نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۶۵-۴۹

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 49-65

مقاله پژوهشی

غلظت عناصر کم‌مصرف در ارقام گندم نان با روی‌کارایی متفاوت در شرایط کمبود روی و روی کافی

محسن نیازخانی[1*]- بابک عبدالهی مندولکانی[2]- مراد جعفری[3]- میرحسن رسولی صدقیانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸

چکیده

کمبود عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه روی، به‌خاطر کاهش رشد و نمو گیاهان و در نتیجه تحت تأثیر قرار دادن زندگی انسان‌ها یک مشکل جهانی است. بعضی از راه‌کارهای مورد استفاده توسط گیاهان روی-کارا برای جذب و استفاده بهینه از روی خاک ممکن است در جذب دیگر عناصر کم‌مصرف از جمله آهن، مس و منگنز تداخل ایجاد کند. برای مطالعه اثر کمبود روی بر غلظت عناصر روی، آهن، مس و منگنز در ریشه، شاخساره و دانه ارقام گندم نان با روی‌کارایی متفاوت، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه در سال ۱۳۹۶ انجام شد. به‌این منظور چهار رقم گندم نان شامل دو رقم روی-کارا (بیات و نیک‌نژاد) و دو رقم روی-ناکارا (هیرمند و کرج ۱) در گلدان‌های حاوی خاک شنی شسته شده‌ی بدون روی (عدم کاربرد روی) و حاوی روی کافی (کاربرد ۵ میلی‌گرم درکیلوگرم) کاشته شدند. نمونه‌گیری از ریشه و شاخساره در مرحله ۳۰ درصد سنبله‌دهی و دانه در زمان رسیدگی کامل انجام گرفته و غلظت عناصر روی، آهن، مس و منگنز در اندام‌ها اندازه‌گیری شد و میانگین ارقام روی-کارا و میانگین ارقام روی-ناکارا محاسبه گردید. نتایج نشان داد کاهش روی خاک باعث شد در ریشه، غلظت آهن و مس (به‌ترتیب ۳۷/۹۷ و ۷/۹ درصد) و در دانه، غلظت آهن و منگنز (به‌ترتیب ۲۴/۵۸ و ۶/۳۳ درصد) افزایش یابد. هم‌چنین با کاهش روی خاک، غلظت منگنز در ریشه (۱۵ درصد) و غلظت آهن، مس و منگنز در شاخساره (به‌ترتیب ۳۹/۴۴، ۲۸/۵ و ۱۶/۱۹ درصد) و غلظت مس در دانه (۲۴/۵۱ درصد) کاهش پیدا کرد. در مقایسه با ارقام روی-ناکارا، غلظت روی، مس و منگنز ریشه (به‌ترتیب ۱۳/۴، ۴۴/۸۸ و ۱۰/۳۲ درصد) و غلظت آهن دانه ارقام روی-کارا (۶/۴۲ درصد) بیش‌تر بود. در شرایط کمبود روی، ارقام روی-کارا از غلظت آهن ریشه (۱۸/۵۵ درصد) و غلظت روی دانه (۱۱ درصد) بیش-تری نسبت به ارقام روی-ناکارا برخوردار بودند. مقایسه توانایی انتقال نسبی عناصر به شاخساره ارقام با روی کارایی متفاوت نشان داد، در شرایط کمبود روی، ارقام روی-کارا از توانایی کم‌تری در انتقال روی (۵۳/۸۵ درصد)، آهن (۲۹/۶۹ درصد)، مس (۲۱/۶۹ درصد) و منگنز (۵۰/۱۷ درصد) در مقایسه با ارقام روی-ناکارا (به ترتیب با ۷۹/۷۷، ۳۷/۶۸، ۲۷/۶۵ و ۷۰/۹۱ درصد) برخوردار بودند. به‌طورکلی می‌توان گفت، ارقام روی-کارای گندم نان از غلظت عناصر کم‌مصرف روی، آهن و منگنز بیش‌تری در ریشه و دانه برخوردار بوده و قابلیت استفاده از عناصر کم‌مصرف در اندام‌های آن‌ها بیش‌تر از ارقام روی-ناکاراست، با این‌حال ارقام روی-کارا از توانایی کم‌تری در انتقال روی، آهن، مس و منگنز از ریشه به شاخساره برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: اثرات متقابل، انتقال نسبی، روی، روی-کارا، عناصر کم‌مصرف

مقدمه

عناصر کم‌مصرف برای رشد و نمو گیاهان ضروری بوده (۸۶) و نقش بسیار حیاتی در سلامتی انسان‌ها و حیوانات دارند (۱۳). این عناصر که به مقدار بسیار کم برای فرآیندهای فیزیولوژیکی مورد نیاز هستند، تقریباً در تمامی فعالیت‌های سلولی و متابولیکی مشارکت کرده (۳۶) و کمبود آن‌ها تأثیر به‌سزایی در کاهش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارد. بدن انسان برای عملکرد عادی خود حداقل به ۲۰ عنصر معدنی ضروری نیاز دارد، که همه آن‌ها از طریق رژیم غذایی تأمین می‌شوند. برآوردهای اخیر نشان می‌دهند، بسیاری از مردم دنیا از کمبود حداقل یکی از این عناصر معدنیِ ضروری رنج می‌برند. گزارشاتی که جدیداً منتشر شده به‌وضوح نشان می‌دهند، سالانه بیش از ۱۰ میلیون نفر در اثر کاهش ایمنی بدن در مقابل بیماری‌های مزمن ناشی از کمبود عناصر کم‌مصرف جان خود را از دست می‌دهند (۸۴). سطح اهمیت و هم‌چنین کمبود گسترده این

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری اصلاح نباتات-ژنتیک مولکولی، استاد و دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: Mohsen.n114@gmail.com)
۴- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
DOI: 10.22067/jsw.v35i1.84269

عناصر باعث شده است که در سال‌های اخیر این مسئله به‌طور جدی مورد توجه محققان قرار گیرد (۷۰).

چهار عنصر روی، آهن، مس و منگنز به‌جهت این‌که برای تمامی موجودات زنده عالی ضروری هستند، نسبت به دیگر عناصر از نقش برجسته‌تری برخوردارند (۱۳). بین تنش‌های مربوط به کمبود مواد معدنی، کمبود روی یکی از وسیع‌ترین عوامل محدود کننده برای تولید محصولات کشاورزی است که تولید غذای جهان (۲) و در نهایت سلامت بشر را تهدید می‌کند (۳۸). به‌همین خاطر افزایش غلظت روی اندام‌های مورد مصرف محصولات زراعی به یک چالش جهانیِ در حال رشد بدل شده است (۸۵). تخمین زده می‌شود، حدود ۱/۱ میلیارد نفر از مردم سراسر جهان دچار کمبود روی هستند (۶۴). عامل اصلی در شیوع گسترده کمبود عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی در بدن انسان، وجود نسبت بالایی از غذاهای مبتنی بر غلات دارای کمبود (۳۲) و غذاهای غنی از پروتئین با محتوای ناچیز عناصر کم-مصرف در رژیم غذایی، علی‌الخصوص در کشورهای در حال توسعه است (۱۲). به‌همین جهت در دو دهه گذشته تحقیق برای تولید و توسعه گیاهان زراعی که قسمت‌های خوراکی آن‌ها غنی از عناصر کم‌مصرف باشد (غنی‌سازی زیستی[1]) به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (۷۳).

غلظت پایین روی در خاک‌های زراعی از تعیین کننده‌ترین عواملِ کمبود روی در گیاهان است. بررسی‌ها نشان می‌دهند بیش از ۴۰ درصد اراضی زیرکشت گندم دچار کمبود شدید روی هستند (۳). علاوه بر کمبود روی خاک، قابلیت دسترسی به آن نیز از عوامل محدود کننده برای استفاده گیاه به‌شمار می‌رود. قابلیت دسترسی روی خاک برای گیاهان به عوامل زیستی و غیرزیستی مانند گونه گیاهی، اقلیم منطقه، غلظت روی قابل جذب کل، pH خاک، دما، مقدار کربنات کلسیم خاک، مواد آلی خاک، بافت خاک، فعالیت میکروبی، شوری، غرقابی و برهم‌کنش[2] (اثرات متقابل) روی با دیگر عناصر مانند آهن، مس، منگنز، فسفر و منیزیم بستگی دارد (۲۰، ۶۳ و ۸۵). بذور تولید شده در خاک‌های با کمبود عناصر کم‌مصرفی مانند روی، نه‌تنها از ارزش غذایی کمی برای مصرف انسان‌ها و حیوانات برخوردارند، بلکه گیاهان تولید شده از این بذور با داشتن بنیه ضعیف، در مواجهه با تنش‌های محیطی بسیار آسیب‌پذیر بوده و عملکرد خوبی ندارند (۲۷). به‌همین خاطر توانایی تجمع حداکثری عناصر کم‌مصرف در دانه، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است.

برای حل مشکل کمبود روی، تاکنون از راه‌کارهای متنوعی استفاده شده است، ولی در بین همه این راه‌کارها، تولید ژنوتیپ‌های روی-کارا یک استراتژی امیدوارکننده است که می‌تواند تحت شرایط کمبود روی عملکرد مؤثری داشته باشد. این ژنوتیپ‌ها در خاک‌های با کمبود روی از رشد بهتری برخوردار بوده و عملکرد بیش‌تری تولید می‌کنند (۶۹). خصوصیات ریشه، تولید و پخش فیتوسیدرفور[3]، انتقال (مجدد)[4] روی و مصرف بهینه[5] روی، از جمله عوامل مهم درگیر در روی‌کارایی گیاهان به‌شمار می‌روند (۷۷). شماری از مکانیسم‌های استفاده شده توسط ژنوتیپ‌های روی-کارا ممکن است جذب و انتقال دیگر عناصر غذایی از جمله آهن، مس و منگنز را نیز تحت تأثیر قرار دهد، که این موضوع اهمیت خاصی در بحث کیفیت محصولات کشاورزی دارد (۳۳). به‌نظر می‌رسد این اثرات می‌تواند در شرایط خاص مانند غلظت کم و زیاد عناصرِ خاک متفاوت باشد. برآیند این برهم‌کنش‌ها به‌عنوان یک پاسخ، ممکن است باعث افزایش و یا کاهش رشد گیاه گردد (۵۳). با توجه به موارد ذکر شده، لازم است در فرآیند تغذیه گیاهی، هر عنصری به اندازه کافی در دسترس گیاه قرار گرفته و تعادل و تناسب میان عناصر غذایی رعایت شود (۲۳).

بنابراین در مطالعه حاضر بر روی سه هدف زیر تمرکز شد: ۱- مطالعه غلظت روی، آهن، مس و منگنز در شرایط کمبود روی در ریشه، شاخساره و دانه گندم نان. ۲- بررسی غلظت عناصر کم‌مصرف مورد مطالعه در اندام‌های مختلف ارقام گندم نان با روی-کارایی متفاوت در شرایط کمبود روی. ۳- مطالعه قدرت انتقال عناصر کم‌مصرف روی، آهن، مس و منگنزِ جذب شده، به شاخساره‌ی ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در بهار و تابستان سال ۱۳۹۶ اجرا گردید. فاکتورهای مورد بررسی، شامل عنصر روی در دو سطح عدم مصرف (کمبود روی) و سطح پنج میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (روی کافی) از منبع سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) و چهار رقم گندم نان با روی‌کارایی متفاوت (دو رقم بیات و نیک‌نژاد به‌عنوان ارقام روی-کارا و دو رقم هیرمند و کرج ۱ به‌عنوان ارقام روی-ناکارا) بودند (۸، ۴۶). خاک شنی مورد استفاده بعد از تهیه از بستر رودخانه فصلی "خان آرخی" واقع در شمال‌غربی دانشگاه ارومیه، با الک دو میلی‌متری غربال و سپس پنج بار با آب معمولی کاملاً آب‌شویی شده و در نهایت با آب دوبارتقطیر آب‌کشی و هواخشک گردید.

