 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 مورفولوژیک و فیزیولوژیک برگ

پس از چهار هفته اعمال تنش منگنز، از هر گلدان پنج بوته انتخاب شده 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.

نامحلول بوده و گیاهان به آن دسترسی ندارند. اما سیلیسیم معمولاً در محلول‌های خاک به شکل اسید مونوسیلیسیک (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 وسیعی 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 پژوهش‌های 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 فیزیولوژیک گیاهان، به‌ویژه گیاهان دارویی-روغنی مانند گیاه کتان روغنی، در خاک‌های آلوده به منگنز پژوهش‌های چندانی انجام نشده است. از این رو هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر کاربرد 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 یا MnSO₄) در چهار سطح (۰، ۲، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار) و عامل دوم سیلیسیم (به صورت سدیم متاسیلیکات یا Na₂SiO₃) در پنج سطح (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم) بود. انتخاب سطوح تیمارها براساس نتایج پژوهش‌های پیشین در این زمینه صورت گرفت (Shi et

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

تجزیه و تحلیل آماری داده ها

تجزیه آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد و مقایسه میانگین ها برای آثار اصلی با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد صورت گرفت. برای ویژگی هایی که برهم کنش دو عامل معنی دار شد برش دهی بر اساس تنش منگنز و مقایسه میانگین با رویه LS Means انجام شد. نمودارها به کمک نرم افزار Excel رسم گردید.

نتایج

محتوای کلروفیل کل برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر برهم کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح پنج درصد بر محتوای کلروفیل کل در کتان روغنی معنی دار شد (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 برگ) در تیمار ۲ میلی مولار سیلیسیم و کمترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم (به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۴، ۰/۳۷ و ۰/۲۴ میلی گرم بر گرم بافت تازه برگ) مشاهده شد (شکل ۱-الف).

محتوای نسبی آب برگ

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱)، اثر تنش منگنز و سیلیسیم و اثر برهم کنش آن ها بر محتوای نسبی آب (RWC)

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

$$RWC = \frac{Fw - Dw}{Tw - Dw} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، Fw وزن تازه برگ، Dw وزن خشک برگ و Tw وزن آماس برگ می باشد.

رنگیزه های فتوستتری شامل کلروفیل کل با روش (Arnon, 1949) و در سه طول موج ۴۷۰، ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. محتوای پرولین برگ نمونه ها با استفاده از روش (Paquin and Lechasseur, 1979) اندازه گیری شد و میزان جذب نمونه ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای اندازه گیری قندهای محلول از روش (Irgoyen et al., 1992) استفاده شد و میزان جذب نمونه ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد.

محتوای پروتئین برگ با روش (Kar and Mishra, 1976) اندازه گیری شد و میزان جذب نمونه ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت گردید. برای تعیین سطح برگ در هر گلدان یک بوته انتخاب شده و برگ های آن شمارش شد. سپس برگ ها شماره گذاری شده و برای اندازه گیری سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج مدل WINAREA-UT-11 استفاده گردید.

اندازه گیری غلظت منگنز در ریشه و شاخساره

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

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر منگنز (Mn) و سیلیسیم (Si) بر کلروفیل کل، محتوای نسبی آب (RWC)، 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 variation	درجه آزادی df	کلروفیل کل Total chlorophyll	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 نبود اثر معنی دار، و اثر معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می دهد.

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effect at probability levels of 5 and 1 percents, respectively.

