نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد هفدهم، شماره ۳(۶۷)، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۳۵۰-۳۳۳

مقاله پژوهشی DOI:

پاسخ ارقام مختلف گندم دوروم به تنش کمبود روی در خاک آهکی با استفاده از برخی پارامترهای فیزیولوژیک

صدیقه حاجی‌حسینلو[1*]، عزت‌اله اسفندیاری[2]، اسماعیل کریمی[3] و لونت اوزتورک[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۵

چکیده

با توجه به اهمیت تنوع ژنتیکی در برنامه‌های اصلاحی، پژوهش حاضر با مطالعه ۲۸ رقم گندم دوروم با هدف شناسایی پاسخ رفتاری آنها به کمبود روی در خاک آهکی، به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای مورد مطالعه شامل ارقام گندم دوروم و کاربرد خاکی روی بود. بوته‌های گندم ۴۵ تا ۶۰ روز در شرایط کنترل‌شده نگهداری و در نهایت کف‌بر شده و پارامترهای مورد نظر مطالعه گردید. در شرایط کمبود روی کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های PGS و Cheheldaneh و در شرایط کافی بودن آن به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های Celcuklu و Cheheldaneh حاصل شد. کمترین غلظت روی در شرایط کمبود روی به ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ و بالاترین مقدار به ژنوتیپ Ozbec و در شرایط کاربرد روی کمترین و بیشترین غلظت روی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های Durbel و Mirzabey اندازه‌گیری شد. از طرفی، در شرایط کافی بودن روی، ارقام Amonos و Durbel به‌طور مشترک کمترین و ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ بیشترین محتوای روی را داشتند. بیشترین علایم کمبود روی در ژنوتیپ Durbel و کمترین علایم در ژنوتیپ Dena ظاهر شد. در شرایط کمبود روی ارقام Zenit و Cakmak و در شرایط کاربرد روی ارقام Mirzabey و Kunduru به‌ترتیب بیشترین و کمترین کارآیی مصرف روی را نشان دادند. از نظر علایم ظاهری، میزان ماده خشک اندام‌های هوایی، کارآیی روی، محتوا و غلظت روی تنوع بالایی مشاهده شد. همچنین، محتوا و غلظت روی در اندام‌های هوایی ارقام متحمل مانند Dena و Cheheldaneh الزاماً بیشتر از ارقام حساس مانند Uzbek، Amonous و Aydin در هر دو شرایط کمبود روی و کافی بودن آن نیست و ممکن است در ارقام مقاوم میزان و محتوای روی در اندام‌های هوایی کمتر از ارقام حساس باشد. در بین پارامترهای مورد بررسی علایم ظاهری، میزان ماده خشک اندام‌های هوایی و کارآیی روی، پارامترهای مناسب‌تری بوده و ارزیابی براساس نتایج هر سه پارامتر توصیه می‌گردد. به عبارت دیگر، ژنوتیپ‌هایی که میزان کارآیی روی و میزان ماده خشک بیشتر ولی علایم ظاهری کمتری در شرایط کمبود روی دارند مانند Dena متحمل به کمبود روی می‌باشند.

واژگان کلیدی: غلظت روی، کارایی روی، گندم، ماده خشک بوته.

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی و علوم طبیعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه سابانچی، استانبول، ترکیه

نگارنده مسئول hajihoseinlou.s@gmail.com

مقدمه

روی عنصری ضروری و کم‌مصرف برای گیاهان می‌باشد که نقش‌های فیزیولوژیک متعددی تاکنون برای آن گزارش شده که می‌توان به نقش کوفاکتوری برای آنزیم‌هایی مانند کربنیک آنهیدراز، دهیدروژنازها، پروتئینازها و کربوکسی پپتیدازها و فسفاتازها اشاره نمود. همچنین، حضور این عنصر برای ساختن بیومولکول‌ها مانند RNA و DNA، هورمون اکسین و برخی از اسیدهای آمینه نظیر سیستئین، هیستیدین، اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک لازم می‌باشد (Passerini *et al.*, 2007; Shu *et al.*, 2008). روی در ساختار آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز حضور داشته و از مهم‌ترین آنزیم‌ها در مقابله با بروز تنش اکسیداتیو هستند و به‌ترتیب نقش جمع‌آوری رادیکال سوپراکسید و پراکسید هیدروژن را بر عهده دارند (Hemantaranjan, 2009; Esfandiari *et al.*, 2018).

کمبود روی از عوامل محدودکننده کشت و تولید غلات نظیر گندم در اراضی زراعی کشور بوده و بیش از ۶۰ درصد زمین‌های زراعی ایران با کمبود روی قابل دسترس مواجه هستند (Malakouti, 2007). pH بالا و آهکی بودن خاک به‌همراه بی‌کربناته بودن آب آبیاری و مصرف بیش از نیاز کودهای فسفاته بخشی از دلایل پایین بودن روی قابل جذب در خاک‌های زراعی است (Khoshgoftar-manesh, 2007). وجود مقادیر بالای بی‌کربنات در خاک‌های آهکی سبب ترکیب این ماده با روی شده و با تبدیل نمودن آن به $ZnCO_3$، روی میزان قابلیت دسترسی به‌صورت زیستی را کاهش می‌دهد (Khoshgoftar-manesh, 2007). امروزه برای مقابله با کمبود روی و ممانعت از اثرات منفی کمبود آن بر رشد و نمو گیاهان از روش‌های به‌زراعی همچون بذرمال یا پیش‌تیمار کردن بذور، محلول‌پاشی، کاربرد خاکی روی و یا ترکیب آنها استفاده می‌شود (Cakmak, 2002 and 2008). روش‌های یاد شده علی‌رغم تمامی اثرات مثبت روشی پایدار نبوده و در صورت توقف عملیات مورد اشاره، کاهش بارندگی یا کمبود آب، محدودیت‌های فیزیولوژیک ناشی از کمبود روی مجدداً پدیدار خواهد شد (Cakmak, 2002). با توجه به معایب ذکر شده در خصوص روش به‌زراعی و رفع محدودیت‌های یاد شده، امروزه روش به‌نژادی غنی‌سازی زیستی در راستای مقابله با کمبود عناصر کم‌مصرف مانند روی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Cakmak, 2008).

گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. ssp. Durum, AABB, 4X=2, 2n=28) رایج‌ترین فرم کشت شده از گندم آلوتتراپلوئید می‌باشد که حدود ۸ درصد زمین‌های زیر کشت گندم را به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2016). منشاء گندم دوروم نواحی مدیترانه بوده و برای تولید پاستا و سمولینا مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ren *et al.*, 2013). گندم نسبت به یولاف، چاودار و جو به کمبود روی حساسیت بیشتری دارد. در بین گونه‌های مختلف گندم، گندم دوروم نسبت به سایر گونه‌ها به کمبود این عنصر حساس‌تر است که ناشی از توانایی تولید فیتوسیدروفر کمتر در گندم‌های دورم نسبت به گندم‌های نان می‌باشد (Esfandiari and Abdoli, 2017). با این وجود، تنوع ژنتیکی در گندم دوروم و نان برای ویژگی‌هایی مانند بروز علایم ظاهری، توانایی رشد گیاه، ماده خشک تولیدی و کارآیی روی در پاسخ به کمبود روی گزارش شده است (Genc *et al.*, 2002; Genc and McDonald,

2004 and 2008; Narwal *et al.*, 2012; Vanitha *et al.*, 2016; Esfandiari *et al.*, 2018; Abdoli *et al.*, 2019). همچنین، تورن و همکاران (Torun *et al.*, 2000)، اردال و همکاران (Erdal *et al.*, 2003) و ناروال و همکاران (Narwal *et al.*, 2012) به‌ترتیب با بررسی ۱۶۴، ۲۰ و ۱۴ ژنوتیپ گندم نان وجود تنوع ژنتیکی از نظر تحمل به کمبود روی را گزارش کرده‌اند. وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های گونه‌های مختلف گندم در پاسخ به کمبود روی سبب امیدواری محققین به اصلاح و دست‌یابی به ارقام سازگار به کمبود روی با برنامه‌های اصلاحی شده است.

