

Research Paper

The Effect of Iron Deficiency Stress on the Relative Expression of *ZIP3*, *ZIP6*, and *ZIP7* Genes in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars

Saeed Rezaei Musa Dargh¹, Babak Abdollahi Mandoulakani²  and
Raheleh Ghasemzadeh³

1- MSc student of Agricultural Biotechnology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran,
(Corresponding author: b.abdollahi@urmia.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 25 November, 2023

Accepted: 10 March, 2024

Extended abstract

Background: Bread Wheat is the most extensively cultivated wheat and one of the four major crops in the world that constitutes the principal food of more than 30% of the world population. Biotic and abiotic environmental stressors are major factors limiting plant growth and productivity, which play a significant role in determining the yield and production potential of plants by affecting morphological, physiological, biochemical, and molecular processes. Among the abiotic stresses, the deficiency of micronutrients in the soil is important. Micronutrients regulate food metabolism in humans, and their deficiency endangers human health. Iron and zinc are essential micronutrients for human health and cofactors of many vital enzymes involved in many human metabolic processes. In plants, iron is the most required element among all micronutrients. It is a part of the catalytic group of many oxidation and reduction enzymes and is required for chlorophyll synthesis. To facilitate the adequate uptake and prevent excessive absorption of iron, plants have developed a balanced network to regulate the uptake, use, and storage of ions. In fact, such adjustment processes depend on genes that regulate ion homeostasis in plants. Due to the existence of a large allohexaploid genome and technical challenges in wheat transformation, few genes involved in iron and zinc uptake, transfer, and storage have been characterized functionally. Considering the important role of ZIP proteins in iron uptake efficiency, investigating the expression of the ZIP genes in Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars can be effective in improving Fe-efficient cultivars in this valuable crop. Therefore, this research aimed to evaluate the expression of ZIP3, ZIP6, and ZIP7 genes in the leaves and roots of two Fe-efficient and -inefficient bread wheat cultivars at different growth stages under iron deficiency stress.

Methods: This research was carried out in a completely randomized design (CRD) based on a factorial experiment with three replications in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Urmia University. The first factor was two Fe-efficient (Pishtaz) and -inefficient (Flat) bread wheat cultivars, the second factor was two soil iron levels (iron deficiency and sufficiency, respectively, 1.4 and 10 mg/kg of soil), and the third factor was two sampling stages (vegetative and reproductive, respectively, one month after planting and 30% heading). To evaluate the expression of genes, the roots and leaves of the plants were sampled at each growth stage. The seeds were obtained from the Iranian Seed and Plant Improvement Institute, disinfected with 1% hydrogen peroxide, and planted at a depth of 4 cm in the soil. The plants were irrigated using distilled water to the extent of field capacity during the growing period.

Results: The results of variance analysis of the relative expression of all three studied genes showed that the interaction effect of cultivar × organ × sampling stage was significant at the probability level of 1%. The comparison of the means for the cultivar × organ × sampling stage interaction effect revealed the highest ZIP3 expression in the roots of the Fe-efficient cultivar (Pishtaz) in the vegetative and reproductive stages. The relative expression of this gene was higher in the roots of the Fe-inefficient cultivar (Falat) than that of the Fe-efficient cultivar (Pishtaz). However, the Fe-inefficient cultivar (Falat) showed the highest relative expression increase in the leaf in both reproductive and vegetative stages, but the difference in the gene



expression level in the leaf between the two growth stages was not statistically significant. The lowest gene expression level in the leaf belonged to the Pishtaz cultivar. The comparison of the means of cultivar $\times$ organ $\times$ sampling stage for the *ZIP6* gene indicated an increase in the relative expression of this gene in the roots of the Fe-efficient (Pishtaz) and -inefficient (Falat) varieties in the vegetative and reproductive stages, respectively. The comparison of the means of cultivar $\times$ organ $\times$ sampling stage for the *ZIP7* gene indicated the highest relative expression of this gene in the roots of the Fe-efficient cultivar (Pishtaz) at the vegetative stage. The relative expression level of this gene in the root of the Fe-efficient variety in the vegetative stage was significantly higher than that in the reproductive stage. In both vegetative and reproductive stages in the leaf, the increase in gene expression was higher in the Fe-inefficient cultivar.

Conclusion: The increased *ZIP3* expression in iron deficiency conditions in the roots of the Fe-efficient cultivar at the vegetative stage demonstrates the possible role of this gene in Fe uptake from the soil and its transfer to the aerial parts of the plant in the early growth phase. The *ZIP6* gene was expressed in both roots and leaves throughout the entire growth period of the plant. However, the expression level of this gene increased with the age of the plant. Therefore, the *ZIP6* gene is probably responsible for Fe uptake and transport to different organs throughout the entire growth period of the plant and plays an important role in preserving iron in iron deficiency conditions. The *ZIP7* gene is expressed in both leaves and roots in iron deficiency conditions, but the level of expression is higher in the roots of the Fe-efficient variety during the vegetative stage. This gene may be involved in iron uptake from the soil and its transfer to aerial organs.

Keywords: Bread wheat, Iron deficiency, Micronutrients, Real-time PCR

How to Cite This Article: Rezaei Musa Dargh, S., Abdollahi Mandoulakani, B., & Ghasemzadeh, R. (2024). The Effect of Iron Deficiency Stress on the Relative Expression of *ZIP3*, *ZIP6*, and *ZIP7* Genes in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *J Crop Breed*, 16(3), 52-63. DOI: 10.61186/jcb.16.3.52



مقاله پژوهشی

تاثیر تنش کمبود آهن بر بیان نسبی ژن های ZIP3 ، ZIP6 و ZIP7 در گندم نان (*Triticum aestivum* L.)سعید رضائی موسی درق^۱، بابک عبدالهی مندولکانی^۲ و راحله قاسم زاده^۳

۱- دانش آموخته رشته بیوتکنولوژی کشاورزی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، (نویسنده مسوول: b.abdollahi@urmia.ac.ir)
 ۳- استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۴

صفحه: ۵۲ تا ۶۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: گندم نان (*Triticum aestivum* L.) گسترده ترین گونه ی گندم و یکی از چهار محصول عمده در جهان است که غذای اصلی بیش از ۳۰ درصد مردم جهان را تشکیل می دهد. تنش های غیرزیستی مهم ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید محصول و کاهش عملکرد می باشند که با تأثیر روی فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی نقش قابل توجهی در تعیین پتانسیل عملکرد و تولید گیاهان دارند. از تنش های غیرزیستی می توان به کمبود عناصر کم مصرف در خاک اشاره کرد. عناصر کم مصرف متابولیسم موادغذایی در بدن انسان را تنظیم می کنند و کمبودشان سلامت انسان را به خطر می اندازد. آهن و روی از جمله عناصر کم مصرف ضروری برای سلامت انسان هستند و به عنوان عوامل کمکی بسیاری از آنزیم های حیاتی، در بسیاری از فرآیندهای متابولیک انسان نقش دارند. در گیاهان نیز عنصر آهن بیشترین عنصر مورد نیاز در بین تمام عناصر کم مصرف می باشد. آهن بخشی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم های اکسیداسیون و احیا بوده و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز می باشد. برای تسهیل در جذب کافی آهن و برای جلوگیری از جذب بیش از حد، گیاهان یک شبکه متعادل برای تنظیم جذب، استفاده و ذخیره یون ها ایجاد کرده اند. در واقع چنین تنظیماتی به ژن هایی بستگی دارد که هموستازی یون ها را در گیاهان تنظیم می کنند. در گندم به دلیل وجود ژنوم بزرگ آلوپلوئید و چالش های فنی در ترانسفورماسیون، تعداد کمی از ژن های دخیل در جذب، جابجایی و ذخیره سازی آهن و روی از نظر عملکردی مشخص شده اند. با توجه به نقش مهم پروتئین های ZIP در کارایی ارقام نسبت به جذب آهن، مطالعه بیان ژن های مذکور در ارقام گندم نان آهن-کارا و آهن-ناکارا می تواند در اصلاح ارقام آهن-کارا در این محصول مؤثر باشد. بنابراین هدف از این تحقیق، مطالعه بیان ژن های ZIP3 ، ZIP6 و ZIP7 در برگ و ریشه دو رقم گندم نان آهن-کارا و آهن-ناکارا در مراحل مختلف رشدی تحت تنش کمبود آهن بود.

