

## The Effect of Different Soil Iron Concentrations on Morphological Traits, Fe Content, and Activity of Some Antioxidant Enzymes in Bread Wheat Cultivars

Morteza Salekjalali<sup>1</sup>, Babak Abdollahi Mandoulakani<sup>\*2</sup>, Ebrahim Sepehr<sup>3</sup>

(Accepted: March, 2024 Received: July, 2024)

### Abstract

To investigate the response of Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars to iron deficiency conditions, a factorial-based greenhouse experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. Fe-efficient (Pishtaz, Parsi and Chamran) and -inefficient (Alvand and Falat) cultivars were grown in two Fe concentrations: 10 mg kg<sup>-1</sup> (Iron sufficiency) and 1.4 mg kg<sup>-1</sup> (Iron deficiency). The shoot and root samples were harvested in two growth stages, 30 days after germination (vegetative) and 30% of heading (reproductive). The traits and indices studied, were Fe efficiency index, some morphological traits, chlorophyll content, seed iron concentration and content, Fe efficiency and Fe uptake efficiency. The activity of ascorbate peroxidase, superoxide dismutase, catalase, and guaiacol peroxidase enzymes were also measured in the roots and shoots of plants. Results showed the highest and lowest Fe efficiency in Pishtaz and Falat cultivars, respectively. The maximum amount of seed iron concentration and content was obtained for Pishtaz cultivar. The highest level of Fe efficiency was observed in the shoots of Pishtaz cultivar at reproductive stage, whereas the highest level of Fe uptake efficiency was found in the roots of this cultivar at vegetative stage. The chlorophyll content was increased in iron deficiency conditions. The activity of ascorbate peroxidase, catalase and guaiacol peroxidase was reduced in iron deficiency conditions, while the activity of superoxide dismutase enzyme was enhanced in the shoots and roots of cultivars in both vegetative and reproductive stages. To better elucidate the mechanism of iron absorption and transfer in iron-efficient and -inefficient varieties of bread wheat, it is suggested to study the expression of genes involved in iron uptake and transfer in bread wheat cultivars under iron deficiency conditions.

**Keywords:** Bread Wheat, Iron Deficiency, Fe Efficiency, Catalase, Yield Components

Salekjalali M., Abdollahi Mandoulakani B, Sepehr E. 2025. The effect of different soil iron concentrations on morphological traits, fe content, and activity of some antioxidant enzymes in bread wheat cultivars. *Applied Soil Research*. 12(4): 110-128.

1. Ph.D Student of Plant Breeding, Department of Plant Production and Genetics, Urmia University, Urmia, Iran

2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Urmia University, Urmia, Iran

3 . Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia, Iran

\*Corresponding Author Email : [b.abdollahi@urmia.ac.ir](mailto:b.abdollahi@urmia.ac.ir)

## اثر غلظت‌های مختلف آهن قابل جذب خاک بر صفات مورفولوژیک، محتوی آهن و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گندم نان

مرتضی سالک جلالی<sup>۱</sup>، بابک عبدالهی مندولکانی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم سپهر<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲)

### چکیده

به منظور بررسی واکنش ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان به غلظت‌های مختلف آهن قابل جذب (Fe) خاک، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در گلخانه اجرا گردید. ارقام آهن-کارا (پیش‌تاز، پارس و چمران) و آهن-ناکارا (الوند و فلات) در دو شرایط کفایت و کمبود آهن قابل جذب (به ترتیب ۱۰ و ۱/۴ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک) کشت و نمونه‌برداری از شاخساره و ریشه گیاهان در دو مرحله ۳۰ روز بعد از جوانه‌زنی (رویشی) و ۳۰ درصد خوشه‌دهی (زایشی) انجام گرفت. در این پژوهش شاخص آهن کارایی ارقام، صفات مورفولوژیک، غلظت و محتوی آهن بذر، آهن کارایی و کارایی جذب آهن ریشه و شاخساره اندازه‌گیری شد. همچنین میزان کلروفیل کل و فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، ارقام پیش‌تاز و فلات به ترتیب بیشترین و کمترین آهن کارایی را نشان دادند. از لحاظ غلظت و محتوی آهن بذر، رقم پیش‌تاز بیشترین و رقم فلات کمترین مقدار را داشتند. بیشترین میزان آهن کارایی در شاخساره رقم پیش‌تاز در مرحله زایشی و بیشترین میزان کارایی جذب آهن در ریشه همین رقم در مرحله رویشی مشاهده شد. میزان کلروفیل کل در شرایط کمبود آهن قابل جذب در مرحله زایشی، بیشترین کاهش را نشان داد. فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در شرایط کمبود آهن قابل جذب در شاخساره و ریشه در هر دو مرحله رویشی و زایشی کاهش ولی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت. پیشنهاد می‌شود به منظور درک بهتر ساز و کار جذب و انتقال آهن در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان، بیان ژن‌های دخیل در جذب و انتقال آهن در این ارقام در گندم نان در شرایط کمبود آهن قابل جذب، مطالعه شود.

واژه های کلیدی: گندم نان، کمبود آهن، آهن کارایی، کاتالاز، اجزای عملکرد

سالک جلالی م.، عبدالهی مندولکانی ب.، سپهر ا. ۱۴۰۳. اثر غلظت‌های مختلف آهن قابل جذب خاک بر صفات مورفولوژیک، محتوی آهن و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گندم نان. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۴. صفحه: ۱۱۰-۱۲۸.

۱- دانشجوی دکتری اصلاح نباتات، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (مکاتبه کننده)

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\*پست الکترونیک: [b.abdollahi@urmia.ac.ir](mailto:b.abdollahi@urmia.ac.ir)

## مقدمه

گندم از عمده ترین محصولات کشاورزی و مهمترین تامین کننده نیاز غذایی انسان در کشورهای در حال توسعه است (Chegeni, 2014). این گیاه حدود ۲۱ درصد از غذای مردم جهان و ۲۰۰ میلیون هکتار از کشتزارها را تشکیل می دهد (Amirjani *et al.*, 2016). بنابراین افزایش عملکرد دانه و بهبود کیفیت آن اهمیت زیادی در مساله افزایش جمعیت انسانی دارد (Gurtis & Halford, 2014).

آهن یکی از عناصر ضروری کم مصرف و کم تحرک برای گیاهان است. گیاهان در بین عناصر کم مصرف، بیشترین نیاز را به آهن دارند. آهن، بخشی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم های اکسیداسیون و احیاء بوده و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز است. نقش این عنصر در تثبیت ازت و فعایت برخی آنزیم ها نظیر کاتالاز، پراکسیداز و سیتوکروم اکسیداز اثبات شده است (Blakrishman *et al.*, 1991; Ruiz *et al.*, 2000 and Welch *et al.*, 2000). معمولاً غلظت کل این عنصر در خاک به مقدار کفایت وجود دارد، اما به دلیل عواملی همچون وجود آهن و یون کلسیم فراوان، pH بالا و ماده آلی کم، خشکی، کاربرد بیش از اندازه فسفر در خاک، وجود بی کربنات در خاک و آب های آبیاری که از خصوصیات مهم خاک های مناطق خشک و نیمه خشک از جمله ایران محسوب می شوند، فقط مقدار کمی از آن برای گیاهان قابل دسترس می باشد (Khakzar *et al.*, 2024). در ایران حد بحرانی آهن در خاک به روش DTPA برای گندم، ۵ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Malakoti *et al.*, 2005). آهن فقط از طریق آوند چوبی به برگ های جوان می رسد و به همین علت نشانه های کمبود آهن بیشتر در برگ های جوان ظاهر می شود (Marschner *et al.*, 1995). کمبود آهن قابل جذب منجر به زرد برگی (Mahmoudi *et al.*, 2005)، کاهش فتوسنتز و غلظت کلروفیل (Ksouri *et al.*, 2007)، کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه (Yousefi *et al.*, 2009)، تغییر غلظت و محتوای آهن (Mahmoudi *et al.*, 2005) و محدود شدن فعالیت آنزیم هایی مانند پراکسیداز و کاتالاز (Ranieri *et al.*, 2001) می شود. این صفات ارتباط نزدیکی با عملکرد گیاهان زراعی دارند (Golshahi *et al.*, 2017). بلالی و ملکوتی (Balali & Malalkooti, 2002) گزارش کردند که با مصرف سکوسترین آهن، علاوه بر افزایش ۲۰ درصدی عملکرد، غلظت آهن در دانه و کلش گندم افزایش

و درصد پروتئین نیز بهبود یافت. دمیرکیران (Demirkiran, 2009) با تحقیق روی روش های مصرف آهن در گندم در یک خاک آهکی گزارش کرد که محلول پاشی آهن موجب ایجاد بالاترین غلظت و جذب آهن در اندام هوایی و مصرف خاکی موجب ایجاد بالاترین عملکرد دانه می شود. تاندون (۲۰۰۳) گزارش کرد که در ۴۵۳۰ مزرعه تحت کشت گندم در هندوستان پس از مصرف کود حاوی آهن، ۷۸۰ کیلوگرم در هکتار افزایش عملکرد حاصل شد. ضیائیان و ملکوتی (Ziaeyan & Malakouti, 2001) طی پژوهشی در استان فارس، اظهار داشتند که مصرف آهن موجب افزایش معنی دار تعداد دانه در خوشه و وزن هزاردانه در گندم شد.

