Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research
Vol. 41, No. 2, Page 183-200 (2025)

DOI:10.22092/ijmapr.2024.364831.3420

Effects of potassium silicate foliar application on phytochemical, morphological, and physiological characteristics of *Solidago virgaurea* L. under salt stress

Nasrin Biyabani[1], Vahid Abdossi[2*], Marzieh Ghanbari Jahromi[1]

1. Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2*. Corresponding author, Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, E-mail: abdossi@yahoo.com

Received: January 2024 Revised: November 2024 Accepted: November 2024

Abstract

Background and objectives: Salinity stress is one of the most significant abiotic stresses that impede agricultural production. It is often accompanied by oxidative stress due to the generation of reactive oxygen species (ROS). Mitigating the effects of environmental stress on plants through the use of growth-promoting compounds is of particular importance. In this context, silicon sources, such as potassium silicate, play a critical role in modulating salinity stress in plants. By enhancing plant resistance to salt stress, potassium silicate can contribute to improved growth and performance in areas with saline soils. These compounds promote cellular ion balance under adverse conditions and improve water uptake and retention in plants, thereby reducing ion leakage and the detrimental effects of salinity stress.

Methodology: The present study aimed to investigate the effect of potassium silicate on the growth and physiological and biochemical characteristics of goldenrod in a factorial design based on a completely randomized design with the factor of salinity stress at three levels (0, 60, and 120 mM) and foliar application of potassium silicate at three levels (0, 50, and 100 mg/l) under greenhouse conditions. Foliar application was carried out three times at 15-day intervals. The first foliar application was performed at the 4-leaf stage. After the second foliar application, salinity stress was induced by applying 200 milliliters of sodium chloride solution to each pot for 40 days. To prevent salt accumulation in the pots, all pots were rinsed with non-saline water after every 4 irrigations with saline water. The morphological variables investigated include wet and dry weight of shoots and roots and plant height and other traits including plant pigments (chlorophyll a, b and total), relative leaf water content, ion leakage rate, proline, sodium and potassium absorption rate of roots and it was the aerial parts that were measured in the middle of the golden grass flowering period.

Results: Salinity stress caused yield reduction, and potassium silicate moderated the negative effects of salinity stress and improved plant growth conditions. The evaluations showed that the salinity of 120 mM caused a decrease in the fresh weight of shoot (28%), dry weight of shoot (29%), fresh weight of root (38%), dry weight of root (37%), total chlorophyll (40%), the relative content of leaf water (17%), root potassium (14%) and leaf potassium (16%) and increased ion leakage (23%), proline (13%), root sodium (256%), sodium leaves (325%). Potassium silicate, especially 100 mg/l, moderated salinity stress by increasing plant weight, chlorophyll, leaf water, and potassium content in leaves and roots and reducing sodium accumulation in leaves and roots

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

and ion leakage.
Conclusion: The general results of the research showed that increasing the intensity of salinity stress had negative effects on the growth and functional characteristics of golden grass and potassium silicate in the volume of 50 to 100 mM caused the adjustment of salinity stress by increasing the quantitative and qualitative performance (biochemical and phytochemical) of golden grass. Therefore, to cultivate the golden grass plant, it should be noted that the water or soil used does not contain salts such as sodium and chlorine, or soil conditioners or growth stimulants should be used for the production and cultivation of this plant.

Keywords: Salinity stress, proline, growth promoter, golden grass.

تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی *Solidago virgaurea* L. تحت تنش شوری

نسرین بیابانی[۱]، وحید عبدوسی[۲*] و مرضیه قنبری‌جهرمی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، پست‌الکترونیک: abdossi@yahoo.com

۳- استادیار، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۴۰۲ تاریخ اصلاح نهایی: آبان ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: شوری، یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی است که تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد و معمولاً با استرس اکسیداتیو به دلیل تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) همراه است. استفاده از ترکیب‌های محرک رشد به منظور کاهش اثر تنش‌های محیطی در گیاهان اهمیت خاصی دارد. منابع سیلیسیم مانند سیلیکات پتاسیم نقش مهمی در تعدیل تنش شوری در گیاهان دارد. سیلیکات پتاسیم با افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش شوری، می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد گیاهان در مناطق با خاک‌های شور کمک کند. این ترکیب‌ها موجب تعادل یونی در سلول‌ها در شرایط نامساعد شده و با بهبود جذب و نگهداری آب در گیاه، نشت یونی و اثر منفی تنش شوری را کاهش می‌دهند.

مواد و روش‌ها: این تحقیق به منظور بررسی تأثیر سیلیکات پتاسیم بر رشد و خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی علف طلایی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با فاکتور تنش شوری در سه سطح (۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و محلول‌پاشی با سیلیکات پتاسیم در سه سطح (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در شرایط گلخانه انجام شد. محلول‌پاشی سه بار با فواصل ۱۵ روز اعمال گردید. اولین محلول‌پاشی در مرحله ۴ برگی و پس از دومین مرحله محلول‌پاشی برگی، تنش شوری با حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول کلرید سدیم برای هر گلدان به مدت ۴۰ روز انجام گردید. به منظور عدم تجمع نمک در گلدان‌ها، بعد از هر ۴ مرتبه آبیاری با آب شور تمامی گلدان‌ها یکبار با آب (بدون شوری) آبشویی شدند. متغیرهای مورفولوژیکی مورد بررسی شامل وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و ارتفاع بوته و سایر صفات شامل رنگیزه‌های گیاهی (کلروفیل a، b و کل)، محتوای نسبی آب برگ، میزان نشت یونی، پرولین میزان جذب سدیم و پتاسیم ریشه و اندام هوایی بود که در اواسط دوره گلدهی علف طلایی، اندازه‌گیری گردیدند.

نتایج: تنش شوری سبب کاهش عملکرد و سیلیکات پتاسیم سبب تعدیل اثرهای منفی تنش شوری و بهبود شرایط رشد گیاه شد. ارزیابی‌ها نشان داد که شوری ۱۲۰ میلی‌مولار سبب کاهش وزن تر اندام هوایی (۲۸ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۲۹ درصد)، وزن تر ریشه (۳۸ درصد)، وزن خشک ریشه (۳۷ درصد)، کلروفیل کل (۴۰ درصد)، محتوای نسبی آب برگ (۱۷ درصد)، پتاسیم ریشه (۱۴ درصد) و پتاسیم برگ (۱۶ درصد) و باعث افزایش نشت یونی (۲۳ درصد)، پرولین (۱۳ درصد)، سدیم ریشه (۲۵۶ درصد) و سدیم برگ (۳۲۵ درصد) شد. سیلیکات پتاسیم به‌ویژه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر آن سبب تعدیل تنش شوری با افزایش وزن گیاه، کلروفیل، محتوای آب برگ و پتاسیم برگ و ریشه و کاهش تجمع سدیم در برگ و ریشه و نشت یونی گردید.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی تحقیق نشان داد که افزایش شدت تنش شوری بر روی خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه علف طلایی تاثیر منفی داشته و سیلیکات پتاسیم در حجم ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌مولار سبب تعدیل تنش شوری با افزایش عملکرد کمی و کیفی (بیوشیمیایی و فیتوشیمیایی) علف طلایی خواهد شد. از این‌رو، برای کشت گیاه علف طلایی باید توجه نمود آب و یا خاک مورد استفاده دارای املاحی مانند سدیم و کلر نباشد و یا از اصلاح‌کننده‌های خاک و یا محرک‌های رشد برای تولید و کشت و پرورش

این گیاه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تنش شوری، پرولین، محرک رشد، علف طلایی

مقدمه

علف طلایی (*Solidago canadensis* L.) گیاهی چندساله، دارویی و زینتی متعلق به خانواده Asteraceae است. این گیاه به دلیل شرایط اقلیمی در برخی مناطق به صورت یکساله کشت می‌شود. علف طلایی گونه‌های مختلفی دارد که برای استفاده چمنزار، دشت و ... مناسب می‌باشد. ساقه و برگ‌هایش معمولاً به رنگ سبز روشن است (Elshafie *et al*., 2019). گل‌های کوچک خوشه‌ای مانند به رنگ طلایی دارد که در انتهای ساقه و شاخه گیاه ظاهر می‌شود (Kato-Noguchi & Kato, 2022). علف طلایی در طراحی فضای سبز کاربرد داشته و وجود ترکیب‌های ثانویه مانند فلاونوئید و تانن در اندام‌ها خاصیت دارویی آن را تقویت کرده و در درمان طیف وسیعی از بیماری‌ها مانند نفریت بینابینی مزمن، عفونت مثانه، سنگ کلیه و روماتیسم استفاده می‌شود (Elshafie *et al*., 2019).