مواد و روش ها: این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه اجرا شد. فاکتور اول شامل دو رقم گندم نان آهن-کارا (پیشکار) و آهن-ناکارا (فلات)، فاکتور دوم شامل دو سطح آهن خاک (کمبود و کفایت آهن به ترتیب ۱/۴ و ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) و فاکتور سوم شامل دو مرحله نمونه برداری (رویشی و زایشی به ترتیب یک ماه بعد از کشت و ۳۰ درصد خوشه دهی) بود. برای ارزیابی بیان ژن ها، نمونه برداری در هر مرحله رشدی از ریشه و برگ گیاهان انجام شد. بذور از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر ایران تهیه و بعد از ضدعفونی با آب اکسیژنه یک درصد، در عمق ۴ سانتی متری خاک کاشته شد. آبیاری در طول فصل رشد، با استفاده از آب مقطر در حد ظرفیت زراعی انجام شد.

یافته ها: نتایج تجزیه واریانس بیان نسبی هر سه ژن مورد مطالعه نشان داد که اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه برداری در سطح احتمال یک درصد معنی دار می باشد. براساس نتایج مقایسه میانگین برهمکنش رقم × اندام × مرحله نمونه برداری برای ژن ZIP3 بیشترین افزایش بیان نسبی ژن در ریشه رقم آهن-کارای پیشکار در مرحله رویشی مشاهده شد و در مرحله زایشی میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-ناکارای فلالت بیشتر از رقم آهن-کارای پیشکار بود. ولی در برگ، رقم آهن-ناکارای فلالت بیشترین افزایش بیان نسبی در هر دو مرحله زایشی و رویشی را به خود اختصاص داد ولی اختلاف میزان بیان ژن در برگ بین دو مرحله نمونه برداری از نظر آماری معنی دار نبود و کمترین میزان بیان ژن در برگ مربوط به رقم پیشکار بود. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه برداری برای ژن ZIP6 حاکی از افزایش میزان بیان نسبی ژن ZIP6 در ریشه رقم آهن-کارای پیشکار در مرحله رویشی و رقم آهن-ناکارای فلالت در مرحله زایشی بود. بیشترین میزان افزایش بیان نسبی این ژن در ریشه رقم پیشکار در مرحله رویشی و ریشه رقم فلالت در مرحله زایشی مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه برداری برای ژن ZIP7 نشان داد که بیشترین میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-کارای پیشکار در مرحله رویشی مشاهده شد. همچنین میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-کارا در مرحله رویشی به طور معنی داری بیشتر از مرحله زایشی می باشد. در هر دو مرحله رویشی و زایشی در برگ میزان افزایش بیان ژن در رقم آهن-ناکارای فلالت بیشتر بود.

نتیجه گیری: با افزایش بیان ژن ZIP3 در شرایط کمبود آهن در مرحله رویشی در ریشه رقم آهن-کارا نسبت به برگ احتمال می رود نقش اصلی این ژن، در جذب آهن از خاک و انتقال آن به اندام هوایی در اوایل دوره رشدی در شرایط کمبود آهن باشد. ژن ZIP6 در هر دو اندام ریشه و برگ در کل دوران رشدی گیاه بیان می شود با این تفاوت که با افزایش سن گیاه، میزان بیان هم بیشتر می شود. بنابراین ژن ZIP6 احتمالاً وظیفه جذب و انتقال آهن در اندام های مختلف، در کل دوره رشدی گیاه را برعهده دارد و نقش مهمی را در حفظ آهن در شرایط کمبود آن ایفا می کند. ژن ZIP7 تحت شرایط کمبود آهن در هر دو اندام برگ و ریشه بیان می شود ولی در ریشه در مرحله رویشی در رقم آهن-کارا این میزان بیان بیشتر می باشد و احتمال می رود این ژن در جذب آهن از خاک و انتقال آن به اندام های هوایی شرکت دارد.

واژه های کلیدی: عناصر کم مصرف، کمبود آهن، گندم نان، واکنش زنجیره ای پلیمرز در زمان واقعی

مقدمه

محصول عمده در جهان است که غذای اصلی بیش از ۳۰ درصد مردم جهان را تشکیل می دهد و در ۱۷ درصد از زمین های زراعی جهان کشت شده و ۳۵ درصد از انرژی و پروتئین جیره غذایی انسان را تشکیل می دهد (FAO, 2017; Khavarinejad and Babajanov, 2011). گندم گیاهی است خودگردانه افشان که در عرض های جغرافیایی ۶۰-۳۰

غلات نقش مهمی در تأمین غذای جهان برعهده دارند که در این بین گندم مهم ترین محصول مورد کشت به شمار می رود (Kasirajan et al., 2013). گندم نان (*Triticum aestivum* L.) گسترده ترین گونه ی گندم و یکی از چهار

کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا بوده و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز می‌باشد (Taiz and Zeiger, 2002). طبق تحقیقات انجام‌شده توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب در ایران کمبود عناصر کم‌مصرف، خصوصاً آهن در مزارع و باغ‌ها شیوع دارد. زیر کشت بودن توام و پی‌درپی اراضی، کشت ارقام پرمحصول و پرتوقع، مصرف بیش از حد و نامتعادل کودهای شیمیایی خصوصاً کود نیتروژن و فسفر از عواملی هستند که باعث شدند علائمی نظیر کمبود عناصر کم‌مصرف و کاهش عملکرد در گیاهان بروز کند (Rahemi et al., 2014). از طرف دیگر در طول چند دهه گذشته، افزایش بازده محصولات برای تغذیه جمعیت روبه‌رشد انسان، کانون توجه اصلاح نباتات بوده است که ارقام زراعی مدرن با عملکرد بالا تولید کرده است ولی یک عارضه جانبی ناگوار، محتوای کم عناصر کم‌مصرف در این محصولات است. علاوه بر این، آسیاب کردن، لایه آلورون را که حاوی مقدار زیادی آهن و روی است، از بین می‌برد. بنابراین، آهن و روی برنج صیقل داده‌شده و آرد سفید بسیار کمتر است (Brier et al., 2020; Hensawang et al., 2015). برنج و گندم غذاهای اصلی غالب هستند که بیش از نیمی از جمعیت انسانی جهان را تغذیه می‌کنند (Fitzgerald et al., 2009). اتفاقاً این دو محصول، غذاهای اصلی اکثر افرادی هستند که کمبود آهن و روی دارند (Kiely, 2021; Satyavathi et al., 2021).

برای تسهیل در جذب کافی آهن و برای جلوگیری از جذب بیش از حد، گیاهان یک شبکه متعادل برای تنظیم جذب، استفاده و ذخیره یون‌ها ایجاد کرده‌اند. در واقع چنین تنظیماتی به ژن‌هایی بستگی دارد که هموستازی یون‌ها را در گیاهان تنظیم می‌کنند (Grotz and Gueriot, 2006). یکی از دلایل تفاوت در توانایی گیاهان مختلف در جذب آهن، ممکن است مربوط به اختلاف آنها در تعداد و نوع پروتئین‌های ناقل آهن در ریشه باشد (Ashrafzadeh and Abdollahi Mandoulakani, 2023; Teymouri Rad et al., 2022). در سال‌های اخیر، تعدادی از ناقل‌های عناصر فلزی که در جذب و توزیع آهن در گیاهان دخالت دارند شناسایی شده‌اند. بیشتر خاک‌های قابل کشت در سراسر جهان از نظر میزان آهن، کمبود دارند که این کمبود در اصل ناشی از حضور آن در فرم‌های غیرقابل استفاده برای گیاه می‌باشد. به‌دلیل کمبود این عناصر در خاک‌های زراعی، توجه به نقش عناصر کم‌مصرف طی دهه‌های گذشته افزایش یافته است. برای حل مشکل کمبود آهن از استراتژی‌های متفاوتی استفاده شده است (Vert et al., 2002).