1- Biofortification
2- Interaction
3- Phytosiderphore
4- (Re) translocation
5- Utilization

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک شنی مورد استفاده در مطالعه

Table 1- Properties of soil used for the experiment

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	روی Zn	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	پتاسیم K	فسفر P	ماده آلی OM	کربنات کلسیم $CaCO_3$	pH	شوری EC
%			mg.kg^{-1}						%			mmoh.cm^{-1}
96	1	3	0.15	0.87	3.8	0.07	9.4	2.4	0.29	9	7.8	1.19

جدول ۲- ترکیب محلول غذایی مورد استفاده در آزمایش

Table 2- Composition of the nutrient solution used in the experiment

مواد مورد استفاده Ingredients	غلظت محلول غذایی (گرم در لیتر) Concentration (gr.L^{-1})	مقدار محلول غذایی (میلی‌لیتر در کیلوگرم خاک) Amount (ml.kg^{-1})
NH_4NO_3 / $CaCl_2.2H_2O$ / $MgSO_4.7H_2O$	(57) / (90) / (24)	1.67
K_2SO_4 / KH_2PO_4	(42) / (30.24)	3
$MnSO_4.H_2O$ / $Na_3[Co(NO_3)_6]$ / $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ / $CuSO_4.5H_2O$ / H_3BO_3	(0.55) / (0.62) / (1.2) / (0.42) / (6)	1.67
Fe - EDTA	(41.66)	2
$ZnSO_4.7H_2O$*	(13.14)	1.67

* فقط برای تیمارهای با روی کافی (شرایط نرمال) مورد استفاده قرار گرفت.

*Just for Zn sufficient treatments were applied.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بستر شنی مورد استفاده با روش‌های استاندارد در آزمایشگاه اندازه‌گیری و تعیین گردید. به این منظور بافت خاک به روش هیدرومتری، pH خاک با دستگاه pH سنج، شوری با دستگاه EC متر، مقدار مواد آلی به روش واکلِی بلک[1]، کربنات کلسیم و فسفر قابل جذب به روش اولسِن[2]، پتاسیم قابل جذب به روش نشر شعله‌ای (فلِیم فتومتری[3]) و عناصر کم‌مصرف (آهن، روی، مس و منگنز قابل جذب) به روش جذب اتمی اندازه‌گیری شد (۷۸) (جدول ۱).

مواد غذایی مورد نیاز، قبل از کشت به‌صورت محلول تهیه و به خاک هر یک از گلدان‌ها جداگانه اضافه شده و کاملاً با آن مخلوط گردید (۸) (جدول ۲). با توجه به این‌که خاک‌هایی که کم‌تر از ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، روی داشته باشند خاک‌های فقیر از روی محسوب می‌شوند (۵۱)، علاوه بر این مواد غذایی، به خاک نیمی از گلدان‌ها (تیمارهای حاوی روی کافی) عنصر روی، به‌مقدار پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک افزوده شد (۸).

بذور قبل از کشت به‌مدت سه دقیقه با اتانول ۷۰ درصد و سپس به‌مدت پنج دقیقه با آب اکسیژنه یک درصد ضدعفونی شده و در نهایت با آب دوبارتقطیر آب‌کشی گردید. تعداد ۱۰ عدد بذر در لوله‌های پلی‌اتیلنی به ارتفاع ۳۴ و قطر ۱۱ سانتی‌متر، حاوی چهار کیلوگرم خاک شنی کشت، و بعد از ده روز، تعداد گیاهان در هر گلدان به هفت عدد کاهش داده شد. در طول فصل رشد، هر دو هفته یک‌بار محلول نیترات‌آمونیوم به‌همراه آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه گردید (جدول ۲). آبیاری در حد ظرفیت زراعی به‌صورت روزانه و با استفاده از آب دوبارتقطیر انجام شد. نمونه‌برداری از ریشه و شاخساره در مرحله ۳۰ درصد سنبله‌دهی و از دانه‌ها بعد از رسیدگی کامل انجام گردید. غلظت عناصر کم‌مصرف روی، آهن، مس و منگنزِ اندام‌های هر یک از ارقام به‌روش سوزاندن خشک در کوره الکتریکی و قرائت عصاره استخراجی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (SHIMADZU AA-6300) اندازه‌گیری شد (۸). برای اطمینان از صحت انتخاب ارقام به‌لحاظ روی‌کارایی، شاخص روی‌کارایی (ZE[4]) با تقسیم عملکرد ماده خشک شاخساره در شرایط کمبود روی بر عملکرد ماده خشک شاخساره در شرایط روی کافی برای هرکدام از ارقام محاسبه شد (۸). آزمون نرمالیته داده‌ها و خطاهای آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB (نسخه ۱۹) انجام گرفت. برای تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین تیمارها (به‌روش دانکن در سطح یک درصد) از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) استفاده گردید. انتقال نسبی عناصر از ریشه به شاخساره و هم‌چنین نسبت انتقال عناصر با استفاده از فرمول‌های مربوطه محاسبه گردید (۵۴).

1- Walkley-Black
2- Olsen
3- Flame photometery
4- Zinc efficiency index

$$RST\ (\%) = (SMC/RMC) *100$$

RST: انتقال نسبی عنصر به شاخساره، SMC: غلظت عنصر در شاخساره، RMC: غلظت عنصر در ریشه

$$ETR\ (\%) = (OOT_{-Zn}/OOT_{+Zn}) *100$$

ETR: نسبت انتقال عنصر، OOT_{-Zn}: انتقال نسبی عنصر در شرایط کمبود روی، OOT_{+Zn}: انتقال نسبی عنصر در شرایط روی کافی

نتایج و بحث

روی‌کارایی ارقام

ابتدا برای هرکدام از ارقام مورد مطالعه شاخص روی‌کارایی (ZE) محاسبه گردید. شاخص روی‌کارایی محاسبه شده برای ارقام بیات، نیک‌نژاد، کرج ۱ و هیرمند به‌ترتیب با ۰/۹۸، ۰/۸۸، ۰/۸۳ و ۰/۸۰ بود. شاخص روی‌کارایی برای این ارقام توسط خوش‌گفتارمنش و همکاران (۴۶) به‌ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۶۷ و توسط باغبان‌طبیعت و رسولی‌صدقیانی (۸) به‌ترتیب ۱/۲، ۱/۰۴، ۰/۸۴ و ۰/۷۳ گزارش شده است. در مطالعه حاضر، از میانگین غلظت عناصر در اندام‌های دو رقم بیات و نیک‌نژاد با متوسط روی‌کارایی ۰/۹۳ به‌عنوان ارقام روی-کارا و از میانگین دو رقم کرج ۱ و هیرمند با متوسط روی‌کارایی ۰/۸۱ به‌عنوان ارقام روی-ناکارا استفاده شد.

غلظت روی

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کمبود روی خاک باعث کاهش غلظت روی در هر سه اندام ریشه، شاخساره و دانه شد (جداول ۳، ۴ و ۵). کاهش غلظت روی در شرایط کمبود روی محیط و یا افزایش روی در اثر کاربرد کودهای حاوی روی چه به‌صورت محلول‌پاشی و چه به‌صورت خاکی، در ریشه، شاخساره و یا دانه گندم (۱، ۵۹، ۶۰ و ۶۱) و جو (۵۲، ۷۱ و ۸۱) گزارش شده است.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد، غلظت روی ریشه در ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۶). در شرایط کمبود روی، غلظت روی دانه ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۴). در شرایط کمبود روی کاهش غلظت روی دانه در ارقام روی-کارا کم‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. در شرایط روی کافی تفاوت معنی‌داری بین غلظت روی دانه ارقام روی-کارا و روی-ناکارا مشاهده نشد (جدول ۴). در مجموع نتایج نشان داد، غلظت روی ریشه و دانه ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود.

به‌نظر می‌رسد ارقام روی-کارا نه‌تنها از توانایی بیش‌تری در جذب روی برخوردار هستند، بلکه قابلیت آن‌را دارند که در شرایط کمبود روی، مقدار بیش‌تری از روی جذب شده را به دانه منتقل نمایند. عوامل متعددی در روی‌کارایی ارقام می‌توانند دخیل باشند، ولی به‌طورکلی این عوامل را می‌توان به دو گروه فعال و غیرفعال تقسیم کرد. جذب غیرفعال از طریق جذب الکترواستاتیکی یون‌های روی در دیواره سلولی سلول‌های ریشه گیاه صورت می‌گیرد و طبیعتاً فعالیت‌های متابولیکی جاری گیاه تأثیری بر آن ندارند. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهند عناصر روی، آهن، مس و منگنز موقعی از طریق مکانیسم غیرفعال و با استفاده از خاصیت انتشار از طریق ریشه جذب می‌شوند که در سطوح بالاتر از سطح مورد نیاز گیاه در خاک وجود داشته باشند. در شرایط مقدار کافی این عناصر در خاک، جذب از طریق مکانیسم فعال صورت می‌گیرد (۴۱). به‌نظر می‌رسد جذب فعال به‌دلیل وابستگی به فعالیت‌های متابولیکی گیاه تأمین‌کننده بخش عمده روی مورد نیاز گیاه باشد.

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش کارایی جذب روی توسط ارقام روی-کارا می‌توان به بالا بودن دو فاکتور راندمان جذب[1] روی توسط ریشه گیاه و مصرف بهینه از روی موجود در سلول‌های آن (۲۹) که توسط مکانیسم فعال کنترل می‌شوند نسبت داد. با این‌وجود عقیده بر این‌است که از بین این دو عامل، افزایش راندمان جذب، مکانیسم اصلی در روی‌کارایی بوده که با افزایش بازده فیزیولوژیکی، ساختاری و مولکولی قابل اصلاح است. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد کارایی جذب روی در غلات عمدتاً مربوط به اختلاف در جذب روی توسط ریشه است (۱۵). از طرفی گزارش شده است که روی‌کارایی ارقام تحت کنترل ژنتیکی بوده و عوامل محیطی تأثیری بر این ویژگی ندارند (۷۴). روی از جمله عناصری است که قادر به انتشار بین سلولی نیست، لذا ناقل‌های[2] مخصوص برای انتقال از محیط خاک به درون سلول‌های ریشه نیاز است (۴۲). از این‌رو گمان می‌رود فعالیت بالای ژن‌های کدکننده ناقل‌های جذب روی (به‌ویژه ژن‌های *ZIP*[3]) یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش بازده مولکولی قابل اصلاح برای روی‌کارایی باشد (۲۶، ۶۰، ۸۱).

