دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی

"مقاله پژوهشی"

اصلاح غلات برای کمبود عنصر روی و اهمیت آن در تعدیل تنش خشکی

بهزاد صادق‌زاده[۱]، لیلا قدسی‌زاد[۲]، نوشین صادق‌زاده[۳]، ابراهیم سپهر[۴] و مهدی فیضی[۵]

۱- دانشیار، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران، (نویسنده مسوول: Behzada4@yahoo.com)
۲- کارشناس ارشد زراعت، مدیریت جهاد کشاورزی مراغه، ایران
۳- دانشجوی دکترای فیزیولوژی گیاهی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، ایران
۴- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران.
۵- دانشجوی دکترای اصلاح نباتات، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی دانشگاه زابل، زابل، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴
صفحه: ۲۲ تا ۴۰

چکیده

در دیم‌زارها، تنش خشکی می‌تواند جذب روی توسط غلات را به‌طرق مختلف از جمله با کاهش رشد و توسعه ریشه، کاهش میزان تحرک و جابجایی روی در خاک تحت‌تاثیر قرار داده و کاهش دهد. از طرف دیگر، تحمل به تنش‌های محیطی نظیر خشکی معمولاً با نیاز بالا به عنصر روی برای تنظیم و حفظ بیان ژن‌های دخیل در محافظت از سلول‌ها در برابر اثرات مضر تنش همراه است. علاوه بر این، تحت شرایط کمبود روی، گیاهان قادر به کاهش تولید رادیکال‌های آزاد حاصل از خشکی و نیز غیرسمی کردن اکسیژن فعال نیستند. از اینرو، تأثیر توأم کمبود روی و تنش خشکی در دیم‌زارها موجب کاهش عملکرد دانه غلات و نیز کیفیت تغذیه‌ای گشته و در نتیجه موجب سوء تغذیه در میلیاردها انسان در جهان می‌گردد. گرچه کاربرد کود روی می‌تواند به حل این مشکل کمک نماید، ولی به‌دلیل مشکلاتی نظیر خشکی سطح خاک در دیم‌زارها، تثبیت قسمت اعظم کود در خاک‌های رسی و عدم دسترسی زارعین به کود روی، جهت نیل به یک راه‌حل اساسی و پایدار برای تصحیح کمبود روی در دیم‌زارها، استفاده از ژنوتیپ‌های کارا در جذب و استفاده از روی می‌تواند تکمیل‌کننده کاربرد کود روی در نظر گرفته شود. از اینرو استفاده از روش‌های به‌نژادی در زمینه معرفی ارقامی با کارایی بالا در جذب و کارایی روی تحت شرایط دیم جهت تهیه و نیز بهبود وضعیت غذایی بخش مهمی از ۸ میلیارد انسان در سال ۲۰۲۵ بیش از پیش اهمیت می‌یابد. کمبود عنصر روی در خاک گسترده‌ترین کمبود عناصر ریزمغذی در گیاهان زراعی است و تقریباً ۵۰ درصد خاک‌های تحت زراعت غلات با کمبود عنصر روی قابل دسترس گیاه مواجه هستند. مشکل کمبود روی در شرایط دیم به‌دلیل نبود رطوبت کافی در اطراف ریشه تشدید می‌گردد. کمبود روی باعث کاهش عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای غلات از جمله گندم شده و باعث سوء تغذیه بیش از یک میلیارد انسان مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران شده است. مرور منابع نشان می‌دهد که راه‌حل اساسی و پایدار برای افزایش میزان روی در دانه استفاده از سیستم‌های کشاورزی از حمله اصلاح نباتات می‌باشد. صفات مؤثر در افزایش جذب روی، در ژنوم گندم موجود بوده و می‌تواند در اصلاح ارقامی با غلظت بالای روی و آهن بدون کاهش پروتئین و عملکرد مورد استفاده قرار گیرند. ضمناً این صفات در محیط‌های مختلف از پایداری مطلوبی نیز برخوردار هستند. البته لازم به ذکر است فاکتورهای منفی در خاک از قبیل pH بالا و مواد ارگانیک کم می‌توانند میزان روی قابل دسترس برای گیاه را کاهش داده و توانایی ارقام اصلاح‌شده را در جذب و تجمع روی در بذر به‌شدت تحت‌تاثیر قرار دهند. تنوع ژنتیکی برای کارائی روی در غلات مشاهده شده، که این تنوع می‌تواند در برنامه‌های اصلاح غلات برای معرفی ارقامی با کارائی بهتر در جذب و تجمع روی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. سازوکارهای مختلفی نظیر افزایش جذب روی از خاک، افزایش دسترسی عنصر در ناحیه ریزوسفر ریشه در نتیجه آزادسازی ترشحات ریشه‌ای، کارایی بهتر در استفاده از روی در داخل گیاه می‌توانند باعث افزایش کارائی روی در گیاهان زراعی گردد. در گندم و جو توانائی جذب روی از طریق ریشه یکی از مکانیسم‌های مهم در کارائی روی می‌باشد. تنش خشکی و کمبود روی از عوامل عمده محدود کننده تولید محصول در دیمزارهای ایران می‌باشد، ولی متأسفانه اصلاح برای کمبود روی و مطالعه برهم‌کنش بین تنش خشکی و کمبود روی به‌صورت وسیعی در دیم‌زارها انجام نگرفته است. وضعیت تغذیه روی در گیاه ممکن است حساسیت گیاه به کمبود آب را به‌طرق مختلف تحت‌تأثیر قرار دهد. گیاهان در معرض تنش روی، کارایی کمتری در استفاده از آب داشته و توانایی آنها در تنظیم فشار اسمزی جهت مقابله با تنش رطوبتی کمتر از گیاهانی است که به‌میزان کافی روی دسترسی دارند. به‌علاوه، تنش خشکی گیاهان را با القای تولید اکسیژن فعال می‌کشد. میزان کافی از روی در غیرسمی کردن اکسیژن فعال و نیز کاهش تولید رادیکال‌های آزاد مؤثر است. از اینرو، کمبود روی احتمال کاهش عملکرد در نتیجه خشکی را تشدید می‌کند. از طرف دیگر، منابع موجود نشان می‌دهند کاربرد کودهای روی می‌تواند دسترسی گیاه به روی را افزایش داده و موجب افزایش تحمل به خشکی گردد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، دیمزار، عنصر روی، غلات

مقدمه

در دیمزارها، تنش‌های محیطی (سرما، خشکی، گرما و کمبود عناصر غذایی در خاک) از عوامل مهم اولیه در کاهش عملکرد گیاهان بوده و به‌طور متوسط باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد گیاهان زراعی عمده در دنیا می‌شوند (۲۰). قسمت اعظم نواحی زیر کشت دیم با مشکل کمبود بارش و نیز عدم پراکنش مناسب بارندگی در طی فصل رویشی مواجه می‌باشند. در ایران از مجموع ۱۲ میلیون هکتار اراضی زیر کشت کشور بالغ بر ۶/۲ میلیون هکتار آن به کشت دیم اختصاص دارد. کمبود رطوبت در خاک دیمزارها همچنین مانع انتشار مطلوب ریزمغذی‌ها در خاک شده و بر فراهمی آنها در اطراف ریشه تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، نقش تغذیه مناسب گیاه در شرایط دیم و نیز شناخت سازوکارهای موثر در افزایش تحمل به خشکی برای حصول عملکرد مناسب ضروری می‌باشد. در غلات، تحمل به تنش‌های محیطی نظیر خشکی به میزان عنصر روی بستگی زیادی دارد، چراکه عنصر روی بیان ژن‌های مؤثر در تحمل و نیز محافظت سلول‌ها در برابر اثرات منفی تنش خشکی نقش اساسی دارد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

در دیمزارها، تنش خشکی می‌تواند جذب روی توسط گیاه را به طرق مختلف از جمله با کاهش رشد و توسعه ریشه و نیز کاهش میزان تحرک و جابجایی روی در خاک تحت‌تأثیر قرار دهد (۱۲۵،۵۱). همچنین در شرایط تنش خشکی، تداخل سازوکارهای جذب و تخلیه همراه با کاهش میزان تعرق، باعث کاهش جذب عناصر غذایی از جمله روی می‌گردند (۹، ۹۰). از اینرو، کاهش آب قابل دسترس در شرایط دیم باعث کاهش میزان روی و سایر عناصر غذایی قابل دسترس گیاه و در نهایت کاهش غلظت روی در گیاه می‌شود.

کاهش میزان روی قابل جذب توسط گیاه نه‌تنها باعث کاهش عملکرد در شرایط تحت تنش خشکی شده است (۳۶، ۹۲،۶۲) بلکه باعث کاهش ارزش تغذیه‌ای دانه جو و در نهایت سوء تغذیه در دام و انسان می‌شود (۲۶). روی، نقش حیاتی در فرآیندهای مختلف متابولیکی و فیزیولوژیکی در انسان بازی می‌کند و کمبود آن همراه با کمبود آهن، زندگی تقریباً ۳ میلیارد انسان مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه را تحت‌تأثیر قرار داده (۱۷) و باعث عدم سلامتی، کم‌خونی و افزایش میزان مرگ‌ومیر می‌شود (۴۴،۲۵). بنابراین افزایش میزان مواد معدنی دانه از جمله روی توسط اصلاح نباتات می‌تواند روشی بسیار مطلوب در بهبود سلامتی انسان‌ها و افزایش عملکرد گندم در شرایط دیم کشور باشد، چراکه گیاهان حاصل از بذوری با میزان روی بالاتر دارای قدرت رشد بیشتر، ریشه‌های بزرگتر و در نهایت عملکرد بیشتر می‌باشند (۱۶۰،۱۵۵).

میزان دسترسی به روی توسط گیاه به فاکتورهایی نظیر میزان کل روی در خاک، دما و رطوبت خاک، pH خاک، میزان مواد آلی و برهم‌کنش بین عناصر وابسته می‌باشد. از فاکتورهای محیطی مهم در دسترسی به روی، میزان رطوبت خاک است (۸۹). کمبود رطوبت در دیم‌زارها علاوه بر اثر مستقیمی که روی رشد عمومی گیاه دارد، موجب کاهش انتقال روی در خاک از طریق انتشار شده و بر فراهمی روی برای گیاه اثر منفی می‌گذارد (۱۵۱). در اوایل فصل رشد مخصوصاً در دیم‌زارهای نواحی کوهستانی هنگامی‌که درجه حرارت خاک هنوز نسبتاً کم است دما با تأثیر بر سوخت و ساز گیاهی ممکن است باعث کاهش جذب روی شود (۲۱). در گیاهان بین میزان جذب عناصر و pH خاک همبستگی منفی مشاهده شده‌است. (۱۵۰،۹۷،۴۰) کمبود ماده‌آلی خاک می‌تواند باعث کاهش فراهمی روی شود. البته باید خاطر نشان کرد زیادی بیش از حد ماده‌آلی با افزایش جذب سطحی و افزایش فعالیت موجودات میکروبی خاک موجب کاهش فراهمی روی برای گیاه خواهد شد. در نهایت، برهم‌کنش روی با سایر عناصر غذائی نیز بر فراهمی آن برای گیاه اثر می‌گذارد. مهمترین عنصر تغذیه‌ای که بر غلظت و فراهمی روی در گیاه تأثیر می‌گذارد، فسفر می‌باشد که برهم‌کنش بین این دو عنصر منفی گزارش شده است (۱۶۳،۱۰۰).

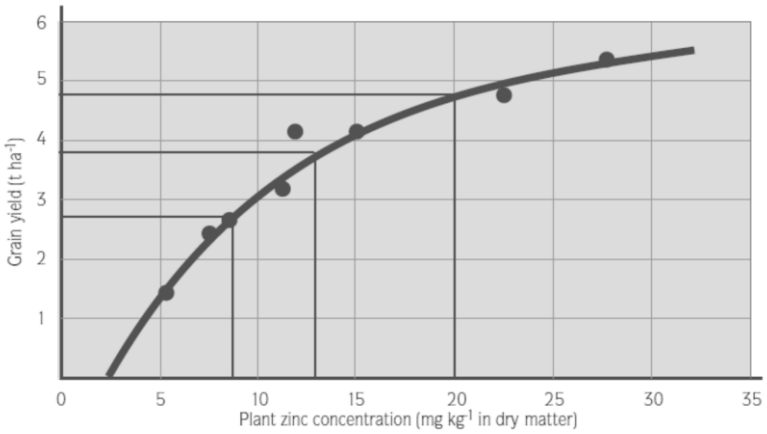
اختلاف در توانایی جذب و مصرف عناصر غذایی در ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی، باعث ترغیب محققین به مطالعه فاکتور کارآیی مصرف عناصر گردید، که توسط معادلات مختلفی قابل محاسبه می‌باشد (۲۷). قدرت تحمل ژنوتیپ‌های گیاهی به کمبود روی به‌عنوان یک ویژگی خاص ژنتیکی، معمولاً کارایی روی نامیده می‌شود و چنین تعریف می‌شود: "توانایی و کارایی یک رقم برای رشد و عملکرد بهتر در خاک‌هایی با کمبود بیش از حد روی در مقایسه با رقم استاندارد (۶۱)". سازوکارهای فیزیولوژیکی و مولکولی سازگاری به کمبود روی می‌توانند در اصلاح محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد. درک بهتر فرآیندهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و ژنتیکی برای کارایی روی نیاز به پیشرفت سریع روش‌های آزمایشی قابل اطمینان و آسان دارد که در شناخت و اصلاح ژنوتیپ‌ها از جهت کارایی روی مورد استفاده قرار گیرد. اولین گام برای اصلاح کارایی روی، ارزیابی ژرم‌پلاسم‌های گیاهی از جمله توده‌های بومی می‌باشد.

وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها به‌وجود سازوکارهای درگیر در داخل گیاه و نیز خاک مرتبط می‌باشد. برخی از ژنوتیپ‌ها دارای سازوکارهایی برای جذب روی می‌باشند که جذب روی توسط گیاه در شرایطی که امکان دسترسی به روی موجود در خاک پایین باشد را فراهم می‌کند. این سازوکارها شامل: الف) افزایش روی قابل جذب در ناحیه ریزوسفر در نتیجه افزایش سطح ریشه، ترشح موادی از قبیل فیتوسیدروفورها و کاهش pH در ریزوسفر؛ ب) افزایش میزان جذب روی توسط ریشه‌ها؛ ج) جابجایی و کارآیی بهتر در استفاده از روی در داخل گیاه (۱۰۸،۷۲،۷۰) می‌باشد. در گندم، ترشح فیتوسیدروفورهای متحرک کننده روی (۳۷،۳۱)، توانایی بهتر ریشه‌ها در جذب روی (۱۱۲)، توسعه بهتر ریشه (۴۶)، فعالیت بیشتر انهیدراز کربنیک (۱۰۶) و وجود زیادتر گروه‌های سولفوهیدریل در غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه (۱۰۷) به‌عنوان سازوکارهای درگیر در کارآیی استفاده از روی گزارش شده‌اند.

