چالش‌ها و راهکارهای پیش رو برای بهبود سوء تغذیه از طریق غنی‌سازی زیستی گندم

مجید عبدلی [۱*] و عزت‌اله اسفندیاری [۲]

۱*- دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، majid.abdoli64@yahoo.com

۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، esfand1977@yahoo.com

*نویسنده مسئول: مجید عبدلی

تاریخ دریافت: دی ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۳۹۷

Challenges and solutions to improve malnutrition through biofortification of wheat

Majid Abdoli[1*] and Ezatollah Esfandiari[2]

1*- Ph.D, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran, majid.abdoli64@yahoo.com

2- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran, esfand1977@yahoo.com

*Corresponding author: Majid Abdoli

Received: December 2018 Accepted: February 2019

چکیده

یکی از مشکلات کنونی کشور سوء تغذیه ناشی از دریافت کم عناصر ریزمغذی از جمله آهن و روی می‌باشد که دلیل اصلی آن تنوع پایین رژیم غذایی مردم این کشورها و نقش عمده غلات به‌خصوص گندم در تأمین انرژی و ریزمغذی‌ها است. با توجه به نقش‌های فیزیولوژیک بسیار مهم عناصر آهن و روی در بدن و پایین بودن ذاتی این عناصر در دانه گندم (بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) افزایش میزان این عناصر در گندم الزامی است و از طرفی، گندم دارای ترکیبات ضد تغذیه‌ای مانند اسید فیتیک می‌باشد که جذب این عناصر را در بدن کاهش می‌دهند. در این بین کاربرد کودهای حاوی عنصر روی به‌صورت محلول‌پاشی در مراحل رویشی و رشد دانه با اثر گذاری بر متابولیسم سلول و بهبود آن، سبب افزایش پارامترهای دخیل در عملکرد مانند تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه می‌گردد که برآیند این عوامل به شکل افزایش عملکرد دانه نمود می‌یابد. بهبود خصوصیات کیفی از جمله افزایش محتوای عناصر میکرو در دانه (روی و آهن)، اسید آسکوربیک (ویتامین C) و کاهش اسید فیتیک سبب تنزل شاخص نسبت مولی اسید فیتیک به روی در خاک‌های آهکی می‌گردد. همچنین کاربرد روی می‌تواند سبب بهبود کیفیت گندم‌های تولید شده گردد و با افزایش ارزش بیولوژیکی پروتئین به کاهش سوء تغذیه ناشی از دریافت کم پروتئین کمک نماید. لذا به‌نظر می‌رسد که تأمین روی مورد نیاز گیاه با استفاده از روش‌های غنی‌سازی زیستی به‌زراعی می‌تواند به‌عنوان راهکار کوتاه مدت برای کاهش مشکلات تغذیه‌ای ناشی از کمبود روی و بهبود شاخص‌های کمی و کیفی امنیت غذایی پیشنهاد گردد. از طرفی در گندم تنوع ژنتیکی بالایی در تحمل به روی وجود دارد. این ویژگی سبب گردیده تا بتوان با غنی‌سازی زیستی ژنتیکی، به‌عنوان راهکار بلند مدت، برای رسیدن به ژنوتیپ‌ها و یا ارقام با کارایی روی بالا در راستای کاهش مصرف کودهای شیمیایی و بهبود امنیت غذایی مردم امیدوار بود.

کلمات کلیدی: اسید فیتیک، خاک آهکی، سوء تغذیه، غنی‌سازی زیستی، گندم، مواد معدنی.

Abstract

One of the current problems in the country is the malnutrition caused by the low intake of micronutrients such as iron (Fe) and zinc (Zn), due to the low diversity of the diet of the people of these countries and the major role of cereals, especially wheat, in energy and micronutrient nutrition. Considering the important physiological roles of Fe and Zn in the body and the low intrinsic of these elements in wheat grain (between 10 to 50 mg/kg), it is necessary to increase these elements in wheat. On the other hand, wheat has anti-nutritional compounds, such as phytic acid, which reduce the absorption of these elements in the body. In the meanwhile, the application of Zn-containing fertilizers as soluble in vegetative and seedling stages, with effect on cell metabolism and its improvement, increased the parameters involved in yield such as number of spikes per area, number of seeds per spike and thousand grain weight which the result of these factors is the increase of grain yield. Improvement of qualitative properties such as increasing the content of micro-elements in grains (Zn and Fe), ascorbic acid (vitamin C) and reducing phytic acid causes the index of phytic acid to Zn molar ratio to degrade in calcareous soils. Also, Zn application can improve the quality of the produced wheat and by increasing the biological value of the protein, will help reduce the malnutrition caused by low protein intake. Therefore, it seems that supplying the Zn with the needs of the plant using agronomic biofortification methods can be proposed as a short-term solution to reduce the nutritional problems caused by Zn deficiency and to improve quantitative and qualitative food safety indicators. On the other hand, wheat has a high genetic diversity in Zn tolerance. This feature has made it possible to achieve genetic biofortification as a long-term solution to achieve higher-yielding genotypes or cultivars to reduce the use of chemical fertilizers and improve people's food security.

Keywords: Biofortification, Calcareous Soil, Malnutrition, Minerals, Phytic acid, Wheat

مقدمه و کلیات

سوء تغذیه نوعی بیماری بوده و عبارت است از اینکه رژیم غذایی قادر نباشد همه مواد و فاکتورهای لازم برای سلامتی انسان را به شکل پایدار تأمین نماید. برای داشتن جامعه سالم و فعال باید فاکتورهای ضروری مورد نیاز بدن انسان به اندازه کافی از طریق مواد غذایی به افراد جامعه برسد که در غیر این صورت سوء تغذیه ناشی از کمبود دریافت (انرژی و پروتئین و یا کمبود ریزمغذی‌ها) در افراد جامعه اتفاق خواهد افتاد. طبق آمار سازمان بهداشت جهانی بیش از سه میلیارد نفر از مردم دنیا از سوء تغذیه رنج می‌برند و هر ساله بیش از پنج میلیون کودک در اثر این مشکل جان خود را از دست می‌دهند (World Health Organization, 2012). در این بین، متأسفانه ایران در میان ۱۹۲ کشور جهان، رتبه بهداشتی ۱۲۳ را کسب نموده است که شیوع سوء تغذیه از دلایل اصلی آن می‌باشد (شهریاری، ۱۳۸۷). از دلایل شیوع سوء تغذیه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران می‌توان به افزایش جمعیت اشاره نمود. با افزایش جمعیت تقاضا به غذا نیز افزایش خواهد افتاد. در حالی که سطح اراضی قابل کشت محدود می‌باشد که لازم است با افزایش تولید در واحد سطح بین تقاضا به مواد غذایی و تولید آنها تعادل ایجاد شود. به‌طوری‌که می‌توان به افزایش سطح زیر کشت محصولاتی مانند گندم و کاهش سطح زیر کشت حبوبات، به‌عنوان یکی از منابع مهم عناصر آهن و روی، اشاره کرد (ارزانی، ۱۳۹۰). مجموعه این عوامل تنوع محصولات کشاورزی را کاهش داده است. از سویی، عدم توجه به حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی از دیگر عواملی است که سبب به‌خطر افتادن امنیت غذایی جوامع انسانی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌شود (ملکوتی، ۱۳۹۰). برآیند این عوامل سبب کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی و در نهایت ناامنی غذایی و سوء تغذیه در کشور می‌باشد. کمبود عناصر کم مصرف در کشورهای در حال توسعه به‌عنوان یک مشکل عمومی مطرح است. طبق آمارهای جهانی در حدود ۴۰ درصد مردم جهان از کمبود ریزمغذی‌ها رنج می‌برند. در این بین کمبود عناصر روی و آهن به یک مشکل و معظل اساسی در حوزه بهداشت عمومی کشورها به‌خصوص کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است (Thacher *et al*., 2006; Cakmak, 2008)، که ناشی از کمبود آنها در تولیدات گیاهی است. زیرا در صورت وجود مقدار کافی این عناصر در خاک به‌راحتی جذب گیاه شده و در بخش خوراکی گیاه تجمع یافته و نیاز بدن انسان را تأمین خواهد نمود (ملکوتی و داودی، ۱۳۸۱). کمبود این عناصر سبب اختلال در رشد، ضعف سیستم ایمنی بدن و گسترش بیماری‌های عفونی و غیره را به‌دنبال دارد که پیامد آن افت کارآیی افراد جامعه، کاهش امید به زندگی و تحمیل هزینه‌های هنگفت درمانی به خانواده‌ها و دولت است که از عوارض ثانویه سوء تغذیه به شمار می‌آید. از آنجا که گندم همواره به‌عنوان یک گیاه استراتژیک مطرح است و نان تولیدی از آن نقش مهم و به‌سزایی در تغذیه دارد، پس هرگونه کمبود در این ماده غذایی مهم و کلیدی به جمعیت وسیعی از مردم جامعه انتقال می‌یابد. باتوجه به نقش بسیار کلیدی امنیت غذایی در جنبه‌های مختلف توسعه ملی هر کشوری و همچنین تبعات ناشی از سوء تغذیه در جوامع انسانی، نهادهای مسئول همواره تلاش نموده‌اند تا با راهکارهای مختلف با پدیده سوء تغذیه مقابله نموده و تبعات منفی آن را به حداقل برسانند

که این راهکارها عبارتند ازتنوع رژیم غذایی، مکمل-یاری، غنی‌سازی فرم تجاری مواد غذایی و غنی‌سازی زیستی. اما روش‌های مکمل‌یاری و غنی‌سازی مواد غذایی صرفاً جنبه کیفی محصولات غذایی پوشش می‌دهند و بر بعد کمی امنیت غذایی تأثیر ندارند. لذا متخصصین کشاورزی به‌دنبال راهکاری بودند که بتواند هر دو بعد کمی و کیفی امنیت غذایی را پوشش دهد که غنی‌سازی زیستی دارای این توانایی می‌باشد.