در مطالعه‌ای که بر روی الگوی بیان ژن‌های *ZIP* در ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی انجام گردید، مشاهده شد که تحت شرایط کمبود روی بیان این ژن‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در ارقام روی-کارا به‌طور چشم‌گیری بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا است (۶۰). لذا به‌نظر می‌رسد، در کنار دیگر عواملِ روی‌کارایی، افزایش بیان ژن‌های *ZIP* یکی از عوامل بسیار مهم در روی‌کارایی ارقام باشد. هم‌چنین در این مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین افزایش بیان این ژن‌ها

1- Uptake
2- Transporters
3- Zrt-Irt like protein

و غلظت روی ریشه، شاخساره و دانه در گندم نان دیده شد (۵۹ و ۶۰). در همین راستا تیونگ و همکاران (۸۱) گزارش کردند که ارقام جو، که دارای بیان بالای ژن‌های *ZIP* در اندام‌های خود هستند از توانایی بیش‌تری در جذب روی برخوردار بوده و دارای غلظت روی بیش‌تری در اندام‌های خود هستند. گزارشات منتشر شده نشان می‌دهند که در شرایط کمبود روی، غلظت روی در ریشه و شاخساره جو (۵۲، ۷۱)، ریشه و شاخساره برنج (۲۲)، ریشه، برگ و ساقه نخود فرنگی (۶۳) و دانه‌های لوبیا چیتی[1] (۵۶) در ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بوده و کاهش غلظت روی این ارقام در شرایط کمبود روی، کم‌تر از ارقام روی-ناکارا است.

نتایج نشان داد، اختلاف معنی‌داری بین غلظت روی شاخساره ارقام روی-کارا و روی-ناکارا وجود نداشت (جدول ۳). گزارشاتی وجود دارد که نشان می‌دهند، زمانی‌که ارقام روی-کارا و روی-ناکارا تحت شرایط کمبود روی رشد می‌کنند فقط ارقام روی-ناکارا علائم کمبود را نشان می‌دهند و بین غلظت روی شاخساره و برگ ارقام روی-کارا و ارقام روی-ناکارا، اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود (۱۶، ۱۸، ۳۴، ۵۲، ۶۶). بنابراین می‌توان گفت غلظت روی شاخساره نمی‌تواند شاخص مناسبی برای تفکیک ارقام روی-کارا از روی-ناکارای گندم نان باشد.

غلظت آهن

کاهش روی خاک باعث افزایش غلظت آهن ریشه و دانه (جداول ۴ و ۵) و کاهش چشم‌گیر ($P\leq0.01$) غلظت آهن شاخساره گردید (جدول ۵). یکی از دلایل افزایش جذب آهن توسط ریشه در شرایط کمبود روی و یا افزایش جذب روی در شرایط کمبود آهن، وجود پدیده جذب رقابتی[2] است. علت این پدیده وجود یک سیستم انتقال عمومی در سطح غشاء پلاسمایی برای فلزات و وجود رقابت بین عناصر فلزی برای انتقال توسط این سیستم عنوان شده است (۴۸). پدیده جذب رقابتی دو عنصر روی و آهن در ریشه گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است. چِن و همکاران (۲۱) گزارش کردند که کمبود فلزات سنگین در خاک، موجب تحریک بیان ژن‌های کدکننده پروتئین‌های ناقلِ این فلزات می‌شود و از آنجائی‌که فلزات سنگین توسط ناقل‌های مشابه منتقل می‌شوند، تحت شرایط کمبود روی تجمع دیگر فلزات سنگین از جمله آهن و مس در ریشه افزایش می‌یابد. افزایش غلظت آهن در شرایط کمبود روی در اواخر دوره رشدی در ریشه گندم نان (۴۰)، ریشه تیمارهای هفت روزه گندم نان (۲۶)، ریشه ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان (۵۲) و ریشه جو (۸۰ و ۸۱) گزارش شده است. هم‌چنین به کاهش غلظت آهن ریشه با افزایش روی محیط در نعناع[3] (۶۲) اشاره شده است. مشاهده شده است که در شرایط کمبود آهن، غلظت روی در ریشه گندم نان (ارقام قدس و بک‌کراس روشن)، تریتیکاله (رقم الینر)، ذرت (دانه‌ای ۷۰۴ و شیرین ۴۰۳) و گلرنگ (رقم اراک ۲۸۱۱) افزایش پیدا می‌کند (۷۹). با این‌حال گزارشات متنوع و بعضاً ضد و نقیضی در مورد برهم-کنش روی و دیگر عناصر کم‌مصرف در ریشه گیاهان در شرایط روی کافی منتشر شده است. در همین راستا برخلاف نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، گزارش شده است که با افزایش روی، غلظت آهن در ریشه گیاهانی مانند گندم نان (۴۳)، آرابیدوپسیس[4] (۵۰) و گیاه دارویی بالنگوی شهری[5] (۶) افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران (۹۰) گزارش کردند که افزایش روی تا مقدار کافی، غلظت آهن را در ریشه گندم نان بالا می‌برد، با این‌حال تفاوت معنی‌داری بین دو سطح کمبود روی و روی کافی وجود نداشت. در مطالعاتی که بر روی گیاهان مختلف انجام شده، به افزایش غلظت آهن دانه در شرایط کمبود روی اشاره شده است. در تأیید نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر، مبنی بر افزایش غلظت آهن دانه در شرایط کمبود روی، بیگی و همکاران (۱۱) گزارش کردند که در شرایط کمبود روی، غلظت آهن در دانه لوبیا چیتی افزایش می‌یابد. مطالعات عبدلی و همکاران (۱) بر روی گندم نان نشان داد که محلول‌پاشی با سولفات روی باعث کاهش معنی‌دار غلظت آهن دانه در این گیاه شد. با این‌حال پهلوان راد و پسرکلی (۶۱) افزایش ۸ درصدی غلظت آهن دانه گندم نان را در اثر محلول‌پاشی با سولفات روی گزارش کرده‌اند.

نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاهش روی خاک باعث کاهش معنی‌دار ($P\leq0.01$) غلظت آهن شاخساره نسبت به شرایط روی کافی شد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که غلظت روی در حد مقدار کافی در خاک، بر غلظت آهن شاخساره گیاه اثر مثبت داشته و از این طریق باعث افزایش وزن خشک گیاه می‌شود (۷ و ۶۲). کاهش غلظت آهن شاخساره در شرایط کمبود روی خاک را به جلوگیری از انتقال آهن از ریشه به شاخساره در شرایط کمبود روی می‌توان نسبت داد (۶۷ و ۶۸). در توافق با مشاهدات ما، افزایش در غلظت آهن شاخساره در شرایط روی کافی نسبت به شرایط کمبود روی در گندم نان (۲۶ و ۹۰)، برگ پرچم گندم نان (۲۸)، ذرت (۴) و گیاهان دارویی هم‌چون نعناع (۶۲)، پونه[6] (۷)، بالنگوی شهری (۶) و مرزه[7] (۵) گزارش شده است. در تناقض با نتایج حاصل از مطالعه حاضر، گزارشاتی وجود دارد

1- *Phaseolus vulgaris* L.
2- Competition uptake

3- *Mentha arvensis* L.
4- *Arabidopsis thaliana*
5- *Lallemantia iberica* F. & CM
6- *Mentha pulegium* L.
7- *Satureja hortensis* L.

که نشان می‌دهند در شرایط کمبود روی، غلظت آهن در شاخساره گیاهان گندم نان (۴۰، ۴۳، ۴۸ و ۵۲)، ذرت (۲۴) و جو (۵۲، ۸۰ و ۸۱) افزایش پیدا می‌کند. کُلِلی و همکاران (۴۸) افزایش آهن را در شرایط کمبود روی در شاخساره دو رقم گندم نان و رقم دوروم گزارش کرده‌اند. ایشان علت افزایش آهن در شرایط کمبود روی را دخالت یک سیستم انتقال عمومی در سطح غشاء پلاسمایی و رقابت عناصر فلزی برای جابه‌جایی توسط این سیستم عنوان کردند. لیلای و همکاران (۵۰)، گزارش کردند که در شرایط کمبود روی غلظت آهن در شاخساره گیاه آرابیدوپسیس افزایش یافت، با این‌حال این افزایش تفاوت معنی‌داری با شرایط روی کافی نداشت. هم‌چنین گراهام و رِنگِل (۳۱)، در بررسی ارقام لوبیا با روی‌کارایی متفاوت نشان دادند که با افزایش تیمار کود روی، غلظت آهن در اندام هوایی هر دو نوع رقم کاهش داشت.

مقایسه میانگین ارقام نشان داد در شرایط کمبود روی، ریشه ارقام روی-کارا غلظت آهن بیش‌تری ($P\leq0.01$) نسبت به ارقام روی-ناکارا داشتند (جدول ۴). از طرفی افزایش در غلظت آهن ریشه در اثر کاهش روی خاک، در ارقام روی-کارا به نحو بارزی بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. ولی در شرایط روی کافی تفاوت معنی‌داری بین غلظت آهنِ ریشه ارقام روی-کارا و روی-ناکارا مشاهده نشد. غلظت آهنِ شاخساره در ارقام روی-کارا کم‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۶). همانند غلظت روی دانه، غلظت آهن دانه ارقام روی-کارا نیز به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۶). البته لازم به ذکر است هر چند غلظت آهن در دانه ارقام روی-کارا در این مطالعه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود ولی به جهت اختلاف بسیار اندک در غلظت این ارقام شاید نتوان با قطعیت نسبت به نتیجه حاصله استناد کرد. با این‌حال به‌لحاظ آماری می‌توان گفت، به‌طورکلی در مقایسه با ارقام روی-ناکارا، ارقام روی-کارا از غلظت آهن بیش‌تری در ریشه و دانه و غلظت کم‌تری در شاخساره برخوردار بودند. گیاهان برای افزایش کارایی جذب عناصر از راه‌کارهای متنوعی هم‌چون مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بهره می‌برند. برخی از این ساز و کارهای به‌کار رفته توسط گیاهان ممکن است بر جذب و انتقال سایر عناصر نیز تأثیر داشته باشند (۵۵). در راه‌کار فیزیولوژیکی، گیاهان با اضافه کردن موادی به خاک می‌توانند محیط را برای جذب عنصر مساعد کنند (۱۹). بسته به نوع گیاه، دو استراتژی توسط گیاهان مختلف برای جذب آهن از خاک به‌کار برده می‌شود. گیاهان دو لپه‌ای برای جذب آهن از خاک از استراتژی نوع یک[1] استفاده می‌کنند، در حالی‌که گندمیان از استراتژی نوع دوم بهره می‌برند (۳۳). در استراتژی نوع دوم، ریشه گندم با ترشح فیتوسیدِرفور[2] در ریزوسفر، آهن‌های سه ظرفیتی را با پیوندهای قوی کلاته کرده و جذب می‌کند. فیتوسیدروفورها ترکیباتی از خانواده موگنِئیک اسید[3] هستند که در شرایط کمبود آهن و روی از ریشه گیاهان خانواده گندمیان در ریزوسفر ترشح می‌شوند (۸۷) تا جذب فلزات از خاک را بهبود بخشیده و علاوه بر آن باعث تسهیل در انتقال درون سلولی آن‌ها گردند (۳۹). در همین راستا، تریبی و همکاران (۸۳) معتقدند تولید فیتوسیدرفور یک پاسخ عمومی گیاهان برای تحمل کمبود عناصر کم‌مصرفی مانند روی و آهن می‌باشد. ترکیب فیتوسیدرفورها با روی و آهن موجب تشکیل کمپلکس محلولی می‌شود که این کمپلکس با افزایش پویایی این عناصر در خاک منجر به افزایش قابلیت جذب آن‌ها توسط گیاه می‌گردد. مشاهده شده است که در شرایط کمبود روی، توانایی ارقام روی-کارا در ترشح فیتوسیدرفورها بیش‌تر از ارقام روی-ناکاراست (۶۷، ۷۶). به‌نظر می‌رسد ارقام روی-کارا در شرایط تنش کمبود روی با افزایش ترشح فیتوسیدرفور سعی در جذب کم‌ترین روی موجود در خاک داشته و از آنجائی‌که این مواد بر ترکیبات آهن هم تأثیر دارند، موجب آزادسازی آهن، و جذب و انتقال آن به ریشه شده و در نهایت در شرایط کمبود روی غلظت آهن در ریشه گیاه بالا می‌رود.

