

The effect of silicon nutrition of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) transplant on its post-transplant seedling tolerance to stress caused by foramsulfuron drift

Akbar Aliverdi^{1*}, Hamed Mansouri²
(Received: 7 April. 2025 ; Accepted: 26 May. 2025)

How to cite this article:

Aliverdi A, Mansouri H. The effect of silicon nutrition of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) transplant on its post-transplant seedling tolerance to stress caused by foramsulfuron drift. Journal of Sugar Beet. 2024; (40)2. 185-198. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22092/jsb.2025.369082.1385.

Extended abstract

Introduction

Sugar beet is a major crop cultivated for sugar production. Herbicides, though a modern and efficient method of weed control, can easily cause toxicity to non-target crops through drift. Herbicide drift not only contributes to environmental pollution but is also considered a significant factor in reducing crop productivity. Sugar beet is particularly susceptible to herbicides. In recent years, the detrimental effects of herbicide drift-such as from nicosulofuron, a corn-selective herbicide, and fumsafen, a soybean-selective herbicide, have been reported on sugar beet. The application of silicon has attracted considerable interest among growers due to its potential to enhance crop resistance against both biotic and abiotic stresses, including herbicide exposure. Initially, the protective role of silicon was attributed to its mechanical effects, particularly its ability to form a physical barrier by strengthening plant cell walls. However, more recent research has revealed that silicon also provides biochemical protection to plants. Silicate-solubilizing bacteria may offer a sustainable and cost-effective alternative to synthetic silica nanoparticles, which are not only expensive to produce but also raise concerns regarding environmental and biological safety. Therefore, this study was conducted to investigate the effects of silicon-based nutrition on enhancing the tolerance of sugar beet transplants to stress caused by foramsulfuron drift.

Materials and Methods:

The first experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with four replications. The first factor included two types of seedbeds used for producing sugar beet cultivar Shokofa transplants (inoculation and non-inoculation with 100 mg/kg of K_2SiO_3 + 10 ml/kg of a commercial silicate-solubilizing bacteria), and the second factor included six doses of foramsulfuron (0, 0.05, 0.56, 5.62, 56.25 and 562.5 g a.i. ha⁻¹). Transplanting was performed at the 4-leaf stage of sugar beet and herbicide treatments were applied at the 6-leaf stage using a hand-held pressure sprayer. In the second experiment, in addition to the two aforementioned factors, a third factor was included: three levels of foliar application involving either no treatment or pretreatment with malathion (applied 2 hours before foramsulfuron) and 4-chloro-7-nitrobenzofurazan (applied 2 days before foramsulfuron).

Results and Discussion:

Silicon nutrition significantly improved several physiological and biochemical traits in sugar beet, including shoot dry weight (by 28.4%), silicon content (by 178.1%), lignin content (by 122.2%), phenylalanine ammonia-lyase activity (by 90.9%), and catalase activity (by 14.5%). It also reduced hydrogen peroxide (by 15.4%) and malondialdehyde content (by 11.7%). The observed growth enhancement was likely due to improved nutritional conditions in silicon-fed plants. The activity of silicate-solubilizing bacteria, which convert various silicates into plant-available silicic acid, slightly decreased soil acidity. This shift promoted greater uptake of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium, and boron. Application of 0.05

1. Plant Production and Genetics Department, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran.

*Corresponding author: a.aliverdi@basu.ac.ir

2. Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran.

g ha⁻¹ foramsulfuron to sugar beets not supplied with silicon resulted in 23.9% reduction in dry weight. Under herbicide stress (except for 56.2 and 562.5 g a.i. ha⁻¹), sugar beets that received silicon nutrition exhibited higher dry weight compared with non-silicon fed plants. This suggests that silicon alleviates herbicide toxicity, potentially through enhanced lignification cell-walls- thereby reducing herbicide absorption-and or by strengthening the plant's antioxidant defense system, leading to decreased oxidative stress. Under low herbicide doses (0.05 and 0.56 g a.i. ha⁻¹), pretreatment with 4-chloro-7-nitrobenzofuran and malathion prior to herbicide application had a noticeable effect on sugar beet dry weight. However, in general, these pretreatments led to a reduction in dry weight, with 4-chloro-7-nitrobenzofurazan showing more pronounced effect than malathion.

Conclusion

The findings indicate that foramsulfuron induces severe oxidative stress in sugar beet, beyond the plant's inherent capacity to metabolize or detoxify it effectively. While silicon nutrition helped mitigate this stress to some extent, it was not sufficient on its own to fully counteract the herbicide's phytotoxic effects.

Keywords: Herbicide, Potassium silicate, Silicate-solubilizing bacteria, Transplanting.

References:

- Abdellatif HIA, Bakeer ART, Ali AM, Ahmed HMH. Effect of some alternative control compounds to fungicides on sugar beet cercospora leaf spot under greenhouse conditions. *Fayoum Journal of Agricultural Research and Development*. 2024; 38: 352–69. Doi: <https://doi.org/10.21608/fjard.2024.277771.1034>
- Nath D, Selvi D, Thiyageshwari S, Anandham R, Venkatesan K. Silicon sources and bacterial inoculants on growth parameters, leaf yield, quality of coriander (*Coriandrum sativum L.*) and soil adsorbed silicon in sandy loamy soil. *International Journal of Plant and Soil Science*. 2022; 34: 194–208. Doi: <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i2231372>.
- Pereira S, Monteiro A, Moutinho-Pereira J, Dinis L-T. Silicon, an emergent strategy to lighten the effects of (a)biotic stresses on crops: a review. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2024; 210: e12762. Doi: <https://doi.org/10.1111/jac.12762>

تأثیر تغذیه نشاء چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) از سیلیسیم بر تحمل گیاهچه پس از نشاکاری آن به تنش ناشی از باد بردگی فورام سولفورون[†]

اکبر علی وردی^{۱*}، حامد منصوری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۵

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2025.369082.1385

۱. علی وردی، ح. منصوری، ۱۴۰۳، تأثیر تغذیه نشاء چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) از سیلیسیم بر تحمل گیاهچه پس از نشاکاری آن به تنش ناشی از باد بردگی فورام سولفورون. چغندرقد ۴۰ (۲): ۱۸۵-۱۹۸

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر مصرف سیلیسیم بر تحمل گیاهچه چغندرقد پس از نشاکاری آن به تنش ناشی از باد بردگی فورام سولفورون انجام گرفت که به عنوان یکی از علل کاهش بهره‌وری در گیاهان زراعی مطرح است. این پژوهش در قالب دو آزمایش اجرا شد. آزمایش اول به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. عامل اول شامل دو نوع بستر بذر برای تولید نشاء (تلقیح و عدم تلقیح با سیلیکات پتاسیم + باکتری حل کننده سیلیکات) و عامل دوم شامل شش دوز فورام سولفورون (صفر، ۰/۰۵، ۰/۵۶، ۵/۶۲، ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم ماده مؤثره در هکتار) بود. در آزمایش دوم، علاوه بر عوامل بالا، عامل سوم شامل سه سطح محلول پاشی (با و بدون مالاتیون و ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان) قبل از کاربرد فورام سولفورون جهت بررسی قابلیت تجزیه فورام سولفورون به وسیله چغندرقد بود. تغذیه سیلیسیم چغندرقد سبب افزایش ۲۸/۴ درصدی وزن خشک، ۱۷۸/۱ درصدی محتوی سیلیسیم، ۱۲۲/۲ درصدی محتوی لیگنین، ۹۰/۹ درصدی فعالیت فنیل آلانین آمونیا لیا، ۱۴/۵ درصدی فعالیت کاتالاز و کاهش ۱۵/۴ درصدی محتوی آب اکسیژنه و ۱۱/۷ درصدی محتوی مالون دی آلدئید شد. کاربرد ۰/۰۵ گرم فورام سولفورون در هکتار روی چغندرقد تغذیه نکرده از سیلیسیم سبب کاهش وزن خشک (۲۳/۹ درصد) شد. تحت شرایط کاربرد علف کش (به جز دو سطح ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم ماده مؤثره در هکتار)، وزن خشک چغندرقد تغذیه کرده از سیلیسیم بیشتر از تغذیه نکرده از سیلیسیم بود. پیش تیمار چغندرقد با مالاتیون و ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان سبب کاهش وزن خشک شد. تأثیرگذاری پیش تیمار چغندرقد با ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان بیشتر از مالاتیون بود. تنش اکسیداتیو ناشی از فورام سولفورون به چغندرقد به حدی بالا بود که امکان متابولیسم آن میسر نشد. با کاهش این تنش از طریق تغذیه سیلیسیم چغندرقد، این امکان تا حدی میسر شد ولی کافی نبود.