در شرایط کمبود روی در دیم‌زارها معرفی ارقامی با میزان جذب و کارایی بالای روی (افزایش رشد و عملکرد به‌ازای واحد جذب روی) در غلات با روش‌های به‌نژادی امکان‌پذیر می‌باشد ولی این موارد به‌ندرت مورد توجه اصلاح‌گران قرار گرفته است. استفاده از ارقام دارای کارایی بالا در جذب و تجمع روی در اندام‌های هوایی، می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف کودهای شیمیایی، باعث افزایش کمی و کیفی عملکرد غلات گردد (شکل ۱). در واقع ژنوتیپ‌ها و ارقام با کارایی بالای روی، در مقایسه با ژنوتیپ‌ها و ارقام ناکارا، قادرند با حداقل میزان روی در دسترس، بیشترین عملکرد اقتصادی را تولید نمایند (۱۲۲،۹۶،۷۷،۲). از اینرو استفاده از روش‌های به‌نژادی در زمینه معرفی ارقامی با کارایی بالا در جذب و کارایی روی تحت شرایط دیم جهت تهیه و نیز بهبود وضعیت غذایی بخشی از جمعیت ۸ میلیاردی انسان در سال ۲۰۲۵ بیش از پیش اهمیت می‌یابد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]



شکل ۱- رابطه بین غلظت روی در گیاه با میزان عملکرد دانه گندم (۶)
Figure 1. The correlation between plant Zn concentration and grain yield in wheat

چالش‌های زراعت غلات در دیمزارها

در دیم‌زارها، تنش‌های محیطی (سرما، خشکی، گرما و کمبود عناصر غذایی در خاک) از عوامل مهم اولیه در کاهش عملکرد گیاهان بوده و به‌طور متوسط باعث کاهش ۵۰ درصدی محصول گیاهان زراعی عمده در دنیا می‌شوند (۲۰). در دنیا، بیش از ۳۵٪ اراضی زیر کشت گندم و جو با مشکل خشکی و فقر خاک مواجه می‌باشند (۸۱). در ایران نیز از مجموع ۱۲ میلیون هکتار اراضی زیر کشت کشور بالغ بر ۶/۲ میلیون هکتار آن به کشت دیم اختصاص دارد. قسمت اعظم نواحی زیر کشت دیم با مشکل کمبود بارش و نیز عدم پراکنش مناسب بارندگی در طی فصل رویشی مواجه می‌باشند. کمبود رطوبت در خاک دیم‌زارها همچنین مانع انتشار مطلوب عناصر غذایی در خاک گشته و بر فراهمی مواد غذایی در اطراف ریشه تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین شناخت سازوکارهای مؤثر در افزایش تحمل به خشکی و نیز نقش تغذیه مناسب گیاه در شرایط دیم برای حصول عملکرد مناسب ضروری می‌باشد. در غلات، تحمل به تنش‌های محیطی نظیر خشکی به‌میزان عناصر ریزمغذی نظیر عنصر روی بستگی زیادی دارد، چراکه این عناصر در بیان ژن‌های مؤثر در تحمل و نیز محافظت سلول‌ها در برابر اثرات منفی تنش خشکی نقش اساسی بازی می‌کند.

در طول دهه گذشته توجه به نقش ریزمغذی‌ها در محصولات زراعی به‌دلیل کمبود این عناصر در خاک‌های زراعی افزایش قابل توجهی یافته است. اکثر خاک‌های مناطق دیم آهکی بوده و دارای pH بالا و مواد آلی کم هستند که موجب محدودیت در جذب بسیاری از عناصر غذایی در گیاهان می‌شود (۸۸). بررسی‌های طهرانی و همکاران (۱۴۴) نشان داد که در بیش از ۲۰۰۰۰ نمونه خاک و ارزیابی ملاک‌های تشخیص وضعیت عناصر غذائی در خاک و گیاه، بالای ۵۰ درصد خاک‌های کشور دچار کمبود یک یا چند عنصر غذایی می‌باشند. از بین کمبود ریزمغذی‌ها، کمبود عنصر روی مهمترین عامل محدودکننده بوده و تقریباً نصف خاک‌های زیر کشت غلات در دنیا به‌ویژه خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک دچار کمبود روی هستند (۳۰، ۶۴). طبق بررسی‌های انجام شده، ۴۰ درصد از اراضی زیر کشت گندم در ایران دچار کمبود شدید روی هستند (۱۴۴). مطالعات متعدد نشان داده‌است تولید محصول غلات از جمله گندم و جو تحت تأثیر کمبود روی کاهش قابل توجهی داشته است (۱۲۱،۶۲،۲،۱).

عنصر روی و اهمیت آن

ریز مغذی‌ها (منگنز، مس، برم، آهن، روی، کلر، مولیبدن و نیکل) از عناصر ضروری مورد نیاز گیاهان بوده و هر یک از آنها نقش خاصی در گیاه ایفاء می‌کنند. وجود این عناصر در حد کفایت، برای کامل کردن چرخه زندگی و رشد گیاه لازم است. نقش این عناصر از واکنش بسیار ساده تا خیلی پیچیده نظیر فرآیندهای مختلف مربوط به فتوسنتز، رشد و نمو گیاه را در بر می‌گیرد. نقش هر یک از ریزمغذی‌ها اختصاصی بوده و عنصر دیگر نمی‌تواند نقش آن را بر عهده گیرد. در این میان، عنصر روی جایگاه ویژه‌ای داشته و کمبود آن در کنار برخی دیگر از ریز مغذی‌ها، مانند آهن در مقیاس جهانی قابل مشاهده است.

عنصر روی یکی از هشت عنصر کمیاب و ضروری برای رشد سالم و تولیدمثل گیاهان است (۶). روی به‌عنوان یک جزء اساسی در ساختار و فعالیت تعداد زیادی از پروتئین‌ها مثل متالوآنزیم‌ها و عوامل رونویسی مورد نیاز است (۱۴۸،۱۴) و در نتیجه کمبود روی، گیاه در انجام فرآیندهای فیزیولوژیکی که روی در آنها نقش به‌سزایی دارد ناتوان خواهد بود. توجه به ریزمغذی‌ها در دهه گذشته بیشتر شده‌است، زیرا کمبود ریزمغذی‌ها در گستره وسیعی از خاک‌های کشاورزی کشور، به یکی از عوامل مهم محدودکننده برای تولید غلات تبدیل شده است.

به‌علاوه، در چند سال گذشته سوء تغذیه، مفهومی معادل کمبود دریافت پروتئین و انرژی داشت، اما امروزه نگرش جهان به‌معنی سوء تغذیه تغییر کرده و گستره وسیعی از کمبود ریزمغذی‌ها را نیز شامل می‌شود. کمبود روی، غلظت و محتوای روی را در بخش‌های خوراکی از محصولات غذایی کاهش داده و باعث پایین آمدن کیفیت تغذیه‌ای آنها می‌شود (۱۵۶). حدود ۴۰ درصد جمعیت کل جهان از کمبود

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

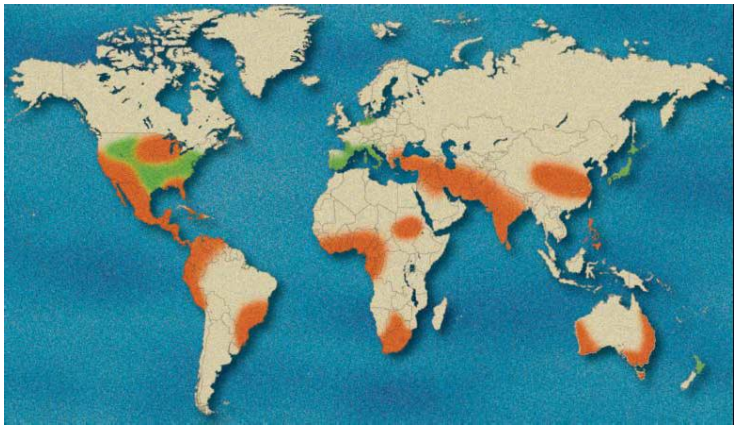
ریزمغذی‌ها و مخصوصاً روی رنج می‌برند که گرسنگی پنهان نامیده می‌شود (۶۴،۱۶). کمبود روی همراه با آهن زندگی تقریباً ۳ میلیارد انسان در جهان و مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه را تحت‌تأثیر قرار داده و باعث افزایش مرگ کودکان می‌شود (۱۵۹). همچنین در مطالعه‌ای بر روی ۸۸۱ دانش‌آموز در تهران مشاهده گردید که ۵۰ درصد آنها به کمبود روی مبتلا بوده که در نهایت می‌تواند به کم خونی ایرانی منجر گردد (۱۶۵). نسبت سهم زیاد مواد غذایی از جمله غلاتی با محتوای کم روی یکی از علل اصلی گستردگی کمبود روی در انسان به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه است (۶۵، ۱۵۵).

کمبود روی یکی از مهمترین کمبودهای ریز مغذی‌ها است که تولید غذایی جهان را تهدید می‌کند (۱۵۶،۴). بنابراین شناخت کمبود روی، مدیریت‌های مناسبی را در اختیار ما قرار می‌دهد. ضرورت روی برای رشد نرمال از لحاظ علمی از حدود ۷۰ سال پیش شناخته شده‌است (۵). البته در برخی از مناطق دنیا از جمله ایران کمبود روی و تأثیر منفی آن بر تولیدات زراعی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه واقع شده است. اخیراً گزارش‌هایی مبنی بر کمبود روی در مورد محصولات زراعی مختلف ارائه گردیده است چرا که با معرفی ارقام جدید و پر پتانسیل، همه ساله مقادیر زیادی از عنصر روی موجود در خاک از طریق محصول زراعی برداشت شده و در نتیجه منبع روی خاک هر سال تحلیل می‌رود. ضمناً بسیاری از ارقام جدید نسبت به واریته‌های محلی بیشتر تحت‌تأثیر کمبود روی قرار می‌گیرند.

عنصر روی در خاک

۱- گستره کمبود روی در خاک‌های دنیا

کمبود روی در سطح وسیعی از انواع خاک‌ها و در قسمت‌های زیادی از دنیا گزارش شده است، اما مناطقی با خاک‌هایی فرسایش یافته، مناطق نیمه‌خشک و آهکی با میزان pH بالا، خاک‌های شنی و خاک‌های اسیدی بیشتر در معرض کمبود روی هستند (۱۴۳). حدود ۵۰ درصد از خاک‌های زیر کشت غلات در دنیا دارای کمبود روی هستند (۶۴). نتایج بررسی ۱۹۰ مزرعه در ۱۵ کشور در سراسر دنیا، وجود کمبود روی به‌همراه دیگر ریزمغذی‌ها را در ۴۹ درصد از اراضی نشان داد (شکل ۲)، که ۲۵ درصد از این‌ها از نوع حاد و با علائم قابل مشاهده و ۲۴ درصد با علائم کمبود پنهان بودند (۱۳۷). خاک‌هایی با میزان کم روی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هندوستان (۹۸)، در زمین‌های شالیکاری پاکستان (۱۰۲)، در خاک‌های آهکی و بدون زهکش شالیزارها در چین (۱۳۶) و زمین‌های قلیایی با ماده‌ی آلی کم در آنتالیای مرکزی ترکیه (۴۹) گزارش شده‌اند. در استرالیا، خاک‌هایی با میزان کم روی در جنوب استرالیا، ویکتوریا، کونیزلند، نیوسات ولز و استرالیای غربی نیز یافت شده‌اند (۶۳). جنوب‌غربی ایالت استرالیای غربی وسیع‌ترین منطقه کمبود روی را در کل دنیا دارا می‌باشد (۴۵). این کمبود گسترده باعث شده تا استرالیا در دنیا به مرکز تحقیقات در مورد ریزمغذی‌ها تبدیل گردد. در خاک‌های دیم زیرکشت گندم نان در ایران، فیضی‌اصل (۵۳)، حد بحرانی عنصر روی را ۰/۸۸ تعیین کرد که متأسفانه اغلب خاک‌های زیرکشت غلات دیم در ایران میزان روی قابل جذب کمتر از این حد بحرانی دارند.



شکل ۲- توزیع جغرافیایی اراضی با مشکل کمبود شدید عنصر روی (نواحی قرمز رنگ) در جهان (۶)
Figure 2. Geographical distribution of sever Zn deficient soils (red areas) in the world

غلظت کل روی خاک به‌ترکیب مواد اولیه سنگ و کانی‌های خاک مربوط می‌شود. ذرات روی خاک می‌توانند در پروفیل خاک بر اساس توزیع اندازه ذرات و روش‌های تجزیه و تحلیل شیمیایی از هم جدا شوند. میزان روی در فرم و اشکال شیمیایی متفاوت بوده و بیشتر از مواد بنیادین خاک بوجود می‌آید. در جریان‌های آب و هوایی شدید، Zn^{2+} از بسیاری از مواد معدنی بنیادین آزاد می‌شود و در طی نوسان‌های هوایی جذب خاک می‌شود (۴۱). روی در خاک، به شکل اسیدهای آلی، مواد و سایر گونه‌های کربن آلی غیر-قابل‌حل تجمع یافته است (۱۰). تجمع روی نمی‌تواند معیاری برای ارزیابی و سنجش میزان روی قابل استفاده برای گیاهان باشد چراکه تنها مقدار کمی از کل روی موجود در خاک قابل تغییر و یا قابل‌حل بوده و می‌تواند در دسترس گیاه قرار گیرد. در دسترس بودن روی برای گیاه به عوامل مختلفی نظیر

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

غلظت آن در محلول خاک و برهم‌کنش روی با دیگر عناصر غذایی بستگی دارد (۱۶۴،۸۳،۷۱،۵۴).