از دیگر راه‌کارهای به‌کار گرفته شده در گیاه برای افزایش کارایی جذب عناصر، راه‌کار بیوشیمیایی است. در مطالعه‌ای که توسط چِن و همکاران (۲۱) بر روی گیاه کاملینا[4] انجام گردید مشاهده شد که کمبود آهن خاک منجر به افزایش روی ریشه و شاخساره در این گیاه می‌شود. در این گزارش علت افزایش غلظت روی در شرایط کمبود آهن، تحریک بیان ژن‌های کدکننده ناقل‌های آهن عنوان شد و اضافه گردید، از آنجائی‌که این ناقل‌ها علاوه بر آهن در جذب و انتقال دیگر فلزات سنگین هم‌چون روی نیز دخالت دارند، تحت شرایط کمبود آهن، تجمع روی در ریشه و شاخساره این گیاهان افزایش می‌یابد. ناقل‌های متعددی در جذب و انتقال آهن و روی به‌طور مشترک در گیاه درگیر هستند. از مهم‌ترین این ناقل‌ها، می‌توان به ناقل‌های ZIP که قادر به انتقال هر دو عنصر روی و آهن می‌باشند اشاره کرد (۹ و ۴۹).

علاوه بر این ناقل، مشخص شده است که نیکوتیانامین[5] که ناقل انتقال‌دهنده آهن در عرض آوند چوبی ریشه است قادر به انتقال روی، مس و منگنز نیز می‌باشد (۷۲). گزارش شده است، تعدادی از

1- Strategy I

2- Phytosiderophore

3- Mugineic acid (MA) family PS (2-deoxymugineic acid, 3-hydroxymugineic acid, and avenic acid)

4- *Commelina communis*

5- Nicotianamine

ناقل‌های اعضای خانواده YSL[1] در انتقال عناصری مانند روی، آهن، مس، منگنز و حتی نیکل در مسافت‌های طولانی درون گیاهی درگیر هستند (۹۱). این ناقل‌ها قادر به انتقال کمپلکس‌های فلز-نیکوتیانامین مانند منگنز-نیکوتیانامین و آهنII-نیکوتیانامین می‌باشند (۴۷). گمان می‌رود کاهش روی خاک منجر به تحریک بیان ژن‌های کدکننده ناقل‌های روی که در انتقال هر دو عنصر آهن و روی دخالت دارند می‌شود. لذا به‌نظر می‌رسد افزایش پروتئین‌های درگیر در انتقال این دو فلز به‌همراه کمبود روی خاک، منجر به افزایش آهن در ریشه گیاهان با کمبود روی می‌شود. با توجه به‌این‌که بیان این ژن‌ها در ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا است، به‌نظر می‌رسد در مطالعه حاضر افزایش بیان این ژن‌ها در شرایط کمبود روی یکی از عوامل افزایش عنصر آهن در ریشه و دانه ارقام روی-کارا باشد. در همین رابطه گزارش شده است که در شرایط کمبود روی غلظت آهن در ریشه ارقام روی-کارای گندم نان (۶۷) و جو (۵۲) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. طباطبائی و همکاران (۷۹) گزارش کردند که در شرایط کمبود آهن، گیاهان مختلف با آهن‌کارایی بیش‌تر، دارای غلظت روی بیش‌تری در ریشه خود هستند. ولی برخلاف یافته‌های مطالعه حاضر، بیگی و همکاران (۱۱) مشاهده کردند که در شرایط کمبود روی، غلظت آهن دانه رقم روی-کارای لوبیا چیتی نسبت به رقم روی-ناکارا به‌طور معنی‌داری کم‌تر بود.

غلظت مس

مقایسه میانگین نشان داد که در شرایط کمبود روی، غلظت مس در ریشه افزایش (جدول ۵) و در شاخساره و دانه به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) کاهش یافت (جداول ۴ و ۵). کاهش در غلظت روی شاخساره ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. دلیل افزایش غلظت مس ریشه، می‌تواند به علت رقابت دو عنصر در اشغال محل‌های جذب مشترک بر روی ریشه‌های مویین گیاه (۵۷) و یا رقابت آن‌ها برای انتقال توسط ناقل‌های یکسان (۸۲) باشد که این وضعیت می‌تواند منجر به کاهش دسترسی روی (و برعکس) برای گیاه گردد. در تأیید نتایج حاصل از مطالعه حاضر، افزایش غلظت مس در شرایط کمبود روی در ریشه گندم نان و جو (۵۲) و افزایش غیرمعنی‌دار آن در گیاهچه‌های سویا (۸۹) گزارش شده است.

نتایج مطالعات انجام یافته بر روی گیاهان مختلف از جمله گندم نان (۲۶، ۴۰، ۴۳، ۸۲ و ۹۰)، جو (۸۰ و ۸۱) و باقلای مصری[2] (۸۸) نشان می‌دهند که با افزایش روی محیط، غلظت مس در ریشه این گیاهان کاهش می‌یابد. ولی افزایش مس با افزایش روی محیط در ریشه گیاه دارویی بالنگوی شهری (۶) و در اواخر دوره رشدی گندم نان (۴۰) گزارش شده است. بااین‌حال، لیلای و همکاران (۵۰) نشان دادند که در شرایط کمبود روی غلظت مس در ریشه آرابیدوپسیس کاهش می‌یابد، هر چند این کاهش نسبت به شرایط روی کافی معنی‌دار نبود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر مبنی بر کاهش غلظت مس شاخساره در شرایط کمبود روی، می‌توان گفت که افزایش روی در خاک تا حد مقدار کافی باعث افزایش غلظت مس در شاخساره می‌شود. به‌نظر می‌رسد در شرایط روی کافی، در شاخساره گندم نان بین روی و مس برهم‌کنش منفی وجود ندارد. افزایش در مس شاخساره در شرایط روی کافی نسبت به شرایط کمبود روی در گندم نان (۴۳ و ۹۰)، برگ پرچم گندم نان (۲۸)، جو (۸۰ و ۸۱)، آرابیدوپسیس (۵۰) و گیاهان دارویی پونه (۷)، بالنگوی شهری (۶) و مرزه (۵) گزارش شده است. با این‌حال گزارشاتی هم وجود دارد که نشان می‌دهند با کاهش روی محیط، غلظت مس در شاخساره افزایش پیدا می‌کند. از آن‌جمله می‌توان به افزایش غلظت مس در شاخساره گندم نان (۲۶، ۴۰، ۴۸ و ۵۲)، جو (۵۲) و جوانه‌های سویا (۸۹) در شرایط کمبود روی اشاره کرد. همانند غلظت مس در شاخساره، غلظت مس در دانه نیز با کاهش روی خاک، کاهش یافت. عبدلی و همکاران (۱) نشان داند که محلول‌پاشی با سولفات روی به‌طور معنی‌داری افزایش غلظت مس دانه گندم نان را به‌دنبال دارد. کارِن و همکاران (۴۴) گزارش کردند که تفاوت معنی‌داری بین شرایط روی کافی و شرایط کمبود روی در غلظت مس دانه لوبیا مشاهده نشد، ولی افزایش روی خاک به بیش‌تر از حد نرمال، باعث افزایش غلظت مس در دانه این گیاه شد. با این‌حال بیگی و همکاران (۱۱)، افزایش غلظت مس با کاهش روی خاک را در دانه لوبیا چیتی گزارش کرده‌اند.

نتایج نشان داد، ارقام روی-کارا از غلظت مس ریشه بیش‌تری نسبت به ارقام روی-ناکارا برخوردار بودند. در شرایط کمبود روی هر چند غلظت مس در شاخساره در ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود، با این‌حال این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود. هم‌چنین غلظت مس دانه ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) کم‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۶). در شرایط روی کافی، غلظت مس در شاخساره ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود (جدول ۴). مطالعات انجام یافته نشان می‌دهند که در شرایط کمبود روی، غلظت مس ریشه ارقام روی-کارای گندم نان (۵۲، ۶۷) و جو (۵۲) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. مطالعات انجام یافته بر روی تیمارهای ۶۵ روزه گندم‌های نان و دوروم (۴۸)، گندم نان و جو (۵۲) و گندم نان (۶۷) نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر مبنی بر بیش‌تر بودن غیرمعنی‌دار

1- Yellow stripe-like
2- *Lupinus angustifolius* L.

غلظت مس شاخساره در ارقام روی-کارا در شرایط کمبود روی را تأیید می‌کنند. گزارش بیگی و همکاران (۱۱) در مورد کم بودن غلظت مس دانه در رقم روی-کارا نسبت به رقم روی-ناکارا در لوبیا چیتی، نتیجه مطالعه حاضر را در مورد کم بودن غلظت مس در دانه ارقام روی-کارا نسبت به ارقام روی-ناکارا تأیید می‌کند.

غلظت منگنز

کمبود روی خاک بر غلظت منگنز ریشه و شاخساره تأثیر منفی ($P\leq0.01$) داشت، درحالی‌که این کمبود باعث افزایش ($P\leq0.01$) غلظت منگنز دانه شد (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد در شرایط کمبود روی، مکانیسم کنترل هومئوستازی عناصر گندم نان، عوامل جذب عناصر کم‌مصرف را بیش‌تر بر جذب و انتقال روی، آهن و مس متمرکز می‌کند، به‌همین خاطر جذب و ذخیره منگنز در ریشه تحت تأثیر قرار گرفته و غلظت آن در این اندام کاهش می‌یابد. مطالعات انجام یافته در مورد غلظت منگنز در اندام‌های گیاهان در سطوح مختلف روی، غالباً محدود به کاربرد روی بوده و مطالعات در شرایط تنش کمبود روی به‌ندرت در منابع دیده می‌شود. در تأیید نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، کاهش غلظت منگنز در شرایط کمبود روی در ریشه گیاهچه‌های سویا گزارش شده است (۸۹). تحقیقات منتشر شده نشان می‌دهند که با افزایش روی محیط، غلظت منگنز ریشه در گندم نان (۴۳)، جو (۸۰ و ۸۱) نعناع (۶۲)، مرزه (۵) و بالنگوی شهری (۶) افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران (۹۰) کاهش غیرمعنی‌دار غلظت منگنز در ریشه گندم نان را در شرایط کمبود روی نسبت به شرایط با روی کافی گزارش کردند. با این‌حال گزارش شده است که افزایش روی محیط باعث کاهش غلظت منگنز در ریشه در اواخر دوره رشدی گندم (۴۰) و ذرت (۷۵) می‌شود. افزایش غلظت منگنز ریشه در شرایط کمبود روی در تیمارهای هفت روزه گندم نان (۲۶ و ۵۲)، جو (۵۲) و تیمارهای هشت هفته‌ای آرابیدوپسیس (۵۰) گزارش شده است.

