19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بهبود جذب عناصر غذایی در گندم‌های رشد یافته تحت تنش خشکی

میثم چراغی[۱،۲*]، حسینعلی علیخانی[۱]، مجید بصیرت[۲]، سید مجید موسوی[۲]، بابک متشرع‌زاده[۱]

۱- گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران *my.cheraghi@ut.ac.ir
۲- موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

مطالعه حاضر با هدف بررسی نقش کلیدی سیلیسیم بر بهبود جذب عناصر غذایی در گیاهان گندم رشد یافته تحت تنش خشکی انجام شد. فرض بر این بود که کاربرد سیلیسیم با حفظ تماس مکانیکی و هیدرولیکی ریشه با خاک در حال خشک شدن، جذب عناصر غذایی را تسهیل می‌کند. برای بررسی این هدف، یک آزمایش گلدانی در یک گلخانه کنترل شده از نظر دما و رطوبت و با ۲ تیمار اولیه شامل سطوح مختلف محتوای رطوبت خاک و تیمارهای سیلیسیمی انجام شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد برگ را به‌ترتیب ۱/۲۳، ۱۶/۹۷، ۱۹/۳۳ و ۷/۲۴ درصد کاهش داد. در این شرایط، کاربرد سیلیسیم منجر به افزایش قابل توجه غلظت این عناصر در برگ گندم شد. اثر سیلیسیم بر تسهیل جذب عناصر غذایی در گیاهان گندم رشد یافته تحت تنش خشکی با اثر آن بر افزایش تراکم ریشه‌های مویین، تسهیل تشکیل رایزوشیت و بهبود جذب آب توضیح داده شد. بر این اساس، جای دادن سیلیسیم در برنامه‌های تغذیه‌ای گیاهان رشد یافته در مناطق محتمل تنش خشکی، به مدیریت تغذیه‌ای آنها کمک می‌کند.

واژگان کلیدی: رایزوشیت، ریشه‌های مویین، سیلیسیم، گندم، مقاومت به خشکی

مقدمه

تنش خشکی رشد و بهره‌وری محصولات کشاورزی را از طریق محدودیت دسترسی آنها به آب و عناصر غذایی محدود می‌کند. توانایی گیاهان برای جذب عناصر غذایی تحت تنش خشکی، به محتوای آب خاک و تداوم تماس هیدرولیکی ریشه با محلول خاک در حال خشک شدن وابسته است. در یک خاک مرطوب، هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها نرخ جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه گیاهان را تعیین می‌کند. در مقابل، با خشک شدن خاک، هدایت هیدرولیکی خاک کنترل کننده‌ی جذب آب توسط ریشه است (Hosseini et al., 2024). خشک شدن همچنین منجر به تشکیل گپ‌های هوایی در مرز مشترک ریشه-خاک می‌شود و از این طریق تماس هیدرولیکی و مکانیکی ریشه با خاک را قطع می‌کند (Cheraghi et al., 2023b). در چنین شرایطی گیاهان قادر نیستند آب مورد نیاز برای تأمین نیاز تعرق روزنه‌ای خود را از خاک جذب کنند و در نتیجه پتانسیل آب منفی زیادی در سراسر سیستم گیاه ایجاد شده و باعث بسته شدن روزنه‌ها و توقف تعرق و فتوسنتز گیاه می‌شود (Vadez et al., 2024).

گیاهان مکانیسم‌های متنوعی را برای افزایش جذب آب و عناصر غذایی تحت تنش خشکی توسعه داده‌اند. سیلیسیم یک عنصر مفید است که در برخی از گیاهان مانند گندم در مقادیر بیشتر از بسیاری از عناصر غذایی ضروری جذب و انباشته می‌شود (Cheraghi et al., 2023a). اثر سیلیسیم در القای مقاومت گیاهان به خشکی خاک با اثر آن بر طیف زیادی از مکانیسم‌های مرتبط با پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان ثابت شده است. سیلیسیم در زیر اپیدرم برگ تجمع می‌یابد و

