University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 13, No. 1, Spring 2023 (47-63)
doi: 10.22124/CR.2023.24502.1767
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) based on agro-morphological traits using factor analysis under zinc (Zn) deficiency conditions

Maryam Harati Rad[1], Nafiseh Mahdinezhad[2*], Reza Darvishzadeh[3*], Baratali Fakheri[4] and Mitra Jabari[5]

1. Ph.D. Student, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran ([*] Corresponding author: nmahdinezhad@uoz.ac.ir)
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran ([*] Corresponding author: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir)
4. Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran
5. Assistant Professor, Department of plant production and genetic engineering, Faculty of Agriculture, Higher Education Complex of Saravan. Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

The first step in breeding programs is to use the genetic diversity among existing populations, cultivars and lines. Maize is used as a model plant to study the genetics of various traits. Compared to other crops, maize has a high demand for zinc (Zn) and is known as an indicator of zinc deficiency in the soil. In terms of climatic conditions, Iran is located in a arid and semi-arid region, and there is a lack of micronutrients specially Zn in this region. Lack of nutrients such as Zn is one of the important abiotic stresses that affects the growth and development of plants including maize. The objective of this study was to evaluate the genetic diversity of a number of corn lines under normal and zinc deficiency conditions.

Materials and methods

To assess the genetic diversity of 95 maize lines using agro-morphological traits, an experiment was carried out in alpha lattice design in two replications under two normal (use of zinc sulfate fertilizer) and zinc deficiency (no use of zinc sulfate fertilizer) conditions in Sistan Agriculture and Natural Resources Research Center during two years. The studied maize lines were obtained from Razi University of Kermanshah, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center, and Seed and Plant Improvement Institute (SPII) in the form of research project No. 94/101/T.T. approved by Biotechnology Institute of Urmia University. Twenty-nine traits were measured and recorded. Combined analysis of variance of the studied traits under normal and zinc (Zn) deficiency conditions were performed using SAS ver. 9.4 software. Other statistical analyzes including descriptive statistics, Pearson correlation coefficient, forward stepwise regression and factor analysis method were done using R software by pastecs, corrplot, olsrr, and psych packages, respectively.

Research findings

The results of this study revealed high phenotypic variation among the studied maize lines for all investigated traits under both normal and zinc (Zn) deficiency stress conditions. The results of analysis

of variance confirmed the presence of high phenotypic diversity among maize lines. All traits were affected by environment, and a statistically significant difference was observed between two environments for the all measured traits in maize lines. Genotype × environment interaction was also significant for most of the studied traits. Descriptive statistics showed a considerable diversity among the lines, and the highest diversity in both normal and zinc deficiency conditions was observed for yield per unit area, economic yield, and number of grains per cob. In correlation analysis, weight of five cobs, number of grains per cob, and 100-grain weight showed a positive and significant correlation with economic yield in both normal and zinc deficiency conditions. Therefore, these three can be introduced as important traits in the initial selection of zinc deficiency tolerant lines. In factor analysis of morphological traits using the parallel analysis method, four hidden and independent factors were determined under both normal and zinc deficiency conditions, which explained 63% and 57% of the total variation of the lines, respectively. Based on the results of the factor analysis, the traits including number of days to tasseling, number of days to pollen emergence, number of days to cob emergence, plant height, ear diameter and width, number of grains per cob, economic yield, yield per unit area, and harvest index with high degree of commonality under both normal and zinc deficiency conditions, can be suggested as key traits for the selection of zinc deficiency tolerant lines.

Conclusion

The results of this research showed that there is a high genetic diversity among the studied maize lines in terms of morphological traits under both normal and zinc deficiency stress conditions. It makes it possible to use these lines in breeding programs as a valuable genic source to improve the performance of lines and produce improved genotypes under normal and zinc deficiency conditions.

Keywords: Correlation, Economic performance, Hidden factors, Maize, Zinc deficiency stress

Received: November 13, 2022 Accepted: April 17, 2023

Cite this article:

Harati Rad, M., Mahdinezhad, N., Darvishzadeh, R., Fakheri, B. and Jabari, M. 2023. Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) based on agro-morphological traits using factor analysis under zinc (Zn) deficiency conditions. *Cereal Research*, 13(1), pp. 47-63.

تحقیقات غلات
دوره سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲ (۶۳-۴۷)
doi: 10.22124/CR.2023.24502.1767
دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

بررسی تنوع ژنتیکی لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.) بر اساس صفات اگرومورفولوژیک با استفاده از تحلیل عاملی تحت شرایط کمبود روی (Zn)

مریم هراتی‌راد[۱]، نفیسه مهدی‌نژاد[۲*]، رضا درویش‌زاده[۳*]، براتعلی فاخری[۴] و میترا جباری[۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲- دانشیار، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران (* نویسنده مسئول: nmahdinezhad@uoz.ac.ir)
۳- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (* نویسنده مسئول: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir)
۴- استاد، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۵- استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: اولین گام در برنامه‌های به‌نژادی، استفاده از تنوع ژنتیکی موجود در بین جمعیت‌ها، ارقام و لاین‌های موجود است. ذرت به‌عنوان یک گیاه مدل برای مطالعات ژنتیک صفات مختلف استفاده می‌شود. ذرت نسبت به سایر محصولات زراعی، نیاز بالایی به روی (Zn) دارد و به‌عنوان شاخص ارزیابی کمبود روی در خاک شناخته می‌شود. ایران از نظر شرایط آب و هوایی در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و عموماً کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی در آن وجود دارد. کمبود عناصر غذایی از قبیل روی یکی از تنش‌های غیرزیستی مهمی است که بر رشد و نمو گیاهان از جمله ذرت تاثیر می‌گذارد. هدف از انجام این مطالعه، ارزیابی تنوع ژنتیکی تعدادی از لاین‌های ذرت تحت دو شرایط بهینه و کمبود روی بود.

مواد و روش‌ها: به‌منظور ارزیابی تنوع ژنتیکی ۹۵ لاین ذرت بر اساس صفات اگرو-مورفولوژیک، آزمایشی در قالب طرح آلفا لاتیس در دو تکرار تحت دو شرایط نرمال یا بهینه (استفاده از کود سولفات روی) و کمبود روی (عدم استفاده از کود سولفات روی) در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان به‌مدت دو سال اجرا شد. لاین‌های ذرت مورد تحقیق از دانشگاه رازی کرمانشاه، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج در قالب طرح تحقیقاتی شماره 94/101/T.T مصوب پژوهشکده زیست‌فناوری دانشگاه ارومیه تهیه شدند. تعداد ۲۹ صفت اندازه‌گیری و ثبت شد. تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه تحت شرایط نرمال و کمبود روی با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. سایر تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار R و بسته‌های مختلف شامل آماره‌های توصیفی با استفاده از بسته pastecs، ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از بسته corrplot، تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام پیشرو با استفاده از بسته olsrr و تحلیل عاملی با استفاده از بسته psych انجام شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرات فنوتیپی زیادی در میان لاین‌های ذرت مورد استفاده برای تمامی صفات در هر دو شرایط محیطی وجود داشت. نتایج تجزیه واریانس وجود تنوع فنوتیپی بالا در بین لاین‌های ذرت را تائید کرد.

همه صفات تحت تاثیر محیط قرار گرفتند و تفاوت آماری معنی‌داری بین دو محیط از نظر تمامی صفات اندازه‌گیری شده در لاین‌ها مشاهده شد. برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط نیز برای بیش‌تر صفات مطالعه شده معنی‌دار بود. برآورد آماره‌های توصیفی نشان داد که تنوع قابل توجهی در میان لاین‌ها وجود داشت، به‌طوری که برای صفات مورفولوژی در هر دو محیط کمبود روی و نرمال، بیش‌ترین میزان تنوع در صفات عملکرد در واحد سطح، عملکرد اقتصادی و تعداد دانه در بلال مشاهده شد. از لحاظ همبستگی، صفات وزن پنج بلال، تعداد دانه در بلال و وزن ۱۰۰ دانه در هر دو محیط نرمال و کمبود روی دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد اقتصادی بودند. بنابراین این سه صفت را می‌توان به‌عنوان صفاتی مهم در گزینش اولیه لاین‌های متحمل به کمبود روی معرفی کرد. در تحلیل عاملی صفات مورفولوژی با استفاده از روش تجزیه و تحلیل موازی، تعداد چهار عامل مستقل و پنهانی در هر دو شرایط نرمال و کمبود روی تعیین شد که به‌ترتیب ۶۳ و ۵۷ درصد از تنوع کل لاین‌ها را توجیه کردند. بر اساس نتایج تحلیل عاملی، صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده، تعداد روز تا بلال‌دهی، ارتفاع بوته، قطر و عرض بلال، تعداد دانه در بلال، عملکرد اقتصادی، عملکرد در واحد سطح و شاخص برداشت که میزان اشتراک بالایی در هر دو شرایط بهینه و کمبود روی داشتند، به‌عنوان صفات کلیدی جهت انتخاب لاین‌های متحمل به کمبود روی پیشنهاد می‌شوند.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که تنوع ژنتیکی قابل توجهی از لحاظ صفات مورفولوژی در بین لاین‌های ذرت مورد مطالعه تحت هر دو شرایط نرمال و کمبود روی وجود داشت که امکان استفاده از این لاین‌ها را در برنامه‌های به‌نژادی به‌عنوان یک منبع ژنی ارزشمند جهت بهبود عملکرد لاین‌ها و تولید لاین‌های اصلاح شده در شرایط نرمال و کمبود روی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تنش کمبود روی، ذرت، عملکرد اقتصادی، عوامل پنهانی، همبستگی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

نحوه استناد به این مقاله:

هراتی‌راد، مریم، مهدی‌نژاد، نفیسه، درویش‌زاده، رضا، فاخری، براتعلی و جباری، میترا. ۱۴۰۲. بررسی تنوع ژنتیکی لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.) بر اساس صفات اگرومورفولوژیک با استفاده از تحلیل عاملی در شرایط کمبود روی (Zn). *تحقیقات غلات*، ۱۳(۱): ۴۷-۶۳.