سطح برگ

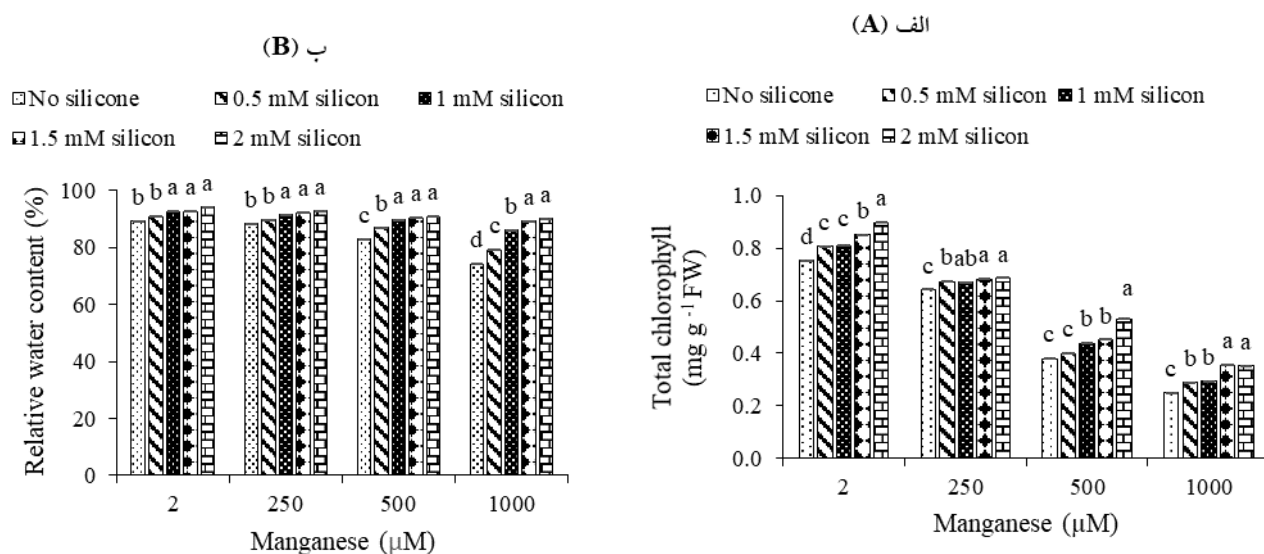
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) بیانگر معنی دار بودن اثر تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد و غیرمعنی دار بودن اثر برهم کنش این دو عامل بر سطح برگ کتان روغنی بود. مقایسه میانگین اثر اصلی تنش منگنز (جدول ۲) حاکی از کاهش شاخص سطح برگ با افزایش شدت تنش است به طوری که کم ترین میزان این صفت (۷۳۲ میلی متر مربع) در تیمار ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز و بیش ترین میزان (۱۷۱۹ میلی مترمربع)، در 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 مترمربع) در تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم به دست آمد که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها داشت و کم ترین میزان آن (۹۵۱ میلی مترمربع) در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم به دست آمد.

محتوای پرولین برگ

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

برگ کتان روغنی در سطح یک درصد معنی دار شد. مقایسه میانگین ها نشان داد با افزایش تنش منگنز از ۲ به ۱۰۰۰ میکرومولار، RWC کاهش یافت و کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم موجب افزایش این ویژگی گردید. در سطح ۲ میکرومولار منگنز، بیش ترین RWC (۹۴/۰ درصد) در زمان کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم، و کم ترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم به دست آمد. در سطح ۲۵۰ میکرومولار منگنز نیز بیش ترین RWC در تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم و کم ترین آن نیز با میانگین ۸۸/۲ درصد در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم مشاهده شد که تفاوت معنی داری با تیمار کاربرد ۵/۰ میلی مولار سیلیسیم نشان نداد (شکل ۱-ب).

در سطح ۵۰۰ میکرومولار منگنز، تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم از بیش ترین RWC برخوردار بود که با تیمار بدون کاربرد سیلیسیم که از کم ترین RWC برخوردار بود تفاوت معنی دار ۴/۱ درصدی نشان داد (شکل ۱-ب). در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز نیز بیش ترین RWC در تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم و کم ترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم به دست آمد که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها داشت (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 نبود تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه LS Means است.