از دلایل تنوع ژنتیکی در ژنوتیپ‌ها و ارقام گندم می‌توان به توانایی ریشه‌ها در ترشح فیتوسیدروفور، جذب، انتقال و جابجایی روی از ریشه به اندام‌های هوایی و اختصاص روی در دسترس به فرآیندها و مسیرهای متابولیسمی ضروری اشاره نمود. به‌طوری‌که حاجی‌صالح‌اوغلو و کوچیان (Hacisalihoglu and Kochian, 2003) در ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به روی گزارش کردند که ژنوتیپ‌های متحمل قادر هستند روی را به آنزیم‌های موثر در متابولیسم سلول مانند کربونیک آنهیدراز یا آنزیم‌های دفاعی نظیر سوپراکسید دیسموتاز اختصاص دهند (Hajiboland *et al.*, 2011; Rasouli-Sadaghiani *et al.*, 2011).

با توجه به کمبود روی در بخش وسیعی از اراضی زیرکشت گندم، نقش روی در ویگور اولیه گیاهچه و اثر مثبت این ویژگی بر عملکرد گندم به‌همراه محدودیت‌های اجرای روش به‌زراعی و اهمیت این محصول در تغذیه مردم کشور، بیانگر ضرورت دست‌یابی به ارقام یا ژنوتیپ‌های سازگار به کمبود روی است. لذا هدف از این مطالعه معرفی بهترین ژنوتیپ گندم دوروم از بین ۲۸ ژنوتیپ مختلف از نظر پاسخ به کمبود روی در خاک آهکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی الگوی رفتاری تعدادی از ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم از نظر حساسیت یا مقاومت به کمبود روی در خاک آهکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شرایط کنترل‌شده به مرحله اجرا درآمد. تیمارهای مورد ارزیابی شامل ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم، تهیه شده از موسسه تحقیقات دیم کشور، (جدول ۱) و سطوح قابل دسترس روی (عدم کاربرد روی (شاهد) و افزودن روی به خاک، پنج میلی‌گرم سولفات روی بر کیلوگرم) بود.

جهت آماده‌سازی خاک آهکی تهیه شده از شهرستان هشترود، ابتدا خاک هوا خشک و الک گردید تا یکنواخت گردد. سپس، بر اساس نتایج آزمایش انجام شده، عناصر نیتروژن از منبع نیترات کلسیم (۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، فسفات و پتاسیم از منبع پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) به خاک اضافه شدند. همچنین، برخی از عناصر مورد نیاز گیاه شامل آهن، مس و منگنز تا رسیدن به آستانه نیاز گندم و بر اساس نتایج آزمون خاک، به خاک در حال آماده‌سازی اضافه گردید. در ادامه خاک تهیه شده به دو بخش تقسیم و به نیمی از آن روی با مقدار یاد شده اضافه و به نیم دیگر اضافه نگردید که به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

خاک آماده‌سازی شده به گلدان‌های ۳/۵ کیلویی منتقل گردید و در هر گلدان ۱۴ بذر از ژنوتیپ‌ها و یا ارقام گندم دوروم در عمق ۳ تا ۴

سانتی‌متری قرار گرفت. برای ممانعت از ایجاد خطا و ورود عنصر روی از طریق آب، آبیاری گلدان‌ها در تمامی طول دوره رشد با آب دیونیزه انجام شد. بعد از جوانه‌زنی و استقرار کامل گیاهچه‌ها (حدود ۳-۲ هفته بعد از کشت) گلدان‌ها تنک شده و در هر یک، ۷ گیاهچه نگهداری و تا انتهای آزمایش این تراکم بوته حفظ گردید. پس از گذشت ۴۵ تا ۶۰ روز از زمان کاشت، بوته‌های گندم از سطح خاک کف‌بر شده و پس از خشک شدن برای ارزیابی پارامترها مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای عناصر موجود در بافت گیاهی، ابتدا بخش مورد نظر توسط آب مقطر به‌خوبی شسته شد و پس از خشک کردن در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، آسیاب شده و ۰/۵ گرم از آنها در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ الی ۷ ساعت در کوره الکتریکی قرار گرفت تا خاکستر تهیه گردید. نمونه خاکستر در ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال حل شده و به مدت ۳۰ دقیقه روی هات‌پلات در دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفت. سپس، نمونه‌ها از کاغذ صافی عبور داده شده و با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. میزان روی در نمونه‌های صاف شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل AA-6300 Shimadzu,) قرائت شد (Maralian *et al.*, 2008).

پارامترهای مورد ارزیابی شامل علایم ظاهری، وزن خشک اندام‌های هوایی (میلی‌گرم بر بوته)، کارآیی روی (مقدار ماده خشک تولید شده در شرایط کمبود روی به میزان ماده خشک تولید شده در شرایط کافی بودن روی (درصد))، غلظت روی (میلی‌گرم روی بر کیلوگرم ماده خشک)، محتوای عنصر روی در گیاهچه (میکروگرم روی در تک بوته) و کارآیی مصرف روی (مقدار ماده خشک تولید شده به ازای مقدار روی جذب شده) مورد ارزیابی قرار گرفت.

بروز علایم ظاهری ناشی از کمبود عنصر روی به‌صورت کمی و با دادن اعداد بین یک تا نه ثبت و به‌صورت زیر مشخص گردید. یک: بوته‌های سبز و سالم، ۲: کاهش رشد اندام‌های هوایی بوته، ۳: ظهور نواحی کلروزه در اولین برگ، ۴: پراکنش نواحی کلروزه در اولین برگ، ۵: نواحی کلروزه شده بزرگ در اولین برگ، ۶: از بین رفتن و شکستن از میانه برگ، ۷: گسترش نواحی کلروزه به برگ‌های دوم، ۸: زرد شدگی برگ‌های اول و دوم و ۹: از بین رفتن نقطه رشد.

داده‌های صفات مورد بررسی در نرم‌افزار Excel وارد شده و برای آنالیز داده‌ها و کلاستر بندی ژنوتیپ‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کاربرد سولفات روی و ژنوتیپ، بر صفات وزن خشک اندام‌های هوایی، غلظت و محتوای روی و کارآیی استفاده از روی در بوته‌های گندم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). اثر متقابل کاربرد روی در ژنوتیپ به‌غیر از وزن خشک بوته برای سایر پارامترهای مورد مطالعه، غلظت و محتوای روی، علایم ظاهری و کارآیی مصرف روی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳).

وزن خشک اندام‌های هوایی

نتایج نشان داد که تنوع خوبی بین ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم بررسی شده در این

پژوهش از نظر وزن خشک اندام‌های هوایی در شرایط کمبود و کافی بودن روی وجود دارد (شکل ۱). در شرایط کمبود روی کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به‌ترتیب در ژنوتیپ-های PGS و Cheheldaneh با مقادیر بین ۴۰/۰±۳/۰۸ تا ۹۴/۰ ±۲/۶۹ میلی‌گرم بر بوته متغیر بود. درحالی‌که در شرایط کافی بودن روی قابل دسترس در خاک کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های Celcuklu و Cheheldaneh با مقادیر بین ۵۲/۵±۰/۹۲ تا ۱۰۶/۶۱۱±۱۳/۵۵ میلی‌گرم بر بوته متغیر بود (شکل ۱).

روی به دلیل نقش‌های متابولیسمی متعدد، مانند متابولیسم کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها، که برعهده دارد، در بذور در حال جوانه‌زنی فرآیندهای متابولیسمی را بهبود داده و با کاهش تنفس نگهداری و افزایش تنفس سنتزی منجر به ایجاد شرایطی می‌گردد که بخش بیشتری از اندوخته بذر به ساختار گیاهچه تبدیل گردد. برآیند این عمل افزایش ویگور گیاهچه و میزان ماده خشک تولید شده در بوته است. به‌طوری‌که عبدلی و همکاران (Abdoli *et al.*, 2019) گزارش کردند که بذور با مقادیر بالاتر غلظت و محتوای روی، بوته‌های قوی‌تری را در مقایسه با شاهد به-وجود می‌آورند. با توجه به اینکه در این پژوهش هدف، بررسی تنوع ارقام و ژنوتیپ‌های گندم مورد بررسی به کمبود روی می‌باشد، لازم بود که اثرات محیطی اثرگذار بر میزان ماده خشک اندام‌های هوایی، غلظت و محتوای روی بذور، حذف شوند و تفاوت موجود بین آنها صرفا ناشی از اختلاف ژنتیکی باشد. براین اساس بین غلظت و محتوای روی در بذرها با ماده خشک اندام‌های هوایی آزمون همبستگی محاسبه شد که به‌ترتیب $r_{=}159^{ns}$ و $r_{=}251^{ns}$ به‌دست آمد. نتایج حاصل حاکی از عدم معنی‌داری ارتباط غلظت و محتوای روی بذر بر وزن خشک اندام‌های هوایی می‌باشد. به‌عبارت دیگر، محتوا و غلظت روی بذر بر میزان ماده خشک اندام‌های هوایی و کارآیی روی به-دست آمده اثرگذار نبوده و اختلاف بین ژنوتیپ‌ها ناشی از عوامل ژنتیکی است.