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) نقش به‌سزایی در تغذیه انسان و دام دارد و بعد از برنج و گندم، مهم‌ترین غله در سراسر جهان بوده و به‌دلیل عملکرد بالا، بازده اقتصادی مناسب و کاربردهای همه جانبه، بسیار محبوب است. این گیاه به‌طور گسترده تحت شرایط اقلیمی متنوع و انواع خاک‌ها در سطح جهان کشت می‌شود و بنابراین در معرض انواع تنش‌های زنده و غیرزنده از جمله تنش کمبود عناصر مهم نظیر روی (Zn) که یک ریزمغذی ضروری در رشد و نمو گیاه است، قرار می‌گیرد. عنصر روی نقش مهمی در واکنش‌های آنزیمی مختلف، فرآیندهای متابولیک، متابولیسم هورمون‌های گیاهی، رشد اندام‌های تولید مثلی گیاه، مقاومت در برابر پاتوژن‌های خاص و بهبود مقاومت گیاه در برابر تنش ایفا می‌کند (Shemi *et al*., 2021; Suganya *et al*., 2021). ویژگی‌های شیمیایی خاک از قبیل مقدار کربنات کلسیم، مواد آلی و فسفات قابل جذب بر تعادل بین اشکال قابل جذب روی مؤثر بوده و می‌تواند سبب افزایش یا کاهش غلظت روی قابل جذب شود. کمبود روی احتمالاً شایع‌ترین کمبود ریزمغذی‌ها در خاک است (Rehman *et al*., 2021). کمبود روی در خاک منجر به کاهش عملکرد گیاه شده (Aziz *et al*., 2017) و بر کیفیت تغذیه گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد (Cakmak and Kutman, 2018). برای تولید بالا و خوب محصولات گیاهی، وجود خاک مناسب حاوی مقدار کافی عناصر غذایی قابل استفاده و تعادل بین مقدار این عناصر غذایی بسیار مهم است (Suganya *et al*., 2021). تقریباً ۵۰ درصد از زمین‌های قابل کشت دنیا دارای کمبود روی هستند که به سوء تغذیه گیاه و در پی آن انسان و دام می‌انجامد (Yu *et al*., 2020). جذب ناکافی ریزمغذی‌ها باعث بسیاری از مشکلات جدی در سلامت انسان می‌شود (Montoya *et al*., 2021). مقدار روی در خاک‌های زراعی ایران از حد بحرانی (یک میلی‌گرم در کیلوگرم) کم‌تر است که این خود باعث می‌شود میزان عنصر روی در محصولات کشاورزی کشور بسیار کم باشد (Malakouti, 2003). کمبود روی، گرده‌افشانی ذرت را بیش از ۱۵ روز به‌تأخیر می‌اندازد و در نتیجه منجر به کاهش عملکرد دانه در گیاه می‌شود (Hong and Ji-Yun, 2007). ذرت در مقایسه با سایر گیاهان زراعی، نیاز بیش‌تری به روی دارد و بنابراین به‌عنوان گیاهی شاخص برای ارزیابی کمبود روی شناخته می‌شود (Zhang *et al*., 2021).

اطلاع از تنوع و کنترل ژنتیکی صفات، باعث استفاده مؤثر و بهتر از آنها در برنامه‌های به‌نژادی می‌شود. بررسی تنوع ژنتیکی فرآیندی است که تفاوت یا شباهت گونه‌ها، جمعیت‌ها و یا افراد مورد مطالعه را با استفاده از روش‌ها و مدل‌های آماری خاصی نشان می‌دهد (Mohammadi and Prasanna, 2003). وجود تنوع برای تداوم و پیشرفت برنامه‌های به‌نژادی و افزایش کارایی انتخاب ضروری است (Nikolić *et al*., 2010). روش‌های مختلفی برای مطالعه تنوع ژنتیکی وجود دارد و از جمله مهم‌ترین آنها روش‌های آماری چند متغیره است که به‌طور همزمان از اطلاعات چندین صفت در کلیه افراد استفاده می‌کند (Mohammadi and Prasanna, 2003). در بررسی ۴۰ رقم ذرت بر اساس ۱۸ صفت فنوتیپی گزارش شد که صفات تعداد دانه در بلال و وزن کل دانه بیش‌ترین میزان ضریب تغییرات فنوتیپی را دارا بودند (Harada *et al*., 2009). در بررسی ۱۵ لاین ذرت با استفاده از تجزیه به عامل‌ها، چهار عامل مستقل شناسایی شد که تحت شرایط تنش گرما ۸۱/۹۲ و بدون تنش ۸۲/۹۰ از تغییرات را توجیه کردند و در هر دو شرایط عامل اول به‌عنوان عامل عملکرد نامیده شد (Khodarahmpour, 2012). بررسی تنوع ژنتیکی برای شروع یک برنامه اصلاحی بسیار ضروری است. تجزیه به عامل‌ها یک روش آماری مؤثر در کاهش حجم داده‌ها است، به‌طوری که صفات دارای همبستگی بالا با همدیگر را در یک عامل گروه‌بندی می‌کند (Cooper, 1983). این روش برای درک روابط و ساختار اجزای عملکرد و صفات مورفولوژیک گیاهان زراعی استفاده شده است (Welsh, 1981). هدف از پژوهش حاضر، برآورد تنوع ژنتیکی بین لاین‌های خالص ذرت با استفاده از روش‌های آماری از جمله تجزیه به عامل‌ها بر اساس صفات اگرو-مورفولوژیک تحت شرایط کمبود روی بود. نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی تولید و توسعه هیبریدهای روی-کارا مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تعداد ۹۵ لاین خالص ذرت طی دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۹ و ۱۴۰۰) در شرایط مزرعه در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان تحت دو شرایط کمبود عنصر روی (عدم استفاده از کود سولفات روی) و شرایط بهینه یا نرمال (استفاده از کود سولفات روی) در قالب طرح آلفالاتیس در دو تکرار مورد ارزیابی

قرار گرفتند. لاین‌های مورد نظر از دانشگاه رازی کرمانشاه، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج در قالب طرح تحقیقاتی شماره 94/101/T.T مصوب پژوهشکده زیست‌فناوری دانشگاه ارومیه تهیه شدند (جدول ۱). محل اجرای آزمایش طی دو سال متوالی از یک رده خاک با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (جدول ۲) مشابه بود تا از تغییرات ناشی از غیریکنواختی خاک جلوگیری شود. مراحل آماده‌سازی زمین طی دو سال با انجام شخم از پاییز سال پیش از کاشت آغاز شد و کوددهی بر اساس توصیه‌های فنی نتایج تجزیه خاک صورت گرفت.

کاشت در هر دو سال زراعی بر اساس تقویم زراعی منطقه از اول مرداد ماه انجام و مزرعه بلافاصله پس از کاشت آبیاری شد تا گیاهچه‌ها به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه سبز شوند. از آنجایی‌که منطقه مورد نظر (شهرستان زابل) دارای اقلیم گرم و خشک است، آبیاری اول و دوم با فاصله سه روز انجام شد تا از کاهش تراکم بوته جلوگیری شود. در محیط بهینه (نرمال)، اعمال تیمار روی (۳۵ کیلوگرم در هکتار سولفات روی) پیش از آغاز مرحله زایشی و در مراحل ۴، ۶ و ۱۰ برگی بر اساس تقسیم‌بندی هانوی (Hanway, 1986) صورت گرفت. کود روی در ساعات اولیه روز (به‌علت درجه حرارت پایین هوا) همراه با آب به زمین اضافه شد. برای هر لاین در هر یک از شرایط آزمایشی، تعداد پنج بوته تصادفی از هر تکرار انتخاب و تعداد ۲۹ صفت شامل صفات فنولوژیک، مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری صفات مربوط به بلال، بلال‌ها پس از رسیدگی فیزیولوژیک از بوته‌ها جدا و به آزمایشگاه منتقل شدند.

