Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 15, No 48, Winter 2024 p: 1-13

"Research Paper"

# Evaluation of Genetic Diversity and Zinc Deficiency Stress Tolerance in Spring Wheat Cultivars

**Nasrin Valipour[1], Hadi Alipour[2] and Reza Darvishzadeh[3]**

1- M.Sc. Graduated Student Urmia University, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia
2- Associate Professor Urmia University, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, (Corresponding author: ha.alipour@urmia.ac.ir)
3- Professor Urmia University, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia

Received: 4 June, 2023 Accepted: 15 October, 2023

## Extended Abstract

**Introduction and Objective:** Like other crops, wheat also faces several environmental limitations during its growth period, such as the lack of micronutrients. Zinc deficiency causes limitations in crop production, especially growth, and yield in calcareous soils. Considering the economic and agricultural importance of wheat in the world and Iran, it is necessary to pay attention to and identify genetic relationships, to know the level of genetic diversity, and estimate it in wheat germplasm by plant breeders. The present research was conducted with the aim of identifying genetic diversity and investigating stress tolerance indicators on phenological, physiological, and biochemical traits in desirable spring wheat cultivars under optimal conditions and zinc deficiency stress.

**Material and Methods:** Sixty-four spring wheat cultivars under both optimal conditions and zinc deficiency stress, a simple lattice design was performed in 2019-2020 in the research farm of the Faculty of Agriculture, Urmia University. In this research, phenological traits including the number of days to germination, number of days to booting, number of days to pollination, number of days to physiological maturity, grain filling period, and physiological and biochemical characteristics including canopy temperature, total chlorophyll, leaf area index, fresh weight and dry weight, relative water content, grain protein concentration, zinc concentration in shoot and grain yield were measured.

**Results:** The results of the analysis of variance revealed a significant difference among the cultivars in both optimal conditions and zinc deficiency stress in most of the studied traits. positive and significant correlations of Ys and Yp with MP, GMP, STI, and HM indices showed that these indices are the most suitable indices for screening cultivars under zinc deficiency stress conditions.

**Conclusion:** Generally, based on studied traits, tolerance indices, the results of principal components analysis, and cluster analysis, Aflak, Darya, Arvand, Roshan, Kavir, and Sirvand were selected as desirable cultivars and VEE/NAC, Tajan, Parsi, and Panjamo were identified as undesirable and susceptible cultivars. The selected tolerant and susceptible cultivars can be used for developing biparental populations, gene expression analysis, and breeding programs to produce cultivars with high yield.

**Keywords:** Physiological and biochemical traits, Tolerance indices, Wheat, Zinc

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

OPEN ACCESS
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

"مقاله پژوهشی"

# ارزیابی تنوع ژنتیکی و تحمل تنش کمبود روی در ارقام گندم بهاره

**نسرین ولی پور[۱]، هادی علی‌پور[۲] و رضا درویش‌زاده[۳]**

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
۲- دانشیار دانشگاه ارومیه، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، (نویسنده مسوول: ha.alipour@urmia.ac.ir)
۳- استاد دانشگاه ارومیه، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۳
صفحه: ۱ تا ۱۳

## چکیده مبسوط

**مقدمه و هدف:** گندم مانند سایر محصولات زراعی در طول دوره رشد خود با محدودیت‌های زیست محیطی متعددی مانند کمبود عناصر ریزمغذی مواجه است. کمبود روی باعث ایجاد محدودیت در تولید محصول به‌ویژه رشد و عملکرد در خاک‌های آهکی می‌شود. با توجه به اهمیت اقتصادی و کشاورزی گندم در جهان و ایران، توجه و شناسایی روابط ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها، شناخت میزان تنوع ژنتیکی و برآورد آن در ژرم پلاسم گندم توسط اصلاح‌کنندگان گیاه ضروری است. تحقیق حاضر با هدف شناسایی تنوع ژنتیکی و بررسی شاخص‌های تحمل به تنش بر صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در ارقام مطلوب گندم بهاره تحت شرایط نرمال و تنش کمبود روی انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** ۶۴ رقم گندم بهاره در دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی آزمایشی به‌صورت طرح لاتیس ساده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. صفاتی همچون روز تا جوانه‌زنی، روز تا سنبله‌دهی، روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و طول پر شدن دانه، دمای کانوپی، کلروفیل کل، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک، محتوای نسبی آب، غلظت پروتئین، غلظت روی اندام هوایی و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

**یافته‌ها:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی برای اکثر صفات مورد بررسی تفاوت آماری معنی‌داری بین ارقام وجود دارد. همبستگی‌های مثبت و معنی‌دار بین عملکرد در شرایط نرمال و تنش با شاخص‌های MP، GMP، STI و HM مشاهده شد که این شاخص‌ها مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال کردن ارقام در شرایط تنش کمبود روی شناسایی شدند.

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی براساس صفات مورد مطالعه، شاخص‌های تحمل و نتایج تجزیه به عامل و تجزیه خوشه‌ایی ارقام افلاک، دریا، اروند، روشن، کویر و سیروند به‌عنوان ارقام مطلوب و متحمل و ویناک، تجن، پارسی و پنجامو به‌عنوان ارقام نامطلوب و حساس معرفی شدند. از ارقام متحمل و حساس شناسایی شده می‌توان در ایجاد جمعیت‌های دووالدی، بررسی بیان ژن و برنامه‌های به‌نژادی جهت تولید ارقامی با عملکرد بالا استفاده نمود.

**واژه‌های کلیدی:** تحمل تنش، روی، شاخص‌های صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، گندم

## مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) مهمترین محصول زراعی در جهان و از سازگارترین گونه‌های غلات است (Bavandpouri et al., 2022 Ebadzadeh et al., 2017) که غذای بیش از ۳۵ درصد از جمعیت جهان را تامین می‌کند (Amiri and Assad, 2005). سازگاری گندم با شرایط آب و هوایی مختلف، خاک، تنوع محصولات و کیفیت انباری گندم، باعث شده تا دانه این گیاه جزو غذای اصلی بیش از یک سوم مردم جهان باشد (Arzani, 2006). همانند سایر گیاهان زراعی، گندم نیز در طول دوره رشد خود با محدودیت‌های محیطی متعددی همچون کمبود عناصر کم‌مصرف مواجه می‌شود (Abdoli and Esfandiari, 2014).

کمبود روی باعث ایجاد محدودیت در تولید محصولات زراعی به‌ویژه رشد و عملکرد در خاک‌های آهکی می‌شود (Alloway, 2009; Cakmak et al., 2010). در گزارشی مک‌کاولی و همکاران (McCauley et al., 2009) افزایش عملکرد دانه و زیست توده را در نتیجه‌ی استفاده از روی بیان کردند. روی یک ماده مغذی مهم برای رشد و نمو انسان است و کمبود آن در مواد غذایی باعث عقب‌ماندگی رشد، اختلال در سیستم عصبی، ایمنی، کوتاهی قد کودکان، افزایش ابتلا به بیماری‌های عفونی، اختلالات پوستی، کاهش باروری در زنان و افزایش مرگ و میر در جوامع انسانی شود (White and Broadley, 2009).

اخیراً روش‌های به‌نژادی مختلفی در رابطه با کاربرد کودهای مناسب برای افزایش کیفیت و کمیت محصولات انجام شده است. به‌عنوان مثال در مطالعه‌ای برروی ارقام گندم نان استفاده از محلول‌های غذایی حاوی عناصر ماکرو باعث بهبود کیفیت عملکرد دانه و زیست‌توده در خاک‌های با کمبود روی شد (Pataco et al., 2017). در پژوهشی دیگر برروی گندم در خاک‌های آهکی و استفاده از محلول‌پاشی سولفات روی باعث بهبود کمی و کیفی عملکرد گندم در خاک‌های دارای کمبود روی گردید (Abdoli et al., 2016). در یک مطالعه مروری به این نتیجه رسیدند که استفاده بهینه از کودهای حاوی روی در هر دو شرایط مزرعه و گلخانه، برای گیاهان زراعی از جمله گندم بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Cakmak and Kutman, 2018).

با توجه به اهمیت اقتصادی و زراعی گندم در جهان و ایران، توجه و شناسایی روابط ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها، آگاهی از سطح تنوع ژنتیکی و برآورد آن در ژرم‌پلاسم گندم توسط به‌نژادگران گیاهی ضروریست. تنوع از تکامل طبیعی ناشی شده و جز نیازهای مهم به‌نژادی است. دامنه تنوع ژنتیکی در ارقام در حال کشت گندم به دلیل کاربرد پایه‌های ژنتیکی محدود و افزایش تمایل به کشت خالص رو به کاهش می‌باشد. همچنین تنوع موجود در ارقام بومی نیز به دلیل کاهش جمعیت رو به نابودی است. بهره‌برداری از تنوع موجود در یک ژرم‌پلاسم منجر به شناسایی والدین مناسب، استفاده ازاین تنوع در جهت

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

بهبود خصوصیات زراعی و در نهایت تولید ارقام بهتر می‌شود (Mohammadi and Prasanna, 2003).