واژه‌های کلیدی: باکتری حل کننده سیلیکات، سیلیکات پتاسیم، علف کش، نشاکاری.

[†] این مقاله حاصل طرح مطالعاتی و تحقیقاتی نویسندگان است.

۱. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

... * نویسنده مسئول: a.aliverdi@basu.ac.ir

۲. استادیار بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.



مقدمه

چغندر قند گیاهی با مسیر فتوسنتزی سه کربنه از خانواده تاجخروسیان (*Amaranthaceae*) است که جهت استحصال شکر کشت و کار می‌شود. در سال ۱۴۰۲، ۴/۵ میلیون هکتار از اراضی جهان زیر کشت چغندر قند رفت تا ۲۸۱/۱ میلیون تن ریشه چغندر قند تولید شود. در همین سال، سهم ایران از این اراضی تقریباً ۱/۹ درصد و از این تولید تقریباً ۱/۸ درصد بود (Anonymous 2023). رشد رویشی روزتی چغندر قند از آن رقیب بسیار ضعیفی در برابر علف‌های هرز برای کسب منابع (نور، آب و مواد غذایی) ساخته است. به همین دلیل، طول دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز در چغندر قند بسیار طولانی و بستگی به روش کشت نیز دارد (Guerra et al. 2016). محققان وقتی چغندر قند را از طریق بذر پرورش دادند، طول دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز را از ۵ تا ۵۰ روز پس از سبز شدن برآورد کردند (Guerra et al. 2016)؛ اما وقتی آن را از طریق نشاکاری پرورش دادند، طول دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز بین ۱۸ تا ۴۳ روز پس از کاشت نشا برآورد کردند (Guerra et al. 2016). همچنین، عدم کنترل علف‌های هرز تا ۳۰ روز پس از رویش چغندر قند عملکرد ریشه آن را تا ۴۵ درصد کاهش داد (Guerra et al. 2016). از این رو، نشاکاری چغندر قند باعث افزایش توانایی رقابتی چغندر قند در برابر علف‌های هرز می‌شود که منجر به مدیریت کارآمدتر علف‌های هرز در مزارع چغندر قند می‌شود.

کاربرد علف‌کش‌ها یکی از روش‌های رایج کنترل علف‌های هرز در مزارع محسوب می‌شود، اما کاربرد نادرست آن‌ها به راحتی می‌تواند باعث سمیت گیاهان زراعی غیر هدف در مزارع مجاور از طریق بادبردگی قطرات پاشش یا بخارهای حاصل از آن‌ها شود. از این رو، بادبردگی علف‌کش‌ها ضمن آلوده‌سازی محیط‌زیست، به عنوان یکی از علل کاهش بهره‌وری در گیاهان زراعی است که دچار بادبردگی علف‌کش‌ها می‌گردد (Orsolin et al. 2025). چغندر قند گیاهی بسیار حساس به علف‌کش‌ها،

حتی به علف‌کش‌های اختصاصی خود می‌باشد (Li et al. 2021). در سال‌های اخیر، تأثیر نامطلوب بادبردگی علف‌کش‌های نیکوسولوفورون که علف‌کش اختصاصی ذرت (*Zea mays*) است (Wang et al. 2022) و فومسافن که علف‌کش اختصاصی سویا (*Glycine max*) است (Li et al. 2021; 2022b). بر روی چغندر قند مستند شده است. به طوری که وقوع باد بردگی به میزان ۱/۱۰۰ دوز برچسب شده از علف‌کش‌های مذکور روی چغندر قند می‌تواند باعث گیاه‌سوزی نزدیک به ۶۰ درصدی آن شود. تلاش‌هایی نیز در جهت کاهش اثرات نامطلوب ناشی از باد بردگی فومسافن با تیمار بذر یا گیاهچه چغندر قند با اسید سالسیلیک (Li et al. 2022a) و ملاتونین (Aliverdi and Mansouri 2023) انجام و مستند شده است.

علف‌کش فورام‌سولوفورون به دلیل کارایی بالا در کنترل طیف وسیعی از علف‌های هرز پهن و باریک‌برگ به طور گسترده در مزارع ذرت استفاده می‌شود. فورام‌سولوفورون مانع فعالیت آنزیم استولاکتات سینتاز در علف‌های هرز می‌شود. این آنزیم تولید اسیدهای آمینه شاخه‌دار مورد نیاز برای تولید پروتئین را تسریع می‌کند و گیاهان بدون پروتئین از گرسنگی می‌میرند (Wang et al. 2022). فورام‌سولوفورون به یک جزء مهم از برنامه کنترل علف‌های هرز در مزارع ذرت در بسیاری از کشورها تبدیل شده است و در کشور ما نیز در دسترس کشاورزان قرار دارد لذا، باد بردگی قطرات پاشش آن از مزارع ذرت به مزارع مجاور مانند چغندر قند محتمل است.

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در زمین پس از اکسیژن است و برای تغذیه گیاه ضروری نیست اما به اصطلاح عنصر مفیدی است که گیاهان آن را جذب و در بافت‌های گیاهی خود انباشت می‌کند. اگرچه تغذیه گیاهان زراعی با سیلیسیم دارای تاریخچه‌ای ۲۰۰۰ ساله است، اما تحقیقات در مورد آن سابقه ۱۰۰۰ ساله دارد که منجر به تولید سودآور بسیاری از گیاهان زراعی شده است (Datnoff and Rodrigues 2015). برای

مثال، تحقیقات انجام شده در شرایط بدون تنش نشان می‌دهد که تغذیه چغندر قند از سیلیسیم موجب افزایش عملکرد کمی و کیفی آن می‌شود (Siuda et al. 2024; de Lima et al. 2024). از این‌رو، امروزه کشاورزان برای استفاده از سیلیسیم در مزارع تمایل زیادی پیدا کردند. از طرفی دیگر، امروزه دسترسی به کودهای سیلیسیمی بر پایه نانو ذراتی در بازار افزایش یافته است. سیلیسیم در خاک به صورت سیلیکات‌ها، رس آلومینوسیلیکات یا سیلیکا یافت می‌شود که به آسانی در دسترس گیاهان نیستند. گیاهان سیلیسیم را به صورت اسید سیلیسیک (Si(OH)_4) جذب می‌کنند. پس از جذب، اسید سیلیسیک از طریق آوند چوبی منتقل می‌شود و عمدتاً به صورت دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) در دیواره‌های سلولی، به‌ویژه در دیواره‌های سلولی اپیدرمی رسوب می‌کند و اصطلاحاً لایه دوگانه کوتیکول-سیلیسیم را تشکیل می‌دهد (Datnoff and Rodrigues 2015) که احتمالاً بر جذب برگی مواد شیمیایی کشاورزی تأثیرگذار باشد ولی تاکنون این موضوع مطالعه نشده است.