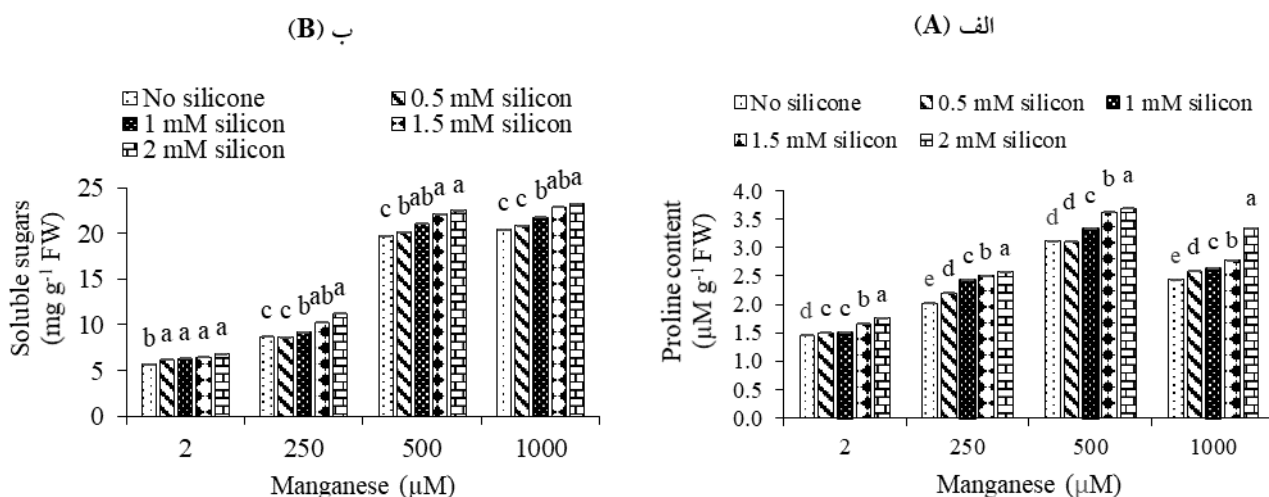
Fig. 1. Mean comparison for the effect of silicon levels at each manganese stress level on total chlorophyll content (A) and relative water content (B) in *Linum usitatissimum*; At each manganese stress level, means with at least one similar letter are not significantly different based on LS Means ($p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

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر تنش منگنز (Mn) و سیلیسیم (Si) 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*.

تیمار	محتوای پروتئین	سطح برگ در بوته	طول ریشه در بوته (سانتی
Treatment	(میلی گرم بر گرم بافت تازه برگ)	(میلی متر مربع)	متر)
سطوح منگنز (میکرومولار)	Protein content (mg g ⁻¹ FW)	Leaf area per plant (mm ²)	Root length per plant (cm)
Mn (μM)			
2	57.88 ^a	1719 ^a	15.32 ^a
250	39.03 ^b	1411 ^b	13.21 ^b
500	30.32 ^c	841 ^c	11.34 ^c
1000	15.51 ^d	732 ^d	10.38 ^d
سطوح سیلیسیم (میلی مولار)			
Si (mM)			
0	31.82 ^e	951 ^e	9.99 ^d
0.5	33.57 ^d	1052 ^d	11.46 ^c
1	35.52 ^c	1215 ^c	12.07 ^c
1.5	37.79 ^b	1279 ^b	14.15 ^b
2	39.73 ^a	1381 ^a	15.16 ^a

در هر ستون و برای هر تیمار، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد است.
In each column and for each treatment, means with at least one similar letter are not significantly different based on LSD test ($p < 0.05$).



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 نبود تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه LS Means است.

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 LS Means ($p < 0.05$).

مقدار قندهای محلول برگ افزایش یافت. کاربرد سیلیسیم مقایسه با شاهد (بدون کاربرد سیلیسیم) سبب افزایش معنی‌دار این صفت در هر یک از سطوح تنش منگنز شد (شکل ۲-ب). در سطح تیمار ۲ میکرومولار منگنز، بیش‌ترین میانگین محتوای قندهای محلول برگ (۶/۸۳ میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ) در اثر کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن (۵/۶۵ میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ) در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم بدست آمد که با یکدیگر تفاوت ۱۷/۳ درصدی دارند. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز، بیش‌ترین محتوای قندهای محلول برگ به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۱/۲، ۲۲/۵ و ۲۳/۳ میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ در اثر کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن به‌ترتیب با میانگین‌های ۸/۷، ۱۹/۷ و ۲۰/۵ میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم مشاهده شد که به‌ترتیب با یکدیگر تفاوت ۲۲/۸، ۱۲/۴ و ۱۲/۰ درصدی دارند (شکل ۲-ب).

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 نبود 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 (به‌ترتیب ۱/۷۵، ۲/۵۶، ۳/۶۸ و ۳/۳۳ میکرومول بر گرم بافت تازه برگ) در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم (به‌ترتیب ۱/۴۴، ۲/۰۲، ۳/۱۰ و ۲/۴۴ میکرومول بر گرم بافت تازه برگ) مشاهده شد (شکل ۲-الف).