در گذشته کاهش فعالیت برخی آنزیم های آنتی اکسیدان در ارقام آهن-ناکارا در شرایط کمبود آهن در گیاهانی مانند سورگوم (Golshahi *et al.*, 2017)، آفتابگردان (Ranieri *et al.*, 2001) و گندم (Sabaghnia & Esfandiari, 2012) گزارش شده است. همچنین دوستی و عبدالهی مندولکانی (Dousti & Abdollahi Mandoulakani, 2023) گزارش کردند که بیان ژن های کد کننده آنزیم های پراکسیداز و گلوکاتاتیون اس-ترنسفراز در شرایط کمبود آهن در برگ و ریشه رقم آهن-کارا پیشتر از در مراحل رویشی و زایشی افزایش می یابد. با این حال مطالعه جامعی روی فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و کلروفیل در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود آهن در ریشه و شاخساره ارقام مختلف گندم نان انجام نگرفته است. با در نظر گرفتن توانایی متفاوت ژنوتیپ ها در استفاده از آهن خاک، استفاده از ارقام آهن-کارا در خاک هایی با آهن قابل استفاده کم (به ویژه خاک های آهکی) می تواند تا حدی مشکلات کمبود آهن را بدون نیاز به مصرف بیش از حد کود برطرف کند. با توجه به اهمیت استراتژیک گندم در تغذیه مردم در کشور ما و کمبود شایع آهن قابل استفاده در مزارع گندم، تحقیق حاضر با هدف مقایسه کارایی جذب آهن در پنج رقم گندم نان در سطوح مختلف آهن قابل جذب خاک و همچنین بررسی تأثیر کمبود آهن قابل جذب خاک بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و کلروفیل کل در ریشه و شاخساره در مراحل مختلف رشد در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در پائیز و زمستان سال ۱۳۹۸ اجرا گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. خاک مورد استفاده از اطراف دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه که دارای کمبود آهن قابل جذب بود، تهیه گردید (جدول ۱). بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، آهن قابل جذب و سایر عناصر کم‌مصرف (روی، مس، منگنز) به روش لیندزی و نورول (Lindsay & Norwell, 1960)، فسفر به روش اولسن در خاک (Olsen *et al.*, 1954)، پتاسیم به روش استات آمونیوم (Klute, 1986)، پی‌اچ و میزان EC در عصاره اشباع خاک

(Mclean, 1982) اندازه‌گیری شد. ارقام آهن-کارا (پیش‌تاز، پاریسی و چمران) و آهن-ناکارا (الوند و فلات) (Rahemi *et al.*, 2014) در دو شرایط کفایت آهن (۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک) و کمبود آهن قابل جذب (۱/۴ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک) کشت و نمونه‌برداری از شاخساره و ریشه گیاهان در دو مرحله رشدی ۳۰ روز بعد از جوانه زنی (رویشی) و ۳۰ درصد خوشه‌دهی (زایشی) انجام گرفت. لازم به توضیح است که مقدار اولیه غلظت آهن قابل جذب خاک، ۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود که برای تیمار کمبود استفاده شد. سپس آهن همین خاک با کود آهن سکوسترین به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک رسانده شد و به‌عنوان تیمار کفایت آهن استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در آزمایش  
Table 1. Chemical and physical properties of the soil used in the study

Fe	Zn	Cu	Mn	K	P	CCE	OC	EC	PH	Texture	Clay	Silt	Sand
mg kg <sup>-1</sup>						%	dS m <sup>-1</sup>	-	-	-	%		
1.4	0.1	1.25	10.1	160	3.4	22	0.65	0.89	7.98	Silty loam	9	53	38

غذایی که به خاک داده شد، به نیمی از گلدان‌ها (ترکیبات تیماری دارای آهن) عنصر آهن به صورت سکوسترین آهن (Fe-EDDHA) افزوده شد.

نمونه خاک مورد استفاده بعد از الک دو میلی‌متری، به نسبت ۱:۲ با ماسه بادی تهیه شده مخلوط گردید. سپس مواد غذایی مورد نیاز، قبل از کشت به صورت محلول تهیه و با خاک کاملاً مخلوط گردید (جدول ۲). علاوه بر مواد

جدول ۲- ترکیب محلول غذایی مورد استفاده در آزمایش  
Table 2. The composition of nutrient solution used in the experiment

Elements	mg kg <sup>-1</sup>	Fertilizer	mg kg <sup>-1</sup>
N	30	Urea (CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )	65.22
P	50	Triple superphosphate (Ca(PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )	249
K	100	Potassium sulfate (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	223
Zn	5	Zinc sulfate (ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O)	22.1
Cu	5	Copper sulfate (CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O)	19.6
Fe	10	Fe-EDDHA	182

داده شد. به منظور تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاهان در طول فصل رشد، هر دو هفته یکبار، محلول نترات آمونیوم به همراه آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. آبیاری در طول فصل رشد، با استفاده از آب مقطر در حد ظرفیت زراعی خاک گلدان و با استفاده از توزین در ترازو در گلخانه انجام شد.

به منظور کشت، بذور ارقام (موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر ایران) به مدت سه دقیقه با اتانول ۷۰ درصد و سپس به مدت پنج دقیقه با آب اکسیژنه یک درصد ضدعفونی و در نهایت با آب مقطر آبکشی شد. بذور (۱۰ عدد بذر) در لوله‌های پلی‌اتیلنی به ارتفاع ۳۴ و قطر ۱۱ سانتی‌متر، حاوی سه کیلو و هفتصد گرم خاک کشت و بعد از ده روز، تعداد گیاهان در هر گلدان به هفت عدد کاهش

دانکن در سطح یک درصد) توسط نرم افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام شد.

### نتایج و بحث

#### شاخص آهن کارایی ارقام

جهت اطمینان از صحت انتخاب ارقام مورد استفاده در این تحقیق به لحاظ کارایی جذب آهن قابل جذب، شاخص آهن کارایی کل برای هر یک از ارقام محاسبه شد (جدول ۳). در بین ارقام مورد مطالعه، به طور متوسط ارقام پیشتاز، چمران، پارسی، الوند و فلات به ترتیب با ۹۲٪، ۹۰٪، ۸۸٪، ۷۲٪ و ۷۰٪ دارای بیشترین تا کمترین آهن کارایی بودند. راحمی و همکاران (Rahemi *et al.*, 2014) عنوان کردند که رقم فلات را نمی‌توان به عنوان رقم آهن-کارا در نظر گرفت. ولی بررسی میزان جذب آهن قابل جذب در دو رقم پارسی و پیشتاز در تیمار بدون مصرف آهن، نشان داد که آنها کارایی بیشتری نسبت به رقم فلات در جذب آهن قابل جذب در شرایط کمبود آهن قابل استفاده خاک دارند. خوش‌گفتارمنش و همکاران (Khoshgoftar Manesh *et al.*, 2014) شاخص آهن کارایی را برای ارقام پیشتاز و فلات به ترتیب ۸۷/۹ و ۸۸/۲ گزارش کردند.

کارایی ارقام گندم نان از لحاظ آهن، قابلیت ژنوتیپ‌های مختلف گندم برای رشد بهتر و تولید عملکرد بالاتر در شرایط کمبود آهن در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها می‌باشد (Behl *et al.*, 2003). مطالعات مختلف نشان می‌دهد بین ژنوتیپ‌های گندم از نظر کارایی آهن تفاوت‌های ژنتیکی وجود دارد (Mendoza, 1999). بر اساس یافته‌های برخی محققان، اصلاح ژنتیکی در گونه‌های گیاهی مانند گندم جهت مقابله با کمبود آهن راهکار موثری می‌باشد (Mendoza, 1999). ویژگی‌های ژنوتیپی که باعث بروز نشانه‌های متفاوت کمبود آهن در ژنوتیپ‌های مختلف می‌شود به توان این گیاهان برای محلول کردن، جذب و مصرف کاراتر و موثرتر این عنصر مربوط است. به طور خلاصه، به ژنوتیپ‌هایی که رویزوسفر کاراتری برای جذب آهن به وسیله ریشه و یا توان بالاتری در مصرف آهن جذب شده توسط گیاه دارند، ژنوتیپ‌های "آهن-کارا" گفته می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر توان بیشتر ریشه‌ها در احیا  $Fe^{3+}$  به  $Fe^{2+}$  (Mendoza, 1999) و یا احیاکننده‌های آهن سه ظرفیتی، برهمکنش‌های کمتر با سایر عناصر مانند P، Ca، Cu، Zn، Mo، Al و عناصر سنگین و تولید کلات‌ها یا دارا

برای مطالعه صفات، نمونه‌برداری از ریشه و برگ گیاهان در دو مرحله رویشی (۳۰ روز بعد از جوانه زنی) و زایشی (۳۰ درصد گل‌دهی خوشه‌ها) انجام گرفت. بعد از برداشت نمونه‌های گیاهی در هر مرحله، ابتدا دو برگ انتهایی و ریشه با ابعاد دو سانتی‌متر مربع جدا و جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها و کلروفیل کل در آزمایشگاه فیزیولوژی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه ارومیه به یخچال ۸۰- درجه سانتی‌گراد منتقل شد. سپس اندام هوایی و ریشه‌های باقی مانده به منظور اندازه‌گیری وزن خشک و مقدار آهن، در پاکت‌های جداگانه‌ای نگهداری گردید. غلظت آهن (Fe concentration) توسط دستگاه جذب اتمی (آزمایشگاه گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه) اندازه‌گیری شد. محتوی آهن (Fe content) از حاصلضرب غلظت آهن در ماده خشک (Dry matter) به دست آمد (Baghban-Tabiat & Rasouli-Sadaghiani, 2012). شاخص آهن کارایی شاخساره با استفاده از فرمول وزن خشک شاخساره در حالت تیمار آهن ۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم تقسیم بر وزن خشک شاخساره در حالت تیمار آهن ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ضرب در ۱۰۰ و شاخص کارایی جذب آهن با استفاده از فرمول غلظت آهن جذب شده در حالت تیمار آهن ۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم تقسیم بر غلظت آهن جذب شده در حالت تیمار آهن ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ضرب در ۱۰۰ اندازه‌گیری شد (Baghban-Tabiat & Rasouli-Sadaghiani, 2012). صفات اندازه‌گیری شده شامل میزان کلروفیل کل (Arnon, 1949) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز (Beauchamp & Fridovich, 1971)، کاتالاز (Aebi, 1984)، آسکوربات پراکسیداز (Nakano & Asada, 1981) و پراکسیداز (Mac Adam *et al.*, 1992) بود. جهت اطمینان از صحت انتخاب ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارا، شاخص‌های آهن کارایی برای هر کدام از ارقام محاسبه شد. برای محاسبه این شاخص، وزن ریشه، شاخساره و هزار دانه یک رقم در شرایط کمبود آهن قابل جذب اندازه‌گیری و بر وزن همان رقم در شرایط کفایت آهن قابل جذب تقسیم گردید (Baghban-Tabiat & Rasouli-Sadaghiani, 2012). آزمون نرمالیتی داده‌ها و خطاهای آزمایشی با استفاده از نرم افزار MINITAB (نسخه ۱۹) انجام گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین تیمارها (به روش

آمینه غیرپروتئینی) در خاک ترشح می‌کنند که با یون‌های آهن سه ظرفیتی کمپلکس آهن-فیتوسیدورفور (Fe-PS) تشکیل داده و قابلیت دسترسی آهن را بهبود می‌بخشند. آزادسازی این ترکیبات ارتباط مثبتی با تفاوت‌های ژنوتیپی در تحمل کمبود آهن دارد (Mendoza, 1999).

