

Original article

Evaluation of maize (*Zea mays* L.) lines response to zinc deficiency using stress tolerance indices

Maryam Harati Rad¹, Nafiseh Mahdinezhad^{2*}, Reza Darvishzadeh^{3*}, Baratali Fakhri⁴, Mitra Jabari⁵, Sorour Arzhang⁶

1. PhD student of Plant Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran
2. Associated Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Western Azerbaijan, Iran
4. Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran
5. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, University of Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran
6. Ph.D., Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Western Azerbaijan, Iran

Received 26 April 2024; Revised 18 July 2024; Accepted 25 July 2024

Extended abstract

Introduction

Maize, like other plants, faces various environmental constraints during its growth period, such as the lack of nutrients. In calcareous soils, zinc deficiency reduces growth and yields. One of the important methods for improving tolerance to environmental stresses is the study of plant genotypes under stress conditions. In order to distinguish genotypes tolerant to stressful conditions, several tolerance indices are used. Genotypes are divided into 4 groups based on their reactions to normal and stressful environmental conditions. Group A includes genotypes that show good performance in both stress and normal conditions. Group B includes genotypes that show good performance only in stress-free environment. Group C includes genotypes that show good performance only in stressful environment and group D includes genotypes that show low performance in both stress and normal conditions. This experiment was carried out with the aim of evaluating the tolerance of maize genotypes to zinc deficiency by using stress tolerance indices.

Materials and methods

Ninety-three maize genotypes were evaluated morphologically under optimal and zinc deficiency conditions using alpha lattice design with two replications in field conditions at Zabol Agriculture and Natural Resources Research Center, during 2 successive crop years (2020 and 2021). Based on the grain yield of maize genotypes under optimal and zinc deficiency conditions, 10 stress tolerance indices including tolerance index (TOL), mean productivity index (MP), geometric mean productivity index (GMP), stress tolerance index (STI), abiotic tolerance index (ATI), stress sensitivity index (SSI), drought stress resistance index (DI), harmonic mean (HM), modified stress tolerance index (MPSTI), and modified stress tolerance index in moderate and severe stress (MSSTI) were calculated. Pearson's and partial correlations between indices were calculated using corrplot package in R and SPSS version 26 softwares. A three-dimensional diagram was drawn to identify genotypes tolerant to zinc deficiency with high yield in both normal and zinc deficiency conditions using Statistica version 10 software, in which

* Corresponding authors: Nafiseh Mahdinezhad; E-Mail: nmahdinezhad@uoz.ac.ir
Reza Darvishzadeh; E-Mail: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

the grain yield under stress conditions was considered on the X axis, grain yield in optimal conditions was considered on the Y axis and one of the selected indices was considered on the Z axis. Principal components analysis and hierarchical clustering using Ward's method on standardized data were done using the factoextra and Cluster packages in R software, respectively.

Results and discussion

Based on the results of analysis of variance, statistically significant difference was observed among the studied maize genotypes in terms of grain yield under optimal and zinc deficiency conditions, as well as all calculated stress tolerance indices. The t-test showed statistically significant difference between the average seed yield of the genotypes in optimal (77.85 g pl⁻¹) and zinc deficiency conditions (61.86 g pl⁻¹). Grain yield in optimal conditions showed a positive and significant correlation with all indices except DI index. The highest correlation was related to MP, MpSTI, GMP, STI, ATI and HM indices. Grain yield under zinc deficiency conditions showed a negative and significant correlation with SSI (-0.45), TOL (-0.41) and ATI (-0.28) indices. Other indices showed a positive and significant correlation with grain yield under zinc deficiency conditions. The positive and significant correlation of GMP, MP, STI and HM indices with grain yield in both optimal and zinc deficiency conditions indicates that these indices are the best and most appropriate indices to identify and select maize genotypes tolerant to deficiency stress. Principal component analysis showed that the first two components explained about 95.42% of total variations. Cluster analysis classified maize genotypes into 5 groups comprising 27, 9, 23, 17 and 17 genotypes per each group, respectively. The genotypes classified in group 4, 2 and 1 were identified as highly tolerant (stable), tolerant and sensitive to Zn deficiency stress, respectively.

Conclusion

High genetic diversity was obtained between the studied genotypes in terms of grain yield and stress tolerance indices. Using the three-dimensional diagram, the genotypes tolerant to zinc deficiency with high yield in both optimal and zinc deficiency conditions were separated from each other. Also, the use of multivariate analyses was not only able to differentiate high-performance genotypes in both optimal and stress conditions, but also distinguished stable genotypes in stress conditions from unstable genotypes. So, Ma004, Ma027, Ma028, Ma038, Ma045, Ma083, Ma091, Ma105, Ma115 genotypes can be introduced as tolerant to zinc deficiency with stable performance for use in breeding programs.

Keywords: Abiotic stress, Hierarchical clustering, Micronutrients, Tropical cereal, Yield

ارزیابی واکنش لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.) به کمبود روی با استفاده از شاخص‌های تحمل تنش

مریم هراتی راد^۱، نفیسه مهدی نژاد^{۲*}، رضا درویش‌زاده^۳، براتعلی فاخری^۴، میترا جباری^۵، سرور ارزنگ^۶

۱. دانشجوی دکتری، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، سیستان و بلوچستان، ایران
۲. دانشیار، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، سیستان و بلوچستان، ایران
۳. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران
۴. استاد، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، سیستان و بلوچستان، ایران
۵. استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه سراوان، سیستان و بلوچستان، ایران
۶. دانشجوی سابق دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی:	این مطالعه به منظور ارزیابی تحمل به کمبود روی ژنوتیپ‌های ذرت و انتخاب مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی انجام شد. در این آزمایش ۹۳ ژنوتیپ ذرت در قالب طرح آلفا لاتیس در شرایط تنش غیر زیستی
تنش غیر زیستی	بهبود و کمبود روی با دو تکرار در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زابل در ۲ سال زراعی مورد مطالعه قرار گرفتند. بر اساس عملکرد دانه ژنوتیپ‌های ذرت در شرایط بهینه و کمبود روی، ده شاخص گزینش برای تحمل به
خوشه‌بندی سلسله مراتبی	کمبود روی شامل شاخص تحمل (TOL)، شاخص میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، شاخص تحمل به تنش (STI)، شاخص تحمل غیرزیستی (ATI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)،
ریز مغذی‌ها	شاخص مقاومت به تنش خشکی (DI)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط
عملکرد	نرمال (MPSTI)، شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش (MSSTI) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که
غلات گرمسیری	تنوع ژنتیکی گسترده‌ای در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از لحاظ عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل وجود دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷	شاخص‌های MP، GMP، STI و HM بالاترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد دانه در هر دو
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸	شرایط بهینه و کمبود روی نشان دادند. بر اساس نمودار سه‌بعدی ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی با عملکرد بالا
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴	در هر دو شرایط بهینه و کمبود روی تفکیک شدند. بر اساس نتایج، ژنوتیپ‌های Ma004، Ma027، Ma028،
تاریخ انتشار:	Ma038، Ma045، Ma083، Ma091، Ma105، Ma115 به عنوان ژنوتیپ‌های ذرت متحمل به کمبود روی که
زمستان ۱۴۰۴	فقط در شرایط کمبود روی عملکرد بالایی دارند جهت استفاده در برنامه‌های به‌نژادی در راستای بهبود و تحمل به
۱۸(۴): ۵۴۷-۵۶۴	کمبود روی معرفی می‌شوند.

مقدمه

تنش‌ها از جمله عواملی هستند که باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌شوند که در این رابطه مقابله با تنش‌ها و یا کاهش اثرات آن‌ها در جهت افزایش عملکرد محصولات می‌تواند به عنوان یک راهکار مفید در نظر گرفته شود (Golparvar et al., 2003). عناصر کم‌مصرف برای رشد و نمو گیاهان ضروری بوده و نقش حیاتی در سلامتی انسان‌ها و حیوانات دارند (Blasco et al., 2018; White and Pongrac, 2017). چهار عنصر روی، آهن، مس و منگنز با توجه به اینکه برای تمامی موجودات زنده ضروری هستند، نسبت به سایر عناصر از نقش اساسی برخوردار هستند (Blasco et al., 2018). بین تنش‌های مربوط به کمبود مواد معدنی، کمبود روی یکی از گسترده‌ترین عوامل محدودکننده برای تولید محصولات کشاورزی است که تولید غذا در جهان (Alloway, 2008) و در نهایت سلامت بشر را تهدید می‌کند

تنش‌ها از جمله عواملی هستند که باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌شوند که در این رابطه مقابله با تنش‌ها و یا کاهش اثرات آن‌ها در جهت افزایش عملکرد محصولات می‌تواند به عنوان یک راهکار مفید در نظر گرفته شود (Golparvar et al., 2003). عناصر کم‌مصرف برای رشد و نمو گیاهان ضروری بوده و نقش حیاتی در سلامتی انسان‌ها و حیوانات دارند (Blasco et al., 2018; White and Pongrac, 2017). چهار عنصر روی، آهن، مس و منگنز با توجه به اینکه برای تمامی موجودات زنده ضروری هستند، نسبت به سایر عناصر از نقش اساسی برخوردار هستند (Blasco et al., 2018). بین تنش‌های مربوط به کمبود مواد معدنی، کمبود روی یکی از گسترده‌ترین عوامل محدودکننده برای تولید محصولات کشاورزی است که تولید غذا در جهان (Alloway, 2008) و در نهایت سلامت بشر را تهدید می‌کند

شاخص حساسیت به تنش^۱ (SSI) بر اساس کاهش عملکرد نسبی یک ژنوتیپ تحت شرایط تنش محاسبه و نشان می‌دهد، ژنوتیپ‌های با مقادیر SSI کمتر از یک، حساسیت کمتری به تنش داشته و یا به عبارتی دارای عملکرد پایدار در شرایط تنش هستند (Fischer and Maurer, 1978). شاخص تحمل^۲ (TOL) که تفاوت عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط نرمال نسبت به شرایط تنش را نشان می‌دهد؛ مقدار بالای TOL حساسیت ژنوتیپ به تنش را نشان داده و انتخاب ژنوتیپ بر اساس مقدار کم آن است (Rosielle and Hamblin, 1981). در ادامه شاخص میانگین بهره‌وری^۳ (MP) به صورت میانگین عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط نرمال و تنش معرفی شد (Rosielle and Hamblin, 1981).