بر اساس اطلاعات موجود، حداکثر مزایای تغذیه گیاهان از سیلیسیم تنها زمانی حاصل می‌شود که مواد معدنی سیلیکاتی از طریق هوازگی که یک فرآیند طولانی مدتی است و یا توسط باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات حل، به اسید سیلیسیک تبدیل و جذب گیاهان شوند. این فرآیند اخیر نسبتاً کوتاه مدت است (Datnoff and Rodrigues 2015). به همین دلیل، گزارش‌ها نشان می‌دهد که وقتی خاک تیمار شده با سیلیکات‌ها هم‌زمان با باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات نیز تلقیح شود، مزایای تغذیه سیلیسیمی برای گیاهان افزایش می‌یابد (Chaganti et al. 2023; Anitha et al. 2023; Ruban and Jeyaramraja 2022; Nath et al. 2022; Sari et al. 2022). ضمن تحقق هدف «خاک را تغذیه کنید تا خاک گیاهان را تغذیه کند» به‌عنوان یک اصل اساسی در بوم نظام‌های کشاورزی، رویکرد استفاده از باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از نانو ذرات سیلیسیمی مصنوعی باشد که

هم هزینه ساخت بالایی دارند و هم نگرانی‌هایی را در رابطه با آلودگی زیست‌محیطی و بیولوژیکی ایجاد کردند (Liu and Sayes 2022). به همین دلیل، کاوش و استفاده از باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات مورد توجه محققان قرار گرفته است (Datnoff and Rodrigues 2015). باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات با ترشح انواع مختلفی از اسیدهای آلی و معدنی باعث تغییر اسیدیته خاک می‌شوند (Raza et al. 2023). در نتیجه، ضمن تبدیل انواع سیلیکات‌ها به اسید سیلیسیک، کاهش اسیدیته خاک ناشی از فعالیت آن‌ها باعث افزایش جذب سایر عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم (Maleva et al. 2017; Raza et al. 2023) و بور (de Souza Júnior et al. 2023) نیز می‌شود. علاوه بر این، محققان متعددی گزارش کردند که تغذیه چغندر قند از سیلیسیم منجر به بهبود مقاومت آن در برابر انواع تنش‌های زیستی و غیر زیستی مانند حشرات (Amine et al. 2022; Yarahmadi et al. 2022)، عوامل بیماری‌زای گیاهی (Shabrawy and Rabboh 2020; Yassin 2015; Khan and Siddiqui 2020; Abdellatif et al. 2024) خشکی (Masri et al. 2024)، شوری (Enan and Nemeat 2024)، فلزات سنگین (Kabir et al. 2021)، آمونیوم (Olivera-Viciedo et al. 2024) و علف‌کش‌ها (Kabir et al. 2021; Saudy and Mubarak 2015; Li et al. 2022c; Soares et al. 2021; Tripathi et al. 2020) می‌شود. در ابتدا، تصور می‌شد که اثرات محافظتی سیلیسیم مکانیکی و ناشی از توانایی آن در تشکیل یک مانع فیزیکی از طریق تقویت دیواره سلولی است با این حال، تحقیقات بیشتر نشان داده است که سیلیسیم محافظت بیوشیمیایی برای گیاهان را نیز فراهم می‌کند (Otolakoski et al. 2023; Pereira et al. 2024).

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تغذیه نشاء چغندر قند از سیلیسیم بر تحمل گیاهچه پس از نشاکاری آن به تنش ناشی از باد بردگی فورام‌سولفورون انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در قالب دو آزمایش مستقل در محیط بیرون گلخانه اجرا شد.

آزمایش اول: این آزمایش به صورت فاکتوریل (2×6) در قالب طرح کاملاً تصادفی در دانشگاه بوعلی سینا در اوایل بهار ۱۴۰۲ اجرا شد. از ابتدای آزمایش، دو گروه چهارتایی از تکرارها در نظر گرفته شد که چهار تکرار اول در دو هفته و چهار تکرار دوم در چهار هفته پس از کاربرد علف‌کش برداشت شدند. عامل اول آزمایش شامل دو نوع بستر بذر برای تولید نشاء (تلقیح و عدم تلقیح با ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم از سیلیکات پتاسیم + ۱۰ میلی لیتر در کیلوگرم از مایه باکتری حل کننده سیلیکات تجاری (سونکول، هند) بود. برای تولید نشاء، گلدان‌های کاغذی ($13 \times 2 \times 1$ سانتی متر) درون جعبه‌های پلاستیکی ثابت شدند و از خاکی با بافت لومی شنی که از مزرعه مجاور جمع‌آوری شده بود برای پر کردن آن‌ها استفاده شد. ویژگی خاک شامل ۱۲ درصد رس، ۲۷ درصد سیلت، ۶۰ درصد ماسه، ۱/۲ دسی زیمنس بر متر هدایت الکتریکی، پی‌اچ ۷/۶، ۱/۱ درصد مواد آلی، ۴۲ پی‌پی‌ام فسفر، ۳۶۸ پی‌پی‌ام پتاسیم و ۰/۱ درصد نیتروژن بود. داخل هر گلدان کاغذی یک عدد بذر چغندر قند (رقم شکوفا، هیبرید تک‌جوانه مقاوم به ریزومانی و نماتد سیست است که در سال ۱۳۹۴ معرفی شد) کشت شد. گلدان‌های کاغذی به درون گلخانه با قابلیت کنترل نور، دما و رطوبت نسبی منتقل و برحسب نیاز آبیاری شدند. در مرحله سه برگه، نشاءهای به دست آمده به گلدان‌های پلاستیکی ($13 \times 13 \times 13$ سانتی متر) حاوی همان خاکی که ویژگی آن در بالا ذکر شد نشاکاری شدند. گلدان‌های پلاستیکی به فضای باز (بیرون گلخانه) منتقل و برحسب نیاز آبیاری شدند. لازم به ذکر است که خاک درون گلدان‌های پلاستیکی برای همه تیمارها یکسان و شامل عدم تلقیح با سیلیکات + باکتری حل کننده آن بود. با استناد به اینکه اغلب دوز باد بردگی علف‌کش‌ها روی گیاهان غیر هدف بسیار کمتر از دوز برچسب شده آن‌هاست (Li et al., 2022a)، عامل دوم

آزمایش شامل کاربرد شش دوز فورام‌سولفورون (صفر، ۰/۰۵، ۰/۵۶، ۰/۶۲، ۵/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم ماده مؤثره در هکتار) در نظر گرفته شد که به ترتیب برابر صفر، ۱/۱۰۰۰، ۱/۱۰۰، ۱/۱۰ و ۱ برابر دوز برچسب شده از فرمولاسیون سوسپانسیونی اکوئپ ۲۲/۵ درصد روغن قابل پخش (بایر کراپ ساینس، آلمان) بودند. تیمارهای علف‌کشی یک هفته پس از نشاکاری با استفاده از سمپاش دستی فشاری اعمال شدند. سمپاش مجهز به نازل بادبزی لبه یکنواخت 11002 بود و تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال، حجم پاشش ۲۲۰ لیتر در هکتار را فراهم ساخت. قبل از پاشش، مویان غیریونی (ترند-۹۰) با غلظت یک در هزار به محلول‌های پاشش طبق توصیه برچسب اضافه شد.