بودن ترکیبات ذخیره‌ای و یا اعمال برخی فرایندهای شیمیایی-فتوشیمیایی داخلی که دسترسی به آهن و مصرف آن را تنظیم می‌کنند، سبب کارآمدی بعضی ژنوتیپ‌ها در مصرف آهن می‌شود (Clark, 1983). مطالعات نشان می‌دهد که گندمیان فیتوسیدورفورها (اسیدهای

جدول ۳- شاخص آهن کارایی ارقام مختلف گندم نان

Table 3. Fe efficiency index of different bread wheat cultivars

Cultivars	Root	Shoot	Seed	Average
Phishtaz	0.92	0.89	0.84	0.88
Parsi	0.88	0.82	0.75	0.82
Chamran	0.90	0.80	0.74	0.81
Alvand	0.72	0.77	0.71	0.72
Phalat	0.70	0.72	.64	0.68

طول خوشه، تعداد خوشه، طول برگ پرچم و تعداد سنبلیچه افزایش یافت (جدول ۵). همانتارانجان و گرگ (Hemantaranjan & Grag, 1988) گزارش کردند که

تأثیر کمبود آهن بر صفات مورفولوژیکی

در جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی ارائه شده است. در این تحقیق با افزایش سطح آهن قابل جذب خاک به ده میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میزان صفات

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی در ارقام مختلف گندم نان

Table 4. The results of ANOVA for morphological trait in different bread wheat cultivars

Source	df	Mean Square (MS)				
		Stem Length(cm)	Spike Length(cm)	Spike Number	Flag Leaf Length(cm)	Flag Leaf Width(cm)
Iron Level (A)	1	0.16 <sup>ns</sup>	4.63 <sup>**</sup>	6.53 <sup>*</sup>	31.62 <sup>**</sup>	0.042 <sup>ns</sup>
Cultivar (B)	4	75.80 <sup>**</sup>	6.26 <sup>**</sup>	7.02 <sup>**</sup>	124.89 <sup>*</sup>	0.14 <sup>ns</sup>
A*B	4	9.13 <sup>ns</sup>	0.40 <sup>ns</sup>	1.80 <sup>ns</sup>	4.87 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>
Error	20	8.28	0.27	1.27	5.53	0.089
CV (%)		6.49	9.59	12.28	17.91	33.17

Source	df	Mean Square (MS)				
		Awn Length(cm)	Spikelet Number	Peduncle Length(cm)	Spike Seeds Number	1000-Seed Weight(gr)
Iron Level (A)	1	0.01 <sup>ns</sup>	19.46 <sup>*</sup>	5.17 <sup>ns</sup>	14.63 <sup>ns</sup>	118.32 <sup>ns</sup>
Cultivar (B)	4	5.32 <sup>**</sup>	77.18 <sup>**</sup>	4.08 <sup>**</sup>	93.26 <sup>**</sup>	355.92 <sup>**</sup>
A*B	4	0.89 <sup>**</sup>	6.36 <sup>ns</sup>	13.34 <sup>ns</sup>	17.50 <sup>ns</sup>	89.42 <sup>ns</sup>
Error	20	0.16	5.05	1.89	9.60	60.50
CV (%)		6.21	15.15	16.80	27.29	17.04

\*\* و \*: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، ns: غیرمعنی‌دار

\*\* , \* : are significant at P <0.01, and 0.05, respectively, ns is non-significant.

جدول ۵- مقایسه برخی صفات مورفولوژیکی در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب در ارقام مختلف گندم نان

Table 5. The comparison of some morphological traits under iron deficiency and sufficiency conditions in various bread wheat cultivars

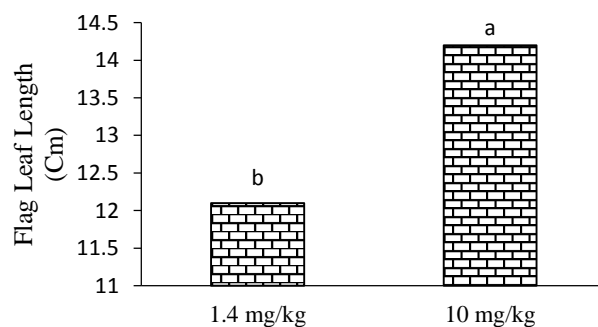
Iron Level	Spike Length(cm)	Spike Number	Flag Leaf Length(cm)	Spikelet Number
1.4 (mg kg <sup>-1</sup> )	5.02 <sup>b</sup>	8.70 <sup>b</sup>	12.09 <sup>b</sup>	14.03 <sup>b</sup>
10 (mg kg <sup>-1</sup> )	5.81 <sup>a</sup>	9.63 <sup>a</sup>	14.15 <sup>a</sup>	15.64 <sup>a</sup>

معناداری در اجزای عملکرد و در نهایت عملکرد دانه می‌گردد. آنها همچنین اعلام نمودند که مقدار کلروفیل a و b در اثر مصرف آهن افزایش می‌یابد. ضیائیان و ملکوتی (Ziaeian & Malakoti, 2000) گزارش نمودند که مصرف آهن، عملکرد دانه و کلش گندم را به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

آرزمجو و همکاران (Arazmjoo *et al.*, 2018) نشان دادند که ارقام بم و افق در مقایسه با ارقام روشن و بک کراس روشن از طول سنبله، تعداد دانه در سنبله، عملکرد دانه و شاخص برداشت بیشتری برخوردار بودند. همچنین محلول‌پاشی آهن منجر به بهبود خصوصیات رشدی و عملکرد دانه شد. افزایش تعداد دانه تحت تأثیر آهن با نتایج تحقیق رایز و همکاران (Raesee *et al.*, 2015) مطابقت دارد. عنصر آهن در ساخت کلروفیل و انتقال الکترون در فتوسنتز نقش حیاتی دارد و فرودوکسین، پروتئین حامل آهن است که در انتقال الکترون درگیر است (Ahmadi *et al.*, 2005). بنابراین طبیعی است که با افزایش آهن برگ، میزان کلروفیل برگ و فعالیت فتوسنتزی بیشتر شده و در نهایت منجر به افزایش عملکرد شود. از طرف دیگر، آهن از طریق افزایش فعالیت فتوسنتزی و تولید مواد پروتئینی و کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌تواند وزن خشک گیاه را افزایش دهد (Kamaraki & Galavi, 2012).

کاربرد عنصر آهن در گندم، بطور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد دانه، وزن هزاردانه، تعداد دانه در خوشه، طول خوشه و تعداد خوشه در واحد سطح می‌شود. ایشان اضافه کردند که علت افزایش عملکرد و اجزای آن در اثر کاربرد آهن، تأثیر آن بر کلروفیل برگ و غلظت ایندول استیک می‌باشد. افزایش میزان کلروفیل از طریق افزایش فتوسنتز، عملکرد ماده خشک گیاه را افزایش می‌دهد. بررسی تأثیر میزان آهن قابل جذب خاک بر طول برگ پرچم گندم نشان داد که با افزایش سطح آهن قابل جذب خاک، طول برگ پرچم نیز افزایش یافت (شکل ۱).

مقایسه بین ارقام آهن-کارای گندم نان (پیش‌تاز، پارسی و چمران) با ارقام آهن-ناکارا (الوند و فلات) (جدول ۶) از لحاظ برخی صفات مورفولوژیک نشان داد که ارقام آهن-کارای گندم نان از لحاظ صفات طول ساقه، طول خوشه، تعداد خوشه، طول ریشک، تعداد سنبلچه، طول پدانکل، تعداد دانه در سنبلچه و وزن هزار دانه عملکرد بهتری دارند. کشاورز و همکاران (Keshavars *et al.*, 2017) گزارش کردند که مصرف آهن به طور میانگین سبب افزایش عملکرد دانه گندم به میزان ۹/۹ درصد نسبت به شاهد می‌شود و افزایش عملکرد ناشی از مصرف آهن در گندم دوروم ۴/۲ برابر رقم طوس بود. همان‌تارانجان و گرگ (Hemantaranjan & Grag, 1988) نشان دادند که آهن با تأثیر بر کلروفیل برگ و افزایش فتوسنتز، موجب افزایش



شکل ۱- تأثیر میزان آهن قابل جذب خاک بر طول برگ پرچم در ارقام گندم نان

Figure 1. The effect of soil iron concentration on flag leaf length in bread wheat cultivars

۱,۴ mg kg<sup>-1</sup>=آهن ناکافی؛ ۱۰ mg kg<sup>-1</sup>=آهن کافی

1.4 mg kg<sup>-1</sup>=insufficient iron; 10 mg kg<sup>-1</sup>=sufficient iron

جدول ۶- مقایسه برخی صفات مورفولوژیک در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان

Table 6. The comparison of some morphological traits in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars

	Stem Length(cm)	Spike Length(cm)	Spike Number	Awn Length(cm)
Phishtaz	44.87 <sup>a</sup>	7.18 <sup>a</sup>	10.00 <sup>a</sup>	7.27 <sup>a</sup>
Parsi	47.33 <sup>a</sup>	4.95 <sup>cb</sup>	9.66 <sup>a</sup>	6.82 <sup>a</sup>
Chamran	48.07 <sup>a</sup>	4.85 <sup>cb</sup>	10.16 <sup>a</sup>	5.40 <sup>b</sup>
Alvand	40.22 <sup>b</sup>	5.39 <sup>b</sup>	8.08 <sup>b</sup>	7.29 <sup>a</sup>
Phalat	41.11 <sup>b</sup>	4.69 <sup>c</sup>	7.91 <sup>b</sup>	5.49 <sup>b</sup>