عدم تامین روی مورد نیاز گیاه همانند خشکی، شوری و بقیه تنش‌های محیطی تولید ماده خشک را کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر عدم دسترسی به مواد ضروری مورد نیاز برای انجام فرآیندهای متابولیسمی به‌میزان کافی، نوعی تنش محیطی به‌شمار می‌آید (Esfandiari *et al.*, 2018). گیاهان طی فرآیند فتوسنتز، انرژی و پتانسیل هیـدروژن لازم برای تثبیت و احیای دی‌اکسید کربن به تریـوز فسفات‌ها را به‌دست می‌آوردند. متابولیت‌های حاصل به سایر بیومولکول‌های تشکیل دهنده ساختار گیاه تبدیل شده و در نهایت منجر به ایجـاد وزن خشک اندام‌های هوایی می‌گردند (Esfandiari and Mahboob, 2014). بر این اساس برخی از محققین نظیر اسفندیاری و جوادی (Esfandiari and Javadi, 2014) و مونز و تستر (Munns and Tester, 2008) معتقد هستند که میزان ماده خشک تولید شده نشان‌دهنده نحوه انجام فرآیندهای متابولیسمی نسبت به شرایط محیطی بوده و می‌توان از آن برای ارزیابی پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی بهره برد. به‌عبارتی دیگر، ژنوتیپ‌هایی که بتوانند در خاک‌هایی که با مشکل کمبود روی قابل جذب مواجه هستند، ماده خشک بیشتری تولید نمایند به کمبود روی متحمل‌تر می‌باشند. لذا، در این راستا عبدلی و اسفندیاری (Abdoli and Esfandiari, 2017)

معتقد هستند که سنجش میزان ماده خشک اندام‌های هوایی در شرایط کافی بودن روی قابل دسترس و کمبود آن، برای ارزیابی پاسخ گیاه به کمبود روی و میزان تحمل آنها مهم می‌باشد. وجود تنوع بین ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم از نظر میزان ماده خشک اندام‌های هوایی توسط اسفندیاری و همکاران (Esfandiari *et al.*, 2018) و عبدلی و همکاران (Abdoli *et al.*, 2019) در خاک آهکی گزارش شده است. همچنین، تورن و همکاران (Torun *et al.*, 2000)، اردال و همکاران (Erdal *et al.*, 2003) و ناروال و همکاران (Narwal *et al.*, 2012) به‌ترتیب با بررسی ۱۶۴، ۲۰ و ۱۴ ژنوتیپ گندم نان وجود تنوع ژنتیکی از نظر تحمل به کمبود روی را گزارش کرده‌اند.

پاسخ ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم مورد مطالعه را می‌توان به دو دسته مجزا تقسیم‌بندی کرد. دسته اول را می‌توان ژنوتیپ(ها)ی کودپذیر اطلاق نمود. در این دسته در اثر افزودن روی به خاک، ویگور بوته‌های حاصل و میزان ماده خشک اندام‌های هوایی نسبت به شاهد افزایش می‌یابد. ارقام Durbel و Aminbey از این دسته هستند که به‌ترتیب در شرایط کافی بودن و کمبود روی ماده خشک اندام‌های هوایی برای Durbel، ۴۴ و ۶۸ میلی‌گرم بر بوته و برای Aminbey، ۴۲ و ۶۳ میلی‌گرم بر بوته بود (شکل ۲).

در دسته دوم ژنوتیپ‌هایی جای می‌گیرند که افزودن روی به خاک بر میزان ماده خشک اندام‌های هوایی تاثیری نداشته و در هر دو شرایط کافی بودن و کمبود روی، ویگور و میزان ماده خشک تولید شده آنها تقریباً یکسان می‌باشد. به این دسته می‌توان ژنوتیپ‌های کودناپذیر گفت. ارقام Ceylan، Balcali و Cheheldaneh از این دسته هستند که به‌ترتیب در شرایط کافی بودن و کمبود روی ماده خشک اندام‌های هوایی برای ژنوتیپ Ceylan، ۷۹ و ۸۴ میلی‌گرم بر بوته، برای Balcali، ۷۵ و ۸۲ میلی‌گرم بر بوته و برای ژنوتیپ Cheheldaneh، ۹۴ و ۱۰۶ میلی‌گرم بر بوته بود (شکل ۲).

ویگور بوته و میزان ماده خشک تولید شده بیانگر عملکرد متابولیسمی گیاه می‌باشد. به‌عبارتی هرچه میزان ویژگی‌های یاد شده در شرایط تنش-های محیطی بیشتر بوده و به شرایط عادی و مطلوب محیطی نزدیک‌تر باشد، می‌توان آن را به تنش مورد نظر متحمل‌تر دانست. در این مطالعه اگرچه برخی از ارقام مانند Balcali و Cheheldaneh میزان ماده خشک نسبتاً یکسانی در شرایط شاهد و کافی بودن روی تولید کردند و هر دو را براساس این پارامتر می‌توان به‌نوعی متحمل به کمبود روی دانست اما، میزان ماده خشک اندام‌های هوایی ژنوتیپ چهل‌دانه در شرایط کمبود یا کافی بودن روی به‌ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد بیشتر از ژنوتیپ Balcali است (شکل-های ۱ و ۲). با در نظر گرفتن فرآیندهای متابولیسمی گیاه، نقش ویگور بوته در عملکرد نهایی و تحمل به تنش‌های محیطی، علی‌رغم اینکه هر دو رقم قادر هستند در کمبود روی هم ماده خشک تقریباً برابری با شرایط مطلوب تولید نمایند، ولی Cheheldaneh به سایر ارقام که در این دسته قرار می‌گیرند برتری دارد. از دلایل برتری برخی از ارقام کودپذیر به سایر ارقام این دسته و یا برتری آنها نسبت به ژنوتیپ‌های کود ناپذیر می‌توان به برخورداری آنها از ویژگی‌های خاص ژنتیکی نظیر توانایی ترشح فیتوسیدروفور از ریشه (Esfandiari and Abdoli, 2017) و یا اختصاص روی موجود در سلول به فرآیندهای

حیاتی گیاه مانند آنزیم کربنیک آنهیدراز و یا مکانیسم‌های دفاعی اشاره کرد.

کارآیی روی

نسبت وزن خشک اندام‌های هوایی در شرایط کمبود روی به وزن خشک اندام‌های هوایی در شرایط کافی بودن روی را کارآیی روی می‌گویند. محققین معتقدند که هرچه ماده خشک تولید شده در شرایط کمبود روی بیشتر باشد و به شرایط مطلوب و عدم کمبود این عنصر نزدیک‌تر باشد آن رقم کارآمدتر است. همچنین، از این پارامتر برای بررسی وجود تنوع بین ژنوتیپ‌های یک رقم یا گیاهان مختلف استفاده می‌گردد (Esfandiari *et al.*, 2018). کارآیی روی در ارقام و ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بین ۶۴/۷ تا ۱۰۹/۲۳ درصد متغیر بود که بیانگر وجود تنوع بین ژنوتیپ‌ها و ارقام مورد بررسی در این پژوهش است (شکل ۱). وجود تنوع در کارآیی روی در گندم دوروم بیانگر امکان استفاده از پتانسیل ژنتیکی موجود برای توسعه کارآیی روی و مقابله با کمبود این عنصر در خاک‌های آهکی است که در گندم دوروم توسط اسفندیاری و همکاران (Esfandiari *et al.*, 2018) و عبدلی و همکاران (Abdoli *et al.*, 2019) و در گندم نان توسط رسولی صدقیانی و همکاران (Rasouli-Sadaghiani *et al.*, 2011) و خوش‌گفتارمنش (Khoshgoftar-manesh, 2007) گزارش شده است.