دو هفته پس از کاربرد علف‌کش، اندام هوایی بوته‌های مربوط به گروه اول تکرارها برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی از روی سطح خاک برداشت و درون فریزر در دمای منفی ۱۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. سپس، فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیلایز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز و محتوی آب اکسیژنه و مالون‌دی‌آلدئید اندازه‌گیری شد (Hasanuzzaman et al. 2020; Madany et al. 2018). چهار هفته پس از کاربرد علف‌کش، بوته‌های مربوط به گروه دوم تکرارها برای اندازه‌گیری زیست‌توده اندام هوایی و محتوی سیلیس و لیگنین (Madany et al. 2020) برداشت و در آون (۶۵ درجه سانتی‌گراد، ۴۸ ساعت) خشک شدند. داده‌ها با دستور PROC GLM در محیط نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ تجزیه و تحلیل شدند. بر اساس نتایج آزمون شاپیرو-ویلک، نرمال بودن باقیمانده‌ها تأیید گردید. هر جایی که اثر اصلی یک عامل یا برهم‌کنش دوگانه بین عوامل محرز گردید، میانگین‌های مربوطه با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

آزمایش دوم: این آزمایش هم‌زمان با آزمایش اول، ایضاً طبق مواد و روش‌های ذکر شده در بالا ولی با یک اختلافی در طرح آزمایشی به صورت فاکتوریل ($2 \times 3 \times 6$) در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. عامل اول آزمایش شامل

به دست آمده به همان روشی که قبلاً توضیح داده شد تجزیه و تحلیل آماری شدند.

نتایج و بحث

آزمایش اول: نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که در تمامی صفات اندازه‌گیری شده، اثر عوامل اصلی (نوع بستر بذر برای تولید نشاء چغندر قند و دوز علف‌کش فورام‌سولفورون) و اثر متقابل بین آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

دو نوع بستر بذر مشابه آزمایش اول برای تولید نشاء بود. عامل دوم آزمایش شامل سه سطح محلول‌پاشی با بازدارنده‌های آنزیم‌های مرتبط با تجزیه علف‌کش (آب (شاهد)، مالاتیون و ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان) بود. مالاتیون دو ساعت قبل از کاربرد علف‌کش با دوز ۲۰۰۰ گرم در هکتار و ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان دو روز قبل از کاربرد علف‌کش با دوز ۲۵۰ گرم در هکتار بکار برده شد (Yang et al. 2023). عامل سوم آزمایش شامل کاربرد شش دوز از فورام‌سولفورون مشابه آزمایش اول بود. پنج هفته پس از کاربرد علف‌کش، بوته‌ها برای اندازه‌گیری زیست‌توده اندام هوایی برداشت شدند. داده‌های

جدول ۱ تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد مطالعه در چغندر قند.

Table 1 Analysis of variance (Mean of square) of studied traits in sugar beet

منابع تغییر	df	وزن خشک	محتوی سیلیسیم	محتوی لیگنین	فعالیت آنزیم پال	فعالیت SOD آنزیم سود	فعالیت آنزیم کات	محتوی آب اکسیژنه	محتوی مالون-دی‌آلدئید
Source of variation		Dry weight	Silicon content	Lignin content	PAL activity	SOD activity	CAT activity	H ₂ O ₂ content	MDA content
Seedbed (S) بستر بذر	1	4.51**	2027052.00**	185.65**	21.33**	112737.34**	8758.80**	112737.34**	95.65**
Herbicide (H) علف‌کش	5	5.66**	32435.73**	10.34**	1.47**	26149.54**	3009.28**	26149.54**	15.90**
S × H	5	0.46**	10504.00**	0.81**	0.39**	4707.81**	245.71**	4707.81**	2.48**
Error	36	0.07	416.66	0.04	0.01	878.46	16.00	86.64	0.03
CV (%)	-	8.56	4.65	3.89	4.53	11.43	7.32	3.58	3.67

** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

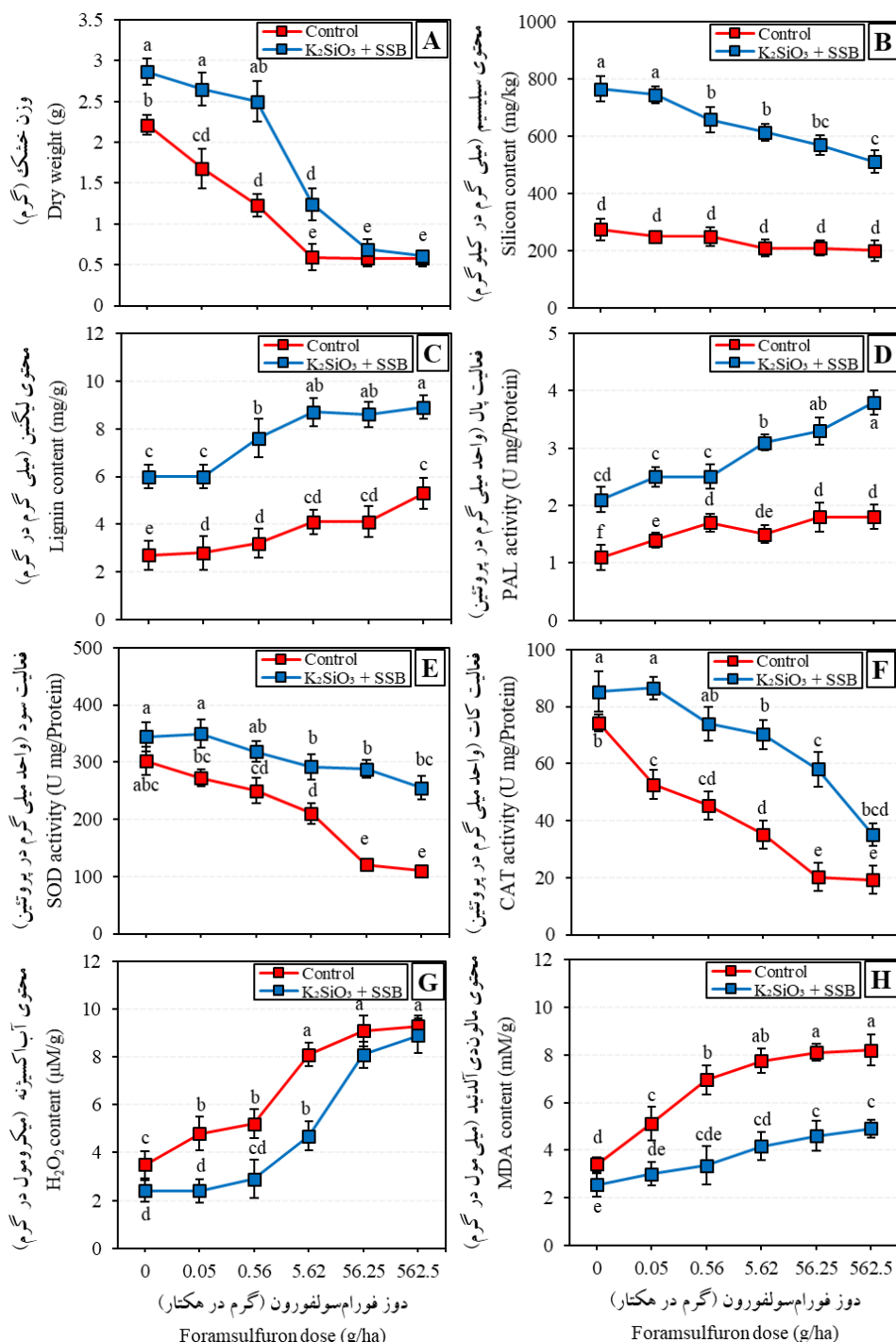
مخفف‌ها: پال: فنیل‌آلانیل آمونیا لیاز؛ سود: سوپراکسید دیسموتاز؛ کات: کاتالاز.

** shows significance at 1% probability level based on Duncan's multiple range test.

Abbreviations: PAL: phenylalanine ammonia-lyase; SOD: superoxide dismutase; CAT: catalase; MDA: Malondialdehyde.