۲- جذب روی از خاک

جذب و ورود روی به گیاهان در درجه اول از طریق جذب Zn^{2+} از محلول خاک توسط ریشه طی فرآیندهایی فعال و پیچیده انجام می‌شود. عمل جذب به فاکتورهایی نظیر غلظت یون در سطح ریشه، نیاز گیاه و توانایی جذب ریشه بستگی دارد (۵). در غلظت‌های پایین روی به‌ویژه در خاک‌هایی با قابلیت دسترسی کم، سازوکار انتشار نقش مهمی در انتقال روی و سایر عناصر غذایی مانند پتاسیم، فسفر، مس، آهن و منگنز به سطح ریشه دارد، زیرا جریان توده‌ای تنها بخش کوچکی از انتقال موادغذایی مورد نیاز گیاه را فراهم می‌کند (۳۵). اکثر محققان بر این باورند روی قابل استفاده عمدتاً در لایه‌های بالای خاک به‌خصوص در افق سطحی متمرکز می‌باشد. به‌نظر می‌رسد که Zn^{2+} یون غالب در جذب توسط ریشه‌های گیاه باشد اما ممکن است هیدراته‌های روی و چندین ترکیب دیگر به‌همراه اشکال آلی روی نیز قابل جذب باشند (۸۹). جذب مواد مغذی از طریق ریشه‌ها یک سازوکار مهم جذب برای مواد مغذی غیرمتحرک در خاک نظیر روی می‌باشد (۹۵). بنابراین میزان و پخشیدگی ریشه و همچنین میزان سطح ریشه از عوامل مهم در تعیین توانایی دسترسی گیاه به روی است (۸۹).

۳- عوامل مؤثر بر دسترسی روی موجود در خاک برای گیاه

اصطلاح «قابل دسترس بودن» برای توصیف قدرت و توانایی گیاهان برای جذب مواد مغذی از خاک می‌باشد (۱۴۶). دسترسی گیاهان به روی توسط عوامل مختلفی مخصوصاً میزان رطوبت خاک تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (شکل ۳). با توجه به وجود مقدار روی ناچیز در کانی کوارتز، خاک‌های شنی دارای غلظت پایینی از این عنصر هستند و اغلب کمبود روی قابل دسترس در این خاک‌ها مشاهده می‌شود. همچنین کمبود روی در گیاهانی که در خاک‌های اسیدی رشد یافته‌اند عمدتاً به‌علت کمبود مطلق روی در خاک و نیز آبشویی زیاد می‌باشد (۶۷). مقدار روی قابل دسترس گیاه با افزایش pH خاک کاهش می‌یابد، این کاهش عمدتاً مربوط به افزایش جذب سطحی روی توسط اجزاء تشکیل‌دهنده خاک (اکسیدهای فلزی و کانی‌های رسی) می‌باشد.

در محلول خاک، غلظت روی تا حد زیادی به pH وابسته است. در pH بالا، روی در خاک به اشکال مختلف $ZnCO_3$ و $Zn(OH)_2$ رسوب می‌کند (۸۹) و در نتیجه باعث کاهش حلالیت و دسترسی عنصر روی می‌شود. به‌عنوان مثال، در ۵ =pH، غلظت روی در محلول خاک ۴- ۱۰ مولار، و در ۸= pH این مقدار برابر با ۱- ۱۰ مولار می‌باشد (۸۴). آللوی (۵) گزارش کرد زمانی‌که کودهای آلی با قابلیت تجزیه آسان به خاک اضافه می‌شوند، دسترسی به روی برای گیاه به‌دلیل تشکیل ترکیبات آلی روی بیشتر می‌شود این ترکیبات متحرک بوده و قابل جذب توسط ریشه گیاهان می‌باشند.

شکل ۳- دیاگرام شماتیک عوامل موثر در دسترسی روی به گیاه
Figure 3. Diagram of factors affecting plant Zn availability

خاک‌های آهکی و قلیایی نسبت به خاک‌های خنثی و اسیدی، بیشتر مستعد کمبود روی می‌باشند (۵). در خاک‌های اسیدی، مصرف روی بستگی به‌میزان روی خاک دارد. در خاک‌های لوم شنی، توانایی دسترسی و ذخیره روی وقتی که pH خاک در اثر استفاده از سولفات آمونیوم از ۷ به ۵ کاهش می‌یابد، ۲ برابر خواهد شد (۱۴۹). مقدار کل تجمع روی در خاک‌های آهکی و غیر آهکی اغلب مشابه است. اما کمبود روی درخاک‌های آهکی به‌طور فراوانی گزارش شده‌است. در خاک قلیایی فقیر، افزایش مصرف روی باعث افزایش تجمع روی در گیاه شده و علائم کمبود را کاهش می‌دهد اما در رشد گیاه تأثیر چندانی ندارد. بنابراین رشد گیاه در خاک قلیایی بیشتر متأثر از قلیائیت خاک است (۸۵).

فاکتورهای دیگری که در کمبود روی نقش دارند، رطوبت کم و دمای پایین خاک هستند (۹۳،۸۹). رطوبت خاک در

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

تأمین مواد مغذی از طریق انتشار به سطح ریشه مؤثر است (۹۱). انتشار روی در خاک به رطوبت خاک بستگی دارد و ممکن است تغذیه گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایی‌که خاک‌ها معمولاً با کمبود آب برای مدت طولانی در طول فصل رشد مواجه هستند، در معرض خطر باشد. از سوی دیگر، کند شدن حرکت آب میزان روی در خاک را تغییر می‌دهد. برای مثال غرقاب شدن خاک، تجمع عنصر روی محلول در آب را در مقایسه با خاک‌هایی با زهکشی خوب، کاهش می‌دهد (۷). علاوه بر این کاهش در مقدار روی محلول و جذب کم آن در خاک‌هایی با زهکشی کم باعث ته‌نشینی روی با آهن محلول و آلومینیم در خاک می‌شود (۱۳۸).

در اوایل فصل رشد مخصوصاً در دیمزارهای نواحی کوهستانی هنگامی‌که درجه حرارت خاک هنوز نسبتاً کم است دما با تأثیر بر سوخت و ساز گیاهی ممکن است باعث کاهش جذب روی شود (۲۱). به‌علاوه، رشد ریشه در دماهای پایین کاهش‌یافته و همچنین همزیستی قارچ میکوریزایی، فاکتور مؤثر در جذب روی، کاهش می‌یابد. دمای پایین خاک اغلب به‌طور ناگهانی و به‌شدت نشانه‌های کمبود روی را افزایش می‌دهد البته با افزایش دما علائم کمبود برطرف می‌شود (۹۳). جذب روی به‌وسیله ساقه در گیاهان رشدیافته در محلول غذایی با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در مقایسه با ۱۰ درجه سانتیگراد، ۸۲ درصد بیشتر بوده است (۱۳۰).

در گیاهان همبستگی منفی بین میزان جذب عناصر و pH خاک مشاهده شده است. (۱۵۰،۹۷،۴۰). افزایش pH باعث جذب روی به سطح اجزاء تشکیل دهنده خاک شده که در نتیجه باعث کاهش حلالیت و دسترسی آن می‌شود (۲۳،۱۱). وجود ماده آلی کافی در خاک و تشکیل کمپلکس روی- ماده آلی موجب بهبود انتشار روی و در نتیجه افزایش فراهمی آن می‌شود (۱۳۵). از اینرو کمبود ماده آلی خاک می‌تواند باعث کاهش فراهمی روی شود. البته باید خاطر نشان کرد که زیادی بیش از حد ماده‌ی آلی با افزایش جذب سطحی و افزایش فعالیت موجودات میکروبی خاک موجب کاهش فراهمی روی برای گیاه خواهد شد.

در نهایت، برهم‌کنش روی با سایر عناصر، دسترسی روی را کاهش داده و بر قدرت جذب، میزان انتشار و مصرف آن در گیاهان تاثیر می‌گذارد. افزایش مقدار نیتروژن به کار رفته در فقدان روی می‌تواند باعث کاهش جذب روی، به‌دلیل تغییر pH محیط اطراف ریشه و یا افزایش نسبت ساقه به ریشه، شود (۸۷،۷۴). مهمترین عنصر تغذیه‌ای که بر غلظت و فراهمی روی در گیاه تاثیر می‌گذارد، فسفر می‌باشد که بر هم‌کنش بین این دو عنصر منفی گزارش شده‌است (۱۰۰، ۱۶۳). سطوح بالای فسفر در خاک علائم کمبود روی را افزایش می‌دهد (۵۴). ته‌نشینی روی و فسفر در خاک باعث شکل‌گیری $Zn_3(PO_4)_2$ نامحلول شده و در نتیجه قابلیت دسترسی روی را کاهش می‌دهد (۱۲). علاوه بر این، فسفر یک عامل محدود کننده روی در گیاهان نیز هست و نسبت جذب روی را کاهش می‌دهد (۱۲۳). کاهش غلظت روی در گیاه در نتیجه مصرف فسفر توسط محققین دیگری نیز گزارش شده‌است (۱۳۹،۱۳۴). در خاک‌های فقیر، همراه با مصرف کودهای نیتروژنه و فسفره، می‌توان با استفاده از کودهای روی یک ذخیره مناسب برای گیاهان زراعی فراهم کرد. ترکیبات متعددی از روی وجود دارند که به‌عنوان کود به‌کار برده می‌شوند اما سولفات روی کاربرد بیشتری دارد. میزان و نسبت به‌کارگیری کودهای روی نیز متفاوت بوده و بستگی به شکل روی، شرایط خاک و روش به‌کارگیری آن دارد. البته باید خاطر نشان‌کرد واکنش گونه‌های مختلف غلات به کاربرد کود روی یکسان نبوده و برخی غلات پاسخ ضعیفی به آن نشان می‌دهند (جدول ۱).

جدول ۱- پاسخ گونه‌های مختلف غلات به کاربرد کود روی از طریق خاک (۶)

Table 1. Reaction of different cereal species to Zn fertilizer in soil

ردیف	گونه گیاهی	پاسخ به کاربرد روی
۱	ذرت	زیاد
۲	برنج	زیاد
۳	جو	متوسط
۴	گندم	متوسط تا کم
۵	یولاف	کم
۶	چاودار	کم

عنصر روی در گیاهان

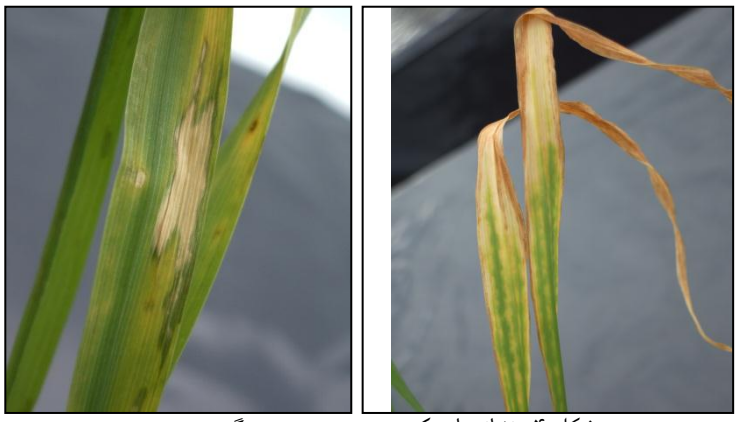
۱- نقش روی در گیاهان

روی برای رشد سالم و نرمال گیاه ضروری بوده و باعث تکثیر و تولیدمثل گیاهان می‌شود. همچنین عنصر روی دارای عملکردهای فیزیولوژیکی متعددی در گیاهان عالی می‌باشد. این عملکردها نقش مهمی در تنظیم رشد گیاه، فعال‌سازی آنزیم‌ها، بیان‌ژن، فعالیت هورمون‌های گیاهی، سنتز پروتئین‌ها، فتوسنتز و متابولیسم کربوهیدرات‌ها، حاصل‌خیزی، تولید دانه و مقاومت در برابر بیماری‌ها ایفاء می‌کنند (۹۰،۶۹). مقدار هورمون‌های گیاهی نیز تحت‌تأثیر مقدار روی در گیاه هستند. روی نقش حیاتی در تنظیم فعالیت اکسین (۵)، تکثیر بافت مریستمی (۹۰) و سنتز کلروفیل (۱۲۹) بازی می‌کند. کمبود روی مقدار ایندول‌استیک‌اسید (IAA) و جیبرلیک اسید را کاهش می‌دهد (۱۳۱). توقف رشد و کوچک ماندن برگ‌ها از بارزترین نشانه‌های کمبود روی می‌باشند که در نتیجه کاهش سنتز اکسین‌ها و مخصوصاً IAA اتفاق می‌افتد. احتمالاً کاهش سنتز IAA به‌دلیل کاهش سنتز تریپتوفان، ماده اولیه سنتز IAA باشد، چراکه کمبود روی تولید تریپتوفان را متأثر می‌سازد (۲۲). تحت‌شرایط کمبود روی، یک سری فرایندهای متابولیکی مهم در سلول به‌درستی انجام نگرفته و کاهش در اندازه برگ و رشد طولی گیاه از نخستین نشانه‌های واکنش غلات به کمبود روی است که از نظر زراعی مهم

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

می‌باشند (شکل ۴)، چراکه باعث کاهش بیوماس و در نهایت عملکرد بذر می‌گردد (۳۹،۲۹). مهمترین نقش روی در سنتز پروتئین از طریق دخالت در ثبات و عملکرد مواد ژنتیکی است، چراکه روی در ساختار کروماتین، متابولیسم DNA و RNA و بیان ژن نقش اساسی دارد (۱۴۸). عنصر روی در فعالیت متالوآنزیم‌های مؤثر در متابولیسم پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئوئیک نقش دارد (۷۵).



شکل ۴- نشانه‌های کمبود عنصر روی در برگ جو
Figure 4. Zinc deficiency symptoms on barley leaf

با توجه به نقش عمده روی در بسیاری از فعالیت‌های حیاتی گیاه، کمبود آن به این قبیل اعمال فیزیولوژیکی آسیب زده و به کاهش رشد، کاهش عملکرد و کیفیت محصولات زراعی منجر خواهد شد (۲۲). روی تنها فلزی است که در تمامی ۶ آنزیم (اکسیدوردوکتازها، ترانسفرازها، هیدرولازها، لیازها، ایزومرازها و لیگازها) (۱۵۲) نقش داشته و کمبود آن فعالیت آنزیم‌های لازم در متابولیسم پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، هورمون‌ها را مختل می‌کند (۱۱۵،۲۲). کاهش در فتوسنتز در اثر کمبود روی می‌تواند نتیجه کاهش در فعالیت آنزیم کربنیک انهیدراز (CA) (۱۳۳)، کاهش فعالیت فتوشیمیایی کلروپلاست (۳۱) باشد. در اثر کمبود روی سنتز پروتئین به‌علت تخریب RNA کاهش‌یافته و فعالیت RNA پلی‌مراز پایین می‌آید (۱۴۰).