	Spikelet Number	Peduncle Length(cm)	Spike Seeds Number	1000-Seed Weight(gr)
Phishtaz	21.24 <sup>a</sup>	8.00 <sup>a</sup>	14.08 <sup>a</sup>	58.17 <sup>a</sup>
Parsi	13.25 <sup>b</sup>	9.02 <sup>a</sup>	11.80 <sup>ab</sup>	37.62 <sup>b</sup>
Chamran	12.94 <sup>b</sup>	9.07 <sup>a</sup>	9.18 <sup>b</sup>	44.24 <sup>b</sup>
Alvand	13.42 <sup>b</sup>	6.00 <sup>b</sup>	9.69 <sup>b</sup>	46.16 <sup>b</sup>
Phalat	13.33 <sup>b</sup>	8.83 <sup>a</sup>	12.00 <sup>ab</sup>	41.93 <sup>b</sup>

**غلظت و محتوی آهن بذر**

۵/۳ درصد افزایش نسبت به شاهد) بود. ضیائیان و ملکوتی (Ziaeian & Malakoti, 2000) گزارش نمودند که بر اثر مصرف آهن، غلظت و جذب آن در دانه گندم به ترتیب ۱۵ و ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. بوربوری و همکاران (Borbori *et al.*, 2011) نشان دادند که اثر مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن روی غلظت آهن دانه در سطح احتمال ۱ درصد معنادار می‌باشد. همچنین بیشترین غلظت آهن دانه در تیمار ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مصرف خاکی آهن بدست آمد. بیشترین میزان غلظت آهن دانه و وزن هزاردانه در بالاترین سطح مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن بدست آمد. به عقیده دمیرکیران (Demirkiran, 2009) افزایش آهن به صورت خاکی و محلول‌پاشی سبب افزایش محتوی آهن دانه می‌شود.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر سطح آهن بر محتوی آهن بذر و اثر رقم بر هر دو محتوی و غلظت آهن بذر در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). در این تحقیق با افزایش میزان آهن قابل جذب خاک، محتوی آهن بذر گندم نیز افزایش یافت (شکل ۲) بطوریکه ارقام آهن-کارای پیشتاز و پارسی بیشترین و رقم آهن-ناکارای فلات کمترین میزان غلظت و محتوی آهن را دارا بودند (جدول ۸). کشاورز و همکاران (Keshavars *et al.*, 2017) گزارش کردند که گندم تریپیکاله بیشترین میزان جذب آهن و گندم C75-5 کمترین مقدار آن را دارا می‌باشد. بیشترین میزان افزایش جذب آهن در دانه، مربوط به گندم دوروم (۳۸،۱ درصد افزایش) و کمترین آن مربوط به رقم طوس

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس صفات غلظت و محتوی آهن بذر در ارقام مختلف گندم نان

Table 7. The results of ANOVA for seed iron concentration and content in different bread wheat cultivars

Source	df	Mean Square (MS)	
		Fe con.	Fe cont.
Iron Level (A)	1	0.049 <sup>ns</sup>	5.47 <sup>**</sup>
Cultivar (B)	4	0.120 <sup>**</sup>	1.84 <sup>**</sup>
A*B	4	0.033 <sup>ns</sup>	0.57 <sup>ns</sup>
Error	20	0.015	0.28
CV (%)		13.37	20.58

\*\* و \*: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، <sup>ns</sup>: غیرمعنی‌دار

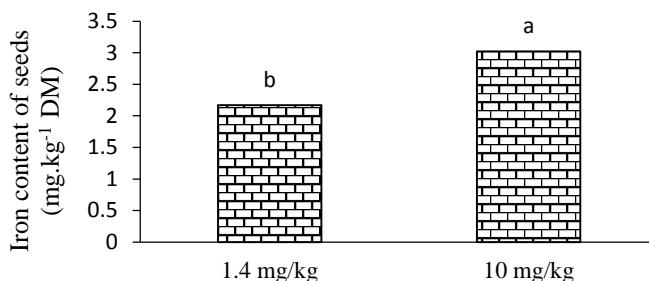
\*\* , \* : are significant at P < 0.01, and 0.05, respectively, ns is non-significant.



جدول ۸- غلظت و محتوای آهن بذور ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان

Table 8. Seed Iron concentration and content in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars

Cultivars	Iron Concentration (mg kg <sup>-1</sup> )	Iron Content (mg kg <sup>-1</sup> DM)
Phishtaz	1.01 <sup>ab</sup>	3.05 <sup>a</sup>
Parsi	1.12 <sup>a</sup>	3.23 <sup>a</sup>
Chamran	0.86 <sup>bc</sup>	2.15 <sup>b</sup>
Alvand	0.87 <sup>bc</sup>	2.61 <sup>ab</sup>
Phalat	0.76 <sup>c</sup>	1.94 <sup>b</sup>



شکل ۲- تأثیر میزان آهن قابل جذب خاک بر محتوای آهن بذور ارقام مختلف گندم نان

Figure 2. The effect of soil iron concentration on the iron content of seeds in different bread wheat cultivars

۱.۴ mg kg<sup>-1</sup> = آهن کافی؛ ۱۰ mg kg<sup>-1</sup> = آهن ناکافی

1.4 mg kg<sup>-1</sup> = insufficient iron; 10 mg kg<sup>-1</sup> = sufficient iron

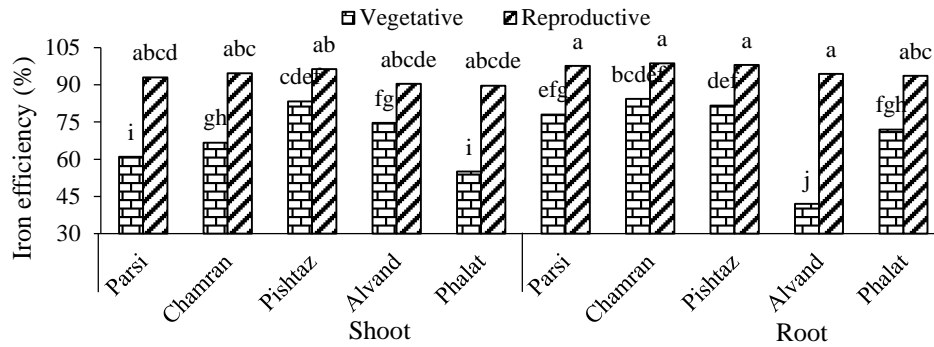
میزان کارایی جذب آهن قابل جذب در ریشه ارقام آهن-کارای گندم نان در مقایسه با ارقام آهن-ناکارا افزایش معناداری یافت (شکل ۴).

پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با کارایی عناصر کم مصرف در خانواده گرامینه نشان می‌دهد که کارایی بیشتر متأثر از توانایی گیاه برای جذب این عناصر از خاک است تا تحرک مجدد آنها در درون گیاه (Graham *et al.*, 1992). در ارتباط با گندم، ساز و کارهایی نظیر ریخت‌شناسی ریشه، تلقیح میکروبی، ترشح فیتوسیدروفورهای متحرک کننده آهن و تفاوت در جذب، ممکن است در افزایش آهن کارایی دخالت داشته باشند (Cakmak *et al.*, 1996). کاکماک و همکاران (Cakmak *et al.*, 1996) اظهار داشتند که آزاد شدن فیتوسیدروفورها از ریشه گیاهان خانواده گرامینه که به استراتژی دو (II) مشهور است، در شرایط کمبود آهن صورت می‌گیرد. این موضوع در تحمل ژنوتیپ‌های گندم به کمبود آهن دخالت دارد. راحمی و همکاران (Rahemi *et al.*, 2014) در یک تحقیق گلخانه‌ای با سه رقم گندم فلات، پیشتاز و پارسی، مشاهده کردند که در رقم فلات با افزایش آهن، جذب، عملکرد رویشی و نسبت ریشه به اندام هوایی افزایش یافت و در بین این سه رقم، رقم فلات کارایی کمتری در جذب آهن داشت.

#### آهن کارایی و کارایی جذب آهن قابل جذب ریشه و شاخساره

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل مرحله × اندام × رقم برای هر دو صفت آهن کارایی و کارایی جذب آهن قابل جذب در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۹). میزان آهن کارایی بر اساس شاخساره در ارقام پیشتاز و چمران نسبت به رقم آهن-ناکارای فلات در مرحله رویشی به طور معناداری بیشتر بود. از طرف دیگر میزان آهن کارایی بر اساس ریشه در ارقام پیشتاز، پارسی و چمران در مقایسه با رقم آهن-ناکارای الوند به طور معناداری افزایش یافت. همچنین میزان آهن کارایی بر اساس ریشه و شاخساره ارقام مورد مطالعه در مرحله زایشی نسبت به مرحله رویشی افزایش معناداری نشان داد (شکل ۳).