غنی‌سازی زیستی (Biofortification): امروزه غنی-سازی زیستی یکی از اولویت‌های جهانی در بخش کشاورزی و امنیت غذایی محسوب می‌گردد که تلاش می‌کند ضمن افزایش عملکرد در واحد سطح، با بهبود ارزش تغذیه‌ای محصولات گیاهان زراعی از نظر بودن ریزمغذی‌ها، سوء تغذیه را در جوامع انسانی کاهش داده و تلاش می‌کند تا گرسنگی سلولی را به حداقل برساند (Cakmak, 2008; Bouis and Welch, 2010). به‌عبارت دیگر در این روش، بهبود هر دو بعد کمی و کیفی محصولات تولید شده مد نظر می‌باشد که از دو طریق غنی‌سازی زیستی زراعی (Agronomic biofortification) (Bouis and Welch, 2010; Bouis *et al*., 2011) و غنی‌سازی زیستی ژنتیکی (Genetic biofortification) (Brinch-Pederson *et al*., 2007; Sadeghzadeh *et al*., 2015) به‌دنبال رسیدن به اهداف خود در بهبود امنیت غذایی هستند.

- **راهکار به‌زراعی یا آگرونومیکی:** غنی‌سازی زیستی زراعی روشی کوتاه مدت برای تأمین ریزمغذی‌های مورد نیاز گیاهان بوده و اثرات مثبت آن از همان سال شروع اجرای آن، از ابتدای جوانه‌زنی گیاه تا تأثیر بر عملکرد کمی و کیفی گندم، مشاهده می‌گردد. راهکار به‌زراعی در روش‌های مختلفی می-تواند اجرا گردد که عبارتند از:

الف) کاربرد بذری: با در نظر گرفتن اینکه بذر مورد استفاده نقش بسیار مهمی در عملکرد نهایی محصول خواهد داشت و بوته‌های رشد یافته در خاک‌هایی که با کمبود ریزمغذی‌ها مواجه هستند بذور تولید شده در آنها نیز به‌طور طبیعی با کمبود آنها مواجه خواهند بود. لذا لازم است در زمان کاشت به نوعی این محدودیت بر طرف گردد. امروزه برخی از محققین روش پیش تیمار بذور را برای حل این مشکل عنوان می‌کنند که در خصوص روی، سولفات روی یا هر ترکیب محتوی روی با غلظت مشخص در آب حل شده و روی بذور محلول‌پاشی می‌شود (Cakmak, 2008) و یا می‌توان بذور را در محلول‌های یکنواخت محتوی سولفات روی برای مدت معین نگهداری نمود (Farooq *et al*., 2006; Harris *et al*., 2008). این روش، روشی ارزان و راحت برای افزایش میزان ریزمغذی‌ها نظیر روی و ترکیبات دیگر در بذر می-باشد. در این ارتباط گزارش شده است که پیش تیمار بذر با روی سبب افزایش عملکرد شلتوک برنج و غلظت روی دانه برنج می‌شود (Harris *et al*., 2008). طبق گزارش Ajouri *et al*., 2004 پیش تیمار بذور جو با روی سبب بهبود جوانه‌زنی بذور و نمو بهتر گیاهچه‌ها گردید. Harris *et al*., 2008 معتقدند که پیش تیمار بذر نسبت به سایر تیمارهای کاربرد روی مقرون به صرفه‌تر بوده و سبب افزایش عملکرد کاه و دانه در نخود و گندم شده است. با این حال برخی از محققین بیان کرده‌اند که پیش تیمار بذور با روی تأمین کننده روی مورد نیاز برنج برای تولید عملکرد مطلوب برنج نیست (Imran *et al*., 2015).

ب) استفاده از بذور غنی شده با روی: در این روش با اسپری برگی ترکیبات محتوی روی (به‌ویژه در مرحله پر کردن دانه) میزان روی انباشته شده در دانه گندم را در خاک‌هایی که با محدودیت روی قابل جذب مواجه هستند افزایش داده و بذور غنی شده از روی را فراهم می‌نمایند. تحقیقات انجام گرفته (Genc and McDonald, 2008; Narwal *et al*., 2012) نشان دادند که محتوا و غلظت روی بذر نقش مهمی در ویگور اولیه گیاهچه‌ها دارد که می‌تواند بر وزن خشک اندام‌های هوایی تولید شده در شرایط کمبود و کافی بودن روی و در نهایت کارایی روی تأثیرگذار باشد. برخی از محققین معتقدند که برای افزایش سرعت جوانه‌زنی و ایجاد گیاهچه‌های قوی بایستی علاوه بر اندوخته ترکیبات آلی، در بذور ذخیره کافی عناصر مانند روی وجود داشته باشد تا بتواند نیاز اولیه گیاهچه‌های در حال رشد را تا زمانی که خود قادر به جذب عناصر غذایی از خاک شود، تأمین نماید (Bardbeer, 1988; Bolland *et al*., 1989). بنا به نظر رینگل و گراهام (Rengel and Graham, 1995) و Cakmak, 2008 بذور محتوی روی بیشتر قادرند گیاهچه‌های قوی‌تر تولید نموده و حساسیت آنها به عوامل بیماری‌زای گیاهی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، حساسیت بیشتر گیاهچه‌های حاصل از بذور محتوی روی کم به سرما در مقایسه با گیاهچه‌های حاصل از بذور با محتوی روی بیشتر گزارش شده است (Graham and Webb, 1991; Graham and Rengel, 1993). در این ارتباط ثواقبی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۲) طی تحقیقات خود نتیجه گرفتند که استفاده از بذور غنی شده و مصرف سولفات روی توانست به‌طور قابل توجهی عملکرد، میزان پروتئین و غلظت روی در دانه، آرد و سبوس حاصل را افزایش ولی غلظت فسفر و نسبت فسفر به روی دانه را کاهش دهد. موارد فوق بیانگر مزیت کشت بذور غنی شده با روی در مقایسه با بذور معمولی است. لذا به نظر می‌رسد که استفاده از بذور غنی شده با روی به‌دلیل بهبود شرایط جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه در خاک، کاهش میزان مصرف بذر در واحد سطح و در نهایت با بهبود عملکرد کمی و کیفی و همچنین کاهش هزینه‌های تولید می‌تواند سبب بهبود شاخص‌های امنیت غذایی شود.

پ) کاربرد خاکی: کاربرد خاکی عبارت است از اینکه ریزمغذی‌هایی مانند روی براساس آزمون خاک همانند عناصر پر مصرف به خاک اضافه شده و از طریق ریشه گیاهان جذب گردد. در این ارتباط Martens and Westermann, 1991 معتقدند که روش کاربرد خاکی در دراز مدت از نظر اقتصادی با صرفه‌تر بوده و دلیل آن را باقی ماندن کود در خاک عنوان نموده که می‌تواند نیاز گیاه را برای چندین سال فراهم نماید و لزومی به دادن همه ساله کود نخواهد بود. نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که کاربرد خاکی روی سبب افزایش ۲۰ تا ۹۰ درصدی غلظت روی دانه در گندم نان و ۶۰ تا ۲۵۰ درصدی غلظت روی دانه در گندم دوروم شده است (Cakmak, 2010; Stomph *et al*., 2011). Rafique *et al*., 2015 گزارش کردند که کاربرد خاکی روی سبب افزایش میزان انباشت عنصر روی در برگ و دانه و عملکرد دانه نخود در مقایسه با شاهد شد. Nawaz *et al*., 2015 بیان کردند که کاربرد روی سبب افزایش قابل توجه عملکرد گندم شد که در این میان کاربرد ۸ و ۱۲ کیلوگرم سولفات روی در هکتار از اثر بخشی بهتری برخوردار است. تفاوت در میزان استفاده از کود سولفات روی در خاک توسط محققان، اساساً به

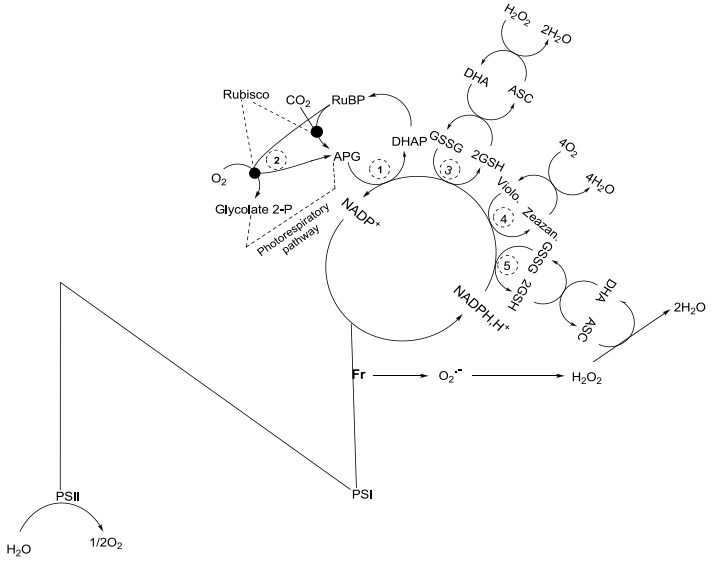
میزان اولیه روی قابل دسترس گیاه و نوع خاک بستگی دارد.