روی تأثیر مهم فیزیولوژیکی در نگهداری و عملکرد غشاهای سلولی بوسیله کنترل عمومی و دفع مسمومیت گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) دارد (۳۳،۳۲). ROS به‌طور نهانی به غشاء لیپیدها و گروه‌های سولفیدریل آسیب می‌رساند (۱۱۰). در شرایط کمبود روی، صدمات ناشی از تنش‌های اکسیداتیو افزایش یافته و در نتیجه میزان ترکیبات آلی نظیر کربوهیدارت‌ها و اسیدهای آمینه در سلوهای ریشه کاهش می‌یابد (۳۲). در خاک‌های فقیر، میزان ترکیبات کربن‌دار در ریزوسفر کاهش یافته و این گیاهان مستعد بیماری‌های ریشه، مانند فوزاریوم گرامینروم می‌گردند (۱۴۱،۶۶).

۲- جذب و حرکت روی در گیاه

ریشه، روی را از محلول خاک به‌صورت یون دو ظرفیتی Zn^{2+} و در pH بالا به‌صورت یون تک‌ظرفیتی $(ZnOH)^{+}$ جذب می‌کند (۹۰). در طی تجمع روی در ریشه، حرکت جنبشی ابتدایی، سریع و اجباری در دیواره سلول‌های ریشه مشاهده می‌گردد، و به‌دنبال آن یک انتقال آهسته خطی در غشاء پلاسمایی صورت می‌گیرد (۱۲۶). حرکت روی از محلول خارجی به دیواره سلول‌های ریشه از طریق انتشار است و سپس روی از میان غشاء پلاسمایی از طریق انتقال یون پروتئین انتقال می‌یابد. برای انتقال عنصر روی از غشای پلاسمایی، نیازی به سیستم انتقال فعال نیست چون ورود عنصر روی به‌صورت ترمودینامیکی خواهد بود. از سطح ریشه، مواد مغذی در داخل آوند چوبی ریشه از میان اپیدرم، کورتکس و آندودرم منتقل می‌شود (۹۰). عنصر روی ممکن است از میان ریشه به‌طرف آوند چوبی حرکت کرده و از میان فضای خارج سلولی بین سلول‌های ریشه (آپوپلاست) یا از میان سیتوپلاسم سلول‌های ریشه متصل‌شده بوسیله پلاسمودسماتا (سیمپلاست) عبور کند. با افزایش غلظت روی در خاک، مسیر آپوپلاستیک به‌طور افزایشی در جذب روی و نفوذ به آوند چوبی شرکت می‌کند (۱۵۸).

حرکت مواد مغذی در آوند چوبی به ساقه‌ها در اثر جریان تعریق است. نیروی محرکه تعریق از شیب پتانسیل آب بین سلولی روزنه و اتمسفر ناشی می‌شود (۷۹). تجزیه و تحلیل محتوای مایع آوند چوبی نشان‌داد که عنصر روی به‌عنوان یک شکل کمپلکس در آوند مانند فیتات روی اندازه‌گیری می‌شود. کمپلکس فلز و فعالیت‌های یونی از ریزمغذی‌ها در شیره آوند آبکش و چوبی متفاوت هستند (۱۵۳). فعالیت کاتیونی ریزمغذی‌ها مانند منگنز، روی، آهن، مس و نیکل در شیره آوند آبکش با توجه به سطح بالای فسفات و pH، کم است.

۳- سازوکارهای کارایی روی در گیاهان

قدرت تحمل کمبود روی در ژنوتیپ‌های گیاهی به‌عنوان یک ویژگی خاص ژنتیکی، معمولاً کارایی روی نامیده می‌شود و چنین تعریف می‌شود: "توانایی و کارایی یک رقم برای رشد و عملکرد بهتر در خاک‌هایی با کمبود بیش از حد روی در مقایسه با رقم استاندارد (۶۱)". سازوکارهای فیزیولوژیکی و مولکولی در سازگاری به کمبود روی می‌تواند در اصلاح محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد. درک بهتر فرآیندهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و ژنتیکی برای کارایی روی نیاز به پیشرفت سریع روش‌های آزمایشی قابل

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

اطمینان و آسان دارد که در شناخت و اصلاح ژنوتیپ‌ها در کارایی روی مورد استفاده قرار گیرد. اولین گام برای اصلاح کارایی روی، ارزیابی ژرم‌پلاسم‌های گیاهی از جمله توده‌های بومی می‌باشد.

سازوکارهای مختلفی برای توضیح کارایی روی در سطح مولکولی، فیزیولوژیکی و ساختاری در ژنوتیپ‌های کارآمد ارائه شده است، اما مکانیزم واقعی دخیل در کارایی روی مشخص نیست. به‌طور کلی در ژنوتیپ‌های کارآمد روی، افزایش جذب روی بوسیله ریشه‌ها و یا بهره‌برداری مؤثر از روی درون سلول‌ها مشاهده می‌شود. گونه‌های گیاهی کارآمد روی شناسایی شده توانایی استخراج روی از خاک را بوسیله افزایش روی قابل دسترس در ریزوسفر را دارند (۱۱۳،۴۳،۳۵). گنج و همکاران (۵۸) گزارش دادند تعدادی از سازوکارهای مختلف در کارایی روی شرکت دارند اما جذب، سازوکار مهمی است. چاکماک و براون (۲۷) گزارش کردند افزایش جذب روی ممکن است وابسته به مساحت سطحی ریشه، کلونیزاسیون ریشه توسط میکوریزا، کاهش pH منطقه ریزوسفری و القاء پلی پپتیدهای درگیر در جذب روی و انتقال در سرتاسر غشاء پلاسمایی باشد. کارایی روی نیز می‌تواند تحت‌تأثیر مورفولوژی ریشه قرار گیرد که در میان گونه‌های گیاهی متفاوت است (۴۳). ریشه‌های بلندتر و نازک‌تر با افزایش سطح دسترسی ریشه به روی و سایر مواد مغذی مانند مس، منگنز و آهن را ممکن است تحت‌تأثیر قرار دهند (۱۱۱). آربوسکولار مایکوریزا، گیاهان را قادر به افزایش جذب روی توسط گسترش حجم خاک اشغال‌شده توسط ریشه می‌سازد (۸۰). در ذرت، آربوسکولار مایکوریزا جذب روی و مقدار آن در ساقه را در خاک‌هایی با غلظت پایین روی قابل دسترس گیاه افزایش می‌دهد (۵۰). ریشه‌ها شیمی ریزوسفر را با تغییر pH ریزوسفر تغییر می‌دهند (۱۵۰) و یا با آزادکردن فیتوسایدروفورها (PS) باعث افزایش دسترسی روی برای گیاه می‌شوند (۱۶۱،۳۱). به‌علاوه ترشحات ریشه با کاهش مقدار pH می‌تواند دسترسی به روی به‌کمک افزایش انحلال روی از مواد معدنی و آلی خاک را بهبود بخشد.

بخشی از مطالعات بر نقش ماده مترشحه ریشه در کارایی روی متمرکز شده است. ترشح بیشتر اسیدهای آلی توسط ریشه گیاهان کارا در جذب روی، در جو گزارش شده است (۱۰۳). علاوه بر اسیدها، فیتوسایدروفورهای آزاد شده از ریشه‌ها نیز در متحرک کردن و جمع‌آوری روی در خاک‌های آهکی بسیار مؤثر هستند (۱۴۷). آنها درگیر متحرک کردن روی از آپوپلاست ریشه گندم (۱۶۲) و احتمالاً، انتقال و حلالیت روی درون گیاه هستند (۱۵۳). تحت کمبود روی، انتشار فیتوسایدروفورها در گندم دوروم ناکارآمد در جذب روی، در حدود ۸-۶ برابر پایین‌تر از گندم نان کارآمد در جذب روی است (۳۹). نتایج در زمینه نقش فیتوسایدروفورها ترشح‌شده از ریشه در کارایی جذب روی متناقض و تا حدودی بحث‌برانگیز است. ایرنوگلو و همکاران (۴۸) مشاهده‌کردند انتشار فیتوسایدروفورها تأثیری در افزایش کارایی ژنوتیپ‌ها تحت شرایط کمبود روی ندارد؛ و کمبود روی انتشار فیتوسایدروفورها را به‌میزان قابل توجهی در ارقام گندم و جو القاء نمی‌کند. اگر چه ترشح فیتوسایدروفورها از ریشه چندان اهمیت عمده‌ای در کارایی روی ندارد، اما بی‌تأثیر هم نخواهد بود. تصمیم نهایی در انتظار نتایج حاصل از مطالعات بیشتر است (۱۰۹). ژنوتیپ‌های کارآمد نسبت به ناکارآمدها در جذب روی می‌توانند روی بیشتری از ریشه‌ها به ساقه‌ها تحت شرایط روی کم انتقال دهند (۳۵). کارایی بالای چاودار نسبت به سایر غلات در جذب و تجمع عنصر روی عمدتاً به پتانسیل بیشتر این گیاه در جابجا کردن روی به ساقه‌ها مرتبط است (۳۴). ژن‌های حمل‌شده توسط کروموزوم‌های ۱ و ۷ در چاودار عامل کارائی بهتر این گیاه در مقایسه با سایر غلات می‌باشد (۱۲۸) که با انتقال این کروموزوم‌ها به غلاتی مثل گندم می‌توان باعث افزایش کارائی روی در آنها گردید (۲۸). خان و همکاران (۷۶) به این نتیجه رسیدند که جذب بهتر روی همراه با انتقال بهتر از ریشه به ساقه می‌تواند در کارایی روی در ژنوتیپ‌های نخود مهم باشد. البته برخی از گزارش‌ها نشان می‌دهد انتقال روی از خاک به ریشه و سپس به ساقه، فاکتور مهمی در کارایی روی نمی‌باشد. هیچ اختلاف معنی‌داری در غلظت روی ساقه بین ژنوتیپ‌های کارآمد و ناکارآمد در جذب روی، در خاک‌هایی با مقدار روی پایین وجود ندارد، حتی زمانی‌که تفاوت‌های زیادی در علائم قابل مشاهده کمبود روی در ژنوتیپ‌ها دیده می‌شود (۳۸). نتایج مربوط به تقسیم بافت برگ در ارقام رشدیافته گندم تحت شرایط کمبود روی نشان می‌دهد در هر دو رقم کارآمد و ناکارآمد، میزان روی در سیتوپلاسم (۱۱-۹ درصد) و واکوئل (۸۵-۸۳ درصد) مشابه است. این نتایج نشان می‌دهد انتشار روی در سلول‌های مجاور ممکن است نقشی در کارایی روی نداشته باشد، اما واضح است که مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است.

ژنوتیپ‌های کارآمد در جذب روی ممکن است حاوی مقدار بیشتر روی باشند که به‌آسانی در واکنش‌های متابولیک و اتصال به آنزیم‌های نیازمند به روی شرکت دارند. تحت شرایط کمبود روی و در غلظت مشابه روی در برگ‌ها، فعالیت آنزیم‌های نیازمند به روی (مثل کاربنیک آنهیدراز و سوپراکسید دیسموتاز) در ژنوتیپ‌های کارآمد در جذب روی نسبت به ژنوتیپ‌های ناکارآمد بیشتر است (۱۱۱،۳۴). گنج و همکاران (۵۷) اظهار کردند کارایی بیشتر ژنوتیپ‌های جو ممکن است با استفاده کارآمدتر روی در سطح سلولی مرتبط باشد.

نقش روی در تحمل به خشکی گیاهان در دیم‌زارها

بخش عمده‌ای از مناطق زیر کشت غلات در دنیا و ایران از تنش خشکی و توزیع نامنظم بارش در طول فصل رشد رنج می‌برند. تنش خشکی و کمبود روی از عوامل عمده محدود کننده تولید محصول در دیم‌زارهای ایران بوده و باعث کاهش بهره‌وری دیم‌زارها می‌شوند، اما اثرات همزمان تنش خشکی و کمبود روی هنوز به‌صورت وسیعی در دیم‌زارها مطالعه نشده‌اند. وضعیت تغذیه روی در گیاه ممکن است حساسیت گیاه به کمبود آب را به‌طرق مختلف تحت‌تأثیر قرار دهد. گیاهان در معرض تنش روی، کارایی کمتری در استفاده از آب داشته و توانایی آنها در تنظیم فشار اسمزی جهت مقابله با تنش رطوبتی کمتر از گیاهانی است که به‌میزان کافی روی

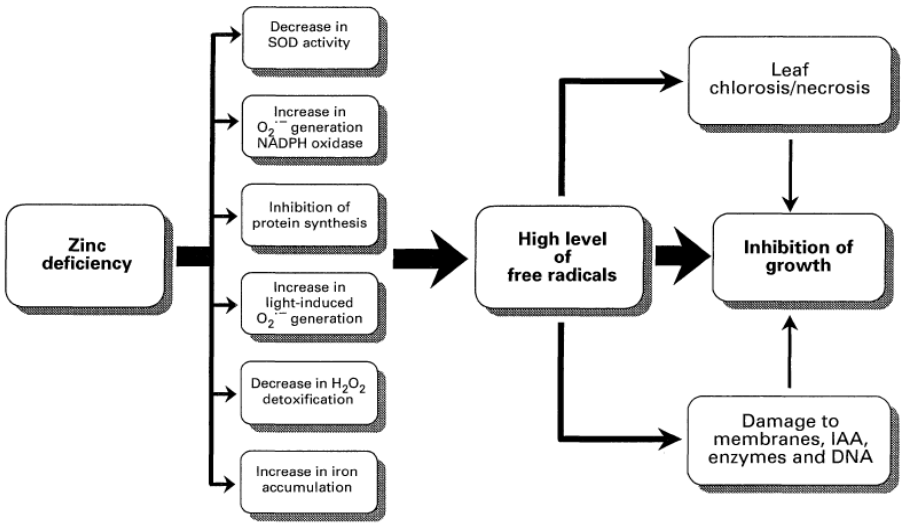
[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

دسترسی دارند. به‌علاوه، میزان کافی روی در غیرسمی کردن گونه‌های اکسیژن فعال و نیز کاهش تولید رادیکال‌های آزاد حاصل از تنش خشکی مؤثر می‌باشد. تحمل به تنش‌های محیطی معمولاً با نیاز بالا به روی برای تنظیم و حفظ بیان ژن‌های دخیل در محافظت از سلول‌ها در برابر اثرات مضر استرس همراه است. لذا کمبود روی قابل دسترس گیاه می‌تواند باعث تشدید کاهش عملکرد در زمان وقوع خشکی در دیم‌زارها گردد (۴۷،۸).