جدول ۱- ژنوتیپ‌های ذرت مورد مطالعه تحت شرایط بدون تنش و تنش کمبود روی (Zn)

Table 1. The studied maize genotypes under non-stress and zinc (Zn) deficiency stress conditions

No.	Genotypic code	No.	Genotypic code	No.	Genotypic code
1	Ma001	33	Ma034	65	Ma079
2	Ma002	34	Ma035	66	Ma080
3	Ma003	35	Ma036	67	Ma083
4	Ma004	36	Ma037	68	Ma085
5	Ma005	37	Ma038	69	Ma089
6	Ma006	38	Ma039	70	Ma091
7	Ma007	39	Ma040	71	Ma096
8	Ma008	40	Ma042	72	Ma098
9	Ma009	41	Ma043	73	Ma100
10	Ma010	42	Ma044	74	Ma104
11	Ma011	43	Ma045	75	Ma105
12	Ma012	44	Ma046	76	Ma106
13	Ma013	45	Ma048	77	Ma107
14	Ma014	46	Ma049	78	Ma108
15	Ma015	47	Ma050	79	Ma109
16	Ma016	48	Ma051	80	Ma110
17	Ma017	49	Ma052	81	Ma111
18	Ma018	50	Ma053	82	Ma112
19	Ma019	51	Ma054	83	Ma113
20	Ma020	52	Ma055	84	Ma114
21	Ma021	53	Ma057	85	Ma115
22	Ma022	54	Ma060	86	Ma116
23	Ma023	55	Ma062	87	Ma117
24	Ma024	56	Ma064	88	Ma118
25	Ma025	57	Ma065	89	Ma119
26	Ma026	58	Ma066	90	Ma120
27	Ma027	59	Ma072	91	Ma121
28	Ma028	60	Ma073	92	Ma122
29	Ma030	61	Ma074	93	Ma123
30	Ma031	62	Ma075	94	G703
31	Ma032	63	Ma076	95	Simon
32	Ma033	64	Ma077		

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 2. Soil physico-chemical characteristics of the experimental field

Depth (cm)	EC (dS/m)	pH	TNV (%)	Total N (%)	Availabe P (ppm)	Availabe K (ppm)	OC (%)	Clay (%)	Sand (%)	Silt (%)	Soil texture	Zn (ppm)
0-30	1.85	8.03	20.4	0.05	26	220	0.54	18	42	40	Loam	0.67

EC, electrical conductivity; TNV, total neutralizing value; N, nitrogen; P, Phosphorus; K, potassium; OC, organic carbon.

تجزیه واریانس مرکب صفات مطالعه شده در دو شرایط و طی دو سال اجرای آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام گرفت. آماره‌های توصیفی با استفاده از بسته «pastecs» با دستور «stat.desc(mydata)» در نرم‌افزار R که شاخص‌های (# nbr.val, nbr.null, nbr.na, min max, range, sum, # median, mean, SE.mean, CI.mean, var, std.dev, coef.var) را ارائه می‌کند، برآورد شد. برای بررسی جهت و میزان ارتباط خطی بین صفات مورد مطالعه، از ضریب همبستگی پیرسون توسط بسته «corrplot» در نرم‌افزار R (Wei and Simko, 2021) و برای بررسی دقیق‌تر روابط و ساختار عملکرد اقتصادی و اجزای مؤثر بر آن، از تحلیل عاملی به‌روش Parallel analysis توسط بسته «psych» با دستور factor.pa(mydata, nfactors=…, rotation= "…") در نرم‌افزار R (Revelle, 2016) استفاده شد.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی و تجزیه واریانس

آماره‌های توصیفی شامل مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات صفات مورد بررسی تحت دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی در جدول ۳ ارایه شده است. نتایج نشان داد که در کلیه صفات مورد بررسی تنوع قابل توجهی در بین لاین‌ها وجود داشت. در میان صفات مورد بررسی، بیش‌ترین میزان تنوع فنوتیپی در محیط کمبود روی مربوط به صفات عملکرد در واحد سطح، وزن دانه در بلال (عملکرد اقتصادی)، تعداد دانه در بلال و شاخص برداشت (درصد) به‌ترتیب با مقدار ۰/۵۶ ، ۰/۳۴ ، ۰/۳۰ و ۰/۳۰ بود. بنابراین می‌توان گفت که در میان لاین‌های مورد بررسی منابع ژنتیکی خوبی از لحاظ واکنش به کمبود روی برای استفاده در برنامه‌های اصلاحی ذرت جهت بهبود این صفات وجود دارد. در محیط کمبود روی صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده و تعداد روز تا بلال‌دهی دارای کم‌ترین درصد تنوع محاسبه شده بین صفات بودند. در این محیط ضریب تغییرات از ۰/۰۳ تا ۰/۵۶ برای صفات مختلف متغیر بود. برای صفت عملکرد در واحد سطح در محیط کمبود روی، اختلاف ۳۸۳۶۱/۰۷ گرم بین کم‌ترین عملکرد (۴۸۱/۸) و بیش‌ترین عملکرد (۳۸۸۴۲/۸۷) مشاهده شد که نشان‌دهنده تنوع بالا برای این صفت در بین لاین‌های مورد مطالعه می‌باشد. از این ویژگی می‌توان در برنامه‌های اصلاحی بسیار بهره برد.

در محیط نرمال با رفع کمبود روی کاهش مقادیر حداقل و حداکثر در صفات فنولوژی مشاهده شد، به‌طوری‌که تمامی مراحل جوانه‌زنی تا بلال‌دهی پس از رفع کمبود روی در مدت زمان کوتاه‌تری اتفاق افتاد. در مقابل کمبود روی سبب افزایش صفات فنولوژی نسبت به شرایط نرمال شد. همچنین در محیط نرمال پس از رفع نیاز کودی روی، افزایش قابل ملاحظه‌ای در اکثر صفات از قبیل ارتفاع بوته، طول تاسل، طول پدانکل، تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن پنج بلال، عملکرد اقتصادی، تعداد دانه در بلال، عملکرد در واحد سطح، عملکرد زیستی و شاخص برداشت مشاهده شد. کاهش میانگین عملکرد اقتصادی و عملکرد در واحد سطح در محیط کمبود روی در بین لاین‌ها متفاوت بود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که دریافت مقادیر لازم عنصر روی پیش از مرحله زایشی بر عملکرد دانه در مرحله نهایی تأثیر می‌گذارد و منجر به افزایش تحقق پتانسیل عملکردی ژنوتیپ‌ها می‌شود. هارادا و همکاران (Harada *et al*., 2009) در تحقیق خود روی صفات مورفولوژیک ذرت، گزارش کردند که صفات تعداد دانه در بلال و وزن کل دانه‌ها دارای بالاترین ضریب تغییرات فنوتیپی بودند. خدا رحم‌پور (Khodarahmpour, 2012) نشان داد که صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف و تعداد دانه در بلال بیش‌ترین ضریب تغیرات فنوتیپی را داشتند. صادقی و رحیمی (Sadeghi and Rahimi, 2017) نیز در آزمایش خود لاین‌های نسل S6 ذرت را بررسی و گزارش کردند که در بین صفات مختلف، بیش‌ترین میزان تنوع فنوتیپی مربوط به صفات مقاومت به خوابیدگی، مقاومت به بیماری و عملکرد دانه بود.

جدول ۳- آماره‌های توصیفی و ضریب تغییرات صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت تحت شرایط نرمال و کمبود روی (Zn)

Table 3. Descriptive statistics and coefficient of variation of the investigated traits in maize lines under normal and zinc (Zn) deficiency conditions