ت) محلول‌پاشی: محلول‌پاشی یا تغذیه برگی عبارت است از پاشش ریزمغذی‌های مورد نیاز گیاه (مانند بور، مس، منگنز، آهن، روی و یا ویتامین‌ها) بر روی اندام‌های هوایی آن. این روش دارای مزیت‌هایی نظیر رفع سریع کمبود، سهولت استفاده، کاهش سمیت ناشی از تجمع عناصر کم مصرف در خاک و یا جلوگیری از تثبیت آنها می‌باشد (Camberato, 2004). از طرفی در روش محلول‌پاشی برگی گیاه به مصرف ریزمغذی‌ها سریع عکس‌العمل نشان می‌دهد و این روش به‌دلیل صرفه‌جویی در مصرف کود، می‌تواند گامی مؤثر در راستای نیل به کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست باشد. زیرا در این روش از ورود کودهای شیمیایی به آب‌های زیرزمینی و آلودگی آنها و تخریب خاک جلوگیری می‌شود (ملکوتی و ضیائیان، ۱۳۷۹). از دیگر مزیت‌های اسپری برگی ریزمغذی‌ها می‌توان به جذب عناصر در زمان ابتلای گیاهان به بیماری‌های ریشه‌ای اشاره نمود. در شرایط آسیب‌دیدگی ریشه‌ها در اثر بیماری‌هایی مانند پی-تیوم، فوزاریوم و فیتوفتورا بهره‌گیری از عناصر غذایی کم مصرف به روش برگی می‌تواند بسیار ثمربخش‌تر از کاربرد خاکی باشد (Alvin, 2003). همچنین Marschner, 1993 بیان داشت در خاک‌های مناطق خشک که با کمبود روی و آهن روبرو هستند، مصرف خاکی روی و آهن مؤثر نبوده، بلکه محلول‌پاشی برگی این عناصر در اوایل رشد رویشی گیاهان دانه‌ای، سبب افزایش عملکرد آنها خواهد شد. تأثیر مثبت محلول‌پاشی روی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم در مقایسه با سایر روش‌های کاربرد روی توسط Aref *et al*., 2006 و Gomaa *et al*., 2015 گزارش شده است. واکنش گیاه به محلول‌پاشی به گونه گیاهی، فرم کود، غلظت، مرحله رشدی گیاه و دفعات کاربرد بستگی دارد. علیرغم مزیت‌های عنوان شده برای این روش، برخی از محققین معایب و محدودیت‌هایی را عنوان می‌کنند که عبارتند از در محلول‌پاشی مواد مغذی، کوتیکول برگ اولین عامل در جذب مواد غذایی است و میزان نفوذ و جذب آنها را کاهش می‌دهد، احتمال آبدوی و ریزش مواد اسپری شده از اندام‌های هوایی و سطح برگ وجود دارد، خشک شدن مواد اسپری شده، احتمال شستشو توسط باران، احتمال سوختگی برگی ممکن است وجود داشته باشد، پاسخ موقت گیاه به آن و قابل استفاده فقط در دزها و غلظت‌های پایین (به‌دلیل محدودیت‌های ناشی از ایجاد سمیت در دزهای بالا) اشاره کرد (Kannan, 1990؛ ملکوتی و همکاران، ۱۳۸۴). اگر چه در حال حاضر برای حل مشکلات و محدودیت‌های عنوان شده راه حلی ارائه شده است که به برخی از آنها اشاره می‌گردد. استفاده از مویان می‌تواند نفوذ بسیاری از مواد از طریق کوتیکول را افزایش داده و سبب چسبندگی مواد اسپری شده به برگ گردد (Stock and Holloway, 1993). علاوه بر این، میزان جذب اوره ۲۰ برابر بیشتر از سایر مواد مغذی است که می‌تواند در جذب مواد غذایی مانند روی از طریق برگ نقش مؤثری داشته باشد (Mortvedt and Gilkes, 1993). در این ارتباط Cakmak, 2008 اظهار داشت که سریع‌ترین و آسان-ترین روش افزایش محتوای روی دانه، اسپری برگی روی بوده و حداکثر میزان آن به هنگام اضافه کردن اوره ۱۰ درصد حاصل شد. برای کاهش اثرات منفی خشک شدن محلول اسپری شده و عدم جذب عناصر، بهتر است محلول‌پاشی در ساعات اولیه روز

(صبح) و یا ساعات پایانی روز (غروب) که هوا خنک بوده و شدت نور کم است صورت گیرد تا میزان تبخیر حداقل باشد.

ث) کاربرد توأم خاکی و محلول‌پاشی: در این روش ضمن اینکه براساس نتایج آزمون خاک اقدام به اضافه کردن ریزمغذی‌ها به خاک می‌گردد در مراحل فنولوژیکی متعددی نیز از طریق اسپری برگی نیازهای آنها تأمین می‌گردد. تحقیقات امین پور و همکاران (۱۳۸۵) نشان می‌دهد که محلول‌پاشی تنها برای بدست آوردن عملکرد کمی و کیفی کافی نبوده و لازم است محلول‌پاشی عناصر کم مصرف با کاربرد خاکی توأم شده تا نتیجه مطلوب‌تری حاصل گردد. Mohammad *et al*., 1990 گزارش کردند که با استفاده از روش توأم خاک و محلول‌پاشی بالاترین عملکرد و مقدار آهن در دانه بدست آمد. Imran *et al*., 2015 در بررسی روش‌های مختلف کاربرد سولفات روی اعم از پیش تیمار بذر، کاربرد خاکی، محلول‌پاشی و ترکیب آنها مشاهده کردند که کاربرد ترکیبی روی توانست میزان غلظت روی دانه را افزایش دهد. محققان دیگر نیز به تأثیر مثبت توأم مصرف خاکی و محلول‌پاشی روی در بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاهان زراعی مختلف اشاره کرده‌اند (Bharti *et al*., 2013; Mathpal *et al*., 2015). عملکرد گندم همانند سایر گیاهان زراعی تابع فتوسنتز و توان تبدیل CO_2 به قند می‌باشد. طبق شکل ۱ بین اجرای چرخه کالوین و مسیرهای دفاعی گیاه ارتباط معکوس وجود دارد. بدین مفهوم که افزایش سرعت اجرای چرخه کالوین به‌دلیل مصرف پتانسیل هیدروژن حاصل از واکنش‌های نوری فتوسنتز، سبب باز ماندن زنجیر انتقال الکترون و کاهش تولید انواع اکسیژن فعال (Reactive oxygen species) در برگ گیاهان می‌گردد. براین اساس چرخه کالوین به‌عنوان اولین و مهمترین مکانیسم دفاعی گیاه برای مقابله با تنش‌های محیطی عنوان می‌شود. در مقابل اگر چرخه کالوین نتواند پتانسیل هیدروژن حاصل از واکنش‌های نوری فتوسنتز را صرف تثبیت CO_2 نماید، برای ممانعت از تولید انواع اکسیژن فعال مکانیسم‌های دفاعی مانند گلوتاتیون-آسکوربات اجرا خواهند شد (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۵). طبیعتاً افزایش سرعت اجرای چرخه کالوین به‌دلیل تولید کربوهیدرات و نقش آن در عملکرد از اهمیت بیشتری در مقایسه با مکانیسم‌های دفاعی برخوردار خواهد بود. با در نظر گرفتن اینکه عنصر روی در متابولیسم کربوهیدرات نقش مهمی برعهده دارد، اهمیت کاربرد آن بر عملکرد بیشتر می‌گردد. به‌طوری‌که عنصر روی به‌عنوان کوفاکتور آنزیم کربونیک آنهیداز عمل کرده (Tu *et al*., 2012) و CO_2 بیشتری وارد چرخه کالوین می‌شود. به‌علاوه، روی در بیوسنتز نشاسته دخیل بوده و با افزایش میزان دسترسی گیاه به روی، مکانیسم عمل تبدیل قندهای حاصل به نشاسته بهتر اتفاق می‌افتد (Henriques *et al*., 2012). برآیند این عمل مانع تجمع تریوز فسفات‌های حاصل از چرخه کالوین و یا سایر فرم‌های کربوهیدرات در گیاه شده و به این شکل از اثر پس‌خوری چرخه کالوین و ممانعت از بسته شدن زنجیر انتقال الکترون پیشگیری می‌شود (اسفندیاری و محبوب، ۱۳۹۳). برآیند این عوامل سبب می‌گردد تا توان تولید گیاه افزایش یابد که افزایش عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی در آزمایشات مختلف تائیدی بر این مورد می‌باشد. از طرفی دیگر عناصر کم مصرف در عملکرد مکانیسم‌های دفاعی نقش مؤثری داشته و در صورتی‌که چرخه کالوین نتواند پتانسیل هیدروژن تولید شده

را مصرف نماید مکانیسم‌های دفاعی به‌دلیل عملکرد بهتر قادر خواهند بود تا با هدر دادن پتانسیل هیدروژن مازاد مانع تولید انواع اکسیژن فعال شوند (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۵). به این ترتیب از شدت صدمات وارده به بخش‌های کلیدی سلول گیاه مانند غشاها کاهش یافته و سبب بهبود عملکرد متابولیسمی گیاه می‌گردد (Cakmak *et al*., 1998).



شکل ۱- مسیرهای مصرف پتانسیل هیدروژن حاصل از واکنش‌های نوری فتوسنتز. اعداد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب نشان دهنده چرخه‌های کالوین، تنفس نوری، گلوتاتیون-آسکوربات، گزانتوفیل و مهلر می‌باشد.