محتوای قندهای محلول برگ

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱)، حاکی از معنی‌داری اثر برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر محتوای قندهای محلول برگ در سطح پنج درصد بود. با افزایش سطوح تنش منگنز،

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر منگنز (Mn) و سیلیسیم (Si) بر غلظت منگنز ریشه و شاخساره، طول ریشه و شاخساره، و وزن خشک ریشه و شاخساره در کتان روغنی

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

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	منگنز ریشه Root Mn	منگنز Shoot Mn	طول ریشه Root length	طول Shoot length	وزن خشک ریشه Root DW	وزن خشک شاخساره 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 نبود اثر معنی دار، و اثر معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می دهد.

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effect at probability levels of 5 and 1 percents, respectively.

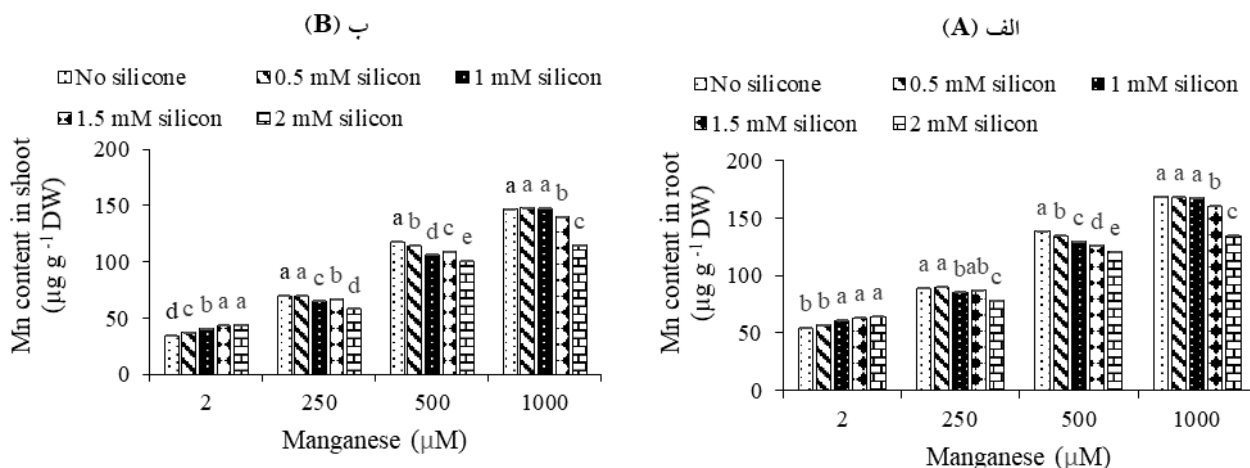
محتوای پروتئین برگ

نتایج تجزیه واریانس بیانگر معنی داری آثار اصلی تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر محتوای پروتئین برگ است (جدول ۱). در بین سطوح منگنز، بیشترین محتوای پروتئین (۵۷/۹ میلی گرم بر گرم بافت تازه برگ) در سطح ۲ میکرومولار منگنز به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی داری داشت. کمترین مقدار آن در اثر کاربرد ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز (۱۵/۵ میلی گرم بر گرم بافت تازه برگ) به دست آمد که کاهش ۷۷/۲ درصدی را نسبت به مقدار پیشینه نشان می دهد (جدول ۲). در بین سطوح سیلیسیم، کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم باعث افزایش ۱۹/۹ درصدی محتوای پروتئین برگ نسبت به تیمار بدون کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۲).

غلظت منگنز ریشه

با توجه به جدول (۳)، اثر تنش منگنز و سیلیسیم و برهم کنش آن‌ها بر غلظت منگنز ریشه کتان روغنی در سطح پنج درصد معنی دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۳-الف) نشان داد با افزایش 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 بیشتر منگنز، با کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم از غلظت منگنز در ریشه کاسته شد. در زمان کاربرد ۲ میکرومولار منگنز، بیشترین غلظت منگنز ریشه (۶۴/۲ میکروگرم بر گرم) در تیمار ۲ میلی مولار سیلیسیم و کمترین آن (۵۴/۴ میکروگرم بر گرم) در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم به دست آمد. در زمان کاربرد ۲۵۰ میکرومولار منگنز، بیشترین غلظت منگنز در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم و کمترین آن با میانگین ۷۸/۳ میکروگرم بر گرم در تیمار کاربرد ۲ میلی مولار سیلیسیم به دست آمد که موجب کاهش ۱۳/۶ درصدی نسبت به تیمار بدون کاربرد سیلیسیم شد (شکل ۳-الف). در سطح ۵۰۰ میکرومولار منگنز، تیمار بدون 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 تفاوت ۱۰/۶ درصدی نشان داد. در سطح ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز نیز بیشترین غلظت منگنز ریشه در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم و کمترین آن با میانگین ۱۳۴/۸ میکروگرم بر گرم در 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 (Mn) ریشه (الف) و غلظت منگنز (Mn) شاخساره (ب) در کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه LS Means است.

