

Selection of Bread Wheat Recombinant Inbred Lines for Grain Yield, Iron and Zinc Concentrations

Sepideh Mirzaei¹  | Sohbat Bahraminejad^{1,2*}  | Reza Amiri³ 

1- Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Cereal Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran

*Corresponding author ✉: bahraminejad@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: January 31, 2026;

Received in revised form: May 30, 2026;

Accepted: June 7, 2026;

Available online: June 30, 2026

Keywords:

MGIDI index,
Grain Fe concentration,
Grain Zn concentration,
Biofortification,
Hidden hunger,
Heatmap

ABSTRACT

Wheat is the most important food source, providing up to 50% of the daily calories of the population in developing countries. Zinc and iron deficiencies are the most common micronutrient deficiencies worldwide. Biofortification of wheat with increased zinc and iron concentrations in the grain is a promising strategy for reducing micronutrient malnutrition in humans. A field experiment was conducted during the 2021–2022 cropping season at Razi University, Kermanshah, to evaluate 63 F8 bread wheat lines derived from three distinct populations. These lines, alongside their parents (winter backcross Roshan × Gascogene, Marvdasht, Shahpasand, and MV17) and the Krichauff cultivar as a control, were assessed for grain yield, iron and zinc concentrations, and other agronomic traits using a randomized complete block design with three replications. According to the results obtained, the average grain zinc and iron concentrations in the first population were 63.74 and 29.99 mg/kg, respectively, in the second population the grain iron concentration was 28.95 mg/kg, and in the third population the grain zinc and iron concentrations were 57.43 and 39.34 mg/kg, respectively. Based on the MGIDI selection index, Genotypes 96, 34, winter backcross Roshan, and 88 from the first population; Genotypes 347, 226, 233, 245, 214, the control cultivar Krichauff, and 321 from the second population; and Genotypes 579, 400, 421, and 407 from the third population were identified as superior genotypes. The superior genotypes identified in this study can be introduced after further evaluations in different environments as valuable parents in future crosses or directly as new cultivars. This research could be considered as an effective step towards improving food security and reducing micronutrient malnutrition.



Cite this article: Mirzaei, S., Bahraminejad, S. and Amiri, R. (2026). Selection of bread wheat recombinant inbred lines for grain yield, iron and zinc concentrations. *Plant Genetic Research*, 13(1): 129–154 (In Persian).

DOI: <https://doi.org/10.22034/pgr.2026.2084199.1031>

Introduction

Globally, two billion people are affected by severe micronutrient deficiencies, a condition commonly referred to as hidden hunger. Because the grains of cereal (graminaceous crops) are a primary source of micronutrients for human consumption, insufficient consumption of essential micronutrients, especially iron and zinc, poses a critical public health challenge. Agricultural systems can help combat micronutrient undernourishment, but the focus on grain yield has led to deficiencies of essential micronutrients in crops. Industrial enrichment, food diversification, supplementation and biofortification are the most widely used strategies to address micronutrient deficiencies. The processes of micronutrient uptake, transport and accumulation in grains are under genetic control. Therefore, identifying genotypes with a higher ability to absorb micronutrients from the soil and selecting genotypes with high iron and zinc concentrations in grains, obtained through breeding in a compatible genetic background, can facilitate biofortification strategies in developing countries. In this regard, the aim of this study was to obtain recombinant inbred lines with high yield and iron and zinc concentrations, investigate changes in grain iron and zinc content and agronomic traits, and evaluate the relationships between agronomic traits and micronutrients in bread wheat grain.

Material and Methods

This study was conducted to evaluate grain yield, yield components, and iron and zinc concentrations in 63 bread wheat genotypes (including F₈ lines and their parents along with the cultivar Krichauff as a control) in three different populations during the 2021-2022 crop year. The experiment was conducted at the Research Farm of the Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. The measured traits included phenological traits (days to booting, days to heading, days to anthesis, days to physiological maturity, grain-filling duration and rate), agronomic traits (grain yield per plant, 1000-grain weight, biological yield per plant, straw yield, number of grains per spike, spike weight per plant, harvest index and plant height), and nutritional quality (grain Fe and Zn concentrations). The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications for each population separately. Each experimental plot consisted of five two-meter rows with a 25 cm spacing. Planting was done manually at a density of 400 plants per m². Before planting, 100 kg of triple superphosphate, 50 kg of urea, and 50 kg of potassium sulfate were applied per hectare. Irrigation was done by sprinkler method based on the water requirement of the plant. Weed control was done mechanically and manually. Data analysis was performed using several statistical software packages, including SAS, SPSS, and R.

Results and Discussion

The results of analysis of variance (ANOVA) showed that in the first population (winter backcross Roshan × Gascogene) there were significant differences between genotypes in terms of all traits except some agronomic and nutritional quality traits, while in the second population (Marvdasht × MV17) these significant differences were observed for all traits except biological yield per plant and number of grains per spike. Within the third population (Marvdasht × Shahpasand), genotypes showed significant variation across all measured traits, with the exception of the number of grains per spike, days to physiological maturity, and grain zinc and iron concentrations. Correlation analysis showed that in the first and third populations, the grain yield per plant had a positive and highly significant correlation with the grain Zn and Fe yield per plant. In the second population, a positive and highly significant correlation was observed between the grain yield per plant with grain Fe yield per plant and some agronomic traits. Cluster analysis grouped the genotypes of the first population into three clusters, the second population into two clusters, and the third population into four clusters. The genotypes of the first cluster from the first population, the second cluster from the second and third populations

could be introduced for breeding programs due to their high grain yield per plant and Fe and Zn concentrations. Based on the results of the MGIDI selection index, Genotypes 96, 34, the winter backcross Roshan and 88 from the first population, Genotypes 347, 226, 233, 245, 214, control cultivar Krichauff and 321 from the second population, and Genotypes 579, 400, 421 and 407 from the third population were introduced as superior genotypes.

Conclusions

Wheat biofortification is an important goal to address micronutrient malnutrition on a large scale. This study demonstrates the progress made in a breeding program to provide improved wheat lines with high yield potential and increased Zn and Fe concentrations.

Author Contributions

Sepideh Mirzaei contributed to performing the research and analyzing the data and writing of the original and subsequent drafts. Sohbat Bahraminejad contributed to the design and management of the project and conceptualization of the article. Reza Amiri participated in the analysis of the data, interpretation of the results, and final writing of the article.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

Acknowledgements

The authors acknowledge financial support from Ministry of Science, Research and Technology of the Islamic Republic of Iran and Razi University as part of the Ph.D. thesis.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

گزینش رگه‌های درون‌زاد نو ترکیب گندم نان با هدف عملکرد و غلظت آهن و روی دانه

سپیده میرزائی^۱ | صحبت بهرامی‌نژاد^{۲،۱*} | رضا امیری^۳

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- مرکز تحقیقات غلات، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

گندم یکی از مهم‌ترین منابع غذایی است که تا ۵۰ درصد از کالری روزانه جمعیت کشورهای در حال توسعه را تأمین می‌کند. کمبود عناصر روی و آهن شایع‌ترین کمبود ریزمغذی‌ها در سراسر جهان است. غنی‌سازی زیستی گندم با غلظت روی و آهن افزایش یافته در دانه، یک راه‌کار امیدوارکننده‌ای برای کاهش سوء تغذیه ریزمغذی‌ها در انسان است. به منظور ارزیابی و گروه‌بندی تعداد ۶۳ لاین گندم نان نسل F₈ حاصل از سه جمعیت مختلف بر اساس عملکرد، غلظت آهن و روی دانه و سایر صفات زراعی، به همراه والدین آن‌ها (بک‌کراس زمستانه روشن، گاسکوژن، مرودشت، شاهپسند و MV17) و رقم خارجی کرایچف (Krichauff) به عنوان شاهد، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه رازی کرمانشاه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ اجرا شد. طبق نتایج به دست آمده میانگین غلظت روی و آهن دانه به ترتیب در جمعیت اول، ۶۳/۷۴ و ۲۹/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، در جمعیت دوم غلظت آهن دانه ۲۸/۹۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و در جمعیت سوم غلظت روی و آهن دانه به ترتیب ۵۷/۴۳ و ۳۹/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد. بر اساس نتایج شاخص گزینش MGIDI از جمعیت اول ژنوتیپ‌های ۹۶، ۳۴، والد بک‌کراس زمستانه روشن و ۸۸، از جمعیت دوم ژنوتیپ‌های ۳۴۷، ۲۲۶، ۲۳۳، ۲۴۵، ۲۱۴، شاهد کرایچف و ۳۲۱ و از جمعیت سوم ژنوتیپ‌های ۵۷۹، ۴۰۰، ۴۲۱ و ۴۰۷ به عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی شدند. ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شده در این پژوهش، می‌توانند پس از ارزیابی‌های تکمیلی در محیط‌های مختلف، به عنوان والدین ارزشمند در تلاقی‌های آینده یا به صورت مستقیم به عنوان ارقام جدید معرفی شوند و گامی مؤثر در جهت ارتقای امنیت غذایی و کاهش سوء تغذیه ریزمغذی‌ها به شمار آیند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

واژگان کلیدی:

شاخص MGIDI،

غلظت آهن دانه،

غلظت روی دانه،

غنی‌سازی زیستی،

گرسنگی پنهان،

نمودار دمایی

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از غلات اصلی در سراسر جهان است که مقادیر قابل توجهی از کالری دریافتی روزانه و پروتئین مصرفی مردم را تأمین می‌کند و منبع مواد معدنی مانند آهن (Fe) و روی (Zn) است. گندم با تولید جهانی بیش از ۷۰۰ میلیون تن در سال، ۲۰ درصد پروتئین مورد نیاز روزانه و کالری ۴/۵ میلیارد نفر در جهان را تأمین می‌کند (Amiri et al., 2020). بنابراین، بهبود مقدار کمی و کیفی دانه گندم تأثیر مهمی بر امنیت غذایی، وضعیت تغذیه و سلامت انسان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه دارد (Seifolahpour et al., 2024). طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲، در ایران سطح برداشت گندم ۷/۶ میلیون هکتار، میزان تولید ۱۸/۵ میلیون تن و عملکرد در شرایط آبی ۳۸۹۲ و در شرایط دیم ۱۶۰۶ کیلوگرم در هکتار بوده است. سطح زیرکشت گندم در استان کرمانشاه حدود ۴۵۷ هزار هکتار با عملکرد در شرایط آبی ۵۵۰۸ و در شرایط دیم ۲۲۱۵ کیلوگرم در هکتار بود که منجر به تولیدی در حدود ۱/۴ میلیون تن شده است (Agricultural Statistics, 2025). نان و سایر محصولات مشتق شده از گندم، در ایران نیز همانند بسیاری از مناطق جهان منبع اصلی غذای روزانه مردم است (Amiri et al., 2015). در ایران، گندم به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی که جایگاه خاصی در الگوی تغذیه مردم دارد، دارای اهمیت ویژه‌ای است؛ بنابراین، همواره انجام مطالعات علمی روی جنبه‌های مختلف این گیاه مهم و بهبود آن، ضامن امنیت غذایی و رفاه اجتماعی، به‌ویژه برای طبقات متوسط و ضعیف جامعه است (Amiri et al., 2021). حدود ۵۲ درصد از انرژی جمعیت ایران از غلات و گندم تأمین می‌شود و تنها حدود ۵ و ۱۱ درصد انرژی دریافتی را به‌ترتیب از گوشت و منابع پروتئینی تأمین می‌کنند (Kalantari et al., 2005).

در طول قرن گذشته، بهره‌وری گندم به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، اما با رشد جمعیت جهانی، پیش‌بینی می‌شود تولید باید ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش یابد تا نیازهای

آینده را برآورده کند (Sheera et al., 2025)؛ بنابراین، افزایش تولید محصولات غذایی برای تأمین نیازهای غذایی بشر امری اجتناب‌ناپذیر است. علی‌رغم تلاش‌های انجام گرفته برای افزایش بازده تولید غذا در کشورهای فقیر و درحال توسعه، گرسنگی و سوءتغذیه همچنان در این مناطق متداول است (Amiri, 2018). در سراسر جهان، دو میلیارد نفر از کمبود شدید ریز مغذی‌ها به‌دلیل در دسترس نبودن مواد غذایی حاوی ریزمغذی‌ها، رنج می‌برند (Hasheminasab et al., 2023). تخمین زده می‌شود که ۶۷۳ میلیون نفر (۸/۲ درصد از جمعیت جهان) در سال ۲۰۲۴ دچار سوءتغذیه باشند (FAO, 2025). کمبود منابع مالی برای تهیه غذاهای غنی از ریزمغذی‌ها از یک‌سو و ظهور گندم به‌عنوان غذای اصلی بیش از یک‌سوم جمعیت جهان و کمبود ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری در دانه‌های آن از سوی دیگر، از دلایل اصلی سوءتغذیه ناشی از کمبود ریزمغذی‌ها در کشورهای در حال توسعه است (Amiri et al., 2020). سوءتغذیه ریزمغذی‌ها، میلیاردها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد و زنان باردار و کودکان زیر پنج سال در کشورهای در حال توسعه با عواقب شدید سلامتی روبرو هستند (Nnamani et al., 2025).