با توجه به هزینه تولید پروتئین‌های گیاهی در مقایسه با پروتئین‌های جانوری و نقش غلات در تغذیه مردم، محققین تلاش می‌کنند با استفاده از راهکارهای به‌زراعی یا به‌نژادی میزان پروتئین دانه را افزایش دهند (Bybordi and Malakouti, 2007; Pourgholam *et al*., 2013). از طرفی، یکی از مشکلات کنونی کشور سوء تغذیه ناشی از دریافت کم پروتئین می‌باشد. لذا صرف‌نظر از افزایش میزان پروتئین دانه، توجه به بعد کیفی پروتئین نیز ضروری می‌باشد. کیفیت پروتئین تابع میزان اسیدهای آمینه موجود در آن به‌خصوص اسیدهای آمینه ضروری و تعادل بین آنهاست که با عنوان ارزش بیولوژیکی شناخته می‌شود. ارزش بیولوژیکی پروتئین غلات از جمله گندم به‌دلیل پایین بودن میزان اسیدهای آمینه لیزین و تره‌ئونین پایین است. بر این اساس محققین تلاش می‌نمایند که ارزش بیولوژیکی پروتئین را با ایجاد تعادل بین اسیدهای آمینه ضروری و افزایش میزان آنها بالا ببرند که از جمله می‌توان به نتایج Bybordi and Malakouti, 2007، Pourgholam *et al*., 2013 و Bharti *et al*., 2013 اشاره نمود. به اعتقاد این محققین کاربرد خارجی روی با تأثیر بر بیوسنتز اسیدهای آمینه ضروری و ایجاد تعادل بین آنها، ضمن افزایش میزان پروتئین دانه، کیفیت پروتئین را افزایش داد. عنصر روی باعث سنتز و انتقال بهتر پروتئین به دانه گندم می‌گردد که این امر منجر به بالا رفتن عملکرد کیفی محصول می‌شود. دلیل آن این است که روی به‌عنوان عنصر ساختمانی در RNA پلیمراز در سنتز پروتئین‌ها نقش دارد. در اثر کمبود عنصر روی فعالیت آنزیم RNA پلیمراز کم می‌شود و با کاهش انتقال اسیدهای آمینه و بالا رفتن میزان تجزیه و تخریب RNA سنتز و در

نهایت تولید پروتئین کاهش می‌یابد (Hemantaranjan and Grag, 1988). همچنین افزایش درصد پروتئین دانه در شرایط کاربرد روی را می‌توان به تأثیر عناصر ریزمغذی در افزایش جذب نیتروژن نسبت داد یعنی گیاه با در دسترس داشتن عناصر کم مصرف، استفاده بهینه‌ای از نیتروژن موجود در خاک کرده و در نتیجه پروتئین‌سازی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر عناصر ریزمغذی در ساختمان برخی از پروتئین‌ها و همچنین در متابولیسم پروتئین شرکت می‌کنند و از این طریق نیز ممکن است باعث افزایش مقدار پروتئین گردند. اسید آسکوربیک یا ویتامین C از جمله ویتامین‌های اکسید و احیا کننده می‌باشد که نقش ویژه‌ای در سلامتی انسان ایفا می‌کند. این ویتامین همانند سایر ریزمغذی‌ها بایستی از طریق غذا تأمین گردد. همچنین، اسید آسکوربیک در بذور در حال جوانه‌زنی تأمین کننده پتانسیل هیدروژن لازم برای جمع‌آوری انواع اکسیژن فعال در چرخه گلوتاتیون-آسکوربات می‌باشد (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۵). با اجرای این چرخه انواع اکسیژن تولید شده در طی فرآیندهایی مانند تنفس جمع‌آوری شده و از آسیب به بخش‌های کلیدی سلول مانند غشاها جلوگیری می‌نماید که برآیند آن افزایش میزان تنفس رشد و کاهش هدر رفت کربن به شکل دی‌اکسید کربن است. برآیند این عوامل سبب افزایش ساختار گیاهچه و ویگور آن می‌گردد (Smirnoff, 2000؛ اسفندیاری و محبوب، ۱۳۹۳). براین اساس حضور اسید آسکوربیک در دانه‌های گندم تولید شده هم برای انسان و هم برای کشت آن به‌عنوان بذر یکی از فاکتورهای کیفی محسوب می‌شود. در ارتباط با تأثیر مثبت کاربرد روی بر میزان اسید آسکوربیک، Welch, 2003 و Bharti *et al*., 2013 گزارش کردند که با کاربرد روی علاوه بر انباشت آن در دانه، میزان اسید آسکوربیک دانه نیز افزایش یافت. از دیگر فاکتورهای تعیین کننده کیفیت گندم میزان روی و آهن انباشته شده در دانه می‌باشد. در این گیاه ذاتاً میزان آهن و روی انباشته شده در دانه پایین بوده و همین عامل سبب کاهش ارزش تغذیه‌ای آن شده است. در خاک‌های آهکی به‌دلیل پایین بودن میزان روی و آهن قابل جذب، کمتر نیز می‌گردد. در مقابل در دانه گندم میزان اسید فیتیک بالا می‌باشد. این ترکیب به‌دلیل توان شلاته کنندگی بالایی که دارد عناصر ریزمغذی مانند آهن و روی را شلاته نموده و مانع جذب این عناصر در روده می‌گردد (Urbano *et al*., 2000; Prasad, 2003). محققان بر این نکته تأکید دارند که کاربرد روی سبب انباشت آن در دانه و باعث غنی شدن دانه می‌گردد (Nan *et al*., 2002; Nautiyal *et al*., 2011). نسبت مولی اسید فیتیک به روی از دیگر شاخص‌های کیفی گندم می‌باشد. این شاخص برای ارزیابی قابلیت استفاده عناصر مغذی موجود (به‌ویژه روی) در مواد غذایی کاربرد دارد (World Health Organization, 1996). به‌عبارت دیگر، نسبت مولی اسید فیتیک به روی مهمترین عامل تعیین کننده زیست فراهمی روی در بدن تلقی می‌شود. به‌طوری‌که Gibson, 1998 گزارش می‌کند که چنانچه مقدار این شاخص در هر ماده غذایی کمتر از ۵ باشد، بیش از ۵۵ درصد عناصر معدنی موجود در آن ماده غذایی در سیستم گوارشی بدن قابل جذب خواهد بود، ولی اگر این نسبت بین ۵ تا ۱۵ باشد فقط ۳۵ درصد عناصر موجود قابل جذب می‌باشد و در مقادیر بیش از ۲۵ برای شاخص یاد شده، هیچ عنصر معدنی قابل جذب نخواهد بود. برآیند این موارد نشان می‌دهد که بایستی با استفاده از راهکارهای ممکن نسبت مولی

اسید فیتیک به روی را کاهش داده و از این طریق امکان جذب عناصر ریزمغذی در بدن انسان را افزایش داد. بر این اساس محققین متعددی کاهش نسبت یاد شده را با روش غنی‌سازی زیستی گزارش نموده‌اند (Hussain *et al*., 2013; Bharti *et al*., 2013; Imran *et al*., 2015). از دلایل کاهش نسبت یاد شده در حضور عنصر روی می‌تواند ناشی از بالا رفتن میزان عنصر روی در دانه و افزایش عملکرد دانه باشد. زیرا عنصر روی در بیوسنتز کربوهیدرات‌ها دخالت می‌کند و با افزایش میزان روی قابل جذب و افزایش عملکرد عملاً این ترکیب در دانه رقیق‌تر می‌گردد. در این ارتباط Bharti *et al*., 2013 بیان کردند که غنی‌سازی زیستی از طریق کاربرد خاکی به‌همراه محلول‌پاشی سولفات روی سبب افزایش غلظت روی در دانه و کاهش میزان اسید فیتیک شد. سایر محققین نیز به افزایش غلظت روی در دانه و فراهمی زیستی (Bioavailability)، همچنین کاهش غلظت فیتات و شاخص نسبت مولی اسید فیتیک به روی در اثر کاربرد روی در گیاهان مختلف مثل گندم و برنج اشاره کرده‌اند (Hussain *et al*., 2013; Imran *et al*., 2015). باتوجه به اینکه بخش اعظم اسید فیتیک در رویان، اسکوتلوم و لایه آلرون متمرکز است که از لحاظ علمی به‌منظور کاهش میزان آن در آرد تولیدی، سبوس جدا می‌شود ولی بیشترین میزان عناصر کم مصرف دانه نیز در همین بخش‌ها است (Peng *et al*., 2010; Stomph *et al*., 2011). تحقیقات Hussain *et al*., 2013 نشان داد که در آرد سبوس‌گیری شده، کمترین غلظت روی و فراهمی زیستی نسبت به آرد بدون سبوس‌گیری وجود داشت. با مصرف سولفات روی در مزارع گندم می‌توان غلظت روی را افزایش، مقدار اسید فیتیک کاهش و در نهایت نسبت مولی اسید فیتیک به روی را کاهش داد (Erdal *et al*., 2002) و بدین ترتیب عناصر غذایی در نانی که از این گندم تهیه می‌شود برای انسان قابل جذب بوده و در نهایت در فرآیند تهیه آرد نیازی به سبوس‌گیری نخواهد بود (Malakouti, 2011). روش غنی‌سازی زیستی زراعی، راهکاری کوتاه مدت برای افزایش کمی و کیفی عملکرد به‌شمار می‌آید. زیرا اثرات مثبت این روش در سال اجرای طرح قابل مشاهده می‌باشد. اما علیرغم تمامی مزیت‌های این روش، توقف تیمار گیاهان با ریزمغذی‌ها سبب برگشت به حالت اول و کاهش عملکرد کمی و کیفی می‌گردد که مهمترین معایب این روش محسوب می‌گردد. بر همین اساس امروزه محققین معتقدند که روش به‌نژادی ضمن حفظ اثرات مثبت روش به‌زراعی قادر است اثرات منفی آن را برطرف نماید.