پس از آن شاخص تحمل به تنش^۴ (STI) معرفی شد که می‌تواند ژنوتیپ‌هایی را که در هر دو شرایط نرمال و تنش، عملکرد بالایی دارند شناسایی نماید (Fernandez, 1992). مقادیر بالای STI نشان می‌دهد که ژنوتیپ دارای پتانسیل عملکرد بالا و متحمل به تنش است (Geravandi et al., 2010). در ادامه شاخص GMP^۵ معرفی شد؛ که این شاخص حساسیت کمتری نسبت به شدت‌های مختلف تنش دارد. شدت تنش ممکن است در محیط مزرعه در طی سال‌های مختلف متفاوت باشد. شاخص GMP در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در هر دو شرایط نرمال و تنش، بهتر از شاخص MP عمل می‌کند. به همین دلیل GMP در مقایسه با MP در تفکیک ژنوتیپ‌های گروه A از قدرت بالاتری برخوردار است. شاخص مقاومت به خشکی^۶ (DI) نیز یکی دیگر از شاخص‌های مورد استفاده است؛ که برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط نرمال و تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lan, 1998). در ادامه برای بهبود کارایی شاخص STI، با اضافه نمودن ضرایب تصحیح به عنوان وزنه به این شاخص، شاخص‌های تغییر یافته تحمل به تنش برای انتخاب بهینه در شرایط نرمال^۷ (MPSTI) و تنش^۸ (MSSTI) معرفی شدند. شاخص تحمل به تنش غیر زیستی^۹ (ATI) برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی که تحمل نسبی به تنش خشکی داشتند و کارایی بیشتری نسبت به شاخص‌های SSI و TOL دارد،

(Hotz and Brown, 2004). تحقیقات نشان داده است که تقریباً نصف خاک‌های زیر کشت غلات در دنیا و به‌ویژه خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک گریبان‌گیر کمبود روی هستند (Cakmak et al., 2002)؛ بنابراین به دلیل کمبود این عنصر در خاک‌های زراعی، توجه به نقش عناصر کم‌مصرف از جمله روی در غلات را طی دهه گذشته افزایش داده است (Sadeghzadeh, 2015). غلظت پایین روی در خاک‌های زراعی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل کمبود روی در گیاهان به حساب می‌آید. همچنین قابلیت دسترسی روی خاک برای گیاهان به عوامل زیستی و غیرزیستی مانند گونه گیاهی، اقلیم منطقه، غلظت روی قابل جذب کل، pH خاک، دما، مقدار کربنات کلسیم خاک، مواد آلی خاک، بافت خاک، فعالیت میکروبی، شوری، غرقابی و برهمکنش روی با دیگر عناصر همچون آهن، مس، منگنز، فسفر و منیزیم بستگی دارد (Cakmak and Kutman, 2018; Pandey et al., 2012; Ullah et al., 2019).

ذرت (*Zea mays* L.) با دارا بودن ارزش غذایی بالا، سومین محصول مهم بعد از گندم و برنج، دارای مسیر فتوسنتزی چهار کربنه (C4) بوده، تحقیقات نشان داده است که کمبود عنصر روی بر میزان سرعت فتوسنتز گیاهان ۴ کربنه مانند ذرت در مقایسه با گیاهان ۳ کربنه تأثیر بیشتری دارد (Marschner, 1995). یکی از روش‌های مهم برای بهبود عملکرد و تحمل تنش‌های محیطی، مطالعه ژنوتیپ‌های گیاهی در شرایط تنش است. به منظور تمایز ژنوتیپ‌های متحمل به تنش در شرایط مختلف از چندین شاخص تحمل استفاده می‌شود. ژنوتیپ‌ها بر اساس واکنش به شرایط محیطی نرمال و تنش، در ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. گروه A: شامل ژنوتیپ‌هایی که عملکرد خوبی در هر دو شرایط تنش و نرمال دارند. گروه B: ژنوتیپ‌هایی که فقط در محیط بدون تنش، عملکرد خوبی دارند. گروه C: ژنوتیپ‌هایی که فقط در محیط تنش، عملکرد خوبی نشان می‌دهند و گروه D: ژنوتیپ‌های که در هر دو شرایط تنش و نرمال عملکرد پایین نشان می‌دهند (Fernandez, 1992).

7. Modified stress tolerance index in normal conditions

8. Modified stress tolerance index in stress conditions

9. Abiotic tolerance index

1. Stress susceptibility index

2. Tolerance

3. Mean productivity

4. Stress tolerance index

5. Geometric mean productivity

6. Drought index

استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش و انتخاب مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ۹۳ ژنوتیپ ذرت در دو شرایط بهینه (استفاده از کود سولفات روی) و کمبود روی (عدم استفاده کود) در قالب طرح آلفا لاتیس 10×10 با دو تکرار، در دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زابل، به طول جغرافیایی 61° درجه و $41'$ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 30° درجه و $54'$ دقیقه شمالی با ارتفاع ۴۸۱ متر از سطح دریا انجام شد. ژنوتیپ‌های موردبررسی از دانشگاه رازی کرمانشاه، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. تعدادی از ژنوتیپ‌ها از تیپ رشدی متوسط‌رس (فائو ۵۰۰ و ۶۰۰) و بقیه از تیپ رشدی دیررس (فائو ۷۰۰) بودند. از تیپ رشدی زودرس (فائو ۲۰۰) وجود نداشت. قبل از اقدام به کاشت، نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از ۵ نقطه زمین تهیه و نمونه خاک مرکب حاصل از این نقاط مورد آزمایش تجزیه خاک قرار گرفت (جدول ۱).

معرفی شد (Moosavi et al., 2008). میانگین هارمونیک^۱ (HM) نیز یکی از شاخص‌هایی است که در ارزیابی تحمل به تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Farshadfar, 2000). مطالعات ارزیابی شاخص‌های استفاده‌شده در ذرت در شرایط تنش گرمایی نشان داده که شاخص‌های STI، SSI، GMP و MP مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل ذرت بودند (Kandel et al., 2019). مطالعه‌ی دیگر صورت گرفته بر روی ذرت در شرایط تنش خشکی نشان می‌دهد که شاخص‌های MP، GMP، STI، HM، MRP، MSSTI، MPSTI، REL و YI مناسب‌ترین شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل می‌باشند (Shahrokhi et al., 2020). نتایج حاصل از تحقیق دیگری بر روی ذرت در شرایط تنش خشکی، بیانگر این است که هیچ‌کدام از شاخص‌های مورد ارزیابی STI، MP، GMP، ATI، RDI و SSPI همبستگی بالا با عملکرد دانه ذرت در هر دو شرایط نرمال و تنش ندارند (Bonea, 2020). مطالعات متعدد و زیادی درباره ارزیابی شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش‌ها در گیاهان مختلف انجام‌شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در برنج به‌منظور ارزیابی تحمل به خشکی در مرحله رویشی و زایشی، شاخص‌های STI و GMP به‌عنوان بهترین شاخص بوده و مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها بر اساس این شاخص‌ها انتخاب شدند (Erfani et al., 2013). این آزمایش با هدف ارزیابی تحمل به کمبود روی ژنوتیپ‌های ذرت با

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1. Physical and chemical characteristics of farm soil

عمق الکتریکی	هدایت	ارزش خنثی -	نیتروژن کل	فسفر قابل	پتاسیم قابل	کربن	بافت خاک	رو
EC	pH	TNV	Total Nitrogen	Available P	Available K	OC	Soil texture	Zn
ds m ⁻¹		%		ppm		%		ppm
1.85	8.03	20.4	0/05	26	220	0.54	Loam	0.67

OC: Organic carbon; K: Potassium; P: Phosphorus; TNV: Total neutralizing value; pH: Potential of hydrogen; EC: Electrical conductivity; ds/m: Decisiemens per metre.

روز انجام گرفت. ادامه روند آبیاری بر اساس شرایط آب‌وهوایی منطقه در مراحل رشد گیاه انجام گرفت. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش تجزیه خاک، مقدار عنصر روی در حد کم بود (کمبود روی) و مصرف کود روی در این تحقیق به‌منظور رفع کمبود روی (ایجاد محیط بهینه) صورت گرفت. با توجه به حساس بودن گیاه ذرت نسبت به کمبود روی و اثرات

از اول مردادماه هر سال (بر اساس تقویم زراعی منطقه)، ردیف‌های کاشت به فواصل ۷۵ سانتی‌متر توسط فاروئر ایجاد و کشت به‌صورت دستی و بر روی هر پشته با فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. اندازه کرت در هر تکرار $2/7$ متر در نظر گرفته شد. با توجه به اقلیم منطقه (گرم و خشک)، جهت استقرار مناسب بوته‌ها، آبیاری اول و دوم با فاصله ۳

¹Harmonic index

سانتی‌گراد برای رسیدن به رطوبت ۱۴ درصد خشک شدند. میانگین عملکرد دانه در پنج بوته تصادفی (عملکرد اقتصادی) بر اساس داده‌های دو سال زراعی برحسب گرم در بوته محاسبه شد. بر اساس عملکرد دانه در شرایط بهینه (YP) و عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود روی (YS)، شاخص‌های گزینش برای تحمل به کمبود روی برای هر ژنوتیپ ذرت بر اساس فرمول‌های ارائه‌شده در **جدول شماره ۲** محاسبه شد (Pour-Aboughadareh et al., 2019).