Trait[a]	Minimum		Maximum		Range		Mean		Standard deviation		Coefficient of variation	
	N[b]	ZD[b]	N	ZD	N	ZD	N	ZD	N	ZD	N	ZD
DTS (day)	3	4	5	5	2	1	3.71	4.5	0.523	0.406	0.14	0.09
DTT (day)	41	49	55.5	56	14.5	7	47.35	53.07	3.506	2.061	0.07	0.03
DTA (day)	49	57	64.5	65	15.5	8	55.85	61.77	3.714	2.205	0.06	0.03
DTE (day)	51	59.5	67.5	68.5	16.5	9	58.35	64.99	3.952	2.364	0.06	0.03
ASI (day)	2	2.5	3.25	3.5	1.25	1	2.5	3.19	0.381	0.289	0.15	0.09
LL (cm)	33.25	33.25	52.75	52.5	19.5	19.25	43.57	43.33	4.025	3.290	0.09	0.07
LW (cm)	6	5.5	8.62	8	2.62	2.5	7.44	7.08	0.541	0.468	0.07	0.06
EULN	4.25	4.25	6.75	6.75	2.5	2.5	5.16	5.61	0.538	0.463	0.10	0.08
TL	9	8.5	13.91	13.83	4.91	5.33	11.35	11.48	0.874	1.044	0.07	0.09
EH (cm)	47.75	38.5	87.5	88.5	39.75	50	70.70	67.84	8.787	9.533	0.12	0.14
PH (cm)	97.5	84.5	162.5	166.16	65	81.66	139.63	136.44	13.424	14.198	0.09	0.10
TAL (cm)	21.25	20.5	34.37	33.75	13.12	13.25	18.18	27.86	3.059	2.688	0.10	0.09
SD (cm)	6.87	6.5	9.12	9.25	2.25	2.75	8.01	7.78	0.469	0.588	0.05	0.07
PL (cm)	9	8.75	23	19.75	14	11	15.58	14.94	2.40	2.809	0.15	0.18
EL (cm)	10	8.5	15.75	15.5	5.75	7	13.39	12.23	1.348	1.289	0.10	0.10
NRC	10	9.5	18	16.5	7.5	7	13.83	13.19	1.376	1.468	0.09	0.11
NKR	9.75	10.5	32	28.5	22.25	18	23.25	19.90	4.627	3.553	0.19	0.17
ED (cm)	4.75	4.87	8	7.37	3.25	2.5	6.43	6.28	0.532	0.486	0.08	0.07
EW (cm)	9.5	10	15.5	14.25	6	4.25	12.67	12.43	0.948	0.953	0.07	0.07
GD (cm)	0.312	0.375	1.37	1	1.06	0.62	0.650	0.58	0.165	0.123	0.25	0.21
CD (cm)	4	3.75	5.93	6.12	1.93	2.37	5.13	5.11	0.409	0.446	0.08	0.08
FEW (g)	183.75	156.25	562.75	480	379	323.75	359.80	321.01	79.15	69.414	0.22	0.21
FCW (g)	56.25	56.25	96.25	92.5	40	36.25	78.86	74.86	7.484	6.471	0.09	0.08
EY (g)	19.8	9.7	129.5	110.18	109.75	100.48	77.85	61.86	26.826	21.366	0.34	0.34
HGW (g)	16.25	17.5	40.75	40	24.5	22.5	29.63	29.64	4.199	4.465	0.14	0.15
NKE	80.25	48.5	406.5	355	326.25	306.5	255.32	203.67	76.523	61.052	0.30	0.30
YUA (g)	2226.1	481.8	56073.6	38842.9	53847.4	38361.1	23188.2	14827.1	12403.	8324. 9	0.53	0.56
BY (g)	612.5	603.5	1004	903.2	391.5	299.70	776.55	748.15	66.054	60.770	0.08	0.08
HI	3.25	1.62	15.40	13.74	12.15	12.11	9.85	8.23	2.933	2.527	0.29	0.30

[a] The traits abbreviations are: DTS, days to seedling; DTT, days to tasseling; DTA, days to anthesis; DTE, days to earing; ASI, anthesis silking interval; LL, leaf length; LW, leaf width; EULN, ear-up leaves number; TL, total leaves; EH, ear height; PH, plant height; TAL, tassel length; SD, stem diameter; PL, peduncle length; EL, ear length; NRC, number of rows per cob; NKR, number of kernel per row; ED, ear diameter; EW, ear width; GD, grain depth; CD, cob diameter; FEW, five ears weight; FCW, five cob weight; EY, economic yield; HGW, 100-grain weight; NKE, number of kernel per ear; YUA, yield per unit area; BY, biological yield; HI, harvest index.

[b] N, normal conditions; ZD, zinc deficiency conditions.

نتایج تجزیه واریانس مرکب دو محیط (نرمال و کمبود روی) طی دو سال زراعی در جدول ۴ ارایه شده است (به‌دلیل حجم بالای نتایج، فقط قسمتی از جدول تجزیه واریانس ارایه شده است). نتایج نشان داد که بین لاین‌های مورد مطالعه در شرایط نرمال و تنش کمبود روی از نظر اغلب صفات مورد مطالعه اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت. مقادیر نسبتاً بالای میانگین مربعات لاین‌ها، بیانگر دامنه وسیع تنوع بین لاین‌های مورد مطالعه از لحاظ صفات مورد بررسی بود که این خود زمینه مناسب برای انجام کارهای به‌نژادی در راستای تحمل به تنش کمبود روی را فراهم می‌کند. کم‌ترین ضرایب تغییرات در هر دو شرایط محیطی نرمال و کمبود روی برای صفات عرض بلال (۵/۱)، تعداد روز تا بلال‌دهی (۵/۴)، تعدا روز تا ظهور گرده (۵/۴)، قطر بلال (۵/۹)، تعداد روز تا تاسل‌دهی (۶/۰۴)، ارتفاع بوته (۶/۱) و قطر چوب بلال (۶/۴) و بیش‌ترین مقدار ضریب تغییرات برای صفات عملکرد در واحد سطح (۳۹/۹)، عمق دانه (۲۷/۵)، وزن دانه در بلال (عملکرد اقتصادی) (۲۳/۱)، شاخص برداشت (۲۰/۵)،

تعداد دانه در بلال (۱۶/۸)، تعداد دانه در ردیف (۱۵/۵) و وزن صد دانه (۱۳/۰۵) به‌دست آمد (جدول ۴). ضریب تغییرات بالا برای عملکرد و اجزای عملکرد، نشان‌دهنده اثر محیطی زیاد بر این صفات می‌باشد. از آنجایی که لاین‌های مورد مطالعه لاین خالص بودند، مقادیر بالای ضریب تغییرات بیانگر وجود تنوع محیطی بالاتر در این قبیل صفات می‌باشد. نتایج همچنین وجود تفاوت آماری معنی‌دار در برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، ژنوتیپ × سال و ژنوتیپ × سال × محیط را نشان داد (جدول ۴). تفاوت آماری معنی‌دار در میانگین مربعات برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بیانگر رفتار بسیار متفاوت ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات مورد بررسی در مواجه با کمبود روی می‌باشد. از تنوع موجود در بین لاین‌های مورد مطالعه می‌توان در زمینه کاهش اثرات کمبود روی بر صفات مورد نظر بهره‌مند شد.

بررسی اثر روی (Zn) بر صفات فیزیولوژیک ذرت نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در تجمع و انتقال عنصر روی بین دو ژنوتیپ ذرت مشاهده نشد، اما یکی از ژنوتیپ‌ها میزان ماده خشک بیش‌تری در مقایسه با دیگری در واحد غلظت عنصر روی در بافت هوایی داشت، که کارآیی بیش‌تر آن ژنوتیپ را در شرایط کمبود فراهمی عنصر روی نشان می‌دهد (Peaslee and Phillips, 1981). در پژوهشی دیگر، محققان اثر عناصر فسفر و روی را بر عملکرد توده زنده و جذب آن‌ها توسط لاین‌های ذرت مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین اثرات فسفر و عنصر روی بر عملکرد ماده خشک، ارتفاع گیاه، قطر ساقه و غلظت فسفر و روی در برگ‌های مجاور بلال بررسی شد. نتایج نشان داد که مصرف عنصر روی موجب کاهش و مصرف فسفر موجب افزایش وزن خشک گیاه شد. قابل ذکر است که در این مطالعه، کود محتوی روی به‌ویژه به شکل محلول‌پاشی موجب افزایش غلظت عنصر روی در برگ‌های مجاور بلال در لاین‌های تحت ارزیابی شد (Bukvic *et al*., 2003). یافته‌های مطالعه دیگری در زمینه اثر غلظت روی و کاربرد آن بر رشد و عملکرد ذرت، نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در طول و قطر بلال و تعداد ردیف دانه ذرت (در سطح احتمال پنج درصد) برای اکثر گروه‌های تیماری در مقایسه با شاهد وجود داشت. طول و قطر بلال تا ۲۰ درصد با کاربرد روی افزایش یافت، در حالی که تعداد ردیف‌ها تا ۱۲ درصد بهبود یافتند (Ahmad Hisham *et al*., 2021).

بررسی همبستگی صفات

ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در دو شرایط نرمال (استفاده از کود سولفات روی) و کمبود روی در شکل ۱ ارایه شده است. نتایج نشان داد که در شرایط نرمال، تعداد روز تا جوانه‌زنی همبستگی مثبت و بسیار بالایی با صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی و تعداد روز تا ظهور گرده داشت. قطر بلال نیز همبستگی مثبتی را با تعداد روز تا جوانه‌زنی (۰/۹) نشان داد، اما همبستگی بین عرض برگ و طول پدانکل با تعداد روز تا جوانه‌زنی پایین بود (به‌ترتیب ۰/۳ و ۰/۲). همچنین تحت شرایط نرمال، همبستگی معنی‌داری بین تعداد روز تا جوانه‌زنی با صفات مدت گرده‌افشانی، تعداد برگ بالای بلال، تعداد کل برگ، ارتفاع بلال اصلی از زمین، قطر ساقه و قطر چوب بلال مشاهده نشد. همچنین در شرایط نرمال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، وزن ۱۰۰ دانه، وزن پنج بلال، وزن دانه در بلال (عملکرد اقتصادی)، عملکرد در واحد سطح، عملکرد زیستی و شاخص برداشت، همبستگی منفی (۰/۵-) با صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا تاسل‌دهی و تعداد روز تا ظهور گرده نشان دادند.