– **راهکار به‌نژادی یا ژنتیکی:** یکی از راه‌حل‌های مؤثر برای افزایش تولید در مناطقی که دچار کمبود روی هستند، انتخاب ارقام متحمل به کمبود روی یا ارقامی با توان بالای جذب روی از خاک می‌باشند. استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم و کارا در جذب و استفاده از روی می‌تواند تکمیل کننده کاربرد روی در نظر گرفته شود. مخصوصاً در شرایط ایران که درصد بالایی از کشاورزان از کمبود روی در خاک مزرعه خود آگاه نبوده و عدم دسترسی به کودهای محتوی روی که کاربرد این عنصر را در شکل به‌زراعی با هزینه‌هایی همراه می‌کند که ضمن افزایش هزینه تولید، ممکن است به دلایل مختلف از اجرای آن کشاورزان صرف نظر نمایند. استفاده از ارقام گندم با کارایی بالای روی، می‌تواند با توانایی‌های فیزیولوژیک خود حداقل میزان روی قابل جذب را دریافت نموده و علاوه بر کاهش مصرف کودهای

شیمیایی، افزایش عملکرد کمی و کیفی محصول تولید شده را به‌دنبال دارند. وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها به وجود مکانیسم‌های درگیر در داخل گیاه و نیز خاک مرتبط می‌باشد (Rasouli-Sadaghiani, 2011). در این ارتباط بر روی ژنوتیپ‌های مختلف تحقیقات گوناگونی صورت گرفته است به‌طور مثال Genc and McDonald, 2004 در بررسی‌های خود بر روی گندم‌های هگزاپلوئید سنتتیک (Synthetic hexaploid wheat) و مدرن در شرایط کمبود و کفایت روی بیان کردند که تفاوت‌های محسوس ژنتیکی از نظر بروز نشانه‌های کمبود روی (بین کم تا زیاد) و کارایی روی (بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد) وجود دارد. همچنین تحقیقات Hacisalihoglu *et al*., 2004b روی ۳۵ ژنوتیپ لوبیا و Narwal *et al*., 2012 روی ۱۴ ژنوتیپ گندم نشانگر تفاوت و تنوع وسیع ژنوتیپی بین آنها در واکنش به شرایط کفایت و کمبود عنصر روی است. عنصر روی دارای نقش‌های متعددی در گیاه بوده و انتظار می‌رود در ژنوتیپ‌ها با کارایی روی بالا غلظت و محتوای روی بیشتر باشد. ولی در مطالعات صورت گرفته توسط Hacisalihoglu *et al*., 2004a عدم تفاوت از نظر غلظت و محتوای روی بین در بخش‌های مختلف (نظیر غشاها، آپوپلاست، واکوئل و دیواره سلولی) ارقام با کارایی روی بالا و متحمل گزارش شده است. با توجه به اینکه روی نقش کوآنزیمی برای آنزیم‌های متعددی را ایفا می‌کند آنها به تأثیر روی بر عملکرد آنزیم‌ها پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که در شرایط کمبود روی فعالیت آنزیم‌های مانند کربونیک آنهیدراز و Cu/Zn-SOD در رقم با کارایی روی پایین کاهش می‌یابد. درحالی‌که در این رقم کمبود روی بر فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز (به‌عنوان آنزیمی که روی هیچ نقشی را در ساختار و عملکرد آن ندارد) تأثیری نداشت. در مقابل در ارقام با کارایی روی بالا، فعالیت آنزیم‌های کربونیک آنهیدراز و Cu/Zn-SOD به‌همراه آنزیم نیترات ردوکتاز در شرایط کمبود روی در مقایسه با شرایط کافی بودن روی تغییری نداشت. این محققین معتقدند که دلیل تولید ماده خشک نزدیک به شرایط کافی بودن روی در محیط‌هایی که با کمبود روی مواجه هستند ناشی از ویژگی این ارقام در بکارگیری روی موجود در ساختار گیاه در فرآیندها و مسیرهای متابولیسمی که نقش مهمی را در تولید ماده خشک یا مکانیسم‌های دفاعی گیاه دارند می‌باشد. به‌عبارت دیگر، این ارقام از توانایی اختصاص روی موجود در گیاه بر اساس اولویت‌های متابولیسمی گیاه یا مسیرهای ضروری است. به‌طور کلی مکانیسم‌هایی که با استفاده از آنها ارقام متحمل گندم قادر به تأمین روی مورد نیاز خود می‌باشند به شرح زیر است:

– **افزایش روی قابل جذب در ناحیه ریزوسفر:** در شرایط کمبود روی، گیاه برای افزایش روی قابل جذب در ناحیه ریزوسفر ممکن است چندین مکانیسم را در پیش بگیرد، تراوش پروتون از ریشه، ترشح ترکیبات کلات‌کننده روی از قبیل اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه و آزادسازی فیتوسیدروفرهای (Phytosiderophores) کمپلکس کننده روی از ریشه به محیط ریزوسفر (Graham and Rengel, 1993; Hacisalihoglu and Kochian, 2003; Khoshgoftarmanesh *et al*., 2010). در این ارتباط Rasouli-Sadaghiani, 2011 بیان کردند که یکی از دلایل اختلاف غلات در توانایی جذب روی موجود در خاک به‌ویژه در خاک‌های آهکی ممکن است ناشی از تفاوت توانایی آنها در آزادسازی اسیدهای آلی از ریشه باشد. این ترکیبات به‌علت داشتن گروه-های عاملی کربوکسیل و آمین، قادر به تشکیل

کمپلکس با کاتیون‌های فلزی از جمله روی هستند (Aravind and Prasad, 2005). کمپلکس عناصر با کلاته کننده‌های آلی باعث افزایش حلالیت عناصر کم مصرف در خاک و همچنین جذب آنها توسط گیاه می‌شود. در این ارتباط Dessureault-Rompre *et al*., 2008 بیان کردند که آنیون‌های اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه نقش بسیار مهمی در افزایش غلظت روی در محلول ریزوسفر دارد. از دیگر مکانیسم‌های گیاهی برای جذب روی موجود در خاک آزادسازی فیتوسیدروفرها می‌باشد. آزادسازی فیتوسیدروفرها در شرایط کمبود روی سبب می‌شود که روی غیرقابل جذب به‌صورت قابل جذب برای گیاه تبدیل شود. فیتوسیدروفرها ظرفیت بالایی برای تشکیل پیوند با آهن و روی و افزایش تحرک آنها به‌ویژه در خاک-های آهکی دارند (Treeby *et al*., 1989). فرم غالب فیتوسیدروفر ترشح شده از ریشه، اسید ۲-دکسی موجینیس (2'-deoxymugineic acid (DMA)) است که در شرایط کمبود روی و آهن مشابه می‌باشد. میزان آزادسازی فیتوسیدروفرها توسط ریشه‌ها به عوامل مختلفی به‌ویژه سن گیاه، شدت کمبود روی، تجزیه میکروبی فیتوسیدروفرها، دما و شدت نور بستگی دارد (Zhang *et al*., 1991). در شرایط کمبود روی میزان آزادسازی فیتوسیدروفر در میان ارقام و همچنین گونه‌های مختلف غلات متفاوت است که دلیل این تفاوت ژنتیکی بین ارقام گندم به‌خوبی شناخته نشده است (Daneshbakhsh *et al*., 2013). گزارش شده است که فعالیت آنزیم‌های نیکوتیامین سینتاز (Nicotianamine synthase (NAS)) و نیکوتیامین آمینو ترانسفراز (Nicotianamine aminotransferase (NAAT)) که در ارتباط با بیوسنتز فیتوسیدروفر هستند در جو و برنج تحت شرایط کمبود آهن یافت شده است که سبب مقاومت به شرایط کمبود آهن می‌شوند (Kanazawa *et al*., 1994; Higuchi *et al*., 1999). مشیری و همکاران (۱۳۸۹) و Daneshbakhsh *et al*., 2013 در بررسی ارقام مختلف گندم بیان کردند که در شرایط کمبود روی، ارقام توانایی متفاوتی در ترشح فیتوسیدروفر دارند. به-طوری‌که ارقام با کارایی روی بالا (روی-کارا) فیتوسیدروفر بیشتری نسبت به ارقام با کارایی روی کمتر تولید کردند. پس نتیجه گرفتند که جذب روی بیشتر در ارقام روی-کارا می‌تواند به خاطر آزادسازی بیشتر فیتوسیدروفر از ریشه آنها باشد. در این مورد بیان شده است که ژنوتیپ‌های با تولید فیتوسیدروفر بیشتر از وزن خشک بالاتری در شرایط کمبود روی برخوردارند که احتمالاً علت آن به خاطر تأمین روی مورد نیاز برای مکانیسم‌های درونی گیاه و تولید مواد فتوسنتزی بیشتر است (مشیری و همکاران، ۱۳۸۹). به‌طور کلی تنوع ژنتیکی گسترده‌ای برای توانایی رشد گیاه، ماده خشک تولیدی و کارایی استفاده از روی در شرایط کمبود روی در بین گونه‌های مختلف غلات گزارش شده است (Genc and McDonald, 2008; Narwal *et al*., 2012; Vanitha *et al*., 2016).