روی و آهن عناصر ریزمغذی ضروری هستند که بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارند و کمبود آن‌ها موجب تأخیر در رشد، اختلال عملکرد سلولی، اختلال در عملکرد سیستم ایمنی، اختلال در رشد جسمی، رشد ذهنی و ظرفیت یادگیری می‌شود. همچنین احتمال ابتلاء به عفونت‌ها، افزایش آسیب به DNA و پیشرفت سرطان را در پی دارد. کمبود این عناصر نه‌تنها سبب اثرات نامطلوب بر سیستم ایمنی، بلکه بر توانایی‌های شناختی افراد نیز می‌شود (Frydrych et al., 2023). برای رفع مشکلات سوءتغذیه ناشی از کمبود ریزمغذی‌ها به‌ویژه در میان کودکان، در سالیان اخیر پروژه‌هایی در سراسر جهان آغاز شده است. این مشکل فقط مختص مردمان کشورهای درحال توسعه نبوده و حتی در کشورهای توسعه یافته نیز به‌دلیل رژیم‌های نادرست

غذایی و دریافت ناکافی مواد معدنی و ویتامین‌ها شاهد پدیده‌ای تحت عنوان گرسنگی پنهان (Hidden hunger) هستیم. گرسنگی پنهان به معنای عدم دریافت مواد مغذی و ویتامین‌های مورد نیاز و دریافت بیش از نیاز مواد غیرضروری بدن انسان است (Gupta et al., 2020). تخمین زده می‌شود که گرسنگی پنهان از هر سه نفر در سراسر جهان یک نفر را تحت تأثیر قرار دهد و اثرات جدی بر سلامتی انسان در کشورهای در حال توسعه داشته باشد (Wakeel et al., 2018).

دانه گندم و آندوسپرم ذاتاً از نظر محتوای روی و آهن ضعیف هستند. میزان روی و آهن در دانه‌های گندم به ترتیب بین ۷ تا ۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۹ تا ۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است (Sushree Shyamli et al., 2021). کشت در خاک‌های دارای کمبود آهن و روی و به‌ویژه در مناطق در حال توسعه (کشورهای ایران، ترکیه، چین و هند)، یکی دیگر از دلایل غلظت کم ریزمغذی‌ها در قسمت‌های خوراکی گیاهان است (Sushree Shyamli et al., 2021). اهلی‌سازی گندم و به‌دنبال آن فرآیندهای اصلاحی، عمدتاً در دو قرن گذشته، منجر به افزایش عملکرد دانه شده است که با کاهش کیفیت دانه به دلیل کاهش پروتئین، ویتامین‌ها و مواد معدنی، همراه بوده است (Arzani and Ashraf, 2017). سیستم کشاورزی می‌تواند به مقابله با سوءتغذیه ریزمغذی‌ها کمک کند، اما تمرکز بر عملکرد دانه منجر به کمبود ریزمغذی‌های ضروری در گیاهان زراعی شده است. غنی‌سازی صنعتی (Industrial enrichment)، تنوع غذایی (Dietary diversification)، استفاده از مکمل‌ها (Supplementation) و غنی‌سازی زیستی (Biofortification) پرکاربردترین راهبردها برای رفع کمبود ریزمغذی‌ها هستند (Sushree Shyamli et al., 2021).

افزایش غلظت ریزمغذی‌ها در بخش‌های خوراکی غذاهای گیاهی و همچنین فراهمی زیستی (Bioavailability) آن‌ها از طریق شیوه‌های اصلاحی مرسوم و رویکردهای بیوتکنولوژی مدرن معرفی گردیده است و یکی از بهترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌حل‌ها برای کاهش سوءتغذیه در

کشورهای در حال توسعه است (Khush et al., 2012). غنی‌سازی زیستی را می‌توان از طریق شیوه‌های زراعی و یا از طریق روش‌های مرسوم دستکاری ژنتیکی مورد بررسی قرارداد. روش‌های زراعی و اصلاح کمبود عناصر خاک از طریق استفاده از کودهای شیمیایی و یا اصلاح جذب و انتقال از طریق محلول پاشی می‌تواند مؤثر باشد. از طرف دیگر، غنی‌سازی زیستی ژنتیکی شامل بررسی تنوع ژنتیکی در میان بخش‌های خوراکی محصولات زراعی اصلی و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط از نظر عناصر معدنی و نیز بررسی پتانسیل اصلاح جهت افزایش غلظت این عناصر می‌باشد. روش‌های زراعی نه اقتصادی هستند و نه سازگار با محیط زیست، زیرا به عنوان مثال تنها دو درصد از روی اعمال شده برای جذب توسط گیاه در دسترس است و باقی‌مانده روی توسط ذرات خاک جذب شده و غیرفعال می‌شود. بنابراین بهبود غلات از طریق بهبود ژنتیکی برای مقادیر آهن و روی دانه، به عنوان مؤثرترین رویکرد در نظر گرفته شده است (Amiri, 2013). پارامترهای کیفیت تغذیه‌ای یعنی روی و آهن تمایل به چندژنی بودن دارند. از این رو، گسترش پایه ژنتیکی از طریق بهره‌برداری از توده‌های بومی و ارقام وحشی از طریق رهیافت‌های به‌نژادی پیشرفته، به شناسایی کنترل ژنتیکی و اثرات آن کمک می‌کند. بنابراین می‌توان گفت غنی‌سازی زیستی گندم، امیدوارکننده، مقرون به صرفه و پایدارترین رویکرد برای مقابله با کمبود روی و آهن است (Wani et al., 2022). بسیاری از مطالعات، تنوع ژنتیکی کافی را برای غلظت آهن و روی دانه در گندم گزارش کرده‌اند. برای مثال، کرسپو-هررا و همکاران (Crespo-Herrera et al., 2017) با ارزیابی دو جمعیت متشکل از ۱۸۸ رگه درون‌زاد نوترکیب (RIL) گندم نان، دامنه وسیعی از تنوع برای غلظت آهن و روی دانه را نشان دادند و QTL‌های مؤثری روی کروموزوم‌های 7B (برای غلظت روی) و 4A (برای غلظت آهن) شناسایی کردند. کومار و همکاران (Kumar et al., 2024) در بررسی ۱۵۲۰ ژنوتیپ گندم نان، دامنه تغییرات غلظت آهن (۲۱/۸ تا ۷۱/۴ پی‌پی‌ام) و روی (۲۰/۴ تا ۸۴/۳ پی‌پی‌ام) و همبستگی مثبت

غلظت روی و آهن دانه، به برنامه‌های به‌نژادی برای توسعه ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالاتر و غلظت ریزمغذی بیشتر جهت تأمین امنیت و ایمنی غذایی کمک خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات محل اجرای آزمایش: این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد دانه، اجزای عملکرد و محتوای آهن و روی در دانه گندم نان، در ۶۳ ژنوتیپ (شامل ژنوتیپ‌های F8 و والدین آن‌ها به همراه رقم شاهد کرایچف) در قالب سه جمعیت مختلف در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ انجام شد. آزمایش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه (طول جغرافیایی ۴۷° ۹' شمالی، عرض جغرافیایی ۳۴° ۲۱' شرقی با ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا) اجرا گردید. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. نمودار میانگین دما و بارش منطقه در سال اجرای آزمایش (۱۴۰۰-۱۴۰۱) در شکل ۱ ارائه شده است.

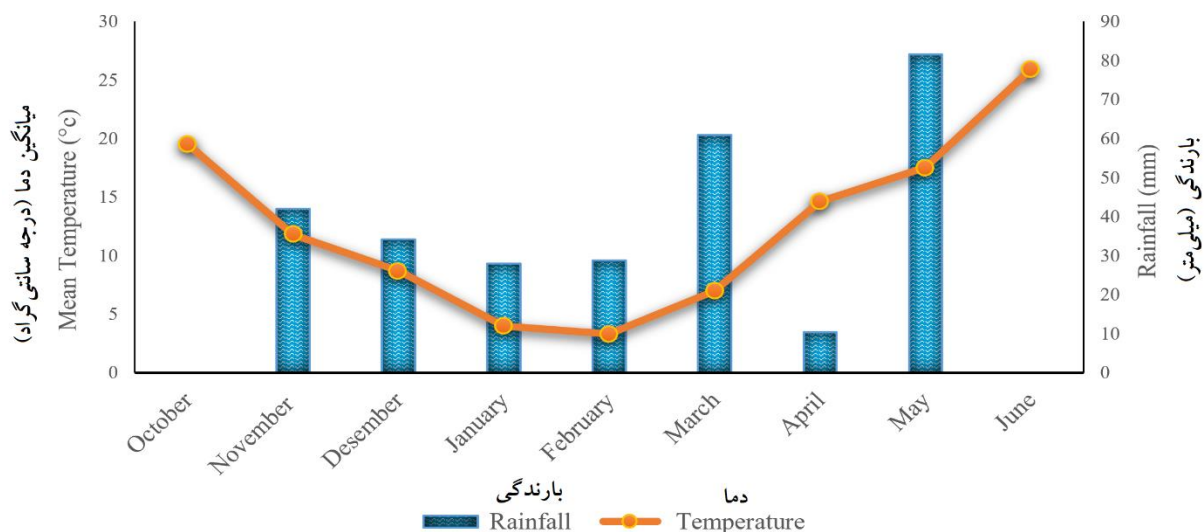
این دو عنصر را نشان دادند که نویدبخش امکان افزایش همزمان آن‌ها از طریق به‌نژادی است. حکیم و همکاران (Hakeem *et al.*, 2025) نیز اخیراً با غربالگری ۸۱۳ ژنوتیپ گندم نان، گندم دوروم و تریتیکاله، تنوع بالای آهن (۳۱-۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم) و روی (۳۸-۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و وراثت‌پذیری بالای این صفات را گزارش کردند و نتیجه گرفتند که غلظت ریزمغذی‌ها و عملکرد دانه را می‌توان به‌طور همزمان برای کاهش سوءتغذیه، بدون کاهش عملکرد، بهبود بخشید.

با توجه به مباحث فوق، هدف از این مطالعه که از جنبه مواد ژنتیکی آزمایشی دارای وجه تمایز با مطالعات پیشین است، شامل: (۱) دستیابی به رگه‌های درون‌زاد نو ترکیب دارای عملکرد و غلظت روی و آهن بالا؛ (۲) بررسی تغییرات در محتوای آهن و روی دانه و صفات زراعی و (۳) ارزیابی روابط صفات زراعی و ریزمغذی‌های دانه بود. شناسایی ژنوتیپ‌های گندم دارای عملکرد بالا و غنی از

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه (عمق نمونه‌برداری: ۰ تا ۳۰ سانتی متر)

Table 1. Field soil properties (Sampling depth: 0-30cm)

نوع بافت خاک	درصد کربن آلی	درصد آهک	اسیدیته pH	غلظت ریزمغذی‌ها (پی‌پی‌ام)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	نسبت جذب سدیم (میلی‌اکی‌والان گرم الکتریکی (دسی) بر لیتر)	درصد ذرات خاک % Soil particles
Soil texture	Percentage of organic carbon	Soil lime percentage	pH	Micronutrient concentration (ppm)	EC (ds.m ⁻¹)	Sodium Adsorption Ratio	رس Silty clay loam
سیلتی رسی لومی	1.25	14.75	7.71	0.24	7.5	0.488	36
							48.6
							15.4



شکل ۱- نمودار آمبروترمیک محل اجرای آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱

Figure 1. Ambrothermic graph of the experiment site in 2021-2022 cropping season

طرح و ماده آزمایشی: آزمایش در قالب سه طرح بلوک‌های کامل تصادفی (هر جمعیت یک طرح) با سه تکرار اجرا شد. هر کرت آزمایشی شامل پنج خط کاشت دو متری با فاصله ردیف‌های ۲۵ سانتی‌متری بود. سه جمعیت گندم نان مورد مطالعه عبارت بودند از: ۱) تعداد ۱۵ ژنوتیپ حاصل از تلاقی ارقام بک‌کراس زمستانه روشن × گاسکوژن؛ ۲) تعداد ۳۰ ژنوتیپ حاصل از تلاقی ارقام مروداشت × MV17 و ۳) تعداد ۱۸ ژنوتیپ حاصل از تلاقی ارقام مروداشت × شاهپسند. در هریک از جمعیت‌ها، والدین مربوطه و رقم شاهد کرایچف (KRY=Krichauff) نیز

کاشته و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. البته در طول اجرای آزمایش، والد شاهپسند از آزمایش حذف شد و از این‌رو، تعداد نمونه‌ها برای جمعیت اول، دوم و سوم به‌ترتیب برابر ۱۸، ۳۳ و ۲۰ بود. با توجه به وضعیت ریزمغذی‌های آهن و روی در والدین در ارزیابی‌های اولیه، جمعیت اول به هدف بررسی غلظت آهن و روی دانه، جمعیت دوم به هدف بررسی غلظت آهن دانه و جمعیت سوم به هدف بررسی غلظت آهن و روی دانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. خصوصیات این والدین در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲- خصوصیات والدین جمعیت‌ها

Table 2. Characteristics of the parents

جمعیت Population	والد پدری Paternal parent				والد مادری Maternal parent			
	رقم Cultivar	تیپ رشد Growth type	سال معرفی Year of introduction	عملکرد دانه خصوصیت کیفی دانه Grain yield (kg.h ⁻¹) Grain quality characteristic	رقم Cultivar	تیپ رشد Growth type	سال معرفی Year of introduction	عملکرد دانه Grain yield (kg.h ⁻¹)
اول The first	گاسکوژن Gascogen	زمستانه Winter	1373	غلظت آهن و روی بالا High iron and zinc concentrations	بک کراس زمستانه روشن Winter backcross of Roshan	زمستانه Winter	1377	9535
دوم The second	MV-17	زمستانه Winter	1372	غلظت آهن بالا High iron concentration	مروداشت Marvdasht	بهاره Spring	1378	9431
سوم The third	شاهپسند*	زمستانه Winter	1321	غلظت آهن و روی بالا High iron and zinc concentrations	مروداشت Marvdasht	بهاره Spring	1378	9431

*: والد شاهپسند در طول اجرای این مطالعه حذف شد.

*: Shahpasand's parent was removed during the implementation of this study.