به‌طور مشابه، افزایش حدوداً ۲۰ درصدی در عملکرد ریشه چغندر قند از طریق محلول‌پاشی با سیلیسیم قبلاً گزارش شده است (Siuda et al. 2024) که احتمالاً به سبب بهبود شرایط تغذیه‌ای چغندر قند از سایر عناصر غذایی رخ داده است. در تحقیقات قبلی ثابت شده است که فعالیت باکتری حل‌کننده سیلیکات برای تبدیل انواع سیلیکات‌ها به اسید سیلیسیک سبب وقوع یک کاهش جزئی در اسیدیته خاک می‌شود؛ که در نتیجه آن، جذب برخی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم (Maleva et al. 2017; Raza et al. 2023) و بور (de Souza Júnior et al. 2022) افزایش می‌یابد.

تحت شرایط دوز صفر فورام‌سولفورون، تمامی صفات اندازه‌گیری شده (به‌جز فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع بستر بذر برای تولید نشاء قرار گرفتند. به‌طوری که تلقیح بستر بذر تولید نشاء با سیلیکات پتاسیم + باکتری حل‌کننده آن موجب افزایش ۲۸/۴ درصدی وزن خشک اندام هوایی چغندر قند (شکل ۱؛ A)، افزایش ۱۷۸/۱ درصدی محتوی سیلیسیم (شکل ۱؛ B)، افزایش ۱۲۲/۲ درصدی محتوی لیگنین (شکل ۱؛ C)، افزایش ۹۰/۹ درصدی فعالیت فنیل‌آلانیل آمونیا لیاز (شکل ۱؛ D)، افزایش ۱۴/۵ درصدی فعالیت کاتالاز (شکل ۱؛ F)، کاهش ۱۵/۴ درصدی محتوی آب اکسیژنه (شکل ۱؛ G) و کاهش ۱۱/۷ درصدی محتوی مالون‌دی‌آلدئید (شکل ۱؛ H) شد.



شکل ۱ تأثیر کاربرد سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3) + باکتری حل کننده سیلیکات (SSB) در بستر بذر نشاء چغندر قند و کاربرد فورام سولفورون بر صفات رشدی و فیزیولوژیکی چغندر قند.

پال: فنیل آلانین آمونیا لیااز؛ سود: سوپراکسید دیسموتاز؛ کات: کاتالاز. میانگین ها با حرف مشترک طبق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف آماری ندارند. میله های خطا انحراف از معیار هستند.

Fig. 1 Effects of potassium silicate (K_2SiO_3) + silicate solubilizing bacteria (SSB) applied in sugar beet transplant seedbeds and foramsulfuron application on the growth and physiological traits of sugar beet. PAL: phenylalanine ammonia-lyase; SOD: superoxide dismutase; CAT: catalase. Means with similar letters are not statistically different based on Duncan's test at the 5% probability level. Error bars are the standard deviation.

نتایج نشان داد که چغندر قند به فورام سولفورون فوق العاده حساس است به طوری که تیمار چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم با ۰/۰۵ گرم فورام سولفورون در هکتار سبب کاهش معنی دار وزن خشک اندام هوایی چغندر قند (۲۳/۹ درصد) شد. تحت همین شرایط، وزن خشک اندام هوایی چغندر قند به طور پیوسته با افزایش دوز فورام سولفورون کاهش یافت. کاربرد سه دوز آخر فورام سولفورون (۵/۶۲، ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم ماده موثره در هکتار) برای چغندر قند کاملاً مرگ آور بود و موجب گیاه سوزی کامل آن شد. نتایج مشابهی به وسیله محققان قبلی مشاهده شده است (Wang et al. 2022)؛ به طوری که آن ها گزارش کردند که تیمار چغندر قند در مرحله دو برگگی با ۱/۰۰ دوز برچسب شده فورام سولفورون سبب کاهش بیش از ۷۰ درصدی در وزن خشک بوته چغندر قند شد. در تحقیق حاضر، وزن خشک اندام هوایی چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم و تیمار شده با ۰/۰۵ و ۰/۵۶ گرم فورام سولفورون در هکتار در مقایسه با شاهد (تغذیه نکرده از سیلیسیم و تیمار نشده با علف کش) از نظر آماری تفاوتی نداشت. همچنین، به جز در شرایط تیمارهای ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم فورام سولفورون در هکتار، در سایر سطوح عامل علف کشی وزن خشک اندام هوایی چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم به طور معنی داری بیشتر از چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم بود (شکل ۱؛ A). این نتایج نشان دهنده افزایش تحمل چغندر قند به فورام سولفورون به دلیل تغذیه از سیلیسیم می باشد. تحقیقات انجام شده با سایر گیاهان و علف کش ها نیز به افزایش تحمل گیاهان تغذیه کرده از سیلیسیم به علف کش اشاره دارند. برای مثال، محققان نشان دادند که سیلیسیم می تواند گیاه سوزی ناشی از علف کش های فنوکساپروپ-پی-اتیل روی گندم (*Triticum aestivum*)، (Saudy and Mubarak 2015)، پندیمتالین، روی زنجبیل (*Zingiber officinale*) (Li et al. 2022c)، گلایفوسیت روی گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) (Soares et al. 2021)، بوتاکلر روی برنج (*Oryza sativa*) (Jain et al. 2020) و مت سولفورون متیل روی گندم (et al. 2021) را کاهش دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده استنباط شد که محتوی سیلیسیم در چغندر قندهای تیمار نشده با سیلیکات پتاسیم+ باکتری حل کننده آن تحت تأثیر کاربرد فورام سولفورون قرار نگرفت ولی محتوی سیلیسیم در چغندر قندهای تیمار شده با سیلیکات پتاسیم+ باکتری حل کننده آن به طور پیوسته با افزایش دوز فورام سولفورون کاهش یافت (شکل ۱؛ B). نتایج نشان داد که تحت هر شرایطی از تغذیه نشاء چغندر قند از سیلیسیم، روند تغییرات محتوی لیگنین به صورت مثبت وابسته به دوز فورام سولفورون بود. همچنین، در هر سطحی از دوز فورام سولفورون، محتوی لیگنین چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم به طور معنی داری بیشتر از محتوی لیگنین چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم بود (شکل ۱؛ C). در رابطه با فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیا، نتایجی مشابه با نتایج محتوی لیگنین مشاهده شد (شکل ۱؛ D). آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیا تبدیل ال-فنیل آلانین را به ترانس-سینامیک اسید تسریع می کند که پیش ماده تولید لیگنین و انواع فلاونوئیدها می باشد. از این رو، با افزایش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیا، انتظار بر این است که محتوی لیگنین نیز افزایش یابد. چندین مطالعه نشان دادند که آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیا که در بیوسنتز لیگنین دخیل است، در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم فعال تر است و موجبات افزایش محتوی لیگنین در دیواره های سلولی اپیدرمی گیاهان مختلف را فراهم می سازد (Wang et al. 2017). کاهش سمیت فورام سولفورون در چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم (شکل ۱؛ A) ممکن است به دلیل لیگنینی تر شدن دیواره سلولی باشد چون در یک گزارشی آمده است که هر چقدر دیواره سلولی اپیدرم گیاهان بیشتر لیگنینی باشد، مولکول علف کش کمتری قادر است از آن عبور کند و به دلیل جذب کمتر علف کش، گیاه تحمل بیشتری به علف کش پیدا می کند (Barak et al. 1983).