همسو با نتایج حاصل از مطالعه حاضر در مورد کاهش غلظت منگنز شاخساره در شرایط کمبود روی خاک، در مطالعاتی که بر روی گندم نان (۲۶، ۴۳)، جو (۸۰) و گیاهان دارویی بالنگوی شهری (۶)، مرزه (۵) و پونه (۷) انجام شد، مشخص گردید که غلظت منگنز در شاخساره این گیاهان در شرایط کمبود روی، کاهش می‌یابد. با این‌وجود گزارشاتی هم وجود دارند که نشان می‌دهند در شرایط کمبود روی، غلظت منگنز در شاخساره گندم نان (۴۰، ۵۲ و ۶۷)، آرابیدوپسیس (۵۰)، جو (۵۲ و ۸۱) و نعناع (۶۲) افزایش می‌یابد. گزارش شده است که کاربرد روی تا حد مقدار کافی تأثیر معنی‌داری بر غلظت منگنز در برگ پرچم گندم نان (۲۸)، شاخساره گندم نان (۹۰)، ذرت (۴)، شاخساره گیاهچه‌های سویا (۸۹) ندارد. افزایش غلظت منگنز با کاهش روی محیط در دانه لوبیا چیتی (۱۱) و دانه گندم نان (۶۵) گزارش شده است. با این‌حال کارِن و همکاران (۴۴) نشان دادند که تفاوت معنی‌داری بین غلظت منگنز دانه در کاربرد مقادیر مختلف مصرف و هم‌چنین اعمال روش‌های متنوع استفاده از کود روی وجود ندارد. پهلوان راد و پسرکلی (۶۱) هم نشان دادند که محلول‌پاشی روی تأثیر معنی‌داری بر غلظت منگنز دانه در گندم نان ندارد. عبدلی و همکاران (۱) نشان دادند که محلول‌پاشی با سولفات روی سبب افزایش ۳۳/۲ درصدی منگنز دانه در گندم می‌شود.

درحالی‌که غلظت منگنز ریشه ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود، نتایج نشان داد غلظت منگنز شاخساره این ارقام کم‌تر ($P\leq0.01$) از ارقام روی-ناکارا است (جدول ۶). با این‌حال تفاوت معنی‌داری بین غلظت منگنز دانه ارقام روی-کارا و روی-ناکارا وجود نداشت (جدول ۳). در همین ارتباط رِنگِل و همکاران (۶۷) نشان دادند که در شرایط کمبود روی، غلظت منگنز ریشه در رقم روی-کارای گندم نان بیش‌تر از رقم روی-ناکارا بود. لُمبن و سینگ (۵۲) هم گزارش کردند، غلظت منگنز ریشه جو در رقم روی-کارا به‌طور غیرمعنی‌داری بیش‌تر از رقم روی-ناکارا بود. در تأیید نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر در مورد غلظت منگنز شاخساره ارقام، مطالعات لُمبن و سینگ (۵۲) نشان داد که تحت شرایط کمبود روی در جو و گندم نان، غلظت منگنز در شاخساره رقم روی-کارا کم‌تر از رقم روی-ناکارا بود. با این‌حال رِنگِل و همکاران (۶۷) گزارش کردند که در هر دو شرایط کمبود روی و روی کافی، تفاوت معنی‌داری بین غلظت منگنز شاخساره ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان وجود نداشت. برخلاف نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر، در لوبیا چیتی مشاهده شده است که در هر دو شرایط کمبود روی و روی کافی غلظت منگنز در دانه رقم روی-کارا کم‌تر از رقم روی-ناکارا بود (۱۱).

انتقال نسبی عناصر از ریشه به شاخساره

برای مقایسه توانایی انتقال عناصر کم‌مصرف از ریشه به شاخساره‌ی ارقام با روی‌کارایی متفاوت، برای هرکدام از آن‌ها درصد انتقال نسبی به شاخساره در هر دو شرایط کمبود روی و روی کافی و نسبت انتقال آن‌ها محاسبه گردید (جدول ۷). نتایج نشان داد، در شرایط کمبود روی، انتقال نسبی به شاخساره تمامی عناصر مورد مطالعه و هم‌چنین نسبت انتقال آن‌ها در ارقام روی-کارا کم‌تر از ارقام روی-ناکارا بود.

جدول ۳- تجزیه واریانس غلظت عناصر روی، آهن، مس و منگنز در ریشه، شاخساره و دانه میانگین دو رقم روی-کارا و دو رقم روی-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی

Table 3- Analysis of variance for Zn, Fe, Cu and Mn concentration of bread wheat Zn-eficient and -ineficient cultivars under Zn deficiency and Zn sufficient conditions

منابع تغییر (SOV)	df	میانگین مربعات (Mean of square)					
		روی ریشه (Root Zn)	روی شاخسار (Shoot Zn)	روی دانه (Grain Zn)	آهن ریشه (Root Fe)	آهن شاخساره (Shoot Fe)	آهن دانه (Grain Fe)
سطح روی (Zn level)	1	64775.56**	12445.98**	3464.40**	23659.87**	14786.93**	166.69**
روی‌کارایی رقم (Cultivar Zn efficiency)	1	654.01**	45.78	10.54**	970.56**	1021.39**	13.49**
سطح روی × روی‌کارایی رقم (Cultivar Zn efficiency × Zn level)	1	1.88	24.71	1.74*	2447.02**	84.22	0.41
خطا (Error)	8	23.70	4.92	0.22	49.28	6.42	0.55
ضریب تغییرات (C.V)		4.14	3.66	1.11	2.52	6.42	2.17

منابع تغییر (SOV)	df	میانگین مربعات (Mean of square)					
		مس ریشه (Shoot Cu)	مس شاخساره (Shoot Cu)	مس دانه (Shoot Cu)	منگنز ریشه (Shoot Mn)	منگنز شاخساره (Shoot Mn)	منگنز دانه (Shoot Mn)
سطح روی (Zn level)	1	64.40**	110.53**	12.11**	2878.66**	1236.98**	12.48**
روی‌کارایی رقم (Cultivar Zn efficiency)	1	1490.00**	95.71**	1.39**	1055.44**	1775.19**	0.26
سطح روی × روی‌کارایی رقم (Cultivar Zn efficiency × Zn level)	1	0.20	47.44**	0.09	20.38	2.19	0.004
خطا (Error)	8	1.86	0.97	0.02	23.40	41.94	0.57
ضریب تغییرات (C.V)		2.24	5.39	2.18	2.53	5.61	1.99

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and **: Significant at the 5 and 1% probability level, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین غلظت اثر سطح روی در روی‌کارایی رقم بر غلظت روی دانه، آهن ریشه و مس شاخساره (میلی‌گرم در کیلوگرم)

Table 4- Mean comparision for Cultivar Zn efficiency × Zn level on Zn concentrations (mg.kg^{-1}) of grain, Fe of root and Cu of shoot

		روی دانه (Grain Zn)	آهن ریشه (Root Fe)	مس شاخساره (Shoot Cu)
کمبود روی (Zn deficiency)	روی-کارا (Zn-efficient)	26.54^{b}	345.99^{a}	16.08^{b}
	روی-ناکارا (Zn-inefficient)	23.91^{c}	299.45^{b}	14.41^{b}
روی کافی (Zn sufficient)	روی-کارا (Zn-efficient)	59.77^{a}	228.63^{c}	26.13^{a}
	روی-ناکارا (Zn-inefficient)	58.65^{a}	239.20^{c}	16.50^{b}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف متفاوت می‌باشند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند.

کمبود روی: عدم کاربرد روی، روی کافی: کاربرد پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک، روی-کارا: میانگین دو رقم روی-کارای بیات و نیک‌نژاد، روی-ناکارا: میانگین دو رقم روی-ناکارای هیرمند و کرج ۱

Numbers followed by the same letters in each column show no significant difference based on Duncan's multiple range test at %1 probability level.
Zn deficiency: no application of Zn, Zn sufficient: application of 5 mg Zn per kg soil, Zn-efficient: mean of the Zn-efficient cultivars (Bayat and Niknejhad), Zn-inefficient: mean of the Zn-inefficient cultivars (Hirmand and Karaj1).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف روی بر غلظت روی، آهن، مس و منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم) ریشه، شاخساره و دانه ارقام گندم نان با روی‌کارایی متفاوت

Table 5- Mean comparison of different Zn levels on Zn, Fe, Cu and Mn concentrations (mg.kg^{-1}) of root, shoot and grain of bread wheat cultivars with different Zn efficiency

	روی ریشه (Root Zn)	روی شاخساره (Shoot Zn)	آهن شاخساره (Shoot Fe)	آهن دانه (Grain Fe)	مس ریشه (Root Cu)	مس دانه (Grain Cu)	منگنز ریشه (Root Mn)	منگنز شاخساره (Shoot Mn)	منگنز دانه (Grain Mn)
کمبود روی (Zn deficiency)	44.10^{b}	28.45^{b}	107.78^{b}	37.81^{a}	63.13^{a}	6.19^{b}	175.56^{b}	105.17^{b}	38.78^{a}
روی کافی (Zn sufficient)	191.04^{a}	92.86^{a}	177.98^{a}	30.35^{b}	58.49^{b}	8.20^{a}	206.53^{a}	125.48^{a}	36.47^{b}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف متفاوت می‌باشند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند.

کمبود روی: عدم کاربرد روی، روی کافی: کاربرد پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک

Numbers followed by the same letters in each coumn show no significant difference based on Duncan's multiple range test at %1 probability level.
Zn deficiency: no application of Zn, Zn sufficient: application of 5 mg Zn per kg soil

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر روی‌کارایی ارقام بر غلظت روی، آهن، مس و منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم) ریشه، شاخساره و دانه ارقام گندم نان با روی کارایی متفاوت

Table 6- Mean comparision of cultivars Zn efficiency on Zn, Fe, Cu and Mn concentrations (mg.kg^{-1}) of root, shoot and grain in bread wheat cultivars with different Zn efficiency

	روی ریشه (Root Zn)	آهن شاخساره (Shoot Fe)	آهن دانه (Grain Fe)	مس ریشه (Root Cu)	مس دانه (Grain Cu)	منگنز ریشه (Root Mn)	منگنز شاخساره (Shoot Mn)
روی-کارا (Zn-efficient)	124.95^{a}	133.66^{b}	35.14^{a}	71.96^{a}	6.85^{b}	200.42^{a}	103.16^{b}
روی-ناکارا (Zn-inefficient)	110.19^{b}	152.11^{a}	33.02^{b}	49.67^{b}	7.53^{a}	181.67^{b}	127.49^{a}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف متفاوت می‌باشند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند.

روی-کارا: میانگین دو رقم روی-کارای بیات و نیک‌نژاد، روی-ناکارا: میانگین دو رقم روی-ناکارای هیرمند و کرج ۱

Numbers followed by the same letters in each coumn show no significant difference based on Duncan's multiple range test at %1 probability level.
Zn-efficient: mean of the Zn-efficient cultivars (Bayat and Niknejhad), Zn-inefficient: mean of the Zn-inefficient cultivars (Hirmand and Karaj1).