جدول ۳- غلظت آهن و روی والدین جمعیت‌ها

Table 3. Iron and zinc concentrations of the parents

Table 3: Iron and Zinc concentrations of the parents						
جمعیت Population	والد پدری Paternal parent			والد مادری Maternal parent		
	رقم Cultivar	غلظت آهن دانه Grain Fe concentration (mg/kg)	غلظت روی دانه Grain Zn concentration (mg/kg)	رقم Cultivar	غلظت آهن دانه Grain Fe concentration (mg/kg)	غلظت روی دانه Grain Zn concentration (mg/kg)
اول The first	گاسکوژن Gascogen	76.349	53.835	بک کراس زمستانه روشن Winter backcross of Roshan		
دوم The second	MV-17	82.115	54.026	مرودشت Marvdasht		
سوم The third	شاهپسند* Shahnasand	77.763	47.620	مرودشت Marvdasht		

*: والد شاهپسند در طول اجرای این مطالعه حذف شد.

*: Shahpasand's parent was removed during the implementation of this study.

مقادیر به دست آمده از میزان ریزمغذی‌ها بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم، در عملکرد دانه تک‌بوته ضرب شده و مقادیر آهن و روی به گرم در بوته تبدیل شد.

$$\text{ZnGY \& FeGY (g/plant)} = \frac{(\text{GMC(mg/kg)} \times \text{GY(g/plant)})}{1000} \quad (\text{رابطه ۲})$$

پردازش و تحلیل آماری: نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون Kolmogorov-Smirnov در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ بررسی گردید. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن (Duncan) در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. ضرایب همبستگی فنوتیپی بین صفات اندازه‌گیری شده به روش پیرسون و با نرم افزار R و به صورت نمودار دمایی رسم گردید. برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها، تجزیه خوشه‌ای به روش Ward با استفاده از مربع فاصله اقلیدسی و به صورت نمودار دمایی در در محیط نرم‌افزار R انجام شد. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها با بسته NbClust در نرم افزار R صورت گرفت. در این بسته، به طور پیش فرض ۳۰ معیار مختلف برای تعیین تعداد خوشه‌ها بررسی می‌شوند و در نهایت، تعداد خوشه‌ای که توسط بیشترین معیارها پشتیبانی شود، به عنوان بهترین تعداد خوشه انتخاب خواهد شد. همچنین مقایسه میانگین خوشه‌ها نیز به روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر بر اساس عملکرد و سایر صفات اندازه‌گیری شده از شاخص گزینش فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چندصفتی (Multi trait genotype ideotype distance index: MGIDI) با استفاده از بسته نرم‌افزاری metan در محیط R استفاده گردید. این شاخص بر اساس اطلاعات صفات مورد بررسی محاسبه شد (Olivoto and Nardino, 2020). مراحل محاسبه آن به صورت زیر است:

۱- تغییر مقیاس صفات: X_{ij} یک جدول دو طرفه با i ردیف (ژنوتیپ) و j ستون (صفت) می‌باشد. مقدار تغییر مقیاس یافته برای ردیف i و ستون j (rX_{ij}) به صورت رابطه ۳ محاسبه شد.

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \varphi_{0j}}{\eta_{0j} - \varphi_{0j}} \times (\theta_{ij} - \eta_{0j}) + \eta_{nj} \quad (\text{رابطه ۳})$$

مدیریت زراعی: عملیات کاشت در تاریخ ۱۱ آذر ۱۴۰۰ به صورت دستی با تراکم ۴۰۰ بوته در مترمربع انجام شد. کوددهی شامل ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل، ۵۰ کیلوگرم اوره و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار قبل از کاشت بود. آبیاری به روش بارانی و بر اساس نیاز آبی گیاه انجام شد. کنترل علف‌های هرز به صورت مکانیکی و دستی صورت گرفت.

صفات مورد اندازه‌گیری: صفات مورد اندازه‌گیری شامل صفات فنولوژیک (روز تا آبستنی، روز تا سنبله‌دهی، روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، دوره پرشدن دانه و سرعت پرشدن دانه)، صفات زراعی (عملکرد دانه، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک بوته، عملکرد کاه، تعداد سنبله تک‌بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن سنبله تک‌بوته، شاخص برداشت و ارتفاع بوته) و صفات کیفی دانه (غلظت آهن و روی دانه و عملکرد آهن و روی دانه) بودند.

روش اندازه‌گیری صفات: مراحل فنولوژیک بر اساس رسیدن ۵۰ درصد بوته‌های هر کرت به مرحله مورد نظر ثبت شد. فاصله زمانی بین ۵۰ درصد ظهور بساک سنبله هر رقم تا رسیدن فیزیولوژیک به عنوان طول دوره پرشدن دانه در نظر گرفته شد (Saeidi and Esmailzadeh, 2000). میانگین سرعت پرشدن دانه (میلی گرم در روز) از حاصل تقسیم وزن هزاردانه بر طول دوره پرشدن دانه به دست آمد (Saeidi and Esmailzadeh, 2000). برای اندازه‌گیری عملکرد دانه، ۱۵ بوته از هر کرت برداشت و پس از خرم‌کوبی توزین و وزن دانه‌های تک‌بوته محاسبه گردید. وزن هزاردانه نیز با شمارش و توزین دو نمونه ۵۰۰ تایی بذر محاسبه شد. جهت تعیین غلظت آهن و روی دانه، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها به طریق سوزاندن خشک (Dry Ashing)، غلظت نمونه‌ها با دستگاه جذب اتمی (مدل SpectraAA-220, VARIAN, Australia) بر حسب ppm قرائت گردید و سپس با استفاده از رابطه (۱) به میلی گرم در کیلوگرم تبدیل شدند.

(رابطه ۱) $\text{GMC(mg/kg)} = (a-b) \left(\frac{V}{W} \right) (100/\text{D.M.}\%)$
که در این رابطه GMC: غلظت ریزمغذی دانه؛ a: غلظت نمونه (ppm)؛ b: غلظت شاهد (برابر صفر)؛ V: حجم نمونه؛ W: وزن نمونه؛ DM%: درصد ماده خشک گیاه می‌باشد.

گزینش برای همه صفات با در نظر گرفتن شدت گزینش ۲۰ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین: بر اساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس (جدول ۴)، در جمعیت اول بین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات وزن هزاردانه، ارتفاع بوته و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در سطح احتمال یک درصد و صفت عملکرد دانه در بوته در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری وجود داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد (جدول ۵)، میانگین عملکرد دانه ۱۰/۴۱ گرم در بوته و ژنوتیپ‌های شماره ۸۷ و ۱۱۶ به ترتیب با ۱۲/۵۹ و ۱۲/۵۸ گرم در بوته، بیشترین میزان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند. این ژنوتیپ‌ها نسبت به ارقام والدینی نیز عملکرد دانه بیشتری داشتند. ژنوتیپ شماره ۸۷ به ترتیب با ۲۱/۲۹ و ۷/۰۶ درصد و ژنوتیپ شماره ۱۱۶، به ترتیب با ۲۱/۱۹ و ۶/۹۷ درصد، عملکرد دانه بیشتری نسبت به دو والد گاسکوژن و بک‌کراس زمستانه روشن داشتند. میانگین عملکرد بیولوژیک در بوته ۳۲/۴۸ گرم در بوته و ژنوتیپ‌های شماره ۸۷، ۸۸، ۱۱۶، والد گاسکوژن و ۳۴ به ترتیب دارای بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک در بوته، ژنوتیپ‌های شماره ۸۷، ۲۷ و والد بک‌کراس زمستانه روشن به ترتیب بیشترین میزان وزن هزاردانه (میانگین ۳۸/۲۲ گرم)، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱۶، ۱۷ و شاهد کرایچف به ترتیب بیشترین میزان تعداد دانه در سنبه (میانگین ۳۹/۵۲)، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۳۴، ۱۵، ۹، ۵۲، ۲۷، والد بک‌کراس زمستانه روشن، ۸۳ و ۸۷ به ترتیب بیشترین میزان ارتفاع بوته (میانگین ۸۲/۶۹ سانتی‌متر) را به خود اختصاص دادند. همچنین شاهد کرایچف بیشترین غلظت روی دانه را در بین ژنوتیپ‌های این جمعیت به خود اختصاص داد. میانگین غلظت روی ژنوتیپ‌های این جمعیت ۶۳/۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در مطالعه هاشمی‌نسب و همکاران (Hasheminasab et al., 2023) به منظور بررسی غلظت ریزمغذی‌ها شامل مس، منگنز، آهن و روی دانه گندم در ایران، میانگین غلظت روی و آهن دانه به ترتیب

φ_{oj} و η_{oj} به ترتیب مقادیر اصلی حداقل و حداکثر برای صفت j پس از تغییر مقیاس (Rescaling) هستند و θ_{ij} مقدار اصلی برای صفت j ام از ژنوتیپ i ام است. برای تغییر مقیاس، مقادیر φ_{nj} و η_{nj} به صورت زیر محاسبه شدند: برای صفاتی که در آن‌ها مقدار بالا مورد نظر است، φ_{nj} برابر با صفر و η_{nj} برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شد، در حالی که برای صفاتی که در آن‌ها مقدار پایین مورد نظر بود، φ_{nj} برابر با ۱۰۰ و η_{nj} برابر با صفر در نظر گرفته شد.

۲- تجزیه به عامل‌ها: در مرحله بعد، تحلیل عاملی (FA) برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط انجام شد. این تحلیل بر اساس رابطه ۴ انجام شد:

$$F = Z(A^T R^{-1})^T \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن F یک ماتریس $g \times f$ با مقادیر عامل‌ها است. Z یک ماتریس $g \times p$ با میانگین استاندارد شده (تغییر مقیاس یافته) است. پارامتر A یک ماتریس $p \times f$ از بارگذاری متعارف (Canonical loadings) است و R یک ماتریس همبستگی $p \times p$ بین صفات است. علاوه بر این، g ، f و p به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها، عامل‌های باقیمانده (عامل‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها از یک بیشتر است) و شاخص‌های محاسبه شده را نشان می‌دهند.

۳- تعریف ایدئوتیپ: طبق تعریف رابطه ۳، ایدئوتیپ دارای بالاترین مقدار متغیر مقیاس (۱۰۰) برای همه صفات مورد بررسی است. بنابراین ایدئوتیپ را می‌توان با یک بردار $I [1 \times p]$ تعریف کرد؛ به طوری که I برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ...، ۱۰۰ باشد. نمرات I نیز بر اساس رابطه ۴ تخمین زده شدند.

۴- محاسبه شاخص MGIDI: در مرحله آخر، فاصله اقلیدوسی بین نمرات ژنوتیپ‌ها و ایدئوتیپ به عنوان شاخص MGIDI با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$MGIDI = \sum_{i=1}^f [(\gamma_{ij} - \gamma_j)^2]^{0.5} \quad \text{رابطه (۵)}$$

γ_{ij} امتیاز i امین ژنوتیپ در فاکتور j ام است ($i=1, 2, \dots$)، f به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و عامل‌ها است، t ؛ $t=1, 2, \dots, f$ ؛ γ_j نمره j ام ایدئوتیپ است. ژنوتیپ‌های با کم‌ترین مقدار MGIDI به ایدئوتیپ نزدیک‌تر هستند. دیفرانسیل

۲۶ و ۳۲/۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شد. نتایج بررسی ۱۵ ساله گندم آبی (نمونه از ده استان ایران گرفته شد) توسط ملکوتی و همکاران (Malakouti et al., 2022) نشان داد که میانگین غلظت روی دانه ۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. همچنین در مطالعه هاشمی‌نسب و همکاران (Hasheminasab et al., 2021)، میانگین غلظت روی در دانه گندم تولید شده در ایران در طول فصول زراعی ۹۶-۱۳۹۵، ۲۳/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

ژنوتیپ‌های ۸۷، ۳۴ و ۸۸ به ترتیب بیشترین میزان صفت عملکرد روی دانه در بوته را نسبت به میانگین ژنوتیپ‌ها (۰/۶۶ گرم در بوته) به خود اختصاص دادند. شاهد کرایچف، ژنوتیپ‌های شماره ۸۸، ۳۴، ۱ و والدین گاسکوژن به ترتیب دارای بیشترین میزان غلظت آهن دانه بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند. میانگین غلظت آهن دانه در ژنوتیپ‌های این جمعیت ۲۹/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بود و از ۲۵/۱۸ تا ۳۶/۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود که نسبت به شاهد کرایچف غلظت آهن دانه کمتری داشتند. ژنوتیپ‌های شماره ۳۴، ۸۸، ۱۱۶ و ۸۷ به ترتیب بیشترین میزان عملکرد آهن دانه در بوته را نسبت به میانگین ژنوتیپ‌ها (۰/۳۱ گرم در بوته) دارا بودند.

در جمعیت دوم بین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات وزن هزاردانه، ارتفاع بوته، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و عملکرد آهن دانه در بوته در سطح احتمال یک درصد و صفات عملکرد دانه در بوته و غلظت آهن دانه در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۴). در این جمعیت ژنوتیپ‌های شماره ۳۷۳، ۲۴۱ و ۲۳۲، بیشترین میزان عملکرد دانه در بوته نسبت به میانگین ژنوتیپ‌ها (۸/۱۹ گرم) را به خود اختصاص دادند (جدول ۵). این ژنوتیپ‌ها نسبت به ارقام والدینی و شاهد کرایچف عملکرد دانه بیشتری داشتند. ژنوتیپ‌های شماره ۳۷۳، ۲۹۳، ۳۲۹، ۱۸۹، ۲۳۴، ۳۲۵ و ۱۴۵، به ترتیب بالاترین غلظت آهن دانه نسبت به میانگین غلظت آهن دانه (۲۸/۹۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) در بین ژنوتیپ‌های این جمعیت را به خود اختصاص دادند. این ژنوتیپ‌ها نسبت به ارقام والدینی و

شاهد کرایچف غلظت آهن دانه بیشتری داشتند. ژنوتیپ‌های این جمعیت میانگین غلظت آهن دانه (۲۸/۹۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) کمتری در مقایسه با میانگین غلظت آهن دانه ۳۲/۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم در ایران (Hasheminasab et al., 2023)، ۳۶/۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در استرالیا (Norton, 2013)، ۳۹/۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در چین (Zhang et al., 2010) و ۳۱/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در ایالات متحده (USDA, 2018) داشتند. همچنین از نظر عملکرد آهن دانه در بوته ژنوتیپ‌های شماره ۳۷۳، ۲۳۲، ۳۲۵، ۱۸۹، ۲۲۶، ۳۲۹، شاهد کرایچف و ژنوتیپ شماره ۲۴۱، به ترتیب بیشترین میزان این صفت را در جمعیت مورد بررسی دارا بودند. اطلاعات آماری مربوط به سایر صفات در این جمعیت، در جدول ۵ ارائه شده است.