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 LS Means ($p < 0.05$).

غلظت منگنز شاخساره

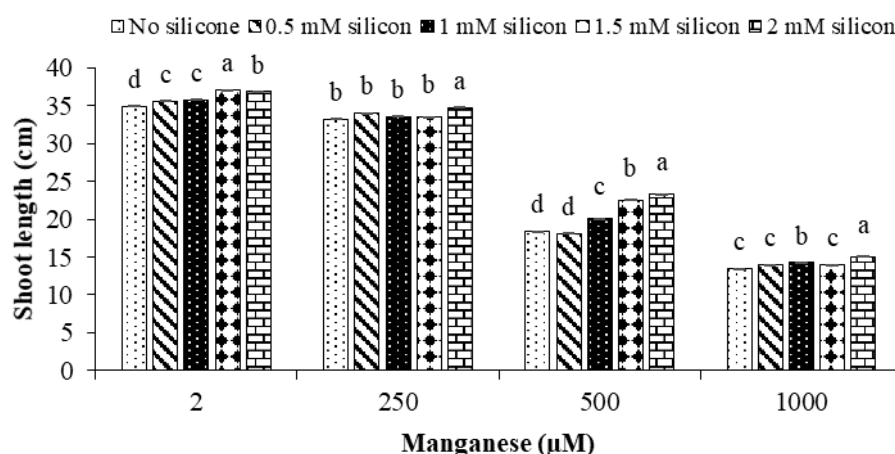
نتایج نشان داد که اثر برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر غلظت منگنز شاخساره معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش تنش منگنز، غلظت منگنز شاخساره افزایش یافت. کاربرد سیلیسیم در مقایسه با شاهد (بدون کاربرد سیلیسیم) در سطح ۲ میکرومولار منگنز تأثیر مثبت معنی‌داری بر این صفت نداشت اما در سایر سطوح منگنز موجب کاهش این صفت شد (شکل ۳-ب). در سطح ۲ میکرومولار منگنز بیش‌ترین غلظت منگنز شاخساره (با میانگین ۴۳/۹ میکروگرم بر گرم) در اثر کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن (۳۴/۲ میکروگرم بر گرم) در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم بدست آمد. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌مولار منگنز، بیش‌ترین غلظت منگنز شاخساره به‌ترتیب با میانگین‌های ۶۹/۶، ۱۱۷/۶ و ۱۴۶/۶ میکروگرم بر گرم در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم و کم‌ترین آن به‌ترتیب با میانگین‌های ۵۸/۰، ۱۰۰/۶ و ۱۱۴/۵ میکروگرم بر گرم در تیمار کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم مشاهده شد (شکل ۳-ب).

طول ریشه

نتایج 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 در سطح ۲ میکرومولار منگنز به‌دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد. کم‌ترین میزان این صفت نیز در زمان کاربرد ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز به‌دست آمد که موجب کاهش ۳۲/۲ درصدی طول ریشه نسبت به سطح ۲ میکرومولار منگنز شد (جدول ۲). در بین سطوح سیلیسیم، کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم باعث افزایش ۵۱/۸ درصدی طول ریشه نسبت به تیمار بدون کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۲).

طول شاخساره

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۳) اثر برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح پنج درصد بر طول شاخساره در کتان روغنی معنی‌دار شد. مقایسه میانگین طول شاخساره در سطوح مختلف سیلیسیم در همه سطوح تنش منگنز، نشان از کاهش



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر سطوح سیلیسیم در هر سطح تنش منگنز بر طول شاخساره کتان روغنی؛ در هر سطح تنش منگنز، میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری در سطح پنج درصد بر اساس رویه LS Means است.

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 LS Means ($p < 0.05$).