جدول ۷- انتقال نسبی روی، آهن، مس و منگنز به شاخساره و نسبت انتقال آن‌ها در ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی

Table 7- Root to shoot translocation of Zn, Fe, Cu and Mn and their translocation ratios in bread wheat Zn-efficient and –inefficient cultivars under Zn deficiency and Zn sufficient conditions

	انتقال نسبی روی (%) Zn RST (%)		نسبت انتقال (%) ETR (%)	انتقال نسبی آهن (%) Fe RST (%)		نسبت انتقال (%) ETR (%)	انتقال نسبی مس (%) Cu RST (%)		نسبت انتقال (%) ETR (%)	انتقال نسبی منگنز (%) Mn RST (%)		نسبت انتقال (%) ETR (%)
	-Zn	+Zn		-Zn	+Zn		-Zn	+Zn		-Zn	+Zn	
روی-کارا (Zn-efficient)	53.85	45.18	119.19	29.69	71.99	41.24	21.69	37.45	57.92	50.17	52.60	95.38
روی-ناکارا (Zn-inefficient)	79.77	52.29	152.55	37.68	80.01	47.09	27.65	34.94	79.14	70.91	69.57	101.93

Zn-: کمبود روی (عدم کاربرد روی)، Zn+: روی کافی (کاربرد پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک)، روی-کارا: میانگین دو رقم روی-کارای بیات و نیک‌نژاد، روی-ناکارا: میانگین دو رقم روی-ناکارای هیرمند و کرج ۱.

RST: root to shoot translocation, ETR: element translocation ratio, -Zn: Zn deficiency (no application of Zn), +Zn: Zn sufficient (application of 5 mg Zn per kg soil), Zn-efficient: mean of the Zn-efficient cultivars (Bayat and Niknejhad), Zn-inefficient: mean of the Zn-inefficient cultivars (Hirmand and Karaj1).

به‌نظر می‌رسد در شرایط کمبود روی، ارقام روی-کارا مقدار کمی از این عناصر کم‌مصرف را ذخیره کرده و کسر قابل‌توجهی از این عناصر را در عناصر را صرف سوخت‌وساز و تولید ماده خشک می‌کنند، در عوض ارقام روی-ناکارا ترجیح می‌دهند، مقدار بیش‌تری از این عناصر را در

اندام‌های خود ذخیره کنند و یا احتمالاً توانایی استفاده از آن‌ها را در متابولیسم‌های جاری و یا در تولید بیوماس ندارند، موردی که از آن به‌عنوان توانایی بالا در "مصرف بهینه[1]" و یا "کارایی بهره‌برداری" که یکی از شاخص‌های اصلی تفکیک ارقام روی-کارا از ارقام روی-ناکارا به‌حساب می‌آید، یاد می‌شود (۱۷). روی‌کارایی به‌طورکلی به مقدار ماده خشک[2] تولید شده توسط گیاه در شرایط تنش کمبود روی نسبت به مقدار ماده خشک تولیدی در شرایط فراهمی روی اطلاق می‌شود (۱۰). در مطالعه‌ای که قبلاً بر روی همین ارقام انجام شد، مشاهده شد که مقدار ماده خشک تولید شده توسط ارقام روی-کارا به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا است (۵۹). در نتیجه با توجه به نتایج حاصله از مطالعه حاضر می‌توان گفت، ارقام روی-کارا نه‌تنها از مصرف بهینه بالایی در استفاده از عنصر روی برخوردارند، بلکه مصرف بهینه عناصر آهن، مس و منگنز نیز در این ارقام بیش‌تر از ارقام روی-ناکاراست، موضوعی که تاکنون در کم‌تر گزارشی به آن اشاره شده است.

در همین رابطه گراهام و همکاران (۳۰) معتقدند، برای این‌که یک گیاه روی-کارا باشد نه‌تنها بایستی دارای توانایی بالایی در جذب روی از خاک‌های با کمبود روی باشد، بلکه بایستی بتواند در همین شرایط، ماده خشک و عملکرد بیش‌تری نیز تولید کند. چنین به‌نظر می‌رسد، ارقام روی-کارا (ZE=۰/۹۳) در مقایسه با ارقام روی-ناکارا (ZE=۰/۸۱) از توانایی بیش‌تری در جذب روی توسط ریشه برخوردار بوده (جدول ۴) و علاوه بر آن قادر هستند مقدار بیش‌تری از روی جذب شده را صرف تولید و افزایش ماده خشک در شاخساره نمایند. لازم به ذکر است که عنصر روی از طرق مختلف هم‌چون شرکت مستقیم در ساختمان کلروفیل و افزایش کارایی فتوسنتز گیاه، دخالت در توانایی دانه گرده برای لقاح و تقسیم سلولی، دخالت در متابولیسم نیتروژن و افزایش جذب عنصر پتاسیم و ایفای نقش کلیدی در تنظیم روزنه‌ها، هم‌چنین ایفای نقش به‌عنوان کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌ها از طریق شرکت در بیوسنتز اسید آمینه تریپتوفان به‌عنوان پیش‌ماده سنتز اکسین موجب تحریک رشد گیاه شده و در نهایت افزایش شاخص‌های رشد (وزن تر و خشک گیاه) در گیاه می‌شود (۵۸). تحقیقات نشان می‌دهند توانایی بالای ژنوتیپ‌ها برای انتقال روی از ریشه به شاخساره و به‌کارگیری آن در شرایط کمبود روی در روی-کارایی ژنوتیپ‌های گندم نقش دارند (۱۴). بررسی‌ها نشان می‌دهند که روی به‌طور مداوم در داخل سیستم و بین اندام‌های گندم در حال انتقال است (۳۷)، لذا می‌توان گفت افزایش انتقال روی از ریشه به شاخساره و یا انتقال مجدد آن از اندام‌های مسن[3] برای استفاده در رشد اندام‌ها، تحت شرایط کمبود روی می‌تواند در روی‌کارایی گیاه نقش مهمی داشته باشد.

حاجی‌بُلاند و همکاران (۳۵) گزارش کردند که تحمل کمبود روی یک ژنوتیپ برنج روی-کارا، علاوه بر توانایی بالای جذب روی توسط ریشه، به توانایی آن برای انتقال مجدد روی از برگ‌های پیر و مسن به برگ‌های در حال رشد و در حال ظهور ارتباط دارد. با این‌حال مطالعات انجام یافته بر روی گندم این یافته را تأیید نکرده است (۲۵). گزارشات منتشر شده در مورد گندم (۶۷) و نخود (۴۵) نتایج حاصل از مطالعه حاضر را تأیید می‌کنند. در همین ارتباط چاکماک و همکاران (۱۷) نشان دادند که در شرایط کمبود روی، انتقال نسبی روی به شاخساره در تیمارهای ۱۲ روزه، در چاودار بیش‌تر از گندم نانِ با روی‌کارایی بالا و آن‌هم بیش‌تر از رقم روی-ناکارای گندم نان و در نهایت، همه بیش‌تر از گندم دوروم بود. با این‌حال اطلاعات زیادی در مورد انتقال روی و دیگر عناصر کم‌مصرف از ریشه به شاخساره و یا از شاخساره به دیگر اندام‌های گیاهی به‌ویژه در شرایط کمبود روی منتشر نشده است.

در مطالعه حاضر مشخص شد، غلظت بالای روی در ریشه یکی از خصوصیات ارقام روی‌کارا در گندم می‌تواند باشد (جدول ۶). با این‌وجود در شرایط کمبود روی، قدرت انتقال روی جذب شده به شاخساره در این ارقام بسیار کم‌تر از رقم روی-ناکارا بود. در این راستا چاکماک و همکاران (۱۷) معتقدند، ارقام روی-کارا علاوه بر برخورداری از غلظت روی ریشه در شرایط کمبود روی، دارای قدرت انتقال روی به شاخساره بیش‌تری نیز هستند. با توجه به این‌که نتایج ارائه شده توسط این محققان در شرایط محلول غذایی و در مدت بسیار محدود (۱۲ روز) به‌دست آمده، و با عنایت به این‌که، مطالعه حاضر در شرایط نسبتاً مشابه محیط رشد طبیعی گندم نان انجام یافته و نمونه‌گیری نیز در زمانی انجام گرفته که گندم نان فرصت کافی برای طی دوره رشدی خود داشته، به‌نظر می‌رسد نتایج ارائه شده در مطالعه جاری به واقعیت نزدیک‌تر بوده و لذا انتقال نسبی روی به شاخساره نمی‌تواند به‌عنوان شاخصی معتبر برای روی‌کارایی در گندم به‌کار رود.

هم‌چنین نتایج نشان داد که نسبت انتقال به شاخساره برای دو عنصر روی و منگنز در هر دو رقم به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر از عناصر آهن و مس بود، لذا می‌توان گفت در شرایط کمبود روی، گندم نان مقدار بیش‌تری از روی و منگنز جذب شده توسط ریشه را به شاخساره منتقل می‌کند، درحالی‌که انتقال عناصر آهن و مس در شرایط روی کافی بیش‌تر از شرایط کمبود روی انجام یافت.

1- Utilization efficiency
2- Biomass
3- Senescing

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، کاهش روی خاک موجب کاهش غلظت روی در هر سه اندام ریشه، شاخساره و دانه گندم شد. کاهش روی خاک باعث شد غلظت آهن و مس در ریشه افزایش و غلظت منگنز کاهش یابد. هم‌چنین با کاهش روی خاک، غلظت آهن، مس و منگنز در شاخساره کاهش یافت، درحالی‌که غلظت آهن و منگنز در دانه افزایش و غلظت مس کاهش پیدا کرد. غلظت روی، مس و منگنز، و در شرایط کمبود روی غلظت آهن ریشه ارقام روی-کارا بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. با این‌که تفاوت معنی‌داری بین غلظت روی، و در شرایط کمبود روی غلظت مس شاخساره ارقام وجود نداشت، ولی ارقام روی-کارا از غلظت آهن و منگنز شاخساره کم‌تری در مقایسه با ارقام روی-ناکارا برخوردار بودند. تفاوت معنی‌داری بین غلظت منگنز دانه ارقام مشاهده نشد، ولی غلظت آهن، و در شرایط کمبود روی، غلظت روی در دانه ارقام روی-کارا بیش‌تر و غلظت مس کم‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. با توجه به این‌که مطالعات مختلف در شرایط محیطی خاص خود انجام شده و هم‌چنین فرم‌ها و یون‌های عنصر روی مورد استفاده در مطالعات خاکی و محلول‌پاشی و هم‌چنین محلول‌های مورد استفاده در بررسی‌های آزمایشگاهی متفاوت از هم می‌باشند، این نتایجِ متفاوت و بعضاً متناقض دور از ذهن نیست. در مجموع می‌توان گفت، ارقام روی-کارای گندم نان نه‌تنها از قابلیت استفاده از عناصر کم‌مصرف بیش‌تری در اندام‌های خود سود می‌برند بلکه از غلظت عناصر کم‌مصرف روی، آهن و منگنز بیش‌تری در ریشه و دانه برخوردار هستند.

سپاسگزاری

از اساتید محترم دانشکده کشاورزی ارومیه، آقایان دکتر علی‌رضا پیرزاد و دکتر ابراهیم سپهر و مسئولین محترم آزمایشگاه خاک، آقایان مهندس ناصر بالنده و مهندس حجت صادقی که در اجرای طرح و تفسیر و تدوین نتایج صمیمانه همکاری نموده‌اند، تقدیر می‌شود.