یک لایه دوگانه سیلیس-کوتیکول تشکیل می‌دهد که از هدر رفت آب از طریق تعرق کوتیکولی جلوگیری می‌کند (Vandegeer et al., 2021). این مکانیسم در نهایت منجر به حفظ نرخ تعرق و تداوم فتوسنتز در گیاهان مواجه شده با تنش خشکی می‌شود. اخیراً مشخص شده است که سیلیسیم با تحریک تولید ریشه‌های مویین متراکم‌تر و طویل‌تر، تشکیل رایزوشیت در گیاهان گندم مواجه شده با تنش خشکی را بهبود می‌بخشد (Cheraghi et al., 2024). این عملکرد سیلیسیم با حفظ تماس هیدرولیکی و مکانیکی ریشه با محلول خاک در حال خشک شدن و افزایش سطح تماس ریشه، منجر به تسهیل جذب آب و عناصر غذایی می‌شود.

تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با نقش سیلیسیم در بهبود پاسخ گیاهان به تنش خشکی انجام شده است، با این وجود، بررسی اینکه آیا کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب عناصر غذایی در گیاهان مواجه شده با تنش خشکی می‌شود یا خیر، به روشن‌تر شدن پتانسیل سیلیسیم در افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی کمک می‌کند. توانایی ریشه‌های گیاه برای حفظ تماس با فاز محلول خاک، برای تداوم جذب عناصر غذایی تحت تنش خشکی ضروری است. تشکیل رایزوشیت و افزایش تراکم ریشه-های مویین اثر بالقوه‌ای در حفظ تماس مکانیکی و هیدرولیکی بین ریشه‌ها و خاک در حال خشک شدن دارد. با در نظر گرفتن این موضوع، مطالعه حاضر به بررسی نقش سیلیسیم در بهبود جذب عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، گوگرد) توسط گیاهان گندم رشد یافته تحت تنش خشکی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر سیلیسیم بر جذب عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد) توسط گیاهان گندم رشد یافته تحت تنش خشکی، یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. این آزمایش دارای دو تیمار اولیه سیلیسیم (با سطوح ۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از منبع مونوسیلیسیک اسید) و سطوح متفاوت رطوبت خاک (رطوبت بهینه: در محدوده ۰/۷-۰/۸ ظرفیت مزرعه و تنش خشکی: ۰/۳-۰/۴ ظرفیت مزرعه) بود. برای انجام این آزمایش نمونه‌های خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری یک مزرعه تحقیقاتی در موسسه تحقیقات خاک و آب جمع‌آوری شد. خاک پس از هوا خشک شدن، برای پر کردن گلدان‌ها از الک ۴ میلی‌متری عبود داده شد. این خاک دارای بافت لومی-شنی، کربن آلی ۰/۴۹ درصد، pH ۷/۵، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) ۲۳/۵ درصد بود. غلظت فسفر، پتاسیم و سیلیسیم قابل جذب آن نیز به‌ترتیب ۳/۵۰، ۱۶۰ و ۲۹/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۳). برای انجام آزمایش، بذرهای جوانه دار شده گندم در گلدان‌های پلاستیکی تیره (ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر ۱۱ سانتی‌متر) که با ۱۳۰۰ گرم خاک از قبل تیمار شده با منابع مختلف سیلیسیم (همانطور که در بالا توضیح داده شد) تیمار شده بود، کشت شدند. در مجموع ۱۸ گیاه طی یک آزمایش گلدانی در گلخانه کشت و نگهداری شد. در طول ۲۰ روز اول دوره کشت، محتوای آب در خاک بستر کشت با توزین روزانه گلدان‌ها، بین ۰/۷-۰/۸ ظرفیت مزرعه تنظیم شد. سپس گیاهان به دو گروه تقسیم شدند و به مدت ۲۵ روز تحت رطوبت بهینه و تنش خشکی قرار گرفتند.