مخرب روی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی این گیاه، برای ایجاد شرایط بهینه در آزمایش (استفاده از کود سولفات روی) از روش تقسیم‌بندی هانوی (Hanway, 1982) استفاده شد. بدین‌صورت که پیش از آغاز مرحله زایشی در مرحله ۴، ۶ و ۱۰ برگ (قبل از گل‌دهی)، اعمال تیمار عنصر روی به‌صورت کود سولفات روی (۳۵ کیلوگرم در هکتار) در ساعات اولیه روز همراه با آب آبیاری به زمین انجام گرفت. به‌منظور برآورد عملکرد دانه، بلال‌ها در زمان رسیدگی فیزیولوژیک برداشت و در جریان هوای گرم به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۴۰ درجه

جدول ۲. شاخص‌های تحمل مورد استفاده برای شناسایی لاین‌های ذرت متحمل به کمبود روی

Table 2. Tolerance indices used to identify maize lines tolerant to zinc deficiency

شاخص تحمل Tolerance index	فرمول شاخص Index formula	مقدار مطلوب Optimum value	منبع Reference
شاخص حساسیت به تنش Stress susceptibility index (SSI)	$SSI = \frac{I - (Y_s / Y_p)}{I - (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)}$	کمتر Less	Fischer and Maurer (1978)
شاخص تحمل Tolerance (TOL)	$Tol = Y_p - Y_s$	کمتر Less	Rosielle and Hamblin (1981)
شاخص تحمل به تنش Stress tolerance index (STI)	$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$	بیشتر More	Fernandez (1992)
شاخص تحمل غیرزیستی Abiotic tolerance index (ATI)	$ATI = \frac{(Y_p - Y_s)}{(\bar{Y}_p / \bar{Y}_s)} \times GMP$	کمتر Less	Moosavi et al. (2008)
شاخص میانگین بهره‌وری Mean productivity (MP)	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	بیشتر More	Rosielle and Hamblin (1981)
شاخص میانگین هندسی بهره‌وری Geometric mean productivity (GMP)	$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s}$	بیشتر More	Fernandez (1992)
شاخص مقاومت به تنش خشکی Drought resistance index (DI)	$DI = \frac{Y_s \times (Y_s / Y_p)}{\bar{Y}_s}$	بیشتر More	Lan, (1998)
شاخص میانگین هارمونیک Harmonic mean (HM)	$HM = \frac{2 \times (Y_p \times Y_s)}{(Y_p + Y_s)}$	بیشتر More	Bidinger et al., (1987)
شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط نرمال Modified stress tolerance index in optimum irrigation (MpSTI)	$MpSTI = \frac{(Y_p)^2}{(\bar{Y}_p)^2} \times STI$	بیشتر More	Farshadfar and Sutka (2002)
شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش Modified stress tolerance index in moderate and severe stress (MsSTI)	$MsSTI = \frac{(Y_s)^2}{(\bar{Y}_s)^2} \times STI$	بیشتر More	Farshadfar and Sutka (2002)

Y_s و Y_p به ترتیب عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش در یک ژنوتیپ مشخص است. $\bar{Y}_s$ و $\bar{Y}_p$ به ترتیب میانگین عملکرد دانه در تمام ژنوتیپ‌ها در شرایط بهینه و تنش است.

Y_s and Y_p are stress and optimal (potential) yield of a given genotype, respectively. $\bar{Y}_s$ and $\bar{Y}_p$ are average yield of all genotypes under stress and optimal conditions, respectively.

بررسی و اشتباه معیار (SE) برای هر میانگین محاسبه گردید. همبستگی پیرسون با استفاده از بسته corrplot در نرم‌افزار R و همبستگی‌های جزئی بین شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ محاسبه شد. نمودار سه‌بعدی جهت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی با عملکرد بالا

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R انجام گرفت. تجزیه واریانس عملکرد دانه در شرایط بهینه و در شرایط تنش کمبود روی به همراه شاخص‌های گزینش در قالب طرح آلفا لاتیس انجام گرفت. اختلاف عملکرد هر ژنوتیپ در دو شرایط بهینه و کمبود روی با آزمون تی‌تست ولچ (Welch's t-test)

در هر دو شرایط نرمال و کمبود روی با استفاده از نرم‌افزار Statistica نسخه ۱۰ رسم گردید که در آن عملکرد دانه در شرایط کمبود روی بر روی محور X، عملکرد دانه در شرایط بهینه بر روی محور Y و یکی از شاخص‌های منتخب بر روی محور Z نشان داده شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از بسته factextra و خوشه‌بندی سلسله مراتبی به روش وارد (Ward's method) بر روی داده‌های استاندارد شده با استفاده از بسته Cluster در نرم‌افزار R و مقایسات میانگین شاخص‌ها بر اساس روش دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل تنش
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، بین ژنوتیپ‌های ذرت مورد مطالعه از نظر عملکرد دانه در شرایط بهینه و کمبود روی و همچنین تمامی شاخص‌های تحمل اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد وجود داشت (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل تنش در ژنوتیپ‌های ذرت

Table 3. Analysis of variance for grain yield and tolerance indices in maize genotypes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	Mean square			میانگین مربعات		
		Yp	Ys	TOL	MP	GMP	STI
ژنوتیپ Genotype	99	2211.22**	1673.80**	2924.39**	1211.41**	1242.34**	0.44**
تکرار Replication	1	2650.57*	308.51 ^{ns}	1150.51 ^{ns}	1191.91**	1327.77**	0.515**
بلوک داخل تکرار Block (Replication)	18	560.33 ^{ns}	126.37 ^{ns}	628.58 ^{ns}	186.20 ^{ns}	165.54 ^{ns}	0.071 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Experimental error	81	593.94	185.96	750.35	202.36	174.19	0.07
منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	Mean square			میانگین مربعات		
		ATI	SSI	DI	HM	MpSTI	MsSTI
ژنوتیپ Genotype	99	13441533**	12.18**	1.23**	1314.93**	4.17**	5.02**
تکرار Replication	1	4613778 ^{ns}	12.81**	0.194 ^{ns}	1390.74**	3.51 ^{ns}	4.51*
بلوک داخل تکرار Block (Replication)	18	3511628 ^{ns}	3.94 ^{ns}	0.27 ^{ns}	158.30 ^{ns}	1.18 ^{ns}	0.58 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Experimental error	81	4106194	3.55	0.31	167.79	1.26	0.87

ns, *, **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

YP: عملکرد دانه در شرایط نرمال، YS: عملکرد دانه در شرایط تنش، SSI: شاخص حساسیت به تنش، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، ATI: شاخص تحمل غیرزیستی، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین هندسی بهره‌وری، DI: شاخص مقاومت به تنش خشکی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، MpSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط نرمال، MsSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش.

ns, *, **: Non-significant, significant at 5%, 1%.

YP: Optimal (potential) yield of a given genotype, YS: Stress yield of a given genotype, SSI: Stress susceptibility index, TOL: Tolerance, STI: Stress tolerance index, ATI: Abiotic tolerance index, MP: Mean productivity, GMP: Geometric mean productivity, DI: Drought resistance index, HM: Harmonic mean, MpSTI: Modified stress tolerance index in optimum irrigation, MsSTI: Modified stress tolerance index in moderate and severe stress.

کمبود روی بوده و بر این مسئله تأکید دارد که امکان گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی بر اساس شاخص‌های

تفاوت‌های معنی‌دار مشاهده شده، نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی زیاد بین ژنوتیپ‌ها و واکنش متفاوت این ژنوتیپ‌ها به

گزینه‌هاست (Blum, 1988; Fernandez, 1992). در این راستا بهترین شاخص، شاخصی است که همبستگی بالایی با عملکرد دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش داشته باشد. چنین شاخصی می‌تواند ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بهینه و مشابهی در هر دو شرایط نرمال و تنش دارند را از دیگر ژنوتیپ‌ها جدا نماید. ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل و عملکرد در شرایط بهینه و کمبود روی در شکل ۱ ارائه شده است.

نتایج حاصل (شکل ۱) نشان داد که عملکرد دانه در شرایط بهینه همبستگی مثبت و معنی‌داری با تمامی شاخص‌ها به جز شاخص DI داشت. بیشترین میزان این همبستگی مربوط به شاخص‌های MP, MpSTI, GMP, STI, ATI و HM به ترتیب با ۰/۸۷، ۰/۸۳، ۰/۸۱، ۰/۷۸، ۰/۷۶ و ۰/۷۴ بود، که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند. عملکرد در شرایط کمبود روی، همبستگی منفی و معنی‌دار با شاخص‌های $SSI(-0/45)$ ، $TOL(-0/41)$ و $ATI(-0/28)$ نشان داد. سایر شاخص‌ها همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در شرایط کمبود روی داشتند که بیشترین آن‌ها مربوط به شاخص‌های HM ، $MsSTI$ ، GMP ، STI ، DI و MP به ترتیب با مقدار ۰/۸۸، ۰/۸۶، ۰/۸۴، ۰/۸۳، ۰/۸۲ و ۰/۷۸ بود، که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند. همبستگی مثبت و معنی‌دار شاخص‌های GMP ، MP ، STI و HM با عملکرد دانه در هر دو شرایط بهینه و کمبود روی، نشان‌دهنده‌ی این است که این شاخص‌ها بهترین و مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های ذرت متحمل به کمبود روی در پژوهش حاضر هستند.

نتایج تحقیق گزینش ژنوتیپ‌های ذرت بر اساس شاخص‌های تحمل در محیط شور نشان داده است که شاخص‌های GMP ، MP ، STI و HM با عملکرد دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش همبستگی مثبت و معنی‌دار دارند (Arzhang et al., 2023) که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. همچنین نتایج این تحقیق با تحقیقات انجام‌شده در جو (Feizi et al., 2020)، گندم (Mehraban, et al., 2018)، آفتابگردان (Darvishzadeh et al., 2010)، لوبیا (Beigzadeh and Rashidi, 2016) و برنج (Safaei-Chaeikar et al., 2008) مطابقت دارد.