مطالعه ارقام در شرایط تنش یکی از روش‌های مهم به‌نژادگران برای بهبود عملکرد و تحمل تنش‌های محیطی است (Mohammadi and Abdulahi, 2017). برای تمایز ارقام متحمل به تنش از چندین شاخص تحمل در شرایط مختلف استفاده می‌شود. شاخص تحمل (TOL) به‌صورت اختلاف عملکرد دانه در شرایط تنش و نرمال و شاخص میانگین بهره‌وری (MP) تحت عنوان میانگین عملکرد ارقام در شرایط نرمال و تنش تعریف شده‌اند (Rosielle and Hamblin, 1981). برای اندازه‌گیری پایداری عملکرد شاخص حساسیت به تنش پیشنهاد شده است که میزان کمتر از یک این شاخص بیانگر تحمل به تنش است. به‌طوری که هرچه میزان عملکرد در حالت تنش به عملکرد در حالت نرمال نزدیک باشد نشانه حساسیت کمتر ارقام نسبت به تنش است (Fischer and Maurer, 1978). شاخص تحمل تنش (STI) برای شناسایی ارقامی که در هر دو شرایط تنش و نرمال عملکرد بالایی دارند، استفاده می‌شود. در حالی که انتخاب بر مبنای SSI یا همان شاخص حساسیت به تنش منجر به گزینش ارقام متحمل به تنش، اما با پتانسیل عملکرد پایین می‌شود. هرچقدر میزان SSI کمتر باشد نشانه تغییرات کم یک رقم در شرایط تنش نسبت به شرایط بدون تنش و در نهایت پایداری بیشتر آن رقم است (Rasoulzadeh Aghdam et al., 2021). برآورد دیگر مبتنی بر عملکرد برای مقاومت به تنش میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) است که در مقایسه با شاخص میانگین بهره‌وری به‌منظور تفکیک ارقام قدرت بیشتری دارد (Fernandez, 1992).

در پژوهشی استفاده خارجی از سولفات روی در ژنوتیپ‌های گندم نشان داد که پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف گندم دوروم از بعد کمی عملکرد یکسان نمی‌باشد، اما استفاده به‌صورت خاکی و محلول‌پاشی توانست با افزایش روی دانه و کاهش اسیدفیتیک دانه بعد کیفی عملکرد را بهبود بخشد (Esfandiari and Abdoli, 2017). آزمایشی در رابطه با اثر میزان روی بر عملکرد دانه گندم دیم در فلات پاکستان اجرا شد. این آزمایش تحت شرایط کمبود روی و شرایط نرمال اجرا گردید و نشان داد که اعمال ۰/۵۲ –۰/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم روی در خاک باعث افزایش عملکرد دانه تا ۱۲ درصد شده است (Rafique et al., 2006). کامرانی و همکاران (Kamrani et al, 2016) در مطالعه ۵۰ رقم گندم در شرایط تنش و بدون تنش گزارش کردند که شاخص‌های MP، GMP، STI و HAM مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال نمودن ارقام در شرایط تنش می‌باشند. در مطالعه‌ایی که به منظور بررسی شاخص‌های تحمل به تنش که بر روی ۲۳ رقم گندم دوروم انجام گرفت، شاخص‌های MP، GMP، STI و HAM همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش داشتند و از این‌رو به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت غربال‌گری معرفی شدند (Sangi et al., 2020). تحقیق حاضر با هدف شناسایی تنوع ژنتیکی و بررسی شاخص‌های تحمل به تنش در صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ارقام مطلوب گندم بهاره تحت شرایط نرمال و تنش کمبود روی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر تعداد ۶۴ رقم گندم بهاره (جدول تکمیلی ۱) در قالب طرح لاتیس ساده تحت شرایط نرمال و تنش کمبود روی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه واقع در منطقه نازلو با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۲ ثانیه و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا مورد بررسی قرار گرفتند. کشت به‌صورت گلدانی بوده و خاک رس و ماسه با نسبت (۲:۱) ترکیب شد تا روی خاک به کمترین میزان خودش برسد. در نهایت بعد از آزمایش خاک میزان روی خاک ۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد. کوددهی و تأمین عناصر ریز مغذی به‌صورت محلول هوگلند انجام گرفت. کشت بذور و کنترل علف هرز به‌صورت دستی انجام شد. با توجه به اینکه گیاهان در مراحل اولیه رشد قدرت کمی دارند و همچنین جهت جلوگیری از سوختگی ناشی از تجمع مواد غذایی و شوری خاک، مواد مغذی براساس نیاز گیاه و به تدریج به خاک اضافه گردید تا قابل جذب بوده و تامین کننده نیاز گیاه باشد و همچنین از شور شدن خاک جلوگیری شود. محلول هوگلند با نسبت‌های ۱/۱۶، ۱/۸، ۱/۴، ۱/۲، ۱ آماده شده که در شرایط نرمال میزان روی برای غلظت یک ۵۰، غلظت یک دوم ۲۵، غلظت یک چهارم ۱۲/۵، غلظت یک هشتم ۶/۲۵ و غلظت یک شانزدهم ۳/۱۲ میلی‌گرم بر لیتر و در شرایط تنش کمبود روی برای تمامی غلظت‌ها صفر در نظر گرفته شد. بعد از جوانه‌زنی، محلول هوگلند به‌میزان ۲۰۰ سی‌سی در هر دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی به گلدان‌ها اضافه شد. همچنین آبیاری گلدان‌ها به‌صورت دستی و به‌میزان ۲۰۰ سی‌سی از آب شهری هر دو روز یکبار انجام شد. مراحل فنولوژیکی گیاه شامل تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا سنبله‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی و تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در طی فصل رشد در هر گلدان براساس اینکه ۵۰ درصد نمونه‌ها در مرحله نموی مربوطه قابل مشاهده بودند، تعیین شد. علاوه بر صفات فنولوژیک صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شامل دمای کانوپی، کلروفیل کل، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک، محتوای نسبی آب، غلظت پروتئین دانه، غلظت روی در اندام هوایی و در نهایت عملکرد دانه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. سپس براساس عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی شاخص‌های تحمل مطابق فرمول‌های جدول ۱ محاسبه شدند.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

جدول ۱- شاخص‌های تحمل تنش

Table 1. Stress tolerance indices

| ردیف Row | شاخص Indices | فرمول Formula | رفرنس Reference |
|---|---|---|---|
| 1 | شاخص حساسیت به تنش<br>Stress susceptibility index | $SSI= (1 - (Y_S/Y_p))/(1 - (\overline{Y}_p/\overline{Y}_s))$ | (Fischer and Maurer, 1978) |
| 2 | شاخص میانگین هارمونیک<br>Harmonic mean index | $HAM= 2 \times (Y_p \times Y_s)/(Y_p + Y_s)$ | (Rosille and Hamblin, 1981) |
| 3 | شاخص تحمل<br>Tolerance index | $TOL= Y_p - Y_s$ | (Rosille and Hamblin, 1981) |
| 4 | شاخص میانگین هندسی بهره‌وری<br>Geometric mean productivity index | $GMP= \sqrt{Y_p \times Y_s}$ | (Fernandez, 1992) |
| 5 | شاخص میانگین بهره‌وری<br>Mean productivity index | $MP= (Y_p + Y_s)/2$ | (Rosille and Hamblin, 1981) |
| 6 | شاخص تحمل غیرزیستی<br>Abiotic tolerance index | $ATI= \left(\frac{Y_p - Y_s}{\frac{Y_s}{Y_p}}\right) \times \sqrt{Y_p \times Y_s}$ | (Fischer and Maurer, 1978) |
| 7 | شاخص مقاوم به تنش<br>Stress resistant index | $DI= (Y_s \times \left(\frac{Y_s}{Y_p}\right)/\overline{Y}_s$ | (Fischer and Maurer, 1998) |
| 8 | شاخص تحمل به تنش<br>Stress tolerance index | $STI= (Y_p \times Y_s)/(\overline{Y}_p)^2$ | (Fernandez, 1992) |
| 9 | شاخص اصلاح شده در شرایط بدون تنش<br>Modified in non-stressed conditions index | $kiSTI,K1S = Y_p^2/\overline{Y}_p$ | (Naderi et al., 2008) |
| 10 | شاخص اصلاح شده در شرایط تنش<br>Modified in stressed conditions index | $K2STI = Y_s^2/\overline{Y}_s$ | (Naderi et al., 2008) |

در این روابط $Y_p$ ،$Y_s$، $\overline{Y}_p$ و $\overline{Y}_s$ به‌ترتیب عملکرد دانه در شرایط نرمال، عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود روی، میانگین عملکرد دانه در شرایط نرمال و میانگین عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود روی هستند.

پس از آزمون نرمال بودن توزیع خطاها، با توجه به اینکه سودمندی نسبی طرح لاتیس در مقایسه با طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای صفات مورد بررسی کم بود، بنابراین تجزیه واریانس بصورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تجزیه به عامل‌ها با استفاده از نرم افزار SAS ویرایش ۹,۴، تجزیه خوشه‌ای و ترسیم نمودارهای بای‌پلات با استفاده از نرم‌افزار R ویرایش ۴,۲,۰ به‌ترتیب با استفاده از پکیج‌های gplots و factoextra انجام شد.

## نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ۶۴ رقم گندم بهاره مورد بررسی به غیر از صفات دمای کانوپی، کلروفیل کل و محتوای نسبی آب در شرایط نرمال میزان روی و صفات دمای کانوپی، تعداد روز تا گرده‌افشانی و محتوای نسبی آب در شرایط تنش کمبود روی تفاوت آماری معنی‌داری وجود دارد (جداول ۲ و ۳).