نتایج نشان داد که تحت هر شرایطی از تغذیه نشاء چغندر قند از سیلیسیم، روند تغییرات فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به صورت منفی وابسته به دوز فورام سولفورون بود. همچنین، در هر سطحی از دوز فورام سولفورون (به جز شاهد بدون علف کش)، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در چغندر قند تغذیه کرده از

سیلیسیم به طور معنی داری بیشتر از فعالیت آن آنزیم در چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم بود (شکل ۱؛ E). در رابطه با فعالیت آنزیم کاتالاز، نتایجی مشابه با فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مشاهده شد، اما با این تفاوت که در تیمار شاهد بدون علف کش فعالیت آنزیم کاتالاز در چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم به طور معنی داری بیشتر از فعالیت آن آنزیم در چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم بود (شکل ۱؛ F). در چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم، محتوی آب اکسیژنه (H_2O_2) با کاربرد ۰/۰۵ گرم فورام سولفورون در هکتار به طور معنی داری افزایش یافت (تا ۴/۸ میکرومول بر گرم). در مقابل، در چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم، محتوی آب اکسیژنه با کاربرد ۵/۶۲ گرم فورام سولفورون در هکتار به طور معنی داری تا ۴/۷ میکرومول بر گرم افزایش یافت (شکل ۱؛ G). نتایج نشان داد که تحت هر شرایطی از تغذیه نشاء چغندر قند از سیلیسیم، روند تغییرات محتوی مالون دی آلدئید به صورت مثبت وابسته به دوز فورام سولفورون بود. همچنین، در هر سطحی از دوز فورام سولفورون، محتوی مالون دی آلدئید در چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم به طور معنی داری بیشتر از محتوی مالون دی آلدئید در چغندر قند تغذیه نکرده از سیلیسیم بود (شکل ۱؛ H). از این رو، بالاترین میزان مالون دی آلدئید در چغندر قندهایی مشاهده شد که با ۵/۶۲، ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم فورام سولفورون در هکتار تیمار شده بودند. پاسخ اولیه گیاهان به

تنش علف کشی، تولید رادیکال های آزاد اکسیژن مثل $O_2^{\cdot -}$ ، H_2O_2 و $OH^{\cdot}$ است که منجر به آسیب اکسیداتیو در گیاهان می شود. گیاهان می توانند رادیکال های آزاد اکسیژن را به صورت آنزیمی و غیر آنزیمی مهار کنند تا از آسیب اکسیداتیو نجات یابند. دو تا از آنزیم های مهار کننده رادیکال های آزاد اکسیژن در گیاهان عبارتند از آنزیم سوپراکسید دیسموتاز که $O_2^{\cdot -}$ را به H_2O_2 و O_2 تجزیه می کند و آنزیم کاتالاز که H_2O_2 را به H_2O و O_2 تجزیه می کند. چندین مطالعه به تقویت سیستم مهار کننده رادیکال های آزاد اکسیژن در گیاهان تغذیه کرده از سیلیسیم پرداخته اند که موجب کاهش تنش ناشی از علف کش ها در گیاهان شده است (Saudy and Mubarak 2015; Jain et al. 2021; Li et al. 2022c). به طور مشابه، یافته های ما نیز نشان می دهد که تقویت ظرفیت مهار رادیکال های آزاد اکسیژن در چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم منجر به تحمل نسبی آن به فورام سولفورون شده است.

آزمایش دوم: نتایج تجزیه و تحلیل داده ها نشان داد که اثر عوامل اصلی (نوع بستر بذر برای تولید نشاء چغندر قند، کاربرد بازدارنده های آنزیمی و دوز علف کش فورام سولفورون) و اثر متقابل بین آن ها بر وزن خشک چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۲).

جدول ۲ تجزیه واریانس (میانگین مربعات) وزن خشک اندام هوایی چغندر قند.
Table 2 Analysis of variance of shoot dry weight of sugar beet.

منابع تغییر	df	میانگین مربعات
Source of variation		Ms
Seedbed (S) بستر بذر	1	7.63**
Enzyme inhibitor (E) بازدارنده آنزیمی	2	1.76**
Herbicide (H) علف کش	5	13.26**
S × E	2	0.26**
S × H	5	0.75**
E × H	10	0.33**
S × E × H	10	0.05**
Error	108	0.001
CV (%)	-	3.27

** نشان دهنده معنی داری در سطوح احتمال ۱ درصد بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن است.

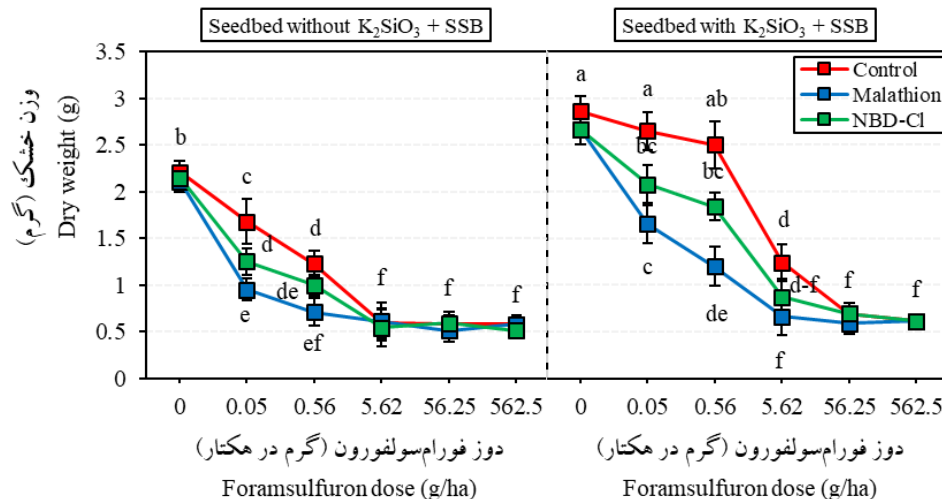
** shows significance at 1% probability level based on Duncan's multiple range test.

(شکل ۲). وزن خشک اندام هوایی چغندر قند به طور پیوسته با افزایش دوز فورام سولفورون کاهش یافت و در تیمارها علف کشی با ۵/۶۲، ۵۶/۲۵ و ۵۶۲/۵ گرم فورام سولفورون در هکتار به

مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که در هر شرایطی از تغذیه نشاء چغندر قند از سیلیسیم و تحت شرایط بدون کاربرد علف کش، کاربرد بازدارنده های آنزیمی تأثیری بر رشد چغندر قند نداشت

قبل از کاربرد فورام سولفورون وزن خشک چغندر قند کاهش یافت. تأثیر پیش تیمار با بازدارنده آنزیم گلوکاتایون اس-ترانسفراز (۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان) بیشتر از پیش تیمار با بازدارنده آنزیم سیتوکروم P_{۴۵} مونواکسیژناز (مالاتیون) بود.

حداقل خود رسید. در تیمارهای ۰/۵ و ۰/۵۶ گرم فورام سولفورون در هکتار، تأثیر کاربرد بازدارنده‌های آنزیمی قبل از کاربرد علف کش بر وزن خشک چغندر قند بهتر قابل رؤیت بود و به طور کلی، با پیش تیمار چغندر قند با بازدارنده‌های آنزیمی



شکل ۲ تأثیر کاربرد سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3) + باکتری حل کننده سیلیکات (SSB) در بستر بذر نشاء چغندر قند و پیش تیمار آن قبل از کاربرد فورام سولفورون با مالاتیون و ۴-کلرو-۷-نیتروبنزوفورازان (NBD-Cl) بر وزن خشک اندام هوایی چغندر قند. میانگین‌ها با حرف مشترک طبق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف آماری ندارند. میله‌های خطا انحراف از معیار هستند.

Fig. 2 Effect of potassium silicate (K_2SiO_3) + silicate solubilizing bacteria (SSB) applied in the sugar beet transplant seedbed, along with pretreatment with malathion and 4-chloro-7-nitrobenzofurazan (NBD-Cl) prior to foramsulfuron application, on the shoot dry weight of sugar beet.