تجزیه واریانس در جمعیت سوم نشان داد، بین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات وزن هزاردانه، ارتفاع بوته و عملکرد روی دانه در بوته در سطح احتمال یک درصد و از نظر صفات عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته و عملکرد آهن دانه در بوته در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۴). مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های این جمعیت (جدول ۵) نشان داد از نظر عملکرد دانه در بوته، ژنوتیپ‌های ۴۸۴، ۵۴۵ و ۴۹۱ به ترتیب بیشترین میزان این صفت را دارا بودند. مقدار این صفت در این ژنوتیپ‌ها بیشتر از ارقام والدینی و شاهد بود ژنوتیپ شماره ۴۰۰، شاهد کرایچف و ژنوتیپ شماره ۴۰۳ به ترتیب دارای دارای بالاترین غلظت روی دانه نسبت به میانگین غلظت روی دانه (۵۷/۴۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) در بین ژنوتیپ‌های این جمعیت بودند. میانگین غلظت روی دانه در ارقام چینی گندم در مطالعه هائو و همکاران (Hao et al., 2021) برابر ۴۲/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم با دامنه ۶۳/۲۵-۲۸/۹۶ بود که کمتر از میانگین غلظت روی دانه در ژنوتیپ‌های جمعیت سوم در این مطالعه بود. این ژنوتیپ‌ها غلظت روی دانه بیشتری نسبت به ارقام والدینی داشتند. عملکرد روی دانه در بوته، ژنوتیپ‌های شماره ۴۸۴ و ۴۹۱، به ترتیب

بیشترین میزان را به خود اختصاص دادند. از نظر غلظت آهن دانه، شاهد کرایچف و ژنوتیپ‌های ۴۷۸، ۴۸۴ و ۴۸۳، به‌ترتیب بالاترین میزان این صفت را داشتند. میانگین غلظت آهن دانه در ژنوتیپ‌های این جمعیت ۳۹/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم با دامنه تغییرات ۲۹/۰۸ تا ۵۹/۵۶ بود. این ژنوتیپ‌ها غلظت آهن دانه بیشتری نسبت به ارقام والدینی داشتند. از نظر عملکرد آهن دانه در بوته، ژنوتیپ‌های شماره ۴۸۴، ۴۹۱، شاهد کرایچف و ژنوتیپ‌های شماره ۴۷۸، ۶۱۳ و ۵۴۵، به‌ترتیب بیشترین میزان این صفت را دارا بودند. اطلاعات آماری مربوط به سایر صفات در این جمعیت، در جدول ۵ ارائه شده است. برای ارزیابی و تعیین ژنوتیپ‌های برتر گندم نان از نظر عملکرد و همچنین ریزمغذی‌های روی و آهن در دانه، ۳۷ ژنوتیپ گندم نان با دو نوع تیپ رشدی در دو آزمایش جداگانه (با/بدون محلول پاشی روی) مورد بررسی قرار گرفتند (Sharifi-soltani *et al.*, 2016). نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی بالا از نظر صفات در نظر گرفته شده در این مطالعه بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ارقام بک‌کراس روشن، توس، امید، سرداری، گاسپارد و نوید از نظر ترکیب آهن و عملکرد از بهترین ژنوتیپ‌ها در این تحقیق بودند (Sharifi-soltani *et al.*, 2016).

در مطالعه امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2018) تعداد ۸۰ ژنوتیپ گندم نان از نظر غلظت آهن دانه، روی و پروتئین همراه با صفات زراعی به مدت دو سال متوالی در شرایط نرمال و تنش خشکی آخر فصل مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس مرکب، تغییرات ژنوتیپی قابل توجهی را برای غلظت آهن دانه، روی و پروتئین و همچنین صفات زراعی در هر دو شرایط نشان داد. با توجه به میانگین هر دو سال، تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه و اجزای آن شد، در حالی که روند افزایشی در غلظت آهن دانه، روی و پروتئین مشاهده

شد. در تمام محیط‌ها، عملکرد دانه همبستگی فنوتیپی و ژنوتیپی منفی با غلظت آهن دانه، روی و پروتئین داشت. وراثت‌پذیری عمومی غلظت آهن دانه، روی و پروتئین در شرایط نرمال در طی دو سال در حد متوسط تا زیاد مشاهده شد. در نهایت، دو گروه از ژنوتیپ‌ها برای استفاده به‌عنوان والد در برنامه‌های تلاقی شناسایی شدند (Amiri *et al.*, 2018).

بهبود مستمر پتانسیل عملکرد و محتوای تغذیه‌ای گندم برای دستیابی به چالش‌های آینده امنیت غذایی و تغذیه‌ای مهم است (Govinda *et al.*, 2022). برای تعیین سهم به‌نژادی گندم در افزایش بهره‌وری، داده‌های به‌دست‌آمده از ۱۹۲ آزمایش انجام‌شده در ۱۱ مکان از سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵-۲۰۱۶ توسط شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 2022) انجام شد. با استفاده از این داده‌ها، سود ژنتیکی سالانه برای عملکرد دانه، تعداد روز تا سنبله‌دهی و ارتفاع گیاه در طول دوره ۱۴ ساله تخمین زده شد. میانگین سود ژنتیکی برای عملکرد دانه ۱۱۵ کیلوگرم در هکتار در سال بود، در حالی که ۱۰ ژنوتیپ برتر به سود عملکرد سالانه ۱۲۳ کیلوگرم در هکتار دست یافتند.

ضرایب همبستگی: نتایج تجزیه همبستگی صفات اندازه‌گیری شده در جمعیت اول (شکل ۲) نشان داد، صفت عملکرد دانه در بوته با صفات عملکرد آهن دانه در بوته، عملکرد روی دانه در بوته و عملکرد بیولوژیک در بوته همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار داشت. وو و همکاران (Wu *et al.*, 2022) با بررسی رابطه عملکرد گندم با سال معرفی، اجزای عملکرد، شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک در بوته و ارتفاع بوته از سال ۱۹۴۵ تا ۲۰۱۰ پیشنهاد کردند که بهبود بیشتر عملکرد دانه گندم به افزایش عملکرد بیولوژیک در بوته نیاز دارد. همچنین عملکرد دانه در بوته با صفت وزن هزاردانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت.

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های سه جمعیت گندم نان

Table 4. Analysis of variance of studied traits in the three populations

جمعیت Population	منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	(Mean Square) مربعات میانگین									
			عملکرد دانه در بوته Grain yield per plant	عملکرد بیولوژیک در بوته Biological yield per plant	وزن هزاردانه 1000-grain weight	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	ارتفاع بوته Plant height	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to maturity	غلظت روی دانه Grain Zn concentration	عملکرد روی دانه در بوته Grain Zn yield per plant	غلظت آهن دانه Grain Fe concentration	عملکرد آهن دانه در بوته Grain Fe yield per plant
اول The First	بلوک Block	2	0.223 ^{ns}	11.232 ^{ns}	53.561 *	31.473 ^{ns}	283.388*	0.166 ^{ns}	113.923 ^{ns}	0.015 ^{ns}	111.620*	0.010 ^{ns}
	تیمار Treatment	17	7.445*	76.625 ^{ns}	50.325**	134.459 ^{ns}	426.610 **	1.029**	76.512 ^{ns}	0.026 ^{ns}	40.454 ^{ns}	0.010 ^{ns}
	خطا Error	34	3.737	44.655	10.684	90.243	72.192	0.107	61.032	0.024	24.075	0.006
	ضریب تغییرات Coefficient Variation (%)	-	18.564	20.572	8.553	24.038	10.274	0.163	12.257	23.421	16.363	26.081
دوم The Second	بلوک Block	2	14.220 ^{ns}	141.976 ^{ns}	4.987 ^{ns}	47.302 ^{ns}	153.517 ^{ns}	0.373 ^{ns}	-	-	268.295**	0.021*
	تیمار Treatment	32	8.810*	147.619 ^{ns}	35.163**	251.396 ^{ns}	254.762 **	3.771**	-	-	41.091 *	0.012**
	خطا Error	64	5.031	108.836	9.672	165.540	49.598	1.852	-	-	25.190	0.004
	ضریب تغییرات Coefficient Variation (%)	-	27.387	30.080	10.080	29.753	8.972	0.676	-	-	17.336	28.924
سوم The Tired	بلوک Block	2	18.184 *	1143.522**	11.400 ^{ns}	165.384 ^{ns}	7.662 ^{ns}	2.816 ^{ns}	247.891**	0.051 ^{ns}	81.650 ^{ns}	0.020 ^{ns}
	تیمار Treatment	19	12.231*	89.598 *	29.157**	100.471 ^{ns}	257.800 **	1.490 ^{ns}	42.670 ^{ns}	0.051**	113.237 ^{ns}	0.033 *
	خطا Error	38	5.121	43.535	6.330	139.397	64.386	1.658	34.962	0.017	72.157	0.017
	ضریب تغییرات Coefficient Variation (%)	-	21.928	17.859	7.839	29.630	9.043	0.641	10.297	22.169	21.593	32.412

*, ** و ^{ns}: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار

*, ** and ^{ns}: Significant at the 5 and 1 percent probability levels and non-significant, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها
Table 5- Mean comparisons of the genotypes

جمعیت Population	پارامتر Parameter	عملکرد دانه در بوته (گرم) Grain yield per plant (gr)	عملکرد بیولوژیک در بوته (گرم) Biological yield per plant (gr)	وزن هزارانه (گرم) 1000-grain weight (gr)	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to maturity	غلظت روی دانه (میلی‌گرم/کیلوگرم) Grain Zn Concentration (mg/kg)	عملکرد روی دانه در بوته (گرم/بوته) Grain Zn Yield per plant (g/plant)	غلظت آهن دانه (میلی‌گرم/کیلوگرم) Grain Fe Concentration (mg/kg)	عملکرد آهن دانه در بوته (گرم/بوته) Grain Fe Yield per plant (g/plant)
اول The First	میانگین $\pm$ خطای استاندارد Mean $\pm$ SE (n=18)	10.41 $\pm$ 1.26	32.48 $\pm$ 4.22	38.22 $\pm$ 2.88	39.52 $\pm$ 5.83	82.69 $\pm$ 8.03	200.83 $\pm$ 0.36	63.74 $\pm$ 4.76	0.66 $\pm$ 0.09	29.99 $\pm$ 3.29	0.31 $\pm$ 0.05
	ژنوتیپ‌های دارای میانگین $\pm$ ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean $\pm$ 0.5 STDEV	87-116-52-34- 88-Winter backcross Roshan	87-88-116- Gascogen-34	87-27- winter backcross Roshan	116-17- Krichauff	14-34-15-9-52- 27-winter backcross Roshan-83-87	Krichauff-17	Krichauff	87-34-88	Krichauff-88-34- 1-Gascogen	34-88-116-87
	ژنوتیپ‌های دارای میانگین - میانگین $\pm$ ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean-0.5 STDEV	96-14-Krichauff- 4-15-1	17-4-107-96-1	15- Gascogen-4- Krichauff	52-83-4-1	88-4-1- Gascogen-107- Krichauff	34-83	winter backcross Roshan-96-52- 116	4-14-96-3	52- winter backcross Roshan-17-14-27	4-15-27-1-17-14
	حداقل Minimum	7.25	19.84	26.65	27.53	59.00	199.00	52.49	0.48	25.18	0.22
	حداکثر Maximum	12.59	39.60	44.03	53.67	97.17	201.67	77.03	0.82	36.64	0.43
	حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (5%)	3.20	11.08	5.42	15.76	14.09	0.54	12.96	0.25	8.14	0.13
	میانگین $\pm$ خطای استاندارد Mean $\pm$ SE (n=33)	8.19 $\pm$ 1.46	34.68 $\pm$ 6.33	30.85 $\pm$ 2.44	43.24 $\pm$ 8.06	78.49 $\pm$ 6.29	201.14 $\pm$ 0.90	-	-	28.95 $\pm$ 3.43	0.24 $\pm$ 0.04
دوم The Second	ژنوتیپ‌های دارای میانگین $\pm$ ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean $\pm$ 0.5 STDEV	373-241-232- 325-321- Krichauff-223	373-329-185- 241-165-322- 189	373-329-233- 189-371-322- 391	371-189-245- 195-241-326- MV17-185- 232	189-329-165- 386-293-367- 321-245-214- 241-345	184-207-329- 195- Marvdasht- 341-373- MV17	-	-	373-293-329- 189-234-325-145	373-232-325- 189-226-329- Krichauff-241
	ژنوتیپ‌های دارای میانگین - میانگین $\pm$ ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean-0.5 STDEV	367-347-MV17- 214-145-345- 386	371-244-347- 341-367-345- 145-386	341-Krichauff- 367-145-386- MV17-320-245	234- Krichauff- 145-214-341- 320	195-371-244- Krichauff-184- 326-234- MV17-325- 145-320	244-322-371- 391-145-214- 232-234-189- 245-326	-	-	326-233-184- 322- Marvdasht- 341-185-214	145-341- MV17-347- 345-214-386
	حداقل Minimum	4.04	17.99	21.35	24.33	62.67	199.33	-	-	22.42	0.11
	حداکثر Maximum	11.46	45.68	38.03	56.60	96.67	204.33	-	-	38.38	0.44
	حداقل اختلاف معنی‌دار LSD (5%)	3.65	17.01	5.07	20.98	11.48	2.22	-	-	8.18	0.11