منابع

1. Abdoli M., Esfandiari A., Mousavi S., Sadeghzadeh B., and Saeidi M. 2016. The effect of seed zinc internal content and foliar application of zinc sulfate on yield and storage compositions of wheat grain. Crop Physiology Journal 7(28): 91-106. (In Persian with English abstract)
2. Alloway B.J. 2004. Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association Communications. IZA publications, Brussels, Belgium.
3. Alloway B.J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. Second edition. International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association. Brussels, Belgium and Paris, France.
4. Aref F. 2012. Manganese, iron and copper contents in leaves of maize plants (*Zea mays* L.) grown with different boron and zinc micronutrients. African Journal of Biotechnology 11(4): 896-903.
5. Asgari-Lajayer H., Motesharezadeh B., Savaghebi G.R., and Hadiyan J. 2014. Effect of copper and zinc on concentration and uptake of micronutrient (Cu, Zn, Fe and Mn) and macronutrient (phosphorus) in savory at greenhouse conditions. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture-Isfahan University of Technology 5(3): 95-112. (In Persian with English abstract)
6. Asgari-Lajayer H., Motesharezadeh B., Savaghebi G.R., and Hadiyan J. 2015a. Effect of copper and zinc on growth characteristics, concentration of some mineral elements and translocation capacities of elements into infusion and decoction of dragon's head (*Lallemantia iberica* F. & CM) under greenhouse conditions. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture-Isfahan University of Technology 6(2): 145-161. (In Persian with English abstract)
7. Asgari-Lajayer H., Savaghebi F.G.R., Motesharezadeh B., and Hadiyan J. 2015b. Change in uptake of micronutrient and macronutrient in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) at greenhouse condition under copper and zinc application. Journal of Soil Management and Sustainable Production 5(2): 197-210. (In Persian with English abstract)
8. Baghban-Tabiat S., and Rasouli-Sadaghiani M.H. 2012. Investigation of Zn utilization and acquisition efficiency in different wheat genotypes at greenhouse conditions. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 3(10): 17-32. (In Persian with English abstract)
9. Barabasz A., Palusinska M., Papierniak A.M., Kendziorek M.E., Kozak K., Williams L.E., and Antosiewicz D.M. 2019. Functional analysis of *NtZIP4B* and Zn status-dependent expression pattern of tobacco *ZIP* genes. Frontiers in Plant Science 9: 1984.
10. Behl K.R., Osaki M., Wasaki J., Watanabe T., and Shinano T. 2003. Breeding wheat for zinc efficiency improvement in semi-arid climate. A review. Tropics 12(4): 295-312.
11. Beygi M., Savaghebi Gh., and Motesharezadeh B. 2012. Study of zinc efficiency in selected common bean cultivars. Journal of Water and Soil 26(1): 33-41. (In Persian with English abstract)
12. Biesalski H.K. 2013. Hidden hunger. In Hidden Hunger. Springer, Berlin, Heidelberg, 25-50.

13. Blasco, B., Navarro-León, E., and Ruiz, J. M. 2018. Oxidative Stress in Relation with Micronutrient Deficiency or Toxicity. p. 181-194. In Plant Micronutrient Use Efficiency. Academic Press.
14. Cakmak I., Sari N., Marschner H., Ekiz H., Kalayci M., Yilmaz A., Braun H.J. 1996a. Phytosiderophore release in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. Plant and Soil 180(2): 183-189.
15. Cakmak I., Yilmaz A., Kalayci M., Ekiz H., Torun B., Erenoglu B., and Brown H.J. 1996b. Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in central Anatolia. Plant and Soil 180(2): 165–172.
16. Cakmak I., Ekiz H., Yilamz A., Torun B., Kololi N., Gultekin I., Alkan A., Eker S. 1997. Differential response of rey, triticale, bread wheat and durum wheats to zinc deficiency in calcareous soils. Plant and Soil 188: 1-10
17. Cakmak I., Torun B., Erenoğlu B., Öztürk L., Marschner H., Kalayci M., Ekiz H., Yilmaz A. 1998. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. Euphytica 100(1-3): 349-57.
18. Cakmak I., Tolay I., Ozdemir A., Ozkan H., Ozturk L., Kling C.I. 1999. Differences in zinc efficiency among and within diploid, tetraploid and hexaploid wheats. Annals of Botany 84(2): 163-71.
19. Cakmak I., and Braun H.J. 2001. Genotypic variation for zinc efficiency, In Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio J.I., and McNab A. (ed.) Application of Physiology in Wheat Breeding. Mexico, D.F.: (No. CIS-3161 CIMMYT).
20. Cakmak I., Kutman U. 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. European Journal of Soil Science 69(1):172-180.
21. Chen Y., Shi J., Tian G., Zheng S., Lin Q. 2004. Fe deficiency induces Cu uptake and accumulation in *Commelina communis*. Plant Science 166(5): 1371-1377.
22. Chen W.R., Feng Y., and Chao Y.E. 2008. Genomic analysis and expression pattern of *OsZIP1*, *OsZIP3*, and *OsZIP4* in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different zinc efficiency. Russian Journal of Plant Physiology, 55(3): 400-409.
23. DalCorso G., Manara A., Piasentin S., and Furini A. 2014. Nutrient metal elements in plants. Metallomics 6(10): 1770-1788.
24. Erdal U., Turan M.A. and Taban S. 2003. Effect of zinc application on growth and nutrient concentrations of corn grown in soils with different characters. Ankara University Journal Agriculture Science 9: 334-339.
25. Erenoglu B., Nikolic M., Romheld V., and Cakmak I. 2002. Uptake and transport of foliar applied zinc (^{65}Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency. Plant and Soil 241(2) :251-257.
26. Evens N.P., Buchner P., Williams L.E., and Hawkesford M.J. 2017. The role of ZIP transporters and group F bZIP transcription factors in the Zn deficiency response of wheat (*Triticum aestivum* L.). The Plant Journal 92(2): 291-304.
27. Faran M., Farooq M., Rehman A., Nawaz A., Saleem M.K., Ali N., and Siddique K.H.M. 2019. High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress tolerance in wheat. Plant and Soil 437: 195–213.
28. Feiziasl V., and Valizadeh G.R. 2004. Effects of phosphorus and zinc fertilizer applications on nutrient concentrations in plant and grain yield in cv. Sardari (*Triticum aestivum* L.) under dryland conditions. Iranian Journal of Crop Sciences 6(3). (In Persian with English abstract)
29. Genc Y., McDonald G.K., and Graham R.D. 2006. Contribution of different mechanisms to zinc efficiency in bread wheat during early vegetative stage. Plant and Soil 281(1-2): 353-367.
30. Graham R.D., Ascher J.S., and Hynes S.C. 1992. Selecting Zn-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. Plant and Soil 146(1-2): 241-250.
31. Graham R.D., and Rengel Z. 1993. Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants. P. 107-118. In: Zinc in Soils and Plants. A.D. Robson (ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
32. Graham R.D., Welch R.M., Saunders D.A., Ortiz-Monasterio I., Bouis H.E., Bonierbale M., and Meisner C.A. 2007. Nutritious subsistence food systems. Advances in Agronomy 92: 1-74.
33. Grusak M.A., Pearson J.N., and Marentes E. 1999. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. Field Crops Research 60(1-2): 41-56.
34. Hacisalihoglu G., Hart J.J., Wang Y.H., Cakmak I., and Kochian L.V. 2003. Zinc efficiency is correlated with enhanced expression and activity of zinc-requiring enzymes in wheat. Plant Physiology 131(2): 595-602.
35. Hajiboland R., Singh B., and Romheld V. 2001. Retranslocation of Zn from leaves as important contributing factor for zinc efficiency of rice genotypes. p. 226–227. In Plant Nutrition – Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems (eds Horst, W. J. et al.), Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
36. Hansch R., and Mendel R.R. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). Current Opinion in Plant Biology 12(3): 259-266.
37. Haslett B.S., Reid R.J., and Rengel Z. 2001. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. Annals of Botany 87(3): 379–386.
38. Hotz C., and Brown K.H. 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutrition Bulletin, 25: 94–204.
39. Impa S.M., and Johnson-Beebout S.E. 2012. Mitigating zinc deficiency and achieving high grain Zn in rice through integration of soil chemistry and plant physiology research. Plant and Soil 361: 3–41.
40. Imtiaz M., Alloway B.J., Shah K.H., Siddiqui S.H., Memon M.Y., Aslam M., and Khan P. 2003. Zinc nutrition of

wheat II: interaction of zinc with other trace elements. Asian Journal of Plant Sciences 2(2): 156-160.
41. Kabata-Pendias A. 2001. Trace elements in soils and plants. p. 331. CRC press, New York.
42. Kambe T., Yamaguchi-Iwai Y., Sasaki R., and Nagao M. 2004. Overview of mammalian zinc transporters. Cellular and Molecular Life Sciences 61(1): 49-68.
43. Kanwal S., Bano A., and Malik R.N. 2016. Role of *Arbuscular mycorrhizal* fungi in phytoremediation of heavy metals and effects on growth and biochemical activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants in Zn contaminated soils. African Journal of Biotechnology 15(20): 872-883.
44. Karen A.C., Shana F., Kenneth F.G., and George L.H. 2005. Inheritance of seed zinc accumulation in navy bean. Crop Science 45: 864–870.
45. Khan H.R., McDonald G.K., and Rengel Z. 1998. Chickpea genotypes differ in their sensitivity to Zn deficiency. Plant and Soil 198: 11–18.
46. Khoshgoftarmanesh A.H., Sadrarhami A., Sharifi H.R., Afiuni D., and Schulin R. 2009. Selecting Zn-efficient wheat genotypes with high grain yield using a stress tolerance index. Agronomy Journal 101(6): 1409-1416.
47. Koike S., Inoue H., Mizuno D., Takahashi M., Nakanishi H., Mori S. et al. 2004. *OsYSL2* is a rice metal–nicotianamine transporter that is regulated by iron and expressed in the phloem. The Plant Journal 39(3): 415-424.
48. Koleli N., Eker S., and Cakmak I. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc deficient soil. Environmental Pollutions 131: 453-459.
49. Kozak K., Papierniak A., Barabasz A., Kendziorek M., Palusińska M., Williams L.E., and Antosiewicz D.M. 2019. *NtZIP11*, a new Zn transporter specifically upregulated in tobacco leaves by toxic Zn level. Environmental and Experimental Botany 157: 69-78.
50. Lilay G.H., Castro P.H., Campilho A., and Assunção A.G. 2019. The Arabidopsis *bZIP19* and *bZIP23* activity requires zinc deficiency insight on regulation from complementation lines. Frontiers in Plant Science 9: 1955.
51. Lindsary W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA soil test for Zn, Fe, Mn and Cu. Journal of American Soil Science 42(3): 421-428.
52. Lombn S.P., and Singh B.R. 2003. Varietal tolerance to zinc deficiency in wheat and barley grown in chelatorbuffered nutrient solution and its effect on uptake of Cu, Fe, and Mn. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166(1): 76-83.
53. Lonergan J.F., and Webb M.J. 1993. Interactions between Zn and other nutrients affecting the growth of plants. p. 151. In A.D. Robson (ed). Zinc in Soils and Plants. Kluwer Academic Publisher, Dordecht;
54. Mahmoodi S., Savaghebi G., Motesharezadeh B. 2014. Uptake and transport of micronutrients (iron, copper, zinc and manganese) in different cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under iron- deficient and non-deficient conditions in soil. Environmental Stresses in Crop Sciences 7(1): 105-117. (In Persian with English abstract)
55. Michael A., Grusak M.A., Pearson J.N., Marentes E. 1999. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. Field Crops Research 60: 41-56.
56. Moraghan J.T., and Grafton K.F. 2003. Plant zinc and the Zn efficiency trait in navy bean. Journal of Plant Nutrition 26(8): 1649-1663.
57. Mousavi S.R., Galavi M., Rezaei M. 2012. The interaction of zinc with other elements in plants: a review. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 4(24): 1881-1884.
58. Niazkhani S.M, Abdollahi Mandoulakani B., Jafari M., and Rasouli-Sadaghiani M. 2020. The effect of absorbable zinc deficiency on some physiological and morphological traits in bread wheat. Applied Soil Research 7(4): 99-100. (In Persian with English abstract)
59. Niazkhani S.M. 2019. Study the expression pattern of *ZIP* genes involved in Zn uptake under zinc deficiency conditions in bread wheat. Ph.D. Thesis Urmia University. (In Persian with English abstract)
60. Niazkhani S.M., Abdollahi Mandoulakani B., Jafari M., Rasouli-Sadaghiani M.H. 2018. Studying the expression of *ZIP1*, *ZIP3* and *ZIP6* genes in bread wheat under Zn deficiency conditions. Cereal Research 8(3):345-358. (In Persian with English abstract)
61. Pahlavan-Rad M.R., Pessarakli M. 2009. Response of wheat plants to zinc, iron, and manganese applications, uptake and concentration of zinc, iron, and manganese in wheat grains. Communications in Soil Science and Plant Analysis 40(7-8): 1322-32.
62. 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.
63. Pandey N., Gupta B., and Pathak G.C. 2012. Antioxidant responses of pea genotypes to zinc deficiency. Russian Journal of Plant Physiology 59(2): 198-205.
64. Rehman A., Farooq M., Ozturk L., Asif M., Siddique K.H. 2018. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. Plant and Soil 422: 283-315.
65. Rengel Z., and Graham R.D. 1995a. Importance of seed Zn content for wheat growth on Zn deficient soil. II. Grain yield. Plant and Soil 173: 267–274.
66. Rengel, Z., and Graham R.D. 1995b. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered

nutrient solution. Plant and Soil 176(2): 307-316.
67. Rengel Z., Romheld V., and Marschner H. 1998. Uptake of zinc and iron by wheat genocatypes differing in tolerance to zinc deficiency. Journal of Plant Physiology 142: 433-438.
68. Rengel Z., and Romheld V. 2000. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance of Zn deficiency. Plant and Soil 222: 25-34
69. Rengel Z. 2001. Genotypic differences in micronutrient use efficiency in crops. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32(7-8): 1163-1186.
70. Rengel Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 15(2): 397-409.
71. Sadeghzadeh B., Rengel Z., and Li C. 2009. Differential zinc efficiency of barley genotypes grown in soil and chelator-buffered nutrient solution. Journal of Plant Nutrition 32(10):1744-1767.
72. Scholz G., Seifert K., GruÈn M. 1987. The effect of nicotianamine on the uptake of Mn^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Rb and $(PO4)^{3-}$ by the tomato mutant chloronerva. Biochemistry and Physiology Pflanzen 182: 189-194.
73. Sharma P., Aggarwal P., and Kaur A. 2017. Biofortification: A new approach to eradicate hidden hunger. Food Reviews International 33(1): 1–21.
74. Shree P.S., and Westermann D.T. 2002. A single dominant gene controlling resistance to soil zinc deficiency in common bean. Crop Science 42: 1071-1074.
75. Singh B.R., and Steenberg K. 1974. Plant response to micronutrients. Plant and Soil, 40: 665-667.
76. Singh, B., Erenoglu, B., Neumann, G., Römheld, V. and von Wiren, N. 2002. Role of phytosiderophores in zinc efficiency of wheat. P. 52-60. In Eco-Physiology of Rhizosphere (ed. Merbach, W.).
77. Singh B., Natesan S.K.A., Singh B.K., and Usha K. 2005. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. Current Science 88(1): 36-44.
78. Sparks D.L. 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods, SSSA Book Ser. 5, Madison, WI, USA. 1390.
79. Tabatabaee S.S., Razazi A., Khoshgoftarmanesh A.H., Khodaeian N., Mehrabi Z., Asgari E., Fathian Sh., and Ramezanzadeh F. 2011. Effect of Fe deficiency on uptake, concentaration and translocation of Fe, Zn, Mn in some plants with different Fe efficiency in hydroponics culture. Journal of Water and Soil 25(4): 728-735. (In Persian with English abstract)
80. Tiong J., McDonald G.K., Genc Y., Pedas P., Hayes J.E., Toubia J., Langridge P., Huang C.Y. 2013. *HvZIP7* mediates zinc accumulation in barley (*Hordeum vulgare*) at moderately high zinc supply. New Phytologist 201(1): 131-143.
81. Tiong J., McDonald G., Genc Y., Shirley N., Langridge P., and Huang C.Y. 2015. Increased expression of six *ZIP* family genes by zinc (Zn) deficiency is associated with enhanced uptake and root-to-shoot translocation of Zn in barley (*Hordeum vulgare*). New Phytologist, 207(4): 1097-1109. (Supporting Information)
82. Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D., and Havline J.L. 1993. Soil fertility and fertilizers. p. 634. 5th eds. Mc Millan, pub. Co. New York.
83. Treeby M., Marschner H., and Romheld V. 1989. Mobilization of iron and other micronutrient cations from a calcareous soil by plantborne, microbial, and synthetic metal chelators. Plant and Soil 114: 217–226.
84. Tripathi D.K., Singh S., Singh S., Mishra S., Chauhan, D.K., and Dubey N.K. 2015. Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. Acta Physiologiae Plantarum 37(7): 139.
85. Ullah A., Farooq M., and Hussain M. 2019. Improving the productivity, profitability and grain quality of Kabuli chickpea with co-application of zinc and endophyte bacteria Enterobacter sp. MN17. Archives of Agronomy and Soil Science 1-16.
86. White P.J., and Pongrac P. 2017. 12 heavy-metal toxicity in plants. Plant Stress Physiology 2(5): 300.
87. Yoneyama T., Ishikawa S., and Fujimaki S. 2015. Route and regulation of zinc, cadmium, and iron transport in rice plants (*Oryza sativa* L.) during vegetative growth and grain filling: metal transporters, metal speciation, grain Cd reduction and Zn and Fe biofortification. International Journal of Molecular Sciences 16(8): 19111–19129.
88. Yu Q., and Rengel Z. 1991. Micronutrient deficiency influences plant growth and activities of superoxide dismutase in narrow-leafed lupines. Annals of Botany 83: 175-182.
89. Zeng H., Zhang X., Ding M., Zhang X., and Zhu Y. 2019. Transcriptome profiles of soybean leaves and roots in response to zinc deficiency. Physiologia Plantarum.
90. Zhao A.Q., Bao Q., Tian X.H., Lu X., and William J.G. 2011. Combined effect of iron and zinc on micronutrient levels in wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Environmental Biology 32(2): 235-239.
91. Zheng L., Fujii M., Yamaji N., Sasaki A., Yamane M., Sakurai I., Sato K., Ma J.F. 2011. Isolation and characterization of a barley yellow stripe-like gene, *HvYSL5*. Plant and Cell Physiology 52(5): 765-74.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 49-65

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۶۵-۴۹

Micronutrients Concentrations in Bread Wheat Cultivars with Different Zn-Efficiency under Zn Deficient and Zn Sufficient Conditions

M. Niazkhani[1]*- B. Abdollahi Mandoulakani[2]- M. Jafari[3]- M.H. Rasouli-Sadaghiani[4]

Received: 01-12-2019
Accepted: 08-07-2020

Introduction: The lack of micronutrients through a decrease in plant growth, which is related to human health, can be a global problem. Micronutrient deficiency reduces the immunological capacity of plant and animals by which they resist against several chronic diseases. This fact has been brought into sharp focus in the last decade because of a large proportion of people being deficient in micronutrients. The micronutrients such as zinc (Zn), iron (Fe), copper (Cu), and manganese (Mn) are more important than the others and therefore, they are essential to all living organisms. Zn deficiency is the most noticeable one since it has an influential effect on the production of agricultural products, and consequently, quality of people's life and health. One of the common methods to reduce The deleterious effects of Zn deficiency is using Zn-efficient cultivars. These cultivars have more biomass than Zn-inefficient cultivars. However, some strategies used by these cultivars for micronutrient supply could have a negative effect on the uptake process of the other micronutrients. Therefore, in the current study, an experimental approach was proposed to evaluate the effect of Zn deficiency on the concentrations of Zn, Cu, Fe, and Mn in the root, shoot, and grain of bread wheat cultivars with differential Zn efficiency. In addition, the capability of transferring the micronutrients from the root system to the shoot system was analyzed.

Materials and Methods: A greenhouse study was conducted using a factorial experiment based on completely randomized design (CRD) with three replications. The first factor was two levels of Zn-efficient (data represent the average for Bayat and Niknejhad) and Zn-inefficient (data represent the average for Hirmand and Karaj1) cultivars, and the second factor was two levels of Zn, including Zn deficiency (no application of Zn) and Zn sufficient (application of 5 mg Zn per kg soil). Soil samples passed through a 2 mm sieve and washed five times with double-distilled deionized water to remove soluble salt and organic matter. Soil samples were dried at room temperature (20-25 ^{o}C), and the necessary nutrients were added. Seeds were sown in polyethylene pots containing 4.5 kg of prepared soil after disinfection. To prevent nitrogen (N) deficiency, ammonium nitrate (NH_4NO_3) was applied to the treatments every 14 days. Daily irrigation was carried out using double-distilled deionized water to maintain field capacity. Sampling of root and shoot was performed at 30% of the heading stage and from the seeds after complete ripening. Finally, the concentration of Zn, Fe, Cu and Mn was measured in root, shoot and grain. The relative ability of Zn, Fe, Cu and Mn translocation from root to the shoot was calculated in the studied cultivars. Analysis of variance was performed using SAS software and comparison of means was done at 1% Duncan's multiple range test (DMRT).

Results and discussion: The results revealed that the concentrations of root Fe and Cu increased by 37.97% and 7.9%, respectively, under soil Zn deficiency. There was also an increase in Fe and Mn concentrations of the grain by 24.58% and 6.33%, respectively. Furthermore, the decrease of Zn in soil resulted in a reduction of Mn concentration in the root by 15%, Fe, Cu, and Mn concentrations in the shoot by 39.44, 28.5, and 16.19%, respectively. Under Zn deficiency condition, Cu concentration in grain (24.51%) decreased. Zn, Cu and Mn concentrations of roots (13.4, 44.88 and 10.32%, respectively) and Fe concentration of grain (6.42%) in Zn-efficient cultivars were higher compared to Zn-inefficient cultivars. In the case of Zn deficiency, Zn-efficient cultivars had a higher concentration of root Fe (18.55%) and grain Zn (11%) than those of the Zn-inefficient cultivars. Comparison of the relative translocation ability of micronutrients from root to shoot in the studied bread wheat cultivars showed that Zn-efficient cultivars had less ability to transfer Zn (53.85%), Fe (29.69%), Cu (21.69%) and Mn (50.17%) compared to Zn-inefficient cultivars (79.77%, 37.68%, 27.65% and 70.91% respectively) under soil Zn deficiency.

Conclusion: On average, the Zn-efficient cultivars of bread wheat contained higher concentrations of Zn, Fe,

1, 2 and 3- Ph.D. of Plant Breeding-Molecular Genetics, Professor and Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Mohsen.n114@gmail.com)
4- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
DOI: 10.22067/jsw.v35i1.84269

and Mn in root and grain. Moreover, the possibility of using micronutrients in their organs was higher compared to the Zn-inefficient cultivars. Zn-efficient cultivars also had less ability to transfer Zn, Fe, Cu and Mn from root to the shoot. The obtained results can be used for micronutrient biofortification and significant improvements of Zn content in wheat grain and to bring the improved varieties to the field.

Keywords: Micronutrients interactions, Microelements, Translocation ratio, Zinc, Zn-efficient