– **افزایش میزان جذب روی توسط ریشه‌ها:** لازم به ذکر است که در جذب عناصر غذایی غیر متحرک در خاک علاوه بر محلول و قابل جذب نمودن آنها، ویژگی‌های ریشه گیاه مانند تعداد ریشه‌های موئین، سرعت رشد و گسترش ریشه، طول کل ریشه، سطح جذب ریشه و سرعت جذب عنصر توسط ریشه مؤثر هستند (Dong *et al*., 1995; Pande *et al*., 2007). لذا، گسترش ریشه و تغییر ساختار مورفولوژیکی آن در غلظت‌های پایین با افزایش سطح بیشتر ریشه در جذب بیشتر عناصر نقش دارند.

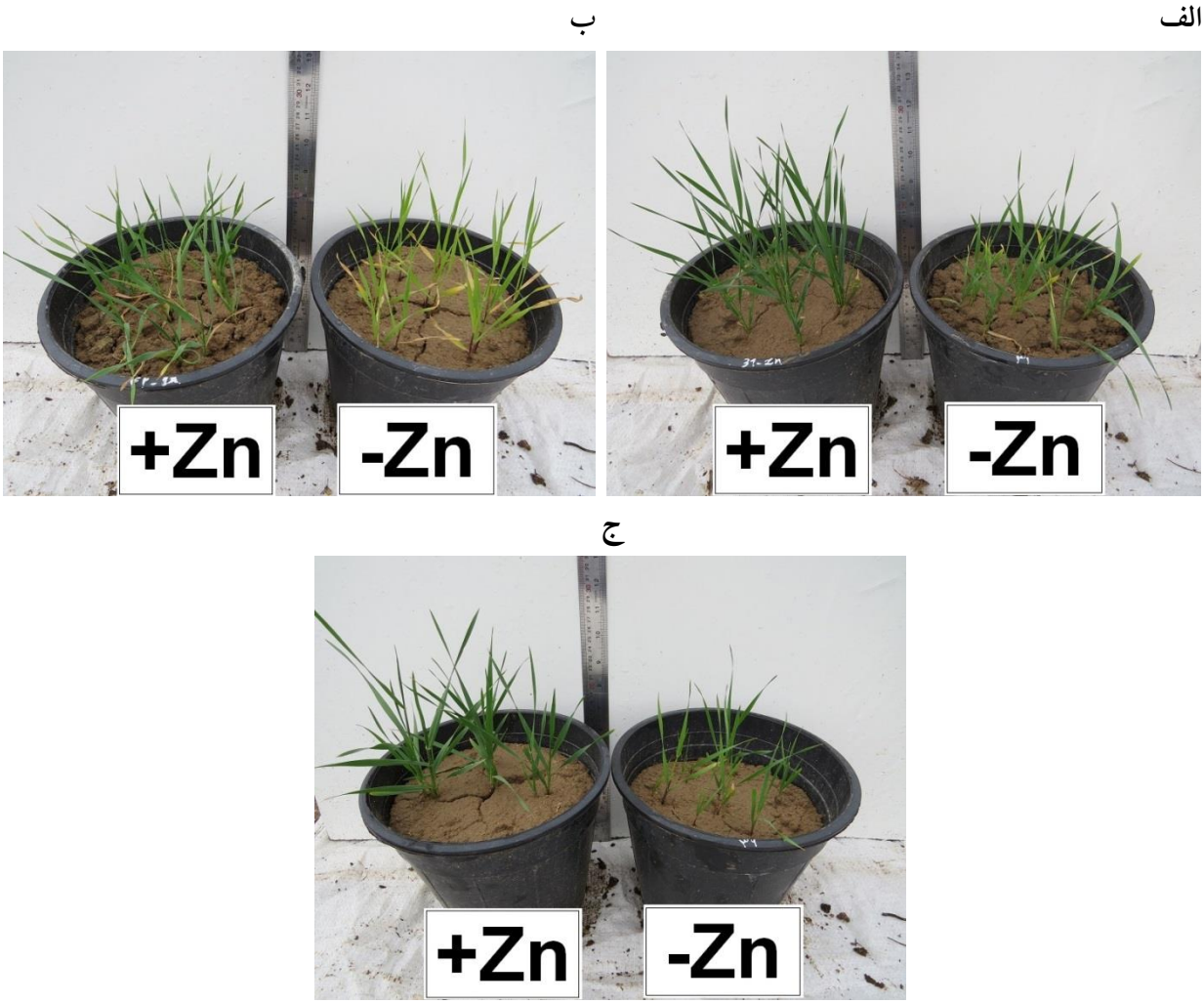
یکی دیگر از دلایل توانایی گیاهان در جذب روی، ممکن است مربوط به اختلاف آنها در تعداد و نوع پروتئین‌های ناقل روی (همانند انتقال دهنده‌ها و کانال‌های یونی) در ریشه باشد. در این ارتباط بیان برخی از ژن‌ها نقش به‌سزایی دارند که در شرایط کمبود روی فعال می‌شوند. ناقل‌هایی که در جذب و توزیع روی در گیاه نقش دارند به‌طور کلی شامل پروتئین‌های خانواده ZIP و CDF هستند. ناقل‌های خانواده ZIP در جذب روی از خاک و انتقال آن از بیرون سلول به داخل سیتوپلاسم نقش دارند، در حالی که ناقل‌های خانواده CDF باعث انتقال روی از سیتوپلاسم به خارج از سلول می‌گردند (Durmaz *et al*., 2011). در این مورد، قاسمی و همکاران (۱۳۹۴) بیان کردند که یکی از دلایل روی-کارایی ارقام گندم ممکن است به‌علت افزایش سطح بیان ژن ZIP1 در ریشه و در نتیجه انتقال روی از خاک به گیاه باشد. همچنین Pedas *at al*., 2009 نشان دادند که در شرایط کمبود روی، ژن‌های ناقل ZIP3 و ZIP5 در ریشه جو بیان شده و باعث افزایش تحمل گیاه به کمبود روی می‌گردد. نقش مؤثر ژن‌های ناقل ZIP1 و ZIP3 در افزایش تحمل گیاه به کمبود روی توسط Grotz *et al*., 1998 نیز گزارش شده است. مشیری و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که به‌طور متوسط ارقامی که کارایی روی بیشتری داشتند، کارایی بیشتری نیز در جذب روی داشتند.

- جابه‌جایی و کارایی بهتر در استفاده از روی در داخل گیاه: توانایی آوندهای گیاه در انتقال روی از ریشه به قسمت‌های هوایی و انتقال مجدد آن از بخش‌های رویشی به دانه نقش به‌سزایی در کارایی روی دارند. فرم انتقال عناصر ریزمغذی چه به‌صورت یونی یا کلات، در بسیاری از موارد نامشخص است. با این حال تحقیقات نشان داده که در داخل گیاه، نیکوتیامین (Nicotianamine (NA)) (کلات تشکیل شده از چندین فلز انتقالی دو ظرفیتی) عامل انتقال-دهنده روی در عرض آوند است قادر به انتقال آهن، مس و منگنز نیز می‌باشد (Stephan and Scholz, 1993). از این رو، میزان روی در دانه به غلظت روی در بافت‌های گیاهی (مثل ساقه و برگ) و کارایی انتقال روی از آنها به دانه بستگی خواهد داشت و باتوجه به تنوع ژنتیکی وسیعی که برای صفات فوق وجود دارد، می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی استفاده کرد. همچنین در غلات، فعالیت بیشتر آنزیم کربونیک آنهیدراز در برگ و وجود زیادتر گروه‌های سولفیدریل در غشاء پلاسمایی سلول‌های ریشه (Rengel, 1995 a; 1995 b) به‌عنوان مکانیسم‌های درگیر در کارایی استفاده از روی گزارش شده‌اند. به-طور کلی، انتخاب ژنوتیپ‌هایی از گیاهان که مقاومت بیشتری نسبت به کمبود روی داشته باشند، روش مناسبی برای غلبه بر کمبود روی در گیاهان محسوب می‌شود (Broadley *et al*., 2007). شکل ۲ الف، ژنوتیپی را نشان می‌دهد که به کاربرد روی پاسخ مثبت نشان داده و کمبود روی سبب کاهش ارتفاع گیاهچه و سبب کلروزگی برگ شده است، در حال که شکل ۲ ب، ژنوتیپی را نشان می‌دهد که ماده خشک تولیدی در هر دو شرایط باهم برابر هستند ولی در علائم ظاهری با هم متفاوت می‌باشند و در نهایت شکل ۲ ج، ژنوتیپی مشاهده می‌شود که کمبود روی باعث کاهش رشد شده است و علائم ظاهری قابل مشاهده نیست.

نتیجه‌گیری کلی

غنی‌سازی زیستی، بهبود هر دو بعد کمی و کیفی عملکرد را مد نظر دارد و از طریق زراعی و ژنتیکی

به‌دنبال رسیدن به اهداف خود در بهبود امنیت غذایی است. پس غنی‌سازی زیستی گندم به‌عنوان نقش مهم این گیاه در تأمین انرژی و پروتئین مردم کشور روشی مؤثر، پایدار، کم هزینه، ایمن‌تر از لحاظ تغذیه‌ای و با ضریب پوشش بسیار بالا به‌شمار می‌آید.