گیاهان از دو استراتژی متمایز برای عبور آهن از عرض غشای پلاسمایی در ریشه بهره می‌برند، استراتژی اول در گیاهان دولیه و تک‌لیپه‌ای غیرگرامینه و استراتژی دوم در گیاهان تک‌لیپه‌ای گرامینه استفاده می‌شود (Vert et al., 2002). استراتژی اول شامل احیا Fe^{3+} به Fe^{2+} در سطح ریشه و جذب Fe^{2+} به سلول‌های ریشه توسط ناقلین مثل ZIPها (Zrt/Irt-like proteins) می‌باشد (Sinclair and Krämer, 2012). استراتژی دوم که در گیاهانی مانند برنج و ذرت مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل سنتز و ترشح فیتوسیدروفورها برای تسهیل در جذب آهن است. سپس آهن

درجه شمالی و ۴۰-۲۷ درجه جنوبی کشت می‌شود (Khan, 2013). سازمان خواربار کشاورزی ملل متحد (فائو) با انتشار گزارشی در خصوص میزان تولید جهانی غلات اعلام داشت که در سال ۲۰۲۱ تولید گندم در جهان ۷۷۸ میلیون تن بوده‌است که در سال ۲۰۲۲ این میزان تولید افزایش داشته و ۷۹۴ میلیون تن بوده است. فائو با اعلام گزارشی مبنی بر رشد ۲۸ درصدی تولید گندم در ایران در سال ۲۰۲۲ خبر داد که ایران رتبه ۱۳ را از نظر تولید گندم در جهان به‌خود اختصاص داده است (FAO, 2017).

عوامل محرک بیرونی شامل مجموعه پیچیده‌ای از تنش‌های محیطی زیستی و غیرزیستی هستند که تنش‌های غیرزیستی مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید محصول و کاهش عملکرد می‌باشند که با تأثیر روی فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی نقش قابل‌توجهی در تعیین پتانسیل عملکرد و تولید گیاهان دارند (Tuteja and Gill, 2012). از تنش‌های غیرزیستی می‌توان به کمبود عناصر کم‌مصرف (ریزمغذی‌ها) در خاک اشاره کرد. عناصر کم‌مصرف متابولیسم مواد غذایی در بدن انسان را تنظیم می‌کنند و کمبودشان سلامت انسان را به‌خطر می‌اندازد. این عناصر در تشکیل ساختارهای آلی گیاهان، فعالیت‌های آنزیمی، کارکرد ناقل‌ها، تنظیمات اسمزی، متابولیسم‌های ثانویه و کارکرد هورمون‌های گیاهی دخالت دارند (Taiz and Zeiger, 2002). آهن و روی از جمله عناصر کم مصرف ضروری برای سلامت انسان هستند و به‌عنوان عوامل کمکی بسیاری از آنزیم‌های حیاتی، در بسیاری از فرآیندهای متابولیک انسان نقش دارند. به‌عنوان مثال، آنزیم‌های حاوی آهن در متابولیسم اکسیداتیو، سنتز هورمون استروئیدی و انتقال الکترون شرکت می‌کنند، در حالی که آنزیم‌های حاوی روی نقش مهمی در بیوسنتز و تخریب کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک ایفا می‌کنند (Kim et al., 2020). بیش از دو میلیارد نفر در سراسر جهان تحت‌تأثیر سوء تغذیه عناصر کم‌مصرف مخصوصاً آهن و روی هستند که یک‌سوم آن‌ها را کودکان زیر ۵ سال تشکیل می‌دهند (Verma et al., 2016; Von Grebmer et al., 2014). آهن علاوه بر اینکه عامل بسیاری از آنزیم‌ها است، جزء اصلی هموگلوبین حامل اکسیژن است. اثرات کمبود آهن شامل کم‌خونی، اختلال در رشد حرکتی و شناختی، افزایش خطر مرگ‌ومیر مادران و زایمان زودرس است. کودکان خردسال و زنان باردار آسیب‌پذیر هستند و به‌شدت تحت‌تأثیر کمبود آهن قرار می‌گیرند (Aggett, 2020; Blancquaert et al., 2017). کمبود آهن شایع‌ترین اختلال تغذیه‌ای در جهان است و تنها عنصر کم‌مصرف است که کمبود آن در کشورهای توسعه‌یافته نیز به‌طور چشمگیری رخ می‌دهد. تخمین زده شده است که تقریباً یک‌سوم جمعیت جهان از کم‌خونی رنج می‌برند که بیشتر کودکان و زنان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Blancquaert et al., 2017).

در گیاهان نیز عنصر آهن بیشترین عنصر موردنیاز در بین تمام عناصر کم‌مصرف می‌باشد. آهن بخشی از گروه

شده‌اند (Connorton et al., 2017). با توجه به نقش مهم پروتئین‌های ZIP در کارایی ارقام نسبت به جذب آهن، مطالعه بیان ژن‌های مذکور در ارقام گندم نان آهن-کارا و آهن-ناکارا می‌تواند در اصلاح ارقام آهن-کارا در این محصول مؤثر باشد. بنابراین هدف از این تحقیق، مطالعه بیان ژن‌های ZIP3، ZIP6 و ZIP7 در برگ و ریشه دو رقم گندم نان آهن-کارا و آهن-ناکارا در مراحل مختلف رشدی تحت تنش کمبود آهن بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه اجرا شد. فاکتور اول شامل دو رقم گندم آهن-کارا (پیش‌تاز) و آهن-ناکارا (فلات)، فاکتور دوم شامل دو سطح آهن خاک (کمبود و کفایت آهن به ترتیب ۱/۴ و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و فاکتور سوم شامل دو مرحله نمونه‌برداری (رویشی و زایشی به ترتیب یک ماه بعد از کشت و ۳۰ درصد خوشه‌دهی) بود. برای ارزیابی بیان ژن‌ها، نمونه‌برداری در هر مرحله رشدی از ریشه و برگ گیاهان انجام شد. خاک مورد استفاده (جدول ۱) از نواحی دارای کمبود آهن از اطراف ارومیه تهیه و پس از انجام آزمایش و اطمینان از کمبود آهن، در گلدان‌های پلی‌اتیلن به قطر ۱۱ و ارتفاع ۳۴ سانتی‌متر، ۳ کیلوگرم خاک ریخته و تیمار آهن براساس حد بحرانی آهن در خاک در دو سطح کمبود آهن (۱/۴ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک) و شاهد (۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک) اعمال شد. لازم به توضیح است که مقدار اولیه غلظت آهن خاک، ۱/۴ میلی‌گرم بود که برای تیمار کمبود استفاده شد. سپس آهن همین خاک با Fe-EDDHA به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک رسانده شد و به عنوان تیمار کفایت آهن استفاده شد. بذور از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر ایران تهیه و بعد از ضدعفونی شدن با آب اکسیژنه یک درصد، در عمق ۴ سانتی‌متری خاک کاشته شد. ترکیب محلول غذایی که در طول آزمایش به گلدان‌ها داده شد در جدول ۲ آورده شده است. آبیاری در طول فصل رشد، با استفاده از آب مقطر در حد ظرفیت زراعی انجام شد.

Fe^{3+} کلاته شده توسط پروتئین‌های YS به سلول‌های ریشه منتقل می‌شود. انتقال آهن در گیاهان دانه‌دار توسط پروتئین‌های NA و YSL^۱ (Yellow stripe-like protein) انجام می‌شود. این نتایج بیان می‌دارد که ZIPها نقش اساسی در جذب و جابجایی روی و آهن در گیاهان غیرگرامینه ایفا می‌کنند درحالی‌که عملکرد آن‌ها در گیاهان دانه‌دار کمتر شناخته شده است. از طرفی ZIPها در هموستازی یونی نقش دارند زیرا می‌توانند کاتیون‌ها را به سیتوپلاسم انتقال دهند (Colangelo and Gueriot, 2006).

توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی در جذب و مصرف عناصر غذایی توسط دانشمندان بسیاری، مورد توجه قرار گرفته است که تفاوت کارایی آن‌ها در استفاده از عناصر غذایی، یا به دلیل جذب بیشتر به وسیله ریشه‌ها، یا مصرف بهتر توسط گیاه می‌باشد، که اهمیت نسی این استراتژی‌ها بسته به نوع عنصر و نوع گونه گیاهی می‌تواند متفاوت باشد (Marschner, 1998). همچنین با در نظر گرفتن توانایی‌های متفاوت گیاهان در استفاده از آهن خاک، استفاده از گونه‌های کارا در خاک‌هایی با آهن قابل استفاده کم به‌ویژه در خاک‌های آهکی می‌تواند تا حدی مشکلات کمبود آهن را بدون نیاز به مصرف بیش از حد کود برطرف کند (Marschner, 1998).