موردبررسی وجود دارد. جدول شماره ۴ عملکرد دانه در شرایط بهینه و کمبود روی به همراه نتایج آزمون تی ولج (Welch's t-test) در ژنوتیپ‌های ذرت مورد مطالعه را نشان می‌دهد؛ در بیشتر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بین عملکرد در دو محیط بر اساس آزمون تی ولج اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت. درحالی‌که ژنوتیپ‌های Ma003, Ma005, Ma006, Ma009, Ma011, Ma012, Ma014, Ma015, Ma019, Ma020, Ma022, Ma026, Ma028, Ma032, Ma043, Ma048, Ma052, Ma053, Ma055, Ma060, Ma064, Ma075, Ma085, Ma091, Ma107, Ma108, Ma110, Ma116, Ma122, Ma123 از این امر مستثنا بودند. دامنه تغییرات عملکرد دانه در شرایط بهینه از ۱۹/۵ تا ۱۲۹/۵۶ و در شرایط کمبود روی از ۹/۷ تا ۱۱۰/۱۹ گرم در بوته بود. در شرایط کمبود روی بیشترین میزان عملکرد در ژنوتیپ‌های Ma072, Ma123, Ma104, Ma030, Ma111, Ma114, Ma107, Ma064, Ma055, Ma017 و کمترین میزان عملکرد در ژنوتیپ‌های Ma100, Ma065, Ma073, Ma043, Ma113, Ma037, Ma023, Ma039, Ma051, Ma121 مشاهده شد. در شرایط بهینه بیشترین میزان عملکرد در ژنوتیپ‌های Ma114, Ma035, Ma111, Ma031, Ma104, Ma096, Ma118, Ma033, Ma049, Ma076 و کمترین میزان عملکرد در ژنوتیپ‌های Ma043, Ma100, Ma119, Ma113, Ma115, Ma066, Ma106, Ma085, Ma048, Ma039 (جدول ۴).

جهت گزینش و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل لازم است عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها هم‌زمان در هر دو شرایط بهینه و کمبود روی مورد توجه قرار گیرد (Fernandez, 1992). در این مورد شاخص‌های تحمل معیار مناسبی برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به تنش هستند (Mitra, 2001). در این مطالعه تعداد ۱۰ شاخص تحمل تنش جهت شناسایی، گزینش و غربال ژنوتیپ‌های ذرت متحمل به کمبود روی با استفاده از عملکرد دانه در شرایط بهینه و کمبود روی محاسبه و بر اساس مقدار مطلوب مرتبط با هر شاخص (جدول ۲)، ژنوتیپ‌ها رتبه‌بندی شدند (جدول تکمیلی ۱).

همبستگی شاخص‌ها

با توجه به اینکه شاخص‌های مورد مطالعه نتایج متفاوتی در رابطه با غربالگری و گزینش ژنوتیپ‌های متحمل نشان می‌دهند (جدول تکمیلی ۱)، طبق نظر بلوم و فرناندز، بهتر است ابتدا بهترین شاخص معرفی و گزینش بر اساس آن انجام گیرد. در این رابطه استفاده از تجزیه همبستگی یکی از

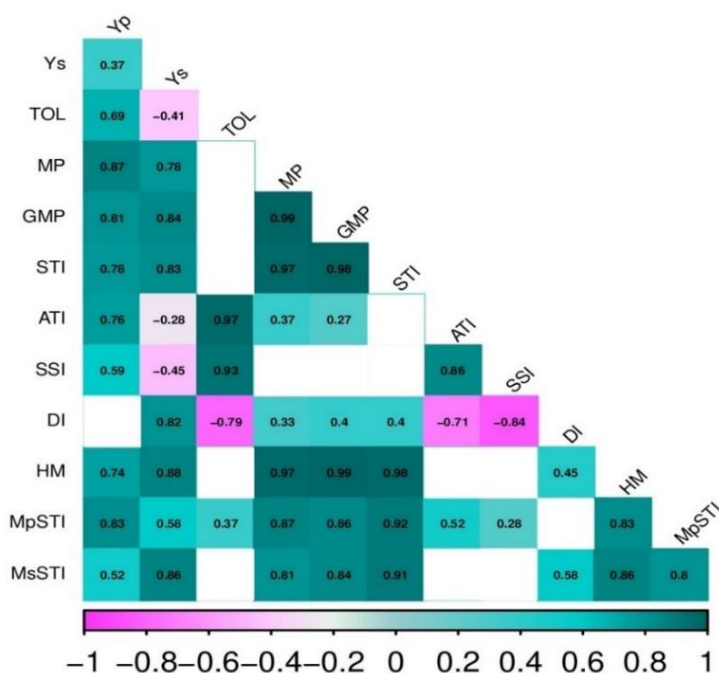
جدول ۴. عملکرد دانه در شرایط بهینه و کمبود روی به همراه نتایج آزمون تی ولج در ژنوتیپ‌های ذرت

Table 4. Grain yield under normal and zinc deficiency conditions with the results of Welch's t-test in maize genotypes

عملکرد دانه در شرایط نرمال			آزمون تی ولج Welch's t-test	عملکرد دانه در شرایط تنش			آزمون تی ولج Welch's t-test
ژنوتیپ	(انحراف معیار) Yp & (SE)	(انحراف معیار) Ys & (SE)		ژنوتیپ	(انحراف معیار) Yp & (SE)	(انحراف معیار) Ys & (SE)	
Genotype	gr pl ⁻¹	gr pl ⁻¹		Genotype	gr pl ⁻¹	gr pl ⁻¹	
Ma001	69.8 (4.2)	47.4 (1.0)	5.1**	Ma051	51.1 (1.0)	34.4 (1.0)	11.2**
Ma002	77.7 (0.5)	63.2 (4.2)	3.4**	Ma052	46.5 (5.7)	46.1 (1.3)	0.0 ^{ns}
Ma003	74.4 (5.4)	67.0 (1.2)	1.3 ^{ns}	Ma053	81.2 (5.9)	71.3 (3.3)	1.4 ^{ns}
Ma004	53.1 (4.3)	77.9 (1.2)	5.4**	Ma054	96.1 (5.2)	81.3 (5.5)	1.9*
Ma005	54.5 (1.5)	55.3 (1.4)	0.4 ^{ns}	Ma055	86.2 (0.8)	92.1 (3.8)	1.5 ^{ns}
Ma006	74.9 (4.3)	73.3 (3.6)	0.2 ^{ns}	Ma057	89.9 (6.6)	38.2 (1.9)	7.4**
Ma007	74.6 (2.6)	49.9 (2.1)	7.1**	Ma060	49.5 (1.6)	60.1 (6.1)	1.4 ^{ns}
Ma008	81.4 (1.1)	46.0 (2.8)	11.4**	Ma062	84 (8.2)	56.5 (6.8)	2.5**
Ma009	48.8 (4.6)	39.6 (3.6)	1.5 ^{ns}	Ma064	103.4 (4.4)	96.9 (3.2)	1.1 ^{ns}
Ma010	79.6 (6.0)	63.3 (3.7)	2.2*	Ma065	51.2 (1.6)	21.7 (0.7)	16.5**
Ma011	52.3 (7.0)	61.4 (1.5)	1.2 ^{ns}	Ma066	33.9 (3.3)	43.5 (2.8)	2.1*
Ma012	80.8 (5.4)	70.0 (5.7)	1.3 ^{ns}	Ma072	88.6 (7.2)	110.1 (6.4)	2.2*
Ma013	74.9 (9.2)	50.6 (6.1)	2.1*	Ma073	98.1 (7.1)	23.6 (0.7)	10.3**
Ma014	46.6 (5.7)	50.9 (5.5)	0.5 ^{ns}	Ma074	86.8 (3.0)	39.3 (1.0)	13.0**
Ma015	93.8 (4.4)	91.0 (0.9)	0.6 ^{ns}	Ma075	67 (2.7)	68.9 (1.1)	0.6 ^{ns}
Ma016	45.8 (2.5)	53.1 (1.2)	2.5**	Ma076	114.7 (3.1)	67.6 (1.4)	13.6**
Ma017	107.3 (3.9)	91.3 (3.1)	3.1**	Ma077	106.6 (2.1)	56.3 (5.0)	9.2**
Ma018	95.5 (4.7)	69.2 (3.2)	4.5**	Ma079	109.3 (2.9)	56.3 (6.3)	7.5**
Ma019	70.2 (2.4)	67.1 (1.3)	1.0 ^{ns}	Ma080	99.9 (3.1)	58.5 (5.7)	6.3**
Ma020	55.2 (5.8)	58.0 (0.7)	0.4 ^{ns}	Ma083	57.9 (6.4)	75.2 (6.0)	1.9*
Ma021	104.4 (1.4)	61.6 (2.3)	15.7**	Ma085	36.8 (2.6)	46.1 (6.1)	1.3 ^{ns}
Ma022	97.2 (5.1)	76.8 (8.6)	1.7 ^{ns}	Ma089	111.7 (5.7)	36.7 (1.1)	12.7**
Ma023	88.2 (5.6)	28.3 (0.5)	10.5**	Ma091	60.1 (2.0)	68.6 (5.0)	1.5 ^{ns}
Ma024	77.2 (2.8)	63.4 (2.8)	3.4**	Ma096	120.8 (7.7)	75.5 (2.2)	5.6**
Ma025	102.3 (3.8)	55.2 (2.4)	10.2**	Ma098	100.3 (2.8)	83.5 (2.8)	4.1**
Ma026	63.5 (5.6)	60.0 (0.9)	0.5 ^{ns}	Ma100	23.7 (0.5)	9.7 (0.5)	18.4**
Ma027	48.3 (2.7)	72.9 (1.5)	7.7**	Ma104	121.0 (4.8)	105.1 (3.8)	2.5**
Ma028	51.7 (7.7)	67.3 (4.3)	1.7 ^{ns}	Ma105	55.4 (8.5)	85.3 (7.6)	2.6**
Ma030	73.8 (1.6)	103.7 (5.4)	5.2**	Ma106	35.8 (4.1)	52.9 (6.5)	2.1*
Ma031	121.9 (2.9)	58.9 (1.9)	18.0**	Ma107	91.2 (1.2)	97.7 (5.7)	1.0 ^{ns}
Ma032	72.7 (1.6)	73 (5.2)	0.05 ^{ns}	Ma108	79 (3.7)	82.1 (2.4)	0.6 ^{ns}
Ma033	119 (7.6)	45.1 (2.1)	9.3**	Ma109	49.6 (2.6)	58.8 (2.3)	2.5**
Ma034	107.9 (5.7)	63.6 (1.5)	7.4**	Ma110	55.6 (5.0)	48.1 (4.1)	1.1 ^{ns}
Ma035	127.3 (10.0)	80.5 (2.2)	4.5**	Ma111	124.8 (6.5)	102.2 (2.5)	3.2**
Ma036	73.76 (6.6)	40.5 (4.0)	4.3**	Ma112	81.2 (2.7)	38.6 (1.8)	12.8**
Ma037	105 (5.5)	26.8 (2.0)	13.1**	Ma113	33.3 (3.4)	26.1 (1.2)	1.9*
Ma038	54.9 (4.2)	82.3 (3.2)	4.5**	Ma114	129.5 (9.9)	98.2 (4.3)	2.8**
Ma039	43.9 (2.5)	34.1 (2.7)	2.5**	Ma115	33.6 (2.3)	69.3 (3.4)	8.4**
Ma040	80.3 (7.8)	58.1 (3.2)	2.6**	Ma116	64.6 (6.9)	51.1 (1.7)	1.8 ^{ns}
Ma042	81.1 (5.8)	61.7 (6.3)	2.0*	Ma117	76.7 (2.6)	44.8 (4.6)	5.9**
Ma043	19.8 (2.7)	26.0 (1.4)	1.8 ^{ns}	Ma118	119.2 (7.5)	48.0 (2.5)	8.9**
Ma044	97 (4.7)	60.1 (7.9)	3.9**	Ma119	32.7 (2.4)	43.3 (3.7)	2.3*
Ma045	63.2 (3.6)	78.3 (1.2)	3.8**	Ma120	89.2 (1.3)	73 (4.0)	3.7**
Ma046	66.9 (7.0)	48.3 (2.6)	2.4**	Ma121	108.7 (2.5)	35.8 (2.7)	19.3**
Ma048	39.7 (1.9)	41.2 (1.0)	0.6 ^{ns}	Ma122	63.9 (2.3)	56.6 (5.9)	1.1 ^{ns}
Ma049	115.5 (4.3)	83.3 (9.6)	3.0**	Ma123	81.8 (7.8)	105.3 (9.8)	1.8 ^{ns}
Ma050	98.3 (4.4)	58.1 (5.0)	6.0**				