تحت شرایط کمبود روی نیز بسیاری از صفات دارای همبستگی مثبت و بالایی با یکدیگر بودند. از جمله این صفات می‌توان به تعداد روز تا تاسل‌دهی (۰/۹)، تعداد روز تا ظهور گرده (۰/۹) و نیز تعداد روز تا بلال‌دهی (۰/۹) اشاره کرد. تعداد روز تا جوانه‌زنی نیز همبستگی مثبت و بسیار بالایی با صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی و تعداد روز تا ظهور گرده (۰/۹) داشت. در همین شرایط صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، قطر بلال و تعداد دانه در بلال دارای بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۹) بودند، اما طول تاسل با طول برگ همبستگی بسیار پایینی (۰/۴) را نشان داد. تعداد دانه در بلال و عملکرد زیستی نیز با شاخص برداشت همبستگی مثبت و معنی‌داری (۰/۹) در محیط کمبود روی داشتند. شاخص برداشت با عملکرد در واحد سطح، تعداد دانه در بلال، وزن دانه در بلال و عملکرد اقتصادی همبستگی مثبت بالایی (۰/۹) نشان داد. وزن پنج بلال با عملکرد اقتصادی (۰/۹)، تعداد دانه در بلال (۰/۹) و عملکرد زیستی (۰/۷) همبستگی مثبت بالایی نشان داد. طول بلال نیز در محیط کمبود روی دارای همبستگی مثبتی با تعداد دانه در بلال (۰/۶)، وزن دانه در بلال (۰/۶) و عملکرد اقتصادی (۰/۶) بود.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت تحت شرایط نرمال و کمبود روی (Zn) طی دو سال زراعی

Table 4. Combined analysis of variance of the investigated traits in maize lines under normal and zinc (Zn) deficiency conditions in two crop years

Source of variation†	df	Mean square ‡								
		DTS	DTT	DTA	DTE	ASI	LL	LW	EULN	TL
G	99	0.793**	29.955**	33.572**	37.651**	0.340**	52.140**	0.843**	0.933**	3.948**
G×Y	99	0.115	6.529	8.033	10.404	0.177**	16.244**	0.421**	0.531**	1.269**
G×E	99	0.905**	32.933**	36.766**	41.481**	0.431**	32.777**	0.954**	0.803**	2.523**
G×Y×E	99	0.221**	9.407	11.174	12.793	0.225**	17.566**	0.414**	0.366	1.085*
Error	324	0.157	9.258	10.186	11.473	0.117	10.840	0.254	0.316	0.813
CV (%)	-	9.6	6.04	5.4	5.4	12.04	7.5	6.9	10.3	7.8

Table 4. Continued

جدول ۴- ادامه

Source of variation	df	Mean square ‡									
		EH	PH	TAL	SD	PL	EL	NRC	NKR	ED	EW
G	99	321.620**	845.703**	39.836**	1.003**	27.113**	9.489**	7.951**	70.298**	1.317**	4.450**
G×Y	99	68.156**	197.464**	8.936**	0.484**	5.057**	3.972**	5.611**	42.307	0.600**	2.129**
G×E	99	286.906**	543.637**	18.003**	0.858**	20.055**	3.398**	6.246**	51.690	0.545**	2.007**
G×Y×E	99	55.992*	139.267**	10.434**	0.429**	3.761	3.779**	4.030**	36.461	0.480**	1.640**
Error	324	43.787	73.801	6.077	0.286	3.308	0.934	1.441	11.370	0.142	0.425
CV (%)	-	9.4	6.1	8.7	6.7	11.8	7.4	8.8	15.5	5.9	5.1

Table 4. Continued

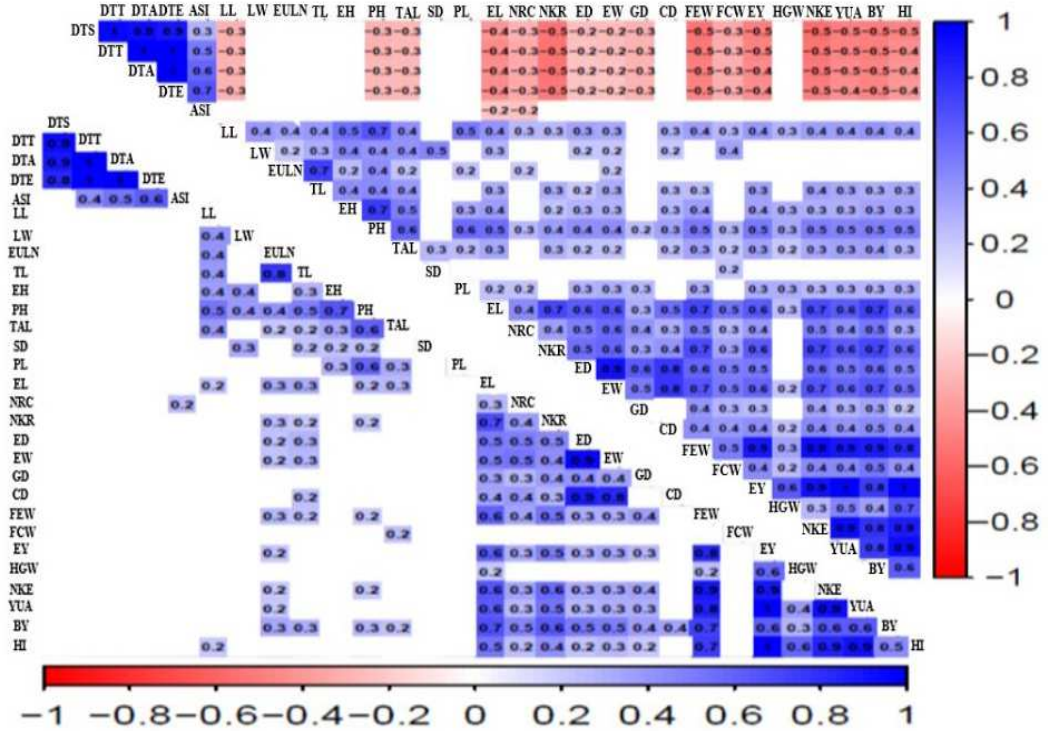
جدول ۴- ادامه

Source of variation	df	Mean square ‡									
		GD	CD	FEW(gr)	FCW(gr)	EY(gr)	HGW(gr)	NKE	YAU(gr)	BY(gr)	HI
G	99	0.098**	0.892**	25448.38**	164.52**	2704.64**	83.85**	24091.30**	502269971**	17115.81**	34.064
G×Y	99	0.085**	0.502**	10675.81**	151.18**	1488.72**	77.81**	8794.78**	264916242**	9047.84**	20.649
G×E	99	0.056**	0.486**	13715.93**	141.81**	1270.78**	46.77**	10290.40**	248974234**	10681.06**	16.705**
G×Y×E	99	0.057**	0.370**	10926.23**	145.07**	1265.98**	48.10**	9276.73**	255101125**	10867.81**	16.556**
Error	324	0.028	0.109	1220.57	61.97	271.45	14.94	1569.36	61770226.30	1778.03	3.557
CV (%)	-	27.5	6.4	10.1	10.2	23.1	13.05	16.8	39.9	5.5	20.5

* and ** Significant at 1% and 5 % probability levels, respectively.

† G, genotype; Y, year; E, environment.

‡ The traits abbreviations are: DTS, days to seedling; DTT, days to taselling; DTA, days to anthesis; DTE, days to earing; ASI, anthesis silking interval; LL, leaf length; LW, leaf width; EULN, ear-up leaves number; TL, total leaves; EH, ear height; PH, plant height; TAL, tassel length; SD, stem diameter; PL, peduncle length; EL, ear length; NRC, number of rows per cob; NKR, number of kernel per row; ED, ear diameter; EW, ear width; GD, grain depth; CD, cob diameter; FEW, five ears weight; FCW, five cob weight; EY, economic yield; HGW, 100-grain weight; NKE, number of kernel per ear; YUA, yield per unit area; BY, biological yield; HI, harvest index.



شکل ۱- ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در لاین های ذرت در شرایط نرمال (بالای قطر) و کمبود روی (Zn) (پایین قطر) در ۲ سال زراعی. بر اساس نقشه حرارتی رنگ های آبی و قرمز به‌ترتیب نشان‌دهنده همبستگی مثبت و منفی است و افزایش شدت رنگ دلالت بر ضرایب بزرگتر دارد. خانه‌های سفید رنگ نشان‌دهنده غیر معنی‌دار بودن ضرایب است.

Figure 1. Correlation coefficients among investigated traits in maize lines under normal (upper panel) and zinc (Zn) deficiency (lower panel) conditions in 2 crop years. Based on heat map plots, blue and red colures indicate positive and negative correlations, respectively, and increasing color intensity reflects a higher coefficient. The white cells indicate non-significant correlations.

در این مطالعه وجود روی کافی در شرایط نرمال باعث بهبود بسیاری از صفات از جمله عملکرد گیاه شد. بر پایه گزارش‌های مختلف، روی سبب افزایش تولید ایندول استیک اسید می‌شود که نتیجه آن افزایش طول ساقه و به‌تبع آن ماده خشک گیاه است. امروزه آشکار شده است که افزایش ماده خشک کل با مصرف عنصر روی می‌تواند به‌علت افزایش غلظت کلروفیل گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفوانول پیروات کربوکسیلاز و ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز و افزایش کارایی جذب عناصر پرمصرف در حضور روی باشد (Rama and Chandra, 2014). آگاهی از همبستگی صفات در کارهای به‌نژادی به‌ویژه در برنامه‌های گزینش بر پایه شماری از صفات ضروری است.