شکل ۲- شمایی از تأثیر کاربرد خاکی سولفات روی (۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بر گیاهچه‌های سه ژنوتیپ گندم بهاره. به‌ترتیب ژنوتیپ‌های 45430 (الف)، آذربایجان (ب) و RCOL (ج).

منابع

۱) ارزانی، ا. ۱۳۹۰. اصلاح گیاهان زراعی. (ترجمه)، نوشته: جان میلتون پولمن و دیوید آلن اسلیپر، چاپ پنجم. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۶۲۸ صفحه.

۲) اسفندیاری، ع.ا. و محبوب، س. ۱۳۹۳. بیوشیمی گیاهی (جلد دوم). انتشارات دانشگاه علوم پزشکی تبریز، ۳۱۵ صفحه.

۳) اسفندیاری، ع.ا. و محبوب، س. ۱۳۹۲. بیوشیمی گیاهی (جلد اول). انتشارات دانشگاه علوم پزشکی تبریز، ۲۴۵ صفحه.

۴) امین پور، ر. مرتضوی بک، ا. و مبلی، م. ۱۳۸۵. اثر روش‌های مختلف مصرف مس و آهن بر عملکرد بذر پیاز در اصفهان. مجله علوم و فنون باغبانی، ۴: ۲۶۵-۲۷۴.

۵) ثواقبی فیروزآبادی، غ.ر. ملکوتی، م.ج. و اردلان، م.م. ۱۳۸۲. اثر سولفات روی و غلظت روی بذر بر پاسخ‌های گیاه گندم در خاک آهکی. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۴(۲): ۴۷۱-۴۸۲.

۶) شهریاری، ح.م. ۱۳۸۷. رتبه ۱۲۳ سلامت ایران در میان ۱۹۲ کشور بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت. مصاحبه با خبرگزاری فارس، تهران، ایران.

۷) قاسمی، س. خوش گفتارمنش، ا.ح. سید طباطبایی، ب.ا. و خاکسار، غ. ۱۳۹۴. سطح بیان پروتئین‌های ناقل ZIP1 و ZIP5

در ریشه و برگ سه رقم گندم با روی کارایی متفاوت. مجله فرآیند و کارکردهای گیاهی، ۴(۱۱): ۲۳-۳۱.

۸) مشیری، ف. اردلان، م.م. طهرانی، م.م. و ثواقبی، غ.ر. ۱۳۸۹. کارایی روی در ارقام متفاوت گندم در یک خاک آهکی دچار کمبود روی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۱)، ۱۴۵-۱۵۳.

۹) ملکوتی، م.ج. ۱۳۹۰. راهکار افزایش کیفیت نان‌های مصرفی در کشور. فصلنامه علوم و صنایع غذایی، ۸(۳۱): ۱۱-۲۱.

۱۰) ملکوتی، م.ج. و داوودی، م.ح. ۱۳۸۱. روی عنصر فراموش شده در چرخه حیات گیاه، انسان و دام. انتشارات سنا، ۲۲۰ صفحه.

۱۱) ملکوتی، م.ج. و ضیائیان، ع. ۱۳۷۹. محلولپاشی روشی نوین در افزایش کارایی کودها و نیل به کشاورزی پایدار. نشریه ترویجی شورای عالی توسعه کاربرد مواد بیولوژیک و استفاده بهینه از کود و سم در کشاورزی. انتشارات فنی معاونت فنی کشاورزی، ۲۳ صفحه.

۱۲) ملکوتی، م.ج. کریمیان، ن. و کشاورز، پ. ۱۳۸۴. روش‌های تشخیص کمبود عناصر غذایی، توصیه کودی و برآورد نیاز کودی گیاهان (چاپ ششم). انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

13) Ajouri, A., Asgedom, H. and Becker, M. 2004. Seed priming enhances germination and seedling growth of barley under conditions of P and Zn deficiency. Journal of Plant Nutrition Soil Science, 167: 630-636.

14) Alvin, A. 2003. Modern developments in foliar fertilization. IFA-FAO Agriculture Conference, Rom, Italy.

15) Aravind, P. and Prasad, M.N.V. 2005. Cadmium induced toxicity reversal by zinc in *Ceratophyllum demersum* L. (a free floating aquatic macrophyte) together with exogenous supplements of amino- and organic acids. Chemosphere, 61: 1720-1733.

16) Aref, M., Chohan, S.A. and Khan, S. 2006. Response of Wheat to foliar application of nutrients. Journal of Agricultural and Biological Science, 1: 30-34.

17) Bardbeer, J.W. 1988. Seed dormancy and germination. Chapman and Hail. New York.

18) Bharti, K., Pandey, N., Shankhdhar, D., Srivastava, P.C. and Shankhdhar, S.C. 2013. Improving nutritional quality of wheat through soil and foliar zinc application. Plant, Soil and Environment, 59(8): 348-352.

19) Bolland, M., Paynter, B. and Barker, M. 1989. Increasing phosphorus concentration in lupin seed increased grain yield in phosphorus deficient soil. Australian Journal of Experimental Agriculture, 29: 797-801.

20) Bouis, H.E. and Welch, R.M. 2010. Biofortification: A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. Crop Science, 50: S20-S32.

21) Bouis, H.E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J.V. and Pfeiffer, W.H. 2011. Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition. Food and Nutrition Bulletin, 32; S31-S40.

22) Brinch-Pederson, H., Borg, S., Tauris, B. and Holm, P.B. 2007. Molecular genetic approaches to increasing mineral availability and vitamin content of cereals. Journal of Cereal Science, 46: 308-326.

23) Broadley, M.R., White, P.J., Hammond, J.P., Zelko, I. and Lux, A. 2007. Zinc in plants. New Phytologist, 173: 677-702.

24) Bybordi, A. and Malakouti, M.J. 2007. Effects of zinc fertilizer on the yield and quality of two winter varieties of canola. Zinc crops. International Congress of Improving Crop Production and Human Health, 24-26 May, Istanbul, Turkey.

25) Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? Plant and Soil, 302: 1-17.

26) Cakmak, I. 2010. Biofortification of cereals with zinc and iron through fertilization strategy. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, August 1-6, 2010, Brisbane, Australia.

27) Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A.A., Aydin, N., Wang, Y., Arisoy, Z., Erdem, H., Yazici, A., Gokmen, O., Ozturk, L. and Horst, W.J. 2010. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58: 9092-9102.

28) Cakmak, I., Torun, B., Erenoglu, B., Ozturk, L., Marschner, H., Kalayci, M., Ekiz, H. and Yilmaz, A. 1998. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. Euphytica, 100: 349-357.

29) Camberato, J.J. 2004. Foliar application on sugar beet. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 12: 120-126.

30) Daneshbakhsh, B., Khoshgoftarmanesh, A.H., Shariatmadari, H. and Cakmak, I. 2013. Phytosiderophore release by wheat genotypes differing in zinc deficiency tolerance growth with zinc free nutrient solution as affected by salinity. Journal of Plant Physiology, 170: 41-46.

31) Dessureault-Rompre, J., Nowack, B., Schulin, R., Tercier-Waeber, M.L. and Luster, J. 2008. Metal solubility and speciation in the rhizosphere of *Lupinus albus* cluster roots. Environmental Science and Technology, 42: 7146-7151.

32) Dong, B., Rengel, Z. and Graham, R.D. 1995. Root morphology of wheat genotypes differing