اندازه‌گیری نرخ تعرق، تراکم ریشه‌های مویین و وزن رایزوشیت

نرخ تعرق گیاهان با روش وزن کردن روزانه گلدان‌ها در طی سیکل‌های خشک-مرطوب و محاسبه کاهش وزن رطوبت از دست رفته در طول تعرق گیاه صورت گرفت. ابتدا، محتوای رطوبت خاک همه گلدان‌ها در سطح بهینه (۰/۸ FC) تنظیم شد و به گیاهان اجازه داد تا به‌طور طبیعی خاک را از طریق تعرق خشک کنند. در طول این چرخه خشک شدن خاک، تعرق آنها با توزین گیاهان دو بار در روز تعیین شد. سپس تعرق روز گیاه از اختلاف وزن بین گلدان‌ها در دو دوره وزنی محاسبه شد و

برای هر سیکل خشکی نرمال شد. فرض بر این بود که از دست دادن آب از سطح خاک ناچیز است زیرا سطح خاک با یک لایه ۳ سانتی‌متری پرلیت پوشانده شده بود. تراکم ریشه‌های مویین در یک سیستم کشت هیدروپونیک اندازه‌گیری شد. در این آزمایش، بذرهای گندم در یک محیط آبکشت تیمار شده با ۲ میلی‌مولار سیلیسیم رشد یافتند و از پلی اتیلن گلایکول ۲۰٪ برای شبیه‌سازی تنش خشکی استفاده شد. سپس، از سیستم ریشه عکس‌برداری و با استفاده از نرم افزار Image J پردازش شد. برای دریافت جزئیات دقیق درمورد روش اندازه‌گیری نرخ تعرق و ریشه‌های مویین، به مطالعه انجام شده توسط Cheraghi و همکاران (۲۰۲۴) مراجعه کنید.

برای اندازه‌گیری وزن رایزوشیت از روش وزن سنجی استفاده شد. پس از برداشت اندام هوایی گیاهان، در رطوبت خاک حدود ۳۵ درصد ظرفیت مزرعه، گلدان‌های پلاستیکی از یک طرف بریده شد و ریشه گیاهان همراه با خاک چسبیده به آن به آرامی از درون گلدان خارج شد. سپس با تکان‌های ملایم خاک بالک وریزوسفری چسبیده شده به ریشه‌ها جدا شد و خاکی که پس از تکان دادن ملایم به ریشه‌ها چسبیده باقی ماند، به‌عنوان رایزوشیت اندازه‌گیری شد (Delhaize et al., 2012). در نهایت وزن رایزوشیت بر حسب گرم خاک خشک چسبیده شده به هر گرم وزن خشک ریشه اندازه‌گیری و گزارش شد.

اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی در برگ گندم

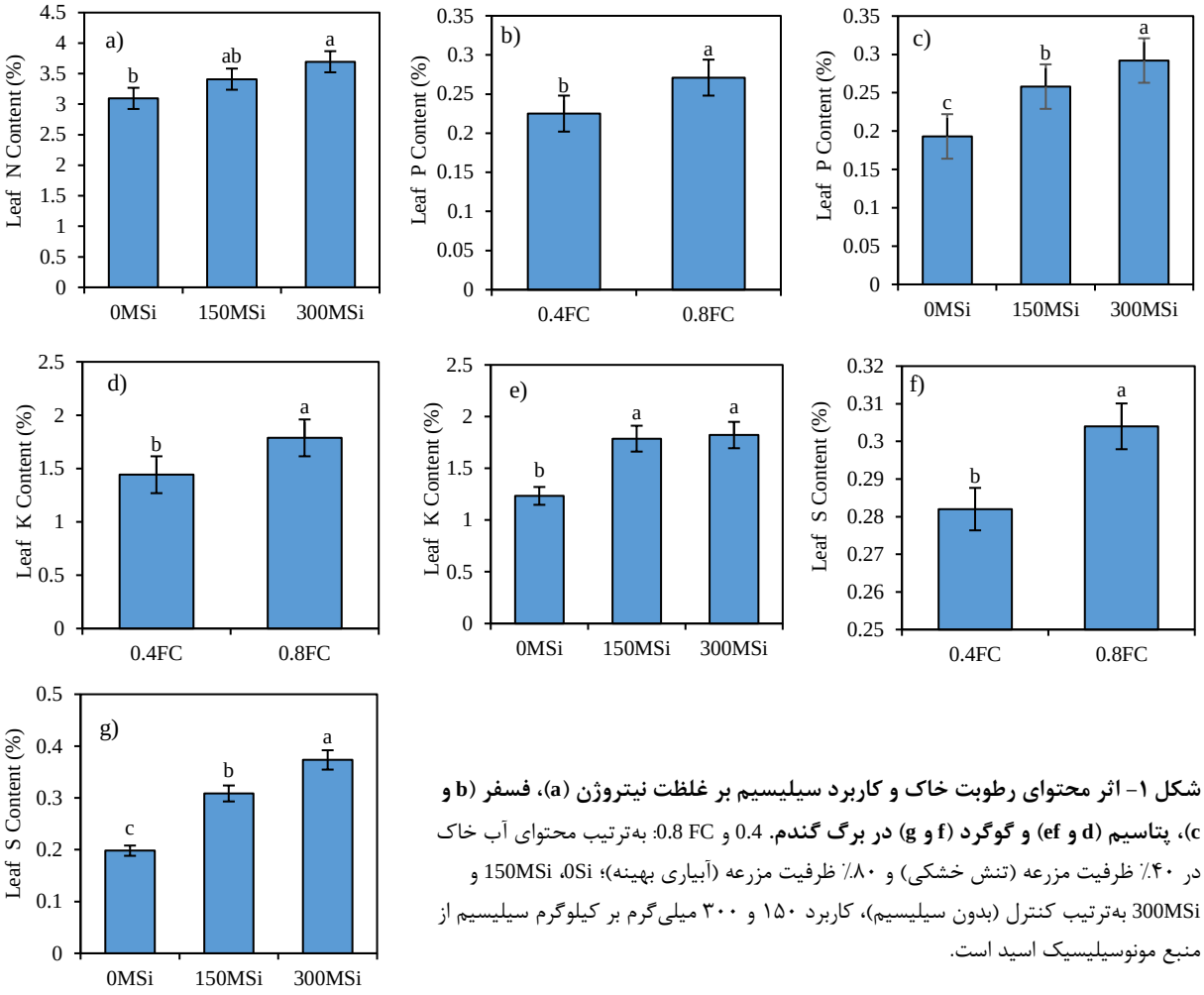
نیتروژن موجود در نمونه‌های گیاهی با استفاده از روش هضم با اسید سولفوسالیسیلیک غلیظ در حضور مخلوط کاتالیزور به سولفات آمونیوم تبدیل و با دستگاه کجلدال اندازه‌گیری شد (Horneck and Miller, 2019). از روش هضم تر با ماکروویو (Anton Paar, Austria)، برای هضم نمونه‌های برگ جهت اندازه‌گیری غلظت فسفر و پتاسیم، استفاده شد. سپس، غلظت این عناصر با استفاده از یک دستگاه طیف سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP) اندازه‌گیری شد.

آنالیز داده‌ها

داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس دو فاکتوره برای اثرات اصلی (سیلیسیم و محتوای آب خاک) و برهمکنش آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام شد. برای ترسیم شکل‌ها نیز از نرم افزار Microsoft Excel 2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