همبستگی بین صفات می‌تواند به‌دلیل وجود اثر پلیوتروپی باشد، که به‌معنی تأثیر یک ژن بر صفات متعدد است و باعث به‌وجود آمدن اثرات فنوتیپی متفاوتی می‌شود. همچنین همبستگی می‌تواند به‌دلیل عدم تعادل پیوستگی اتفاق بیافتد. در واقع ارتباط غیر تصادفی بین آلل‌ها در جایگاه‌های ژنی مختلفی که صفات را تحت تاثیر قرار می‌دهند، می‌تواند موجب همبستگی شود (Falconer and Mackay, 1996). به‌طور کلی، صفاتی که همبستگی بالایی با عملکرد اقتصادی (وزن دانه در بلال) در هر دو شرایط نرمال و کمبود روی داشته باشند، مناسب‌ترین صفات برای انتخاب اولیه لاین‌های متحمل به کمبود روی محسوب می‌شوند. در این تحقیق، صفات وزن پنج بلال (۰/۹)، تعداد دانه در بلال (۰/۹) و وزن ۱۰۰ دانه (۰/۶) در هر دو محیط نرمال و کمبود روی، همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد اقتصادی داشتند و بنابراین می‌توانند به‌عنوان صفات مهم در گزینش اولیه لاین‌های متحمل به کمبود روی در نظر گرفته شوند.

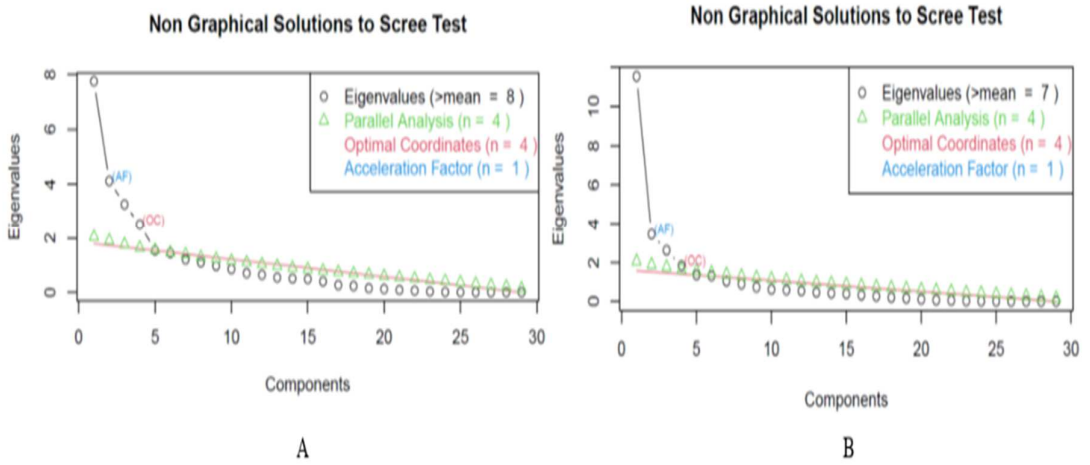
تحلیل عاملی به روش تجزیه و تحلیل موازی

از طریق تجزیه به عامل‌ها می‌توان به تأثیر شرایط محیطی بر اهمیت و گروه‌بندی صفات مختلف پی برد. به‌منظور تعیین عوامل توجیه کننده صفات مورد بررسی و به‌دست آوردن تعداد واقعی عامل‌های پنهانی در هر محیط از روش تجزیه و تحلیل موازی (Parallel Analysis) و معیار ساختار بسیار ساده (VSS=Very Simple Structure) استفاده شد (شکل ۲). تحلیل موازی برخلاف معیار کایزر که بر اساس جامعه می‌باشد، بر اساس نمونه بوده و در تعدیل خطای نمونه‌گیری توانمند است. در تحلیل موازی، مجموعه‌ای از داده‌های تصادفی که حجمی برابر با حجم نمونه تحقیق و نیز تعداد متغیرهایی برابر با متغیرهای مورد مطالعه دارند، شبیه‌سازی و با برگزیدن نقطه‌ای که مقادیر ویژه داده‌های واقعی بزرگ‌تر از مقادیر ویژه داده‌های شبیه‌سازی شده باشد، تعداد دقیق عوامل پنهانی را مشخص می‌کند (Lautenschlager, 1989; Arzhang *et al*., 2021). بر اساس معیار VSS تعداد بهینه عامل‌ها در نقطه رأس نمودار قرار می‌گیرد.

تحلیل عاملی در هر دو شرایط نرمال و تنش کمبود روی، چهار عامل پنهانی شناسایی کرد (شکل ۲)، که این عوامل در مجموع در شرایط نرمال ۶۳ درصد و در شرایط کمبود روی ۵۷ درصد از تنوع ۲۹ صفت مورد بررسی را در ژنوتیپ‌های ذرت توجیه کردند (جدول‌های ۵ و ۶). ضرایب عاملی صفات مورد بررسی پس از چرخش وریماکس در شرایط نرمال نشان داد که عامل اول که ۱۸ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کرد، دارای ضرایب عاملی بزرگ و مثبت برای صفات وزن دانه در بلال، شاخص برداشت، تعداد دانه در بلال، عملکرد در واحد سطح، وزن صد دانه و عملکرد زیستی بود. این عامل، به‌عنوان عامل عملکرد دانه و اجزای وابسته به آن در نظر گرفته شد و همبستگی بالای بین عملکرد دانه و صفات مربوطه را تأیید کرد. عامل دوم با سهم ۱۷ درصد از واریانس کل و با ضرایب عاملی مثبت و بزرگ برای صفات قطر، عرض و طول بلال، تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، عمق دانه و وزن چوب پنج بلال، به‌عنوان عامل اجزای وابسته به عملکرد نام‌گذاری شد. عامل‌های سوم و چهارم نیز به‌ترتیب با توجیه ۱۶ و ۱۲ درصد از واریانس کل، ضرایب بزرگ و مثبت برای اغلب صفات مورد مطالعه داشتند و می‌توان آنها را به‌ترتیب به‌عنوان عامل فنولوژیک و عامل مورفولوژیک از قبیل ارتفاع بوته و طول و عرض برگ در نظر گرفت.

تحت شرایط کمبود روی (جدول ۶) نیز عامل اول با توجیه بیش‌ترین سهم از تنوع بین ژنوتیپ‌های ذرت (۲۱ درصد)، ضرایب عاملی مثبت و بزرگ برای اغلب صفات مورد مطالعه نشان داد و می‌توان آن را به‌عنوان عامل عملکرد و اجزای وابسته به آن نام‌گذاری کرد. عامل دوم با توجیه ۱۴ درصد از واریانس کل، ضرایب مثبت و بزرگ برای صفات فنولوژیک گیاه داشت. عامل‌های سوم و چهارم نیز هر یک ۱۱ درصد از واریانس کل را توجیه کردند و با توجه به صفاتی که در این عامل‌ها دارای ضرایب مثبت و بزرگی بودند، به‌ترتیب می‌توان آنها را به‌عنوان عامل مرتبط با ویژگی‌های بلال و عامل مرتبط با صفات مورفولوژیک (ارتفاع بوته، طول و عرض برگ) در نظر گرفت.

نتایج تحلیل عاملی در رابطه با میزان اشتراک صفات مورد بررسی نشان داد که در شرایط نرمال صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی (۰/۹۹)، تعداد روز تا ظهور گرده (۰/۹۹)، تعداد روز تا بلال‌دهی (۰/۹۹)، وزن دانه در بلال (۰/۹۹)، قطر بلال (۰/۹۶)، شاخص برداشت (۰/۹۴) و عملکرد در واحد سطح (۰/۹۲) میزان اشتراک بالایی را در تجزیه به عامل‌ها نشان دادند. این صفات همبستگی بالایی با دو عامل اول و سوم داشتند و بنابراین می‌توان گفت به‌همین دلیل دارای میزان اشتراک بالایی در تعیین عوامل پنهانی در محیط نرمال بودند. میزان اشتراک که مجموع مربعات بارهای عاملی روی هر صفت می‌باشد، بخشی از واریانس مشترک بین آن صفت با صفات دیگر است که توسط عوامل مشترک توجیه می‌شود و در انتخاب صفات کلیدی تعیین کننده است (Arzhangh *et al*., 2021). مقادیر اشتراک بالای ۰/۸۰ به‌علت اینکه معادل همبستگی بالای ۰/۹۰ بین متغیر استاندارد شده و بخش مشترکی است که این متغیر را توجیه می‌کند. به‌عنوان مقدار بهینه فرض می‌شود. در شرایط کمبود روی صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده، تعداد روز تا بلال‌دهی، قطر بلال، وزن دانه در بلال، عملکرد در واحد سطح، ارتفاع بوته دارای میزان اشتراک بالایی (به‌ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۹، ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۶، ۰/۹۵، ۰/۹۲) بودند. مقادیر بالای اشتراک این صفات نشان‌دهنده سهم زیاد این صفات در توجیه تنوع بین ژنوتیپ‌های ذرت می‌باشد و می‌توان این صفات کلیدی را برای انتخاب لاین‌های برتر پیشنهاد کرد.