تنش خشکی می‌تواند جذب روی توسط گیاه را به‌طرق مختلف از جمله با کاهش رشد و توسعه ریشه، کاهش تحرک و جابجایی روی در خاک و کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌هایی نظیر *Arbuscular mycorrhizae* تحت تاثیر قرارداده (۱۲۵،۵۲،۶) و منجر به کاهش جذب روی و نیز غلظت آن در بافت‌های گیاهی گردد (۶۸). به‌علاوه در شرایط تنش خشکی، تداخل سازوکارهای جذب و تخلیه همراه با کاهش میزان تعرق، باعث کاهش جذب عناصر غذایی از جمله روی می‌گردند (۹۰،۹). البته تنوع‌ژنتیکی در بین گیاهان برای جذب بیشتر روی تحت تنش خشکی گزارش شده‌است (۱۶۶،۶۸،۵۵،۸،۳).

در دیم‌زارها، دسترسی گیاه به‌میزان مناسب عناصر غذایی از جمله روی می‌تواند نقش مهمی در تحمل به خشکی بازی کند (۱۲۵،۸). کمبود آب یک تنش اکسیداسیونی به‌شمار می‌رود چراکه باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در گیاه مخصوصاً در طی فرآیند فتوسنتز می‌گردد (۱۲۴،۸۲،۶۰، ۱۳۲). در شرایط تنش، تولید انواع مختلفی از ROS شامل پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، سوپراکسید (O^{2-})، رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و اکسیژن منفرد ($1O_2$) از تولیدات غیرقابل اجتناب متابولیسم سلولی می‌باشد. در شرایط بهینه، سلول قادر به از بین‌بردن و غیرسمی کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن توسط آنزیم‌های حاوی روی نظیر آسکوربیک پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز و سوپراکسید دسموتاز می‌باشد؛ که البته فعالیت این آنزیم‌ها به‌وجود میزان کافی روی در گیاه وابسته می‌باشد. ولی در شرایط تنش خشکی، تولید این رادیکال‌ها بیش از آن مقداری است که گیاه بتواند مانع از خسارت آنها گردد. لذا تولید بیش از حد ROS باعث شکستن رشته DNA (۱۹)، پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی (۹۴)، غیرفعال‌شدن آنزیم‌ها (۷۳)، دناتوراسیون پروتئین (۱۸) و ممانعت از پیشرفت چرخه سلولی (۱۰۵) می‌گردد. تولید ROS القا شده بوسیله تنش خشکی و افزایش حساسیت گیاه به خسارت در فرآیندهای طبیعی کلروپلاست زمانی بیشتر تشدید پیدا می‌کند که گیاه تحت تنش کمبود روی باشد. کمبود روی می‌تواند فعالیت آنزیم‌های ضداکسیداسیونی را کاهش دهد (۳۲, ۱۵۷)، بنابراین تنش اکسیداسیونی می‌تواند جزئی از تنش کمبود روی نیز محسوب گردد (شکل ۵). روی در کاهش تولید و نیز غیرسمی کردن ROS به‌کمک آنزیم‌های ضداکسیداسیونی موجود در کلروپلاست نظیر سوپراکسید دسموتاز (SOD) مؤثر است (۳۲،۲۴). حال با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان ضرورت استفاده از کود روی در کاهش تأثیرات منفی تنش خشکی و نیز افزایش بهره‌وری دیم‌زارهای مناطق خشک را بیشتر استنباط نمود. به‌دلیل عدم وجود مطالعات لازم در زمینه تأثیر کاربرد کود روی در بهبود تحمل به تنش خشکی، این قبیل مطالعات می‌تواند تأثیر مهمی در افزایش بهره‌وری دیم‌زارهای ایران داشته باشد.



شکل ۵- تغییرات فیزیولوژیکی عمده در نتیجه کمبود روی در سلول (۲۴)
Figure 5. Major physiological changes in cell due to Zn deficiency

اصلاح ارقام برای کارایی روی

برخی از مشکلات تغذیه‌ای در گیاهان را نمی‌توان به راحتی با تغییرات شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌ها رفع کرد، بنابراین اصلاح گیاهان سازگار به خاک‌هایی با شرایط تغذیه‌ای نامناسب ضروری است. به‌عنوان مثال، کمبود ریزمغذی‌ها به‌واسطه pH بالا را نمی‌توان همیشه با راه‌کارهای زراعی (کوددهی) رفع کرد و در این موارد یک راه‌حل ژنتیکی نیازمند می‌باشد (۲۷). علاوه براین، کمبود روی ناشی از محدودیت‌های خاک زیرین، خشکی خاک‌های سطحی و بیماری‌ها را از طریق استفاده کودی به‌طور کامل

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

نمی‌توان رفع کرد (۶۳). بنابراین، اصلاح و استفاده از ژنوتیپ‌های کارآمد برای جذب روی می‌تواند راه‌حلی مؤثر و پایدار برای تولید بیشتر محصولات زراعی در شرایط کمبود روی باشد. صفات مختلفی برای انتخاب ژنوتیپ‌های روی‌کارا تحت شرایط مزراعه‌ای، گلخانه‌ای و محلول غذائی مدنظر محققین قرار گرفته‌است (جدول ۲). گزینش برای تنوع غلظت و میزان عناصر ریزمغذی در دانه و اندام هوایی، از مراحل اولیه اصلاح و تولید گیاهان با تراکم بالای این عناصر می‌باشد. در برخی مطالعات اختلاف معنی‌داری بین ارقام مختلف گندم از لحاظ پاسخ به کاربرد کود روی، از نظر عملکرد دانه و افزایش کیفیت گزارش شده‌است (۷۸).

جدول ۲- مشخصات گیاهی برای گزینش ژنوتیپ‌های غلات برای صفت کارایی روی

Table 2. The traits useful for screening Zn efficient genotypes in cereal

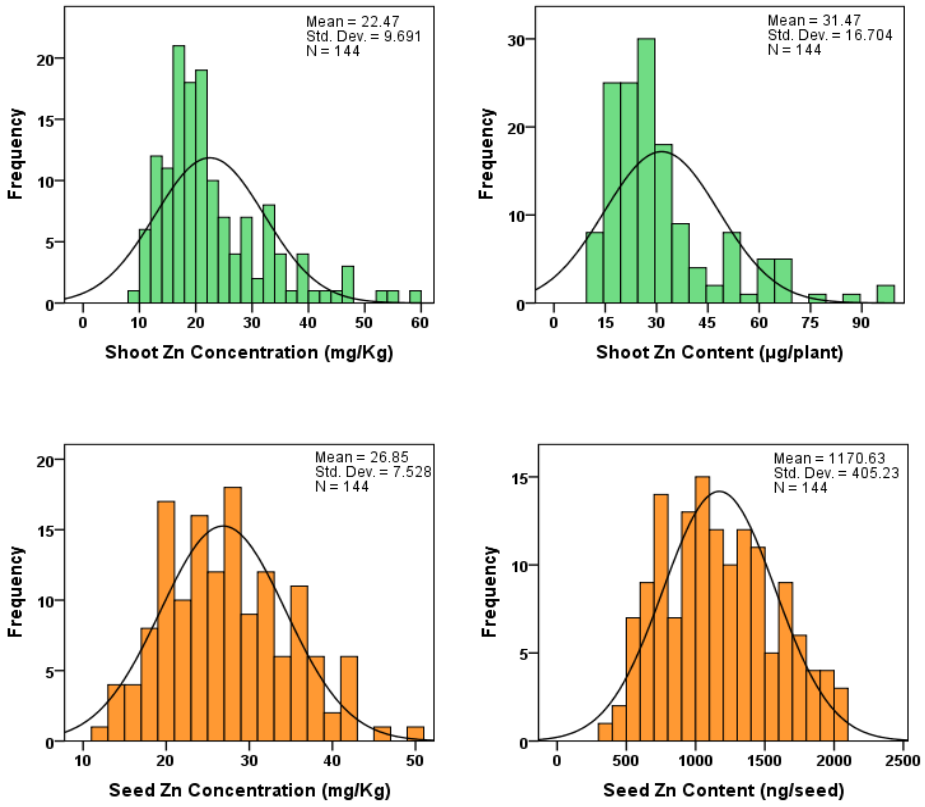
صفت گیاهی	شرایط کشت	رفرنس
رتبه‌بندی علائم ظاهری کمبود روی	مزرعه، گلخانه، محلول کشت	(۵۷ ,۳۴)
وزن خشک ساقه/ریشه	گلخانه، محلول‌کشت	(۱۲۲ ,۹۶)
قطر ریشه‌های موئی	مزرعه، گلخانه، محلول کشت	(۱۱۴ ,۱۰۴ ,۴۶)
محتوای روی در ساقه و بذر	مزرعه، گلخانه، محلول کشت	(۱۲۲ ,۱۲۱)
میزان جذب روی در ساقه	گلخانه، محلول کشت	(۳۶ ,۳۴)
میزان انتقال روی به ساقه	محلول کشت	(۱۱۱ ,۳۴)
آزادسازی فیتوسایدروفرها	گلخانه، محلول کشت	(۱۰۱ ,۹۹ ,۴۲)
آزادسازی اسیدهای آلی	گلخانه، محلول کشت	(۱۴۲ ,۱۰۳)
فعالیت آنزیم انهیدرازکربونیک	محلول کشت	(۱۲۷ ,۱۰۶)
فعالیت آنزیم دسموتاز سوپراکسید	گلخانه، محلول کشت	(۶۹ ,۳۹)

در همه گونه‌های زراعی، ژنوتیپ‌ها اغلب به‌طور قابل توجهی می‌توانند در حساسیتشان به کمبود روی متفاوت باشند. آنچه مهم است آزمایش ژنوتیپ‌های زراعی است تا ژنوتیپ‌های متحمل بتوانند در خاک‌هایی با میزان روی کم رشد کنند. ژنوتیپ‌ها می‌توانند برای کارایی روی بر پایه آزمایشات و شدت علائم ظاهری کمبود روی قابل مشاهده در برگ‌ها آزمایش شوند. با مطالعه علائم ظاهری در برگ جو در مرحله رشد رویشی، چنین استنباط می‌شود که تحمل به کمبود روی در ژنوتیپ‌های کارآمد در مقایسه با ناکارآمدها بوسیله تک ژن کنترل می‌شود (۵۷).

گیاهان زراعی از جمله غلات تنوع ژنتیکی قابل توجهی برای غلظت مواد معدنی مانند روی نشان می‌دهند (۵۹). برای مثال در ژنوتیپ‌های جو رشد یافته در مزرعه، محدوده غلظت روی در دانه ۶۱-۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (۱۲۱). آزمایش ژنوتیپ‌های گندم نشان‌داد غلظت روی در دانه در محدوده ۴۲-۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده و محدوده مشابهی از غلظت روی در برنج نیز یافت شده‌است (۱۵). در مطالعه‌ای توسط صادق‌زاده (۱۱۷) بر روی توده‌ها و لاین‌های جو مشاهده شد که برای میزان روی در بوته تنوع وسیعی بین ژنوتیپ‌های جو وجود دارد. دامنه تغییرات غلظت روی در شاخساره ۵۹-۹ میلی‌گرم روی در کیلوگرم ماده خشک بود و متوسط آن در تمام لاین‌ها ۲۲/۵ میلی‌گرم بود (شکل ۶). برای صفت غلظت روی در بذر، وجود دامنه تغییرات ۴۹-۱۲ میلی‌گرم روی در کیلوگرم بذر، نشانگر تنوع ژنتیکی زیاد مابین ژنوتیپ‌ها بود. متوسط غلظت روی در بذر تمامی لاین‌ها حدود ۲۷ میلی‌گرم بود. متوسط غلظت روی در ژنوتیپ‌های بومی بانک ژن (۲۶ میلی‌گرم) کمتر از متوسط لاین‌های پیشرفته و ارقام دیم (۳۳ میلی‌گرم) بود، این میزان برای رقم سهند ۳۷ و برای رقم محلی قره‌آرپا ۴۹ میلی‌گرم بود. با وجود تنوع ژنوتیپی زیاد در کارایی روی در میان محصولات زراعی، نیاز به انتخاب هدفمند و اصلاح گیاهان با عملکرد دانه بهتر و نیز محتوای روی بیشتر وجود دارد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]



شکل ۶- توزیع فنوتیپی میانگین صفات غلظت و میزان روی در بوته و بذر لاین‌های جو
Figure 6. Phenotypic distribution of Zn concentration and content in stem and seed of barley lines

آزمایشات مزرعه‌ای و گلخانه‌ای، تفاوت‌های ژنتیکی مهمی در مورد کارایی روی در ژنوتیپ‌های غلات نشان‌داده که بیانگر امکان‌پذیر بودن اصلاح برای کارایی روی است (۱۱۸). آزمایش‌های گلخانه‌ای به‌دلیل کم هزینه‌تر و سریعتر بودن از کار مزرعه رایج‌تر هستند. علاوه بر این، مسئله ناهمگونی خاک می‌تواند از طریق آزمایشات گلدانی رفع شود. البته باید توجه داشت آزمایشات گلخانه‌ای نسبت به مزرعه‌ای کمتر قابل اعتماد هستند. به‌علاوه، ارزیابی شدت علائم کمبود روی در برگ‌ها همراه با نسبت کارایی روی (عملکرد در روی پایین و عملکرد در روی بالا) به‌عنوان یک روش مناسب برای آزمایش سریع و قابل اعتماد تعداد زیادی از ژنوتیپ‌ها برای کارایی روی در کوتاه‌مدت به‌نظر می‌رسد (۲۷). لومبنیز و سینگ (۸۶) چهار روش برای توصیف تحمل به کمبود روی در جو و گندم انتخاب کردند:

- نسبت وزن ساقه در شرایط کمبود روی در مقایسه با میزان بهینه روی (شاخص کارایی روی)
- نسبت ساقه به ریشه در شرایط کمبود روی در مقایسه با میزان بهینه روی
- میزان کل روی در ساقه تحت شرایط کمبود روی
- میزان وزن خشک ساقه تحت شرایط کمبود روی

نقش ذخایر بالای روی در دانه

برخی از ژنوتیپ‌های محصولات زراعی، ظرفیت بزرگی برای جذب موادمعدنی و ذخیره آنها در دانه حتی در خاک‌هایی با مقادیر کم ریزمغذی‌ها دارند (۱۲۰). با این‌حال، فرآیندهای فیزیولوژیکی کنترل تجمع ریزمغذی‌ها در دانه شناخته نشده است (۱۵۶). جذب ریزمغذی‌ها و تجمع آنها در گیاهان ارثی است و می‌تواند اصلاح شود. بنابراین، بررسی تنوع ژنتیکی برای این صفات اولین گام در اصلاح این صفات خواهد بود (۱۱۶). تنوع ژنوتیپی قابل توجهی برای تجمع روی دانه در چندین محصول اصلی شامل برنج، گندم، جو، ذرت و لوبیا وجود دارد (۱۴۵،۱۲۱،۵۷،۱۳،۱). برای صفت غلظت روی در بذر جو، دامنه تغییرات ۴۹-۱۲ میلی‌گرم روی در کیلوگرم بذر مشاهده گردید که نشانگر تنوع ژنتیکی زیاد مابین ژنوتیپ‌ها است (۱۱۹). کشت بذوری با غلظت بیشتر مواد مغذی دانه می‌تواند باعث افزایش تولید محصول گردد، مخصوصاً زمانیکه چنین دانه‌هایی در خاک‌هایی با مقدار کم مواد مغذی قابل دسترس کاشته شده باشند. کاشت بذر با غلظت بالای روی می‌تواند یک راه‌حل عملی برای افزایش عملکرد تحت کمبود روی باشد (۲۷).