غلظت عناصر غذایی در برگ گندم به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر محتوای رطوبت خاک و کاربرد سیلیسیم قرار گرفت (شکل ۱). غلظت نیتروژن برگ با کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم به‌ترتیب ۱۰/۱۸ و ۱۹/۳۹ درصد افزایش پیدا کرد (شکل ۱a). با این وجود، نیتروژن برگ تحت تأثیر محتوای رطوبت خاک قرار نگرفت. در مقابل، تنش خشکی غلظت فسفر برگ را ۱۶/۹۷ درصد کاهش داد (شکل ۱b). کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم غلظت فسفر برگ را به‌ترتیب ۳۳/۶۸ و ۵۱/۳۰ درصد افزایش داد (شکل ۱c). به‌طور مشابه، غلظت پتاسیم برگ با کاهش محتوای رطوبت خاک ۱۹/۳۳ درصد کاهش پیدا کرد و در مقابل کاربرد سیلیسیم غلظت پتاسیم برگ را بین ۴۴/۸۳ تا ۴۷/۶۶ درصد افزایش داد (شکل ۱d و ۱e). تنش خشکی همچنین منجر به کاهش ۷/۲۴ درصدی غلظت گوگرد برگ شد (۱f). در مقابل، کاربرد سیلیسیم غلظت گوگرد برگ را به‌طور قابل توجهی افزایش داد (شکل ۱g). این نتایج با یافته‌های Pavlovic و همکاران (۲۰۲۱) و Raza و همکاران (۲۰۲۳) درمورد نقش سیلیسیم در بهبود جذب سایر عناصر غذایی مطابقت داشت.

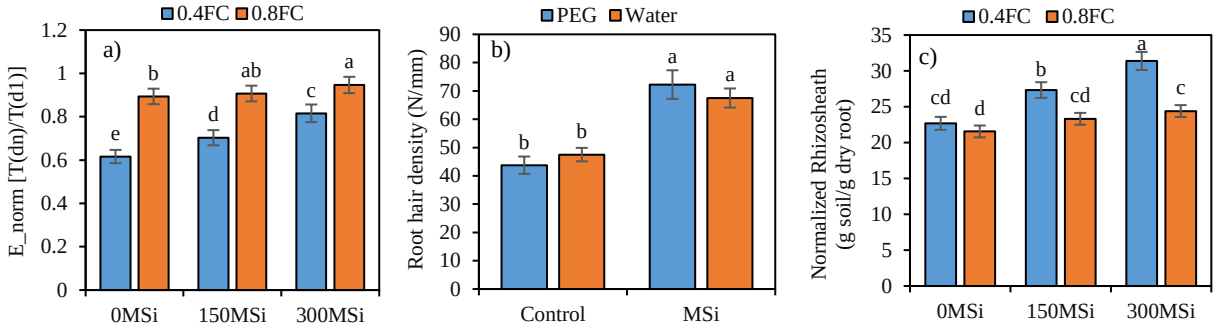


شکل ۱- اثر محتوای رطوبت خاک و کاربرد سیلیسیم بر غلظت نیتروژن (a)، فسفر (b و c)، پتاسیم (d و ef) و گوگرد (f و g) در برگ گندم. 0.4 و 0.8 FC: به‌ترتیب محتوای آب خاک در ۴۰٪ ظرفیت مزرعه (تنش خشکی) و ۸۰٪ ظرفیت مزرعه (آبیاری بهینه)؛ 0Si، 150MSi و 300MSi به‌ترتیب کنترل (بدون سیلیسیم)، کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم از منبع مونوسیلیسیک اسید است.

که نتایج نشان داد که در غیاب سیلیسیم (شاهد)، تنش خشکی نرخ تعرق گیاه را ۳۱/۰۷ درصد کاهش داد. اثر تنش خشکی بر کاهش جذب عناصر غذایی به تأثیر آن بر قطع تماس مکانیکی و هیدرولیکی ریشه با خاک اطراف و در نتیجه کاهش جذب آب نسبت داده شد (Carminati et al., 2009; Hosseini et al., 2024). با این وجود، کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم نرخ تعرق را به‌ترتیب ۱۴/۱۲ و ۳۲/۳۹ درصد در گیاهان رشد یافته تحت تنش خشکی افزایش داد (شکل a۲). نقش سیلیسیم در افزایش نرخ تعرق با اثر آن در تسهیل جذب آب و همچنین در تنظیم اسمزی سلول‌های نگهبان روزنه، کاهش تعرق کوتیکولی و نیز تنظیم سطح املاح سازگار (تنظیم کنندگان اسمزی) در سلول‌های برگ توضیح داده می‌شود (Idrees et al., 2023).