ادامه جدول ۵-

Table 5 continued

جمعیت Population	پارامتر Parameter	عملکرد دانه در بوته (گرم) Grain yield per plant (gr)	عملکرد بیولوژیک در بوته (گرم) Biological yield per plant (gr)	وزن هزارانه (گرم) 1000-grain weight (gr)	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to maturity	غلظت روی دانه (میلی گرم/کیلوگرم) Grain Zn Concentration (mg/kg)	عملکرد روی دانه (گرم/بوته) Grain Zn Yield per plant (g/plant)	غلظت آهن دانه (میلی گرم/کیلوگرم) Grain Fe Concentration (mg/kg)	عملکرد آهن دانه (گرم/بوته) Grain Fe Yield per plant (g/plant)
	میانگین $\pm$ خطای استاندارد Mean $\pm$ SE (n=33)	10.32 $\pm$ 1.61	36.94 $\pm$ 5.64	32.09 $\pm$ 2.14	39.85 $\pm$ 6.52	88.72 $\pm$ 6.44	200.68 $\pm$ 0.74	57.43 $\pm$ 3.85	0.60 $\pm$ 0.09	39.34 $\pm$ 5.31	0.41 $\pm$ 0.08
	ژنوتیپ‌های دارای میانگین $\pm$ ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean $\pm$ 0.5 STDEV	484-545-491	484-400-483	491-484-545-613	483-400-640	484-545-478-483-613	Marvdasht-484-579-478-Krichauff	400-Krichauff-403	484-491	Krichauff-478	484-491-Krichauff-478-613-545
سوم The Third	ژنوتیپ‌های دارای میانگین - ۰/۵ انحراف معیار Genotypes with Mean - 0.5 STDEV	403-394-420-579-477	394-477-579	420-481-452-Krichauff-478-394-Marvdasht	484-560-478-491-403	407-640-Krichauff-477-Marvdasht	491-403-640-421	394-452-545-477	452-420-579-394-477	477-394	420-452-403-579-477-394
	حداقل Minimum	7.13	27.76	27.80	31.73	75.50	199.00	49.80	0.35	29.08	0.23
	حداکثر Maximum	14.32	50.64	37.81	53.00	106.83	201.67	63.26	0.87	59.58	0.59
	حداقل اختلاف معنی دار LSD (5%)	3.74	10.90	4.15	19.51	13.26	2.12	9.77	0.21	14.04	0.21

** : برای صفت عملکرد دانه در بوته، میانگین $\pm$ ۲ خطای استاندارد جهت پیدا کردن ژنوتیپ‌های برتر لحاظ گردید.

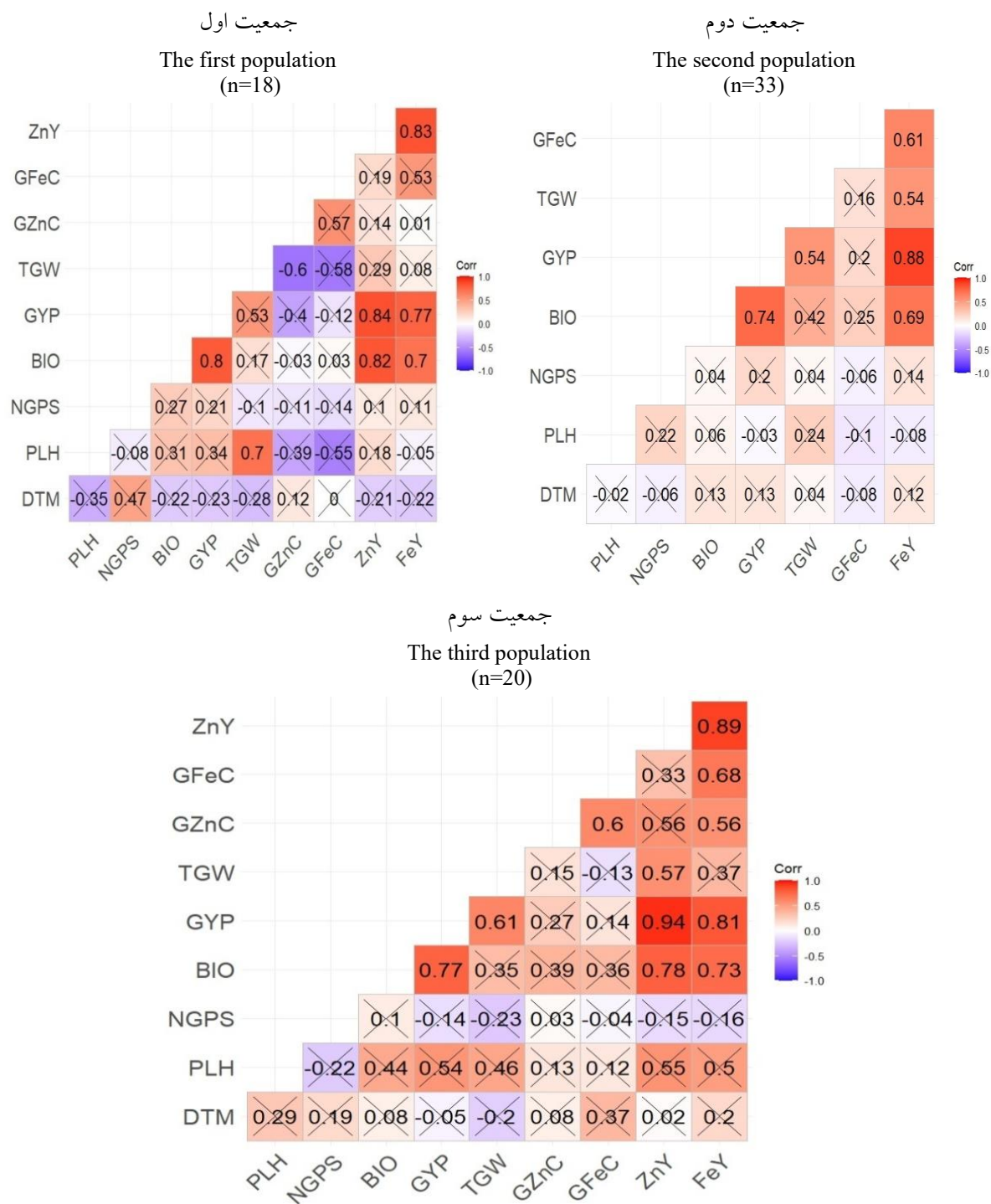
** : For the Grain yield per plant, mean $\pm$ 2 SD was considered to find superior genotypes.

همبستگی مثبت بین عملکرد دانه و وزن هزاردانه در این مطالعه را می‌توان بر اساس مبانی ژنتیکی پلیوتروپی (اثر همزمان یک ژن بر چند صفت) توجیه کرد (Schulthess et al., 2017). تحقیقات نشان دادند که ژن‌های اصلی نظیر *TaGW2-6B* و جایگاه Rht-B1 به‌طور همزمان بر وزن دانه و عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارند (Schulthess et al., 2017). غلظت روی دانه با غلظت آهن دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان داد. بنابراین، انتظار می‌رود که افزایش ژنتیکی غلظت روی، همزمان غلظت آهن دانه را افزایش دهد و بالعکس (Liu et al., 2014). بسیاری از مطالعات همبستگی مثبتی بین غلظت آهن و روی در دانه گندم گزارش کرده‌اند. برای مثال، گراهام و همکاران (Graham et al., 1999) همبستگی مثبت و قوی ($r=0.70^{***}$) بین غلظت آهن و روی در ۱۳۲ نمونه گندم نان در مکزیک گزارش کردند. در مطالعه لیو و همکاران (Liu et al., 2014)، غلظت آهن و روی و عملکرد دانه ۶۵۵ نمونه گندم کشت شده در چین از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ بررسی شد. نتایج نشان داد که غلظت آهن دانه با غلظت روی هم برای گندم بهاره و هم برای گندم پاییزه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. غلظت روی دانه همبستگی منفی و بسیار معنی‌داری با وزن هزاردانه داشت. در مطالعه تاپا و همکاران (Thapa et al., 2022) غلظت روی دانه همبستگی مثبتی با وزن هزاردانه داشت که با نتایج فوق مغایرت دارد. همچنین، وزن هزاردانه با ارتفاع بوته همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری داشت. طبق گفته ولوو و همکاران (Velu et al., 2017a) وزن هزاردانه ارقام گندم نیمه‌پاکوتاه کمتر از ارقام پا بلند بود. بنابراین دلیل این‌که ژنوتیپ‌های با ارتفاع بیشتر وزن هزاردانه بیشتری دارند ممکن است به دلیل اندازه بزرگتر دانه آن‌ها باشد.

در جمعیت دوم (شکل ۲) عملکرد دانه در بوته با صفات عملکرد آهن دانه در بوته، وزن هزاردانه و عملکرد

بیولوژیک همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار را نشان داد. در مطالعه ولوو و همکاران (Velu et al., 2017b) عملکرد دانه با وزن هزاردانه همبستگی مثبت داشتند که مؤید نتایج فوق است. همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار بین عملکرد آهن دانه در بوته با غلظت آهن دانه، عملکرد بیولوژیک و وزن هزاردانه نشان داده شد.

همبستگی بین صفات در جمعیت سوم (شکل ۲) نشان داد عملکرد دانه در بوته با عملکرد آهن دانه در بوته، عملکرد روی دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک و وزن هزاردانه همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار دارد. غلظت آهن دانه با صفات عملکرد آهن دانه در بوته و غلظت روی دانه همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار داشت. در مطالعه تاپا و همکاران (Thapa et al., 2022) غلظت روی با آهن دانه همبستگی مثبت و قوی داشتند، که نشان می‌دهد بهبود همزمان هر دو ریزمغذی از طریق اصلاح گندم امکان‌پذیر است. این یافته با مطالعات مورگونوو و همکاران (Morgounov et al., 2007)، ولوو و همکاران (Liu et al., 2012)، لیو و همکاران (Velu et al., 2012) و چاترا و همکاران (Chatrath et al., 2018) و گیمیر و همکاران (Ghimire et al., 2019) همسو است. عملکرد روی دانه در بوته با عملکرد آهن دانه در بوته، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و وزن هزاردانه همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار داشت. همبستگی مثبت بین عملکرد روی و عملکرد آهن دانه را می‌توان وجود QTL‌های پایدار با اثر پلیوتروپی توجیه کرد که به‌طور همزمان بر جذب و انباشت هر دو ریزمغذی تأثیر می‌گذارند (Joukhadar et al., 2025). همچنین همبستگی مثبت عملکرد روی دانه در بوته با عملکرد بیولوژیک و وزن هزاردانه نشان‌دهنده آن است که ژنوتیپ‌های با زیست‌توده بالاتر و دانه‌های درشت‌تر، ظرفیت بیشتری برای انباشت روی در دانه دارند.



شکل ۲- نقشه دمایی ضرایب همبستگی بین صفات در جمعیت‌ها

Figure 2. Heatmap of the correlation analysis between the traits of the population

DTM: روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، PLH: ارتفاع بوته، NGPS: تعداد دانه در سنبله، BIO: عملکرد بیولوژیک در بوته، GYP: عملکرد دانه در بوته، TGW: وزن هزاردانه، GZnC: غلظت روی دانه، GFeC: غلظت آهن دانه، ZnY: عملکرد روی دانه در بوته، FeY: عملکرد آهن دانه در بوته

DMT: Days to maturity; PLH: Plant height; NGPS: Number of grains per spike; BIO: Biological yield per plant; GYP: Grain yield per plant; TGW: 1000- Grain weight; GZnC: Grain Zn concentration; GFeC: Grain Fe concentration; ZnY: Grain Zn yield per plant; FeY: Grain Fe yield per plant

این یافته‌ها با مطالعات پیشین که افزایش همزمان عملکرد دانه، وزن هزاردانه و غلظت روی را در برنامه‌های به‌نژادی گندم تأیید کرده‌اند، همخوانی کامل دارد (Govindan *et al.*, 2022). همچنین، صفت عملکرد آهن دانه در بوته با عملکرد بیولوژیک همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار را نشان داد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد آهن دانه در بوته و عملکرد بیولوژیک در بوته را می‌توان چنین توجیه کرد که ژنوتیپ‌های با زیست‌توده بالاتر، سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته‌تری دارند و در نتیجه توانایی بیشتری در جذب آهن از خاک و انتقال آن به دانه نشان می‌دهند (Hafsa *et al.*, 2025).

در هر سه جمعیت مورد بررسی، عملکرد دانه در بوته با عملکرد بیولوژیک و وزن هزاردانه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت که نشان‌دهنده پایداری این ارتباط در زمینه‌های ژنتیکی متفاوت است. عملکرد دانه در هر سه جمعیت با عملکرد آهن و عملکرد روی دانه همبستگی مثبت نشان داد که حاکی از پتانسیل بالای این ژنوتیپ‌ها در ترکیب عملکرد بالا با قابلیت جذب و انباشت ریزمغذی‌هاست (Govindan *et al.*, 2022). غلظت آهن و روی دانه در جمعیت اول و سوم با یکدیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند و این رابطه توسط مطالعات پیشین در ژنوتیپ‌های مختلف گندم تأیید شده است (Joukhadar *et al.*, 2025).

در جمعیت اول (شکل ۳)، خوشه اول شامل نه ژنوتیپ بود که دارای عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته و وزن هزاردانه بالایی بودند. همچنین ژنوتیپ‌های این خوشه روز تا رسیدگی فیزیولوژیک پایینی داشتند و زودرس هستند. بنابراین ژنوتیپ‌های این خوشه مناسب انتخاب جهت پیشبرد برنامه‌های به‌نژادی هستند. خوشه دوم این جمعیت شامل یک ژنوتیپ (KRY) بود که عملکرد دانه در بوته، وزن هزاردانه، ارتفاع بوته پایین، تعداد دانه در سنبله و غلظت آهن و روی دانه بالایی داشت. خوشه سوم شامل هشت ژنوتیپ بود که عملکرد دانه در بوته، وزن هزاردانه و غلظت روی دانه متوسطی نسبت به دو خوشه اول و دوم داشتند.