در آزمایشات گلخانه‌ای روی گندم، گیاهان حاصل از بذوری با غلظت بالای روی، رشد و عملکرد دانه بهتری نسبت به گیاهان حاصل از دانه‌هایی با مقدار روی پایین بودند (۱۱۰). چنین نتایجی در مطالعات مزرعه‌ای نیز مشاهده گردید (۲۷). گنج و همکاران (۵۶) گزارش کردند محتوای بالای روی در بذر جو به‌طور قابل‌توجهی علائم قابل مشاهده کمبود

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

روی را کاهش می‌دهد و رشد رویشی، بویژه هنگامی‌که ذخیره روی خاک کاهش می‌یابد، اصلاح می‌شود.

اصلاح برای بذوری با میزان بیشتری از ریزمغذی‌ها می‌تواند سبب مقاومت به بیماری‌های ریشه و در نتیجه نیاز کم به قارچ‌کش‌ها شود. اگر میزان مواد مغذی بذر قادر به تأمین مواد لازم برای جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها در خاک‌های فقیر نباشد، گیاه مستعد تعدادی از بیماری‌ها، خصوصاً بیماری‌های قارچی ریشه می‌شود. در گیاهان حاصل از بذوری با ریزمغذی‌های بیشتر، از نقطه نظر زراعی، ذخیره بذر ممکن است باعث گسترش سیستم ریشه برای جبران مقدار کم مواد مغذی در خاک‌های فقیر شود (۱۵۴). با توجه به موارد بالا، کشاورزان می‌توانند با انتخاب ژنوتیپ‌هایی با میزان بیشتر روی در بذر، انتظار رسیدن به سود بیشتر مخصوصاً در خاک‌های فقیر را داشته باشند. استفاده از بذوری با محتوای روی بالا می‌تواند راه‌حل‌های عملی برای کاهش مشکل کمبود روی، بویژه در مناطقی که کشاورزان از کمبود عنصر روی خاک رنج می‌برند، باشد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت فاکتورهای متعددی در دیم‌زارهای ایران نظیر بافت و نوع خاک، میزان پایین روی قابل دسترس موجود در خاک، آهکی بودن خاک، pH بالای خاک، میزان کم مواد آلی خاک، دمای پایین خاک در اوایل فصل رشد در مناطق دیم کوهستانی، تنش خشکی در مراحل رشد گیاه، استفاده زیاد از کودهای فسفره و در نهایت برهم‌کنش بین عناصر باعث ایجاد تنش کمبود روی می‌شوند. از طرف دیگر، تحمل به خشکی در غلات به‌میزان فراهمی عنصر روی بستگی زیادی دارد، چراکه این عنصر در بیان ژن‌های موثر در تحمل و نیز محافظت سلول‌ها نقش مهمی دارد. حال با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان ضرورت اجرای طرح‌های تحقیقاتی در زمینه اصلاح و معرفی ارقام کارا از نظر جذب و استفاده از روی را در جهت کاهش تاثیرات منفی کمبود روی و نیز تنش خشکی در جهت افزایش بهره‌وری دیم‌زارهای کشور را بیشتر استنباط نمود. در صورت تأمین شدن روی مورد نیاز گیاه، آنزیم‌های حاوی روی نظیر آسکوربیک پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز و سوپراکسید دیسموتاز قادر به از بین بردن و غیرسمی کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن حاصل از تنش خشکی بوده و در نتیجه باعث تعدیل اثرات مخرب رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاه در دیم‌زارها خواهند شد. در کوتاه‌مدت، در نواحی با کمبود شدید روی، کاربرد کود روی (در خاک، محلول‌پاشی و پرایمینگ بذر) روشی سریع و کارا در تأمین نیازهای گیاه خواهد بود. البته برای بهبود تاثیرگذاری استفاده از کود روی در مناطق مختلف، بایستی توصیه کودی با توجه به نوع و بافت خاک، نوع گیاه و واریته، تناوب و سیستم زراعی و فاکتورهای محیطی برای هر منطقه انجام گیرد. البته به‌دلیل مشکلاتی نظیر ترسیب قسمت اعظم کود در خاک‌های رسی، خشکی سطح خاک در دیم‌زارها و عدم دسترسی زارعین به کود روی، جهت نیل به یک راهکار پایدار و اساسی برای تصحیح کمبود روی و افزایش تحمل به تنش خشکی در غلات، اصلاح غلات و معرفی ارقام و ژنوتیپ‌های کارا در جذب و استفاده از روی می‌تواند تکمیل‌کننده کاربرد کود روی مدنظر قرار گیرد.

منابع

1. Abdoli, M., E. Esfandiari, S.B. Mousavi and B. Sadeghzadeh. 2014. Effects of foliar application of zinc sulfate at different phenological stages on yield formation and grain zinc content of bread wheat (cv. Kohdasht). Azarian Journal of Agriculture, 1(1): 11-17.
2. Abdoli, M., E. Esfandiari, B. Sadeghzadeh and S.B. Mousavi. 2016. Zinc application methods affect agronomy traits and grain micronutrients in bread and durum wheat under zinc-deficient calcareous soil. Yuzuncu Yil University Journal Of Agricultural Sciences, 26(2): 202-214.
3. Abo-Hegazi, A.M.T., N.B. Rofail, E.A. Eissa and A.M. Hassan. 1996. Effect of zinc on grain characteristics of draught-resistant rice mutants. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 206(2): 349-357.
4. Alloway, B.J. 2001. Zinc - the vital micronutrient for healthy, high-value crops. International Zinc Association, Brussels.
5. Alloway, B.J. 2004. Zinc in Soils and Crop Nutrition. International Zinc Association Communications. IZA publications, Brussels, Belgium.
6. Alloway, B.J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. 2nd edition, published by IZA and IFA, Brussels, Belgium and Paris, France.
7. Amer, F., A.I. Rezk and H.M. Khalid. 1980 Fertilizer zinc efficiency in flooded calcareous soils Soil Science Society of America Journal, 44: 1025-1030.
8. Bagci, S.A., H. Ekiz, A. Yilmaz and I. Cakmak. 2007. Effects of zinc deficiency and drought on grain yield of field-grown wheat cultivars in Central Anatolia. Journal of Agronomy and Crop Science, 193(3): 198-206.
9. Baligar, V.C., N.K. Fageria and Z.L. He. 2001. Nutrient use efficiency in plants. Commun. Soil Sci. Plant Anal, 32: 921-950.
10. Barak, P. and P.A. Helmke. 1993. The chemistry of zinc, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, pp 1-13, Editor. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
11. Barrow, N.J. 1993. Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 15-31: Dordrecht, The Netherlands. 15-31.
12. Barua, U.M., K.J. Chalmers, W.T.B. Thomas, C.A. Hackett, V. Lea, P. Jack, B.P. Forster, R. Waugh and W. Powell. 1993. Molecular mapping of genes determining height, time to heading, and growth habit in barley (*Hordeum vulgare* L.). Genome, 36: 1080-1087.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

13. Behera, S.K., A.K. Shukla, M. Singh, R.H. Wanjari and P. Singh. 2015. Yield and zinc, copper, manganese and iron concentration in maize (*Zea may*s L.) grown on vertisol as influenced by zinc application from various zinc fertilizers. Journal of Plant Nutrition, 38(10): 1544-1557.
14. Berg, J.M. and Y. Shi. 1996. The galvanization of biology: a growing appreciation for the roles of zinc. Science, 271: 1081-1085.
15. Bouis, H. 1995. Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. Administrative Committee on Coordination-Subcommittee on Nutrition of the United Nations. ACC/SCN c/o WHO, Geneva, Switzerland. SCN News, 12: 15-19.
16. Bouis, H. 1996. Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. Nutrition Reviews, 54(5): 131-137.
17. Bouis, H.E. 2007. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost? Proceedings of the Nutrition Society, 62(2): 403-411.
18. Bowler, C., M.V. Montagu, and D. Inze. 1992. Superoxide dismutase and stress tolerance. Annual Review of Plant Biology, 43(1): 83-116.
19. Brawn, K. and I. Fridovich. 1981. DNA strand scission by enzymically generated oxygen radicals. Archives of Biochemistry and Biophysics, 206(2): 414-419.
20. Bray, E.A., J. Bailey-Serres, and E. Weretilnyk. 2000. Responses to abiotic stresses, in *Biochemistry and molecular biology of plants*, W. Gruissem, B. Buchannan, and R. Jones, Editors. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD. 1158-1249.
21. Brennan, R.F., J.D. Armour and D.J. Reuter. 1993. Diagnosis of zinc deficiency, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic, pp. 168-181. 168-181.
22. Brown, P.H., I. Cakmak and Q. Zhang. 1993. Form and function of zinc in plants, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 93-106: Dordrecht, The Netherlands.
23. Brümmer, G.W., J. Gerth and K.G. Tiller. 1988. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of nickel, zinc and cadmium by goethite. I. Adsorption and diffusion of metals. Journal of Soil Science, 39(1): 37-52.
24. Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. The New Phytologist, 146(2): 185-205.
25. Cakmak, I. 2002. Plant nutrition research: priorities to meet human needs for food in sustainable ways. Plant and Soil, 247: 3-24.
26. Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? Plant and Soil, 302: 1-17.
27. Cakmak, I. and H.J. Braun. 2001. Genotypic variation for zinc efficiency, in *Application of Physiology in Wheat Breeding*, M.P. Reynolds, J.I. Ortiz-Monasterio, and A. McNab, Editors. D.F. CIMMYT, pp. 183-199: Mexico. 183-199.
28. Cakmak, I., R. Derici, B. Torun, I. Tolay, H. Braun and R. Schlegel. 2012. Role of rye chromosomes in improvement of zinc efficiency in wheat and. in *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment: Proceedings of the XIII International Plant Nutrition Colloquium, 13–19 September 1997, Tokyo, Japan*. Springer Science & Business Media.
29. Cakmak, I., H. Ekiz, A. Yilmaz, B. Torun, N. Koleli, I. Gultekin, A. Alkan and S. Eker. 1997. Differential response of rye, triticale, bread and durum wheats to zinc deficiency in calcareous soils. Plant and Soil, 188(1): 1-10.
30. Cakmak, I., R. Graham and R.M. Welch. 2002. Agricultural and molecular genetic approaches to improving nutrition and preventing micronutrient malnutrition globally, in *Encyclopedia of Life Support Systems*, I. Cakmak and R.M. Welch, Editors. Eolss Publishers, Oxford, pp 1075-1099. 1075-1099.
31. Cakmak, I., K.Y. Gulut, H. Marschner, and R.D. Graham. 1994. Effect of zinc and iron deficiency on phytosiderophore release in wheat genotypes differing in zinc efficiency. Journal of Plant Nutrition, 17(1): 1-17.
32. Cakmak, I. and H. Marschner. 1988. Enhanced superoxide radical production in roots of zinc-deficient plants. Journal of Experimental Botany, 39(10): 1449-1460.
33. Cakmak, I., H. Ozkan, H.J. Braun, R.M. Welch and V. Romheld. 2000. Zinc and iron concentrations in seeds of wild, primitive and modern wheats. Food and Nutrition Bulletin, 21(401-403).
34. Cakmak, I., L. Oztürk, S. Eker, B. Torun, H.I. Kalfa and A. Yılmaz. 1997. Concentration of zinc and activity of copper/zinc-superoxide dismutase in leaves of rye and wheat cultivars differing in sensitivity to zinc eficiency. Journal of Plant Physiology, 151(1): 91-95.
35. Cakmak, I., N. Sari, H. Marschner, H. Ekiz, M. Kalaycy, A. Yilmaz and H.J. Braun. 1996. Phytosiderophore release in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. Plant and Soil, 180: 183-189.
36. Cakmak, I., N. Sari, H. Marschner, M. Kalayci, A. Yilmaz, S. Eker and K.Y. Gulut. 1996. Dry matter production and distribution of zinc in bread and durum wheat genotypes differing in Zn efficiency. Plant and Soil, 180: 173-181.
37. Cakmak, I., N. Sary, H. Marschner, H. Ekiz, M. Kalaycy, A. Yilmaz and H.J. Braun. 1996. Phytosiderophore release in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. Plant and Soil, 180: 183-189.
38. Cakmak, I., I. Tolay, A. Ozdemir, H. Ozkan, L. Ozturk and C.I. Kling. 1999. Differences in zinc efficiency among and within diploid, tetraploid and hexaploid wheats. Annals of Botany, 84(2): 163-171.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