in zinc efficiency. Journal of Plant Nutrition, 18: 2761-2773.
33) Durmaz, E., Coruh, C., Dinler, G., Grusak, M.A., Peleg, Z., Saranga, Y., Fahima, T., Yazici, A., Ozturk, L., Cakmak, I. and Budak, H. 2011. Expression and cellular localization of ZIP1 transporter under zinc deficiency in wild emmer wheat. Plant Molecular Biology Reporter, 29: 582-596.
34) Erdal, I., Yilmaz, A., Taban, S., Eker, S., Torun, B. and Cakmak, I. 2002. Phytic acid and phosphorus concentrations in seeds of wheat cultivars grown with and without zinc fertilization. Journal of Plant Nutrition, 25(1): 113-127.
35) Genc, Y. and McDonald, G.K. 2004. The potential of synthetic hexaploid wheats to improve zinc efficiency in modern bread wheat. Plant and Soil, 262: 23-32.
36) Genc, Y. and McDonald, G.K. 2008. Domesticated emmer wheat [*T. turgidum* L. subsp. dicoccon (Schrank) Thell.] as a source for improvement of zinc efficiency in durum wheat. Plant and Soil, 310: 67-75.
37) Gibson, R.S. 1998. Inadequate intakes of zinc in developing countries. Practical household strategies to reduce risk of deficiency. www.zinc.world.org.health.
38) Gomaa, M.A., Radwan, F.I., Kandil, E.E. and El-Zweek. S.M.A. 2015. Effect of some macro and micronutrients application methods on productivity and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). Middle East Journal of Agriculture Research, 4: 1-11.
39) Graham, R.D. and Rengel, Z. 1993. Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants. In: Robson, A.D. (ed.), Zinc in soils and plants. Kluwer academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 107-118.
40) Graham, R.D. and Webb, M. 1991. Micronutrients and resistance and tolerance to disease. In: Mortwedt, L.L., Cox, F.R., Shuman, L.M. and Welch, R.M. (eds.). Micronutrients in Agriculture 2nd ed. Soil Science Society of America Madison. Wisohsim. pp. 329-370.
41) Grotz, N., Fox, T., Connolly, E., Park, W., Guerinot, M.L. and Eide, D. 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: 7220-7224.
42) Hacisalihoglu, G. and Kochian, L.V. 2003. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. New Phytologist, 159: 341-350.
43) Hacisalihoglu, G., Hart, J.J., Vallejos, C.E. and Kochian, L.V. 2004a. The Role of shoot-localized Processes in the mechanism of Zn efficiency in common bean. Planta, 218(5): 704-711.
44) Hacisalihoglu, G., Ozturk, L., Cakmak, I., Welch, R.M. and Kochian, L. 2004b. Genotypic variation in common bean in response to zinc deficiency in calcareous soil. Plant and Soil, 259(1-2): 71-83.
45) Harris, D., Rashid, A., Miraj, G., Arif, M. and Yunas, M. 2008. 'On-farm' seed priming with zinc in chickpea and wheat in Pakistan. Plant and Soil, 306: 3-10.
46) Hemantaranjan, A. and Grag, O.K. 1988. Iron and zinc fertilization with reference to the grain quality of *Triticum aestivum* L. Journal of Plant Nutrition, 11(6-11): 1439-1450.
47) Henriques, A.R., Chalfun-Junior, A. and Aarts, M. 2012. Strategies to increase zinc deficiency tolerance and homeostasis in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, 24: 3-8.
48) Higuchi, K., Suzuki, K., Nakanishi, H., Yamaguchi, H., Nishizawa, N.K. and Mori, S. 1999. Cloning of nicotianamine synthase genes, novel genes involved in the biosynthesis of phytosiderophores. Plant Physiology, 119: 471-479.
49) Hussain, S., Maqsood, M.A., Rengel, Z., Aziz, T. and Abid, M. 2013. Estimated zinc bioavailability in milling fractions of biofortified wheat grains and in flours of different extraction rates. International Journal of Agriculture and Biology, 15(5): 921-926.
50) Imran, M., Kanwal, S., Hussain, S., Aziz, T. and Aamer-Maqsood, M. 2015. Efficacy of zinc application methods for concentration and estimated bioavailability of zinc in grains of rice grown on a calcareous soil. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 52(1): 169-175.
51) Kanazawa, K., Higuchi, K., Nishizawa, N.K., Fushiya, S., Chino, M. and Mori, S. 1994. Nicotianamine aminotransferase activities are correlated to the phytosiderophore secretions under Fe-deficient conditions in Gramineae. Journal of Experimental Botany, 45: 1903-1906.
52) Kannan, S. 1990. Role of foliar fertilization in plant nutrition. In: Baligar, V. C. and Duncan, R. R. (eds.). Crops as enhancers of nutrient use. San Diego, CA, USA: Academic Press, pp. 313-348.
53) Khoshgoftarmanesh, A.H., Schulin, R., Chaney, R.L., Daneshbakhsh, B. and Afyuni, M. 2010. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture: A review. Agronomy for Sustainable Development, 30(1): 83-107.
54) Malakouti, M.J. 2011. The role of zinc in improving the quality of consumed bread. 3rd International Zinc Symposium: Improving crop production and human health. Hyderabad, India.
55) Marschner, H. 1993. Zinc in soil and plant. In: Robon, A.D. (ed.). Kluwer Academic

56) Martens, D.C. and Westermann, D.T. 1991. Fertilizer application for correcting micronutrient deficiencies. In Micronutrients in Agriculture, In: Mortvedt, J.J., Cox, F.R., Shuman, L.M. and Welch, R.M. (eds.), pp. 529-549, SSSA Book Series No. 4. Madison, WI.

57) Mathpal, B., Srivastava, P.C., Shankhdhar, D. and Shankhdhar, S.C. 2015. Zinc enrichment in wheat genotypes under various methods of zinc application. Plant, Soil and Environment, 61(4): 171-175.

58) Mohammad, W., Iqbal, M. and Shal, S.M. 1990. Effect of mode of application of zinc and iron on yield of wheat. Sarhad Journal of Agriculture, 6(6): 615-618.

59) Mortvedt, J.J. and Gilkes, R. J. 1993. Zinc fertilizers. In: Robson, A.D. (ed.). Zinc in soils and plants. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

60) Narwal, R.P., Dahiya, R.R., Malik, R.S. and Kala, R. 2012. Influence of genetic variability on zinc, iron and manganese responses in wheat. Journal of Geochemical Exploration, 121: 45-48.

61) Nautiyal, N., Yadav, S., and Singh, D. 2011. Improvement in reproductive development, seed yield, and quality in wheat by zinc application to a soil deficient in zinc. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42(17): 2039-2045.

62) Nawaz, H., Hussain, N., Yasmeen, A., Arif, M., Hussain, M., Rehmani, M.I.A., Chattha, M.B. and Ahmad, A. 2015. Soil applied zinc ensures high production and net returns of divergent wheat cultivars. Journal of Environmental and Agricultural Sciences, 2(1): 1-7.

63) Pande, P., Anwar, M., Chand, S., Yadav, V.K. and Patra, D. 2007. Optimal level of iron and zinc in relation to its influence on herb yield and production of essential oil in menthol mint. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 38: 561-578.

64) Pedas, P., Schjoerring, J.K. and Husted, S. 2009. Identification and characterization of zinc-starvation induced ZIP transporters from barley roots. Plant Physiology and Biochemistry, 47: 377-383.

65) Peng, W.U., Tao, Z.H.A.O. and Ji-Chun, T.I.A. N. 2010. Phytic acid contents of wheat flours from different mill streams. Agricultural Sciences in China, 9: 1684-1688.

66) Pourgholam, M., Nemati, N. and Oveysi, M. 2013. Effect of zinc and iron under the influence of drought on prolin, protein and nitrogen leaf of rapeseed (*Brassica napus*). Annals of Biological Research, 4(7): 200-203.

67) Prasad, A.S. 2003. Zinc deficiency. British Medical Journal, 326: 409-410.

68) Rafique, E., Yousra, M., Mahmood-Ul-Hassan, M., Sarwar, S., Tabassam, T. and Choudhary, T.K. 2015. Zinc application affects tissue zinc concentration and seed yield of pea (*Pisum sativum* L.). Pedosphere Journal, 25(2): 275-281.

69) Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sadeghzadeh, B., Sepehr, B.E. and Rengel, Z. 2011. Root exudation and zinc uptake by barley genotypes differing in Zn efficiency. Journal of Plant Nutrition, 34: 1120-1132.

70) Rengel, Z. and Graham, R.D. 1995. Importance of seed Zn content for wheat growth on Zn deficient soils. I-Vegetative growth. Plant and Soil, 173: 267-244.

71) Rengel, Z. 1995a. Carbonic anhydrase activity in leaves of wheat genotypes differing in Zn efficiency. Journal of Plant Physiology, 147: 251-256.

72) Rengel, Z. 1995b. Sulfhydryl groups in root-cell plasma membranes of wheat genotypes differing in Zn efficiency. Physiologia Plantarum, 95: 604-612.

73) Sadeghzadeh, B., Rengel, Z. and Li, C. 2015. Quantitative trait loci (QTL) of seed Zn accumulation in barley population Clipper × Sahara. Journal of Plant Nutrition, 38(11): 1672-1684.

74) Smirnoff, N. 2000. Ascorbic acid. Metabolism and functions of a multi-facetted molecule. Current Opinion in Plant Biology, 3(3): 229-235.

75) Stephan, U.W. and Scholz, G. 1993. Nicotianamine: Mediator of transport of iron and heavy metals in the phloem? Physiologia Plantarum, 88: 522-529.

76) Stock, D. and Holloway, P.J. 1993. Possible mechanisms for surfactant-induced foliar uptake of agrochemicals. Pesticide Science, 38: 165-177.

77) Stomph, T.J., Choi, E.Y. and Stangoulis, J.C. R. 2011. Temporal dynamics in wheat grain zinc distribution: Is sink limitation the key? Annals of Botany, 107: 927-937.

78) Thacher, T.D., Fischer, P.R., Strand, M.A. and Pettifor, J.M. 2006. Nutritional rickets around the world: Causes and future directions. Annals of Tropical Paediatrics, 26: 1-16.

79) Treeby, M., Marschner, H. and Römheld, V. 1989. Mobilization of iron and other micronutrient cations from a calcareous soil by plant borne, microbial and synthetic metal chelators. Plant and Soil, 114: 217-226.

80) Tu, C., Foster, L., Alvarado, A., McKenna, R., Silverman, D.N. and Frost, S.C. 2012. Role of zinc in catalytic activity of carbonic anhydrase IX. Archives of Biochemistry and Biophysics, 521(1-2): 90-94.

81) Urbano, G., Lopez-Jurado, M., Aranda, P., Vidal-Valverde, C., Tenorio, E. and Porres, J. Publishers, Dordrcht, The Netherland. pp. 55-77.

2000. The role of phytic acid in legumes. Journal of Physiology and Biochemistry, 56(3): 283-294.

82) Vanitha, J., Amudha, K., Usha Kumari, R. and Robin, S. 2016. Genetic variability studies for zinc efficiency in aerobic rice. Journal of Agricultural Science and Research, 3(1): 49-56.

83) Welch, R.M. 2003. Farming for nutritious foods: Agricultural technologies for improved human health. IFA-FAO Agricultural Conference on Global Food Security and the Role of Sustainable Fertilization. Rome, Italy.

84) World Health Organization. 1996. Trace Element in Human Nutrition and Health. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

85) World Health Organization. 2012. The world health report. World Health Organization (WHO), Geneva.

86) Zhang, F.S., Romheld, V. and Marschner, H. 1991. Diurnal rhythm of release of phytosiderophores and uptake rate of zinc in iron-deficient wheat. Soil Science and Plant Nutrition, 37: 671-678.