بهبود جذب آب در گیاهانی که با تنش خشکی مواجه شده‌اند، بدون شک منجر به تسهیل جذب عناصر غذایی قابل دسترس خواهد شد (Cheraghi et al., 2023b; Farooq et al., 2009). اثر سیلیسیم بر بهبود جذب آب و عناصر غذایی، با تأثیر آن بر افزایش تراکم ریشه‌های مویین (شکل b۲) و همچنین حفظ تماس مکانیکی و هیدرولیکی ریشه از طریق تسهیل تشکیل رایزوشیت (شکل c۲) نشان داده شد. کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیم تراکم ریشه‌های مویین گیاهان رشد یافته در آب و پلی-

اتیلن گلایکول ۲۰٪ را به‌ترتیب ۴۲/۱۱ و ۶۵/۱۴ درصد افزایش دادند (شکل b۲). تشکیل رایزوشیت در سطح ریشه نیز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اثر دوگانه سیلیسیم-محتوای رطوبت خاک قرار گرفت. کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی بر کیلوگرم سیلیسیم تشکیل رایزوشیت را به‌ترتیب ۲۰/۵۰ و ۳۸/۴۰ درصد در گیاهان رشد یافته تحت تنش خشکی و ۸/۱۶ و ۱۳/۱۷ درصد در گیاهان رشد یافته در شرایط رطوبت بهینه افزایش داد (شکل c۲).



شکل ۲- اثر محتوای رطوبت خاک و کاربرد سیلیسیم و روی بر نرخ تعرق (a)، تراکم ریشه‌های مویین (b) و تشکیل رایزوشیت (c) در گیاهان گندم. 0.4 و 0.8 FC: به‌ترتیب محتوای آب خاک در ۴۰٪ ظرفیت مزرعه (تنش خشکی) و ۸۰٪ ظرفیت مزرعه (آبیاری بهینه)؛ 0Si، 150MSi و 300MSi به‌ترتیب کنترل (بدون سیلیسیم)، کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم از منبع مونوسیلیسیک اسید است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی نقش کلیدی سیلیسیم بر جذب عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد) توسط گیاهان گندم رشد یافته تحت تنش خشکی انجام شد. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیم جذب این عناصر توسط گیاهان گندم را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. درواقع، کاربرد سیلیسیم از طریق افزایش تراکم ریشه‌های مویین و تسهیل تشکیل رایزوشیت، تماس مکانیکی و هیدرولیکی ریشه با خاک در حال خشک شدن را بهبود بخشید. این اثر سیلیسیم منجر به بهبود جذب آب و عناصر غذایی محلول توسط گیاهان گندم شد، که با نرخ تعرق افزایش یافته و غلظت بیشتر عناصر غذایی در برگ گندم‌های تیمار شده با سیلیسیم نشان داده شد. تحقیقات آینده باید بر روی مکانیسم‌هایی تمرکز کنند که سیلیسیم از طریق آنها رشد ریشه‌های مویین و تشکیل رایزوشیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

فهرست منابع

شهبازی، ک.، مارزی،م.، محمدی،م. ح.، اسدی،ح.، فتحی گردلیدانی، ا.، هاشمی نسب زواره،ک. س.، طلوعی، ر.، بهشتی، م.، آویژگان، ا.، چراغی، م. (۱۴۰۳). روش‌های تجزیه خاک- نمونه‌برداری، روش‌های شیمیایی و فیزیکی. ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب. تعداد صفحات ۱۰۷۴ صفحه. نوع نگارش: تألیف. شابک: 978-622-6705-36-3.

Carminati, A., Vetterlein, D., Weller, U., Vogel, H.-J.r., Oswald, S.E., (2009). When roots lose contact. Vadose Zone Journal 8(3), 805-809.

Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Mousavi, S.M., Basirat, M., Alikhani, H.A., Zarebanadkouki, M., (2024). Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. Plant and Soil, 1-19.

Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Mousavi, S.M., Ma, Q., Ahmadabadi, Z., (2023a). Silicon (Si): a regulator nutrient for optimum growth of wheat under salinity and drought stresses-a review. Journal of Plant Growth Regulation 42(9), 5354-5378.
Cheraghi, M., Mousavi, S.M., Zarebanadkouki, M., (2023b). Functions of rhizosheath on facilitating the uptake of water and nutrients under drought stress: A review. Plant and Soil, 1-25.
Delhaize, E., James, R.A., Ryan, P.R., (2012). Aluminium tolerance of root hairs underlies genotypic differences in rhizosheath size of wheat (Triticum aestivum) grown on acid soil. New Phytologist 195(3), 609-619.
Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M., (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management, Sustainable agriculture. Springer, pp. 153-188.
Horneck, D.A., Miller, R.O., (2019). Determination of total nitrogen in plant tissue, Handbook of reference methods for plant analysis. CRC Press, pp. 75-83.
Hosseini, B., Cheraghi, M., Hiesch, S., Yu, P., Zarebanadkouki, M., (2024). Contrasting rhizosheath formation capacities in two maize inbred lines: implications for water and nutrient uptake. Plant and Soil, 1-17.
Idrees, K., Aziz, A., Naeem, M., Azhar, M.F., Farooq, S., Hussain, M., (2023). Combined Application of Zinc and Silicon Improved Growth, Gas Exchange Traits, and Productivity of Maize (Zea mays L.) Under Water Stress. Silicon, 1-11.
Lobet, G., Couvreur, V., Meunier, F., Javaux, M., Draye, X., (2014). Plant water uptake in drying soils. Plant physiology 164(4), 1619-1627.
Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E.A., Nikolic, M., (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. Frontiers in Plant Science 12, 697592.
Raza, T., Abbas, M., Amna, Imran, S., Khan, M.Y., Rebi, A., Rafie-Rad, Z., Eash, N.S., (2023). Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. Silicon 15(9), 3797-3817.
Vadez, V., Grondin, A., Chenu, K., Henry, A., Laplaze, L., Millet, E.J., Carminati, A., (2024). Crop traits and production under drought. Nature Reviews Earth & Environment 5(3), 211-225.
Vandegeer, R.K., Zhao, C., Cibils-Stewart, X., Wuhrer, R., Hall, C.R., Hartley, S.E., Tissue, D.T., Johnson, S.N., (2021). Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K+ efflux and consequently reduces stomatal conductance. Physiologia Plantarum 171(3), 358-370.

Improving Nutrient Uptake in Wheat Grown Under Drought Stress

Meysam Cheraghi[1,2]*, Hossein Ali Alikhani[1], Majid Basirat[2], Seyed Majid Mousavi[2], Babak Motesharezadeh[1]

[1] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

Abstract
This study aimed to investigate the pivotal role of silicon (Si) in enhancing nutrient uptake in wheat plants grown under drought stress. It was hypothesized that Si application facilitates nutrient acquisition by maintaining mechanical and hydraulic root-to-soil contact in drying soils. To test this hypothesis, a pot experiment was conducted in a climate-controlled greenhouse using two main factors: varying soil moisture levels and Si treatments. The results showed that drought stress decreased the leaf concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur by 1.23%, 16.97%, 19.33%, and 7.24%, respectively. Under these conditions, Si application significantly increased the concentrations of these nutrients in wheat leaves. The positive effect of Si on nutrient uptake in drought-stressed wheat was attributed to enhanced root hair density, facilitated rhizosheath formation, and improved water uptake. Therefore, integrating Si into the nutritional management of crops cultivated in drought-prone regions can effectively support nutrient acquisition and plant resilience.

Keywords: Rhizosheath, Root hairs, Silicon, Wheat, Drought tolerance