میزان کارایی جذب آهن قابل جذب در ریشه ارقام مورد مطالعه نسبت به شاخساره به‌طور معناداری در مرحله رویشی بیشتر بود. همچنین، کارایی جذب آهن قابل جذب در شاخساره ارقام مورد مطالعه در مرحله زایشی در مقایسه با مرحله رویشی بطور معناداری افزایش یافت. در مرحله رویشی، میزان کارایی جذب آهن قابل جذب در شاخساره ارقام آهن-کارای گندم نان در مقایسه با ارقام آهن-ناکارا افزایش معناداری نشان داد. همچنین در مرحله زایشی،



شکل ۳- میزان آهن کارایی در ریشه و شاخساره ارقام مختلف گندم نان در مراحل رویشی و زایشی

Figure 3. The Fe efficiency in the roots and shoots of bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages

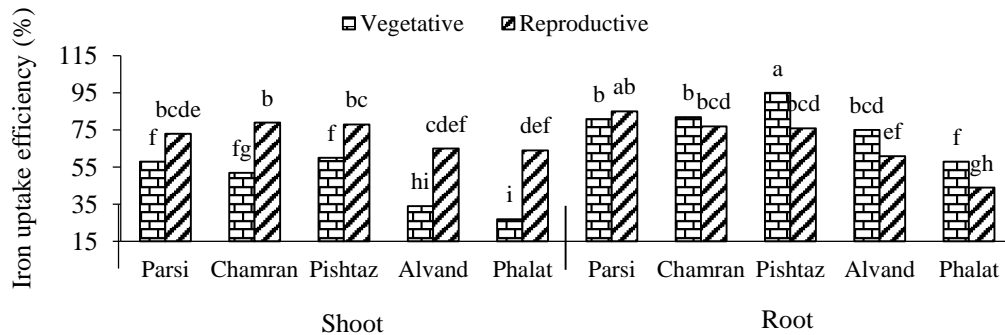
جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس شاخصهای آهن کارایی و کارایی جذب آهن قابل جذب ریشه و شاخساره

Table 9. The results of ANOVA for Fe efficiency and Fe uptake efficiency in the roots and shoots of cultivars

Source	df	Mean Square (MS)	
		Fe efficiency	Fe uptake efficiency
Stage (A)	1	9601.35**	984.15**
Organ (B)	1	252.15*	3067.35**
Cultivar (C)	4	392.22**	1768.69**
A*B	1	4.81 <sup>ns</sup>	4558.81**
A*C	4	183.64**	72.35 <sup>ns</sup>
B*C	4	321.02**	79.72 <sup>ns</sup>
A*B*C	4	400.44**	174.19**
Error	40	44.98	48.80
CV (%)		8.13	10.52

\*\* و \*: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، <sup>ns</sup>: غیرمعنی‌دار

\*\* , \* : are significant at P < 0.01, and 0.05, respectively, ns is non-significant.



شکل ۴- میزان کارایی جذب آهن قابل جذب در ریشه و شاخساره ارقام مختلف گندم نان در مراحل رویشی و زایشی

Figure 4. Fe uptake efficiency in the roots and shoots of different bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages

دو مرحله رویشی و زایشی کاهش معناداری یافت (شکل ۶). نتایج تجزیه واریانس صفت کلروفیل کل در جدول ۱۰ ارائه شده است. غفاری و رزمجو ( Ghafari & Razmjoo, 2013) گزارش کردند کاربرد نانوآکسید آهن بر مقدار کلروفیل a, b و کلروفیل کل گیاه گندم در مقایسه با شاهد افزایش معناداری نشان می‌دهد. ماسونیک و همکاران (Masonic *et al.*, 1996) اثر کمبود آهن بر گیاهان

#### کلروفیل کل

در این تحقیق، میزان کلروفیل کل ارقام گندم مورد مطالعه در مرحله زایشی نسبت به مرحله رویشی کاهش معناداری داشت. همچنین میزان کلروفیل کل ارقام پیشتاز، پارسی و چمران (آهن-کارا) در مقایسه با ارقام الوند و فلات (آهن-ناکارا) به طور معناداری بیشتر بود (شکل ۵). میزان کلروفیل کل کل تحت تنش کمبود آهن قابل جذب در هر

دخالت دارد. بنابراین، کمبود آهن یکی از عوامل مهم محدود کننده عملکرد گیاهان زراعی، کیفیت غذا و تغذیه انسان می‌باشد (Tabatabaei *et al.*, 2011).

آفتابگردان، ذرت، گندم و جو را بررسی و مشاهده کردند که کمبود آهن موجب کاهش کلروفیل و در نتیجه عملکرد و ماده خشک گیاه را نیز کاهش می‌دهد. آهن برای ساخت کلروفیل ضروری است و در تثبیت نیتروژن و انتقال الکترون

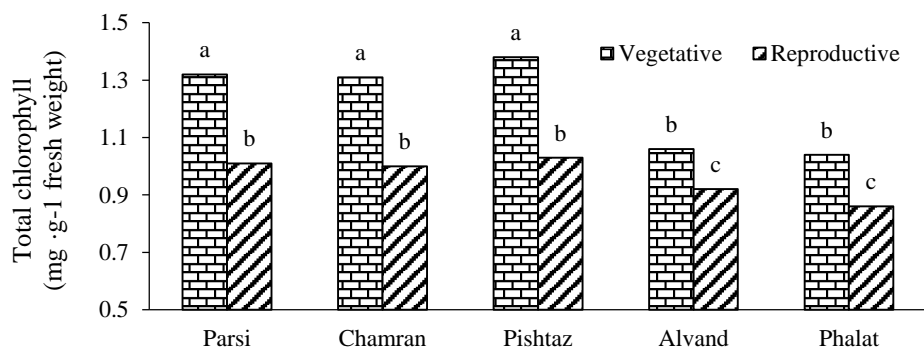
جدول ۱۰- نتایج تجزیه واریانس کلروفیل کل در ارقام مختلف گندم نان

Table 10. The results of ANOVA for total chlorophyll in different bread wheat cultivars

Source	Df	Mean Square (MS)		
		Chlorophyll a	Chlorophyll b	Total Chlorophyll
Iron Level (A)	1	0.2207**	0.0418**	0.2875**
Stage (B)	1	0.9889**	0.1195**	0.9907**
Cultivar (C)	4	0.1060**	0.0162**	0.1562**
A*B	1	0.0000 <sup>ns</sup>	0.0192**	0.0470*
A*C	4	0.0075*	0.0004 <sup>ns</sup>	0.0186**
B*C	4	0.0166**	0.0097**	0.0240**
A*B*C	4	0.0016 <sup>ns</sup>	0.0006 <sup>ns</sup>	0.0015 <sup>ns</sup>
Error	40	0.0025	0.0008	0.0049
CV (%)		4.87	5.79	6.42

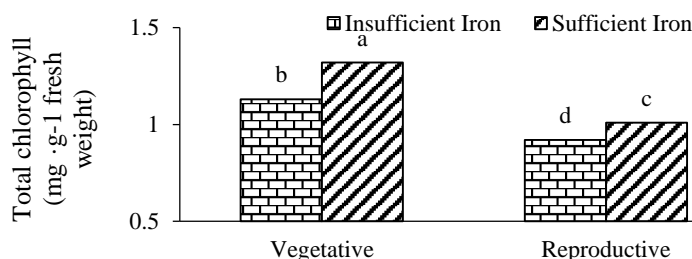
\*\* و \* : به ترتیب معنی دار در سطح یک و پنج درصد، <sup>ns</sup>: غیرمعنی دار

\*\* , \* : are significant at  $P < 0.01$ , and  $0.05$ , respectively, ns is non-significant.



شکل ۵- میزان کلروفیل کل برگ ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارا گندم نان در مراحل رویشی و زایشی

Figure 5. Total chlorophyll content in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages



شکل ۶- میزان کلروفیل کل در مراحل رویشی و زایشی در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب در ارقام مختلف گندم نان

Figure 6. Total chlorophyll content in vegetative and reproductive stages under iron deficiency and sufficiency conditions in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars

رویشی و زایشی ارقام کارا و ناکارا گندم نان مورد بررسی قرار گرفت که نتایج تجزیه واریانس در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

#### فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان

در این تحقیق فعالیت چهار آنزیم آنتی اکسیدان کاتالاز، گوئیکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش کمبود آهن در برگ و ریشه در مراحل

جدول ۱۱- نتایج تجزیه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در ارقام مختلف گندم نان

Table 11. The results of ANOVA for the activity of antioxidant enzymes in different bread wheat cultivars

Source	df	Mean Square (MS)			
		CAT	GPX	APX	SOD
Iron Level (A)	1	40.63**	10627.84**	347.82**	75877.55**
Stage (B)	1	4.45**	2341.80**	91.10**	22936.22**
Organ (C)	1	5.70**	516.21**	22.60**	4423.08**
Cultivar (D)	4	0.33**	39.32**	2.16**	358.69**
A*B	1	0.06**	6.51**	2.25**	7.47 <sup>ns</sup>
A*C	1	0.08**	4.61**	0.62**	0.014 <sup>ns</sup>
A*D	4	0.01**	0.14 <sup>ns</sup>	0.012 <sup>ns</sup>	1.10 <sup>ns</sup>
B*C	1	0.27**	0.045 <sup>ns</sup>	0.032*	68.49**
B*D	4	0.005 <sup>ns</sup>	0.052 <sup>ns</sup>	0.052**	2.81 <sup>ns</sup>
C*D	4	0.003 <sup>ns</sup>	0.35 <sup>ns</sup>	0.032**	14.40**
A*B*C	1	0.11**	0.28 <sup>ns</sup>	0.036*	4.33 <sup>ns</sup>
A*B*D	4	0.009**	0.096 <sup>ns</sup>	0.061**	6.21*
B*C*D	4	0.008**	0.27 <sup>ns</sup>	0.03*	8.92**
A*C*D	4	0.004 <sup>ns</sup>	0.030 <sup>ns</sup>	0.083**	13.36**
A*B*C*D	4	0.004 <sup>ns</sup>	0.28 <sup>ns</sup>	0.058**	0.24 <sup>ns</sup>
Error	80	0.0026	0.28	0.0087	2.18
CV (%)		3.13	1.65	2.29	0.58

\*\* و \* : به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، <sup>ns</sup> غیرمعنی‌دار

\*\*, \*: are significant at P &lt; 0.01, and 0.05, respectively, ns is non-significant.