اگرچه بالا بودن شاخص کارآیی روی به‌نوعی بیانگر متحمل بودن گیاه به کمبود روی است اما تصمیم‌گیری درخصوص متحمل یا حساس بودن ژنوتیپ‌ها بر پایه این شاخص بدون خطا نیست. به‌عبارت دیگر، ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ دارای کارآیی روی بالایی در مقایسه با رقم Cheheldaneh است ولی میزان ماده خشک تولید شده و ویگور بوته حاصل برای این ژنوتیپ کمتر از Cheheldaneh می‌باشد (شکل ۱). با توجه به اینکه ویگور اولیه گیاهچه اثر مثبتی بر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه دارد، انتظار می‌رود طبیعتاً ژنوتیپی که گیاهچه‌های قوی‌تری تولید می‌کند در مقایسه با ژنوتیپ دیگر، از توانایی مناسب‌تری برای اجرای فرآیندهای حیاتی متابولیسم برخوردار باشد و بر ژنوتیپ دیگر ارجحیت دارد. شایان ذکر است که بین محتوای روی با وزن خشک گیاهچه‌ها ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد (r=۲۵۹). این بدین معنی است که گیاهچه‌هایی با بیوماس بیشتر، توانایی انباشت روی زیادی را در خود دارند که احتمالاً به خاطر قابلیت توسعه بیشتر ریشه در گیاهچه‌های بزرگ‌تر و در نتیجه توانایی جذب و انباشت بیشتر عنصر روی در این گیاهچه‌ها می‌باشد و مقدار روی گیاهچه‌ها ارتباطی با میزان روی بذر ندارد.

غلظت و محتوای روی اندام‌های هوایی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزودن روی به خاک سبب افزایش غلظت روی در اندام‌های هوایی در مقایسه با شاهد شد (جدول ۴). در این بین کمترین میزان غلظت روی (۳/۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط کمبود روی به ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ و بالاترین مقدار نیز (۱۲/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به ژنوتیپ Ozbec تعلق داشت. همچنین، در شرایط افزودن روی به خاک، کمترین (۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بیشترین (۵۰/۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) غلظت روی به ترتیب به ژنوتیپ‌های Durbel و Mirzabey تعلق داشت (جدول ۴). غلظت روی بوته‌ها در اثر کاربرد خاکی سولفات روی از ۶/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط کمبود روی به ۳۳/۱ میلی‌گرم بر

کیلوگرم در شرایط کافی بودن روی رسید که حاکی از افزایش بیش از ۵ برابری است (جدول ۴).

نتایج حاصل نشان داد که محتوای روی اندام‌های هوایی در اثر افزودن روی به خاک در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ با ۰/۰۰۲ میکروگرم بر بوته کمترین محتوای روی و رقم Ozbec به‌ترتیب با ۰/۰۰۷۹ میکروگرم بر بوته بیشترین محتوای روی را در شرایط کمبود روی دارا بودند (جدول ۴). از طرفی، در شرایط کافی بودن روی، ارقام Amonos و Durbel به‌طور مشترک با ۰/۰۱ میکروگرم بر بوته کمترین محتوای روی و ژنوتیپ ۴۵۴۳۰ با ۰/۰۹۲ میکروگرم بر بوته بیشترین محتوای روی را داشتند (جدول ۴). همچنین، محتوای روی بوته‌ها در اثر کاربرد خاکی سولفات روی از ۰/۰۰۴ میکروگرم بر بوته در شرایط کمبود روی به ۰/۰۲۴ میکروگرم بر بوته در شرایط کافی بودن روی رسید که حاکی از افزایش حدود ۶ برابری آن می‌باشد (جدول ۴).

با افزودن روی به خاک و در پی آن افزایش میزان روی قابل دسترس در خاک، انتظار می‌رفت که بوته‌های گندم بتوانند روی بیشتری را جذب نموده و با انتقال آن به اندام‌های هوایی، غلظت و محتوای این عنصر در بخش‌های هوایی ارقام و ژنوتیپ‌های مورد مطالعه افزایش یابد (جدول ۴). افزایش غلظت و محتوای روی در گونه‌های مختلف توسط محققین دیگر نظیر اسفندیاری و همکاران (Esfandiari *et al.*, 2018)، عبدلی و همکاران (Abdoli and Esfandiari, 2017) و مشیری و همکاران (Moshiri *et al.*, 2010) و در گندم دوروم توسط اسفندیاری و عبدلی (Esfandiari and Abdoli, 2017) در گیاهچه‌های گندم دوروم و نان گزارش شده است.

غلظت و محتوای روی به‌ترتیب نشانگر میزان روی تجمع یافته در یک کیلوگرم وزن خشک گیاه و تک بوته می‌باشد. طبق انتظار افزودن روی به خاک سبب افزایش غلظت و محتوای روی در اندام‌های هوایی شد (جدول ۴) که در نتیجه آن افزایش غلظت و محتوای روی و افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی را می‌توان متصور بود. در این راستا بیگی و همکاران (Beygi *et al.*, 2012) ارتباط مستقیم بین غلظت و جذب روی با تولید ماده خشک و ایجاد گیاهچه‌های قوی‌تر را گزارش کرده‌اند. لذا به استناد موارد ذکر شده انتظار می‌رود که ارقامی که غلظت و محتوای روی بالاتری دارند از مقادیر وزن خشک بیشتری نیز برخوردار بوده و بوته‌های قوی‌تری داشته باشند. بدین منظور غلظت روی و وزن خشک اندام‌های هوایی برخی از ارقام مورد مطالعه که دارای بیشترین و کمترین وزن خشک در شرایط کاربرد روی و بدون کاربرد روی بود بررسی گردیده است. در شرایط کمبود روی، وزن خشک ارقام چهل‌دانه، Dena، Ceylan، Celculdu، Aminbey، PGS و Cakmak به‌ترتیب ۹۴، ۸۰، ۷۹، ۴۲، ۴۲، ۴۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر بوته بود. همچنین، در شرایط کافی بودن روی وزن خشک اندام‌های هوایی ارقام چهل‌دانه، Diarbekir، Ceylan، Celculdu، Amonos، Saji و Fuatbey به‌ترتیب ۱۰۶، ۸۴، ۸۴، ۶۲، ۵۶ و ۵۶ میلی‌گرم بر بوته بود. طبق انتظار رقم چهل‌دانه باید بیشترین غلظت روی و ارقام Cakmak و Saji کمترین میزان روی را در شرایط کافی بودن و عدم کافی بودن روی داشته باشند. اما بررسی نتایج غلظت روی نشان می‌دهد که در شرایط

کمبود روی ارقام Celculdu، Fuatbey، Saji و Amonos که ماده خشک کمتری نسبت به چهل دانه دارند از غلظت روی بیشتری برخوردار هستند (شکل ۲). همچنین، در شرایط کافی بودن روی نیز رقمی مانند Celculdu که در حدود یک دوم چهل‌دانه وزن خشک اندام هوایی دارد (شکل ۲) دارای مقدار روی بالاتری می‌باشد (جدول ۴). به عبارتی دیگر، با اضافه نمودن روی به خاک و افزایش فرم قابل جذب این عنصر، روی توسط ریشه ژنوتیپ‌ها جذب و به اندام‌های هوایی انتقال می‌یابد که افزایش غلظت و محتوای روی نشان دهنده آن است (جدول ۴). اما افزایش شاخص‌های یاد شده الزاماً به مفهوم بکارگیری روی در فرآیندهای متابولیسمی و بهبود فرآیندهای آن نیست. به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی قادر هستند مقادیر کم این عنصر را به بخش‌های کلیدی متابولیسم نظیر آنزیم کربنیک آنهیدراز یا آنزیم‌های دخیل در مکانیسم‌های دفاعی همچون سوپراکسید دیسموتاز اختصاص دهد که برآیند آن بهبود عملکرد متابولیسمی و افزایش ماده خشک اندام‌های هوایی است. در مطالعات صورت گرفته توسط حاجی‌صالح‌اوغلو و همکاران (Hacisalihoglu *et al*., 2004) نیز عدم تفاوت از نظر غلظت و محتوای روی بین ارقام با کارایی روی بالا و متحمل گزارش شده است. این محققین پراکنش روی در بخش‌های مختلف سلول نظیر غشاها، آپوپلاست، واکوئل و دیواره سلولی را ارزیابی و گزارش نمودند که میزان روی در بخش‌های مختلف در ارقام با کارآیی روی بالا و پایین باهم تفاوتی ندارند. آنها نشان دادند که در شرایط کمبود روی فعالیت آنزیم‌هایی مانند کربنیک آنهیدراز و Cu/Zn-SOD در رقم با کارآیی روی پایین کاهش می‌یابد ولی کمبود روی بر فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز (به‌عنوان آنزیمی که روی هیچ نقشی را در ساختار و عملکرد آن ندارد) تاثیری نداشت. در مقابل در ارقام با کارآیی روی بالا، فعالیت آنزیم‌های کربنیک آنهیدراز و Cu/Zn-SOD به‌همراه آنزیم نیترات ردوکتاز در شرایط کمبود روی در مقایسه با شرایط کافی بودن روی تغییری نداشت. این محققین معتقد هستند 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 برخوردار می‌باشند.