شکل ۲- تعداد بهینه عامل‌ها در تحلیل عاملی به روش تحلیل موازی و معیار ساختار بسیار ساده در شرایط کمبود روی (A) و نرمال (B)

Figure 2. Optimal number of factors in factor based parallel analysis method and very simple structure (VSS) under zinc (Zn) deficiency (A) and normal (B) conditions

جدول ۵- ضرایب عاملی صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت بعد از چرخش وریماکس تحت شرایط نرمال طی دو سال

Table 5. Factor loading of the investigated traits after varimax rotation in maize lines under normal conditions in two years

Trait	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communality
Days to seedling	-0.33	-0.15	0.82	-0.02	0.81
Days to taselling	-0.24	-0.16	0.95	-0.05	0.99
Days to anthesis	-0.21	-0.16	0.97	-0.06	0.99
Days to earing	-0.17	-0.15	0.98	-0.08	0.99
Anthesis silking interval	0.13	-0.06	0.57	-0.13	0.36
Leaf length (cm)	0.19	0.20	-0.18	0.65	0.54
Leaf width (cm)	-0.06	0.13	-0.02	0.61	0.39
Ear-up leaves number	0.10	0.08	0.07	0.50	0.27
Total leaves	0.21	0.11	-0.01	0.57	0.39
Ear height (cm)	0.22	0.14	-0.02	0.68	0.53
Plant height (cm)	0.31	0.25	-0.13	0.76	0.75
Tassel length (cm)	0.18	0.10	-0.20	0.59	0.43
Stem diameter (cm)	-0.15	-0.09	-0.03	0.39	0.19
Peduncle length (cm)	0.19	0.18	-0.08	0.39	0.22
Ear length (cm)	0.39	0.58	-0.27	0.29	0.65
Number of rows per cob	0.16	0.51	-0.23	0.14	0.36
Number of kernel per row	0.45	0.50	-0.36	0.06	0.59
Ear diameter (cm)	0.16	0.95	-0.02	0.16	0.96
Ear width (cm)	0.27	0.92	-0.01	0.17	0.95
Grain depth (cm)	0.06	0.50	-0.22	0.02	0.30
Cob diameter (cm)	0.23	0.64	0.12	0.20	0.51
Five ears weight (g)	0.72	0.52	-0.27	0.13	0.87
Five cob weight (g)	0.23	0.44	-0.19	0.21	0.33
Economic yield (g)	0.91	0.32	-0.19	0.19	0.99
1000-grain weight (g)	0.54	0.02	0.06	0.26	0.36
Number of kernel per ear	0.74	0.48	-0.30	0.14	0.89
Yeilg per unit area (g)	0.84	0.37	-0.23	0.16	0.92
Biological yield (g)	0.54	0.54	-0.30	0.22	0.72
Harvest index	0.90	0.26	-0.15	0.19	0.94
Variance (%)	0.18	0.17	0.16	0.12	
Cumulative variance (%)	0.18	0.35	0.51	0.63	

جدول ۶- ضرایب عاملی صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت بعد از چرخش وریماکس تحت شرایط کمبود روی (Zn) طی دو سال

Table 6. Factor loading of the investigated traits after varimax rotation in maize lines under zinc (Zn) deficiency conditions in two years

Trait	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communality
Days to seedling	-0.04	0.84	0.01	0.06	0.705
Days to taselling	0.00	1.00	0.02	0.06	0.99
Days to anthesis	0.02	1.02	0.01	0.06	0.99
Days to earing	0.04	0.99	0.00	0.05	0.990
Anthesis silking interval	0.13	0.43	0.01	0.03	0.202
Leaf length (cm)	0.14	0.00	-0.01	0.61	0.391
Leaf width (cm)	0.05	0.08	0.00	0.46	0.217
Ear-up leaves number	0.21	-0.04	0.17	0.46	0.291
Total leaves	0.13	0.10	0.24	0.55	0.385
Ear height (cm)	0.02	0.04	0.06	0.62	0.393
Plant height (cm)	0.13	-0.04	0.01	0.95	0.927
Tassel length (cm)	0.04	0.09	0.09	0.56	0.332
Stem diameter (cm)	-0.01	0.06	0.00	0.30	0.096
Peduncle length(cm)	0.09	-0.11	0.02	0.46	0.227
Ear length (cm)	0.62	-0.03	0.39	0.22	0.584
Number of rows per cob	0.31	0.00	0.49	-0.08	0.337
Number of kernel per row	0.54	-0.04	0.38	0.14	0.453
Ear diameter (cm)	0.21	-0.02	0.96	0.13	0.980
Ear width (cm)	0.24	0.01	0.91	0.11	0.898
Grain depth (cm)	0.32	-0.18	0.24	0.12	0.206
Cob diameter (cm)	0.06	0.09	0.80	0.08	0.659
Five ears weight (g)	0.86	0.08	0.14	0.10	0.775
Five cob weight (g)	-0.05	-0.01	0.11	0.10	0.025
Economic yield (g)	0.98	0.06	0.06	0.05	0.966
1000-grain weight (g)	0.39	0.01	0.02	0.13	0.170
Number of kernel per ear	0.91	0.11	0.13	0.06	0.866
Yeilg per unit area (g)	0.98	0.06	0.06	0.01	0.958
Biological yield (g)	0.63	0.05	0.43	0.20	0.624
Harvest index	0.92	0.08	-0.01	0.04	0.847
Variance (%)	0.21	0.14	0.11	0.11	-
Cumulative variance (%)	0.21	0.35	0.46	0.57	-

رمضانی و همکاران (Ramazani *et al*., 2008) با انجام تحلیل عاملی بر اساس ۳۳ صفت موفولوژیک و فنولوژیک هیبریدهای ذرت، چهار عامل مستقل که در کل ۹۸/۰۳ درصد از تنوع داده‌ها را توجیه کردند، استخراج و دو عامل اصلی را ویژگی‌های فنولوژیک و عملکرد نام‌گذاری کردند. ارژنگ و همکاران (Arzhangh *et al*., 2021) نیز با ارزیابی ۸۶ لاین ذرت در شرایط نرمال و تنش شوری و استفاده از تحلیل عاملی، ۲۸ صفت مورد بررسی را در چهار عامل پنهانی گروه‌بندی کردند. این عوامل در مجموع در شرایط نرمال ۶۰ درصد و در شرایط تنش شوری ۶۵ درصد از واریانس کل بین لاین‌های ذرت را توجیه کردند و در هر دو شرایط نرمال و تنش شوری، عامل اول به‌عنوان عامل عملکرد و اجزای وابسته به آن نامگذاری شد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، تنوع بین لاین‌های ذرت در دو سال پیاپی بر اساس از صفات مورفولوژی با استفاده از آماره‌های توصیفی، تجزیه واریانس مرکب، ضرایب همبستگی و تحلیل عاملی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تفاوت بسیار معنی‌داری بین لاین‌های ذرت از نظر بیش‌تر صفات ارزیابی شده تحت شرایط نرمال و کمبود روی طی دو سال زراعی وجود داشت. این تفاوت معنی‌دار نشان‌دهنده تنوع فنوتیپی بالا بین لاین‌های مورد بررسی می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب نیز وجود تنوع فنوتیپی بالا در بین لاین‌های ذرت را مورد تایید قرار داد. همچنین، تجزیه واریانس مرکب نشان داد که برای تمامی صفات مورد مطالعه، برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (به‌جز تعداد دانه در ردیف)، برهم‌کنش ژنوتیپ ×

سال (به‌جز تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده، تعداد روز تا بلال‌دهی و شاخص برداشت) و برهم‌کنش ژنوتیپ × سال × محیط (به‌جز تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده، تعداد روز تا بلال‌دهی، تعداد برگ بالای بلال، طول پدانکل و تعداد دانه در ردیف) بسیار معنی‌دار بود. بنابراین می‌توان گفت تنش کمبود روی باعث رفتار متفاوت لاین‌ها در هر محیط و هر سال شده و تفاوت معنی‌داری را در بیش‌تر صفات مورد مطالعه ایجاد کرده است. نتایج آماره‌های توصیفی صفات مورد مطالعه تحت هر دو شرایط محیطی نیز نشان داد که تنوع قابل توجهی در میان لاین‌ها وجود داشت و بالاترین میزان تنوع فنوتیپی در هر دو محیط نرمال و کمبود روی مربوط به صفات عملکرد در واحد سطح (به‌ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۵۳)، عملکرد اقتصادی (به‌ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۳۴)، تعداد دانه در بلال (به‌ترتیب ۰/۳۰ و ۰/۳۰) و شاخص برداشت (به‌ترتیب ۰/۳۰ و ۰/۲۹) بود.