نتایج حاصل از محاسبه پارامترهای آمار توصیفی (جدول ۴) نشان داد که صفات وزن تر، وزن خشک، غلظت روی در اندام هوایی، غلظت پروتئین و عملکرد دانه دارای بیشترین ضرایب تنوع در هر دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی بودند. مقایسه میانگین صفات در شرایط نرمال و تنش کمبود روی حاکی از بالا بودن عملکرد دانه، غلظت پروتئین، غلظت روی در اندام هوایی، محتوای نسبی آب، وزن خشک، وزن تر، شاخص سطح برگ، کلروفیل کل و دمای کانوپی در شرایط نرمال نسبت به شرایط تنش کمبود روی بود؛ در حالی که از نظر صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا سنبله‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک این صفات در شرایط نرمال مقادیر کمتری نسبت به شرایط تنش کمبود روی داشتند. به‌طور کلی تنوع قابل ملاحظه‌ای بین ارقام مورد مطالعه از نظر عملکرد و صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی وجود داشت و می‌توان از این تنوع جهت انتخاب ارقام برتر به منظور به‌نژادی و بهبود خصوصیات ارقام در برنامه‌های اصلاحی استفاده نمود.

برای تعیین مطلوب‌ترین معیارهای تحمل تنش، ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی و شاخص‌های تحمل تنش محاسبه گردیدند (جدول ۵). نتایج به دست آمده نشان داد که در شرایط تنش کمبود روی (Ys) عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد همبستگی مثبت و معنی‌دار با شاخص‌های MP، GMP، STI، ATI، DI، HM، kiSTI، K1S و K2STI و همبستگی منفی و معنی‌دار با شاخص SSI داشته است. در شرایط نرمال بین عملکرد دانه با شاخص‌های MP، TOL، GMP، STI، ATI، DI، HM، kiSTI، K1S و K2STI همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد وجود داشت که نشان می‌دهد این شاخص‌ها در شناسایی ارقام با عملکرد بالا تحت شرایط نرمال موثر می‌باشند. عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود روی (Ys) با عملکرد دانه در شرایط نرمال (Yp) همبستگی مثبت معنی‌دار داشت که نشان می‌دهد عملکرد بالا در شرایط نرمال منجر به عملکرد بیشتر در شرایط تنش می‌شود. این نتایج با گزارش‌های امیری و همکاران (Amiri et al., 2014) و فرشادفر و همکاران (Farshadfar et al., 2018) در گندم نان و پاتل و همکاران (Patel et al., 2019) در گندم دوروم مطابقت دارند.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در ارقام گندم تحت شرایط نرمال
Table 2. Analysis of variance of phenological, physiological and biochemical traits in wheat cultivars under optimal conditions

| میانگین مربعات Mean squares | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عملکرد دانه Grain yield | غلظت پروتئین دانه Grain protein concentration | غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration | محتوای نسبی آب Relative water content | وزن خشک Dry weight | وزن تر Fresh weight | شاخص سطح برگ leaf area index | کلروفیل کل Total chlorophyll | دمای کانوپی Canopy temperature | طول دوره پرشدن دانه Grain filling period | روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity | روز تا گرده‌افشانی Days to pollination | روز تا سنبله‌دهی Days to booting | روز تاجوانه‌زنی Days to germination | درجه آزادی Df | منابع تغییرات S.O.V. |
| 0.09 | 0.1 | 0.004 | 209.3 | 0.000006 | 0.0009 | 0.001 | 34.03 | 74.4 | 6.57 | 0.0007 | 7.03 | 11.28 | 59.1 | 1 | تکرار Rep |
| 1.14** | 18.07** | 0.06** | 119.9ns | 0.0006** | 0.01* | 7.42** | 81.1ns | 2.50ns | 11.53** | 3.35** | 9.77** | 31.27** | 23.6* | 63 | ژنوتیپ Genotype |
| 0.12 | 1.2 | 0.02 | 102.1 | 0.0003 | 0.005 | 4.03 | 63.12 | 2.25 | 4.77 | 0.27 | 4.20 | 10.01 | 13.86 | 63 | خطا Error |
| 18.1 | 21.7 | 25.6 | 13.1 | 38.4 | 48.1 | 21.1 | 19.3 | 5.2 | 9.5 | 0.2 | 1.05 | 1.7 | 17.7 | – | C.V |

ns، *، ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: Non-siginficant and siginficant at 5% and 1% probability level, respectively.

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ارقام گندم تحت شرایط تنش کمبود روی
Table 3. Analysis of variance of phenological, physiological and biochemical traits in wheat cultivars under Zinc deficiency stress conditions

| میانگین مربعات Mean squares | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عملکرد دانه Grain yield | غلظت پروتئین دانه Grain protein concentration | غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration | محتوای نسبی آب Relative water content | وزن خشک Dry weight | وزن تر Fresh weight | شاخص سطح برگ leaf area index | کلروفیل کل Total chlorophyll | دمای کانوپی Canopy temperature | طول دوره پرشدن دانه Grain filling period | روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity | روز تا گرده‌افشانی Days to pollination | روز تا سنبله‌دهی Days to booting | روز تاجوانه‌زنی Days to germination | درجه آزادی df | S.O.V. منابع تغییرات |
| 0.01 | 0.7 | 0.04 | 3331.7 | 0.0004 | 0.0004 | 91.8 | 0.82 | 25.8 | 1.53 | 0.63 | 4.13 | 4.1 | 39.3 | 1 | تکرار Rep |
| 0.75* | 0.06* | 0.06* | 132.6ns | 0.0007* | 0.01* | 11.4* | 93.8* | 4.41ns | 10.4* | 3.008** | 6.4ns | 15.4** | 24.2* | 63 | ژنوتیپ Genotype |
| 0.08 | 0.01 | 0.01 | 115.4 | 0.0003 | 0.005 | 7.43 | 33.4 | 3.12 | 5.83 | 0.6 | 5.5 | 4.5 | 13.97 | 63 | خطا Error |
| 22.2 | 16.6 | 33.4 | 14.4 | 45.6 | 51.1 | 27.2 | 14.6 | 6.4 | 10.7 | 0.3 | 1.2 | 1.1 | 17.7 | – | C.V |

ns، *، ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: Non-siginficant and siginficant at 5% and 1% probability level, respectively.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

جدول ۴- آماره‌های توصیفی برای صفات مورد بررسی تحت شرایط نرمال و تنش کمبود روی در ارقام گندم
Table 4. Descriptive statistics of investigated traits under optimal and zinc deficiency stress conditions in wheat cultivars

| صفات Trait | میانگین Mean | | حداقل Min | | حداکثر Max | | دامنه تغییرات Range | | واریانس Variance | | ضریب تنوع C.V | | آزمون t T test |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | نرمال optimal | تنش Stress | نرمال optimal | تنش stress | نرمال optimal | تنش stress | نرمال optimal | تنش stress | نرمال optimal | تنش Stress | نرمال optimal | تنش Stress | |
| روز تا جوانه‌زنی Days to germination | 20.9 | 21.08 | 13 | 15 | 29 | 28 | 16 | 12 | 11.8 | 12.1 | 17.7 | 17.7 | -0.23 ns |
| روز تا سنبله‌دهی Days to booting | 177.6 | 183.1 | 171 | 175.5 | 185 | 187 | 14 | 11 | 15.6 | 7.7 | 1.7 | 1.1 | -9.24** |
| روز تا گرده‌افشانی Days to pollination | 194.01 | 194.4 | 190 | 190 | 198 | 197 | 7.5 | 7 | 4.88 | 3.21 | 1.05 | 1.2 | -1.12 ns |
| روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity | 216.8 | 216.9 | 215 | 215 | 219 | 219 | 4 | 4 | 1.6 | 1.5 | 0.2 | 0.3 | -0.42 ns |
| طول دوره پر شدن دانه Grain filling period | 22.8 | 22.5 | 18 | 18.5 | 27 | 27 | 9.5 | 9 | 5.7 | 5.21 | 9.5 | 10.7 | 0.73ns |
| دمای کانوپی Canopy temperature | 28.6 | 27.4 | 26 | 25.3 | 31.6 | 33.2 | 5.4 | 7.9 | 1.2 | 2.20 | 5.2 | 6.4 | 5.17** |
| کلروفیل کل Total chlorophyll | 40.9 | 39.4 | 27.6 | 24.5 | 59.5 | 57.5 | 31.8 | 33 | 40.5 | 46.9 | 19.3 | 14.6 | 1.34 ns |
| شاخص سطح برگ Leaf area index | 9.49 | 10 | 6.96 | 5.1 | 18.23 | 16.9 | 11.27 | 11.8 | 3.71 | 5.74 | 21.1 | 27.2 | -1.30 ns |
| وزن تر Fresh weight | 0.15 | 0.148 | 0.03 | 0.03 | 0.49 | 0.41 | 0.46 | 0.37 | 0.005 | 0.005 | 48.1 | 51.1 | 0.69 ns |
| وزن خشک Dry weight | 0.04 | 0.043 | 0.01 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 0.08 | 0.09 | 0.0003 | 0.0004 | 38.4 | 45.6 | 0.55 ns |
| محتوای نسبی آب Relative water content | 76.62 | 74.14 | 40.75 | 34.71 | 87.8 | 85.38 | 47.12 | 50.67 | 59.9 | 66.32 | 13.1 | 14.4 | 1.76 ns |
| غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration | 0.56 | 0.39 | 0.09 | 0.02 | 1.08 | 0.87 | 0.99 | 0.85 | 0.03 | 0.03 | 25.6 | 33.4 | 5.21** |
| غلظت پروتئین دانه Grain protein concentration | 5.11 | 3.95 | 1.17 | 0.88 | 11.4 | 9.92 | 10.32 | 9.04 | 9.03 | 6.22 | 21.7 | 16.6 | 2.36* |
| عملکرد دانه Grain yield | 1.9 | 1.3 | 0.55 | 0.3 | 3.3 | 2.5 | 2.7 | 2.27 | 0.57 | 0.37 | 18.1 | 22.2 | 5.001** |

ns، *، ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
ns, * and **: Non-siginficant and siginficant at 5% and 1% probability level، respectively.