کارآیی مصرف روی

مقدار ماده خشک تولید شده به ازای هر میلی‌گرم روی را کارآیی مصرف روی می‌گویند. نتایج نشان داد که بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر کارآیی مصرف روی تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد (جدول ۴). به‌طوری‌که در شرایط کمبود روی ژنوتیپ‌های Zenit و Cakmak به‌ترتیب با ۲۵۶ و ۲۳/۴۷ درصد بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر را دارا بودند. درحالیکه در شرایط کافی بودن روی ژنوتیپ‌های Mirzabey و Kunduru با ۲۲۵/۱ و ۱۸/۴۷ درصد به‌ترتیب بیشترین و کمترین کارآیی مصرف روی را نشان دادند. به‌طورکلی، ژنوتیپ Zenit بالاترین کارآیی مصرف روی را در بین ارقام گندم دوروم نشان داد و ژنوتیپ‌های Saji و Kunduru کمترین کارآیی مصرف را در شرایط

کمبود و کافی بودن روی داشتند (جدول ۴). همچنین، کارآیی استفاده از روی در اثر کاربرد سولفات روی در گیاهچه‌های ارقام و ژنوتیپ‌های گندم کاهش یافت و از ۱۱۰ به ۸۹/۳۵ میلی‌گرم ماده خشک بر میکروگرم روی رسید (جدول ۴) که ناشی از افزایش غلظت یا محتوای روی گیاهچه است. به‌عبارت دیگر، در شرایط کمبود روی ژنوتیپ‌های گندم از مقدار کمتر روی برخوردار هستند و قادر هستند که به ازای هر واحد روی دریافتی ماده خشک بیشتری تولید نمایند. اما با دریافت روی بیشتر، میزان ماده خشک تولید شده مطابق با مقدار دریافتی آن افزایش نمی‌یابد و برآیند این عمل سبب افت کارایی روی در شرایط کافی بودن روی می‌گردد. کاهش کارآیی مصرف روی با افزودن روی به خاک و وجود تنوع بین ژنوتیپ‌های گندم از نظر این پارامتر توسط محققین متعددی نیز گزارش شده است (Genc *et al.*, 2002; Genc and McDonald, 2004 and 2008; Narwal *et al.*, 2012). لازم به‌ذکر است که بین ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان از نظر توانایی جذب و مصرف عناصر غذایی تفاوت‌هایی وجود دارد که برای محققین ابهام ایجاد می‌کند. کارآیی مصرف روی به‌طور همزمان ویژگی‌های مرتبط با جذب و مصرف عناصر را در گیاهان نشان می‌دهد و برخی از تضادهای موجود بین ارتباط فاکتورها مانند غلظت روی با ماده خشک تولید شده را رفع می‌نماید (Sepehr *et al.*, 2009).

علایم ظاهری

در این پژوهش بیشترین و کمترین علایم ظاهری به کمبود روی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های Durbel و Dena مشاهده شد. بروز علایم ظاهری در نتیجه اختلال در عملکرد متابولیسمی گیاه در پی کمبود روی می‌باشد که در گزینش ارقام یا ژنوتیپ‌های گندم به این تنش محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد و استفاده از این پارامتر به همراه مقدار ماده خشک اندام‌های هوایی و کارآیی روی، کمک قابل توجهی به کاهش خطا در گزینش صحیح‌تر خواهد نمود. بین ارقام گندم مورد بررسی از نظر علایم ظاهری تنوع بالایی وجود داشت. اگر مبنای تحمل یا حساسیت به کمبود روی پارامترهای وزن خشک اندام‌های هوایی و کارآیی روی باشد ژنوتیپ‌هایی مانند Balcali، Akcakale-2000، Firat-93، Ceylan، Ackala، 45430، Amonos و Ozbec را می‌توان به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی دانست (شکل ۴). زیرا ژنوتیپ‌های ذکر شده در هر دو شرایط کمبود و کافی بودن روی ماده خشک بالاتری تولید کرده و کارآیی روی نزدیک به صد درصد را دارند. برای سنجش میزان ماده خشک اندام‌های هوایی و محاسبه کارآیی روی، صرف‌نظر از علایم و آسیب‌های ناشی از کمبود روی، تمام اجزای گیاه برداشت می‌شود. درحالی که کاهش رشد اندام‌های هوایی بوته ناشی از افت عملکرد چرخه کالوین، کلروزه و نکروزه شدن برگ‌ها، نشان دهنده عدم عملکرد مطلوب مکانیسم‌های دفاعی گیاه و آسیب‌های ناشی از وقوع تنش اکسیداتیو در حساسیت آنها به کمبود روی است (Esfandiari *et al.*, 2018). در ژنوتیپ‌های یاد شده میزان علایم ظاهری براساس کدبندی انجام شده بیش از عدد ۴ بوده و زردشدگی برگی در آنها مشاهده شده است. به عبارت دیگر، هرگاه انرژی و پتانسیل هیدروژن تولید شده در واکنش‌های نوری فتوسنتز توسط چرخه کالوین مصرف نشود، باید مازاد آنها از طریق چرخه‌های گلوتاتیون-آسکوربات، مهلر و

گزانتوفیل به هدر داده شده تا از تولید عوامل آسیب‌رسان مانند انواع اکسیژن فعال ممانعت گردد (شکل ۳). پایین بودن علایم ظاهری در شرایط کمبود روی حاکی از اختصاص روی جذب شده توسط گیاه به نقاط کلیدی مانند آنزیم کربنیک آنهیدراز یا سوپراکسید دیسموتاز می‌باشد. برآیند این عوامل سبب می‌شود تا ژنوتیپ مورد نظر با کنترل تولید انواع اکسیژن فعال یا جمع‌آوری آنها، از بروز تنش اکسیداتیو و شدید بودن علایم کمبود روی پیشگیری نموده و به تنش محیطی مقاوم‌تر باشد. اما در این مطالعه ژنوتیپ‌های یاد شده با وجود کارآیی روی بالا و میزان ماده خشک تولید شده مناسب، در شرایط کمبود روی به آن متحمل نیستند که بیانگر عدم توانایی مکانیسم‌های دفاعی ژنوتیپ‌ها در جمع‌آوری انواع اکسیژن فعال و کنترل بروز تنش اکسیداتیو می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

اگرچه گندم دوروم به کمبود روی بیش از سایر گونه‌های گندم حساس‌تر است اما، نتایج این پژوهش حاکی از وجود تنوع بین ژنوتیپ‌های دوروم در پاسخ به کمبود روی می‌باشد. نتایج به دست آمده در مورد پارامترهای وزن خشک اندام‌های هوایی (در شرایط کمبود روی کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های PGS و Cheheldaneh با مقادیر بین ۴۰/۰±۳/۰۸ تا ۲/۶۹± ۹۴/۰ میلی‌گرم بر بوته و در شرایط کافی بودن روی کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های Celcuklu و Cheheldaneh با مقادیر بین ۵۲/۵±۰/۹۲ تا ۱۰۶/۶۱۱±۱۳/۵۵ میلی‌گرم بر بوته)، کارایی روی (بین ۶۴/۷ تا ۱۰۹/۲۳ درصد) و علایم ظاهری (بین ۱ تا ۹ به‌ترتیب در Dena و Durbel) گویای این تنوع می‌باشد. همچنین، فاکتورهای مورد سنجش هر یک اطلاعاتی را در مورد ویژگی‌های ارقام یا ژنوتیپ‌ها نشان می‌دهد. در بین پارامترهای مورد سنجش برای گزینش ژنوتیپ‌ها به کمبود روی، علایم ظاهری، میزان ماده خشک اندام‌های هوایی و کارآیی روی، پارامترهای مناسب‌تری بوده و ارزیابی براساس نتایج هر سه پارامتر توصیه می‌گردد. به‌عبارت دیگر، ژنوتیپ‌هایی که از میزان کارآیی روی و مقدار ماده خشک بالاتری برخوردارند ولی علایم ظاهری کمتری در شرایط کمبود روی دارند نظیر رقم Dena، متحمل به کمبود روی و برعکس آن Durbel حساس به کمبود روی می‌باشند.