شوری خاک، یکی از مهمترین مشکلات جهانی است که بر بهره‌وری محصولات زراعی و باغی تأثیر منفی می‌گذارد. شوری رشد و نمو گیاه را از طریق تنش آبی، سمیت سلولی به دلیل جذب بیش از حد یون‌هایی مانند سدیم (Na^+) و کلرید (Cl^-) و عدم تعادل تغذیه‌ای مختل می‌کند. علاوه بر این، شوری معمولاً با استرس اکسیداتیو به دلیل تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) همراه است (Etesami *et al*., 2021). پاسخ گیاه به شوری به دو مرحله اصلی تقسیم شده است. مرحله اول کاهش رشد مستقل از یون که در عرض چند دقیقه تا چند روز اتفاق می‌افتد، باعث بسته شدن روزنه و ممانعت از انبساط سلولی عمدتاً در شاخساره می‌شود، مرحله دوم در طول روزها یا حتی هفته‌ها انجام می‌گردد و مربوط به تجمع سطوح یون سمی است که فرایندهای متابولیک را کند کرده و باعث پیری زودرس و در نهایت مرگ سلولی می‌شود (Isayenkov & Maathuis, 2019).

سیلیکات پتاسیم یک ترکیب معدنی می‌باشد که شامل سیلیسیم و پتاسیم است و در تعدیل تنش شوری در گیاهان نقش مهمی ایفا می‌کند که با کاهش جذب نمک‌های مضر مانند سدیم و کلر، به حفظ تعادل یونی در گیاه کمک کرده و موجب توازن آبی گیاه می‌شود (Amiripour *et al*., 2021). در زمینه تأثیر سیلیکات پتاسیم در تعدیل تنش شوری، مطالعات نشان داده‌اند که این ترکیب می‌تواند به گیاهان در مقابل تنش شوری مقاومت بیشتری ببخشد. با افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش شوری، سیلیکات پتاسیم می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد گیاهان در مناطق با خاک‌های شور کمک کند. با این حال، تأثیر سیلیکات پتاسیم ممکن است با توجه به نوع گیاه، شرایط محیطی و سطح شوری متغیر باشد (Abou-Sreea *et al*., 2022).

در پژوهشی تاثیر سلنیوم بر گیاهچه‌های سیر تحت کلرید سدیم بررسی شد. از کلریدسدیم در دو سطح صفر و ۲۵ میلی‌مولار استفاده شد. سلنیوم با غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم و بدون آن استفاده گردید. نتایج نشان داد که کلرید سدیم سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی، محتوای کلروفیل کل، فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه سیر شد. کاربرد سلنیوم با کلریدسدیم، وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه سیر را به ترتیب ۱۴/۲۸ و ۸/۵۷ درصد افزایش داد (Gharehbaghli & Sepehri, 2022).

در تحقیقی که با هدف بهبود رشد و عملکرد خیار با تیمار سیلیسیم در سطوح ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و تنش شوری در ۱/۷ و ۴/۶ دسی‌زیمنس بر متر در گلخانه انجام شد، سیلیسیم سبب افزایش رشد و عملکرد خیار، افزایش غلظت نیتروژن، پتاسیم و سیلیکون تحت تنش و شوری سبب کاهش این عناصر و افزایش سدیم ریشه و برگ گردید (Alsaeedi *et al*., 2019).

محققان در تحقیقی تاثیر سیلیسیم بر کیفیت گیاه موز را در شرایط گلخانه نشان دادند، نانوذرات سیلیسیم موجب کاهش اثرهای منفی تنش شوری و خشکی شد. گیاهان تیمار شده با سیلیسیم دارای کلروفیل و رشد بهتری نسبت به شاهد بودند. نشت یونی با افزایش تنش زیاد و با اضافه شدن نانوذرات سیلیسیم کاهش یافت. نانوذرات سیلیسیم سبب افزایش غلظت عنصر پتاسیم و کاهش نسبت سدیم به پتاسیم شد (Mahmoud *et al*., 2023).

مطالعه اثر سیلیکات پتاسیم بر رشد و عملکرد گیاه گشنیز در شرایط تنش شوری نشان داد که شوری سبب کاهش وزن گیاه، محتوای آب برگ، فتوسنتز و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و سیلیکات پتاسیم سبب افزایش آنها شد (Amiripour *et al*., 2021).

با توجه به نقش مهم سیلیکون در افزایش مقاومت گیاهان به تنش شوری، استفاده از کودهای بر پایه سیلیکون دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد و کاربرد این محرک رشد، به‌ویژه در خاک‌های شور ضرورت دارد. تاکنون تحقیقی در زمینه تاثیر محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم به عنوان منبع اصلی سیلیسیوم در گیاه علف طلایی تحت تنش شوری انجام نشده است. بنابراین هدف این تحقیق، جهت دستیابی به تیمار مناسب برای کنترل رشد و افزایش خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این گیاه در شرایط تنش شوری است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی اثر سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش شوری روی گیاه علف طلایی در سال ۱۴۰۱ در گلخانه‌ای در تهران با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، رطوبت نسبی ۶۵ تا ۷۵ درصد، حداکثر دما ۲۹ و حداقل دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

گیاه با استفاده از تقسیم بوته (حاصل از بذرهایی که از شرکت پاکان بذر تهیه شد) تکثیر و در محیط کشت خاک زراعی همراه با خاک‌برگ (جدول ۱) کشت شد. گلدان‌های مورد استفاده از جنس پلاستیک با قطر ۱۹ سانتی‌متر بودند (شکل ۱). شوری در ۳ سطح (۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) به صورت آب آبیاری و سیلیکات پتاسیم در ۳ سطح (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به صورت محلول‌پاشی سه بار با فواصل ۱۵ روز که اولین محلول‌پاشی در مرحله ۴ برگی انجام شد، به‌طوری‌که تمام سطح برگ خیس می‌شد. پس از دومین مرحله محلول‌پاشی برگی، تنش شوری با حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول کلرید سدیم (با غلظت‌های تعیین شده) برای هر گلدان به مدت ۴۰ روز به صورت آبیاری اعمال گردید. به منظور عدم تجمع نمک در گلدان‌ها، بعد از هر ۴ دفعه آبیاری (۸ روز) با آب شور تمامی گلدان‌ها یکبار (بدون شوری) آبشویی شدند. در اواسط مرحله گلدهی، گیاهان برداشت شدند. طول دوره رشد گیاه ۱۸۰ روز بود. در طول دوره رشد هیچ‌گونه کود و آفت‌کشی استفاده نشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Physicochemical characteristics of the experimental soil

Parameter	Value
Organic matter (%)	4.9
Total nitrogen (%)	0.11
Absorbable phosphorus ($mg.kg^{-1}$)	14.5
Absorbable potassium ($mg.kg^{-1}$)	255
Organic carbon (%)	0.59
Silt (%)	47
Clay (%)	27
Sand (%)	26
EC ($dS.m^{-1}$)	0.011
pH	7.1