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل تنش در ارقام گندم
Table 5. Correlation coefficients between grain yield and stress tolerance indices in wheat cultivars

| | Yp | Ys | TOL | MP | GMP | STI | ATI | SSI | DI | HM | kiSTI,K1S | K2STI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عملکرد در شرایط نرمال Yp | 1 | | | | | | | | | | | |
| عملکرد در شرایط تنش Ys | 0.85** | 1 | | | | | | | | | | |
| شاخص تحمل TOL | 0.58** | 0.08ns | 1 | | | | | | | | | |
| میانگین بهره‌وری MP | 0.97** | 0.95** | 0.37** | 1 | | | | | | | | |
| میانگین هندسی بهره‌وری GMP | 0.95** | 0.97** | 0.31** | 0.99** | 1 | | | | | | | |
| شاخص تحمل تنش STI | 0.92** | 0.96** | 0.26* | 0.97** | 0.98** | 1 | | | | | | |
| شاخص تحمل غیرزیستی ATI | 0.82** | 0.44** | 0.89** | 0.67** | 0.63** | 0.60** | 1 | | | | | |
| شاخص حساسیت به تنش SSI | -0.04ns | -0.50** | 0.71** | -0.26* | -0.31** | -0.32** | 0.38** | 1 | | | | |
| شاخص مقاوم به تنش DI | 0.66** | 0.95** | -0.20ns | 0.82** | 0.85** | 0.86** | 0.16ns | 0.71** | 1 | | | |
| میانگین هارمونیک HM | 0.93** | 0.98** | 0.26* | 0.99** | 0.99** | 0.98** | 0.59** | -0.35** | 0.87** | 1 | | |
| شاخص اصلاح شده در شرایط نرمال kiSTI,K1S | 0.98** | 0.83** | 0.58** | 0.95** | 0.93** | 0.93** | 0.84** | -0.04ns | 0.64** | 0.91** | 1 | |
| شاخص اصلاح شده در شرایط تنش K2STI | 0.80** | 0.97** | 0.02ns | 0.91** | 0.93** | 0.96** | 0.37** | -0.49** | 0.95** | 0.95** | 0.81** | 1 |

ns، *، ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
ns, * and **: Non-siginficant and siginficant at 5% and 1% probability level, respectively.

نتایج تجزیه به عامل‌ها، چهارده صفت مورد بررسی در ۶۴ رقم گندم را تحت شرایط نرمال در پنج عامل و تحت شرایط تنش کمبود روی در شش عامل که مقادیر ویژه بالای یک داشتند، گروه‌بندی کرد. میزان واریانس هر عامل به‌صورت درصد بیان شد که نمایانگر اهمیت آن عامل در توجیه بخشی از تغییرات کل داده‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه است. میزان اشتراک نیز بخشی از واریانس یک متغیر می‌باشد که به عامل‌های مشترک مربوط است. هرچه میزان آن بالا باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر در برآورد واریانس متغیر مربوطه است (Jackson, 1991). عامل‌ها در شرایط نرمال و تنش کمبود روی به‌ترتیب ۷۱/۶۴ و ۷۴/۹ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه نمودند (جداول ۶ و ۷). تحت شرایط نرمال عامل اول با تبیین ۳۳/۰۴ درصد از تغیرات کل عمدتاً شامل صفات شاخص سطح برگ، وزن تر، وزن خشک و غلظت روی در اندام هوایی بود. با توجه به سهم بیشتر صفات فیزیولوژیک در عامل اول می‌توان این مؤلفه را عامل فیزیولوژیک نامید. عامل دوم در شرایط نرمال ۱۳/۶۷ درصد از کل تغییرات را توجیه نمود. عامل دوم شامل صفات تعداد روز تا سنبله‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، طول دوره پرشدن دانه و غلظت پروتئین دانه با بار عاملی مثبت بودند که می‌توان این عامل را عامل دوره رشد نامید. عامل سوم صفت تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با بار عاملی مثبت را شامل و ۹/۶۹ درصد از تنوع کل داده‌ها را توجیه نمود. عامل چهارم ۸/۱۹ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه نمود و صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، کلروفیل کل، محتوای نسبی آب و عملکرد دانه با بار عاملی مثبت در این عامل گروه‌بندی شدند. عامل پنجم که شامل صفت دمای کانوپی بود ۷/۰۳ درصد از تغییرات را توجیه نمود. تحت شرایط تنش کمبود روی، عامل اول ۲۹/۹ درصد از تنوع داده‌ها را توجیه نمود و صفات

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک در این عامل گروه‌بندی شدند. با توجه به سهم بیشتر صفات فیزیولوژیک در عامل اول می‌توان این عامل را عامل فیزیولوژیک نامید. عامل دوم ۱۶/۶۸ درصد از کل تغییرات را توجیه نمود و صفات تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، طول دوره پر شدن دانه و غلظت پروتئین دانه بیشترین بار عاملی مثبت را در عامل دوم داشتند، به‌نحوی که می‌توان آن را عامل دوره رشد نامید. در عامل سوم، صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا سنبله‌دهی و عملکرد با بار عاملی مثبت گروه‌بندی شدند و ۸/۴۸ درصد از تنوع کل داده‌ها را توجیه نمودند. عامل چهارم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۷/۴۵ و ۶/۹۳ و ۶/۴۴ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه نمودند که شامل صفات غلظت روی در اندام هوایی، دمای کانوپی، محتوای نسبی آب و کلروفیل کل بود.

در نتیجه تجزیه به عامل‌ها براساس شاخص‌های تحمل تنش، دو عامل اول و دوم در مجموع ۹۶/۷۵ درصد از تغییرات مربوط به عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی و شاخص‌های تحمل را توجیه نمودند (جدول ۸). به طوری که سهم عامل اول در تبیین تغییرات کل داده‌ها ۷۲/۰۳ درصد بود. این عامل همبستگی مثبتی با عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی و شاخص‌های HMP، GMP، MP، DI، STI، kiSTI,K1S و K2STI داشت و از این‌رو می‌توان عامل اول را عامل پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش در نظر گرفت. عامل دوم ۲۴/۷۲ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه نمود. در این عامل شاخص‌های SSI، TOL و ATI سهم بیشتری داشتند. همچنین این عامل همبستگی مثبت و بالایی با شاخص‌های TOL و SSI نشان داد و بنابراین می‌توان این عامل را عامل حساسیت به تنش نامید. انتخاب ارقامی با مقادیر بالای عامل اول و مقادیر کم عامل دوم منجر به شناسایی ارقام مناسب برای هر دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی می‌شود (Shahryari and Mollasadeghi, 2011). بدین ترتیب صفات موثر در هر عامل شناسایی و عوامل نیز براساس موثرترین صفات نامگذاری شدند. این روش بهبود ژنتیکی عوامل را به واسطه صفات مرتبط با آن‌ها امکان‌پذیر می‌سازد (Tadesse and Bekele, 2001). با توجه به اهمیت هرکدام از این عوامل که به‌صورت درصد تغییرات بیان می‌شود توجه به‌نژادگران به ویژگی‌هایی که در حوزه عامل اول قرار دارند تاثیر جدی‌تری بر افزایش عملکرد گیاه خواهد داشت، زیرا ضرایب بزرگ و مثبت صفات در این عامل نشان‌دهنده ارتباط قوی و مثبت بین آن‌ها در شرایط تنش کمبود روی بوده و حاکی از آن است که گزینش براساس افزایش عامل اول منجر به افزایش عملکرد در ارقام خواهد شد.

نمایش برداری بای‌پلات در شرایط نرمال و تنش کمبود روی (اشکال ۱A و ۲A) نشان داد که بیشترین تنوع توجیه شده ناشی از تعداد روز تا سنبله‌دهی، طول دوره پرشدن دانه، وزن تر و شاخص سطح برگ بود. تحت شرایط نرمال همبستگی منفی بین صفات وزن تر، وزن خشک، شاخص سطح برگ، کلروفیل کل، غلظت روی در اندام هوایی و محتوای نسبی آب با عملکرد دانه مشاهده شد (شکل ۱A). به‌طور کلی زاویه بیشتر بین بردارهای صفات، بر همبستگی منفی بیشتر صفات دلالت دارد. از این‌رو بیشترین همبستگی منفی بین صفات فیزیولوژیک با عملکرد دانه مشاهده شد. ازآنجایی که وجود زاویه ۹۰ درجه بین بردار صفات نشان‌دهنده عدم همبستگی بین صفات است، لذا بین تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا سنبله‌دهی و غلظت پروتئین دانه با عملکرد دانه همبستگی مشاهده نشد. از طرفی کمتر بودن زاویه بین بردار صفات نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین صفات است. بنابراین بین دمای کانوپی، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و طول دوره پر شدن دانه با عملکرد دانه همبستگی مثبتی مشاهده شد. از این رو برای دستیابی به ارقامی با عملکرد بالا بایستی به دنبال ارقامی با مقادیر بالای صفات مذکور بود. براساس دو عامل اصلی در شرایط بهینه ارقام ریحانی، مروارید، مغان۲، مارون، بهار، آرتا، البرز و شیراز (شکل ۱B) و در شرایط تنش کمبود روی ارقام اروند، ریحانی، شیراز، سیروند و قدس (شکل ۲B) که بالاترین مقادیر عامل اول و دوم و همچنین عملکرد دانه بیشتری داشتند، انتخاب شدند.