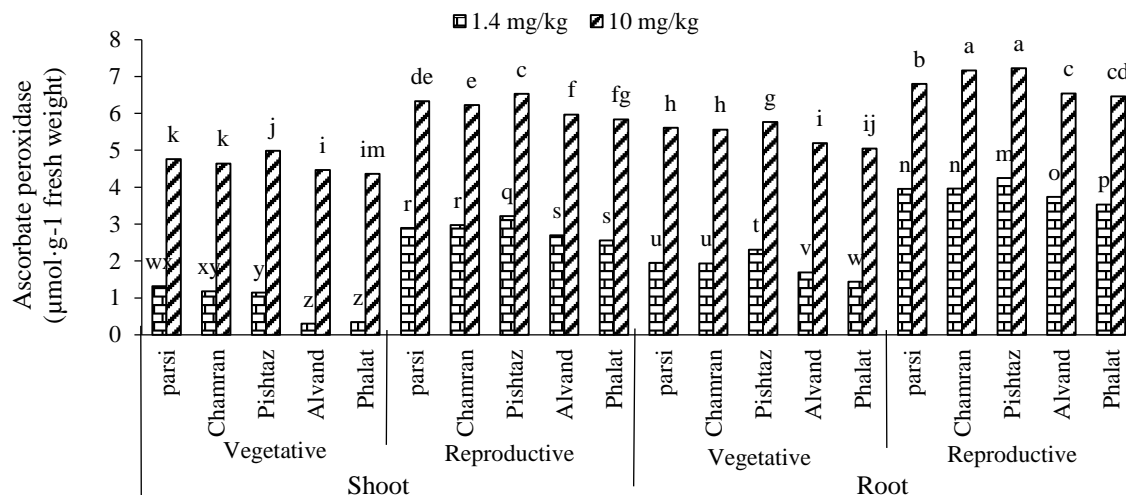
طرفی فعالیت این آنزیم در ارقام آهن-کارای گندم در مقایسه با ارقام آهن-ناکارای گندم نان به طور معناداری بیشتر بود (شکل ۸). همچنین فعالیت این آنزیم در مرحله زایشی کاهش معناداری یافت (شکل ۹) و در ریشه نسبت به اندام هوایی بطور معناداری بیشتر بود (شکل ۱۰). افزایش فعالیت آنزیم سوپراکساید دیسموتاز می‌تواند ناشی از افزایش رادیکال‌های آزاد سوپراکساید (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) در برگ‌های گیاه در شرایط کمبود آهن باشد (Sun *et al.*, 2007). در تحقیقی که توسط سلاما (Salama, 2009) در گیاه کتان صورت گرفت میزان فعالیت آنزیم سوپراکساید دیسموتاز تحت تنش کمبود آهن افزایش یافت.

#### آنزیم آسکوربات پراکسیداز

در این آزمایش، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در هر سه رقم آهن-کارای پیشتاز، پرسی و چمران در مقایسه با دو رقم آهن-ناکارای الوند و فلات افزایش معناداری نشان داد. همچنین فعالیت این آنزیم در ریشه نسبت به شاخساره و در مرحله زایشی نسبت به رویشی افزایش معناداری داشت (شکل ۷). رانی پری و همکاران (Ranieri *et al.*, 2001) نشان دادند که فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه آفتابگردان در شرایط کمبود آهن در هر دو سطح درون و بیرون سلولی بطور معناداری کاهش می‌یابد.

#### آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

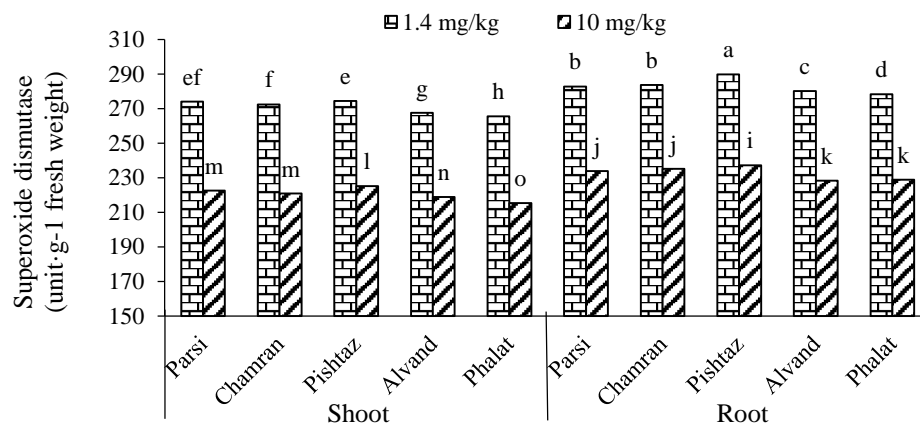
در این مطالعه، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش کمبود آهن قابل جذب افزایش معناداری پیدا کرد. از



شکل ۷- فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در ریشه و شاخساره ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب در مراحل رویشی و زایشی

Figure 7. The activity of ascorbate peroxidase enzyme in the roots and shoots of Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in iron deficiency and sufficiency conditions in vegetative and reproductive stages

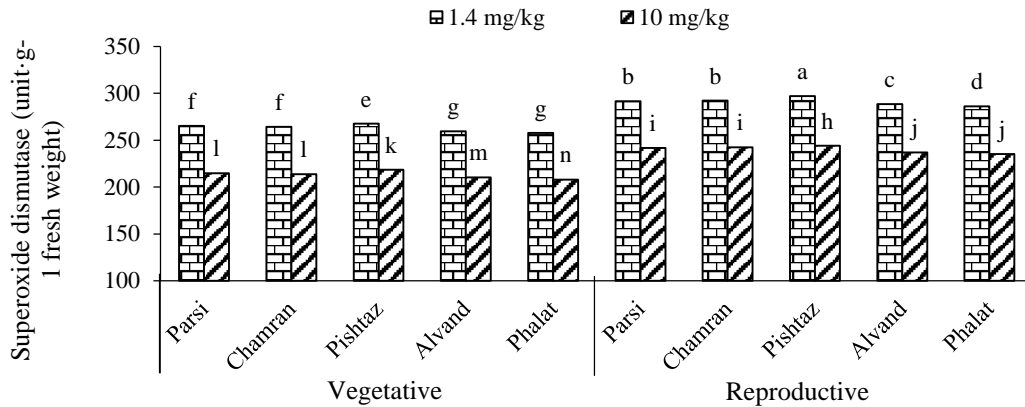
1.4 mg kg<sup>-1</sup>=insufficient iron; 10 mg kg<sup>-1</sup>=sufficient iron



شکل ۸- فعالیت آنزیم سوپراکساید دیسموتاز در ریشه و شاخساره ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب

Figure 8. The activity of superoxide dismutase enzyme in roots and shoots of Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in iron deficiency and sufficiency conditions

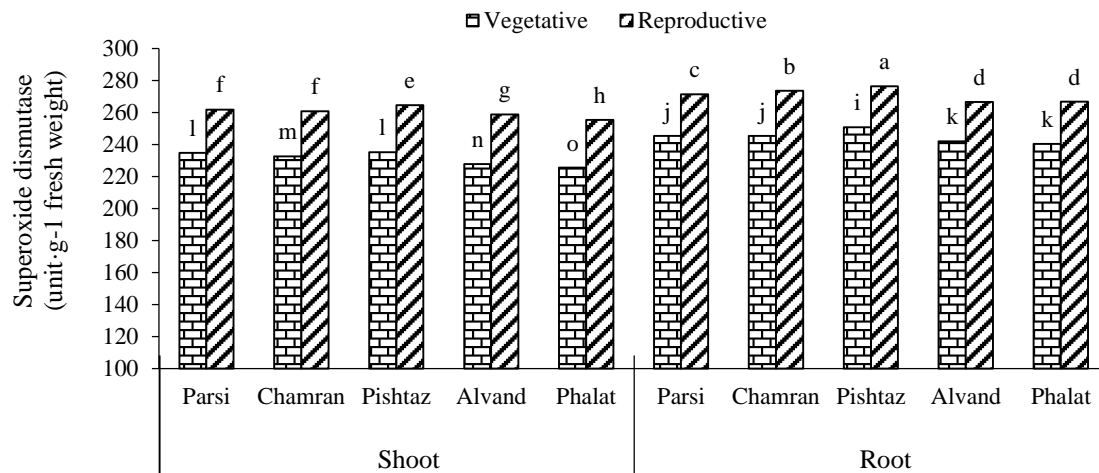
1.4 mg kg<sup>-1</sup>=insufficient iron; 10 mg kg<sup>-1</sup>=sufficient iron



شکل ۹- فعالیت آنزیم سوپراکساید دیسموتاز در مرحله رویشی و زایشی در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب

Figure 9. The activity of superoxide dismutase enzyme in vegetative and reproductive stages of Fe-efficient and inefficient bread wheat cultivars in iron deficiency and sufficiency conditions

۱۰ mg kg<sup>-1</sup> آهن ناکافی؛ ۱۰ mg kg<sup>-1</sup> آهن کافی  
1.4mg/kg=insufficient iron; 10 mg/kg=sufficient iron



شکل ۱۰- فعالیت آنزیم سوپراکساید دیسموتاز در ریشه و شاخساره ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در مراحل رویشی و زایشی

Figure 10. The activity of superoxide dismutase enzyme in roots and shoots of Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages

لیتر فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش می‌یابد. میر بلوک و همکاران (Mirbolook *et al.*, 2020) نشان دادند که با مصرف آهن در خاک، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در شاخساره گیاه لوبیا افزایش پیدا کرد. معاونی (Moaveni, 2014) گزارش نمود که غلظت کاتالاز در تیمار ۰/۰۳ درصد نانو آهن در گیاه سورگوم حداکثر افزایش را نشان داد. احتمالاً این افزایش به علت توانایی گیاه در ذخیره‌سازی بیشتر آهن آزاد شده از نانو آهن می‌باشد و بهترین ساز و کار جذب آهن از سمت ریشه به ساقه رخ داده بود (Moaveni, 2014).