در مطالعه‌ای که وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) انجام دادند تفاوت‌های مشاهده شده و تغییرات بیانی بالا در فاکتورهای رونویسی، نقش تنظیمی آن‌ها را در کنترل پاسخ به کمبود آهن در گندم نان نشان می‌دهد. به‌ویژه مشترک بودن فاکتورهای رونویسی در ریشه و برگ پرچم، نشان‌دهنده پاسخ سیستمیک به تنش کمبود آهن می‌باشد. با توجه به نقش کلیدی پروتئین‌های ZIP در جذب آهن، پیشرفت‌های چشم‌گیری در همسانه‌سازی و توصیف عملکرد آن‌ها در گیاهان زراعی چون ذرت (Li et al., 2013)، جو (Tiong et al., 2015) و گندم تتراپلوئید (Durmaz et al., 2011) به دست آمده است (Wang et al., 2020). با توجه به اهمیت زیاد گندم نان در تأمین انرژی روزانه انسان‌ها، به نظر می‌رسد که مطالعه جامعی در مورد نقش ژن‌های مذکور در جذب و جابجایی آهن در گندم نان انجام نگرفته است. در گندم، تعداد کمی از ژن‌های دخیل در جذب، جابجایی و ذخیره‌سازی آهن و روی، به دلیل وجود ژنوم بزرگ آلوپلوئید و چالش‌های فنی در ترانسفورماسیون گندم، از نظر عملکردی مشخص

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

pH	(ds/m) EC	Sand	Silt	Clay	K (mg/kg)	Fe (mg/kg)	P-Olsen	OC (%)	CCE (%)
7.98	0.89	38	53	9	16	1.4	3.4	0.65	22

EC: electrical conductivity, OC: organic carbon, CCE: calcium carbonate equivalent

جدول ۲- ترکیب محلول غذایی مورد استفاده در آزمایش

Table 2. The composition of nutrient solution used in the experiment

Mg Kg ⁻¹	Fertilizer	Mg Kg ⁻¹	Elements
65.22	Urea	30	N
249	Triple superphosphate	50	P
223	Potassium sulfate	100	K
22.1	Zinc sulfate	5	Zn
19.6	Copper sulfate	5	Cu
182	Fe-EDDHA	10	Fe

استخراج RNA و سنتز cDNA

استخراج RNA از برگ و ریشه گیاهان، با استفاده از محلول استخراج RNX-plus™ (سینا کلون- ایران) مطابق دستورالعمل پیشنهادی شرکت سازنده، با کمی تغییرات انجام گرفت. قبل از سنتز cDNA، برای حذف DNA ژنومی، RNAهای استخراجی با DNAase تیمار شدند. سپس با استفاده از کیت Easy cDNA reverse transcription kit (پارس طوس، ایران) مطابق دستورالعمل پیشنهادی شرکت سازنده، سنتز cDNA انجام شد. جهت اطمینان از عدم وجود آلودگی DNA در RNA استخراجی و اجزای واکنش، واکنش‌های کنترل RT- (عدم استفاده از آنزیم Reverse transcriptase) و NTC (عدم استفاده از RNA) در حین سنتز cDNA طبق دستورالعمل کیت سنتز در نظر گرفته شد. بررسی کمی و کیفیت RNA استخراجی با استفاده از دستگاه نانودراپ انجام شد. همچنین برای ارزیابی کیفیت RNA استخراجی از الکتروفورز ژل آگارز یک درصد استفاده شد.

واکنش Real time PCR

واکنش Real time PCR در حجم ۱۲/۵ میکرولیتر در سه تکرار طبق دستورالعمل کیت Sina Green HS- qPCR MIX100T (سینا کلون، ایران) در دستگاه

Rotor- Gene Q (مدل ۶۰۰۰، کیازن آمریکا) انجام گرفت. در این فرآیند ژن اکتین به عنوان ژن مرجع جهت نرمال‌سازی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. الگوی دمایی واکنش‌ها طبق اندازه محصول و دمای اتصال آغازگرها به صورت فعال‌سازی ابتدایی آنزیم در دمای ۹۵°C به مدت ۱۰ دقیقه در یک چرخه، سپس ۴۰ چرخه شامل مراحل واسرشته‌سازی در دمای ۹۵°C به مدت ۱۵ ثانیه جهت واسرشته‌سازی cDNA، اتصال آغازگرها در دمای‌های اتصال مربوط به هر ژن (جدول ۳) به مدت ۳۰ ثانیه و بسط در دمای ۷۲°C به مدت ۴۰ ثانیه انجام شد. بعد از اتمام واکنش، منحنی ذوب هر کدام از ژن‌ها رسم و صحت تکثیر محصول مربوط به هر ژن با استفاده منحنی ذوب همان ژن و الکتروفورز ژل آگارز یک درصد (شکل ۱) تأیید شد و محاسبه چرخه آستانه^۱ با نرم‌افزار Rotor- Gene Q انجام گرفت و میزان بیان ژن‌های مورد مطالعه با استفاده از فرمول‌های روش $\Delta\Delta CT$ محاسبه شد (Pfaffl, 2001). آزمون نرمال بودن داده‌ها و اشتباهات مدل به روش کلموگروف- اسمیرنوف^۲ با استفاده از نرم‌افزار MINITAB (نسخه ۱۹) بررسی شد. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین تیمارها (به روش SNK در سطح یک درصد) توسط نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱)، انجام گرفت.

جدول ۳- مشخصات آغازگرهای مورد استفاده در Real time PCR (Niazkhani et al., 2021; Niazkhani et al., 2018)

نام ژن Gene name	شماره دسترسی Accession number	توالی آغازگر Primer sequence	دمای اتصال (°C) annealing temperature (°C)	اندازه محصول (bp) Product size (bp)
Actin	KX533928	F: 5'- gacgcacaacaggtatcgtgttg R: 5'- cagcgaggtcaagacgaaggatg	60	108
ZIP3	DQ490131	F: 5'- ggtgtgtcattaggagcatctgtg R: 5'- agcctgtacaatgcaaccacccaa	55.8	114
ZIP6	AK333945	F: 5'- cccaatccccaccaccaagaa R: 5'- ggtcactctcgtccaggaagc	55.2	89
ZIP7	DQ490134	F: 5'- ttacaacgccaatagccccag R: 5'- atcggctacgattagaccaccag	55.4	106



شکل ۱- الگوی باندی حاصل از تکثیر cDNA با آغازگرهای ژن‌های مورد مطالعه

Figure 1. Banding profile obtained from cDNA amplification with primers of studied genes

نتایج و بحث

می‌دهد که اثر متقابل رقم × بافت × مرحله نمونه‌برداری، اثرات متقابل دوجانبه و اثر ساده رقم (برای ژن ZIP3) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین نتایج تجزیه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس بیان نسبی ژن‌های مورد مطالعه در دو رقم گندم نان تحت شرایط کمبود آهن نشان

واریانس بیان نسبی ژن ZIP6 نشان داد که به غیر از اثرات ساده رقم، مرحله نمونه‌برداری و اثر دوجانبه اندام × مرحله نمونه‌برداری که معنی‌دار نیستند سایر اثرات در سطح احتمال

جدول ۴- تجزیه واریانس بیان نسبی ژن‌های ZIP3، ZIP6 و ZIP7 تحت تنش کمبود آهن در ریشه و برگ ارقام آهن-کارا (پیش‌تاز) و آهن-ناکارا (فلات) گندم نان در مراحل رویشی و زایشی

Table 4. Variance analysis of relative expression of ZIP6, ZIP3 and ZIP7 genes under iron deficiency stress in roots and leaves of Fe-efficient (Pishtaz) and -inefficient (Falat) bread wheat cultivars in vegetative and reproductive stages

میانگین مربعات MS			df	درجه آزادی	Source of variance
ژن ZIP7	ژن ZIP6	ژن ZIP3			
23.64**	0.43 ^{ns}	0.92 ^{ns}	1	1	رقم Cultivar
79.79**	313.38**	12.76**	1	1	اندام Organ
52.82**	1.37 ^{ns}	1.57 ^{ns}	1	1	مرحله نمونه‌برداری Sampling stage
66.14**	10.19**	9.29**	1	1	رقم × اندام Cultivar × Organ
71.70**	285.36**	13.16**	1	1	رقم × مرحله Varsity × Stage
24.97**	2.68 ^{ns}	2.38**	1	1	اندام × مرحله Organ × Stage
95.99**	307.74**	9.11**	1	1	رقم × اندام × مرحله Varsity × Organ × Stage
0.05	0.15	0.02	16	16	خطا Error
5.86	6.29	7.19			ضریب تغییرات CV (%)