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

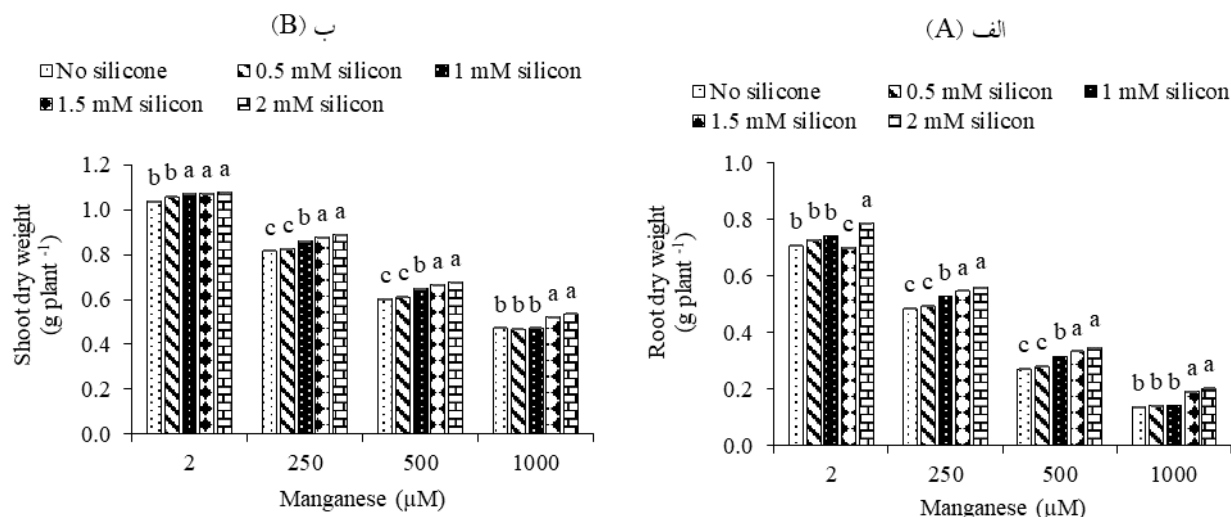
وزن خشک شاخساره

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد اثر برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم در سطح یک درصد بر وزن خشک شاخساره کتان روغنی معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌ها نشان از کاهش وزن خشک شاخساره کتان روغنی با افزایش سطوح تنش منگنز دارد. در هر چهار سطح منگنز، بیش‌ترین وزن خشک شاخساره در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم مشاهده شد (شکل ۵-ب).

این صفت با افزایش سطوح تنش وارد شده بر گیاه دارد. در سطح ۲ میکرومولار منگنز، بیش‌ترین طول شاخساره در تیمار ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیم حاصل شد که موجب افزایش ۶/۰۳ درصدی طول شاخساره نسبت به تیمار بدون کاربرد سیلیسیم شد. در سطوح ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار منگنز، بیش‌ترین طول شاخساره (به‌ترتیب ۳۴/۷، ۲۳/۳ و ۱۵/۱ سانتی‌متر) در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و کم‌ترین آن در تیمار بدون کاربرد سیلیسیم (به‌ترتیب ۳۳/۳، ۱۸/۴ و ۱۳/۵ سانتی‌متر) مشاهده شد (شکل ۴).

وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر برهم‌کنش تنش منگنز و سیلیسیم بر وزن خشک ریشه کتان روغنی در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج 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 بدون کاربرد سیلیسیم شد. در سطح ۲ میکرومولار منگنز، کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم موجب افزایش ۱۳/۰ درصدی



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

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 LS Means ($p < 0.05$).

بحث

مسیر بیوسنتز رنگیزه‌ها نسبت داد (Rezai and Farboodnia, 2008). هم‌چنین، تنش منگنز با افزایش میزان گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در گیاهان موجب کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود. گونه‌های ROS به‌عنوان عامل مخرب رنگدانه‌ها و دیگر مولکول‌های درشت زیستی در گیاهان عمل می‌کنند (Yang et al., 2008). مشخص شده است که کاربرد سطوح بالای منگنز موجب کاهش محتوای کلروفیل a, b و کل گیاه شاهی می‌شود (Hashemi et al., 2010).