#### آنزیم کاتالاز

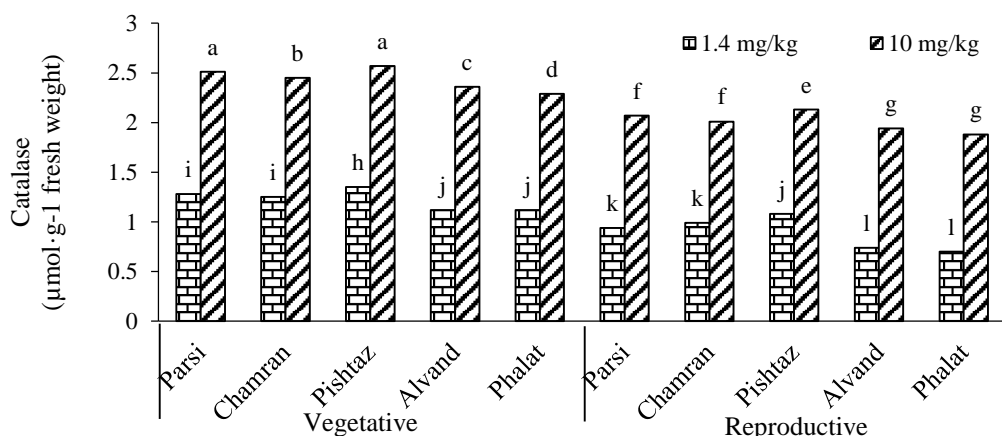
در این تحقیق، تحت شرایط کمبود آهن قابل جذب خاک، فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معناداری کاهش یافت. البته فعالیت این آنزیم در ارقام پیش‌تاز، پارسی و چمران (ارقام آهن-کارا) به‌طور معناداری بیشتر بود (شکل ۱۱). از طرف دیگر فعالیت آنزیم کاتالاز در ریشه نسبت به شاخساره به‌طور معناداری افزایش یافت (شکل ۱۲). همچنین در مرحله زایشی، فعالیت آنزیم کاتالاز در مقایسه با مرحله رویشی به‌طور معناداری کاهش یافت (شکل ۱۳). گلشاهی و همکاران (Golshahi *et al.*, 2017) گزارش کردند در گیاه سورگوم با افزایش سطح آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در

این آنزیم در ارقام آهن-کارا نسبت به ارقام آهن-ناکارای گندم نان در این تحقیق به طور معناداری کمتر کاهش یافت (شکل ۱۶).

رانی یری و همکاران (Ranieri *et al.*, 2001) توقف فعالیت آنزیم پراکسیداز را در آفتابگردان در شرایط کمبود آهن گزارش کردند. کمبود آهن، همواره موجب از بین رفتن کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست و کاهش فعالیت آنزیم‌های اکسیداز نظیر کاتالاز و پراکسیداز می‌گردد (Zuo & Zhang, 2011).

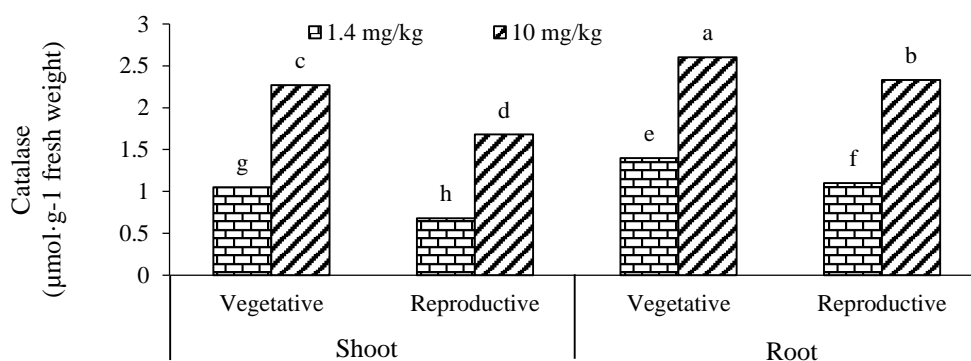
### آنزیم گایاکول پراکسیداز

در این پژوهش، فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در شرایط فقر آهن قابل جذب خاک در ریشه و اندام هوایی ارقام کاهش معناداری نشان داد. همچنین در هر دو تیمار کمبود و کفایت آهن قابل جذب، فعالیت این آنزیم در ریشه در مقایسه با شاخساره افزایش یافت (شکل ۱۴). فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در شرایط فقر آهن قابل جذب خاک در هر دو مرحله رویشی و زایشی کاهش معناداری پیدا کرد. همچنین در هر دو شرایط، فعالیت این آنزیم در مرحله زایشی کاهش معناداری یافت (شکل ۱۵). همچنین فعالیت



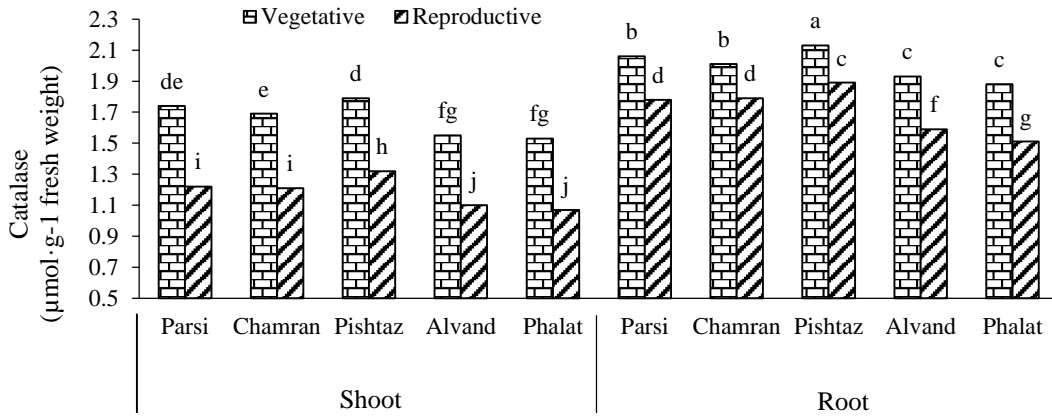
شکل ۱۱- فعالیت آنزیم کاتالاز در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب در مراحل رویشی و زایشی

Figure 11. The activity of catalase enzyme in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars under iron deficiency and sufficiency conditions in vegetative and reproductive stages

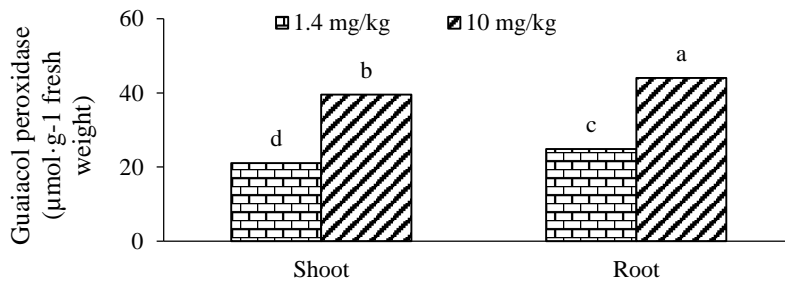


شکل ۱۲- فعالیت آنزیم کاتالاز در ریشه و شاخساره ارقام مختلف گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن در مراحل رویشی و زایشی

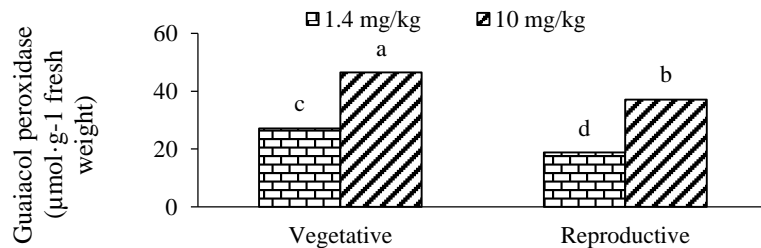
Figure 12. The activity of catalase enzyme in the roots and shoots of different bread wheat cultivars under iron deficiency and sufficiency conditions in vegetative and reproductive stages



شکل ۱۳- فعالیت آنزیم کاتالاز در ریشه و شاخساره ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در مراحل رویشی و زایشی  
 Figure 13. The activity of catalase enzyme in roots and shoots of Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages

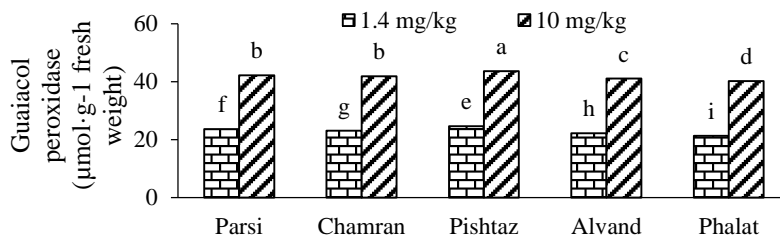


شکل ۱۴- فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در ریشه و شاخساره ارقام مختلف گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب  
 Figure 14. The activity of guaiacol peroxidase enzyme in the roots and shoots of different bread wheat cultivars under iron deficiency and sufficiency conditions



شکل ۱۵- فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب در مراحل رویشی و زایشی در ارقام مختلف گندم نان

Figure 15. The activity of guaiacol peroxidase enzyme in the vegetative and reproductive stages in different bread wheat cultivars in iron deficiency and sufficiency conditions



شکل ۱۶- فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود و کفایت آهن قابل جذب  
 Figure 16. The activity of guaiacol peroxidase enzyme in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars in iron deficiency and sufficiency conditions



## نتیجه گیری کلی

در این تحقیق از لحاظ شاخص آهن کارایی، رقم پیشتاز بیشترین و رقم فلات کمترین مقدار را نشان دادند. ارقام آهن-کارای گندم نان در مقایسه با ارقام آهن-ناکارای گندم نان از لحاظ صفات طول ساقه، طول خوشه، تعداد خوشه، طول ریشک، تعداد سنبلچه، طول پدانکل، تعداد دانه سنبلچه و وزن هزاردانه عملکرد بهتری داشتند. با افزایش میزان آهن قابل جذب خاک، محتوی آهن بذر گندم نیز افزایش یافت و ارقام آهن-کارای پیشتاز و پارسا بیشترین و رقم آهن-ناکارای فلات کمترین میزان غلظت و محتوی آهن را دارا بودند. بیشترین میزان آهن کارایی در شاخساره رقم پیشتاز در مرحله زایشی و بیشترین میزان کارایی جذب

آهن قابل جذب در ریشه همین رقم در مرحله رویشی مشاهده گردید. میزان کلروفیل کل ارقام مورد مطالعه در شرایط کمبود آهن قابل جذب در مرحله زایشی نسبت به مرحله رویشی کاهش معناداری داشت. فعالیت آنزیمهای کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تحت تنش کمبود آهن قابل جذب کاهش یافته در صورتی که فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش معناداری یافت. در ادامه تحقیق حاضر پیشنهاد می شود به منظور درک بهتر ساز و کار جذب و انتقال آهن در ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای گندم نان، بیان ژنهای دخیل در جذب و انتقال آهن در این ارقام در گندم نان در شرایط کمبود آهن مطالعه شود.