همبستگی مثبت بین عملکرد دانه با طول دوره پرشدن دانه نشان داد که در شرایط تنش بعد از گرده‌افشانی به علت کاهش شدید فتوسنتز گیاه انباشت مواد حاصل از این فرایند در دانه محدود می‌گردد. در شرایطی که به دلیل کاهش فتوسنتز در اثر فشار عوامل محیطی، سرعت و مقدار ماده خشک انباشته شده در دانه از فرایند مذکور نقصان یابد، سایر فرایندهای جبران‌کننده کمبود فتوسنتز یعنی حرکت و انتقال مجدد مواد از اندام‌های رویشی به دانه تحریک شده و تا حدودی وزن دانه جبران می‌گردد. در هر صورت سرعت انباشت مواد و دوره پرشدن دانه تعیین کننده وزن نهایی به‌عنوان یکی از اجزای عملکرد گندم بوده و هر دو خصوصیت تحت تاثیر ژنوتیپ و محیط قرار می‌گیرند (Dastur et al., 2013). به نظر می‌رسد ارقامی که تحمل بیشتری در مقابل تنش داشته باشند، چنانچه دوره پرشدن دانه طولانی‌تری داشته باشند زمان بیشتری برای ذخیره موادغذایی جذب شده از ریشه و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌های در حال رشد در اختیار دارند و می‌توانند عملکرد بیشتری را تولید نمایند. اما موضوع بدان معنا نیست که ارقامی با دوره پرشدن طولانی‌تر در شرایط نامساعد عملکرد مطلوبی خواهند داشت، زیرا می‌توان ارقامی را با ارزش یکسان از نظر صفات مورد بررسی پیدا نمود که از نظر عملکرد در شرایط نامساعد متفاوت باشند و این امر نشان می‌دهد که برای هریک از صفات موثر در عملکرد در شرایط نامناسب، سایر صفات نیز بایستی مدنظر قرار گیرند. همچنین اثر متقابل بین صفات در تعیین تفاوت‌های موجود در محصول نهایی بیش از اثر هریک از آن صفات به تنهایی موثر است. بنابراین اگرچه در شرایط بهینه سرعت پرشدن دانه با طول دوره پرشدن دانه طولانی‌تر ممکن است از نظر تئوری برآیند مطلوب‌تری داشته باشد اما با توجه به اهداف به‌نژادی و گزینش ارقام زودرس و متحمل به تنش سرعت بیشتر پرشدن دانه باتوجه به شرایط محیطی یک مزیت تلقی می‌شود (Hossein-pour et al., 2006).

بررسی بای‌پلات مربوط به شاخص‌های تحمل و زوایای بین خطوط شاخص‌ها در هر دو شرایط (شکل ۳) نشان می‌دهد که در شرایط بهینه (Yp) بین عملکرد دانه و شاخص

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

kiSTI,K1S، و در شرایط تنش (Ys) از بین عملکرد دانه و شاخص K2STI همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد که نشان می‌دهد این شاخص‌ها برای انتخاب ارقام به‌ترتیب در شرایط بهینه و تنش کمبود روی مفید هستند. شاخص‌های MP، GMP، STI و HM با عملکرد دانه در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود روی همبستگی مثبت نشان دادند و بهترین شاخص‌های مورد مطالعه بودند. در ضمن بر طبق نمودار بای‌پلات همبستگی منفی بین شاخص SSI با DI مشاهده شد. نمودار پراکنش ارقام براساس دو مولفه اصلی برمبنای شاخص‌های تحمل بررسی و ارقام افلاک، دریا، گهار، مغان۳ و سیروند با بالاترین مقدار از لحاظ دو مولفه انتخاب شدند (شکل ۳B). با توجه به رابطه مؤلفه‌ها و بای‌پلات های مربوطه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی و همچنین شاخص‌های تحمل مورد بررسی ارقام دریا، اروند، سیروند، روشن، کویر و افلاک بهترین ارقام با پتانسیل عملکرد مطلوب در هر دو شرایط بودند. در حالی که ویناک، تجن، پارسی و پنجامو حساس‌ترین ارقام بودند. این نتیجه با تحقیقات بسیاری از محققان مطابقت داشت (Hossein-pour et al., 2006; Ahmadi et al., 2005; Barma et al., 1992). بنابراین با توجه به مثبت بودن همبستگی عملکرد دانه با طول دوره پرشدن دانه می‌توان ارقامی رو انتخاب کرد که با وجود داشتن طول دوره پر شدن دانه بیشتر و همچنین با در نظر داشتن سایر صفات مورد بررسی عملکرد بالایی نیز دارند از جمله این ارقام می‌توان افلاک، سیروند، دریا، اروند، روشن را نام برد.

جدول ۶- نتایج تجزیه به عامل‌های صفات مورد مطالعه در ارقام گندم تحت شرایط نرمال
Table 6. Factor analysis of investigated traits in wheat cultivars under optimal conditions

| صفات Traits | ضرایب عامل‌های مشترک Coefficients of the common factor | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | عامل اول Factor1 | عامل دوم Factor2 | عامل سوم Factor3 | عامل چهارم Factor4 | عامل پنجم Factor5 | میزان اشتراک Communality |
| روز تا جوانه‌زنی Days to germination | 0.320 | 0.390 | 0.126 | -0.541 | -0.275 | 0.642 |
| روز تا سنبله‌دهی Days to booting | 0.388 | 0.658 | 0.274 | 0.016 | 0.114 | 0.671 |
| روز تا گرده‌افشانی Days to pollination | 0.484 | 0.755 | 0.159 | 0.061 | 0.150 | 0.836 |
| روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity | -0.123 | 0.181 | 0.772 | -0.057 | 0.324 | 0.751 |
| طول دوره پر شدن دانه Grain filling period | -0.493 | -0.597 | -0.563 | -0.087 | 0.037 | 0.925 |
| دمای کانوپی Canopy temperature | -0.083 | -0.078 | -0.234 | -0.089 | 0.745 | 0.630 |
| کلروفیل کل Total chlorophyll | 0.528 | -0.066 | 0.016 | 0.574 | 0.099 | 0.622 |
| شاخص سطح برگ Leaf area index | 0.911 | -0.186 | 0.107 | -0.153 | 0.014 | 0.900 |
| وزن تر Fresh weight | 0.926 | -0.247 | 0.118 | 0.057 | 0.004 | 0.935 |
| وزن خشک Dry weight | 0.900 | -0.223 | 0.099 | 0.025 | 0.026 | 0.871 |
| محتوای نسبی آب Relative water content | 0.008 | 0.060 | 0.449 | 0.491 | -0.436 | 0.635 |
| غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration | 0.390 | 0.047 | -0.387 | 0.264 | -0.229 | 0.426 |
| غلظت پروتئین دانه Grain protein concentration | 0.069 | 0.598 | 0.258 | 0.041 | 0.042 | 0.432 |
| عملکرد دانه Grain yield | -0.113 | 0.035 | 0.060 | 0.547 | 0.287 | 0.399 |
| مقادیر ویژه Eigen values | 5.287 | 2.188 | 1.551 | 1.311 | 1.125 | - |
| واریانس نسبی Relative variance | 33.045 | 13.677 | 9.697 | 8.195 | 7.033 | - |
| واریانس تجمعی Cumulative variance | 33.045 | 46.721 | 56.418 | 64.613 | 71.646 | - |