شکل ۱- بوته‌های علف طلایی (***Solidago virgaurea***) تیمارشده با سطوح مختلف شوری و سیلیکات پتاسیم در مرحله رشد رویشی

Figure 1- *Solidago virgaurea* plants treated with different salinity or potassium silicate levels at vegetative growth stage

1: Without salinity or potassium silicate (control), 2: Without salinity and with potassium silicate (50 $mg.l^{-1}$), 3: Without salinity and with potassium silicate (100 $mg.l^{-1}$), 5: Salinity (60 mM) and potassium silicate (50 $mg.l^{-1}$), 6: Salinity (60 mM) and potassium silicate (100 $mg.l^{-1}$), 7: Salinity (120 mM) without potassium silicate, 8: Salinity (120 mM) and potassium silicate (50 $mg.l^{-1}$), and 9: Salinity (120 mM) and potassium silicate (100 $mg.l^{-1}$)

متغیرهای مورفولوژیکی مورد بررسی شامل وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و ارتفاع آن بود. سایر صفات شامل رنگیزه‌های گیاهی (کلروفیل a، b و کل)، محتوای نسبی آب برگ، میزان نشت یونی، میزان سدیم و پتاسیم ریشه و اندام هوایی بود.

محتوای کلروفیل برگ

اندازه‌گیری میزان محتوای کلروفیل با روش Arnon (۱۹۴۹) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۱ گرم نمونه برگی گیاهان را در هاون چینی با ۳ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملاً ساییده شد و حجم نهایی عصاره به ۱۵ میلی‌لیتر رسید. سپس عصاره با استفاده از سانتریفوژ به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت × ۵۰۰۰ g صاف شد. از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160) برای اندازه‌گیری میزان جذب نمونه‌ها استفاده شد. ابتدا دستگاه با استون ۸۰ درصد صفر شده و بعد میزان جذب عصاره استخراج شده در طول‌موج‌های ۶۴۵ نانومتر و ۶۶۳ نانومتر قرائت گردید. سپس با استفاده از رابطه‌های زیر کلروفیل a (رابطه ۱)، کلروفیل b (رابطه ۲) و کلروفیل کل (رابطه ۳) محاسبه شد.

رابطه ۱) میلی‌گرم کلروفیل a در هر گرم برگ تر = [(12.7× A663)– (2.69× A645)]×V / 1000× W

رابطه ۲) میلی‌گرم کلروفیل b در هر گرم برگ تر = [(22.9× A645)– (4.69× A663)]×V / 1000× W

رابطه ۳) میلی‌گرم کلروفیل کل در هر گرم برگ تر= [(20.2× A645) + (8.02× A663)]×V / 1000× W

در رابطه‌های بالا، A میزان جذب در طول موج مورد نظر، V حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W اندازه برگ تازه برحسب گرم است.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC)

برای تعیین RWC، از برگ‌های کامل و توسعه یافته استفاده شد. پس از وزن اولیه برگ، در آب مقطر و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس وزن اشباع برگ‌ها اندازه‌گیری و ۲۴ ساعت دیگر در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و وزن خشک آنها ثبت گردید و در نهایت RWC با فرمول زیر محاسبه شد (Ritchie *et al*., 1990).

RWC= (FW-DW)/(SW-DW)× 100

در این رابطه، FW وزن تازه برگ، SW وزن اشباع برگ و DW وزن خشک برگ است.

سنجش میزان نشت یونی

برای سنجش میزان آسیب به غشاء (نشت الکترولیت)، ۰/۲ گرم از بافت سالم و تازه اندام هوایی گیاه را بعد از شستشو با آب مقطر برای شستشوی یون‌های احتمالی از سطح گیاه، درون لوله آزمایش درب‌دار قرار داده و ۱۰ میلی‌لیتر آب یون‌گیری شده به آن اضافه گردید. سپس لوله‌های آزمایش را به مدت ۲ ساعت درون حمام آب گرم با دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده و میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها (EC1) با استفاده از EC متر (مدل Winlab Data Windaus) اندازه‌گیری شد. سپس لوله‌های آزمایش در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه اتوکلاو شده و بعد از خنک شدن محتوای لوله‌ها تا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها (EC2) دوباره اندازه‌گیری شد و با فرمول زیر درصد نشت یونی محاسبه گردید (Ben-hamed *et al*., 2007).

$$\text{درصد نشت یونی} = \frac{EC1}{EC2} \times 100$$

پرولین

برای اندازه‌گیری پرولین از روش (Bates *et al*., 1973) استفاده شد. ۰/۱ گرم از بافت تر گیاه به صورت جدا از هم در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد سولفوسالیسیلیک اسید سائیده و عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ گرم سانتریفوژ شد. سپس ۲ میلی‌لیتر از مایع رویی را با ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌متر استیک اسید خالص مخلوط کرده و یک ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آبگرم قرار داده شد، سپس بلافاصله لوله‌های محتوای مخلوط در حمام یخ، سرد گردید. در این مرحله ۴ میلی‌لیتر تولوئن به مخلوط اضافه کرده و لوله‌ها به خوبی تکان داده شد. با ثابت نگه داشتن لوله‌ها به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه، دو لایه مجزا تشکیل شد. میزان جذب لایه فوقانی که حاوی تولوئن و پرولین بود در ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160) تعیین شد و برای محاسبه مقدار پرولین از منحنی استاندارد پرولین استفاده گردید و نتایج برحسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه شد.

اندازه‌گیری پتاسیم و سدیم: برگ و ریشه گیاه بعد از برداشت در هوای آزاد کاملاً خشک شد. سپس با استفاده از هاون نمونه‌ها پودر شدند. ۰/۳ از نمونه‌های پودر شده را توزین کرده و در کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت خاکستر شدند و بعد در ۵ میلی‌لیتر محلول اسید نیتریک ۲ مولار حل گردیدند. حجم محلول در نهایت با آب دو بار تقطیر به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و با کاغذ صافی واتمن شماره ۱ صاف شد. سپس با دستگاه فلیم‌فتومتری (مدل PFP7 ساخت کمپانی JENWAY انگلستان) براساس میلی‌گرم در گرم اندازه‌گیری گردید (Chapman & Pratt, 1962).

N%= A*N*1.4/W

N= نرمالیته اسید، A= حجم اسید مصرفی، W= وزن نمونه

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. کلیه داده‌های به دست آمده حاصل از اندازه‌گیری متغیرها در تحقیق، ابتدا در Excel ثبت شده و بعد با نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۳) آنالیز گردید. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح معنی‌دار ۱ درصد با آزمون LSD بررسی شد.

نمودارها و شکل‌ها در نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج

صفات مورفولوژیک

اثر اصلی تیمار تنش شوری و تیمار سیلیکات پتاسیم بر ارتفاع بوته، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل تیمارها بر وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد اما بر ارتفاع بوته و وزن تر و خشک ریشه تفاوت معنی‌دار ایجاد نکرد (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر ارتفاع بوته و صفات وزنی علف طلایی (*Solidago virgaurea*)

Table 2- ANOVA of salinity and potassium silicate effects on plant height and *Solidago virgaurea* weight traits

S.O.V.	d.f.	M.S.				
		Height	Shoots fresh weight	Shoots dry weight	Root fresh weight	Root dry weight
Salinity stress (S)	2	1459**	22.81**	23.46**	56.23**	5.03**
Potassium silicate (P)	2	347**	262.18**	6.11**	8.18**	0.75**
S × P	4	13.6^{ns}	69.76*	0.1*	0.15^{ns}	0.04^{ns}
Experimental error	16	12.7	0.59	0.07	0.17	0.02
C.V. (%)	-	4.32	2.23	2.88	4.05	4.67

^{ns}, *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.