39. Cakmak, I., B. Torun, B. Erenoglu, L. Ozturk, H. Marschner, M. Kalayci, H. Ekiz and A. Yilmaz. 1998. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. Euphytica, 100: 349-357.
40. Castilho, P.D. and W.J. Chardon. 1995. Uptake of soil cadmium by three field crops and its prediction by a pH-dependent Freundlich sorption model. Plant and Soil, 171: 263-266.
41. Chesworth, W. 1991. Geochemistry of micronutrients, in *Micronutrients in Agriculture*, J.J. Mortvedt, et al., Editors. Soil Science Society of America Inc., pp. 1-30: Madison, USA. 1-30.
42. Daneshbakhsh, B., A.H. Khoshgoftarmanesh, H. Shariatmadari and I. Cakmak. 2013. Phytosiderophore release by wheat genotypes differing in zinc deficiency tolerance grown with Zn-free nutrient solution as affected by salinity. Journal of Plant Physiology, 170(1): 41-46.
43. Dang, Y.P., D.G. Edwards, R.C. Dalal and K.G. Tiller. 1993. Identification of an index tissue to predict zinc status of wheat. Plant and Soil, 154: 161-167.
44. Demment, W.M., M.M. Young and R.L. Sensenig. 2003. Providing micronutrients through food-based solutions: a key to human and national development. J Nutr, 133: 3879-3885.
45. Donald, C.M. and J.A. Prescott. 1975. Trace elements in Australian crop and pasture production1924-74, in *Trace Elements in Soil-Plant-Animal Systems*, D.J.D. Nicholas and A.R. Egan, Editors. Academic Press, Inc., pp. 7-37: New York. 7-37.
46. Dong, B., Z. Rengel and R.D. Graham. 1995. Root morphology of wheat genotypes differing in zinc efficiency. Journal of Plant Nutrition, 18(12): 2761-2773.
47. Ekiz, H., S.A. Bagcý, A. Kýral, S. Eker, I. Gültekin, A. Alkan and I. Cakmak. 1998. Effects of zinc fertilization and irrigation on grain yield and zinc concentration of various cereals grown in zinc-deficient calcareous soils. Journal of Plant Nutrition, 21(10): 2245-2256.
48. Erenoglu, B., I. Cakmak, H. Marschner, V. Romheld, S. Eker, H. Daghan, M. Kalayci and H. Ekiz. 1996. Phytosiderophore release does not relate well with zinc efficiency in different bread wheat genotypes. Journal of Plant Nutrition, 19: 1569-1580.
49. Eyüpoglu, F., N. Kurucu and U. Sanısag. 1994. Status of plant available micronutrients in Turkish soils. In: Soil and Fertilizer. Research Institute Annual Report No. R-118. Ankara, Turkey, pp. 25-32. 25-32.
50. Faber, B.A., R.J. Zasoski, R.G. Burau, and K. Uriu. 1990. Zinc uptake by corn as affected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. Plant and Soil, 129(2): 121-130.
51. Fageria, N.K. 2002. Micronutrients' influence on root growth of upland rice, common bean, corn, wheat, and soybean. Journal of Plant Nutrition, 25(3): 613-622.
52. Fageria, N.K., V.C. Baligar and R.B. Clark. 2002. Micronutrients in crop production. Adv. Agron, 77: 185-267.
53. Feiziasl, V. 2008. Comparison of different methods for determining the Zn critical level of dryland wheat in the Northwest of Iran. Journal Of Water and Soil, 22(2): 133-149 (In Persian).
54. Foth, H.D. and B.G. Ellis. 1997. Soil Fertility. 2nd ed.: CRC Press.
55. Garg, B.K. 2003. Nutrient uptake and management under drought: nutrient-moisture interaction. Curr. Agric, 27(1/2): 1-8.
56. Genc, Y., G.K. McDonald and R.D. Graham. 2000. Effect of seed zinc content on early growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) under low and adequate soil zinc supply. Australian Journal of Agricultural Research, 51: 37-45.
57. Genc, Y., G.K. McDonald, and R.D. Graham. 2002. A soil-based method to screen for zinc efficiency in seedlings and its ability to predict yield responses to zinc efficiency in mature plants. Australian Journal of Agricultural Research, 53: 409-421.
58. Genc, Y., G.K. McDonald, and R.D. Graham. 2006. Contribution of different mechanisms to zinc efficiency in bread wheat during early vegetative stage. Plant and Soil, 281: 353-367.
59. Ghodsizad, L., F. Rahimzadeh Khoei and B. Sadeghzade. 2013. Zinc absorption evaluation in barley varieties and landraces under cold dryland conditions. Master of Science, Tabriz Azad University (In Persian).
60. Goodman, B.A. and A.C. Newton. 2005. Effects of drought stress and its sudden relief on free radical processes in barley. J. Sci. Food Agric, 85: 47-53.
61. Graham, R.D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. Advances in Plant Nutrition, 1: 57-102.
62. Graham, R.D., J.S. Ascher and S.C. Hynes. 1992. Selecting zinc-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. Plant and Soil, 146: 241-250.
63. Graham, R.D. and Z. Rengel. 1993. Genotypic variation in Zn uptake and utilization by plants, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 107-114: Dordrecht, The Netherlands. 107-114.
64. Graham, R.D. and R.M. Welch. 1996. Breeding for staple-food crops with high micronutrient density, in *Working Papers on Agricultural Strategies for Micronutrients, No. 3*. International Food Policy Research Institute: Washington, D.C. 1–72.
65. Graham, R.D., R.M. Welch and H.E. Bouis. 2001. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps. Advances in Agronomy, 70: 77-142.
66. Grewal, H.S., R.D. Graham and Z. Rengel. 1996. Genotypic variation in zinc efficiency and resistance to crown rot disease (*Fusarium graminearum* Schw. Group 1) in wheat. Plant and Soil, 186: 219-226.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

67. Grotz, N., T. Fox, E. Connolly, W. Park, M.L. Guerinot and D. Eide. 1998. Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 95(12): 7220-7224.
68. Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan and I. Cakmak. 2006. Genotypic variation in P efficiency between wheat cultivars grown under greenhouse and field conditions. Soil Science and Plant Nutrition, 52(4): 470-478.
69. Hacisalihoglu, G., J.J. Hart, Y. Wang, I. Cakmak and L.V. Kochian. 2003. Zinc efficiency is correlated with enhanced expression and activity of Cu/Zn superoxide dismutase and carbonic anhydrase in wheat. Plant Physiology, 131: 595-602.
70. Hajiboland, R., B. Singh and V. Romheld. 2001. Retranslocation of Zn from leaves as important contributing factor for zinc efficiency of rice genotypes, in *Plant Nutrition - Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems*, W.J. Horst, et al., Editors. Kluwer: Dordrecht, The Netherlands. 226-227.
71. Halvorson, A.D. and W.L. Lindsay. 1977. The critical Zn2+ concentration for corn and the nonabsorption of chelated zinc. Soil Science Society of America Journal, 41(3): 531-534.
72. Hart, J.J., W.A. Norvell, R.M. Welch, L.A. Sullivan and L.V. Kochian. 1998. Characterization of zinc uptake, binding, and translocation of bread and durum wheat cultivars. Plant Physiology, 118: 219-226.
73. Hernandez-Ruiz, J., M.B. Arnao, A.N. Hiner, F. Garcia-Canovas and M. Acosta. 2001. Catalase-like activity of horseradish peroxidase: relationship to enzyme inactivation by H_2O_2. Biochemical Journal, 354(Pt 1): 107-114.
74. Karami, M., M. Afyuni, A.H. Khoshgoftarmanesh, A. Papritz and R. Schulin. 2009. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in central Iran and their relationships with soil and climate variables. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57(22): 10876-10882.
75. Kastrup, V., S. Steiger, U. Luttge, and E. Fischer-Schliebs. 1996. Regulatory effects of zinc on corn root plasma membrane H^+-ATPase. New Phytologist, 134(1): 61-73.
76. Khan, H.R., G.K. McDonald and Z. Rengel. 1998. Chickpea genotypes differ in their sensitivity to Zn deficiency. Plant and Soil, 198(1): 11-18.
77. Khoshgoftarmanesh, A., H. Shariatmadari, N. Karimian, M. Kalbasi and M. Khajehpour. 2005. Zinc efficiency of wheat cultivars grown on a saline calcareous soil. Journal of Plant Nutrition, 27(11): 1953-1962.
78. Khoshgoftarmanesh, A.H., R. Schulin, R.L. Chaney, B. Daneshbakhsh and M. Afyuni. 2010. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 30(1): 83-107.
79. Kochian, L.V. 1991. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants, in *Micronutrients in Agriculture*, J.J. Mortvedt, et al., Editors. Soil Science Society of America, pp. 229-296: Madison, WI. 229-296.
80. Kothari, S.K., H. Marschner and V. Romheld. 1991. Contribution of VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown calacareous soil. Plant and Soil, 131: 177-185.
81. Lantican, M.A., P.L. Pingali and S. Rajaram. 2000. Are marginal wheat environments catching up? CIMMYT World Wheat Overview and Outlook, 2001: 39-44.
82. Li, C.Z., J. Jiao and G.X. Wang. 2004. The important roles of reactive oxygen species in the relationship between ethylene and polyamines in leaves of spring wheat seedlings under root osmotic stress. Plant Sci, 166: 303-315.
83. Li, H.Y., Y.G. Zhu, S.E. Smith, and F.A. Smith. 2003. Phosphorus-zinc interactions in two barley cultivars differing in phosphorus and zinc efficiencies. Journal of Plant Nutrition, 26(5): 1085-1099.
84. Lindsay, W.L. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils, in *Micronutrients in Agriculture*, J.J. Mordvedt, et al., Editors. SSSA Book Series No. 4, pp. 89-112: Madison, WI. 89-112.
85. Liu, Z. 1994. The soil zinc distribution in China. Chinese Agricultural Science, 27: 30-37.
86. Lombnaes, P. and B.R. Singh. 2003. Varietal tolerance to zinc deficiency in wheat and barley grown in chelator-buffured nutrient solution and its effect on uptake of Cu, Fe, and Mn. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 166: 76-83.
87. Loneragan, J.F. and M.J. Webb. 1993. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 119-134: Dordrecht, The Netherlands. 119-134.
88. Malakouti, M.J., P. Keshavarz and N. Karimian. 2008. Comprehensive approach towards identical of nutrient deficiency and optimal fertilization for sustainable agriculture. 7 ed.: Trbiat Modares University. Pub. No. 102. Tehran.
89. Marschner, H. 1993. Zinc uptake from soils, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 59-77: Dordrecht, The Netherlands. 59-77.
90. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2 ed. London: Academic Press.
91. Marschner, H., V. Romheld and M. Kissel. 1986. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. Journal of Plant Nutrition, 9: 695-713.
92. McDonald, G.K., R.D. Graham, J. Lloyd, J. Lewis, P. Lonergan and H. Khabaz-Saberi. 2001. Breeding for improved zinc and manganese efficiency in wheat and barley. in *Proceeding of the 10th Australian Agronomy Conference*. Hobart, Australia, 2001: Department of Plant Science, Waite Institute, Glen Osmond, SA.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

93. Moraghan, J.T. and H.J. Mascagni Jr. 1991. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities, in *Micronutrients in Agriculture*, J.J. Mordvedt, et al., Editors. Soil Science Society of America, pp. 371-425: Madison, WI. 371-425.
94. Moran, J.F., M. Becana, I. Iturbe-Ormaetxe, S. Frechilla, R.V. Klucas and P. Aparicio-Tejo. 1994. Drought induces oxidative stress in pea plants. Planta, 194(3): 346-352.
95. Mortvedt, J.J. and R.J. Gilkes. 1993. Zinc fertilisers, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 33-44: Dordrecht, The Netherlands. 33-44.
96. Moshiri, F., M. Moez-Ardalan, M.M. Tehrani, and G.R. Savaghebi-Firouzabadi. 2010 Zinc efficiency of wheat cultivars in a calcareous soil with low zinc status. Journal Of Water and Soil, 24 (1): 145-153.
97. Narwal, R.P., B.R. Singh and A.R. Panhwar. 1983. Plant availability of heavy metals in a sludge-treated soil: I. Effect of sewage sludge and soil pH on the yield and chemical composition of rape. Journal of Environmental Quality, 12: 358-365.
98. Nayyar, V.K., P.N. Takkar, R.L. Bansal, S.P. Singh, N.P. Kaur and U.S. Sadana. 1990. Micro-nutrients in soils and crops of Punjab. Research Bulletin. Department of Soils, Punjab Agricultural University: Ludhiana, India.
99. Oburger, E., B. Gruber, Y. Schindlegger, W.D. Schenkeveld, S. Hann, S.M. Kraemer, W.W. Wenzel and M. Puschenreiter. 2014. Root exudation of phytosiderophores from soil-grown wheat. New Phytologist, 203(4): 1161-1174.
100. Ova, E.A., U.B. Kutman, L. Ozturk and I. Cakmak. 2015. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. Plant and Soil, 393(1-2): 147-162.
101. Puschenreiter, M., B. Gruber, W.W. Wenzel, Y. Schindlegger, S. Hann, B. Spangl, W.D. Schenkeveld, S.M. Kraemer and E. Oburger. 2017. Phytosiderophore-induced mobilization and uptake of Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn by wheat plants grown on metal-enriched soils. Environmental and Experimental Botany, 138: 67-76.
102. Rashid, A. and E. Rafique. 1998. Micronutrients in Pakistani Agriculture: Significance and Use. Pakistan Agricultural Research Council: Islamabad, Pakistan.
103. Rasouli-Sadaghiani, M., B. Sadeghzadeh, E. Sepehr and Z. Rengel. 2011. Root exudation and Zn uptake by barley genotypes differing in Zn efficiency. Journal of Plant Nutrition, 34: 1120-1132.
104. Ratke, R.F., H.S. Pereira, J.D.D.G. dos Santos, J.J. Frazão, J.M. Barbosa and B. de Oliveira Dias. 2014. Root growth, nutrition and yield of maize with applied finely limestone in surface of cerrado soil. American Journal of Plant Sciences, 5(06): 834-844.
105. Reichheld, J.P., T. Vernoux, F. Lardon, M. Van Montagu and D. Inzé. 1999. Specific checkpoints regulate plant cell cycle progression in response to oxidative stress. The Plant Journal, 17(6): 647-656.
106. Rengel, Z. 1995. Carbonic anhydrase activity in leaves of wheat genotypes differing in Zn efficiency. Journal of Plant Physiology, 147(2): 251-256.
107. Rengel, Z. 1995. Sulfhydryl groups in root-cell plasma membranes of wheat genotypes differing in Zn efficiency. Physiologia Plantarum, 95(4): 604-612.
108. Rengel, Z. 1999. Physiological mechanisms underlying differential nutrient efficiency of crop genotypes, in *Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications*, Z. Rengel, Editor. Food Products Press: New York. 227-265.
109. Rengel, Z. 2001. Genotypic differences in micronutrient use efficiency in crops. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 32(7-8): 1163-1186.
110. Rengel, Z. and R.D. Graham. 1995. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution: I Growth. Plant & Soil, 176(2): 307-316.
111. Rengel, Z. and R.D. Graham. 1995. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution: II. Nutrient uptake. Plant and Soil, 176: 317-324.
112. Rengel, Z. and R.D. Graham. 1996. Uptake of zinc from chelate-buffered nutrient solutions by wheat genotypes differing in zinc efficiency. Journal of Experimental Botany, 47: 217-226.
113. Rengel, Z., V. Roemheld, and H. Marschner. 1998. Uptake of zinc and iron by wheat genotypes differing in tolerance to zinc deficiency. Journal of Plant Physiology, 152(4-5): 433-438.
114. Rengel, Z. and M.S. Wheal. 1997. Herbicide chlorsulfuron decreases growth of fine roots and micronutrient uptake in wheat genotypes. Journal of Experimental Botany, 48: 927-934.
115. Römheld, V. and H. Marschner. 1991. Function of micronutrients in plants, in *Micronutrients in Agriculture*, J.J. Mortvedt, et al., Editors. Soil Science Society of America, Book Series No. 4, pp. 297-328: Madison, USA. 297-328.
116. Ruel, M.T. and H.E. Bouis. 1998. Plant breeding: A long-term strategy for the control of zinc deficiency in vulnerable populations. American Journal of Clinical Nutrition, 68: 488S-494S.
117. Sadeghzadeh, B. 2013. Genotypic variation in barley varieties and landraces to zinc accumulation under cold dryland condition. Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Maragheh, Iran.
118. Sadeghzadeh, B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13(4): 905-927.
119. Sadeghzadeh, B., L. Ghodsizad, E. Sepehr, and F. Rahimzadeh Khoei. 2015. Genotypic variation to zinc accumulation and drought tolerance in barley genotypes, in *International Conference on Applied Research in Agriculture*: Tehran, Iran.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