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

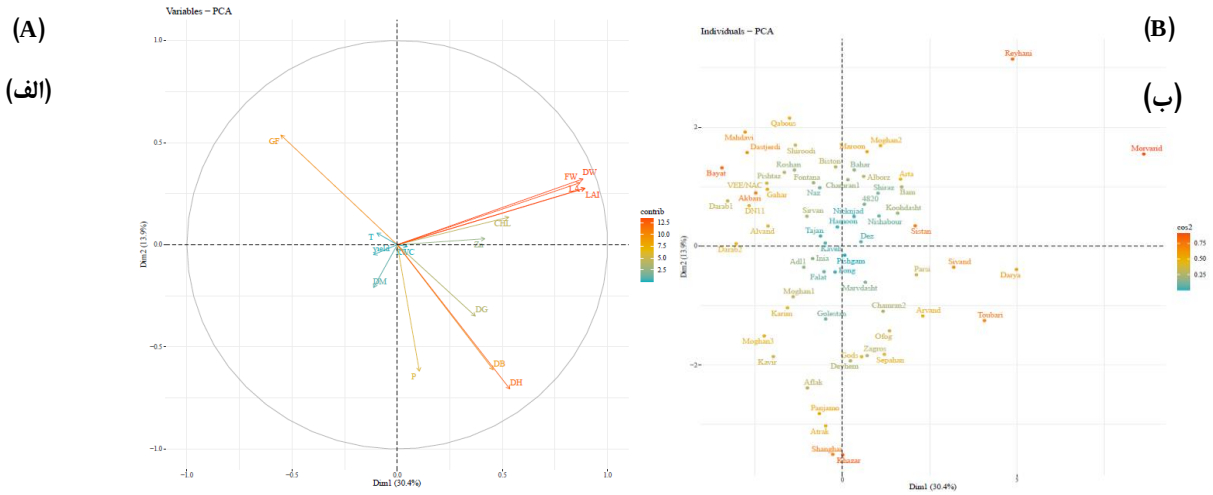
جدول ۷- نتایج تجزیه به عامل‌های صفات مورد مطالعه در ارقام گندم تحت شرایط تنش کمبود روی
Table 7. Factor analysis of investigated traits in wheat cultivars under zinc deficiency stress conditions

| صفات Traits | ضرایب عامل‌های مشترک Coefficients of the common factor | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | عامل اول Factor1 | عامل دوم Factor2 | عامل سوم Factor3 | عامل چهارم Factor4 | عامل پنجم Factor5 | عامل ششم Factor6 | میزان اشتراک Communality |
| روز تا جوانه‌زنی Days to germination | -0.392 | 0.164 | -0.407 | -0.204 | -0.090 | -0.290 | 0.481 |
| روز تا سنبله‌دهی Days to booting | -0.044 | -0.287 | 0.709 | 0.282 | -0.373 | -0.023 | 0.796 |
| روز تا گرده‌افشانی Days to pollination | -0.106 | -0.844 | -0.159 | 0.021 | 0.039 | -0.048 | 0.753 |
| روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity | -0.449 | 0.491 | -0.049 | 0.185 | 0.057 | −0.228 | 0.534 |
| طول دوره پر شدن دانه Grain filling period | -0.158 | 0.926 | 0.098 | 0.116 | 0.00 | -0.085 | 0.912 |
| دمای کانوپی Canopy temperature | 0.025 | -0.166 | -0.051 | -0.321 | 0.543 | 0.419 | 0.603 |
| کلروفیل کل Total chlorophyll | 0.400 | 0.410 | -0.033 | 0.090 | 0.207 | 0.414 | 0.551 |
| شاخص سطح برگ Leaf area index | 0.915 | 0.007 | 0.077 | 0.178 | -0.067 | -0.022 | 0.879 |
| وزن تر Fresh weight | 0.886 | 0.099 | -0.160 | 0.155 | -0.026 | -0.192 | 0.883 |
| وزن خشک Dry weight | 0.938 | 0.122 | -0.050 | -0.065 | -0.009 | -0.114 | 0.915 |
| محتوای نسبی آب Relative water content | 0.329 | 0.045 | -0.354 | -0.021 | -0.597 | 0.502 | 0.844 |
| غلظت روی اندام هوایی Shoot zinc concentration | 0.067 | -0.110 | 0.002 | 0.838 | 0.338 | 0.304 | 0.926 |
| غلظت پروتئین دانه Grain protein concentration | -0.200 | 0.570 | -0.060 | -0.155 | -0.159 | 0.231 | 0.471 |
| عملکرد دانه Grain yield | -0.068 | 0.182 | 0.689 | -0.297 | 0.156 | 0.145 | 0.646 |
| مقادیر ویژه Eigen values | 4.788 | 2.509 | 1.357 | 1.193 | 1.110 | 1.030 | - |
| واریانس نسبی Relative variance | 29.924 | 15.683 | 8.481 | 7.456 | 6.938 | 6.440 | - |
| واریانس تجمعی Cumulative variance | 29.924 | 45.607 | 54.088 | 61.544 | 68.482 | 74.922 | - |

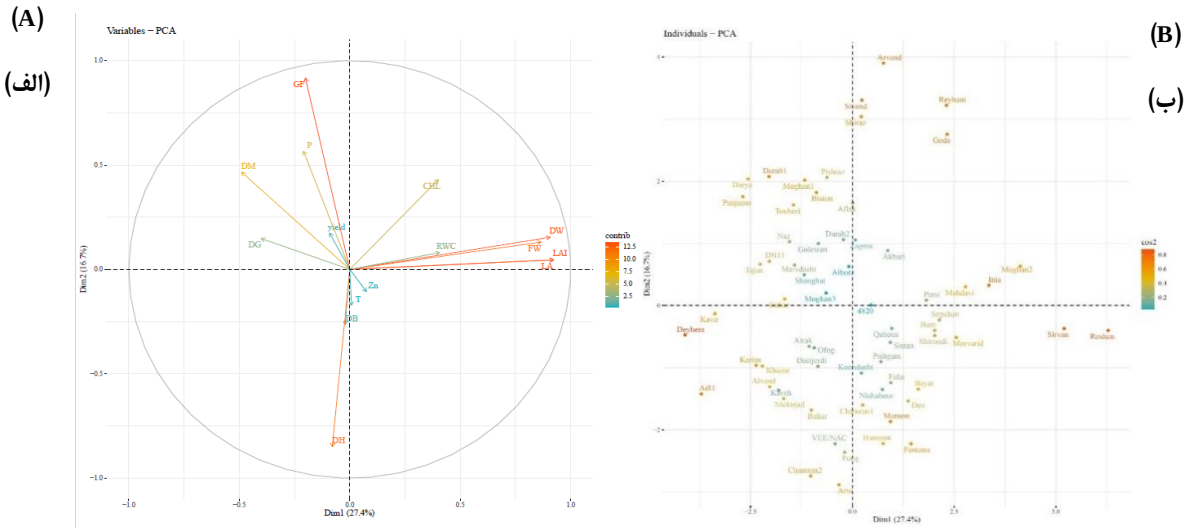
جدول ۸- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های تحمل به تنش در ارقام گندم
Table 8. Principals components analysis for stress tolerance indices in wheat cultivars

| شاخص‌ها Indices | عامل اول Factor1 | عامل دوم Factor2 | میزان اشتراک Communality |
|---|---|---|---|
| عملکرد در شرایط نرمال (Yp) | 0.957 | 0.281 | 0.995 |
| عملکرد در شرایط تنش (Ys) | 0.965 | −0.256 | 0.996 |
| شاخص حساسیت به تنش (SSI) | 0.193 | -0.890 | 0.829 |
| شاخص میانگین هارمونیک (HAM) | 0.994 | -0.071 | 0.992 |
| شاخص تحمل (TOL) | 0.361 | 0.928 | 0.992 |
| شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) | 0.997 | -0.016 | 0.994 |
| شاخص میانگین تولید بهره‌وری (MP) | 0.997 | 0.045 | 0.996 |
| شاخص تحمل غیرزیستی (ATI) | 0.457 | 0.827 | 0.893 |
| شاخص مقاوم به تنش (DI) | 0.827 | -0.554 | 0.990 |
| شاخص تحمل تنش (STI) | 0.989 | -0.057 | 0.981 |
| شاخص اصلاح شده در شرایط بدون تنش (kiSTI,K1S) | 0.951 | 0.283 | 0.984 |
| شاخص اصلاح شده در شرایط تنش (K2STI) | 0.939 | -0.295 | 0.968 |
| مقادیر ویژه Eigen values | 8.644 | 2.967 | - |
| واریانس نسبی Relative variance | 72.032 | 24.721 | - |
| واریانس تجمعی Cumulative variance | 72.032 | 96.753 | - |

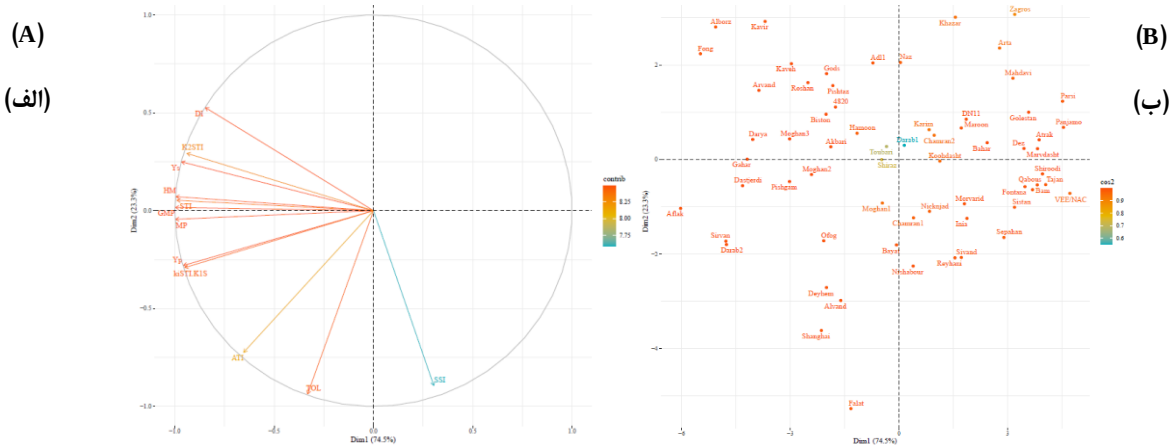
[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]




شکل ۱- نمودار بای‌پلات (الف) صفات و (ب) پراکنش ۶۴ رقم زراعی گندم در شرایط نرمال
Figure 1. Biplot diagram of (A) traits and (B) distribution of 64 wheat cultivars under optimal conditions