ارتفاع بوته

با افزایش شدت تنش شوری، میزان ارتفاع بوته کاهش یافت. بیشترین ارتفاع بوته در شرایط عدم تنش شوری مشاهده شد. افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم موجب افزایش ارتفاع بوته علف طلایی شد، به‌طوری‌که در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر ارتفاع بوته به ۸۸/۴۴ سانتی‌متر رسید (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر ارتفاع بوته و وزن تر و خشک ریشه علف طلایی (*Solidago virgaurea*)

Table 3- Means comparison of salinity and potassium silicate effects on plant height and *Solidago virgaurea* root fresh or dry weight

Treatment	Height (cm)	Root fresh weight (g)	Root dry weight (g)
Salinity stress (mM NaCl)			
0	88.44^{a}	12.99^{a}	4.00^{a}
60	83.56^{b}	10.01^{b}	3.13^{b}
120	76.11^{c}	8.02^{c}	2.51^{c}
Potassium silicate (mg.l^{-1})			
0	76.11^{c}	9.26^{c}	2.89^{b}
50	83.56^{b}	10.72^{a}	3.31^{a}
100	88.44^{a}	11.04^{a}	3.44^{a}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

وزن تر و خشک اندام هوایی

بیشترین وزن تر اندام هوایی در تیمار عدم تنش شوری و کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکات پتاسیم مشاهده شد. اگرچه این تیمار با تیمار نبود تنش شوری و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در یک گروه آماری قرار گرفت (جدول ۴).

بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمار عدم تنش شوری و کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم بود که با تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × سیلیکات پتاسیم بر وزن تر و خشک شاخساره علف طلایی (*Solidago virgaurea*)

Table 4- Means comparison of salinity × potassium silicate effects on *Solidago virgaurea* shoots fresh or dry weight

Salinity stress (mM)	Potassium silicate (mg.l^{-1})	Shoots fresh weight (g)	Shoots dry weight (g)
0	0	35.27^{b}	10.33^{b}
	50	39.07^{a}	11.53^{a}
	100	39.20^{a}	11.47^{a}
60	0	29.73^{d}	8.77^{c}
	50	34.60^{bc}	10.33^{b}
	100	33.93^{c}	9.97^{b}
120	0	23.03^{f}	6.73^{e}
	50	28.23^{e}	8.23^{d}
	100	29.90^{d}	8.70^{cd}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

وزن تر و خشک ریشه

در گیاه علف طلایی افزایش شدت تنش شوری موجب کاهش وزن تر و خشک ریشه شد. بیشترین وزن تر و خشک در تیمار عدم تنش شوری و کمترین آن در تیمار ۱۲۰ میلی‌مولار نمک NaCl مشاهده شد (جدول ۴).

با کاربرد سیلیکات پتاسیم وزن تر و خشک ریشه افزایش یافت. بیشترین وزن تر و خشک ریشه مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم بود که با تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشته و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

محتوای کلروفیل

اثر اصلی تیمار تنش شوری و سیلیکات پتاسیم بر میزان کلروفیل a، b و کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اگرچه اثر متقابل این دو تیمار بر محتوای کلروفیل تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر کلروفیل و صفات بیوشیمیایی علف طلایی (*Solidago virgaurea*)

Table 5- ANOVA of salinity and potassium silicate effects on chlorophyll and *Solidago virgaurea* biochemical traits

S.O.V.	d.f.	M.S.					
		Chlorophyll *a*	Chlorophyll *b*	Total chlorophyll	Relative leaf water content	Ion leakage	Proline
Salinity stress (S)	2	0.15**	0.04**	0.36**	523**	166.7**	1481**
Potassium silicate (P)	2	0.04**	0.014**	0.11**	137**	30.4**	38^{ns}
S × P	4	0.001^{ns}	0.0007^{ns}	0.002^{ns}	8.2^{ns}	2.7^{ns}	216*
Experimental error	16	0.003	0.0004	0.005	3.1	4.12	67
C.V. (%)	-	5.41	5.49	4.47	2.12	5.42	4.48

^{ns}, *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.

افزایش شدت تنش شوری موجب کاهش محتوای کلروفیل گیاه علف طلایی شد. بیشترین کلروفیل a، b و کل در تیمار عدم تنش شوری و کمترین آن در تیمار ۱۲۰ میلی‌مولار نمک NaCl مشاهده شد (جدول ۵).

با کاربرد سیلیکات پتاسیم، کلروفیل a، b و کل افزایش یافت. بیشترین کلروفیل a، b و کل مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم بود که با تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشته و در یک

گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۵).

صفات بیوشیمیایی

اثر اصلی تیمار تنش شوری بر محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی و پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی و تیمار سیلیکات پتاسیم بر محتوای نسبی آب برگ و نشت یونی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل تیمارها بر پرولین در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان داد (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و نشت یونی علف طلایی (***Solidago virgaurea***)

Table 6- Means comparison of salinity and potassium silicate effects on chlorophyll, relative leaf water content, and *Solidago virgaurea* ion leakage

Treatment	Chlorophyll *a* (g.mg^{-1} of leaves)	Chlorophyll *b* (g.mg^{-1} of leaves)	Total chlorophyll (g.mg^{-1} of leaves)	Relative leaf water content (%)	Ion leakage (%)
Salinity stress (mM NaCl)					
0	1.25^{a}	0.42^{a}	1.80^{a}	89.89^{a}	34.11^{c}
60	1.12^{b}	0.39^{b}	1.63^{b}	83.67^{b}	36.44^{b}
120	0.99^{c}	0.29^{c}	1.40^{c}	74.67^{c}	41.89^{a}
Potassium silicate (mg.l^{-1})					
0	104^{b}	0.32^{b}	1.48^{b}	78.22^{b}	39.33^{a}
50	1.16^{a}	0.39^{a}	1.67^{a}	84.89^{a}	37.22^{b}
100	1.17^{a}	0.38^{a}	1.68^{a}	85.11^{a}	35.67^{b}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

محتوای نسبی آب برگ

با افزایش شدت تنش شوری، میزان محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت. بیشترین میزان آب برگ در شرایط عدم تنش شوری مشاهده شد. افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ علف طلایی شد که با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × سیلیکات پتاسیم بر پرولین علف طلایی (***Solidago virgaurea***)

Table 7- Means comparison of salinity × potassium silicate effects on *Solidago virgaurea* proline content

Salinity stress (mM)	Potassium silicate (mg.l^{-1})	Proline (µM) of leaves
0	0	169.33^{d}
	50	184.33^{c}
	100	175.33^{cd}
60	0	178.67^{cd}
	50	174.67^{cd}
	100	175.67^{cd}
120	0	209.33^{a}
	50	199.67^{ab}
	100	186.67^{bc}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

نشت یونی

تنش شوری موجب افزایش نشت یونی در گیاه علف طلایی شد. بیشترین نشت یونی در تیمار ۱۲۰ میلی‌مولار NaCl مشاهده شد. افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم موجب کاهش نشت یونی در علف طلایی شد که با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و پس از آن ۵۰ میلی‌گرم در لیتر کمترین نشت یونی رخ داد، این دو تیمار در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۷).

پرولین

بیشترین پرولین در تیمار تنش شوری شدید (۱۲۰ میلی‌مولار نمک) و بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم در گیاه علف طلایی انباشته شد. کمترین میزان پرولین مربوط به تیمار شاهد (عدم تنش شوری و عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم) بود (جدول ۴).

جذب عناصر

اثر اصلی تیمار تنش شوری و سیلیکات پتاسیم بر تجمع سدیم و پتاسیم در برگ و ریشه علف طلایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اگرچه اثر متقابل این دو تیمار بر سدیم ریشه و برگ در سطح یک درصد و بر پتاسیم برگ در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان داد (جدول ۸).