اعداد داخل پرانتز، نشان‌دهنده اشتباه معیار عملکرد (SE) است.

The numbers in parentheses indicate the yield standard error (SE)



شکل ۱. ضرایب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل کمبود روی در ژنوتیپ‌های ذرت. بر اساس نقشه حرارتی، رنگ‌های سبز و صورتی به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب همبستگی مثبت و منفی هستند، به‌طوری‌که افزایش شدت رنگ دلالت بر ضرایب بزرگ‌تر دارد. جعبه‌های سفید نشان‌دهنده ضرایب غیر معنی‌دار هستند. همبستگی‌های بین اعداد ۰/۲ تا ۰/۲۶ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار هستند. همبستگی‌های بین اعداد ۰/۲۷ تا ۰/۳۲ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار هستند. همبستگی‌های بین اعداد ۰/۳۳ تا ۱ در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار هستند. همبستگی‌های کمتر از ۰/۲ یعنی همبستگی‌هایی که بین صفر تا ۰/۱۹ هستند، غیر معنی‌دار می‌باشند و در شکل به صورت مربع سفید و بدون عدد ارائه شده‌اند.

YP: عملکرد دانه در شرایط نرمال، YS: عملکرد دانه در شرایط تنش، SSI: شاخص حساسیت به تنش، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، ATI: شاخص تحمل غیرزیستی، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین هندسی بهره‌وری، DI: شاخص مقاومت به تنش خشکی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، MpSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط نرمال، MsSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش.

Fig. 1. Pearson correlation coefficients between grain yield and Zinc deficiency tolerance indices in maize lines. Based on the heatmap, green and pink colors indicate positive and negative correlation coefficients, respectively, so that increasing color intensity means larger coefficients. White boxes indicate non-significant coefficients. The correlations between 0.2-0.26 are significant at the 5% probability level ($P\text{-value} > 0.05$). The correlations between 0.27-0.32 are significant at the 1% probability level ($P\text{-value} > 0.01$). The correlations between 0.33-1 are significant at the probability level of 0.1% ($P\text{-value} > 0.001$). Correlations less than 0.2, i.e. correlations between 0- 0.19, are non-significant.

YP: Optimal (potential) yield of a given genotype, YS: Stress yield of a given genotype, SSI: Stress susceptibility index, TOL: Tolerance, STI: Stress tolerance index, ATI: Abiotic tolerance index, MP: Mean productivity, GMP: Geometric mean productivity, DI: Drought resistance index, HM: Harmonic mean, MpSTI: Modified stress tolerance index in optimum irrigation, MsSTI: Modified stress tolerance index in moderate and severe stress.

شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، به دلیل ضریب همبستگی مثبت و بالا در هر دو شرایط بهینه و تنش توانست ژنوتیپ‌های متعلق به گروه A را به‌خوبی از سایر ژنوتیپ‌ها متمایز کند؛ بنابراین در پژوهش حاضر از شاخص GMP برای رسم نمودار سه‌بعدی (شکل ۲) استفاده شد. در بررسی نمودار سه‌بعدی عملکرد دانه در شرایط نرمال و کمبود روی با شاخص GMP مشاهده می‌شود که لاین‌های Ma015, Ma017, Ma022, Ma030, Ma035, Ma049, Ma054, Ma055, Ma064, Ma072, Ma096, Ma098, (Ma104, Ma107, Ma111, Ma114, Ma123 قرار گرفته؛ دارای عملکرد بالایی در هر دو شرایط نرمال و تنش هستند (شکل ۲). لاین‌های قرار گرفته در گروه B (Ma021, Ma023, Ma025, Ma031, Ma033, Ma034, Ma037, Ma044, Ma045, Ma050, Ma073, Ma076, Ma077, Ma079, Ma080, Ma089, Ma118, Ma121)، لاین‌های هستند که دارای عملکرد بالایی فقط در شرایط بهینه هستند. لاین‌های گروه C (Ma004, Ma027, Ma028, Ma038, Ma083, Ma091, Ma105, Ma115)، ژنوتیپ‌های هستند که فقط تحت شرایط تنش

شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، به دلیل ضریب همبستگی مثبت و بالا در هر دو شرایط بهینه و تنش توانست ژنوتیپ‌های متعلق به گروه A را به‌خوبی از سایر ژنوتیپ‌ها متمایز کند؛ بنابراین در پژوهش حاضر از شاخص GMP برای رسم نمودار سه‌بعدی (شکل ۲) استفاده شد. در بررسی نمودار سه‌بعدی عملکرد دانه در شرایط نرمال و کمبود روی با شاخص GMP مشاهده می‌شود که لاین‌های Ma015, Ma017, Ma022, Ma030, Ma035, Ma049, Ma054, Ma055, Ma064, Ma072, Ma096, Ma098, (Ma104, Ma107, Ma111, Ma114, Ma123 قرار گرفته؛ دارای عملکرد بالایی در هر دو شرایط نرمال و تنش هستند (شکل ۲). لاین‌های قرار گرفته در گروه B (Ma021, Ma023, Ma025, Ma031, Ma033, Ma034, Ma037, Ma044, Ma045, Ma050, Ma073, Ma076, Ma077, Ma079, Ma080, Ma089, Ma118, Ma121)، لاین‌های هستند که دارای عملکرد بالایی فقط در شرایط بهینه هستند. لاین‌های گروه C (Ma004, Ma027, Ma028, Ma038, Ma083, Ma091, Ma105, Ma115)، ژنوتیپ‌های هستند که فقط تحت شرایط تنش

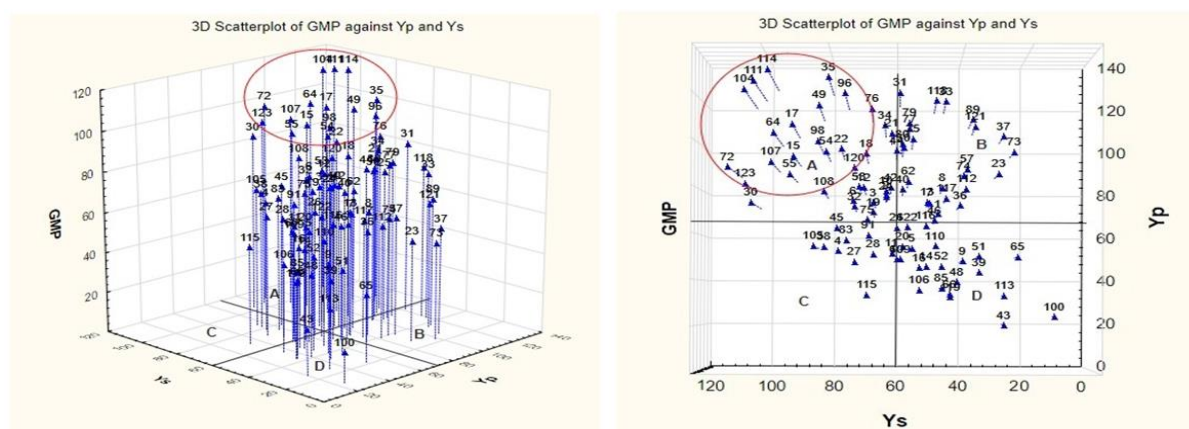
این مؤلفه را می‌توان مؤلفه تحمل یا حساسیت به کمبود روی نامید که توانایی تمایز ژنوتیپ‌های پایدار از سایر ژنوتیپ‌ها را دارد؛ بنابراین ژنوتیپ‌های که کمترین مقدار مؤلفه اول و بیشترین مقدار مؤلفه دوم را داشته باشند، برای هر دو شرایط بهینه و کمبود روی مطلوب خواهند بود. نمودار بای‌پلات بر اساس این دو مؤلفه رسم شد (شکل ۳).