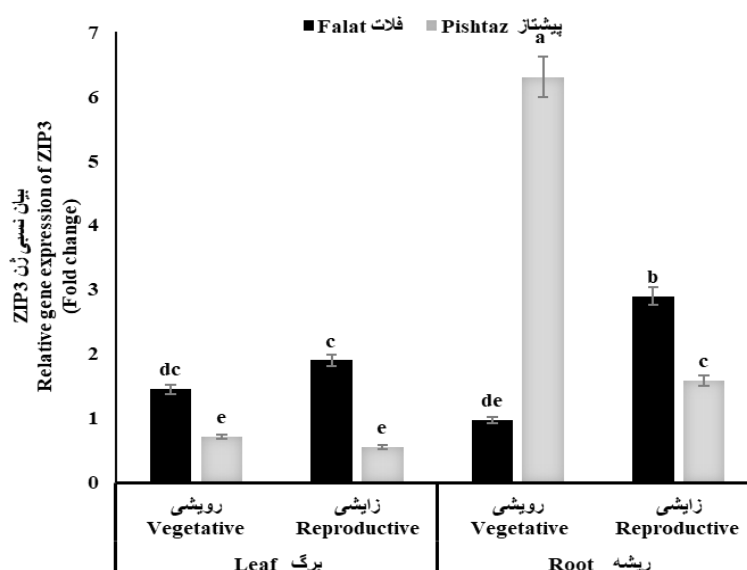
* و ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ و غیرمعنی‌دار از نظر آماری را نشان می‌دهند

*, ** and ^{ns} indicate significant at 0.05 and 0.01 probability levels and nonsignificant, respectively

بیان نسبی ژن ZIP3

نتایج حاصل از تجزیه واریانس بیان نسبی ژن‌های مورد مطالعه در دو رقم گندم نان تحت شرایط کمبود آهن در جدول ۴ ارائه شده است. براین اساس اثر متقابل رقم × بافت × مرحله نمونه‌برداری برای ژن ZIP3 در سطح احتمال یک‌درصد معنی‌دار بود. براساس نتایج مقایسه میانگین برهمکنش رقم × اندام × مرحله نمونه‌برداری (شکل ۲)، بیشترین افزایش بیان نسبی ژن ZIP3 در ریشه رقم آهن-کارای پیش‌تاز در مرحله رویشی مشاهده شد و در مرحله زایشی میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-ناکارای فلات بیشتر از رقم آهن-کارای پیش‌تاز بود. ولی در برگ، رقم آهن-ناکارای فلات بیشترین افزایش بیان نسبی در هر دو مرحله زایشی و رویشی را به خود اختصاص داد ولی اختلاف میزان بیان ژن در برگ بین دو مرحله نمونه‌برداری از نظر آماری معنی‌داری نبود و کمترین میزان بیان ژن در برگ مربوط به رقم پیش‌تاز بود. ژن TaZIP3 روی بازوی بلند کروموزوم شماره ۲ ژنوم‌های گندم نان قرار دارد (Evans et al., 2017) و محصولی با ۳۶۰ اسید آمینه را کد می‌کند (Tiong et al., 2015). براساس تجزیه فیلوژنتیکی ژن‌های خانواده ZIP در گیاهان مختلف چنین می‌توان برداشت نمود که ژن TaZIP3 بیشترین شباهت را به ژن‌های HvZIP3، OsZIP3 و AtZIP3 دارد. ژن HvZIP3 در شرایط کمبود آهن در ریشه جو بیان می‌شود لذا بر این اساس می‌توان گفت که این ژن از عوامل درگیر در هومئوستازی آهن در ریشه جو بوده و یکی از ژن‌های مهم در جذب عنصر آهن در شرایط

تنش کمبود آهن می‌باشد. اخیراً تجزیه و تحلیل عملکردی نشان داده است که برخی از ژن‌های ZIP در آراییدوپسیس و برنج نقش مهمی در انتقال روی یا آهن دارند (Li et al., 2013). در مطالعه‌ای که توسط تیونگ و همکاران انجام گرفت چنین گزارش گردید که با توجه به افزایش بیان سه برابری ژن HvZIP3 تحت شرایط کمبود آهن در ریشه و شاخساره، احتمالاً این ژن در جذب و انتقال آهن از ریشه به شاخساره به‌طور فعال شرکت دارد (Tiong et al., 2015). افزایش بیان این ژن تحت شرایط کمبود آهن در جو، نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر مبنی بر افزایش بیان ژن TaZIP3 در شرایط کمبود آهن را در هر دو اندام تأیید می‌کند. لی و همکاران (Li et al., 2015) با تجزیه فیلوژنتیکی نشان دادند که دو ژن HvZIP3 (همولوگ TaZIP3) و ZmZIP3 مشابهت زیادی باهم دارند. ژن ZmZIP3 روی کروموزوم دو ذرت قرار دارد و دارای ناحیه کد کننده به‌طول ۱۱۰۴ جفت باز می‌باشد. پروتئینی که توسط این ژن کد می‌شود، دارای ۳۶۷ اسید آمینه با ۶ دامین غشاگذر است. براساس نتایج تحقیقات، بیان ژن ZmZIP3 در پاسخ به کاهش آهن در محیط برخلاف دیگر ژن‌های خانواده ZmZIP3 به‌سرعت در هر دو اندام ریشه و برگ زیاد می‌شود. براساس این تحقیق لی و همکاران چنین گزارش نمودند که افزایش بیان ژن ZmZIP3 در آراییدوپسیس تراریخته باعث افزایش میزان آهن در ریشه و کاهش آن در شاخساره می‌شود (Li et al., 2015).



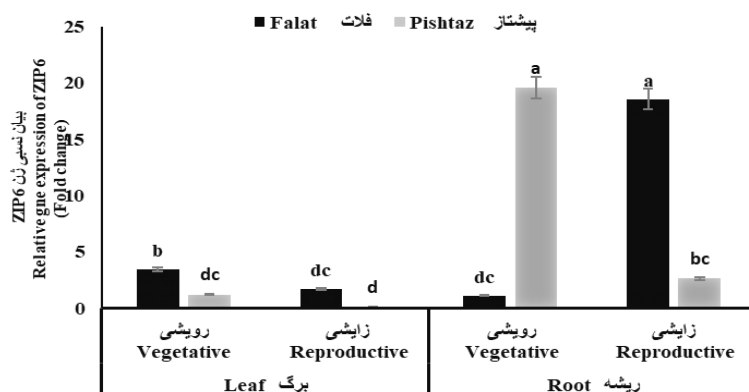
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل اندام × رقم × مرحله نمونه‌برداری بر بیان نسبی ژن ZIP3 در گندم نان (ستون‌هایی که دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون چند دامنه‌ای SNK اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند).
Figure 2. Mean comparison of the interaction effect of organ × cultivar × sampling stage on the relative expression of ZIP3 gene in bread wheat cultivars (columns with the common letters (SNK test) don't have a significant difference at the 1% probability level)

با مطالعه روی گیاه آرابیدوپسیس و ترسیم درخت فیلوژنتیکی چنین گزارش کردند که ژن OsZIP3 با ژن‌های TaZIP3 و HvZIP3 ارتباط تکاملی نزدیکی دارد و به‌عنوان انتقال‌دهنده با میل ترکیبی کم در پاسخ به کمبود آهن در ریشه بیان شده‌اند. بنابراین میتوان چنین برداشت نمود که ژن ZIP3 در جذب آهن از خاک نقش دارد. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر و سایر تحقیقات انجام گرفته در گیاهان نزدیک به گندم نان (به لحاظ تکاملی) می‌توان چنین بیان کرد که بیان ژن ZIP3 در شرایط کمبود آهن در مرحله رویشی رقم آهن-کارا در ریشه نسبت به برگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش بیان در مرحله رویشی در ریشه بیشتر از مرحله زایشی در ریشه می‌باشد. بنابراین احتمال می‌رود نقش اصلی این ژن، در جذب آهن از خاک و انتقال آن به اندام هوایی در اوایل دوره رشدی گندم نان در شرایط کمبود آهن باشد.