جدول ۸- تجزیه واریانس اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر جذب سدیم و پتاسیم علف طلایی (***Solidago virgaurea***)

Table 8- ANOVA of salinity and potassium silicate effects on sodium and potassium absorption in *Solidago virgaurea*

S.O.V.	d.f.	M.S.			
		Root sodium content	Leaf sodium content	Root potassium content	Leaf potassium content
Salinity stress (S)	2	109**	58.1**	132.2**	100.5**
Potassium silicate (P)	2	11.66**	8.73**	23.25**	43.81**
S × P	4	3.08**	3.43**	1.09^{ns}	2.25*
Experimental error	16	0.28	0.24	3.37	0.75
C.V. (%)	-	8.61	12.01	8.15	2.53

^{ns}, *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر شوری و سیلیکات پتاسیم بر جذب پتاسیم ریشه علف طلایی (***Solidago virgaurea***)

Table 9- Means comparison of salinity and potassium silicate effects on potassium absorption by *Solidago virgaurea* roots

Treatment	Root potassium (mg.g^{-1})
Salinity stress (mM NaCl)	
0	26.33^{a}
60	22.56^{b}
120	18.67^{c}
Potassium silicate (mg.l^{-1})	
0	20.67^{b}
50	23.56^{a}
100	23.33^{a}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × سیلیکات پتاسیم بر جذب سدیم و پتاسیم علف طلایی (***Solidago virgaurea***)

Table 10- Means comparison of salinity × potassium silicate effecs on sodium and potassium absorption in *Solidago virgaurea*

Salinity stress (mM)	Potassium silicate (mg.l^{-1})	Root sodium content (mg.g^{-1})	Leaf sodium content (mg.g^{-1})	Leaf potassium content (mg.g^{-1})
0	0	2.73^{e}	1.57^{d}	35.33^{bc}
	50	2.67^{e}	1.47^{d}	39.33^{a}
	100	2.63^{e}	1.60^{d}	39.00^{a}
60	0	7.77^{c}	5.03^{b}	31.33^{e}
	50	6.07^{d}	4.03^{c}	34.33^{cd}
	100	5.17^{d}	3.33^{c}	36.67^{b}
120	0	11.97^{a}	9.03^{a}	29.33^{f}
	50	9.00^{b}	5.77^{b}	31.00^{e}
	100	8.03^{c}	5.07^{b}	33.33^{d}

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

سدیم ریشه و برگ

بیشترین سدیم انباشته شده در اندام هوایی و ریشه علف طلایی مربوط به تیمار تنش شوری شدید و عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم بود. بدیهی است در شرایط نبود تنش شوری (در هر سه غلظت سیلیکات پتاسیم) مقدار سدیم در اندام‌های گیاه کمتر از سایر تیمارها بود (جدول ۹ و ۱۰).

پتاسیم ریشه

افزایش شدت تنش شوری موجب کاهش پتاسیم ریشه شد، بیشترین پتاسیم ریشه در شرایط عدم تنش شوری (۲۶/۳۳ میلی‌گرم در گرم) ارزیابی گردید. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم میزان انباشت پتاسیم در ریشه به ۲۳/۵۶ رسید که با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در یک گروه آماری قرار گرفت (جدول ۷).

پتاسیم برگ

در تیمار نبود تنش شوری و کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم میزان پتاسیم برگ در علف طلایی بیش از سایر تیمارها بود. این در حالی است که افزایش شدت تنش موجب کاهش تجمع پتاسیم در بافت گیاه شد، به‌طوری‌که در تنش شوری شدید (۱۲۰ میلی‌مولار) و بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم کمترین پتاسیم در برگ گیاه ارزیابی گردید (جدول ۹).

بحث

ارتفاع بوته

با افزایش شدت تنش شوری ارتفاع بوته علف طلایی کاهش یافت. در تنش شوری شدید با کاهش جذب آب از خاک توسط ریشه‌ها، روند انتقال شیره خام و پرورده به ترتیب در آوند چوب و آبکش دچار اختلال شده و با تأثیر شدید بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریشه منجر به کاهش ارتفاع و تعداد و سطح برگ خواهد شد (Zhang *et al*., 2023). در گیاهان تحت تنش شوری عدم تورژسانس مناسب سلول‌ها و تخصیص بیشتر مواد سنتز شده برای مقابله با تنش، کوتاه شدن دوره رشد گیاه و نیز سازوکارهای فرار از تنش همگی می‌توانند مانع از توسعه عادی سلول‌ها و کاهش ارتفاع گیاه شوند (Safdar *et al*., 2019). ارتفاع گیاه جزو اولین پارامترهای کاهشی در اثر شوری است، زیرا تجمع ماده خشک حاصل از فتوسنتز خالص و سطح فتوسنتز کننده گیاهی می‌باشند (Qiu *et al*., 2020). سیلیسیم و پتاسیم موجود در سیلیکات پتاسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در رشد و تقسیم سلولی گیاه می‌شوند که سبب افزایش رشد طولی در گیاه خواهند شد (Gomaa *et al*., 2021).

وزن تر و خشک

بیشترین وزن تر و خشک بوته در شرایط عدم تنش شوری و کمترین آن در شرایط تنش شوری شدید مشاهده شد. افزایش غلظت نمک در خاک باعث افزایش فشار اسمزی خارجی و کاهش ظرفیت گیاه برای جذب آب و کاهش وزن تر گیاه می‌شود. همچنین شوری می‌تواند منجر به اختلال در فعالیت آنزیم‌ها و فرایندهای متابولیکی گیاه شود (Kumar *et al*., 2021)، این اختلال باعث افزایش تبخیر آب از سطح برگ‌ها می‌شود، در نتیجه وزن گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طورکلی، تنش شوری باعث کاهش وزن گیاه می‌شود. اما میزان تأثیر واقعی آن بستگی به عواملی مانند نوع گیاه، سن گیاه، غلظت نمک، مدت زمان تنش شوری و شرایط محیطی دارد (Ayub *et al*., 2018).

سیلیکات پتاسیم می‌تواند در تقویت ساختار سلولی گیاهان نقش داشته باشد. سیلیسیم، عنصر اصلی سیلیکات پتاسیم، به صورت نانوذرات در دیواره‌های سلولی حضور دارد و می‌تواند سلول‌ها را تقویت کند. این تقویت ساختار سلولی می‌تواند منجر به رشد و توسعه بهتر سلول‌ها و افزایش وزن گیاه شود. سیلیکات پتاسیم می‌تواند با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز کلروفیل، به رشد و توسعه بهتر گیاه کمک کند و وزن گیاه را افزایش دهد (Mosa *et al*., 2022). سیلیکات پتاسیم می‌تواند در تنظیم ترکیب‌های شیمیایی در گیاهان نقش داشته باشد، این ترکیب می‌تواند به تنظیم تعادل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و

سایر عناصر معدنی در گیاه کمک کند. تعادل مناسب این عناصر می‌تواند موجب رشد و توسعه بهتر گیاه شده و وزن گیاه را افزایش دهد. همچنین سیلیکات پتاسیم می‌تواند به گیاه کمک کند تا در برابر تنش‌های زیستی مانند آفات، بیماری‌ها و تنش‌های محیطی مقاومت بیشتری داشته و سبب افزایش وزن گیاه شود. در کل، سیلیکات پتاسیم می‌تواند از طریق تقویت ساختار سلولی، افزایش تولید کلروفیل، تنظیم ترکیب‌های شیمیایی و افزایش مقاومت در برابر استرس‌های زیستی به رشد و وزن گیاه کمک کند (Felisberto *et al*., 2021). در تحقیقات مشابه بر روی توت فرنگی (Yaghubi *et al*., 2019) و فیسالیس (Falahi *et al*., 2022) به نقش مهم سیلیکات پتاسیم در افزایش وزن گیاه تحت تنش شوری اشاره شد.