بر اساس نتایج بای‌پلات، لاین‌های Ma104، Ma111 و Ma114 که در ناحیه سمت راست بای‌پلات قرار گرفتند، مطابق با ویژگی مؤلفه اول در زمره لاین‌های برتر متحمل به تنش هستند. این لاین‌ها مقدار بالایی برای شاخص‌های MP، GMP، STI، HM، MPSTI و MSSTI (جدول ۱) داشتند و بنابراین در زمره ۱۰ لاین برتر متحمل به تنش قرار گرفته و از عملکرد بالای دانه در هر دو شرایط بهینه و تنش برخوردار بودند. لاین‌های Ma037، Ma89، Ma073، M023، M023 و Ma118 که در قسمت پایین نمودار قرار گرفته‌اند، مطابق با ویژگی مؤلفه دوم جز ژنوتیپ‌های حساس طبقه‌بندی شدند. در تحقیقاتی که بر روی گندم (Kamrani et al., 2018; Molla Heydari Bafghi et al., 2017; Etmian et al., 2019) و برنج (Kazerani et al., 2019) انجام شد، با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و نمودار بای‌پلات، صفت عملکرد در شرایط بهینه و تنش و شاخص‌های تحمل به تنش در دو مؤلفه اصلی گروه‌بندی شده و شاخص‌های تحمل با بار مثبت در مؤلفه اول طبقه‌بندی شدند که در این راستا ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط بهینه و تنش و متحمل به تنش شناسایی شدند.

عملکرد بالا نشان داده و ژنوتیپ‌های قرار گرفته در گروه D در هیچ کدام از شرایط محیطی عملکرد بالایی نداشتند (شکل ۲). نمودار سه‌بعدی جهت تفکیک ژنوتیپ‌های برتر توسط تعدادی از محققین از جمله در ذرت (Arzhang et al., 2023) به منظور ارزیابی تحمل به شوری و در گندم به منظور ارزیابی تحمل به خشکی (Mehraban et al., 2018; Lestari et al., 2019) استفاده شده است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر ماتریس همبستگی نشان داد که مقادیر ویژه دو مؤلفه اول بیشتر از یک است و در مجموع ۹۵/۴۱ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه می‌نمایند (جدول ۵). مؤلفه اول با توجیه ۵۹/۴۲ درصد از تغییرات داده‌ها، همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در هر دو شرایط بهینه و تنش نشان داد. این مؤلفه همچنین با شاخص‌های GMP، MP، STI، HM، MPSTI و MSSTI همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول ۶)؛ بنابراین مؤلفه اول به عنوان مؤلفه پتانسیل عملکرد در هر دو شرایط بهینه و تنش نام‌گذاری شد که می‌تواند ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط بهینه و تنش را از سایر ژنوتیپ‌ها جدا نماید. مؤلفه دوم با توجیه ۳۵/۹۹ درصد از تغییرات، دارای همبستگی مثبت با عملکرد دانه در شرایط کمبود روی و شاخص‌های GMP، STI، DI، HM و MSSTI و نیز همبستگی منفی با عملکرد دانه در شرایط بهینه و شاخص‌های TOL، MP، ATI، SSI و MPSTI بود؛ بنابراین



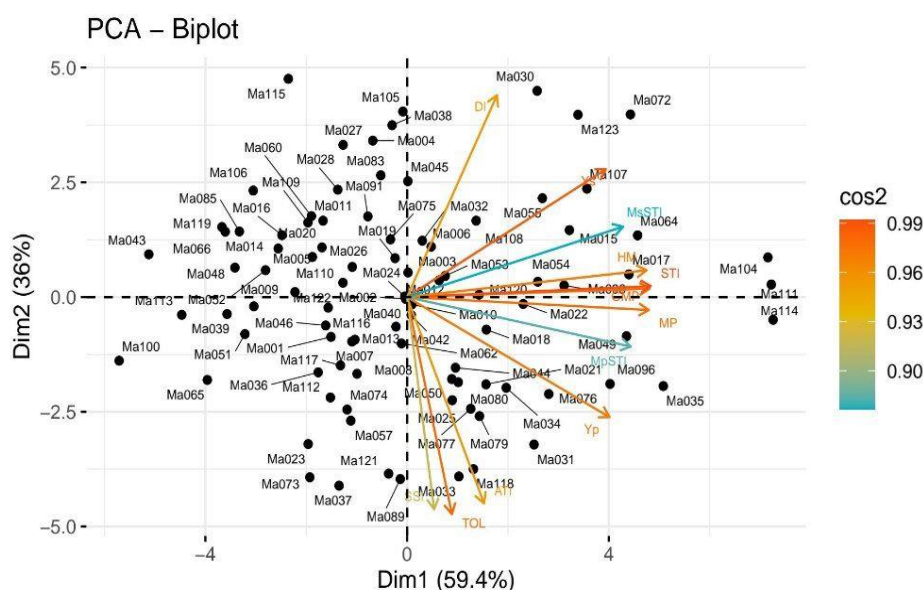
شکل ۲. نمودار سه‌بعدی پراکنش ژنوتیپ‌های ذرت برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی بر اساس عملکرد دانه در شرایط نرمال (Yp)، عملکرد دانه در شرایط کمبود روی (Ys) و شاخص شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)

Fig. 2. 3D distribution diagram of maize lines for selecting genotypes tolerant to zinc deficiency based on grain yield in normal (Yp), grain yield in zinc deficiency conditions (Ys), and GMP (Geometric mean productivity)

جدول ۵. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی روی مقادیر شاخص‌های تحمل تنش و عملکرد دانه ژنوتیپ‌های ذرت در شرایط بهینه و کمبود روی

Table 5. The results of principal component analysis on stress tolerance indices and grain yield of maize genotypes under normal and zinc deficiency conditions

Index name	نام شاخص	مؤلفه‌های اصلی	
		مؤلفه اول PCA1	مؤلفه دوم PCA2
Yp (Potential yield)	عملکرد دانه در شرایط نرمال	0.826	- 0.538
Ys (Stress yield)	عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود روی	0.811	0.573
TOL (Tolerance index)	شاخص تحمل	0.183	- 0.973
MP (Mean productivity)	میانگین بهره‌وری	0.986	- 0.058
GMP (Geometric mean productivity)	میانگین هندسی بهره‌وری	0.989	0.037
STI (Stress tolerance index)	شاخص تحمل به تنش	0.994	0.049
ATI (Abiotic tolerance index)	شاخص تحمل غیر زیستی	0.314	- 0.925
SSI (Stress susceptibility index)	شاخص حساسیت به تنش	0.110	- 0.951
DI (Drought resistance index)	شاخص مقاومت به تنش خشکی	0.367	0.905
HM (Harmonic mean)	شاخص میانگین هارمونیک	0.977	0.120
MpSTI (Modified stress tolerance index in normal condition)	شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط نرمال	0.913	- 0.222
MsSTI (Modified stress tolerance index in stress condition)	شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش	0.811	0.315
Percentage of variation	درصد واریانس توجیه شده	59.42	35.99
Cumulative percentage	واریانس تجمعی	59.42	95.41
Eigenvalues	مقادیر ویژه	7.13	4.31



شکل ۳. نمودار بای‌پلات ژنوتیپ‌های ذرت بر اساس دو مؤلفه اول حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر روی شاخص‌های تحمل که در آن موقعیت شاخص‌ها و ژنوتیپ‌ها مشخص است (دایره‌های مشکی نشان‌دهنده ژنوتیپ‌ها و پیکان‌ها بیانگر شاخص‌ها).

Fig. 3. Biplot diagram of maize genotypes based on the first two components resulting from principal component analysis on stress tolerance indices, where the position of the indices and genotypes is known (black circles indicate genotypes and arrows indicate indices).

روش Ward انجام گرفت. نمودار Heatmap گروه‌بندی

ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص‌های تحمل تنش در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه خوشه‌ای (شکل ۴)

تجزیه خوشه‌ای

گروه‌بندی ژنوتیپ‌های ذرت بر مبنای عملکرد تحت شرایط بهینه و کمبود روی و شاخص‌های تحمل تنش با استفاده از

جدول ۶. تعداد اعضای گروه‌ها و اسامی ژنوتیپ‌های گروه‌های حاصل از تجزیه کلاستر همراه با میانگین و میزان انحراف از میانگین برای شاخص‌های تحمل در ژنوتیپ‌های ذرت

Table 6. Number of members and names of genotypes in each group obtained from cluster analysis along with the average and the amount of deviation from the average for tolerance indices in maize genotypes