در جمعیت دوم (شکل ۳)، خوشه اول شامل هفت ژنوتیپ (۲۱۴، ۳۴۱، ۳۶۷، ۳۴۵، ۳۸۶، ۱۴۵ و MV17) با عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته، وزن هزاردانه و غلظت آهن دانه پایینی بود. خوشه دوم این جمعیت شامل سایر ژنوتیپ‌ها (۲۶ ژنوتیپ) بود که عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته، وزن هزاردانه و غلظت آهن دانه بالایی داشت. ژنوتیپ‌های این دو خوشه از لحاظ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند. نتایج تجزیه خوشه‌ای برای جمعیت سوم (شکل ۳) نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته، وزن هزاردانه و ارتفاع بوته را ژنوتیپ‌های خوشه دوم با دو ژنوتیپ (۴۸۴ و ۵۴۵) به خود اختصاص دادند. خوشه چهارم با چهار ژنوتیپ (۴۰۰، ۴۸۳، KRY و ۴۷۸) بیشترین میزان غلظت آهن و روی دانه و تعداد دانه در سنبله را دارا بودند. خوشه سوم شامل هفت ژنوتیپ (۴۷۷، ۵۷۹، ۴۵۲، ۴۲۰، ۴۸۱، ۳۹۴ و مرودشت) بود که عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته و غلظت روی و آهن دانه در بوته پایینی نسبت به سه خوشه دیگر داشت. همچنین، خوشه اول با هفت ژنوتیپ از لحاظ صفات عملکرد دانه در بوته، وزن هزاردانه و غلظت روی دانه در وضعیت نسبتاً مطلوبی قرار داشت. از لحاظ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های این چهار خوشه از این جمعیت تفاوت بسیار معنی‌داری باهم نداشتند.

تجزیه خوشه‌ای: تجزیه خوشه‌ای یک روش آماری چندمتغیره برای طبقه‌بندی مشاهدات یا متغیرها به گروه‌های مجزا (خوشه‌ها) است، به‌طوری که اعضای یک خوشه حداکثر شباهت را با یکدیگر و حداکثر تفاوت را با اعضای سایر خوشه‌ها داشته باشند. اهمیت این روش در توانایی آن برای کشف الگوهای طبیعی و ساختارهای نهفته در داده‌های پیچیده، بدون نیاز به اطلاعات پیشین درباره گروه‌بندی مشاهدات است (Everitt *et al.*, 2011). نتایج تجزیه خوشه‌ای (جدول ۶)، ژنوتیپ‌های جمعیت اول را در سه خوشه، جمعیت دوم را در دو خوشه و جمعیت سوم را در چهار خوشه قرار داد.

جدول ۶- مقایسات میانگین خوشه‌ها برای صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های سه جمعیت گندم نان به همراه والدین آن‌ها و ژنوتیپ شاهد

Table 6. Means comparisons of the clusters for measured traits in genotypes of three bread wheat populations along with their parents and the control genotype

		غلظت آهن دانه	غلظت دانه	روز تا رسیدگی	ارتفاع بوته	تعداد دانه در	وزن هزارانه	عملکرد بیولوژیک در دانه در بوته	عملکرد	تعداد	خوشه جمعیت
		(میلی گرم/کیلوگرم)	(میلی گرم/کیلوگرم)	(روز)	(سانتی متر)	سنبله	(گرم)	بوته (گرم)	(گرم)	ژنوتیپ	Population Cluster
		Grain Fe concentration (mg/kg)	Grain Zn concentration (mg/kg)	Days to maturity (day)	Plant height (cm)	Number of grains per spike	1000-Grain weight (gr)	Biological yield per plant (gr)	Grain yield per plant (gr)	Number of Genotypes	
The First	1	30.20 ^{ab}	62.39 ^b	200.55 ^b	86.27 ^a	38.75 ^a	39.62 ^a	36.39 ^a	11.66 ^a	9	اول
	2	36.64 ^a	77.03 ^a	201.67 ^a	59.00 ^b	45.33 ^a	26.65 ^b	33.55 ^{ab}	8.80 ^b	1	
	3	28.90 ^b	63.58 ^b	201.04 ^{ab}	81.62 ^a	39.65 ^a	38.09 ^a	27.94 ^b	9.21 ^b	8	
	<i>F test</i>	-	*	-	-	-	**	**	**		
	<i>CV%</i>	11.39	6.28	0.26	12.99	17.56	7.81	9.06	9.27		
The Second	1	28.15 ^a	-	201.19 ^a	79.38 ^a	37.83 ^a	28.11 ^b	25.73 ^b	5.74 ^b	7	دوم
	2	29.16 ^a	-	201.12 ^a	78.25 ^a	44.69 ^a	31.58 ^a	37.09 ^a	8.85 ^a	26	
	<i>F test</i>	-	-	-	-	-	*	**	**		
	<i>CV%</i>	12.90	-	0.56	11.91	20.44	10.22	15.22	13.95		
The Tired	1	38.25 ^b	58.91 ^{ab}	200.04 ^b	88.19 ^b	37.31 ^a	34.02 ^a	37.43 ^b	11.17 ^b	7	سوم
	2	39.08 ^b	55.94 ^b	201.33 ^a	106.00 ^a	37.60 ^a	36.38 ^a	45.05 ^a	14.07 ^a	2	
	3	35.93 ^b	54.45 ^b	200.85 ^{ab}	83.97 ^b	40.70 ^a	30.12 ^b	33.07 ^b	8.54 ^c	7	
	4	47.32 ^a	60.75 ^a	201.16 ^a	89.33 ^b	43.90 ^a	30.01 ^b	38.79 ^{ab}	10.04 ^{bc}	4	
	<i>F test</i>	*	*	**	*	-	**	*	**		
	<i>CV%</i>	12.27	5.22	0.26	8.33	14.17	6.85	12.03	11.30		

هزاردانه را داشتند. غلظت آهن دانه، روی و پروتئین بالا از ویژگی‌های متمایز مهم خوشه سوم شامل دو ژنوتیپ (شاهپسند و نورستار) بودند.

انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI): الیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) یک شاخص چند صفتی جدید بر اساس تجزیه و تحلیل عاملی و فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ با نام MGIDI معرفی کردند. این شاخص، یک شاخص انتخاب چندمتغیره است که اطلاعات مربوط به صفات مختلف را در یک ارزش جمع می‌کند و ژنوتیپ‌ها را بر اساس فاصله آن‌ها از یک ژنوتیپ ایده‌آل، رتبه‌بندی می‌کند (Olivoto and Nardino, 2020).

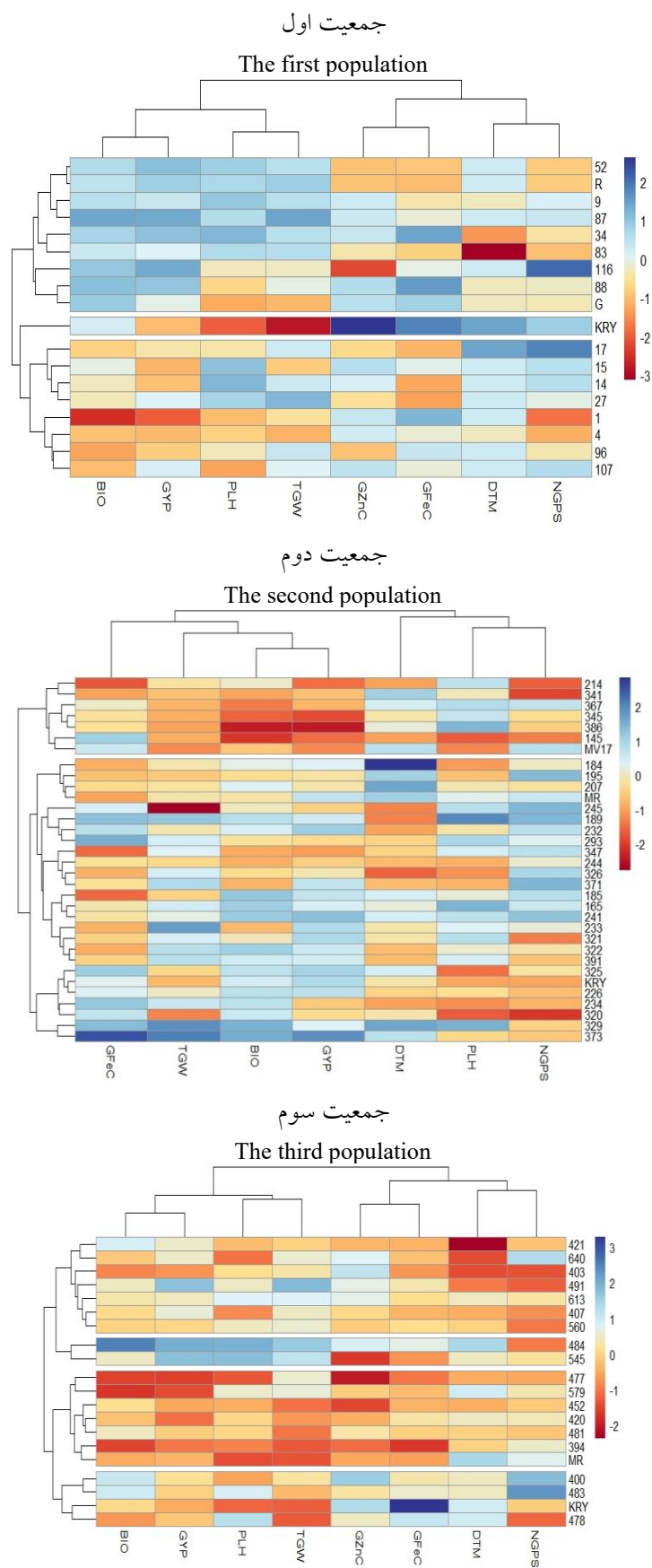
شکل ۴- سمت چپ رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها را بر اساس این شاخص نشان می‌دهد. در این روش، ژنوتیپ‌هایی با کمترین مقدار MGIDI، در حقیقت فاصله کمتری تا ایدئوتیپ یا ژنوتیپ هدف دارند و ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات مورد بررسی هستند. بر اساس این معیار از

در مطالعه امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2018) نتایج تجزیه خوشه‌ای ۸۰ ژنوتیپ گندم نان، ژنوتیپ‌ها را در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی در سه خوشه گروه‌بندی کرد. در شرایط نرمال، خوشه اول شامل ۱۸ ژنوتیپ بود که کمترین عملکرد دانه، شاخص برداشت، تعداد سنبله در مترمربع و تعداد دانه در سنبله را داشتند، اما از غلظت آهن دانه، روی و پروتئین بالایی برخوردار بودند. تنها سه ژنوتیپ از ۱۸ ژنوتیپ در خوشه اول بودند، چهل ژنوتیپ در خوشه دوم قرار داشتند. این ژنوتیپ‌ها در اکثر صفات، مقدار متوسطی داشتند. خوشه سوم شامل ۲۲ ژنوتیپ بود که کمترین میزان غلظت آهن دانه، روی و پروتئین و بیشترین عملکرد دانه، شاخص برداشت و تعداد سنبله در مترمربع را داشتند. در شرایط تنش خشکی، خوشه اول شامل ۲۷ ژنوتیپ بود که متوسط مقادیر صفات را داشتند. پنجاه و یک ژنوتیپ در خوشه دوم قرار گرفتند. این ژنوتیپ‌ها کمترین غلظت آهن دانه، روی و پروتئین و بیشترین عملکرد دانه، شاخص برداشت، تعداد سنبله در مترمربع و تعداد دانه در سنبله و وزن

جمعیت اول ژنوتیپ‌های ۱۳ (ژنوتیپ ۹۶)، ۸ (ژنوتیپ ۳۴)، ۱۶ (والد بک‌کراس زمستانه روشن) و ۱۲ (ژنوتیپ ۸۸)، از جمعیت دوم ژنوتیپ‌های ۲۸ (ژنوتیپ ۳۴۷)، ۱۰ (ژنوتیپ ۲۲۶)، ۱۲ (ژنوتیپ ۲۳۳)، ۱۶ (ژنوتیپ ۲۴۵)، ۹ (ژنوتیپ ۲۱۴)، ۵ (شاهد کرایچف) و ۲۰ (ژنوتیپ ۳۲۱)، از جمعیت سوم ژنوتیپ‌های ۱۸ (ژنوتیپ ۵۷۹)، ۲ (ژنوتیپ ۴۰۰)، ۶ (ژنوتیپ ۴۲۱) و ۴ (ژنوتیپ ۴۰۷) به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند. ژنوتیپ‌های برتر معرفی شده توسط شاخص MGIDI از جمعیت اول، به جز یک ژنوتیپ (ژنوتیپ شماره ۹۶)، همگی در خوشه اول تجزیه خوشه‌ای قرار داشتند. این خوشه دارای بالاترین عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته، وزن هزاردانه و پایین‌ترین تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک بود. همچنین از نظر غلظت روی و آهن دانه در وضعیت مطلوبی قرار داشت. خوشه سوم که ژنوتیپ شماره ۹۶ در آن قرار گرفته بود از لحاظ صفات عملکرد، اجزای عملکرد و صفات کیفی دانه (غلظت آهن و روی دانه) در وضعیت متوسط و مطلوبی قرار داشت. در جمعیت دوم تمام ژنوتیپ‌های برتر منتخب توسط شاخص MGIDI، به‌جز ژنوتیپ شماره ۲۱۴، همگی در خوشه دوم تجزیه خوشه‌ای قرار گرفتند که دارای عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک در بوته، وزن هزاردانه و غلظت آهن دانه بالایی بود. ژنوتیپ شماره ۲۱۴ که در خوشه اول قرار گرفته بود از نظر صفات اجزای عملکرد (وزن هزاردانه و تعداد دانه در سنبله) و غلظت آهن دانه در وضعیت مطلوبی قرار داشت. همچنین، در جمعیت سوم ژنوتیپ‌های برتر معرفی شده توسط MGIDI، به‌طور پراکنده در خوشه سوم (از لحاظ صفات وزن هزاردانه و تعداد دانه در سنبله در وضعیت مطلوبی بود)، خوشه چهارم (تعداد دانه در سنبله و غلظت آهن و روی دانه بالایی داشت) و خوشه اول (از نظر صفات عملکرد دانه در بوته، وزن هزاردانه و غلظت روی دانه در وضعیت مطلوبی قرار داشت) قرار داشتند. این پراکندگی نشان‌دهنده یک رابطه مکمل بین دو روش است، به این معنی که شاخص MGIDI با رویکرد چندصفتی، ژنوتیپ‌هایی را انتخاب می‌کند که به‌طور همزمان در