Means followed by the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level. Error bars represent standard deviations.

آنزیم است. اگر رادیکال‌های آزاد اکسیژن تولید شده توسط علف کش در گیاه به سرعت حذف شوند و یا آنزیم‌های دخیل در متابولیسم برای تجزیه سریع علف کش فعال تر باشند، آسیب کمتری به گیاه وارد خواهد آمد (de Carvalho et al. 2009). از این رو، به نظر می‌رسد که تنش اکسیداتیو ناشی از فورام سولفورون به چغندر قند به حدی بالاست که امکان متابولیسم آن میسر نمی‌شود. با کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از فورام سولفورون از طریق تغذیه چغندر قند از سیلیسیم، این امکان تا حدی میسر شد ولی برای بقاء گیاه تحت دوزهای بالای فورام سولفورون کافی نبود.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که چغندر قند به بادرگی فورام سولفورون بسیار حساس است؛ به طوری که کاربرد ۰/۵ گرم

جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های فوق همراه با افزایش تنش اکسیداتیو علف کش (که با کاهش رشد نمایان می‌شود) نشان دهنده‌ی امکان متابولیسم فورام سولفورون در چغندر قند است. متابولیسم علف کش‌ها که توسط آن مولکول‌های علف کش تجزیه و به ترکیبات کمتر سمی تبدیل می‌شوند، معمولاً در یک فرآیند چهار فازی در گیاهان اتفاق می‌افتد: در فاز اول، علف کش اکسید، احیاء یا هیدرولیز می‌شود. در فاز دوم، علف کش یا متابولیت‌های مشتق شده از فاز اول به قندها، اسیدهای آمینه یا گلوکاتایون الحاق می‌شود. در فاز سوم، متابولیت‌های مشتق شده از فاز دوم به صورت ثانویه الحاق و به واکوئل منتقل می‌شوند. در فاز چهارم، متابولیت‌ها در اجزای دیواره سلولی ادغام می‌شوند. انواع آنزیم‌ها مسئول واکنش در مراحل مختلف متابولیسم هستند. در فاز دوم، مهم‌ترین آنزیم درگیر سیتوکروم P_{۴۵} مونواکسیژناز است. در فازهای دوم و سوم، گلوکاتایون اس-ترانسفراز مهم‌ترین

فورام- سولفورون در هکتار (که برابر ۱/۱۰۰۰۰ دوز توصیه شده برای کاربرد در مزارع ذرت است) روی چغندر قند سبب کاهش معنی- دار وزن خشک بوته (۲۳/۹ درصد) شد. آنزیم های دخیل در متابولیسم فورام- سولفورون در چغندر قند حضور دارند ولی تنش اکسیداتیو ناشی از فورام- سولفورون به چغندر قند به حدی بالاست که امکان متابولیسم آن میسر نشد. چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم تحمل بیشتری به تنش ناشی از بادر دگی فورام سولفورون پیدا می- کند. به طوری که چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم توانست مقادیر علف- کش تا ۱/۱۰۰۰ دوز توصیه شده برای کاربرد در مزارع ذرت را تحمل کند. تغذیه چغندر قند از سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم- های دخیل در متابولیسم

فورام- سولفورون در هکتار (که برابر ۱/۱۰۰۰۰ دوز توصیه شده برای کاربرد در مزارع ذرت است) روی چغندر قند سبب کاهش معنی- دار وزن خشک بوته (۲۳/۹ درصد) شد. آنزیم های دخیل در متابولیسم فورام- سولفورون در چغندر قند حضور دارند ولی تنش اکسیداتیو ناشی از فورام- سولفورون به چغندر قند به حدی بالاست که امکان متابولیسم آن میسر نشد. چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم تحمل بیشتری به تنش ناشی از بادر دگی فورام سولفورون پیدا می- کند. به طوری که چغندر قند تغذیه کرده از سیلیسیم توانست مقادیر علف- کش تا ۱/۱۰۰۰ دوز توصیه شده برای کاربرد در مزارع ذرت را تحمل کند. تغذیه چغندر قند از سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم- های دخیل در متابولیسم

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

بخشی از هزینه های اجرایی این پژوهش توسط گرت دریافت شده از سوی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا همدان تأمین گردید که بدین وسیله صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می آید.

References

منابع مورد استفاده

- Abdellatif HIA, Bakeer ART, Ali AM, Ahmed HMH. Effect of some alternative control compounds to fungicides on sugar beet cercospora leaf spot under greenhouse conditions. *Fayoum Journal of Agricultural Research and Development*. 2024; 38: 352–69. Doi: <https://doi.org/10.21608/fjard.2024.277771.1034>.
- Aliverdi A, Mansouri H. Effect of melatonin on the stress caused by fomesafen on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under greenhouse conditions. *Journal of Sugar Beet*. 2023; 39: 77–90. Doi: <https://doi.org/10.22092/jsb.2024.364814.1344>
- Amine HM, Hamed SA, Anbar HA, Shalaby GA, Khazal NM, Abd El-Rahman HA. Effect of different silica sources on cotton leafworm population in sugar beet plants, and their influence on sugar beet yield. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2022; 10: 55–60. Doi: <https://doi.org/10.22271/j.ento.2022.v10.i3a.9011>
- Anitha R, Vanitha K, Tamilselvi C, Jeyakumar P, Vijayalakshmi D, Yuvaraj M, Nageswari R, Dhanushkodi V, Cyriac J. Potential applications of silicate solubilizing bacteria and potassium silicate on sugarcane crop under drought condition. *Silicon*. 2023; 15: 6879–87. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02534-z>
- Anonymous. FAO. 2023. www.fao.org/faostat/en/#data/QC
- Barak E, Jacoby B, Dinoor A. Adsorption of systemic pesticides on ground stems and in the apoplastic pathway of stems, as related to lignification and lipophilicity of the pesticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 1983; 20: 194–202. Doi: [https://doi.org/10.1016/0048-3575\(83\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0048-3575(83)90024-X)
- Chaganti C, Phule AS, Chandran LP, Sonth B, Kavuru VPB, Govindannagari R, Sundaram RM. Silicate solubilizing and plant growth promoting bacteria interact with biogenic silica to impart heat stress tolerance in rice by modulating physiology and gene expression. *Frontiers in Microbiology*. 2023; 14: 1168415. Doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1168415>
- Datnoff LE, Rodrigues FA. History of silicon and plant disease. pp. 1–5. In: Rodrigues F, Datnoff L (Eds.) *Silicon and Plant Diseases*. Springer, London. 2015; Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_1
- de Carvalho SJP, Nicolai M, Ferreira RR, de Oliveira Figueira AV, Christoffoleti PJ. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. *Scientia Agricola*. 2009; 66: 136–42. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100020>
- de Lima RB, de Paiva LG, Pereira NAE, Morais EG, Silva BM, Grangeiro LCGC, Costa RMCC. Agronomic performance of beetroot as a function of silicon application. *Revista Ciência Agronômica*. 2024; 55: e20218643. Doi: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240040>
- de Souza Júnior JP, de Mello Prado R, Campos CNS, Oliveira DF, Cazetta JO, Detoni JA. Silicon foliar spraying in the reproductive stage of cotton plays an equivalent role to boron in increasing yield, and combined boron-silicon application, without polymerization, increases fiber quality. *Industrial Crops and Products*. 2022; 182: 114888. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114888>