محتوای کلروفیل

تنش شوری موجب کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و سیلیکات پتاسیم سبب افزایش آنها گردید. کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش شوری می‌تواند عمدتاً به‌دلیل تخریب ساختمان کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون کلروفیل‌ها، واکنش آنها با رادیکال اکسیژن، تخریب پیش‌ماده‌های سنتز کلروفیل و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل ازجمله کلروفیلاز و اختلالات هورمونی باشد (Pan *et al*., 2022). تنش شوری باعث پیری زودرس برگ‌ها، شکسته شدن کلروپلاست و کاهش میزان کلروفیل می‌شود. کاهش کلروفیل منجر به کاهش فتوسنتز می‌شود و گیاهانی که در زمان تنش میزان کلروفیل بیشتری را حفظ کنند، کارایی فتوسنتز بیشتری دارند و در برابر تنش مقاوم هستند (Hnilickova *et al*., 2021). کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش شوری به‌دلیل فعالیت بیشتر کلروفیلاز است. بعضی از مواد تنظیم‌کننده رشد مانند اسید آبسیزیک و اتیلن که میزان آنها در شرایط تنش افزایش می‌یابد موجب تحریک فعالیت این آنزیم می‌شود. همچنین کاهش میزان سبزینه می‌تواند به‌دلیل تغییر سوخت‌وساز نیتروژن در رابطه با ساخت ترکیب‌های اسید آمینه پرولین باشد که در شرایط تنش برای تحقق تنظیم اسمزی تولید می‌شود (Amiripour *et al*., 2021).

سیلیکات پتاسیم می‌تواند موجب بهبود فعالیت آنزیم‌هایی که در مراحل مختلف سنتز کلروفیل نقش دارند، شود. این آنزیم‌ها شامل آنزیم پورفیرینوژناز، آنزیم مگنزیز، آنزیم ژیرولیگاز و آنزیم کلروفیلاز است. با افزایش فعالیت این آنزیم‌ها، سرعت سنتز کلروفیل افزایش می‌یابد (Manga *et al*., 2023). سیلیکات پتاسیم می‌تواند در تنظیم ترکیب‌های شیمیایی مرتبط با کلروفیل نقش داشته باشد. این ترکیب به تنظیم تعادل بین عناصر معدنی مختلف که برای سنتز کلروفیل لازم هستند، کمک می‌کند. به عنوان مثال، سیلیکات پتاسیم می‌تواند در تأمین منابع منگنز و آهن برای سنتز کلروفیل مؤثر باشد. سلول‌های گیاهی که به سیلیسیم تقویت شده‌اند، بهترین شرایط را برای سازندگی و سنتز کلروفیل فراهم می‌کنند. سیلیکات پتاسیم به گیاهان کمک می‌کند تا در برابر تنش‌های محیطی مانند تنش حرارتی، خشکی و تنش شوری مقاومت بیشتری داشته باشند. این مقاومت موجب حفظ سلامت کلروپلاست‌ها و فعالیت بهینه آنها در سنتز کلروفیل می‌شود (Ghadakchi asl *et al*., 2019). در تحقیقی مشابه، افزایش محتوای فتوسنتزی گل رز (Asgari & Diyanat, 2021) و توت فرنگی (Avestan *et al*., 2021) تحت تنش شوری با کاربرد سیلیسیم گزارش شد که همسو با نتایج این تحقیق است.

محتوای نسبی آب برگ

با افزایش شدت تنش شوری، آب میان‌بافتی و محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت، پایین بودن محتوای نسبی آب برگ ظرفیت آب برگ را کاهش می‌دهد و منجر به بسته شدن روزنه می‌شود. محتوای نسبی آب نشانگر وضعیت آب در گیاهان است. آب در تمام فرایندهای متابولیک سلول گیاهی نقش اساسی دارد. کاهش سطح آب باعث می‌شود سلول‌های گیاهی کاهش فشار تورژسانس را تجربه کنند که منجر به آسیب سلولی و پژمردگی کلی و کاهش رشد گیاهان می‌شود

(Eyni-Nargeseh *et al*., 2022). کاهش محتوای نسبی آب در اثر تنش، روزنه‌ها را می‌بندد و هدایت روزنه‌ای را کاهش می‌دهد (Amiripour *et al*., 2021).

سیلیکات پتاسیم سبب بهبود شرایط رشد و گیاه و افزایش محتوای آب در بافت‌های گیاهی می‌شود. افزایش محتوای نسبی آب برگ گیاه گشنیز تحت تیمار سیلیسیم گزارش شد (Afshari *et al*., 2021) که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. منابع سیلیکون می‌توانند یکپارچگی و پایداری غشای سلولی گیاهی را تحت تنش زیستی یا غیرزیستی حفظ کنند، از این‌رو، اثر سیلیسیم بر روی گیاهان می‌تواند با تغییرات مورفومتریک و به عنوان محرکی برای دفاع بیوشیمیایی نیز مرتبط باشد (Araújo *et al*., 2022).

نشت یونی

شوری موجب افزایش نشت یونی گیاه علف طلایی و سیلیکات پتاسیم سبب کاهش آن شد. در شرایط تنش آسیب غشایی رخ می‌دهد و گیاه با بحران روبرو می‌شود. وقتی که شدت تنش زیاد باشد، میزان آسیب غشایی و نشت یونی افزایش و گیاه به سمت نابودی پیش می‌رود (Amiripour *et al*., 2021). سیلیسیم می‌تواند ساختار سلولی را تقویت کند و باعث افزایش مقاومت سلولی در برابر نشت یونی شود. سلول‌هایی که به سیلیسیم تقویت شده‌اند، می‌توانند آب و مواد مغذی را به‌طور بهتری جذب کنند و نشت یونی را کاهش دهند (Shen *et al*., 2022). سیلیکات پتاسیم می‌تواند ترکیب‌های شیمیایی سلول را تنظیم کند و به کاهش نشت یونی کمک کند. با تأمین منابع معدنی مناسب مانند پتاسیم، سیلیکات پتاسیم می‌تواند به تعادل یونی سلول کمک کند و نشت یونی را کاهش دهد. همچنین سیلیکات پتاسیم می‌تواند میزان تبخیر آب از سطح گیاه را کاهش دهد (Felisberto *et al*., 2021). با کاهش تبخیر آب، مقدار آب موجود در سلول‌ها و بافت‌های گیاهی حفظ می‌شود و نشت یونی نیز به دنبال آن کاهش می‌یابد. سیلیکات پتاسیم می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با کاهش نشت یونی را تنظیم کند. آنزیم‌هایی مانند آنزیم‌های پمپ یونی و کانال‌های یونی در سلول‌ها می‌توانند تأثیرات سیلیکات پتاسیم را در کاهش نشت یونی تقویت کنند (Oraee & Tehranifar, 2023). در تحقیقی مشابه، در گیاه لوبیا نشان داده شد که سیلیکات پتاسیم به‌طور معنی‌داری سبب کاهش نشت یونی در شرایط تنش شد (El-Saadony *et al*., 2021).

پرولین

پرولین در گیاه علف طلایی با کاربرد سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش شوری افزایش پیدا کرد. وقوع تنش شوری، به معنای وجود غلظت نمک‌های بالا در خاک یا محیط رشد گیاه است. در شرایط تنش شوری، گیاه برای مقابله با این تنش و حفظ تعادل آبی و نمکی، سازوکارهای دفاعی را فعال می‌کند. یکی از این سازوکارها، افزایش تولید پرولین است. پرولین یک آمینو اسید غیر استاندارد است که در شرایط تنشی مانند تنش شوری تولید می‌شود (Abdallah *et al*., 2020). پرولین علاوه بر نقش در ساخت پروتئین‌ها و تنظیم فعالیت آنزیم‌ها، در مقابله با تنش‌های محیطی نیز نقش مهمی دارد (Hnilickova *et al*., 2021). محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم به عنوان یک منبع سیلیسیم و پتاسیم می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش تولید پرولین در برگ‌ها داشته باشد. سیلیسیم به عنوان یک عنصر مورد نیاز برای رشد و توسعه سلول‌ها، می‌تواند تأثیر مستقیمی بر فعالیت آنزیم‌ها و مسیرهای بیوشیمیایی داشته باشد که به تولید پرولین منجر می‌شود. همچنین، پتاسیم نیز برای تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و رشد سلولی ضروری است و می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تولید پرولین را تقویت کند (Hafez *et al*., 2021).