جدول ۱- اسامی ارقام و ژنوتیپ‌های گندم دوروم مورد مطالعه در این پژوهش

Table 1- The names of durum wheat cultivars and genotypes studied in this investigation

	رقم Variety	نوع گندم Wheat type	توصیف Description
1	DiyarBakir-81	Durum	Turkish variety
2	Gediz-75 (CIM. SBP-ICWIP)	Durum	Turkish variety
3	Svevo	Durum	Turkish variety
4	Zenit	Durum	Turkish variety
5	Amonos-97	Durum	Turkish variety
6	Fuatbey-2000	Durum	Turkish variety
7	Balcali-2000	Durum	Turkish variety
8	Ceylan-95	Durum	Turkish variety
9	Firat-93	Durum	Turkish variety
10	Aydin-93	Durum	Turkish variety
11	Ozbec	Durum	Turkish variety
12	Artuklu	Durum	Turkish variety
13	Akcakale-2000	Durum	Turkish variety
14	Ege-88	Durum	Turkish variety
15	Dena	Durum	Local variety for cold
16	45430	Durum	Turkish variety
17	Saji	Durum	Iranian released variety for moderate cold condition
18	Cheheldaneh	Durum	Local variety for cold
19	Kunduru	Durum	Turkish variety
20	PGS	Durum	ICARAD material
21	Kumbet-2000	Durum	Turkish variety
22	Selcuklu-97	Durum	Turkish variety
23	Altintoprak-98	Durum	Turkish variety
24	Mirzabey-2000	Durum	Turkish variety
25	Cakmak-79	Durum	Turkish variety
26	Imren	Durum	Turkish variety
27	Aminbey	Durum	Turkish variety
28	Durbel	Durum	Turkish variety

جدول ۲- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک آهکی تهیه شده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 2- Some physical and chemical properties of calcareous soil provided from the depth of 0 to 30 centimeters

هدایت الکتریکی dS/m	اسیدیته pH	ماده آلی Organic matter (%)	مقدار آهک Calcareous content (%)	منگنز قابل جذب Absorbable manganese	آهن قابل جذب Absorbable iron	مس قابل جذب Absorbable copper	روی قابل جذب Absorbable zinc	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus	نیتروژن قابل جذب Total nitrogen	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture
				(mg/kg)						(%)				
0.49	6.8	0.5	39	1.29	2.39	0.5	0.41	102.2	8.4	0.1	47.6	35.2	12.7	Loam

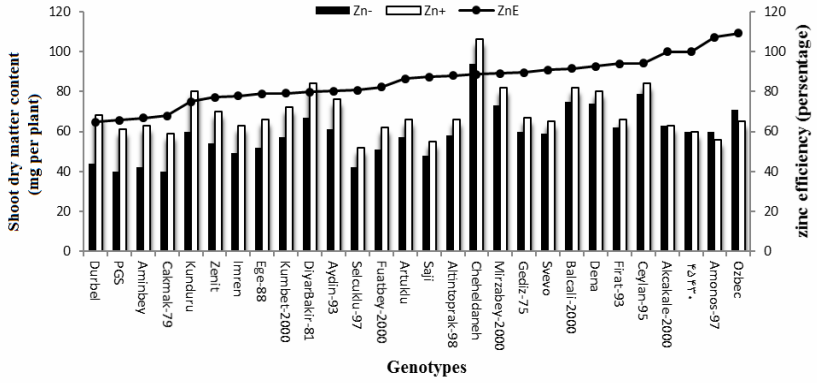
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کاربرد سولفات روی و ژنوتیپ‌های گندم دوروم و اثرات متقابل آن‌ها بر پارامترهای مورد مطالعه

Table 3- Variance analysis of effect of zinc sulphate application and durum wheat genotypes and their interactions on studied parameters

منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares				
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	غلظت روی Zinc concentration	مقدار روی Zinc content	علایم کمبود روی Zinc deficiency symptoms	کارآیی مصرف روی Zinc use efficiency
بلوک Block	2	0.02 ^{ns}	9.883 ^{ns}	5.328 ^{ns}	0.052 ^{ns}	7.039
ژنوتیپ Genotype	27	0.12**	205.562**	141.556**	10.078**	117.61**
کاربرد روی Zinc application	2	0.217**	15420.061**	5182.121**	45.254**	192.514**
ژنوتیپ* روی Genotype*Zinc	54	0.006 ^{ns}	125.395**	61.379**	2.382**	38.287**
خطا Error	166	0.01	16.161	11.1	1.244	9.492
ضریب تغییرات C.V. (%)		15.58	23.47	30.94	25.42	43.21

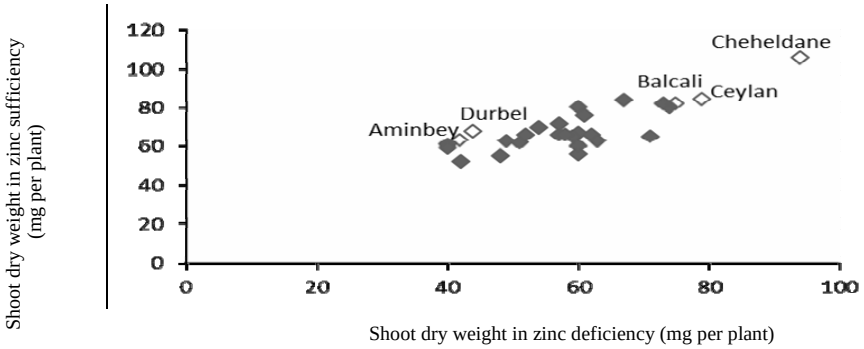
ns , * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns , * and ** are insignificant, and significant in probabilities of five and one percent, respectively



شکل۱- اثر متقابل کاربرد سولفات روی در ژنوتیپ بر وزن خشک قسمت هوایی و کارآیی روی ارقام گندم دوروم

Figure 1- The interaction of zinc sulphate and genotype on shoot dry weight and zinc efficiency of durum wheat cultivars



شکل ۲- ارتباط بین وزن خشک بوته‌های گندم در شرایط کمبود و کافی بودن روی در ژنوتیپ‌ها و ارقام گندم دوروم

Figure 2- The relationship between wheat shoot dry weight in zinc deficiency and sufficiency in durum wheat genotypes and cultivars

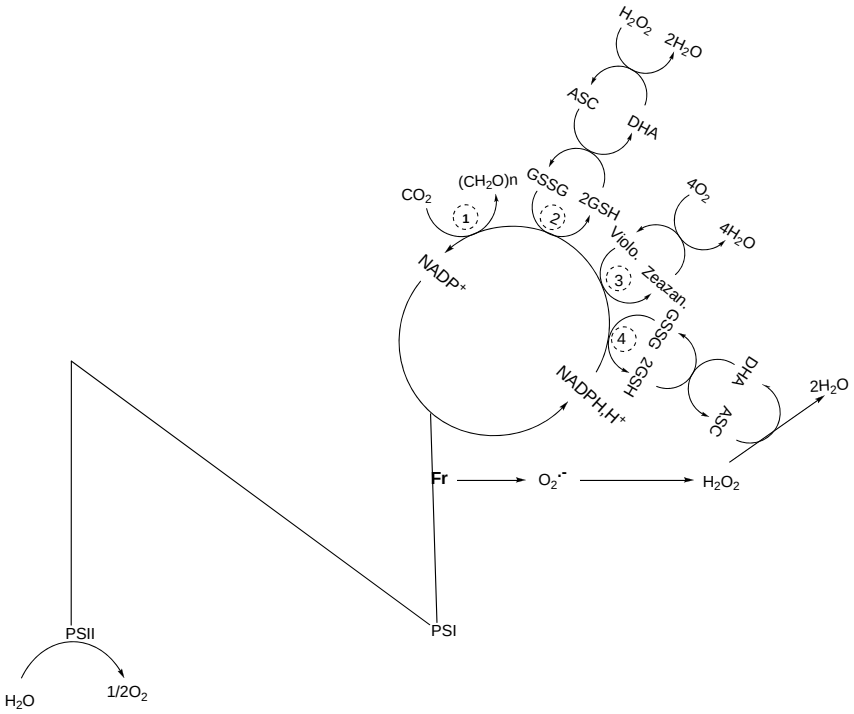
جدول ۴- اثر کاربرد سولفات روی و ژنوتیپ بر غلظت و محتوای روی و کارآیی استفاده از روی در بخش هوایی بوته‌های ارقام و ژنوتیپ‌های گندم