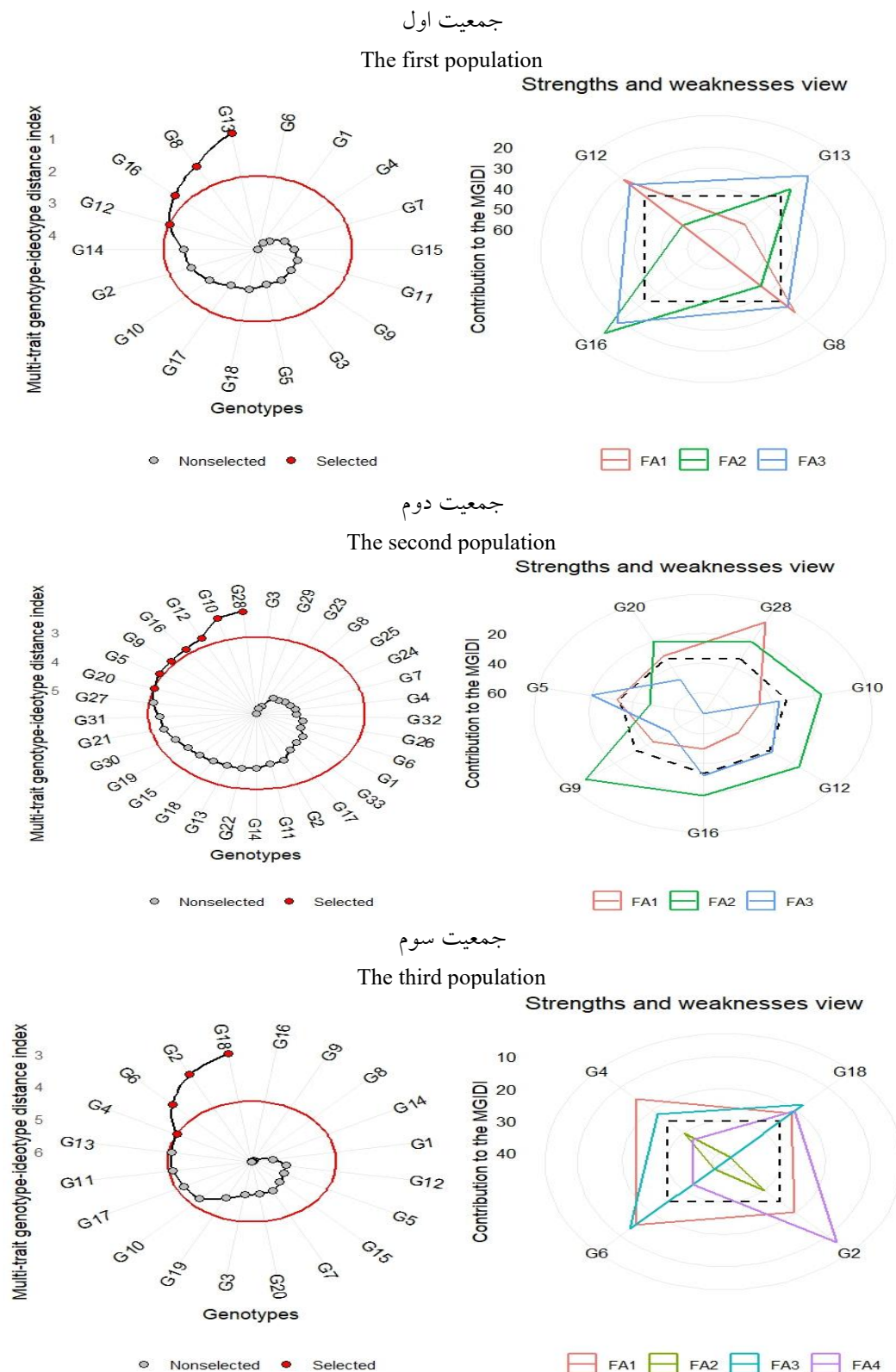
خوشه‌ها وضعیت مطلوبی دارند، در حالی که تجزیه خوشه‌ای صرفاً گروه‌های همگن را تفکیک می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از شاخص MGIDI و تجزیه خوشه‌ای همدیگر را تأیید می‌کنند، زیرا ژنوتیپ‌های برتر منتخب توسط MGIDI عمدتاً در خوشه‌های با عملکرد، اجزای عملکرد و غلظت ریزمغذی بالا (خوشه برتر) قرار داشتند. بنابراین، استفاده همزمان از این دو روش، اطمینان از صحت گزینش را افزایش می‌دهد و رویکردی مکمل برای شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل در برنامه‌های به‌نژادی فراهم می‌آورد.

شاخص MGIDI با تعیین سهم هر عامل در فاصله ژنوتیپ تا ایدئوتیپ، امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های منتخب را فراهم می‌آورد (شکل ۴). در این رویکرد، کاهش سهم یک عامل در یک ژنوتیپ به معنای نزدیکی آن عامل به لبه خارجی شکل (خارج از نقطه چین) بوده و حاکی از نزدیکی صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل است؛ بنابراین، ژنوتیپی که در تعداد بیشتری از عوامل، سهم کمتری داشته باشد (یعنی عوامل بیشتری در لبه خارجی قرار گیرند)، از لحاظ صفات مهم مرتبط با آن عوامل، به ایدئوتیپ نزدیک‌تر خواهد بود (Olivoto and Nardino, 2021). همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در جمعیت اول، ژنوتیپ‌های ۸۸ (کد ۱۲) و ۳۴ (کد ۸) در عامل اول (FA1)، والد بک‌کراس زمستانه روشن (کد ۱۶) در عامل دوم (FA2) و ژنوتیپ ۹۶ (کد ۱۳) در عامل سوم (FA3) به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند. در جمعیت دوم، ژنوتیپ ۳۴۷ (کد ۲۸) در عامل اول (FA1)، ژنوتیپ‌های ۲۱۴، ۲۴۵، ۲۳۳، ۲۲۶ و ۳۲۱ (کدهای ۹، ۱۶، ۱۲، ۱۰ و ۲۰) در عامل دوم (FA2) و شاهد کرایچف (کد ۵) در عامل سوم (FA3) به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر گزینش شدند. همچنین، در جمعیت سوم ژنوتیپ ۴۰۷ (کد ۴) در عامل اول (FA1)، ژنوتیپ‌های ۴۲۱ و ۵۷۹ (کدهای ۶ و ۱۸) در عامل سوم (FA3) و ژنوتیپ ۴۰۰ (کد ۲) در عامل چهارم (FA4) که به لبه شکل نزدیک‌تر می‌باشند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی شدند.



شکل ۳- نمودار تجزیه خوشه‌ای جمعیت‌ها

Figure 3- Cluster analysis diagram of populations



شکل ۴- تصویر سمت چپ: الگوی رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های انتخاب شده بر اساس شاخص MGIDI، تصویر

سمت راست: نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های انتخاب شده بر اساس شاخص MGIDI

Figure 4. Left: Genotype ranking in ascending order according to the MGIDI index, Right: Evaluation of strengths and weaknesses for the selected genotypes based on the same index

(Patil *et al.*, 2025) انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده از شاخص MGIDI، نه ژنوتیپ برتر، شناسایی شدند. میانگین غلظت آهن در هر سه جمعیت مورد مطالعه کمتر از غلظت توصیه شده برای سلامت انسان (آهن = ۵۷ میلی گرم در کیلوگرم) بود که نشان‌دهنده کمبود این ریزمغذی در دانه‌های گندم است. همچنین میانگین غلظت روی دانه در جمعیت اول و سوم بیشتر از غلظت توصیه شده برای سلامت انسان (روی = ۴۱ میلی گرم در کیلوگرم) بود که نشانگر بالا بودن غلظت این ریزمغذی در دانه‌های گندم جمعیت‌های مورد مطالعه است. با توجه به ماهیت آهکی خاک‌های ایران، pH قلیایی و مقدار کم مواد آلی، فراهمی زیستی عناصر غذایی کم است که بر دسترسی گیاهان به مواد مغذی تأثیر می‌گذارد و علائم کمبود ریزمغذی‌ها در دانه آشکار می‌شود. مقایسه حداکثر عملکرد مشاهده شده در مطالعه حاضر با میانگین‌های جهانی نشان می‌دهد که پتانسیل افزایش عملکرد گندم وجود دارد. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش عملکرد دانه، غلظت ریزمغذی‌های دانه افزایش می‌یابد. غنی‌سازی زیستی گندم هدف مهمی برای مقابله با سوءتغذیه ریزمغذی‌ها در مقیاس بزرگ است. روشن شدن اساس ژنتیکی عملکرد دانه و غلظت ریزمغذی‌ها می‌تواند به توسعه ارقامی با عملکرد و غلظت روی و آهن بالا کمک کند. بر اساس نتایج شاخص گزینش MGIDI از جمعیت اول ژنوتیپ‌های ۹۶، ۳۴، والد بک کراس زمستانه روشن و ۸۸، از جمعیت دوم ژنوتیپ‌های ۳۴۷، ۲۲۶، ۲۳۳، ۲۴۵، ۲۱۴، شاهد کرایچف و ۳۲۱ و از جمعیت سوم ژنوتیپ‌های ۵۷۹، ۴۰۰، ۴۲۱ و ۴۰۷ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی شدند. در مجموع، نتایج حاصل از شاخص MGIDI و تجزیه خوشه‌ای یکدیگر را تأیید کردند. تمامی ژنوتیپ‌های برتر منتخب توسط شاخص MGIDI در خوشه‌هایی قرار داشتند که از نظر صفات عملکرد، اجزای عملکرد و غلظت آهن و روی دانه در وضعیت مطلوبی قرار داشتند. این همسویی نشان می‌دهد که استفاده همزمان از این دو رویکرد چندمتغیره، اطمینان از صحت گزینش را افزایش می‌دهد و راهبرد مؤثری برای شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل در برنامه‌های به‌نژادی گندم نان را فراهم می‌آورد.

در مطالعه پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023) با هدف انتخاب لاین‌های برتر جو بر اساس تعدادی از صفات مورفولوژیکی با استفاده از شاخص‌های گزینشی مبتنی بر صفات مختلف، ۱۷ لاین امیدبخش به‌همراه دو ژنوتیپ شاهد ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص MGIDI لاین‌های G11، G13 و G3 به‌عنوان برترین لاین‌ها از سایر لاین‌ها و ژنوتیپ‌های شاهد معرفی شدند. در تحقیقی گزینش ژنوتیپ‌های گندم دوروم در ۵۰ ژنوتیپ مختلف گندم دوروم متحمل به شوری در مرحله جوانه‌زنی با استفاده از شاخص گزینش چندصفتی توسط صابر و همکاران (Saber *et al.*, 2022) انجام شد. بر اساس شاخص MGIDI ژنوتیپ‌های ۶، ۲۳، ۵، ۳۰، ۳۴، ۲۹، ۳۱، ۲، ۱۰، ۳۹، ۱۳، ۹، ۴۷، ۱۲، ۵۲، ۴۸ و ۱ با داشتن کمترین مقدار شاخص MGIDI بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به شوری بودند. شناسایی لاین‌های برتر نوترکیب گندم (RILs) از RAJ3765 × HD2329 با غلظت ریزمغذی‌های بالا در دانه با استفاده از شاخص MGIDI و شناسایی جایگاه‌های صفات کمی (QTLs)/ژن‌های مرتبط با محتوای ریزمغذی‌های دانه با استفاده از نقشه پیوستگی ژنتیکی مبتنی بر چندشکلی تک‌نوکلئوتیدی (SNP) توسط ملکوندایا و همکاران (Malakondaiah *et al.*, 2025) انجام شد. لاین‌های برتر نوترکیب گندم حاوی کمترین مقادیر MGIDI به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند و بهترین ژنوتیپ‌ها با اعمال شدت انتخاب ۱۵ درصد انتخاب شدند. از بین والدین و ۸۱ لاین برتر نوترکیب گندم آن‌ها، ۱۲ لاین برتر نوترکیب گندم با محتوای بالای ریزمغذی‌های دانه با شدت انتخاب ۱۵ درصد برای تحقیقات بیشتر انتخاب شدند. مطالعه‌ای با هدف شناسایی مناطق ژنومی مرتبط با صفات محتوای آهن دانه، محتوای روی دانه و وزن هزاردانه در دانه‌های گندم تحت تنش گرما و خشکسالی از طریق مطالعات ارتباط ژنومی (GWAS) توسط پتیل و همکاران