- Enan SAAM, Nemeat Alla HEA. Alleviation of salt stress on sugar beet by nitrogen, spirulina algae extract and potassium silicate. *Menoufia Journal of Plant Production*. 2024; 9: 211–28. Doi: <https://doi.org/10.21608/mjppf.2024.280910.1049>
- Guerra N, da Silva ÉSB, Tavares AM, Carlet A, de Oliveira Neto AM. Weed interference in beet crop in direct sowing and transplanted. *Revista Agro@mbiente On-line*. 2016; 10: 235–42. Doi: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i3.3279>
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Anee TI, Khan MIR, Fujita M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*. 2018; 115: 50–7. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.12.006>
- Jain S, Rai P, Singh J, Singh VP, Prasad R, Rana S, Deshmukh R, Tripathi DK, Sharma S. Exogenous addition of silicon alleviates metsulfuron methyl induced stress in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 167: 705–12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.031>
- Kabir AH, Das U, Rahman MA, Lee KW. Silicon induces metalochaperone-driven cadmium binding to the cell wall and restores redox status through elevated glutathione in Cd-stressed sugar beet. *Physiologia Plantarum*. 2021; 173: 352–368. Doi: <https://doi.org/10.1111/ppl.13424>
- Khan MR, Siddiqui ZA. Use of silicon dioxide nanoparticles for the management of *Meloidogyne incognita*, *Pectobacterium betavascularum*, and *Rhizoctonia solani* disease complex of beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Scientia Horticulturae*. 2020; 265: 109211. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109211>
- Li XF, Du JY, Song BQ, Zhang X, Riaz M. Fomesafen drift affects morphophysiology of sugar beet. *Chemosphere*. 2021; 287: 132073. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132073>
- Li XF, Riaz M, Song BQ, Liang XL, Liu HJ. Exogenous salicylic acid alleviates fomesafen toxicity by improving photosynthetic characteristics and antioxidant defense system in sugar beet. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022a; 238: 113587. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113587>
- Li XF, Riaz M, Song BQ, Liu HJ. Phytotoxicity response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seedlings to herbicide fomesafen in soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022b; 239: 113628. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113628>
- Li Y, Wang K, Kong Y, Lv Y, Xu K. Toxicity and tissue accumulation characteristics of the herbicide pendimethalin under silicon application in ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Environmental Science and Pollution Research*. 2022c; 29: 25263–75. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17740-8>
- Liu JY, Sayes CM. A toxicological profile of silica nanoparticles. *Toxicology Research*. 2022; 11: 565–582. Doi: <https://doi.org/10.1093/toxres/tfac038>
- Madany MMY, Saleh AM, Habeeb TH, Hozzein WN, AbdElgawad H. Silicon dioxide nanoparticles alleviate the threats of broomrape infection in tomato by inducing cell wall fortification and modulating ROS homeostasis. *Environmental Science: Nano*. 2020; 7: 1415–1430. Doi: <https://doi.org/10.1039/C9EN01255A>
- Maleva M, Borisova G, Koshcheeva O, Sinenko O. Biofertilizer based on silicate solubilizing bacteria improves photosynthetic function of *Brassica juncea*. *AGROFOR International Journal*. 2017; 2: 13–19. Doi: <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703013M>
- Masri MI, HobAllah AA, Yacoub IH, Mohamed EM. Improving drought tolerance in sugar beet by foliar application of anti-stress compounds. *Egyptian Journal of Agronomy*. 2024; 46: 295–314. Doi: <https://doi.org/10.21608/agro.2024.299928.1455>
- Nath D, Selvi D, Thiyageshwari S, Anandham R, Venkatesan K. Silicon sources and bacterial inoculants on growth parameters, leaf yield, quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.) and soil adsorbed silicon in sandy loamy soil. *International Journal of Plant and Soil Science*. 2022; 34: 194–208. Doi: <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i2231372>
- Olivera-Viciedo D, Aguilar DS, de Mello Prado R, Calzada KP, Hurtado AC, de Cássia Piccolo M, Soares MB, Toledo RL, Alves GR, Ferreira D, Rodrigues R, de Moura Zanine A. Silicon-mediated adjustments in c:n:p ratios for improved beetroot yield under ammonium-induced stress. *Agronomy*. 2024; 14: 1104. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy14061104>
- Orsolin da Silva DR, Zeni R, Basso CJ. Response of trinexapac-ethyl-treated wheat to glyphosate drift. *Science and Technology*. 2025; 18: 15–22. Doi: <https://doi.org/10.18779/cyt.v18i1.820>
- Otolakoski MG, Viegas BG, Bagio BZ, Casa Blum MM, Suzana-Milan CS, Huzar-Novakowski J. Reduction of the severity of Asian soybean rust with foliar application of silicon dioxide. *Crop Protection*. 2023; 173: 106387. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106387>

- Pereira S, Monteiro A, Moutinho-Pereira J, Dinis L-T. Silicon, an emergent strategy to lighten the effects of (a)biotic stresses on crops: a review. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2024; 210: e12762. Doi: <https://doi.org/10.1111/jac.12762>
- Raza T, Abbas M, Amna Imran S, Khan MY, Rebi A, Rafe-Rad Z, Eash NS. Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. *Silicon*. 2023; 15: 3797–817. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02302-z>
- Ruban P, Jeyaramraja PR. Isolation and characterization of a silicate-solubilizing bacterial strain associated with the roots of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Indonesian Journal of Agriculture and Environmental Analytics*. 2023; 2: 47–54. Doi: <https://doi.org/10.55927/ijaea.v2i1.3589>
- Sari IP, Lestari Y, Hamim H, Santi LP. Application of silica solubilizing bacteria to improve the water use efficiency of maize. *Menara Perkebunan*. 2022; 90: 71–80. Doi: <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v90i1.493>
- Saudy HS, Mubarak M. Mitigating the detrimental impacts of nitrogen deficit and fenoxaprop-p-ethyl herbicide on wheat using silicon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2015; 46: 897–907. Doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1011753>
- Shabrawy E, Rabboh M. Effect of foliar spraying with micronutrients, elicitors, silicon salts, and fertilizers on powdery mildew of sugar beet. *Menoufia Journal of Plant Protection*. 2020; 5: 123–41. Doi: <https://doi.org/10.21608/mjapam.2020.122567>
- Siuda A, Artyszak A, Gozdowski D, Ahmad Z. Effect of form of silicon and the timing of a single foliar application on sugar beet yield. *Agriculture*. 2024; 14: 86. Doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010086>
- Soares C, Nadais P, Sousa B, Pinto E, Ferreira IMPLVO, Pereira R, Fidalgo F. Silicon improves the redox homeostasis to alleviate glyphosate toxicity in tomato plants—are nanomaterials relevant? *Antioxidants* (Basel). 2021; 10: 1320. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10081320>
- Tripathi DK, Varma RK, Singh S, Sachan M, Guerriero G, Kushwaha BK, Bhardwaj S, Sahi R. Silicon tackles butachlor toxicity in rice seedlings by regulating anatomical characteristics, ascorbate-glutathione cycle, proline metabolism and levels of nutrients. *Scientific Reports*. 2020; 10: 14078. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65124-8>
- Wang L, Riaz M, Song B, Song X, Huang W, Bai X, Zhao X. Study on phytotoxicity evaluation and physiological properties of nicosulfuron on sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 998867. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.998867>
- Wang M, Gao L, Dong S, Sun Y, Shen Q, Guo S. Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8: 701. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
- Yang C, Wang H, Duan Y, Bei F, Jia S, Wang J, Wang H, Liu W. Enhanced herbicide metabolism and target-site mutations confer multiple resistance to fomesafen and nicosulfuron in *Amaranthus retroflexus* L. *Biology*. 2023; 12: 592. Doi: <https://doi.org/10.3390/biology12040592>
- Yarahmadi F, Dinarvan N, Farkhari M. Induction of sugar beet resistance to *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) under field conditions. *Sugar Tech*. 2022; 24: 1845–50. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01156-w>
- Yassin MA. Efficacy of some silicon compounds on the sugar beet pathogen, *Rhizoctonia solani*. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2015; 24: 3189–96.