بیان ژن ZIP6

تجزیه واریانس بیان ژن ZIP6 (جدول ۴) نشان می‌دهد که اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه‌برداری بر بیان ژن ZIP6 در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه‌برداری حاکی از افزایش میزان بیان نسبی ژن ZIP6 در ریشه رقم آهن-کارای پیش‌تاز در مرحله رویشی و رقم آهن-ناکارای فلات در مرحله زایشی بود. بیشترین میزان افزایش بیان نسبی این ژن در ریشه رقم پیش‌تاز در مرحله رویشی و ریشه رقم فلات در مرحله زایشی مشاهده شد (شکل ۶).

ژن *AtZIP1* نزدیکترین عضو خانواده ZIP در آرابیدوپسیس به ZIP3 در گندم (Tiong et al., 2015)، اولین بار در آرابیدوپسیس تالیانا گزارش شد که این ژن کدکننده یک ترانسپورتر آهن است که در ریشه بیشتر از برگ بیان می‌شود (Grotz et al., 1998). طبق نتایج، واسطه انتقال آهن و نیکل در آرابیدوپسیس است. براین‌اساس، بیان بیش از حد *AtIRT3* منجر به افزایش تجمع روی در اندام هوایی و آهن در ریشه می‌شود. علاوه براین *AtIRT3* می‌تواند جهش مخمر دوگانه جذب روی و آهن را تکمیل کند، که نشان می‌دهد *AtIRT3* در انتقال روی و آهن نقش دارد. در مطالعه‌ای که توسط میلنر و همکاران (Milner et al., 2013) انجام گرفت مشاهده شد کمبود آهن سبب افزایش معنی‌دار رونوشت‌های ژن ZIP1 در ریشه آرابیدوپسیس می‌شود، درحالی‌که افزایش در مقدار رونوشت این ژن در اندام هوایی در شرایط کمبود منگنز مشاهده می‌گردد (Milner et al., 2013). در این مطالعه هم‌چنین بیان شد که میزان بیان ژن *AtZIP1* در ریشه بیشتر از برگ بوده و با افزایش سن گیاه میزان بیان نسبی این ژن افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش محتوای آهن و روی دانه جو تراریخته در اثر بیان بیش از حد ژن *AtZIP1* در جو گزارش شده‌است (Ramesh et al., 2004). به‌طور کلی شواهد براین قرار است که این ژن در آرابیدوپسیس علاوه بر جذب و انتقال آهن، در جذب و انتقال روی و منگنز هم دخالت دارد. گروتز و همکاران (Grotz et al., 1998) نشان دادند که ژن‌های *AtZIP1* و *AtZIP3* در گیاه آرابیدوپسیس در پاسخ به شرایط کمبود آهن به‌شدت در ریشه بیان شدند (Grotz et al., 1998). هم‌چنین چن و همکاران (Chen et al., 2008)



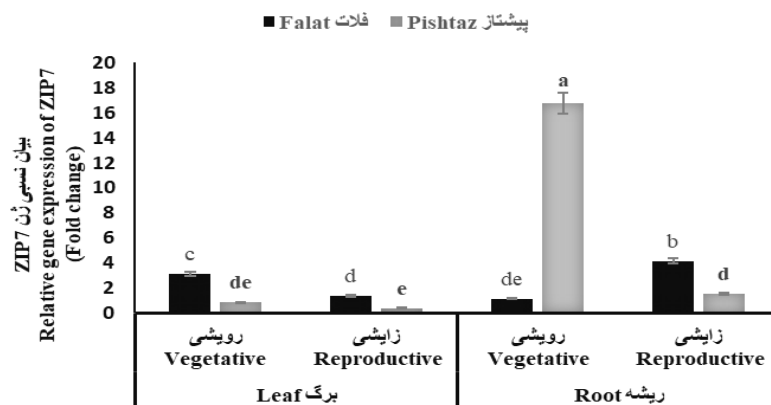
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل اندام × رقم × مرحله نمونه‌برداری بر بیان نسبی ژن ZIP6 در گندم نان (ستون‌هایی که دارای حروف می‌باشند براساس آزمون چند دامنه‌ای SNK اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند)
Figure 3. Mean comparison of the interaction effect of organ × cultivar × sampling stage on the relative expression of ZIP6 gene in bread wheat cultivars (columns with common letters (SNK test) do not have a significant difference at the 1% probability level)

al., 2013). ایده و همکاران (Eide et al., 1996) با انجام آزمایشاتی برای پی‌بردن به نقش ژن ZIP6 در پاسخ به کمبود آهن در گیاه برنج چنین نتیجه گرفتند که تحت شرایط کمبود آهن، رونوشت‌های ژن OsZIP6 در هر دو اندام ریشه و شاخساره افزایش پیدا می‌کند که این میزان افزایش در ریشه بیشتر از شاخساره می‌باشد که ثابت می‌کند ژن ZIP6 در جذب آهن از خاک و انتقال آن به سایر اندام‌های هوایی نقش دارد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق نیز می‌توان چنین برداشت نمود که ژن ZIP6 در هر دو اندام ریشه و برگ گندم در کل دوران رشدی گیاه بیان می‌شود با این تفاوت که با افزایش سن گیاه، میزان بیان هم بیشتر می‌شود. بنابراین ژن ZIP6 احتمالاً وظیفه جذب و انتقال آهن را در اندام‌های مختلف، در کل دوره رشدی گیاه بر عهده دارد و نقش مهمی را با افزایش بیان در حفظ آهن در شرایط کمبود آهن ایفا می‌کند.

بیان ژن ZIP7

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان می‌دهد که اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه‌برداری بر بیان ژن ZIP7 در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل رقم × اندام × مرحله نمونه‌برداری (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشترین میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-کارای پishataz در مرحله رویشی مشاهده شد. همچنین میزان بیان نسبی این ژن در ریشه رقم آهن-کارا در مرحله رویشی به‌طور معنی‌داری بیشتر از مرحله زایشی می‌باشد همچنین در هر دو مرحله رویشی و زایشی در برگ میزان افزایش بیان ژن در رقم آهن-ناکارای فلات بیشتر می‌باشد. ژن TaZIP7 روی بازوی کوتاه کروموزوم یک، هر سه ژنوم گندم نان قرار دارد، این ژن، پروتئینی با ۳۸۶ اسید آمینه را کد می‌کند. با تجزیه فیلوژنتیکی ژن‌های خانواده ZIP چنین برداشت می‌شود که ژن TaZIP7 با ژن‌های ZIP7 گیاهان جو (HvZIP7) و برنج (OsZIP7) بیشترین شباهت را دارد (Evens et al., 2017).

ژن TaZIP6 روی بازوی کوتاه کروموزوم شماره یک هر سه ژنوم گندم نان قرارداد (Evens et al., 2017) و پروتئینی با ۳۹۵ اسیدآمینه را کد می‌کند (Tiong et al., 2015). تجزیه ژن‌های ZIP نشان می‌دهد این ژن به‌ترتیب با ژن‌های HvZIP6، OsZIP6 و AtZIP6 بیشترین شباهت را دارد. OsIRT1 عمدتاً در ریشه در شرایط کمبود آهن و مس بیان می‌شود. این نشان می‌دهد که OsIRT1 یک انتقال دهنده فلزی کاربردی برای آهن می‌باشد که به‌طور فعال در جذب آهن از خاک درگیر می‌باشد. برنج یک گیاه تک‌لپه‌ای گرمینه می‌باشد که در اثر کمبود آهن، فیتوسیدروفورها را آزاد می‌کند. در واقع برنج اولین گیاهی است که ترشح شده فیتوسیدروفور در ریشه آن مشاهده شد (Eide et al., 1996). در تحقیقی که روی ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارای برنج انجام گرفت مشاهده شد که تحت شرایط کمبود آهن، رونوشت‌های ژن OsZIP6 در ریشه و شاخساره افزایش پیدا کرد که این میزان افزایش در ریشه بیشتر از شاخساره بود (Chen et al., 2008; Eide et al., 1996) با این حال نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ژن OsZIP6 همانند ژن‌های OsIRT1، OsIRT2 و OsZIP7 در انتقال آهن بیشتر از انتقال روی دخالت دارد (Bugghio et al., 2002; Kavitha et al., 2015). تیونگ و همکاران (Tiong et al., 2015) مطالعه‌ای که برای شناسایی ترانسپورترهای خانواده ZIP در گیاه جو انجام دادند، ترانسپورتر HvZIP با ۴۰۲ اسید آمینه، یکی از ۱۳ ترانسپورتری بود که شناسایی گردید. در این مطالعه چنین گزارش شد که ژن HvZIP تحت شرایط کمبود آهن در ریشه بیان می‌شود و این افزایش بیان با افزایش سن گیاه بیشتر می‌شود. در مطالعه حاضر نیز بیان این ژن در شرایط کمبود آهن در ریشه ارقام آهن-کارا و آهن-ناکارا در مراحل رویشی و زایشی افزایش یافت. ژن AtZIP6 ترانسپورتری با ۳۴۱ اسیدآمینه را کد می‌کند و در آرکیدوپسیس در شرایط کمبود منگنز بیان می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که ژن AtZIP6 در هر دو اندام ریشه و برگ بیان می‌شود که این بیان در ریشه بیشتر می‌باشد (Milner et



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل اندام × رقم × مرحله نمونه‌برداری بر بیان نسبی ژن ZIP7 در گندم نان (ستون‌هایی که دارای حروف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای SNK اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند)
Figure 4. Mean comparison of the interaction effect of tissue × variety × sampling stage on the relative expression of the coding gene ZIP7 in bread wheat (columns with common letters based on multiple test SNK domains do not have a significant difference at the 1% level)

HvZIP7 تحت شرایط کمبود آهن در ریشه افزایش یافته است.