References

- Agricultural Statistics. (2025). Agricultural statistics yearbook 2023-2024, Volume 1: Crop products. statistics, information, and communication technology center. Deputy of economic planning. *Ministry of Agricultural Jihad*, Tehran, Iran, 120 pp (In Persian).
- Amiri, R. (2013). Estimating genetic variation of bread wheat cultivars for grain iron, zinc concentrations under normal and terminal drought stress conditions. M. Sc Thesis, Razi University, Kermanshah. Iran (In Persian).
- Amiri, R. (2018). Genetic analysis of grain iron, zinc concentrations in bread wheat. Ph. D Thesis, Razi University, Kermanshah. Iran (In Persian).
- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Cheghamirza, K. (2018). Estimating genetic variation and genetic parameters for grain iron, zinc and protein concentrations in bread wheat genotypes grown in Iran. *Journal of Cereal Science*, 80: 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.009>
- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Cheghamirza, K. (2021). Estimation of genetic control model for agronomic traits in the progeny of marvdasht and MV-17 Wheat cross under normal and terminal drought stress conditions. *Plant Genetic Research*, 8(1): 1-20 (In Persian). <http://dx.doi.org/10.52547/pgr.8.1.5>
- Amiri, R., Bahraminejad, S., Cheghamirza, K. and Arzani, A. (2020). Genetic analysis of iron and zinc concentrations in bread wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 95: 103077. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103077>
- Amiri, R., Bahraminejad, S., Sasani, S., Jalali-Honarmand, S. and Fakhri, R. (2015). Bread wheat genetic variation for grain's protein, iron and zinc concentrations as uptake by their genetic ability. *European Journal of Agronomy*, 67: 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.03.004>
- Arzani, A. and Ashraf, M. (2017). Cultivated ancient wheats (*Triticum* spp.): A potential source of health-beneficial food products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3): 477-488. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12262>
- Chatrath, R., Tiwari, V., Gupta, V., Kumar, S., Singh, S.K., Mishra, C.N., Venkatesh, K., Saharan, M.S., Gyanendra, S., Tyagi, B.S., Ratan, T., Indu, S., Om, P. and Singh, G.P. (2018). WB 2: A high yielding bread wheat variety for irrigated timely sown conditions of North Western Plains Zone of India. *Wheat Barley Research*, 10 (1): 40–44.
- Crespo-Herrera, L.A., Govindan, V., Stangoulis, J., Hao, Y. and Singh, R.P. (2017). QTL mapping of grain Zn and Fe concentrations in two hexaploid wheat RIL populations with ample transgressive segregation. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1800. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01800>
- Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*, 5st. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470977811>
- FAO (2025). The State of Food Security and Nutrition in the World 2025– Addressing high food price inflation for food security and nutrition. Rome, pp. 1-234. <https://doi.org/10.4060/cd6008en>
- Frydrych, A., Krośniak, M. and Jurowski, K. (2023). The role of chosen essential elements (Zn, Cu, Se, Fe, Mn) in food for special medical purposes (FSMPs) dedicated to oncology patients—critical review: State-of-the-Art. *Nutrients*, 15(4): 1012. <https://doi.org/10.3390/nu15041012>
- Ghimire, S., Thapa, D.B., Paudel, A. and Adhikari, N.R. (2019). Variability study of biofortified bread wheat genotypes for grain zinc and iron concentration, yield and yield associated traits at Khumaltar, Lalitpur, Nepal. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 7(2): 184-194. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v7i2.23433>
- Govindan, V., Atanda, S., Singh, R.P., Huerta-Espino, J., Crespo-Herrera, L.A., Juliana, P., Mondal, S., Joshi, A. and Bentley, A.R. (2022). Breeding increases grain yield, zinc, and iron, supporting enhanced wheat biofortification. *Crop Science*, 62(5): 1912-1925. <https://doi.org/10.1002/csc2.20759>
- Graham, R., Senadhira, D., Beebe, S., Iglesias, C. and Monasterio, I. (1999). Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Research*, 60(1-2): 57-80. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00133-6)
- Gupta, P.K., Balyan, H.S., Sharma, S. and Kumar, R. (2020). Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: present status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 134: 1-35. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03709-7>
- Hafsa, Kiran, A., Wakeel, A. and Ahmad, F. (2025). Genotypic variability in root system architecture and its association with Fe and Zn biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 188(4): 686–701. <https://doi.org/10.1002/jpln.12020>

- Hakeem, S., Ali, Z., Saddique, M.A.B., Habib-Ur-Rahman, M. and Wiehle, M. (2025). Harnessing genetic diversity in wheat to enhance grain nutrition and yield for biofortification breeding. *Biological Research*, 58(1): 33.
<https://doi.org/10.1186/s40659-025-00606-5>
- Hao, B., Ma, J., Chen, P., Jiang, L., Wang, X., Li, C. and Wang, Z. (2021). Wheat breeding in China over the past 80 years has increased grain zinc but decreased grain iron concentration. *Field Crops Research*, 271: 108253, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108253>
- Hasheminasab, K.S., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K. and Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14: 100913, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913>
- Joukhadar, R., Trethowan, R. M., Thistlethwaite, R., Hayden, M.J., Stangoulis, J., Cu, S., Tibbits, J. and Daetwyler, H.D. (2025). Stable pleiotropic loci controlling the accumulation of multiple nutritional elements in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 138(5): 95.
<https://doi.org/10.1007/s00122-025-04877-0>
- Kalantari, N., Ghaffarpour, M., HoushiarRad A., Abdollahi, M., Kianfar, H. and Bondarianzadeh, D. (2005). National comprehensive study on household food consumption pattern and nutritional status IR IRAN, 2001–2003. Tehran: Nutrition Research Department, National Nutrition and Food Technology Research Institute (In Persian).
- Khush, G.S., Lee, S., Cho, J.I. and Jeon, J.S. (2012). Biofortification of crops for reducing malnutrition. *Plant Biotechnology Reports*, 6: 195-202.
<https://doi.org/10.1007/s11816-012-0216-5>
- Kumar, P., Mavi, G.S., Kaur, H. and Sohu, V.S. (2024). Nutritional assessment of bread wheat genotypes in relation to processing quality and yield related attributes. *Journal of Cereal Research*, 16(3): 2582-2675.
- Liu, H., Wang, Z. H., Li, F., Li, K., Yang, N., Yang, Y., Huang, D., Liang, D., Zhao, H., Mao, H., Liu, J. and Qiu, W. (2014). Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China. *Field Crops Research*, 156: 151-160.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.011>
- Malakondaiah, A.C., Kumar, S., Krishna, H., Singh, B., Taria, S., Dalal, M., Dahandapani, R., Sathee, L., Pandey, R., Kumar, R.R. and Chinnusamy, V. (2025). Mapping of the QTLs governing grain nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under nitrogen treatment using high-density SNP markers. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1553525, 1-15.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1553525>
- Malakouti, A.M.J., Bahrani, A. and Namini, S.K.A. (2022). The role of balanced fertilization on the reduction of phytic acid to zinc molar ratio (PA/Zn) in the irrigated and rainfed wheat fields on the 16 calcareous soils of Iran. *Annals of Agricultural & Crop Sciences*, 7(1): 1-5.
- Morgounov, A., Gómez-Becerra, H.F., Abugalieva, A., Dzhunusova, M., Yessimbekova, M., Muminjanov, H., Zelenskiy, T., Ozturk, L. and Cakmak, I. (2007). Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica*, 155(1): 193-203.
<https://doi.org/10.1007/s10681-006-9321-2>
- Nnamani, J.E., Agu, U.F., Okafor, B.C., Aransiola, M.M., Ezeamii, J.C., Benson, O.C., Appiah, L. and Nwokedi, V.U. (2025). A review on micronutrient malnutrition in pregnant women and children under five years. *Journal of Pharma Insights and Research*, 3(3): 304-316.
<https://doi.org/10.69613/kjd00396>
- Norton, R.M. (2013). Wheat grain micronutrient content in southeastern Australia. In XVII. *International Plant Nutrition Colloquium*, 6 (33): 693-694.
- Olivoto, T. and Nardino, M. (2020). MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *BioRxiv*, 2020-07.
- Olivoto, T. and Nardino, M. (2021). MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments, *Bioinformatics*, 37(10): 1383–1389.
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Patil, S.P., Krishna, H., Devate, N.B., Manjunath, K.K., Kumar, P.V., Chauhan, D., Singh, Sh., Khan, H., Mishra, Ch. N., Jain, N., Singh, G.P. and Singh, P.K. (2025). Deciphering the genetic basis of grain iron and zinc content in wheat under heat and drought stress using GWAS. *PLoS One*, 20(8): e0329578.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329578>
- Pour-Aboughadareh, A., Zali, H., Gholipour, A., Kohkan, S., Barati, A., Jabari, M., Kheirgo, M. and Marzoooghian, A. (2023). Selection of barley superior promising lines using selection indexes of multi-trait. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(3): 1-16 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/saps.2021.49073.2773>
- Saber, F., Asghari Zakaria, R., Zare, N. and Farzaneh, S. (2022). Selection of salinity-tolerant durum wheat genotypes at germination stage using MGIDI and IGSI multi-trait selection indices. *Cereal Research*, 12(3): 263-279 (In Persian).
<https://doi.org/10.22124/CR.2023.24343.1762>

- Saeidi, A. and Esmacilzadeh Moghadam, M. (2000). *Growth And Development Stages Of Wheat, Barley And Wild Oat*. Agricultural Education Press, pp. 1-42. (In Persian).
- Schulthess, A.W., Reif, J.C., Ling, J., Plieske, J., Kollers, S., Ebmeyer, E., Korzun, V., Argillier, O., Stiewe, G., Ganai, M.W., Röder, M.S. and Jiang, Y. (2017). The roles of pleiotropy and close linkage as revealed by association mapping of yield and correlated traits of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 68(15): 4089-4101. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx214>
- Seifolahpour, B., Bahraminejad, S., Cheghamirza, K. and Sasani, Sh. (2024). Estimation of genetic parameters related to grain quality characteristics in inbred lines derived from two bread wheat cultivars. *Plant Genetic Research*, 10(2): 137-150 (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22034/PGR.11.1.9>
- Sharifi-soltani, N., Alavi-Kia, S.S. and Shariatipour, N. (2016). Evaluation of bread wheat varieties in terms of grain yield and Zn and Fe accumulation in grain using stress tolerance index. *In Biological Forum-An International Journal*, 8: 351-358.
- Sharma, R., Crossa, J., Ataei, N., Lodin, R., Joshi, A.K., Vargas, M., Braun, H.J., Singh, R.P. and Bentley, A.R. (2022). Plant breeding increases spring wheat yield potential in Afghanistan. *Crop Science*, 62(1): 167-177. <https://doi.org/10.1002/csc2.20653>
- Sheera, A., Aftab, N., Tanwar, J., Meena, V. K., Kumar, O., Dey, T., Singh, V., Singh, J. and Meena, R. K. (2025). Biofortification Strategies for Wheat: enhancing zinc and iron nutritional quality to combat micronutrient deficiencies and ensure food security. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108009. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108009>
- Sushree Shyamli, P., Rana, S., Suranjika, S., Muthamilarasan, M., Parida, A. and Prasad, M. (2021). Genetic determinants of micronutrient traits in graminaceous crops to combat hidden hunger. *Theoretical and Applied Genetics*, 134: 3147-3165. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03878-z>
- Thapa, D.B., Subedi, M., Yadav, R.P., Joshi, B.P., Adhikari, B.N., Shrestha, K.P., Magar, P.B., Pant, L.R., Gurung, S.B., Ghimire, S., Gautam, N.R., Acharya, N.R., Sapkota, M., Mishra, V.K., Joshi, A.K., Singh, R.P. and Govindan, V. (2022). Variation in grain zinc and iron concentrations, grain yield and associated traits of biofortified bread wheat genotypes in Nepal. *Frontiers in Plant Science*, 13: 881965, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.881965>
- USDA, U. (2018). National nutrient database for standard reference. *Legacy Release*, 9040.
- Velu, G., Singh, R. P., Huerta, J. and Guzmán, C. (2017a). Genetic impact of Rht dwarfing genes on grain micronutrients concentration in wheat. *Field Crops Research*, 214: 373-377. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.030>
- Velu, G., Singh, R.P., Huerta-Espino, J., Peña, R.J., Arun, B., Mahendru-Singh, A., Yaqub Mujahid, M., Sohu, V.S., Mavi, G.S., Crossa, J., Alvarado, G., Joshi, A.K. and Pfeiffer, W.H. (2012). Performance of biofortified spring wheat genotypes in target environments for grain zinc and iron concentrations. *Field Crops Research*, 137: 261-267. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.018>
- Velu, G., Tutus, Y., Gomez-Becerra, H.F., Hao, Y., Demir, L., Kara, R., Crespo-Herrera, L.A., Orhan, S., Yazici, A., Singh, R.P. and Cakmak, I. (2017b). QTL mapping for grain zinc and iron concentrations and zinc efficiency in a tetraploid and hexaploid wheat mapping populations. *Plant and Soil*, 411(1): 81-99. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3025-8>
- Wakeel, A., Farooq, M., Bashir, K. and Ozturk, L. (2018). Micronutrient malnutrition and biofortification: recent advances and future perspectives. In: Hossain, M.A., Kamiya, T., Burritt, D.J., Tran, L.-S.P., & Fujiwara, T. (Eds.), *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*. Elsevier, UK, USA, 225-243. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00017-4>
- Wani, S.H., Gaikwad, K., Razzaq, A., Samantara, K., Kumar, M. and Govindan, V. (2022). Improving zinc and iron biofortification in wheat through genomics approaches. *Molecular Biology Reports*, 49(8): 8007-8023. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07326-z>
- Wu, W., Li, C., Ma, B., Shah, F., Liu, Y. and Liao, Y. (2022). Correction to: Genetic progress in wheat yield and associated traits in China since 1945 and future prospects. *Euphytica*, 218(10): 149. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-03090-0>
- Zhang, Y., Song, Q., Yan, J., Tang, J., Zhao, R., Zhang, Y., He, Zh., Zou, Ch. and Ortiz-Monasterio, I. (2010). Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars. *Euphytica*, 174(3): 303-313. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0082-6>