Table 4- Effect of zinc sulphate application and genotype on zinc concentration and content and zinc use efficiency in wheat shoot cultivars and genotypes

	غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration ($mg.kg^{-1}$)			مقدار روی اندام هوایی Shoot zinc content ($\mu g.plant^{-1}$)			کارآیی مصرف روی Zinc use efficiency (٪)		
ژنوتیپ Genotype	Zn-	Zn+	Mean	Zn-	Zn+	Mean	Zn-	Zn+	Mean
Diarbakir	5.61 (0.1)	43.13 (2.8)	24.36 bc	0.004	0.028	0.0116d-f	27	24.31	25.65 g
Gediz-15	5.5 (0.14)	26.63 (1.1)	16.06 f-h	0.003	0.018	0.01 g	59	46	52.5 e-f
Sevevo	5.96 (0)	32.61 (0)	19.28 ef	0.003	0.019	0.025 c	59.15	45.55	52.35 e-f
Zenit	6.05 (0)	20.05 (1.39)	15.77 gh	0.004	0.013	0.008 c-f	256	202	233.5 a
Amonos	6.5 (0)	17 (2.94)	11.75 i-k	0.003	0.01	0.006 i	63.68	55.46	59.57 e-f
Fuatbey	4.63 (0.26)	21.61(2)	13.12 hi	0.003	0.011	0.007 g-i	219	151	185 ab
Balcali	7.1 (0.54)	41.81 (1.83)	24.45 cd	0.0058	0.031	0.018 d	24.40	38.74	39.35 ef
Ceylan	5.84 (0.1)	35.11 (0.53)	20.47 de	0.005	0.027	0.016 d-f	87.85	86.13	87.24 e
Firat	6.55 (0)	40.99 (1.67)	23.77 cd	0.0045	0.025	0.014 fg	49.98	48.17	49.07 e-f
Aydin	4.5 (0.33)	43.88 (2.22)	24.19 a-c	0.003	0.026	0.014 fg	146.3	128	137.15 d
Ozbec	12.4 (1.12)	42.77 (2)	27.58 bc	0.0079	0.03	0.019 d	39.83	29.83	34.83 f
Artuklu	4.5 (0.33)	44.14 (2.28)	24.32 a-c	0.003	0.025	0.014 fg	252.2	101.55	202 a
Ackala	5.66 (0.1)	21.66 (2)	13.66 hi	0.003	0.013	0.008 g-i	30.68	30	30.18 fg
Ege-88	5.94 (0)	41.94 (1.85)	23.94 cd	0.004	0.022	0.013 fg	201.2	140	170.5 b
Dena	7.69 (0.9)	36.5 (0.8)	22.1 c-e	0.006	0.027	0.016 d-f	27.66	25.22	26.44 a-d
45430	3.74 (0.47)	15 (3.3)	9.37 i-n	0.002	0.092	0.047 a	178.54	154.11	170.82 b
Saji	5.67 (0.1)	12.05 (3.9)	8.86 k-r	0.003	0.057	0.03 b	24.65	20.11	22.38 g
Cheheldane	5.32 (0.54)	25.88 (1.23)	15.6 a-h	0.005	0.024	0.014 fg	156.65	122.1	139.32 d
Kunduru	8.31 (0.4)	26.05 (1.2)	17.18 f-h	0.006	0.015	0.01 g	28.85	18.47	23.66 g
PGS	6.92 (0.44)	43.11 (2)	25 bc	0.004	0.017	0.01 g	140.64	202	170 b
Kumbet	5.61 (0.1)	27.05 (1)	61.31 f-h	0.003	0.015	0.01 g	30.99	29.1	30 fg
Celcuklu	6.11 (0)	41.27 (1.7)	23.7 cd	0.003	0.017	0.01 g	128.1	103.2	115.6b-d
Altintoprak	7.58 (0.83)	49.73 (3.3)	28.65 ab	0.005	0.029	0.017 c-f	28.88	24.4	26.64 g
Mirzabey	8.69 (0.47)	50.88 (3.5)	29.78 a	0.007	0.037	0.022 cd	238.6	225.1	230 a
Cakmak	6.87 (0.14)	27.18 (0.98)	17 f-h	0.004	0.01	0.007 g-i	23.47	34.2	40.71 e-f
Imran	4.64 (0.3)	32.77 (0.1)	18.7 ef	0.003	0.016	0.009 g	216	168.1	219 a
Aminbey	5.46 (0.14)	29.75 (0.48)	17.6 e-g	0.003	0.012	0.007 g-i	80.83	59.64	70.23 ef
Durbel	4.9 (0.24)	8.7 (4.5)	6.8 l-r	0.003	0.01	0.006 i	233	157.12	175.11ab
Mean	6.22 b	33.1 a		0.004 b	0.024 a		110 a	89.35 b	

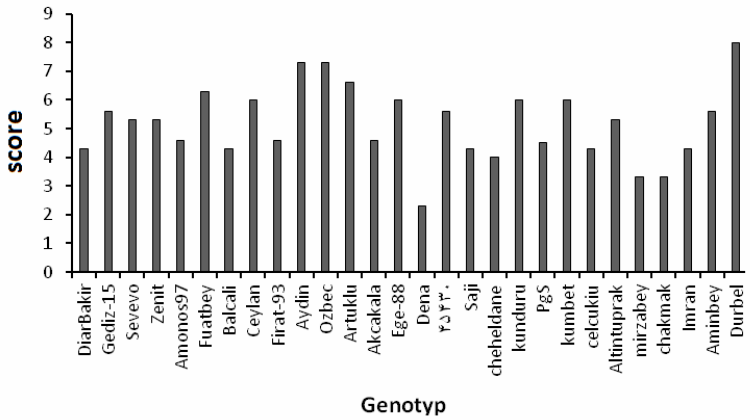
علامت خط تیره (-) بین حروف نشانگر وجود سایر حروف بین آنهاست و براساس الفبای لاتین است. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The dash (-) sign between letters indicates the presence of other letters between them and is according to Latin alphabets. The means with the same letters in each column don't have significant difference according to Duncan's multiple range test in probability of 5 percent



شکل ۳- مسیرهای مصرف پتانسیل هیدروژن حاصل از واکنش‌های نوری فتوسنتز. اعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب نشان دهنده چرخه‌های کالوین، گلوتاتیون-آسکوربات، گزانتوفیل و مهلر می‌باشد (Esfandiari *et al.*, 2018)

Figure 3- Hydrogen potential consumption pathways resulting from photosynthetic light reactions. The numbers 1, 2, 3 and 4 represent the calvin, glutathione-ascorbate, xanthophylls and Mahler cycles, respectively (Esfandiari *et al.*, 2018).