براساس مطالعات و تجزیه و تحلیل چنین نشان داده شده است که رونوشت‌های *IRT1* به‌طور چشم‌گیری در پاسخ به کمبود روی و آهن القا می‌شوند. همچنین الگوی بیان ژن *ZmZIP* در مراحل مختلف رشد جنین و آندروسپرم مشاهده شده است. طبق نتایج می‌توان چنین برداشت نمود که ژن‌های *ZmZIP* ناقل‌های کاربردی روی یا آهن دارند و ممکن است مسئول جذب، انتقال، سم‌زدایی و ذخیره‌سازی یون‌های فلزی دو ظرفیتی در سلول‌های گیاهی باشند. نتایج تجزیه فیلوژنتیکی که توسط لی و همکاران (Li et al., 2013) انجام گرفت نشان داد که بین ژن‌های *OsZIP7* (همولوگ *TaZIP7* در برنج) و *ZmZIP7* در ذرت تشابه زیادی وجود دارد. ژن *ZmZIP7* در ذرت روی کروموزوم شماره شش قرار دارد که پروتئینی با ۳۸۷ اسید آمینه را کد می‌کند. نتایج این مطالعه نشان داده که با افزایش روی، تجمع رونوشت‌های *ZIP* در ذرت کم می‌شود و بیان این ژن در ریشه، شاخساره، دانه و برگ مشاهده می‌شود. در آرایی‌دپسیس ترا ریخته با افزایش بیان بیش از حد این ژن آهن بیشتری در دانه تجمع پیدا می‌کند و همچنین این افزایش بیان باعث تنظیم بیان ژن‌های کلیدی در جهت حفظ هموستازی روی و آهن می‌شود. به‌طور کلی می‌توان چنین برداشت نمود که بیان ژن *ZIP7* گندم نان تحت شرایط کمبود آهن در ریشه رقم آهن-کارا پیشتاز به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. همچنین این ژن در هر دو اندام برگ و ریشه بیان می‌شود ولی در ریشه در مرحله رویشی در رقم آهن-کارا این میزان بیان بیشتر می‌باشد. با این وجود احتمالاً ژن *ZIP7* در گندم نان در جذب آهن از خاک و انتقال آن به اندام‌های هوایی شرکت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

بیان نسبی هر سه ژن *ZIP3*، *ZIP6* و *ZIP7* تحت شرایط کمبود آهن خاک در اندام ریشه افزایش یافت. میزان

عملکرد برخی از ژن‌های *AtZIP* در جذب مواد معدنی مشخص شده است. حذف *AtIRT1* در آرایی‌دپسیس تالیانا منجر به کمبود آهن، همراه با نقش تمایز سلولی شد در حالی که بیان *AtIRT2* در مخمر رشد جهش یافته‌های مخمرهای انتقال آهن و روی را احیا کرد و افزایش داد. همچنین بیان بیش از حد *AtIRT3* باعث افزایش تجمع روی در اندام هوایی و آهن در ریشه گیاهان ترا ریخته شد بیشتر مطالعات انجام گرفته چنین بیان می‌دارند که بیان بیشتر *ZIP*‌ها توسط کمبود روی، آهن یا منگزامت القا می‌شود و تنظیم بیان درون‌زای *ZIP*‌ها برای حفظ هموستازی فلزات سلولی ضروری است زیرا این ژن‌ها در جذب فلز از ریشه و همچنین انتقال و توزیع فلز در بین اندام‌های گیاهی نقش دارند (Henriques et al., 2002).

در مطالعه‌ای که توسط فو و همکاران (Fu et al., 2017) روی میوه پرتقال سه شاخه (*Poncirus trifoliata* L.) انجام شد چنین گزارش شد که تحت کمبود آهن تنها ژن‌های *PtZIP7* و *PtIRT1* عمده‌تاً در ریشه القا شدند. این دو ژن همچنین جهش یافته *fet4/fet3* را حتی در شرایط دسترسی بسیار محدود آهن به‌راحتی نیز تکمیل کردند. طبق این مطالعه به این نتیجه رسیدند که ژن‌های *PtZIP7* و *PtIRT1* مسئول جذب آهن بالا در پرتقال سه شاخه‌ای می‌باشند. نقش ژن *AtIRT1* در جذب آهن به‌خوبی نشان داده شده است (Fu et al., 2017). میلنر و همکاران (Milner et al., 2013) شواهدی ارائه کردند که نقش *AtZIP7* در جذب آهن را با استفاده از آزمایش مکمل *fet4/fet3* نشان داده و تأیید می‌گردد. رامش و همکاران (Ramesh et al., 2003) با مطالعه در گیاه برنج تحت شرایط کمبود آهن چنین گزارش کردند که برخی از ژن‌های *OsZIP* از جمله *OsZIP3* و *OsZIP7* هم در ریشه و هم در اندام هوایی بیان می‌شوند که هرکدام مسئول جذب آهن از خاک، انتقال از ریشه به اندام هوایی و همچنین مسئول پر شدن دانه می‌باشند. تیونگ و همکاران (Tiong et al., 2015) با انجام آزمایش روی گیاه جو چنین نتیجه گرفتند که میزان بیان ژن‌های *HvZIP3* و

ژن ZIP7 مربوط به رقم آهن-کارا پیش‌تاز در ریشه در مرحله رویشی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه به‌خاطر فراهم کردن امکانات و هزینه انجام این تحقیق نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

بیان نسبی ژن ZIP3 تحت شرایط کمبود آهن در ریشه رقم آهن-کارا پیش‌تاز به‌طور معنی‌داری بیشتر می‌باشد. سطح بیان نسبی ژن ZIP6 در دو رقم آهن-کارا و آهن-ناکارا در ریشه افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت که این ژن علاوه بر جذب در انتقال آهن به ساقه هم نقش دارد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان افزایش بیان