شکل ۲- نمودار بای‌پلات (الف) صفات و (ب) پراکنش ۶۴ رقم زراعی گندم در شرایط تنش کمبود روی
Figure 2. Biplot diagram of (A) traits and (B) distribution of 64 wheat cultivars under zinc deficiency stress conditions




شکل ۳- نمودار بای پلات (الف) صفات عملکرد در شرایط نرمال و تنش کمبود روی و شاخص‌های تحمل تنش و (ب) پراکنش ۶۴ رقم زراعی گندم
Figure 3. Biplot diagram (A) yield under optimal and zinc deficiency stress conditions and stress tolerance indices and (B) distribution of 64 wheat cultivars

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

به‌منظور تعیین تنوع بین ارقام مختلف و تعیین قرابت ارقام و گروه‌بندی آن‌ها بر مبنای صفات مورد بررسی تجزیه خوشه‌ای به روش Ward انجام شد. با توجه به دندروگرام تجزیه خوشه-ای در شرایط بهینه روی (شکل۴A)، ارقام مورد بررسی در سه گروه طبقه‌بندی شدند. ارقام گروه اول شامل ناز، قابوس، دی ان۱۱، کویر، داراب۲، روشن، پیشتاز، تجن، شیرودی، مهدوی، داراب۱، ویناک، فونتانا، مغان۳، الوند، دستجردی، بیات، اکبری، سیروند و گهار از لحاظ صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و عملکرد دارای کمترین میزان بودند. ارقام گروه دوم شامل دریا، توباری، مروارید، ریحانی (ارقام دیررس) کمترین میزان صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد و بیشترین میزان صفات فنولوژیک را داشتند. ارقام طبقه‌بندی شده در گروه سوم شامل ۴۸۲۰، البرز، مغان۲، چمران۱، مارون، آرتا، بم، دز، نیشابور، سیوند، کوهدشت، شیراز، هامون و اینیا با وجود داشتن کمترین مقدار صفات فنولوژیک، دارای بالاترین میزان از نظر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد بودند. براساس دندروگرام تجزیه خوشه‌ای در شرایط تنش کمبود روی (شکل ۴B)، ارقام در سه گروه طبقه‌بندی شدند که گروه اول شامل وییناک، پارسی، دیهیم، عدل، دی ان۱۱، پنجامو، تجن، توباری، مغان۱، گلستان، ناز، خزر، گهار، ریحانی، قدس، شیراز، پیشتاز، داراب۲، مغان۳، زاگرس، اکبری، شانگهای، البرز، داراب۱، بم، بیستون (ارقام دیررس) کمترین میزان را از لحاظ صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد و بالاترین میزان را از نظر صفات فنولوژیک دارا بودند. ارقام گروه دوم شامل کویر، بیات، مغان۲، سیروان، روشن، مهدوی، افلاک، دریا، سیستان، اروند، سیوند، کوهدشت، فونتانا، دز، شیرودی، قابوس، سپاهان، اینیا، بیات دارای بالاترین میزان صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد و کمترین میزان صفات فنولوژیک و از ارقام زودرس بودند. گروه سوم شامل ارقام کاوه، هامون، فونگ، نیشابور، آرتا، پیشگام، نیک‌نژاد، افق، ۴۸۲۰، بهار، کریم، دستجردی، الوند، چمران۲، اترک، فلات، مارون، چمران۱ با داشتن متوسط میزان از نظر صفات فنولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد بودند. نهایتا ارقام مورد بررسی براساس شاخص‌های تنش به سه گروه تقسیم شدند (شکل ۴C) که گروه اول شامل ارقام بم، قابوس، فونتانا، شیرودی، تجن، ویناک، سپاهان، سیستان، اترک، مرودشت، دز، گلستان، پنجامو، پارسی، چمران۲، کریم، کوهدشت، DN11، مارون، بهار، آرتا، مهدوی، زاگرس و خزر و گروه دوم شامل چمران۱، نیک‌نژاد، مغان۱، بیات، نیشابور، ریحانی، سیوند، اینیا، مروارید، الوند، دیهیم، شانگهای، افق و فلات و گروه سوم شامل ارقام دریا، گهار، دستجردی، مغان۲، پیشگام، مغان۳، داراب۲، سیروان، افلاک، کاوه، روشن، اروند، کویر، البرز، فونگ، ۴۸۲۰، بیستون، قدس، پیشتاز، اکبری، هامون، شیراز، توباری، داراب۱، عدل و ناز قرار گرفتند. ارقام گروه اول براساس تمام شاخص‌ها بیشترین مقدار را دارا بودند و ارقام موجود در این گروه مطلوب‌ترین ارقام از لحاظ شاخص‌های تحمل تنش بودند.

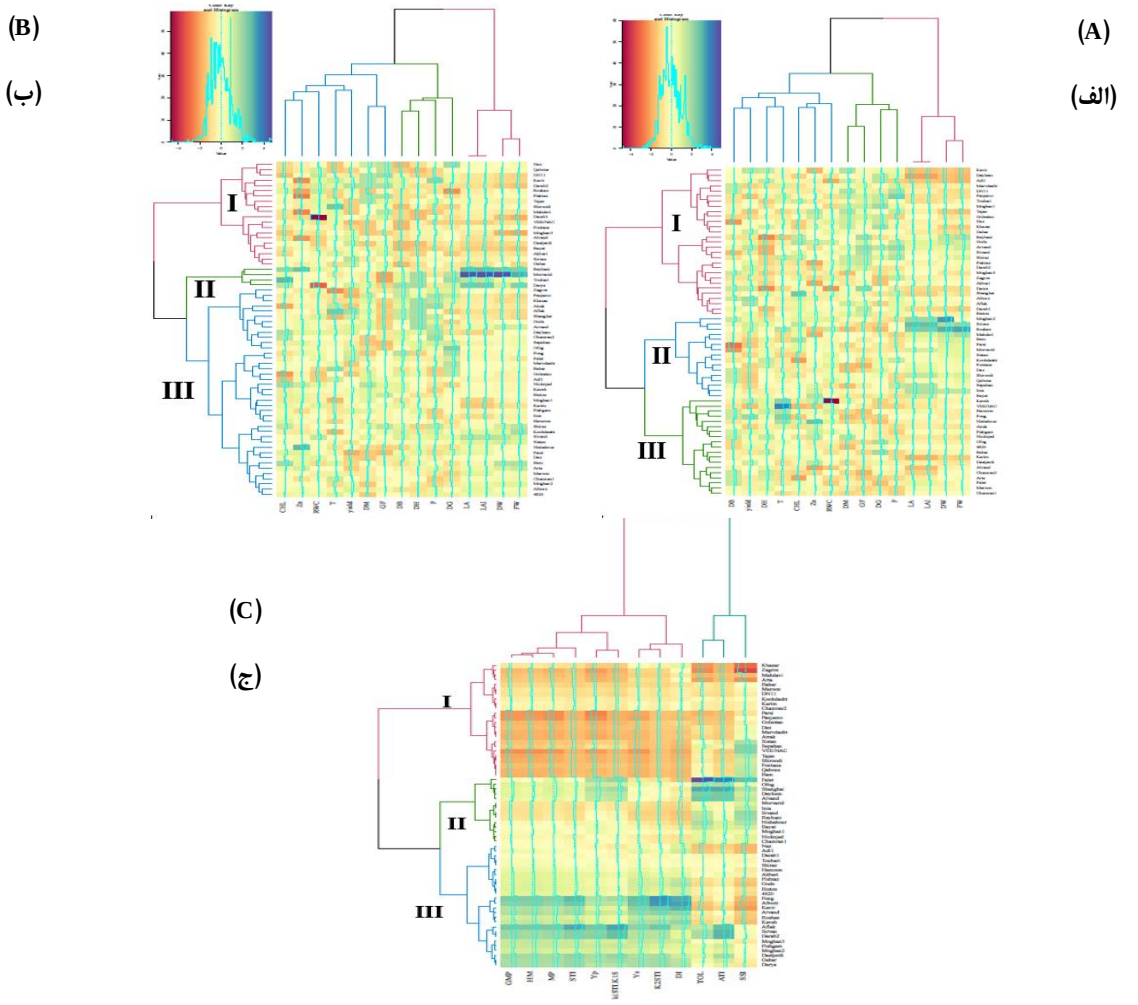
برطبق مطالعات نقوی و همکاران (Naghavi et al., 2014) ارقام دریا، کویر، روشن، مهدوی، سیستان عملکرد بالا و رقم پارسی عملکرد کمی داشتند. رجبی و همکاران (Rajabi et al., 2005) نیز بالا بودن عملکرد ارقام کویر، روشن، اینیا را تایید کردند. براساس گزارش پوستینی و همکاران (Poustini et al., 2007) ارقام کویر، روشن، اینیا جز ارقام متحمل و شیراز، تجن و قدس به‌عنوان ارقام حساس شناسایی شدند. حلیم و همکاران (Halim et al., 2017) و حسین‌علی‌پور و همکاران (Hosseinalipour et al., 2019) در تحقیقی گزارش کردند رقم سیروان و روشن بیشترین و تجن و قدس کمترین عملکرد را به خود اختصاص دادند. در آزمایشی کریمی و رخزادی (Karimi and Rokhzadi, 2010) ارقام کویر و روشن متحمل، ارقام چمران و فلات حدواسط و ارقام شیراز، گلستان و تجن جز ارقام حساس شناسایی کردند که این گزارشات همگی با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشتند.

## نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی در بین ارقام مورد بررسی از نظر اکثر صفات تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود داشت که این خود نشان از وجود تنوع بالا در میان ارقام بهاره برای اهداف اصلاحی است. در نهایت براساس صفات مهم، شاخص‌های تحمل و نتایج تجزیه به عامل‌ها و تجزیه خوشه‌ای ارقام افلاک، دریا، اروند، روشن، کویر و سیروند به‌عنوان مطلوب‌ترین ارقام و ویناک، تجن، پارسی و پنجامو به‌عنوان ارقام حساس معرفی شدند. بنابراین انتخاب ارقام متحمل به محیط‌های تحت تنش کمبود روی و استفاده در برنامه‌های به‌نژادی جهت تولید ارقامی با عملکرد بالا توصیه می‌شوند.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]




شکل ۴- دندروگرام تجزیه خوشه‌ای ارقام گندم تحت (الف) شرایط نرمال، (ب) تنش کمبود روی و (ج) شاخص‌های تحمل تنش
Figure 4. Cluster analysis dendrogram in wheat cultivars under (A) optimal conditions, (B) zinc deficiency stress and (C) stress tolerance indices

## منابع

Abdoli, M., & Esfandiari, E. (2014). Effect of zinc foliar application on the quantitative and qualitative yield and seedlings growth characteristics of bread wheat (cv. Kohdasht). Iranian Journal of Dryland Agriculture, 3, 77-90 (In Persian).

Abdoli, M., Esfandiari, E., Sadeghzadeh, B., & Mousavi, S.Á. (2016). Zinc application methods affect agronomy traits and grain micronutrients in bread and durum wheat under zinc-deficient calcareous soil. Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences, 26, 202-214 (In Persian).

Ahmadi, A., Saeidi, M., & Jahansoz, M. (2005). Distribution patterns of photosynthesis and grain filling in bread wheat genotypes under stress and non-stress. Journal of Agriculture and Natural Resources 36, 1333-1343 (In Persian).

Alloway, B.J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. Environmental Geochemistry and Health, 31, 537-548.

Amiri, F.R., & Aasad, M. (2005). Evaluation of three physiological traits for selecting drought resistant wheat genotypes. Journal of Agricultural Science and Technology (JAST), 7, 81-87 (In Persian).

Amiri, R., Bahraminejad, S., Sasani, S., & Ghobadi, M. (2014). Genetic evaluation of 80 irrigated bread wheat genotypes for drought tolerance indices. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 20, 101-111 (In Persian).

Arzani, A. (2006). Crops breeding, 2nd edition, Sharif University Publication Center. (In Persian).

Barma, N.D., Amin, M.R., & Sarker, Z.I. (1992). Variability and association of grain yield with vegetative and grain filling period in spring wheat. Annals of Bangladesh Agriculture, 2, 63-66.

Bavandpouri, F., Farshadfar, E., & Farshadfar, M. (2022). Investigation of genetic diversity of bread wheat accessions in terms of agronomic traits and SSR molecular markers. Journal of Crop Breeding, 14, 156-173 (In Persian).

Cakmak, I., Pfeiffer, W.H. & McClafferty, B. (2010). Biofortification of durum wheat with zinc and iron. Cereal Chemistry, 87, 10-20.

Cakmak, I., & Kutman, U.Á. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. European Journal of Soil Science, 69, 172-180.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]

Dastur, A.R., Asghari, R., & Shahbazi, H. (2013). In two conditions (Triticum aestivum L.), evaluation of yield and grain filling speed of wheat lines without stress and drought stress after pollination. Journal of Agroecology, 6, 561-570 (In Persian).

Ebadzadeh, H., Ahmadi, K., Mohammadnia Afrouzi, S.H., Taghani, R.A., Abbasi, M., & Yari, S.H. (2017). Agricultural Statistics. Ministry of Agriculture-Jahad. 401 (In Persian).

Esfandiari, E., & Abdoli, M. (2017). Improvement of agronomic and qualitative characters of durum wheat (Triticum turgidum L. var. durum) genotypes by application of zinc sulfate under zinc deficiency stress. Journal of Crop Ecophysiology, 3, 619-636 (In Persian).

Farshadfar, E., Poursiahbidi, M.M., & Safavi, S.M. (2018). Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research. 1, 143-158 (In Persian).

Fernandez, G.C. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug. 13-16, Shanhua, Taiwan, 1992 257-270.

Fischer, R., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research, 29, 897-912.

Halim, G.H., Emam, Y., & Shakeri, E. (2017). Evaluation of yield, yield components and stress tolerance indices in bread wheat cultivars at post-anthesis irrigation cut-off. Journal of Crop Production and Processing, 4, 121-134 (In Persian).

Hosseinalipour, B., Rahnama, A., & Farrokhian Firouzi, A. (2019). Effect of drought stress on wheat root growth and architecture at vegetative growth stage. Iranian Journal of Field Crop Science, 1, 63-75 (In Persian).

Hosseinpour, T., Siadat, A., Mamghani, R., Fathee, G.h., & Rafiee, M. (2006). Study of rate and duration of grain filling of wheat genotypes under rainfed Koohdasht of Lorestan. Journal of Agriculture and Natural Resources, 13, 66-77 (In Persian).

Jackson, J. E. (2005). A user's guide to principal components. John Wiley & Sons.

Kamrani, M., Ebadi, A., & Mehreban, A. (2016). Evaluation of grain yield-based drought tolerance indices for screening durum wheat genotypes. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 12, 649-665 (In Persian).

Karimi, E., & Rokhzadi, A. (2010). An identification of drought tolerant genotypes in wheat using analysis of drought resistance indices. Agronomy Journal, 96, 78-83 (In Persian).

McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. Nutrient management module, 9, 1-16.

Mohammadi, S.A., & Prasanna, B.M. (2003). Analysis of genetic diversity in crop plants-salient statistical tools and considerations. Crop Science, 43, 1235-1248 (In Persian).

Mohammadi, R., & Abdulahi, A. (2017). Evaluation of durum wheat genotypes based on drought tolerance indices under different levels of drought stress. Journal of Agricultural Sciences, Belgrade, 62, 1-14 (In Persian).

Naderi, A., Magidi Heravan, A., Hashemi Dezfuli, A., Rezaei, A., & Noor Mohammadi, G. (2008). Envelopment analysis of indices for evaluating crop tolerance to environmental deficiencies and introduction of a new index. Seed and plant Improvement Journal, 15, 390-402 (In Persian).

Naghavi, M.R., Moghaddam, M., Toorchi, M., & Shakiba, M.R. (2014). Evaluation of Spring Wheat Cultivars Based on Drought Resistance Indices. Journal of Crop Breeding, 17, 192-207 (In Persian).

Pataco, I.M., Lidon, F.C., Ramos, I., Oliveira, K., Guerra, M., Pessoa, M.F., Carvalho, M.L., Ramalho, J.C., Leitão, A.E., Santos, J.P., & Campos, P.S. (2017). Biofortification of durum wheat (Triticum turgidum L. ssp. durum (Desf.) Husnot) grains with nutrients. Journal of Plant Interactions, 12, 39-50.

Patel, J., Patel, A., Patel, C., Mamrutha, H., Pradeep, S., & Pachchigar, K.P. (2019). Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 8, 1165-1178.

Poustini, K., & Sio-Semardeh, A. (2004). Ion distribution in wheat cultivars in response to salinity stress. Field Crops Research, 85, 125-133.

Poustini, K., Sio-Semardeh, A., & Ranjbar, M. (2007). Proline accumulation as a response to salt stress in 30 wheat (Triticum aestivum L.) cultivars differing in salt tolerance. Genetic Resources and Crop Evolution, 54, 925-934.

Rafique, E., Rashid, A., Ryan, J., & Bhatti, A.U. (2006). Zinc deficiency in rainfed wheat in Pakistan: magnitude, spatial variability, management, and plant analysis diagnostic norms. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 37, 181-197.

Rasoulzadeh Aghdam, M., Darvishzadeh, R., Sepehr, E., & Alipour, H. (2021). Evaluation of phosphorus deficiency stress tolerance in oilseed sunflower pure lines (Helianthus annuus L.). Applied Research in Field Crops, 34, 120-139 (In Persian).

Rajabi, R., Poustini, K., Jahanipour, P., & Ahmadi, A. (2005). Effects of salinity on yield and some physiological characteristics of 30 wheat varieties. Journal of Agricultural Science, 2, 153-163 (In Persian).

Rosielle, A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and nonstress environment. Crop Science, 21, 943- 946.

Sangi, S.A., Najafi, A., Cheghamirza, K., & Mohammadi, R. (2020). Evaluation of drought tolerance indices in durum wheat genotypes (Lathyrus sativus L.). Environmental Stresses in Crop Sciences, 14, 901-911 (In Persian).

Shahryari, R., & Mollasadeghi, V. (2011). Introduction of two principle components for screening of wheat genotypes under end seasonal drought. Advances in Environmental Biology, 5, 519-523.

Tadesse, W., & Bekele, E. (2001). Factor analysis of components of yield in grasspea (Lathyrus sativus L.). Lathyrus Lathyrism Newsletter, 2, 91-93.

White, P.J., & Broadley, M.R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets–iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. New Phytologist, 182, 49-84.

[ Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOI: 10.61186/jcb.15.48.1 ]