خوشه	Cluster	Item	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	STI	ATI	SSI	DI	HM	MpSTI	MsSTI
خوشه اول	Cluster 1	میانگین گروه	78.01	58.39	19.61	68.20	67.02	0.76	985.33	1.18	0.75	65.90	0.79	0.78
		Group mean												
		درصد انحراف از میانگین	-0.97	8.90	-49.03	3.50	2.51	10.76	-24.76	-207.03	26.82	1.63	34.58	39.68
		%Deviation from total mean												
	(n=27)	Ma001, Ma002, Ma003, Ma006, Ma007, Ma008, Ma010, Ma012, Ma013, Ma018, Ma019, Ma024, Ma032, Ma036, Ma040, Ma042, Ma046, Ma053, Ma057, Ma062, Ma074, Ma075, Ma108, Ma112, Ma116, Ma117, Ma120												
خوشه دوم	Cluster 2	میانگین گروه	53.19	75.27	-22.07	64.23	63.09	0.67	-1086.69	-2.16	1.78	61.99	0.34	1.04
		Group mean												
		درصد انحراف از میانگین	31.16	-17.42	267.76	9.13	8.23	21.26	237.60	662.74	-73.60	7.47	72.02	20.28
		%Deviation from total mean												
	(n=9)	Ma004, Ma027, Ma028, Ma038, Ma045, Ma083, Ma091, Ma105, Ma115												
خوشه سوم	Cluster 3	میانگین گروه	44.97	44.69	0.28	44.83	44.42	0.35	-17.81	-0.03	0.77	44.04	0.14	0.24
		Group mean												
		درصد انحراف از میانگین	41.79	30.28	97.85	36.57	35.38	58.73	102.26	108.15	24.92	34.26	87.77	81.06
		%Deviation from total mean												
	(n=23)	Ma005, Ma009, Ma011, Ma014, Ma016, Ma020, Ma026, Ma039, Ma043, Ma048, Ma051, Ma052, Ma060, Ma065, Ma066, Ma085, Ma100, Ma106, Ma109, Ma110, Ma113, Ma119, Ma122												
خوشه چهارم	Cluster 4	میانگین گروه	103.48	92.65	10.83	98.07	97.31	1.59	892.41	0.36	1.42	96.56	3.05	3.75
		Group mean												
		درصد انحراف از میانگین	-33.94	-44.55	17.71	-38.75	-41.53	-86.81	-13.00	6.28	-38.95	-44.13	-151.41	-187.09
		%Deviation from total mean												
	(n=17)	Ma015, Ma017, Ma022, Ma030, Ma035, Ma049, Ma054, Ma055, Ma064, Ma072, Ma096, Ma098, Ma104, Ma107, Ma111, Ma114, Ma123												
خوشه پنجم	Cluster 5	میانگین گروه	106.64	49.48	57.15	78.06	71.91	0.88	3175.53	2.58	0.40	66.48	1.73	0.70
		Group mean												
		درصد انحراف از میانگین	-38.03	22.80	-334.29	-10.45	-4.60	-3.95	-302.09	-570.15	60.81	0.76	-42.96	46.06
		%Deviation from total mean												
	(n=17)	Ma021, Ma023, Ma025, Ma031, Ma033, Ma034, Ma037, Ma044, Ma050, Ma073, Ma076, Ma077, Ma079, Ma080, Ma089, Ma118, Ma121												

YP: عملکرد دانه در شرایط نرمال، YS: عملکرد دانه در شرایط تنش، SSI: شاخص حساسیت به تنش، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، ATI: شاخص تحمل غیرزیستی، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین هندسی بهره‌وری، DI: شاخص مقاومت به تنش خشکی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، MpSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط نرمال، MsSTI: شاخص تحمل به تنش تغییر یافته در شرایط تنش.

YP: Optimal (potential) yield of a given genotype, YS: Stress yield of a given genotype, SSI: Stress susceptibility index, TOL: Tolerance, STI: Stress tolerance index, ATI: Abiotic tolerance index, MP: Mean productivity, GMP: Geometric mean productivity, DI: Drought resistance index, HM: Harmonic mean, MpSTI: Modified stress tolerance index in optimum irrigation, MsSTI: Modified stress tolerance index in moderate and severe stress.

همبستگی بالایی با مؤلفه دوم بوده و کمتر بودن مقادیر آن‌ها نشان‌دهنده تحمل بیشتر ژنوتیپ‌ها به تنش کمبود روی است در گروه دوم واقع شدند. ژنوتیپ‌های مورد بررسی در پنج گروه طبقه‌بندی شدند. خوشه اول شامل ۲۷ ژنوتیپ، خوشه دوم

نشان داد که شاخص‌های GMP, STI, MP, HM, MpSTI و MsSTI که همبستگی بالایی با مؤلفه اول داشتند و دارای بیشترین میزان برای ژنوتیپ‌های متحمل هستند، در گروه اول قرار گرفتند. شاخص‌های SSI, ATI و TOL که دارای

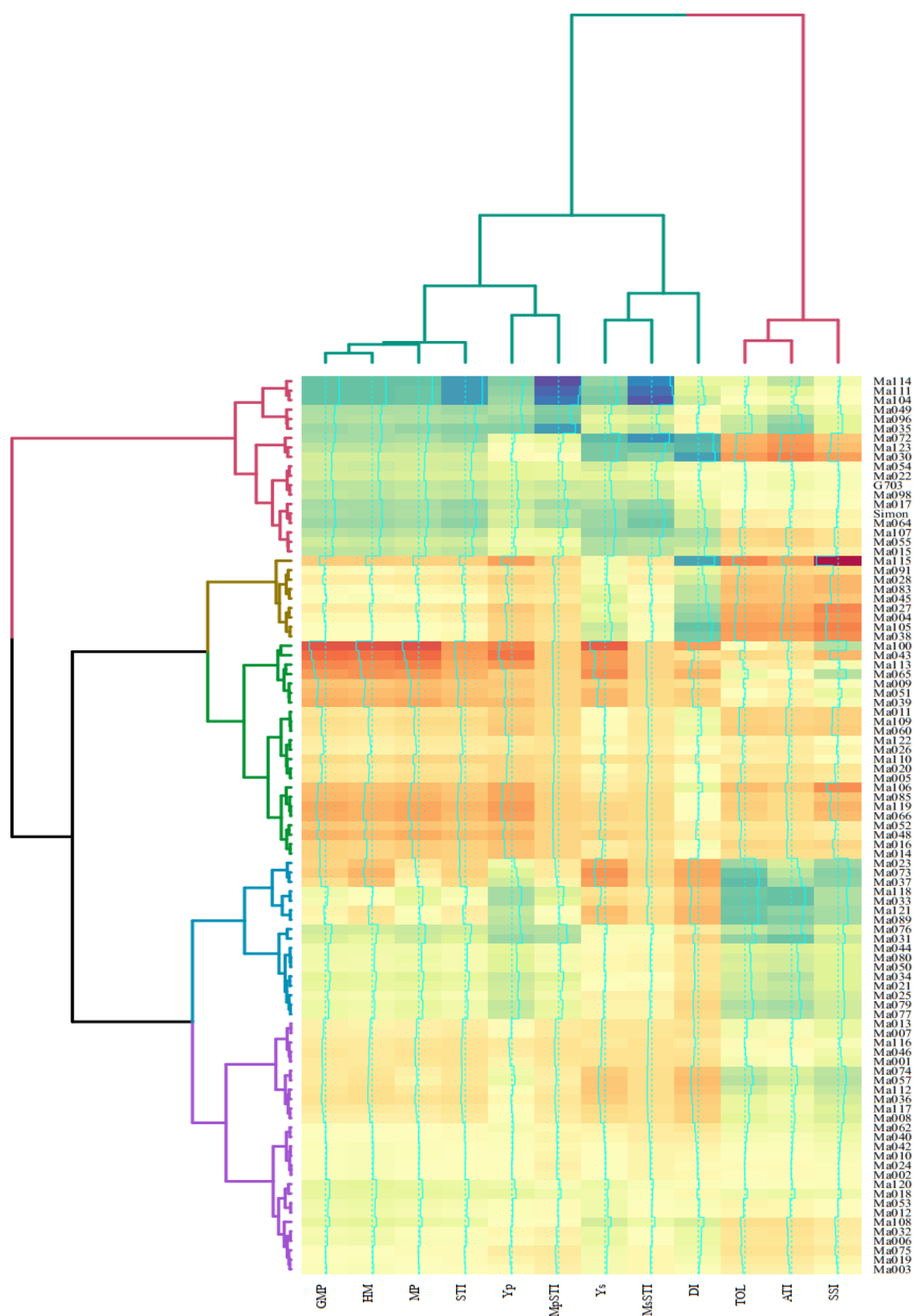
نتیجه‌گیری نهایی

تحقیق حاضر نتایج ارزیابی واکنش تعداد زیادی ژنوتیپ ذرت به کمبود روی با استفاده از شاخص‌های تحمل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این تحقیق اهمیت استفاده از شاخص‌های تحمل به‌عنوان یک راه مطمئن و سودمند جهت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس را نمایان کرد. بر اساس نتایج حاصل، شاخص‌های MP ، GMP ، STI و HM از مؤثرترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا تحت شرایط بهینه و کمبود روی می‌باشند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش ژنوتیپ‌های $Ma015$ ، $Ma017$ ، $Ma022$ ، $Ma030$ ، $Ma035$ ، $Ma049$ ، $Ma054$ ، $Ma055$ ، $Ma064$ ، $Ma072$ ، $Ma096$ ، $Ma098$ ، $Ma104$ ، $Ma107$ ، $Ma111$ ، $Ma114$ ، $Ma123$ جزء ژنوتیپ‌های بسیار متحمل (پایدار) بوده که در هر دو شرایط بهینه و کمبود روی دارای عملکرد بالا می‌باشند. ژنوتیپ‌های $Ma021$ ، $Ma023$ ، $Ma025$ ، $Ma031$ ، $Ma033$ ، $Ma034$ ، $Ma037$ ، $Ma044$ ، $Ma045$ ، $Ma050$ ، $Ma073$ ، $Ma076$ ، $Ma077$ ، $Ma079$ ، $Ma080$ ، $Ma089$ ، $Ma118$ ، $Ma121$ جزء ژنوتیپ‌های بسیار حساس قرار گرفته که فقط در شرایط بهینه (استفاده از کود سولفات روی) عملکرد بالایی دارند. همچنین ژنوتیپ‌های $Ma004$ ، $Ma027$ ، $Ma028$ ، $Ma038$ ، $Ma045$ ، $Ma083$ ، $Ma091$ ، $Ma105$ ، $Ma115$ به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کمبود روی که فقط در شرایط کمبود روی عملکرد بالایی دارند، شناسایی شدند. مابقی ژنوتیپ‌ها در هیچ‌کدام از محیط‌ها عملکرد بالایی نشان نداده و بر اساس شاخص‌های تحمل جزء ژنوتیپ‌های نیمه حساس قرار گرفتند. با انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل و پُر محصول به‌عنوان لاین‌های والدی در برنامه‌های به‌نژادی می‌توان برای تولید و توسعه ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود روی با عملکرد بالا اقدام نمود.