برآورد ضرایب همبستگی بین صفات نیز بیانگر ارتباط قوی بین اغلب صفات در هر دو شرایط کمبود روی و نرمال بود، به‌ویژه برای صفات مورفولوژی که بین بیش‌تر آنها همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت، به‌طوری که صفات وزن پنج بلال، تعداد دانه در بلال و وزن ۱۰۰ دانه در هر دو محیط نرمال و کمبود روی، همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد اقتصادی نشان دادند. بنابراین می‌توان این صفات را صفاتی مهم در گزینش اولیه لاین‌های متحمل به کمبود روی در نظر گرفت. نتایج تحلیل عاملی نیز نشان داد که در شرایط نرمال، چهار عامل پنهانی ۶۳ درصد از تنوع کل لاین‌ها را توجیه کردند. در این شرایط، صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی (۰/۹۹)، تعداد روز تا ظهور گرده (۰/۹۹)، تعداد روز تا بلال‌دهی (۰/۹۹)، وزن دانه در بلال (۰/۹۹)، قطر بلال (۰/۹۶)، شاخص برداشت (۰/۹۴) و عملکرد در واحد سطح (۰/۹۲)، میزان اشتراک بالایی را در تجزیه به عامل‌ها نشان دادند. تحت شرایط کمبود روی نیز تعداد چهار عامل پنهانی شناسایی شد که ۵۷ درصد از تنوع کل لاین‌ها را توجیه کردند. بررسی میزان اشتراک صفات مورد بررسی تحت شرایط کمبود روی نیز نشان داد که صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا ظهور گرده، تعداد روز تا بلال‌دهی، قطر بلال، وزن دانه در بلال، عملکرد در واحد سطح و ارتفاع بوته دارای میزان اشتراک بالایی (به‌ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۹، ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۶، ۰/۹۵ و ۰/۹۲) بودند. مقادیر بالای اشتراک این صفات نشان‌دهنده سهم زیاد این صفات در توجیه تنوع بین لاین‌های ذرت می‌باشد و می‌توان این صفات کلیدی را برای انتخاب لاین‌های برتر پیشنهاد کرد. بنابراین، بر اساس ضرایب عاملی لاین‌ها در تجزیه به عامل‌ها، این امکان فراهم خواهد شد که لاین‌های مطلوب از لحاظ شاخص‌های گزینشی مورد نظر (صفات با میزان اشتراک بالا) انتخاب شوند. به‌طور کلی، تنوع ژنتیکی وسیعی میان لاین‌های ذرت مورد مطالعه از لحاظ صفات آگرو- مورفولوژیک تحت هر دو شرایط نرمال و کمبود روی وجود داشت و بنابراین امکان استفاده از این لاین‌ها را در برنامه‌های به‌نژادی به‌عنوان یک منبع ژنی ارزشمند در جهت بهبود عملکرد و تولید ژنوتیپ‌های اصلاح شده در شرایط نرمال و کمبود روی فراهم می‌کند.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زابل برای حمایت مالی در انجام این پروژه با شماره UOZ-۱۵۸-۳۰۱۴-GR- تشکر و قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Ahmad Hisham, A.R., Ch'ng, H.Y., Rahman, M.M., Mat, K. and Zulhisyam, A.K. 2021. Effects of zinc on the growth and yield of maize (*Zea mays* L.) cultivated in a tropical acid soil using different application techniques. *Earth and Environmental Science,* 756, 01205. http://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012056.

Arzhangh, S., Darvishzadeh, R. and Alipour, H. 2021. Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) under normal and salinity stress conditions. *Cereal Research*, 11(3), pp. 268-243. [In Persian]. http://doi.org/10.22124/CR.2022.21075.1699.

Aziz, M.A., Ahmad, H.R., Corwin, D.L., Sabir, M., Hakeem, K.R. and Ozturk, M. 2017. Influence of farmyard manure on retention and availability of nickel, zinc and lead in metal-contaminated calcareous loam soils. *Journal of Enviromental Engineering and Landscap Management*, 25(3), pp. 289–296. https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1254639.

Bukvic, V. and Bartlett, W. 2003. Financial barriers to SME growth in Slovenia. *Economic and Business Review for Central and South-Eastern Europe*, 5(3), pp. 161-181.

Cakmak, I. and Kutman, U.B. 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. *EuropeanJournal of Soil Science,* 69(1), pp. 172-180. https://doi.org/10.1111/ejss.12437.

Cooper, J. C. B. 1983. Factor analysis. An overview. *The Amerian Statistician,* 37(2), pp. 141-147. https://doi.org/10.2307/2685875.

Falconer, D.S. and Mackay, T.F.C. 1996. Introduction to Quantitative Genetics. 4th Edition. Addison Wesley Longman, Harlow.

Genc, Y., Verbyla, A.P., Torun, A., Cakmak, I., Willsmore, K., Wallwork, H. and McDonald, G.K. 2009. Quantitative trait loci analysis of zinc efficiency and grain zinc concentration in wheat using whole genome average interval mapping. *Journal of Plant and Soil*, 314, pp. 49-66. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9704-3.

Harada, K., Huan, N.V. and Ueno, H. 2009. Classification of maize landraces from Shikoku and Kyushu, Japan, based on phenotypic characteristics. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 43(3), pp. 213-220. https://doi.org/10.6090/jarq.43.213.

Hanway, J.J. 1986. How a corn plant develops. Special Report 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperation and Extension Service, Ames, Iowa.

Hong, W. and Ji-Yun, Jin. 2007. Effects of zinc deficiency and drought on plant growth and metabolism of reactive oxygen species in maize (*Zea mays* L). *Agricultural Sciences in China*, 6(8), pp. 988-995. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(07)60138-2.

Hodge, A. 2006. Plastic plants and patchy soils. *Journal of Experimental Botany*, 57(2), pp. 401-411. https://doi.org/10.1093/jxb/eri280.

Khodarahmpour, Z. 2012. Morphological classification of maize (*Zea mays* L.) genotypes in heat stress condition. *Journal of Agricultural Science,* 4(5), pp. 31-40. https://doi.org/10.5539/jas.v4n5p31.

Lautenschlager, G.J. 1989. A comparison of alternatives to conducting Monte Carlo analysis for determining parallel analysis criteria. *Multivariate Behavioral Research*, 24(3), pp. 365-395. 10.1207/s15327906mbr2403_6.

Malakouti, M.J. 2003. The role of zink in plant growth and enhancing animal and human health. Regional Expert Consultion on Plant, Animal and Human Nutrition. Interaction and Impact. Damascus, Syria Damascus, Syria.

Mohammadi, S.A. and Prasanna, B.M. 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants-salient statistical tools and considerations. *Crop Science*, 43(4), pp. 1235-1248. https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235.

Montoya, M., Guardia, G., Recio, J., Castellano-Hinojosa, A., Ginés, C., Bedmar, E.J., Alvarez, J.M. and Vallejo, A. 2021. Zinc-nitrogen co-fertilization influences N_2O emissions and microbial communities in an irrigated maize field. *Geoderma,* 383, 114735. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114735.

Nikolić, D., Rakonjac, V., Milatović, D. and Fotirić, M. 2010. Multivariate analysis of vineyard peach [*Prunus persica* (L.) Batsch.] germplasm collection. *Euphytica,* 171(2), pp. 227-234. https://doi.org/10.1007/s10681-009-0032-3.

Peaslee, D.E. and Phillips, R.E. 1981. Phosphorus dissolution-desorption in relation to bioavailability and environmental pollution. *Chemistry in the Soil Environment,* 40, pp. 241-259. https://doi.org/10.2134/asaspecpub40.c13.

Reddy, M.P., Sarla, N. and Siddiq, E.A. 2002. Inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism and its application in plant breeding. *Euphytica,* 128(1), pp. 9-17. https://doi.org/10.1023/A:1020691618797.

Rehman, R., Asif, M., Cakmak, I. and Ozturk, L. 2021. Differences in uptake and translocation of foliar-applied Zn in maize and wheat. *Plant and Soil*, 462(12), pp. 235-244. https://doi.org/10.1007/s11104-021-04867-3.

Revelle., W. 2016. R package 'psych'. Ver. 1.6.4. Procedures for personality and psychological research. Northwestern University, Evanston, Illinois, USA.

Sadeghi, F. and Rahimi, M. 2017. The use of cluster analysis for best lines selection in maize at S6 generation. *Journal of Crop Breeding*, 8(20), pp. 91-98. [In Persian].

Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. M.S., Hussain, H.A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K. and Zhang, S. 2021. Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morphophysiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, 11(1), pp. 3195-3210. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7.

Suganya, A., Saravanan, A., Baskar, M., Pandiyarajan, P. and Kavimani, R. 2021. Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with zinc by using of graded levels of zinc in combination with zinc solubilizing bacteria and *Arbuscular mycorrhizal* fungi. *Journal of Plant Nutrition,* 44(7), pp. 988-994. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845383.

Welsh, J.R. 1981. Fundamentals of plant genetics and breeding. John Wiley and Sons ،Inc

Wei, T. and Simko, V. 2021. R package 'corrplot'. Ver. 0.92. Visualization of a correlation matrix.

Yu, B.G., Chen, X.X., Cao, W.Q., Liu, Y.M. and Zou, C.Q. 2020. Responses in zinc uptake of different mycorrhizal and non-mycorrhizal crops to varied levels of phosphorus and zinc applications. *Frontiers in Plant Science,* 11, 606472. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.606472.

Zhang, L., Yan, M., Ren, Y., Chen, Y. and Zhang, S. 2021. Zinc regulates the hydraulic response of maize root under water stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry,* 159, pp. 123-134. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.12.014.