References

- Aggett, P. (2020). Chapter 22-Iron. *Present Knowledge in Nutrition*, 11th ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1, 375-392.
- Ashrafzadeh N., Abdollahi Mandoulakani B. (2023). The effect of iron deficiency on the relative expression of genes encoding transcription factors bZIP56, WRKY1 and NAM-B1 in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Breeding*, 15(45), 194-204. [In Persian]
- Blancquaert, D., De Steur, H., Gellynck, X., & Van Der Straeten, D. (2017). Metabolic engineering of micronutrients in crop plants. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1390(1), 59-73.
- Brier, N. D., Gomand, S. V., Donner, E., Paterson, D., Delcour, J. A., Lombi, E., & Smolders, E. (2015). Distribution of minerals in wheat grains (*Triticum aestivum* L.) and in roller milling fractions affected by pearling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(4), 1276-1285.
- Bughio, N., Yamaguchi, H., Nishizawa, N. K., Nakanishi, H., & Mori, S. (2002). Cloning an iron-regulated metal transporter from rice. *Journal of Experimental Botany*, 53(374), 1677-1682.
- Chen, W., Feng, Y., & Chao, Y. (2008). Genomic analysis and expression pattern of OsZIP1, OsZIP3, and OsZIP4 in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different zinc efficiency. *Russian Journal of Plant Physiology*, 55, 400-409.
- Colangelo, E. P., & Guerinot, M. L. (2006). Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 9(3), 322-330.
- Connorton, J. M., Jones, E. R., Rodríguez-Ramiro, I., Fairweather-Tait, S., Uauy, C., & Balk, J. (2017). Wheat vacuolar iron transporter TaVIT2 transports Fe and Mn and is effective for biofortification. *Plant Physiology*, 174(4), 2434-2444.
- Durmaz, E., Coruh, C., Dinler, G., Grusak, M. A., Peleg, Z., Saranga, Y., Fahima, T., Yazici, A., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2011). Expression and cellular localization of ZIP1 transporter under zinc deficiency in wild emmer wheat. *Plant Molecular Biology Reporter*, 29, 582-596.
- Eide, D., Broderius, M., Fett, J., & Guerinot, M. L. (1996). A novel iron-regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(11), 5624-5628.
- Evens, N. P., Buchner, P., Williams, L. E., & Hawkesford, M. J. (2017). The role of ZIP transporters and group F bZIP transcription factors in the Zn-deficiency response of wheat (*Triticum aestivum*). *The Plant Journal*, 92(2), 291-304.
- FAO. (2017). *FAOSTAT data-base*. [cited 2017 Jan 14]. Available from: <http://faostat.fao.org/beta/en/>. Retrieved 23 June from
- Fitzgerald, M. A., Bergman, C. J., Resurreccion, A. P., Möller, J., Jimenez, R., Reinke, R. F., Martin, M., Blanco, P., Molina, F., & Chen, M. H. (2009). Addressing the dilemmas of measuring amylose in rice. *Cereal Chemistry*, 86(5), 492-498.
- Fu, X. Z., Zhou, X., Xing, F., Ling, L. L., Chun, C. P., Cao, L., ... & Peng, L. Z. (2017). Genome-wide identification, cloning and functional analysis of the zinc/iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.). *Frontiers in Plant Science*, 8, 588.
- Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Sayed-Tabatabaei, B. E., & Khaksar, G. (2015). Expression level of ZIP1 and ZIP5 transporters in root and leaves of three different zinc-efficiency wheat cultivars. *Journal of Plant Process and Function*, 4(11), 23-32.
- Grotz, N., Fox, T., Connolly, E., Park, W., Guerinot, M. L., & Eide, D. (1998). Identification of a family of zinc transporter genes from Arabidopsis that respond to zinc deficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(12), 7220-7224.
- Grotz, N., & Guerinot, M. L. (2006). Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 1763(7), 595-608.
- Henriques, R., Jásik, J., Klein, M., Martinoia, E., Feller, U., Schell, J., Pais, M. S., & Koncz, C. (2002). Knock-out of Arabidopsis metal transporter gene IRT1 results in iron deficiency accompanied by cell differentiation defects. *Plant Molecular Biology*, 50, 587-597.
- Hensawang, S., Lee, B. T., Kim, K. W., & Chanpiwat, P. (2020). Probabilistic assessment of the daily intake of microelements and toxic elements via the consumption of rice with different degrees of polishing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(10), 4029-4039.

- Kasirajan, L., Boomiraj, K., & Bansal, K. (2013). Optimization of genetic transformation protocol mediated by biolistic method in some elite genotypes of wheat (*Triticum aestivum* L.). *African Journal of Biotechnology*, 12(6).
- Kavitha, P., Kuruvilla, S., & Mathew, M. (2015). Functional characterization of a transition metal ion transporter, OsZIP6 from rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 97, 165-174.
- Khan, S. A. (2013). Genetic Variability and Heritability Estimates in F² wheat Genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(9), 983.
- Khavarinejad, M., & Babajanov, A. (2011). Identification of relationships of quantitative and morphological traits to spring wheat genotype yields in drought levels of Mazandaran (north of Iran). *International Journal of Agricultural Science*, 1(6), 329-339.
- Kiely, M. E. (2021). Risks and benefits of vegan and vegetarian diets in children. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(2), 159-164.
- Kim, J., Aydemir, T. B., Jimenez-Rondan, F. R., Ruggiero, C. H., Kim, M.-H., & Cousins, R. J. (2020). Deletion of metal transporter Zip14 (Slc39a14) produces skeletal muscle wasting, endotoxemia, Mef2c activation and induction of miR-675 and Hspb7. *Scientific Reports*, 10(1), 4050.
- Li, S., Zhou, X., Huang, Y., Zhu, L., Zhang, S., Zhao, Y., Guo, J., Chen, J., & Chen, R. (2013). Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. *BMC Plant Biology*, 13(1), 1-14.
- Li, S., Zhou, X., Li, H., Liu, Y., Zhu, L., Guo, J., Liu, X., Fan, Y., Chen, J., & Chen, R. (2015). Overexpression of ZmIRT1 and ZmZIP3 enhances iron and zinc accumulation in transgenic Arabidopsis. *PLoS One*, 10(8), e0136647.
- Marschner, H. (1998). Mineral nutrition of higher plants. Norlforlk. In: Londres. Academyc press Ltd.
- Milner, M. J., Seamon, J., Craft, E., & Kochian, L. V. (2013). Transport properties of members of the ZIP family in plants and their role in Zn and Mn homeostasis. *Journal of Experimental Botany*, 64(1), 369-381.
- Niazkhani, M., Abdollahi Mandoulakani, B., Jafari, M., & Rasouli-Sadaghiani, M. (2021). Induced Expression of Six ZIP Genes by Zinc Deficiency is Associated with Increased Uptake and Root to Shoot Translocation of Zn in Zn-efficient Bread Wheat Cultivars. *Russian Journal of Plant Physiology*, 68, S61-S71.
- Niazkhani, S., Abdollahi Mandoulakani, B., Jafari, M., & Rasouli-Sadaghiani, M. (2018). Studying the expression of ZIP1, ZIP3 and ZIP6 genes in bread wheat under Zn deficiency conditions. *Cereal Research*, 8(3), 345-358. [In Persian]
- Pfaffl, M. W. (2001). A new mathematical model for relative quantification in real-time RT-PCR. *Nucleic acids research*, 29(9), e45-e45.
- Rahemi, S., Khorassani, R., & Halajnia, A. (2014). Uptake efficiency of Iron in different wheat varieties. *Water and Soil*, 28(3), 556-564.
- Ramesh, S. A., Choimes, S., & Schachtman, D. P. (2004). Over-expression of an Arabidopsis zinc transporter in *Hordeum vulgare* increases short-term zinc uptake after zinc deprivation and seed zinc content. *Plant Molecular Biology*, 54, 373-385.
- Satyavathi, C. T., Ambawat, S., Khandelwal, V., & Srivastava, R. K. (2021). Pearl millet: a climate-resilient nutricereal for mitigating hidden hunger and provide nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 12, 659938.
- Sinclair, S. A., & Krämer, U. (2012). The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 1823(9), 1553-1567.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). Photosynthesis: physiological and ecological considerations. *Plant Physiology*, 9, 172-174.
- Teymouri Rad L, Fayaz Moghaddam A, Abdollahi Mandoulakani B, Wehbi E. (2022). Expression pattern of genes encoding bZIP56, WRKY1 and NAM-B1 transcription factors under Zn deficiency conditions in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Breeding*, 14(42), 106-116.
- Tiong, J., McDonald, G., Genc, Y., Shirley, N., Langridge, P., & Huang, C. Y. (2015). Increased expression of six ZIP family genes by zinc (Zn) deficiency is associated with enhanced uptake and root-to-shoot translocation of Zn in barley (*Hordeum vulgare*). *New Phytologist*, 207(4), 1097-1109.
- Tuteja, N., & Gill, S. S. (2012). *Crop improvement under adverse conditions*. Springer.
- Verma, V., Ravindran, P., & Kumar, P. P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC Plant Biology*, 16, 1-10.
- Vert, G., Grotz, N., Dédaldéchamp, F., Gaymard, F., Guerinot, M. L., Briat, J.-F., & Curie, C. (2002). IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *The Plant Cell*, 14(6), 1223-1233.
- Von Grebmer, K., Saltzman, A., Birol, E., Wiesman, D., Prasai, N., Yin, S., Yohannes, Y., Menon, P., Thompson, J., & Sonntag, A. (2014). *Synopsis: 2014 global hunger index: The challenge of hidden hunger* (Vol. 83). Intl Food Policy Research Institute.
- Wang, M., Gong, J., & Bhullar, N. K. (2020). Iron deficiency triggered transcriptome changes in bread wheat. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 18, 2709-2722.