## Reference

- Aebi H. 1984. Catalase *in vitro*. *Methods in enzymology*, 105: 21-126.
- Ahmadi A., Ehsanzadeh P., and Jabbari F. 2005. Introduction to plant physiology. Tehran University Press. 681p. (In Persian)
- Amirjani M., Askari mehrabadi M., and Azizmohamadi, F. 2016. Effects of zinc oxide nanoparticles on vegetative factors, elements content and photosynthetic pigments of wheat (*Triticum aestivum*). *Iranian Journal of plant biology*, 8 (77): 33-48. (In Persian)
- Arazmjoo E., Behdani M.A, Mahmoodi S., and Sadeghzadeh B. 2018. Response of Some Bread Wheat Cultivars to Foliar Application of Zn and Fe Different Forms in Two Locations with Different Soil Properties. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 16 (49): 203-216. (In Persian)
- Arnon D. 1949. Copper enzymes isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1-15.
- 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 Soil and Plant Interactions*, 3 (10): 17-32. (In Persian)
- Balali M.R., and Malakouti M.J. 2002. Effects of different methods of micronutrient application on uptake of nutrients by wheat grains in 10 provinces. *Soil Science*, 15(2): 1-11. (In Persian)
- Beauchamp C., and Fridovich I. 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1): 276-287.
- 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: 295-312.
- Blakrishman K. 2000: Peroxidase activity as an indicator of the iron deficiency banana. *Indian Journal of Plant Physiology*, 5: 389-391.
- Borbori M.R., Eradatmand Asli D., and Tehrani M.M. 2011. The effect of the amount and different methods of iron and copper consumption on the quantitative and qualitative yield of wheat (*Triticum aestivum* L.), the Pishtaz cultivar, under greenhouse conditions. *Crop Ecology Quarterly*, 4 (7): 11-19. (In Persian)
- Cakmak I., Sari N., Marschner H., Yilmaz M., Ekiz S., and Gulut K.Y. 1996. Dry matter production and distribution of zinc in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. *Plant and Soil*, 180: 173-181.
- Chegeni H. 2014. Effect of plant density on yield and yield components of wheat cultivars. *Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi)*, 27 (104): 9-21. (In Persian)
- Clark R.B. 1983. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation, and use of mineral elements required for plant growth. *Plant Soil*, 72: 175-196.
- Demirkiran A.R. 2009. Determination of Fe, Cu and Zn contents of wheat and corn grains from different growing sites. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 8 (8): 1563-1567.
- Esfandiari E., and Sabaghnia N. 2012. The effect of Fe-deficiency on antioxidant enzymes' activity and lipid peroxidation in wheat leaves. *Agronomy Science*, 67 (4): 26-34.

- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-Size Analysis. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 383-411.
- Ghafari H., and Razmjoo J. 2013. Effect of Foliar Application of Nano-iron Oxidase, Iron Chelate and Iron Sulphate Rates on Yield and Quality of Wheat. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(11): 2997-3003.
- Gibbson R.S. 2006. Zinc: the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65 (1): 51-60.
- Golshahi S., Gholamalizadeh Ahangar A., Mir N., and Ghorbani M. 2017. The Effect of Foliar Application of Iron Sources on Growth Parameters, Iron Concentration and Activity of Some Enzymes of Sorghum. *Journal of Water and Soil*, 31 (5): 1467-1480. (In Persian)
- Graham R.D., Ascher J.S., and Hynes S.C. 1992. Selecting zinc-efficient cereal genotype for soils of low zinc status. *Plant and Soil*, 146: 241-250.
- Hemantaranjan A., and Garg O.K. 1988. Iron and Zinc fertilization with reference to the grain quality *Triticum aestivum* L. *Journal of Plant Nutrition*, 11:1439-1450.
- Kamaraki H., and Galavi M. 2012. Evaluation of foliar Fe, Zn and B micronutrients application on quantitative and qualitative traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Agroecology*, 4 (3): 201-206. (In Persian)
- Keshavars P. forouhar M., and Dadivar M. 2017. Application and Fertilization Efficiency of Iron in Some Wheat Genotypes. *Journal of Water and Soil*, 31 (5): 1423-1431. (In Persian)
- Khakzar E., Khorassani R. and Halajnia, A. 2024. Effect of different types of organic waste and their composts on iron availability from the source of iron oxide and nutrient uptake and plant growth of wheat. *Applied Soil Research*, 11(4):95-111. (In Persian)
- Khoshgoftar Manesh A.H., Razizade E., Eshghizade H.R., Sharifi H.R., Savaghebi, G.R., Afyoini D., and Tadayonnejad M. 2012. Comparison of different spring wheat cultivars in terms of response to iron fertilization in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science*, 15 (58): 99-107. (In Persian)
- Klute A. 1986. Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods 2nd Ed. ASA. Soil Science Society of America Madison Wisconsin, USA.
- Ksouri R., Debez A., Mahmoudi H., Ouerghi Z., Gharsalli M., and Lachaa M. 2007. Genotypic variability within Tunisian grapevine varieties (*Vitis vinifera* L.) facing bicarbonate-induced iron deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45: 315-322.
- Lindsay W.L., and Norwell W.A. 1960. Development of a DTPA micronutrient soil test, *Agronomy Abstracts*, 1969: 84-93.
- Mahmoudi H., Ksouri R., Gharsalli M., and Lachaal M. 2005. Differences in responses to iron deficiency between two legumes: Lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). *Journal of Plant Physiology*, 162(11):1237-1245.
- Malakoti M., Moshiri F., and Gheybi M.N. 2005. Optimal concentration of nutrients in soil and some agricultural and garden products. Technical Journal No. 405, Sana Publications. (In Persian)
- Marschner H., Romheld V., and Kissel M. 1995. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. *Journal of Plant Nutrition*, 9: 695-713.
- Masonic A., Evacoli A., and Mavoti M. 1996. Spectral of leaves deficient in iron sulphur, magnesium and manganese. *Agronomy Journal*, 88 (6): 937-943.
- Mendoza A.B. 1999. Absorption and Assimilation of Iron in Plant. Departamento De Horticultura, Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro. Translation by Roger Miller. Available in electronic address: <http://home.infinet.net/teban/iron/ironw.html>.
- Mirbolook A., Rasouli-Sadaghiani MH., Sepehr E., Lakzian A., and Hakimi M. 2020. Effect of iron chelates and their application methods on iron nutrition status of bean plant (*Phaseolus vulgaris*) in a calcareous soil. *Applied Soil Research*, 8(3): 109-128. (In Persian)
- Moaveni P. 2014. Study the priming of nano iron on biochemical traits of Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.). *Data Management Association (DAMA) International*, 3 (2): 102-108. (In Persian)
- Nakano Y., and Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Journal of Plant Cell Physiology*, 22: 867-880.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Buxton, D.R. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part II, 2nd edn. Monograph, No. 9, ASA, Madison, WI, pp. 539-579.

- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture circular 939. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Raese N., Vakili S.M. A., Sarhady G., and Rorkynegad F. 2015. Effects of manure, iron and zinc fertilizers on yield and yield components of Cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31 (1): 138-149. (In Persian)
- Rahemi S., Khorassani R., and Halajnia A. 2014. Uptake Efficiency of Iron in Different Wheat Varieties. *Journal of Water and Soil*, 28 (3): 556- 564. (In Persian)
- Ranieri A., Castagna A., Baldan B., and Soldatini G.F. 2001. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. *Journal of Experimental Botany*, 52: 25–35.
- Ruiz J.M., Baghour M., and Romers L. 2000: Efficiency of the different genotypes of tomato in relation to foliar content of Fe and the response of some bioindicators. *Journal of Plant Nutrition*, 23: 1777-1786.
- Salama Z., El-Beltagi H., and El-Hariri D.M. 2009. Effect of Fe Deficiency on Antioxidant System in Leaves of Three Flax Cultivars, *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37 (1): 122-128.
- Sun B., Jing Y., Chen K., Song L., Chen F., and Zhang L. 2007. Protective effect of nitric oxide on iron deficiency-induced oxidative stress in maize (*Zea mays*). *Journal of Plant Physiology*, 164:536-543.
- Tabatabaei S.S., Razazi A., Khoshgoftarmanesh A.H., Khodaeian N., and Mehrabi Z. 2011. Effect of Fe- deficiency on uptake, concentration and translocation of Fe, Zn and Mn in some plants with different Fe- efficiency in hydroponics culture. *Journal of Water and Soil*, 25: 728-735. (In Persian)
- Welch R.M., Allaway W.H., House W.A., and Kubota J. 1991. Geographic distribution of trace element problems. In: Mortvedt, J.J., F.R. Cox, L.M. Shuman, R.M. Welch. (Ed), *Micronutrients in agriculture*, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 31–57.
- Yousefi S., Rabhi M., Abdelly C., and Gharsalli M. 2009. Iron deficiency tolerance traits in wild (*Hordeum maritimum*) and cultivated barley (*Hordeum vulgare*). *Comptes Rendus Biologies*, 332 (6): 523-533.
- Ziaeian A., and Malakoti M. 2000. Greenhouse investigation of iron, manganese, zinc and copper consumption on wheat production in highly calcareous soils. *Journal of Soil and Water Sciences*, 12 (6): 36-45.
- Ziaeyan A.H., and Malakouti M.J. 2001. Determination of critical level of iron (Fe) in wheat farms and its effects on the yield and grain fortification in highly Calcareous soils of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Sciences*, 12 (13): 45-56. (In Persian)
- Zuo Y., and Zhang F. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil*, 339: 83-93.