شکل ۴- تغییر در رتبه بندی علایم کمبود روی در ژنوتیپ‌های گندم در پاسخ به کمبود روی

Figure 4- Changing in ranking of zinc deficiency symptoms in wheat genotypes in response to zinc deficiency

References منابع مورد استفاده

- Abdoli, M., and E. Esfandiari. 2017. Assessment of genetic variation and zinc deficient tolerance in spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes in calcareous soil with zinc deficiency. *Journal of Genetic Resources*. 3 (1): 7-17.
- Abdoli, M., E. Esfandiari, A.A. Aliloo, B. Sadeghzadeh, and S.B. Mousavi. 2019. Study of genetic diversity in different wheat species with various genomes based on morphological characteristics and zinc use efficiency under two zinc deficient growing conditions. *Acta Agriculturae Slovenica*. 113: 147-161.
- Anonymous. 2016. FAO. Food and agricultural organization of the United Nations, statistics division. Production/Crops/ World.
- Beygi, M., G.H. Savaghebi, and B. Motesharezadeh. 2012. Study of zinc efficiency in selected common bean cultivars. *Journal of Water and Soil*. 26 (1): 33-41.
- Cakmak, I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil*. 247 (1): 3-24.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification. *Plant and Soil.* 302 (1): 1-17.
- Erdal, U., M.A. Turan, and S. Taban. 2003. Effect of zinc application on growth and nutrient concentrations of corn grown in soils with different characters. *Ankara University Journal of Agricultural Science.* 9 (4): 334-339.
- Esfandiari, E., and A. Javadi. 2014. Different responses of two wheat cultivars to salinity stress at seedling stage. *Iranian Journal of Plant Biology*. 6 (2): 1-16. (In Persian).
- Esfandiari, E., and M. Abdoli. 2017. Improvement of agronomic and qualitative characters of durum wheat (*Triticum turgidum* L. *var. durum*) genotypes by application of zinc sulfate under zinc deficiency stress. *Journal of Crop Ecophysiology*. 11 (3): 619-636. (In Persian).
- Esfandiari, E., M. Abdoli, B. Sadeghzadeh, and S.B. Mousavi. 2018. Evaluation of Turkish durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum) genotypes based on quantitative traits and shoot zinc accumulation under zinc-deficient calcareous soil. *Iranian Journal of Plant Physiology*. 8 (4): 2525-2537. (In Persian).
- Esfsndiari, E., and S.A. Mahboob. 2014. Plants biochemistry. Medicinal Science University of Tabriz. 315 p. (In Persian).
- Genc, Y., and G.K. McDonald. 2004. The potential of synthetic hexaploid wheats to improve zinc efficiency in modern bread wheat. *Plant and Soil*. 262 (2): 23-32.
- Genc, Y., and G.K. McDonald. 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 (1): 67-75.
- Genc, Y., G.K. McDonald, and R.D. Graham. 2002. A soil-based method to screen for zinc efficiency in seedlings and its ability to predict yield responses to zinc. *Australian Journal of Agricultural Research*. 53 (4): 409-421.
- Hacisalihoglu, G., and L.V. Kochian. 2003. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytologist*. 159 (2): 341-350.

- Hacisalihoglu, G., J.J. Hart, C.E. Vallejos, and L.V. Kochian. 2004. The Role of shoot-localized Processes in the mechanism of Zn efficiency in common bean. *Planta*. 218 (5): 704-711.
- Hajiboland, R., B. Singh, and V. Römheld. 2011. Retranslocation of Zn from leaves as important factor for zinc efficiency of rice genotypes. In Plant Nutrition. Springer, Dordrecht. pp: 226-227.
- Hemantaranjan, A. 2009. Advancements in micronutrient research. Scientific Publishers. India. 465 pp.
- Khoshgoftar-Manesh, A.H. 2007. Evaluation of plant nutrition status and optimum fertilizer management. Isfahan University of Technology Press. (In Persian).
- Malakouti, M.J. 2007. Zinc is a neglected element in the life cycle of plants. *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Biotechnology*. 1(1): 1-12.
- Maralian, H., R. Didar, K. Shahbazi, and M. Torabi Ghighloo. 2008. Effect of iron and zinc foliar application on improving seed quantitative and qualitative properties of three wheat cultivars. *Journal of Agricultural Research*. 8 (4): 47-59. (In Persian).
- Moshiri, F., M. Ardalan, M.M. Tehrani, and G.H. Savaghebi. 2010. Zinc efficiency of wheat cultivars in a calcareous soil with low zinc status. *Journal of Water and Soil*. 24(1): 145-153.
- Munns, R., and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review in Plant Biology*. 59: 651-681.
- Narwal, R.P., R.R. Dahiya, R.S. Malik, and R. Kala. 2012. Influence of genetic variability on zinc, iron and manganese responses in wheat. *Journal of Geochemical Exploration*. 121 (1): 45-48.
- Passerini, A., C. Andreini, S. Menchetti, A. Rosato, and P. Frasconi. 2007. Predicting zinc binding at the proteome level. *BMC Bioinformatics*. 1(1): 8-39.
- Rasouli-Sadaghiani, M.S., M. Javadi-Paydar, M.H. Gharedaghi, Y.Y. Fard, and A.R. Dehpour. 2011. Antidepressant-like effect of pioglitazone in the forced swimming test in mice: The role of PPAR-gamma receptor and nitric oxide pathway. *Behavioral Brain Research*. 224 (2): 336-343.
- Ren, J., D. Sun, L. Chen, F.M. You, J. Wang, Y. Peng, E. Nevo, D. Sun, M.C. Luo, and J. Pen. 2013. Genetic diversity revealed by single nucleotide polymorphism markers in a worldwide germplasm collection of durum wheat. *International Journal of Molecular Sciences*. 14 (4): 7061-7088.
- Sepehr, E., M.J. Malakouti, B. Kholdebarin, A. Samadi, and N. Karimian. 2009. Genotypics variation in P efficiency of selected Iranian cereals in greenhouse experiment. *Plant Production*. 3(1): 17-28.
- Shu, N., T. Zhou, and S. Hovmoller. 2008. Prediction of zinc-binding sites in proteins from sequence. *Bioinformatics*. 24 (6): 775-782.
- Torun, B., G. Bozbay, I. Gultekin, H.J. Braun, H. Ekiz, and I. Cakmak. 2000. Differences in shoot growth and zinc concentration of 164 bread wheat genotypes in a zinc deficient calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*. 23(9): 1251-1265.
- Vanitha, J., K. Amudha, R. Kumari, and S. Robin. 2016. Genetic variability studies for zinc efficiency in aerobic rice. *Journal of Agricultural Science and Research*. 3 (1): 49-56.

Research Article DOI:

The Response of Genetic Diversity of Durum Wheat for Zinc Deficiency Stress in Calcareous Soil Using some Physiological Parameters

Sedighe Hajihoseinlou[1*], Ezatollah Esfandiari[2], Esmaeil Karimi[3] and Levent Ozturk[4]

Received: January 2022 , Revised: 30 March 2022, Accepted: 24 April 2022

Abstract

Zinc deficiency is a common problem in the agricultural lands of Iran, which is present in a significant part of them with different degrees. Among different wheat cultivars, durum is more sensitive to zinc deficiency than others. Considering the importance of Genetic diversity in breeding programs, the present study was carried out using 28 genotypes of durum wheat with the aim of identifying their behavioral response to zinc deficiency in calcareous soil, as a factorial experiment based on randomized complete block design with three replications. Results showed that zinc content and concentration in the shoots of tolerant cultivars like Dena and Cheheldaneh is not necessarily higher than susceptible cultivars such as Ozbec, Amonos and Aydin in both zinc deficiency and sufficiency conditions, and in resistant cultivars the concentration and content of zinc in the shoots may be less than the sensitive cultivars. In zinc deficiency condition, the lowest and highest dry weight of shoots were obtained in PGS and Cheheldaneh genotypes, respectively, and when sufficient it was obtained in Celcuklu and Cheheldaneh genotypes. The lowest zinc concentration in zinc deficiency belonged to genotype 45430 and the highest value belonged to Ozbec genotype. Also the lowest and highest zinc concentrations in zinc sufficiency were measured in genotypes Durbel and Mirzabey respectively. Genotype 45430 had the lowest and Ozbec had the highest zinc content in zinc deficiency condition. On the other hand in terms of zinc sufficiency, Amonos and Durbel genotypes commonly had the least zinc content and 45430 genotype its highest content. The most symptoms of zinc deficiency appeared in Durbel and the least symptoms were recorded in Dena genotype. In terms of zinc deficiency Zenit and Cakmak genotypes and by zinc application Mirzabey and Kunduru genotypes indicated the highest and lowest zinc consumption efficiencies, respectively.

Key words: Dry matter, Wheat, Zink concetration, Zink efficiency.

1- Ph.D. Student of Crop Physiology, Department of Plant Genetic and Production Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran.
2- Professor Department of Plant Genetic and Production Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran.
3- Assistant Professor of Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran.
4- Professor, Department of Engineering and Natural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Sabanci, Istanbul, Turkey.
Corresponding Authors: hajihoseinlou.s@gmail.com*