جذب عناصر

با افزایش شدت تنش شوری و عدم استفاده از سیلیکات پتاسیم بیشترین میزان سدیم در ریشه و اندام هوایی و کمترین مقدار پتاسیم در ریشه و اندام هوایی علف طلایی مشاهده شد. در محیط‌های شور، محلول خاک حاوی سطوح بالایی از نمک‌های معدنی است که می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم

تأثیر منفی بر تعادل یونی داخل سلول‌های گیاهی داشته باشد. در شرایط تنش شوری، سطح سدیم در خاک افزایش می‌یابد و می‌تواند به داخل گیاه وارد شود. سلول‌های گیاهی به‌طور طبیعی به سدیم حساس هستند و در هنگام جذب بیش از حد سدیم، تعادل یونی داخل سلول‌ها به خطر می‌افتد (Hafez *et al*., 2021). تنش شوری باعث کاهش جذب پتاسیم توسط گیاه می‌شود (Joshi *et al*., 2022). افزایش سدیم در خاک باعث کاهش جذب و حمل پتاسیم به بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. سدیم اضافی می‌تواند به‌طور مستقیم غشاهای سلولی را تخریب کند (Shen *et al*., 2022).

محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم می‌تواند برخی از تأثیرات منفی این تنش را کاهش دهد (Kafi *et al*., 2021). سیلیکات پتاسیم تعادل یونی در سلول‌ها را تنظیم می‌کند و نشت یونی را کاهش می‌دهد. با بهبود جذب و نگهداری آب در گیاه به دلیل استفاده از سیلیکات پتاسیم، اثر منفی تنش شوری کاهش می‌یابد (Yaghubi *et al*., 2019). پتاسیم به عنوان یک عنصر مغذی مهم برای گیاهان شناخته شده است که در بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های مختلف ازجمله تنش شوری نقش دارد (El-Saadony *et al*., 2021). سیلیکات پتاسیم می‌تواند تأثیرات متعددی بر روی بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش شوری داشته باشد و کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش شوری با سیلیکات پتاسیم موجب بهبود جذب آب و افزایش مقاومت به تنش شوری در گیاهان می‌شود. همچنین، سیلیکات پتاسیم می‌تواند بهبود ساختار سلولی و ممانعت از ورود نمک‌ها به بافت‌های گیاهی را تسهیل کند.

این عوامل به‌طورکلی به بهبود کارایی سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه کمک می‌کنند. در تحقیقی در شرایط تنش، سیلیسیم سبب بهبود شرایط رشد و کاهش فعالیت آنزیمی در گیاه شمعدانی معطر شد (Hassanvand & Rezaei Nejad, 2018).

نتایج کلی این تحقیق نشان داد که تنش شوری با غلظت ۶۰ میلی‌مولار نمک NaCl سبب تغییرات معنی‌داری در بسیاری از صفات گیاه علف طلایی شده است. کاهش معنی‌داری رشد، محتوای فتوسنتزی و ترکیب‌های بیوشیمیایی در تنش شوری شدید (۱۲۰ میلی‌مولار) نسبت به شاهد مشاهده گردید که می‌تواند موجب کاهش عملکرد شدید گیاه در شرایط کشت انبوه نیز گردد. نتایج حکایت از این داشت که تیمار سیلیکات پتاسیم نقش مهمی در افزایش عملکرد گیاه و افزایش تولید پرولین و کربوهیدرات در شرایط تنش شوری دارد. تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در کاهش اثر منفی تنش، نقش به مراتب بهتری نسبت به غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر داشت. با توجه به اهمیت استفاده از منابع آلی و طبیعی به منظور تولید محصولات سالم، می‌توان سیلیکات پتاسیم را به عنوان محرک رشد و افزایش تولید پیکره رویشی برای استحصال ترکیب‌های ثانویه به منظور تولید و پرورش گیاه علف طلایی به عنوان گیاه زینتی فضای سبز و مصارف دارویی مورد نیاز، معرفی کرد.

References

- Abdallah, M.M.S., El Sebai, T.N., Ramadan, A.A.E.M. and El-Bassiouny, H.M.S., 2020. Physiological and biochemical role of proline, trehalose, and compost on enhancing salinity tolerance of quinoa plant. Bulletin of the National Research Centre, 44: 1-13. https://doi.org/10.1186/s42269-020-00354-4
- Abou-Sreea, A.I.B., Roby, M.H.H., Mahdy, H.A.A., Abdou, N.M., El-Tahan, A.M., El-Saadony, M.T., El-Tarabily, K.A. and El-Saadony, F.M.A., 2022. Improvement of selected morphological, physiological, and biochemical parameters of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) grown under different salinity levels using potassium silicate and Aloe saponaria extract. Plants, 11(4): 497. https://doi.org/10.3390/plants11040497
- Afshari, M., Pazoki, A. and Sadeghipour, O., 2021. Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulate physiochemical changes to improve growth, yield and active constituents of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil under different irrigation regimes. Silicon, 1-12. https://doi.org/10.1007/s12633-021-01101-8
- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany,

M., Elhawat, N. and Al-Otaibi, A., 2019. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stress by balancing nutrient uptake. Plant Physiology and Biochemistry, 139: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008
- Amiripour, A., Ghanbari Jahromi, M., Souri, M. K. and Mohammadi Torkasvand, A., 2021. Silicon stimulates physiochemical properties of coriander (*Coriandrum sativum* L.) to improve growth and yield under salt stress. Journal of Medicinal Plants and By-products, 10(2): 209-216. https://doi.org/10.22092/jmpb.2021.353466.1324
- Araújo, W.B.S., Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Márcio, A. and Rocha, S., 2022. Silicon mitigates the nutritional stress of nitrogen, phosphorus, and calcium deficiency in two forage plants. Scientific Reports, 12: 6611. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10615-z
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. Plant physiology, 24(1): 1. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1
- Asgari, F. and Diyanat, M., 2021. Effects of silicon on some morphological and physiological traits of rose (*Rosa chinensis* var. minima) plants grown under salinity stress. Journal of Plant Nutrition, 44(4): 536-549. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845367
- Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M. and Barker, A.V., 2021. Effects of nanosilicon dioxide on leaf anatomy, chlorophyll fluorescence and mineral element composition of strawberry under salinity stress. Journal of Plant Nutrition, 44(20): 3005-3019. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936036
- Ayub, Q., Khan, S.M., Hussain, A.K.I., Ahmad, Z. and Khan, M.A., 2018. Effect of gibberellic acid and potassium silicate on physiological growth of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) under salinity stress. Pure and Applied Biology, 7(1): 8-19. http://doi.org/10.19045/bspab.2018.70002
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39: 205-208. https://doi.org/10.1007/BF00018060
- Ben-Hamed, K., Castagna, A., Salem, E., Ranieri, A. and Abdelly, C., 2007. Sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) under salinity conditions: a comparison of leaf and root antioxidant responses. Plant Growth Regulation, 53: 185-194. http://doi.org/10.1007/s10725-007-9217-8
- Chapman, H.D. and Pratt, P.F., 1962. Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. Soil Science, 93: 68. https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700010004x
- El-Saadony, M.T., Desoky, E.S.M., Saad, A.M., Eid, R.S., Selem, E. and Elrys, A.S., 2021. Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metal contaminated saline soil. Journal of Environmental Sciences, 106: 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012
- Elshafie, H.S., Gruľová, D., Baranová, B., Caputo, L., De Martino, L., Sedlák, V., Camele, I. and De Feo, V., 2019. Antimicrobial activity and chemical composition of essential oil extracted from *Solidago canadensis* L. growing wild in Slovakia. Molecules, 24(7): 1206. https://doi.org/10.3390/molecules24071206
- Etesami, H., Fatemi, H. and Rizwan, M., 2021. Interactions of nanoparticles and salinity stress at physiological, biochemical and molecular levels in plants: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 225: 112769. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112769
- Eyni-Nargeseh, H., Shirani Rad, A.H. and Shiranirad, S., 2022. Does Potassium Silicate Improve Physiological and Agronomic Traits and Oil Compositions of Rapeseed Genotypes Under Well-Watered and Water-Limited Conditions? Gesunde Pflanzen, 74(4): 801-816. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00652-z
- Falahi, D., Hosseini, A. and Alirezalou, A., 2022. The effect of potassium silicate foliar spraying on some growth characteristics, photosynthetic pigments and antioxidant activity of Physalis (*Physalis peruviana* L.) under salinity stress conditions. Medicinal Plants Congress; Mechanization and processing, Karaj, 21-23 February.
- Felisberto, G., de Mello Prado, R., de Oliveira, R.L.L. and de Carvalho Felisberto, P.A., 2021. Are nano silica, potassium silicate, and new soluble sources of silicon effective for silicon foliar application to soybean and rice plants? Silicon, 13: 3217-3228. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00668-y
- Ghadakchi asl, A., Mozafari, A.A. and Ghaderi, N., 2019. Iron nanoparticles and potassium silicate interaction effect on salt-stressed grape cuttings under *in vitro* conditions: a morphophysiological and biochemical evaluation. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 55: 510-518. https://doi.org/10.1007/s11627-019-09988-0
- Gharehbaghli, N. and Sepehri, A., 2022. The effect of selenium and hydrogen sulfide on the growth and uptake of elements in garlic (*Allium sativum*)