سیلیسیم باعث افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود (شکل ۱-الف). با توجه به این که قسمت اعظم کلروفیل برگ در کلروپلاست قرار دارد، سیلیسیم با حفظ انسجام کلروپلاست‌ها و به‌ویژه 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

فتوسنتز یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فعالیت فیزیولوژیک و وابسته به محتوای کلروفیل در گیاه است. کلروفیل‌ها از جمله عمده‌ترین مولکول‌های درشت هستند که در اثر تنش‌های محیطی از جمله فلزات سنگین، آسیب می‌بینند. عناصر سنگین با تأثیر بر شدت 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 کتان روغنی، تحت تأثیر سمیت منگنز کاهش می‌یابد (شکل ۱-الف). اولین نشانه واضح سمیت منگنز در گیاهان کلروز برگ‌ها است. هم‌چنین غلظت‌های زیاد منگنز در بافت برگ به‌طور غیرمستقیم از طریق اختلال در فرآیند متابولیک گیاه بر 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

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 آماس و افزایش اندازه برگ می‌شود (Ma and Yamaji, 2006). در پژوهش حاضر نیز به نظر می‌رسد با توجه به این‌که سیلیسیم موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ شده است، در نتیجه به دنبال آن سطح برگ نیز افزایش یافت (جدول ۲).

پرویلین آزاد اغلب به عنوان تنظیم‌کننده اسمزی در نظر گرفته می‌شود و یک آمینو اسید با بیش‌ترین حلالیت در آب است که ممکن است آبیگری سلول‌های گیاهی و بافت‌ها را بهبود بخشد. این اسمولیت می‌تواند مانع از دست رفتن آب برگ‌ها تحت شرایط تنش فلزات سنگین شود (Zengin and Kirbag, 2007). تولید پرویلین یکی از سازوکارهای مهم سمیت‌زدایی فلزات سنگین سمی در بیش‌تر گیاهان است. تجمع پرویلین در گیاهچه‌های قرار گرفته در معرض تنش فلزات سنگین (مانند منگنز) موجب کاهش آسیب به غشاء و پروتئین‌ها می‌شود. زمانی که گیاهان در معرض تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرند، میزان پرویلین آن‌ها افزایش می‌یابد تا ساختارهای سلولی و آنزیمی را در برابر فاکتورهای تنش‌زا حفاظت نماید (Ábrahám et al., 2003). تجمع پرویلین در گیاهان تحت تنش با کاهش خسارت به غشای سلولی و پروتئین‌ها همراه است، که می‌تواند ناشی از ممانعت پرویلین 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 پرویلین، باعث افزایش میزان پرویلین 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

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 راه محدود کردن حرکت آب از ریشه‌ها به بخش‌های هوایی در گیاهان می‌شوند (Sathish et al., 2015). آثار سمی فلزات سنگین بر عملکرد روزنه‌ها، حرکت آب از مسیرهای 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 (Hashemi et al., 2010). رسوب بلورهای سیلیکات در سلول‌های اپیدرم سبب استحکام برگ‌ها و کاهش خروج 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). در این پژوهش نیز با افزایش تنش منگنز، محتوای نسبی آب بافت کاهش یافت و کاربرد سطوح مختلف سیلیسیم موجب افزایش آن شد (شکل ۱-ب).

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

پژوهش حاضر در شرایط کاربرد سیلیسیم، محتوای پروتئین محلول برگ نسبت به تیمار بدون کاربرد آن افزایش یافته است (جدول ۲).

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 شاخساره کتان روغنی، ورود این عنصر در فضای آپوپلاستی ریشه است که به آسانی به همراه 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 (شکل ۳-الف).

در بیش‌تر گیاهان میزان انباشت فلزات سنگین در ریشه بیش‌تر از اندام‌های هوایی است. برخی از پژوهشگران معتقدند که به دلیل سمیت غلظت زیاد منگنز برای سیتوسول در فرم آزاد، سلول‌های گیاهی تلاش می‌کنند با استفاده از سازوکارهایی مانند 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 افزایش غلظت این عنصر در محیط، مقدار بیش‌تری از منگنز به اندام‌های هوایی انتقال یافته و میزان بیش‌تری از این عنصر در بخش‌های بالایی گیاهچه‌های شاهی تجمع یافت که حکایت از توانایی کم گیاهچه‌های شاهی در ممانعت از انتقال آن به شاخساره دارد (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