120. Sadeghzadeh, B. and Z. Rengel. 2011. Zinc in soils and crop nutrition, in *The Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*, M.J. Hawkesford and P.B. Barraclough, Editors. Wiley. 335-375.
121. Sadeghzadeh, B., Z. Rengel and C. Li. 2008. Mapping of chromosome regions associated with seed Zn accumulation in barley, PhD thesis, in *Faculty of Natural and Agricultural Sciences*. The University of Western Australia: Perth.
122. Sadeghzadeh, B., Z. Rengel and C. Li. 2009. Differential zinc efficiency of barley genotypes grown in soil and chelator-buffered nutrient solution. Journal of Plant Nutrition, 32(10): 1744 - 1767.
123. Safaya, N.M. 1976. Phosphorus-zinc interaction in relation to absorption rate of phosphorus, zinc, copper, manganese and iron in corn. Soil Science Society of America Journal, 40(5): 719-722.
124. Sairam, R.K. and D.C. Saxena. 2001. Oxidative stress and antioxidants in wheat genotypes: possible mechanism of water stress tolerance. Journal of Agronomy and Crop Science, 184(1): 55-61.
125. Samarah, N., R. Mullen and S. Cianzio. 2004. Size distribution and mineral nutrients of soybean seeds in response to drought stress. Journal of Plant Nutrition, 27: 815-835.
126. Santa Maria, G.E. and D.H. Cogliatti. 1988. Bidirectional Zn-fluxes and compartmentation in wheat seedling roots. Journal of Plant Physiology, 132: 312-315.
127. Sasaki, H., T. Hirose, Y. Watanabe and R. Ohsugi. 1998. Carbonic anhydrase activity and CO_2-transfer resistance in Zn-deficient rice leaves. Plant Physiology, 118(3): 929-934.
128. Schlegel, R. and I. Cakmak. 2012. Physical mapping of rye genes determining micronutritional efficiency in. in *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment: Proceedings of the XIII International Plant Nutrition Colloquium, 13–19 September 1997, Tokyo, Japan*. Springer Science & Business Media.
129. Schuerger, A.C., G.A. Capelle, J.A.D. Benedetto, C. Mao, C.N. Thai, M.D. Evans, J.T. Richards, T.A. Blank and E.C. Stryjewski. 2003. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge.). Remote Sensing of Environment, 84(4): 572-588.
130. Schwartz, S.M., R.M. Welch, D.L. Grunes, E.E. Cary, W.A. Norvell, M.D. Gilbert, M.P. Meridith and C.A. Sauchirico. 1987. Effect of zinc, phosphorus and root-zone temprature on nutrient uptake by barley. Soil Science Society of America Journal, 51: 371-375.
131. Sekimoto, H., M. Hoshi, T. Nomura and T. Yokota. 1997. Zinc deficiency affects the levels of endogenous gibberellins in *Zea mays* L. Plant and Cell Physiology, 38(9): 1087-1090.
132. Selote, D.S., S. Bharti and R. Khanna-Chopra. 2004. Drought acclimation reduces O2*-accumulation and lipid peroxidation in wheat seedlings. Biochem. Biophys. Res. Commun, 314: 724-729.
133. Sharma, C.P., P.N. Sharma, S.S. Bisht and B.D. Nautiyal. 1982. Zinc deficiency induces changes in cabbage (*Brassica oleracea* var. Capitat), in *Proceedings of the Ninth international Plant Nutrition Colloquium*, A. Scaife, Editor. Commonwealth Agricultural Bureau, pp. 601-606: Warwick, England. 601-606.
134. Sharma, K.C., B.A. Krantz, A.L. Brown and J. Quick. 1968. Interaction of Zn and P in top and root of corn and tomato. Agronomy Journal, 60: 453-456.
135. Sharma, K.N. and D.L. Deb. 1988. Effect of organic manuring on zinc diffusion in soils of varying texture. Journal of the Indian Society of Soil Science, 36: 219-224.
136. Sillanpää, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study, in *FAO Soils Bulletin No. 48*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 75-82: Rome. 75-82.
137. Sillanpää, M. 1990. Micronutrient assessment at the country level: an international study, in *FAO Soils Bulletin No. 63*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations: Rome.
138. Singh, B., S.K.A. Natesan, B.K. Singh and K. Usha. 2005. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. Current Science, 88(1): 36-44.
139. Singh, J.P., R.E. Karmanos and J.W.B. Stewart. 1988. The mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Canadian Journal of Soil Science, 68: 345-358.
140. Solaiman, Z., P. Marschner, D. Wang and Z. Rengel. 2007. Growth, P uptake and rhizosphere properties of wheat and canola genotypes in an alkaline soil with low P availability. Biology and Fertility of Soils, 44(1): 143-153.
141. Sparrow, D.H. and R.D. Graham. 1988. Susceptibility of zinc-deficient wheat plants to colonization by *Fusarium graminearum* Schw. Group I. Plant and Soil, 112: 261-266.
142. Ström, L., A.G. Owen, D.L. Godbold and D.L. Jones. 2005. Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling. Soil Biology and Biochemistry, 37(11): 2046-2054.
143. Takkar, P.N. and C.D. Walker. 1993. The distribution and correction of zinc deficiency, in *Zinc in Soils and Plants*, A.D. Robson, Editor. Kluwer Academic Publishers, pp. 151-165: Dordrecht, The Netherlands. 151-165.
144. Tehrani, M.M., M.R. Balali, F. Moshiri and A.M. Daryashenas. 2012. Fertilizer recommendation and forecast in Iran: Challenges and strategies. Iranian Journal of Soil Research, 26(2): 123-144 (In Persian).
145. Teixeira, R.d.K.S., D.C. Lima, Â.d.F.B. Abreu and M.A.P. Ramalho. 2015. Implications of early selection for grain colour on iron and zinc content and productivity of common bean. Plant Breeding, 134(2): 193-196.
146. Tiller, K.G. 1983. Micronutrients, in *In: Soils: An Australian Viewpoint*. Division of Soils, CSIRO Melbourne, Academic Press, pp. 365-387: London. 365-387.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

147. Treeby, M., H. Marschner and V. Römheld. 1989. Mobilization of iron and other mcronutrient cations from a calcareous soil by plant-borne, microbial and synthetic metal chelators. Plant and Soil, 114: 217-226.
148. Vallee, B.L. and K.H. Falchuk. 1993. The biochemical basis of zinc physiology. Physiological Reviews, 73: 79-118.
149. Viets, F.G. 1966. Zinc deficiency in the soil-plant system, in *Zn Metabolism*, A.S. Prasad, Editor. Charles C. Thomas, pp. 90-128: Illinois, USA. 90-128.
150. Wang, A.S., J.S. Angle, R.L. Chaney, T.A. Delorme, and R.D. Reeves. 2006. Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by Thlaspi caerulescens. Plant and Soil, 281(1): 325-337.
151. Waraich, E.A., R. Ahmad and M. Ashraf. 2011. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. Australian Journal of Crop Science, 5(6): 764-777.
152. Webb, E.C. 1992. Enzyme Nomenclature: Recommendations of the Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology. Academic Press: New York, USA.
153. Welch, R.M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. Critical Reviews in Plant Sciences, 14: 49-82.
154. Welch, R.M. 1999. Importance of seed mineral nutrient reserves in crop growth and development, in *Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications*, Z. Rengel, Editor. Food Products Press, pp. 205-226: New York. 205-226.
155. Welch, R.M. and R.D. Graham. 1999. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs productive, sustainable, nutritious. Field Crops Research, 60(1/2): 1-10.
156. Welch, R.M. and R.D. Graham. 2002. Breeding crops for enhanced micronutrient content. Plant and Soil, 245: 205-214.
157. Wenzel, A.A. and H. Mehlhorn. 1995. Zinc deficiency enhances ozone toxicity in bush beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Saxa). Journal of Experimental Botany, 46(7): 867-872.
158. White, P.J., S.N. Whiting, A.J.M. Baker and M.R. Broadley. 2002. Does zinc move apoplastically to the xylem in roots of *Thlaspi caerulescens*? New Phytologist, 153(2): 201-207.
159. WHO. 2002. The World Health Report 2002; Reducing Risks, Promoting Healthy Life. World Health Organization, pp. 1-168: Geneva, Switzerland.
160. Wissuwa, M., A.M. Ismail and S. Yanagihara. 2006. Effects of zinc deficiency on rice growth and genetic factors contributing to tolerance. Plant Physiology, 142: 731-741.
161. Zhang, F., V. Römheld and H. Marschner. 1989. Effect of zinc deficiency in wheat on the release of zinc and iron mobilizing exudates. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk, 152: 205-210.
162. Zhang, F.S., V. Römheld, and H. Marschner. 1991. Diurnal rhythm of release of phytosiderophores and uptake rate of zinc in iron-deficient wheat. Soil Science and Plant Nutrition, 37: 671-678.
163. Zhang, W., D. Liu, C. Li, Z. Cui, X. Chen, Y. Russell and C. Zou. 2015. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application. Field Crops Research, 184: 155-161.
164. Zhu, Y.G., S.E. Smith and F.A. Smith. 2001. Zinc (Zn)-phosphorus (P) interactions in two cultivars of spring wheat (Triticum aestivum L.) differing in P uptake efficiency. Annals of Botany, 88(5): 941-945.
165. Ziaeyan, A. and M.J. Malakooti. 1999. Effect of zinc sulfate on wheat growth and yield in calcareous soils in Fars provice. Journal Of Water and Soil, 12(6): 99-110 (In Persian).
166. Zubaidi, A., G.K. McDonald and G.J. Hollamby. 1999. Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture, 39(6): 721-732.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]

Cereal Breeding For Zinc Deficiency and Its Importance to Alleviate Drought Stress

Behzad Sadeghzadeh[1], Leila Ghodsizad[2], Noushin Sadeghzadeh[3], Ebrahim Sepehr[4] and Mehdi Feizi[5]

1- Associate Professor, Rainfed Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Maragheh, Iran, (Corresponding author: Behzada4@yahoo.com)
2- Master of Agriculture, Agricultural Jihad Management, Maragheh, Iran
3- PhD Student in Plant Physiology, Faculty of Science, University of Tabriz, Iran
4- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran.
5- PhD Student in Plant Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Zabol University, Zabol, Iran
Received: January 15, 2018 Accepted: January 23, 2021

Abstract

Drought stress limits zinc absorption by cereal plant because of reduction of root growth and development as well as declining zinc movement in soil. On the other hand, tolerance to drought needs enough available zinc for plant to well regulate expression of genes that are responsible for cell protection against drought stress. Moreover, zinc deficient plants unable to detoxify reactive oxygen species (ROS) under drought stress conditions. Hence, zinc deficiency along with drought lessen grain yield and its nutritional quality, which cause hidden hunger in billions people worldwide. Although, zinc fertilizers can solve the problem, but it is not a sustainable solution in drylands because of soil surface dryness, zinc fixation in clay soils, and fertilizer unavailability. Along with zinc fertilizers, cultivation of zinc efficient varieties will be a complementary and viable solution in drylands. Hence, breeding zinc efficient cereals is a sustainable and necessary method to improve grain yield and nutritional quality of people food in 2025. Zinc deficiency in crops is the most widespread micronutrient deficiency, with about 50% of the cereal-growing area worldwide containing low levels of plant-available Zn. Zinc deficiency in soils reduces yield and nutritional quality of cereal (e.g. wheat) and afflicts 1 billion people especially in many developing countries like Iran. Sustainable solutions can only be developed through agricultural system approaches such as plant breeding. Micronutrient enrichment traits are available within wheat genomes that could allow for substantial increases in Fe, Zn and without negatively impacting protein and yield. There is considerable genotypic variation both within and between cereals for micronutrient efficiency. A number of studies have demonstrated differential Zn efficiency in barley, suggesting that genotypic variation could be exploited in breeding programs to produce genotypes with higher Zn efficiency. Various mechanisms may explain Zn efficiency in crops, including increased Zn uptake, increased Zn availability in the rhizosphere due to release of root exudates, and more efficient internal Zn use. In wheat and barley, Zn-uptake capacity of roots is one of the mechanisms of Zn efficiency. Drought stress and zinc (Zn) deficiency are serious abiotic stress factors limiting crop production in drylands of Iran, but the interaction between Zn deficiency and drought stress has not been studied extensively. Zinc nutritional status of plants may affect the drought sensitivity of plants in different ways. Zinc-deficient plants use water less efficiently and are less able to respond to increasing soil water deficits by osmotic adjustment than plants that are supplied with adequate levels of Zn. Moreover, drought stress kills plants by inducing production of reactive oxygen species (ROS). An adequate Zn nutrition can be involved in detoxification of ROS, and it is also important for reducing the production of free radicals. Therefore, likely that drought stress-related yield loss is additionally accentuated when plants would simultaneously suffer from Zn-deficiency stress. On the other hand, the review of literature indicates that application of Zn fertilizers has a potential to increase availability of Zn to plants, which will result in enhanced drought tolerance.

Keywords: Cereals, Drought stress, Drylands, Zinc deficiency

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.52547/jcb.13.37.22]