seedlings under the influence of lead and salinity stress. Journal of Plant Research, 35(3): 525-540.
- Gomaa, OM., Abd El Kareem, H. and Selim, N., 2021. Nitrate modulation of *Bacillus* sp. biofilm components: a proposed model for sustainable bioremediation. Biotechnology Letters, 43(11): 2185-2197. https://doi.org/10.1007/s10529-021-03185-z
- Hafez, E.M., Osman, H.S., El-Razek, U.A.A., Elbagory, M., Omara, A.E.D., Eid, M.A. and Gowayed, S.M., 2021. Foliar-applied potassium silicate coupled with plant growth-promoting rhizobacteria improves growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water in salt-affected soil. Plants, 10(5): 894. https://doi.org/10.3390/plants10050894
- Hassanvand, F., and Rezaei Nejad, A., 2018. Effect of potassium silicate on growth, physiological and biochemical characteristics of *Pelargonium graveolens* under salinity stress. Iranian Journal of Horticultural Science, 48(4), 743-752. https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.210950.1040
- Hnilickova, H., Kraus, K., Vachova, P. and Hnilicka, F., 2021. Salinity Stress Affects Photosynthesis, Malondialdehyde Formation, and Proline Content in *Portulaca oleracea* L. Plants (Basel), 10(5): 845. https://doi.org/10.3390/plants10050845
- Isayenkov, S.V. and Maathuis, F.J., 2019. Plant salinity stress: many unanswered questions remain. Frontiers in Plant Science, 10: 80. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080
- Joshi, S., Nath, J., Singh, A. K., Pareek, A. and Joshi, R., 2022. Ion transporters and their regulatory signal transduction mechanisms for salinity tolerance in plants. Physiologia Plantarum, 174(3): e13702. https://doi.org/10.1111/ppl.13702
- Kafi, M., Nabati, J., Ahmadi-Lahijani, M.J. and Oskoueian, A., 2021. Silicon compounds and potassium sulfate improve the salinity tolerance of potato plants through instigating the defense mechanisms, cell membrane stability, and accumulation of osmolytes. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52(8): 843-858. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1869768
- Kato-Noguchi, H. and Kato, M., 2022. Allelopathy and Allelochemicals of *Solidago canadensis* L. and *S. altissima* L. for Their Naturalization. Plants, 11(23): 3235. https://doi.org/10.3390/plants11233235
- Kumar, S., Li, G., Yang, J., Huang, X., Ji, Q., Liu, Z., Ke, W. and Hou, H., 2021. Effect of Salt Stress on Growth, Physiological Parameters, and Ionic Concentration of Water Dropwort (*Oenanthe javanica*) Cultivars. Frontiers in Plant Science, 12: 660409. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.660409
- Mahmoud, L.M., Killiny, N., Holden, P., Gmitter, F.G., Grosser, J.W. and Dutt, M., 2023. Physiological and Biochemical Evaluation of Salt Stress Tolerance in a Citrus Tetraploid Somatic Hybrid. Horticulturae, 9: 1215. https://doi.org/10.3390/horticulturae9111215
- Manga, A.A., Maina, M.M., Auwalu, B.M., Dayyab, S.M., Adnan, A.A. and Umar, K.M., 2023. Response of Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties to Salicylic Acid, Potassium Silicate and Tamarind Extract in Saline Soils of Kano River Irrigation Scheme Nigeria. Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research, 10(4): 352-363. https://doi.org/10.9734/ajahr/2023/v10i4277
- Mosa, W.F., Behiry, S.I., Ali, H.M., Abdelkhalek, A., Sas-Paszt, L., Al-Huqail, A.A., Ali, M.M. and Salem, M.Z., 2022. Pomegranate trees quality under drought conditions using potassium silicate, nanosilver, and selenium spray with valorization of peels as fungicide extracts. Scientific Reports, 12(1): 6363. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10354-1
- Oraee, A. and Tehranifar, A., 2023. Relationship between silicon through potassium silicate and salinity tolerance in *Bellis perennis* L. Silicon, 15(1): 93-107. https://doi.org/10.1007/s12633-022-01988-x
- Pan, Y., Kang, P., Tan, M., Hu, J., Zhang, Y., Zhang, J., Song, N. and Li, X., 2022. Root exudates and rhizosphere soil bacterial relationships of *Nitraria tangutorum* are linked to k-strategists bacterial community under salt stress. Frontiers in Plant Science, 13: 997292. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.997292
- Qiu, X., Xu, Y., Xiong, B., Dai, L., Huang, S., Dong, T., Sun, G., Liao, L., Deng, Q., Wang, X., Zhu, J. and Wang, Z., 2020. Effects of exogenous methyl jasmonate on the synthesis of endogenous jasmonates and the regulation of photosynthesis in citrus. Physiologia Plantarum, 170: 398-414.https://doi.org/10.1111/ppl.13170
- Ritchie, S.W., Nguyan, H.T. and Holaday, A.S., 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Science, 30: 105-111. https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x
- Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., Ul Hussan, M. and Sarwar, M.I., 2019. A review: Impact of salinity on plant growth. Natural Science, 17(1): 34-40. https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06
- Shen, Z., Pu, X. Wang, S., Dong, X., Cheng, X. and Moxiang Cheng, M., 2022. Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant Na^+ uptake. Scientific Reports, 12:

5089. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09061-8
- Yaghubi, K., Vafaee, Y., Ghaderi, N. and Javadi, T., 2019. Potassium silicate improves salinity resistance and affects fruit quality in two strawberry cultivars grown under salt stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50(12): 1439-1451. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1621333
- Zhang, X., He, P., Guo, R., Huang, K. and Huang, X., 2023. Effects of salt stress on root morphology, carbon and nitrogen metabolism, and yield of Tartary buckwheat. Scientific Reports, 13: 12483. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39634-0