در شرایط سمیت ناشی از منگنز است. از عوامل دیگر افزایش قندهای محلول می‌توان به افزایش آنزیم‌های تجزیه‌کننده قندهای غیرمحلول مانند سلولاز و همچنین کاهش مصرف قندهای محلول در نتیجه کاهش فرایندهای ساخت و ساز در شرایط تنش، اشاره کرد (Aghili et al., 2009). نتایج پژوهشی نشان داد که افزایش غلظت منگنز در محیط کشت باعث افزایش میزان قندهای محلول ریشه و شاخساره گیاه شاهی 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 (شکل ۲-ب). 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 روبیسکو به‌وسیله رادیکال‌های فعال اکسیژن به‌صورت غیرآنزیمی تخریب می‌شوند. گزارش شده است که در شرایط تنش منگنز بین میزان کاهش پروتئین و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین در برگ‌های گندم رابطه مستقیمی وجود دارد (Aghili et al., 2009). رادیکال‌های آزاد تولیدشده در اثر 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 گیاه شاهی گزارش شده است (Hashemi et al., 2010). تیمار سیلیسیم سبب افزایش لیگنین، سلولز و پروتئین می‌شود. در

در رشد ریشه‌ها و حرکت آب به طرف ریشه‌ها در ناحیه ریزوسفر دارد که می‌تواند سبب افزایش میزان وزن تازه و خشک ریشه‌ها شود (Lux et al., 2002; Hattori et al., 2005).

نتیجه‌گیری

فلزات سنگین به‌عنوان یکی از آلاینده‌های محیط زیست، حتی در غلظت‌های کم، می‌توانند آثار فیزیولوژیک خاص خود را بر گیاهان 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 شاخساره 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 شاخساره گیاهان گردید. در شرایط تنش منگنز، محتوای پرولین و قندهای محلول برگ افزایش یافتند، که ممکن است نشانه‌ای از سازوکار دفاعی گیاه در برابر 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 میلی مولار محلول سیلیسیم نسبت به سایر تیمارها، بیش‌ترین تأثیر را بر بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک داشت. بنابراین، کاربرد سیلیسیم در شرایط آلودگی 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 یاسوج 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.

و کاهش در مقدار منگنز سیمپلاستی است. همچنین سیلیسیم از طریق تشکیل کمپلکس با آلومینیوم در محیط و یا در ریشه باعث مهار نفوذ این فلز در غلظت زیاد 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 شد اما با افزایش غلظت منگنز و آثار سمی که بر گیاه داشته است، سیلیسیم موجب کاهش آن در گیاه شده است (شکل ۳).

حضور فلزات سنگین در خاک بر صفات رویشی گیاهان آثار منفی می‌گذارند. در اثر وجود منگنز آماس سلولی از بین می‌رود که نتیجه آن کاهش رشد شاخساره گیاهان است (شکل ۴). گزارش شده است 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 شد که با کاربرد سیلیسیوم ارتفاع بوته افزایش پیدا می‌کند (Ahmad et al., 2007).

فلزات سنگین از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کنند. کاهش وزن ممکن است در ارتباط با سمیت فلزات سنگین باشد. افزودن سیلیسیم به محیط رشد ریشه یا محلول‌پاشی برگ سبب افزایش سطح و میزان ریشه‌های موئن می‌شود؛ در نتیجه، می‌توان انتظار افزایش وزن تازه و خشک ریشه‌ها را داشت. علاوه بر این، افزایش میزان فتوسنتز، وزن تازه برگ، ساقه و به‌طور کلی میزان عملکرد اندام‌های هوایی گیاهانی که تحت تیمار سیلیسیم قرار گرفتند، بیش‌تر گزارش شده است. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد با افزایش سطوح تنش منگنز، از وزن خشک ریشه و شاخساره کتان روغنی کاسته شد اما کاربرد سیلیسیم موجب افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره نسبت به سطح بدون کاربرد سیلیسیم شد (شکل ۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سیلیسیم نقش مهمی

منابع مورد استفاده

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. Kaufamn, 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.
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., Poschenrieder, 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. Ghorri, N.H., Ghorri, 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- Diaz, 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 Proc. Func.* 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. *Can. 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., Ziyade, A., Fotovat, A., 2021. Pollution assessment and source of selected heavy metals in agricultural soils, Southern Sabzevar, Northeastern Iran. *J. Soil Manag. Sustain. Prod.* 11(1), 1–26. doi: 10.22069/ejsms.2021.17932.1943. (In Persian with English abstract)
36. Rang Zan, N., Golsoltani, M., Lajmirorak 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., Schenk, M.k., Bürkert, A., Claassen, N., Flessa, H., Frommer,

- W.B., Goldbach, H., Ols, H.W., Römheld, V., Sattelmacher, B., Schmidhalter, U., Schubert, S., Wirén, N., Wittenmayer, L. (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.
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.