سیاسگزاری

ژنوتیپ‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر از طرح تحقیقاتی شماره T.T/۱۰۱/۹۴ مصوب پژوهشکده زیست‌فناوری دانشگاه ارومیه تهیه شدند؛ بدین جهت از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه ارومیه تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زابل برای حمایت مالی در انجام این پروژه با شماره ۳۰۱۴-GR۱۵۸-UOZ- تشکر و قدردانی می‌گردد.

شامل ۹ ژنوتیپ، خوشه سوم شامل ۲۳ ژنوتیپ، خوشه چهارم شامل ۱۷ ژنوتیپ و خوشه پنجم شامل ۱۷ ژنوتیپ بود (شکل ۴ و جدول ۶). در ادامه برای مشخص کردن اهمیت گروه‌ها از نظر صفات مورد بررسی، میانگین خوشه‌ها و انحراف از میانگین کل، برای هر کدام از شاخص‌ها و عملکرد محاسبه گردید (جدول ۶). ژنوتیپ‌های موجود در خوشه چهارم از نظر عملکرد در شرایط بهینه و کمبود روی و شاخص‌های MP ، GMP ، STI ، HM ، $MPSTI$ و $MSSTI$ بیشترین مقادیر را داشته (جدول تکمیلی ۱، جدول ۴ و جدول ۶) و در نمودار سه‌بعدی در ناحیه A جزء ژنوتیپ‌های بسیار متحمل (پایدار) قرار گرفته که دارای عملکرد دانه بالایی در هر دو شرایط بهینه و تنش بودند. ۹ ژنوتیپ موجود در خوشه دوم به علت داشتن عملکرد بالا فقط در شرایط کمبود روی و بر اساس شاخص‌های SSI ، TOL و ATI جزء ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی شدند (گروه C). ژنوتیپ‌های موجود در خوشه سوم با توجه به اینکه در هر دو شرایط محیطی عملکرد بالایی نداشته؛ بر اساس شاخص‌های تحمل جزء ژنوتیپ‌های نیمه متحمل قرار می‌گیرند (گروه D). ژنوتیپ‌های موجود در خوشه پنجم به علت داشتن عملکرد بالا فقط تحت شرایط بهینه، در گروه B قرار گرفته و با توجه به شاخص‌های TOL ، SSI و ATI جزء ژنوتیپ‌های بسیار حساس می‌باشند. ۲۷ ژنوتیپ موجود در خوشه اول به علت نداشتن عملکرد بالا در هر دو شرایط محیطی و بر اساس برآورد شاخص‌ها، جز ژنوتیپ‌های نیمه حساس قرار گرفتند (گروه D). این گروه‌بندی الگوی مشابه با تفکیک ژنوتیپ‌ها با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی داشت. انحراف از میانگین نشان‌دهنده وجود تنوع در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه است. همچنین ژنوتیپ‌های موجود در هر گروه دارای شباهت ژنتیکی بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های موجود در گروه‌های متفاوت هستند، بنابراین می‌توان از ژنوتیپ‌های موجود در گروه‌های مختلف و ارزش میانگین برای هر گروه، برای تولید هیبرید جهت استفاده از پدیده‌های هتروزیس و تفکیک متجاوز استفاده نمود. از تجزیه خوشه‌ای برای بررسی تنوع ژنتیکی و گروه‌بندی جوامع مختلف گیاهی تحت شرایط مختلف، به‌طور گسترده و عمده توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است (Arzhang et al., 2023; Tahmasbali et al., 2021; Soleimani et al., 2019; Tabkhkar et al., 2018; Afshari et al., 2017).



شکل ۴. دندوگرام حاصل از گروه‌بندی ژنوتیپ‌های ذرت بر اساس شاخص‌های تحمل با استفاده از روش وارد

Fig. 4. Dendrogram resulting from the grouping of maize genotypes based on tolerance indices using Ward's method

منابع

- Afshari, R., Sabouri, A., Esfahani, M., Kafi Ghasemi, A., 2017. Evaluation of tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes using tolerance indices and biplot analysis. Iranian Journal of Field Crop Science. 48, 843-854. [In Persian with English Summary] <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.215828.654176>
- Alloway, B.J., 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition, Second edition. International fertilizer Industry Association and International Zinc Association, Brussels, Belgium.
- Arzhang, S., Darvishzadeh, R., Alipour, H., 2023. Screening of maize (*Zea mays* L.) lines using selection indices for salinity stress tolerance. Environmental Stresses in Crop Sciences. 16, 949-967. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5194.2120>
- Beigzadeh, N., Rashidi, V., 2016. Evaluation of agro-physiological traits of bean genotypes under drought stress and non-stress conditions at reproductive stage. Seed and Plant Journal. 32, 215-230. [In Persian with English Summary]
- Bidinger, F., Mahalakshmi, V., Rao, G.D.P., 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. Australian Journal of Agricultural Research. 38, 49-59. <https://doi.org/10.1071/AR9870049>
- Blasco, B., Navarro-León, E., Ruiz, J. M., 2018. Oxidative stress in relation with micronutrient deficiency or toxicity. In: Hussain, M.A., Kamiya, T., Burritt, D.J., Tran, L.P., Fujiwara, T. (eds.), Plant Micronutrient Use Efficiency. Academic Press, United Kingdom, pp. 181-194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00011-3>
- Blum, A., 1988. Plant Breeding for Stress Environment. CRC Press., Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781351075718>
- Bonea, D., 2020. Grain yield and drought tolerance indices of maize hybrids. Notulae Scientia Biologica. 12, 376-386. <https://doi.org/10.15835/nsb12210683>
- Cakmak, I., Graham, R., Welch, R. M., 2002. Agricultural and molecular genetic approaches to improving nutrition and preventing micronutrient malnutrition globally. In: Cakmak, I., Welch, R.M. (eds.), Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, Oxford, pp. 1075-1099
- Cakmak, I., Kutman, U., 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. European Journal of Soil Science. 69, 172-180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
- Darvishzadeh, R., Pirzad, A., Hatami-Maleki, H., Poormohammad Kiani, S., Sarrafi, A., 2010. Evaluation of the reaction of sunflower inbred lines and their F1 hybrids to drought conditions using various stress tolerance indices. Spanish Journal of Agricultural Research. 8, 1037-1046. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1398>
- Erfani, F., Shokrpour, M., Momeni, A., Erfani, A., 2013. Evaluation of drought tolerance in rice varieties using yield-based indices at vegetative and reproductive stage. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 22 (4), 135-147. [In Persian with English Summary]
- Etminan, A., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Shooshtari, L., Yousefiazarkhanian, M., morAdkhAni, H., 2019. Determining the best drought tolerance indices using artificial neural network (ANN): Insight into application of intelligent agriculture in agronomy and plant breeding. Cereal Research Communications. 47, 170-181. <https://doi.org/10.1556/0806.46.2018.057>
- Farshadfar, E., Sutka, J., 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. Acta Agronomica Hungarica. 50, 411-416. <https://doi.org/10.1556/AAgr.50.2002.4.3>
- Farshadfar, A., 2000. Selection for drought resistance in bread wheat lines. Agricultural Sciences and Technology. 14, 161-171. [In Persian with English Summary]
- Feizi, M., Solouki, M., Sadeghzadeh, B., Fakheri, B., Mohammadi, S.A., 2020. Evaluation of drought tolerance indices for barley landraces under irrigated and dry conditions. Bioscience Journal, 36, 1518-1527. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo, C.G. (ed.), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress. AVRDC Publication, Tainan, pp. 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. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Geravandi, M., Farshadfar, E., Kahrizi, D., 2010. Evaluation of drought tolerance in bread wheat advanced genotypes in field laboratory conditions. Seed and Plant Improvement Journal. 26, 233-252. [In Persian with English Summary]
- Golparvar, A., Majidi Harvan, I., Ghassemi Pirbaloti, E., 2003. Genetic improvement yield potential and water stress resistance in wheat genotypes (*Triticum aestivum*). Journal of Research in Agricultural Science. 13, 13-21. [In Persian with English Summary]
- Hanway, J., 1982. How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48, Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.
- Hotz, C., Brown, K.H., 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutrition Bulletin. 25, 94-204. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182010000200014>
- Kamrani, M., Mehraban, A., Shiri, M., 2018. Identification of drought tolerant genotypes in dryland wheat using drought tolerance indices. Journal of Crop Breeding. 10, 13-26. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcb.10.28.13>
- Kandel, M., Ghimire, S.K., Ojha, B.R., Shrestha, J., 2019. Evaluation of heat stress tolerance indices in maize inbred lines. Malaysian Journal of Applied Sciences. 4, 57-68
- Kazerani, B., navabpour, S., Sabouri, Sabouri., Ramezanpour, S.S., Zaynali Nezhad, KH., Eskandari, A., 2019. Evaluation and selection of rice mutant lines based on drought tolerance indices. Journal of Plant production. 25, 15-31. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22069/jopp.2018.13685.2228>
- Lan, J., 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agric Boreali-Occidentalis Sinica. 7, 85-87.
- Lestari, A.P., Suwarno, Trikoesoemaningtyas, Sopandie, D., Aswidinnoor, H., 2019. Estimation for stress tolerance indices of rice genotypes in low nitrogen condition. The Agricultural Science Society of Thailand. 52, 180-190
- Marschner, H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second edition. London, Academic Press.
- Mehraban, A., Tobe, A., Gholipouri, A., Amiri, E., Ghafari, A., Rostaii, M., 2018. Evaluation of drought tolerance indices and yield stability of wheat cultivars to drought stress in different growth stage. World Journal of Environmental Biosciences. 7, 8-14.
- Mitra, J., 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. Current Science. 80, 758-763.
- Molla Heydari Bafghi, R., Baghizadeh, A., Mohammadinezhad, G., 2017. Evaluation of salinity and drought stresses tolerance in wheat genotypes using tolerance indices. Journal of Crop Breeding. 9, 27-34. [In Persian with English Summary]
- Moosavi, S.S., Yazdi Samadi, B., Naghavi, M.R., Zali, A.A., Dashti, H., Pourshahbazi, A., 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert. 12, 165-178. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2008.27115>
- Pandey, N., Gupta, B., Pathak, G.C. 2012. Antioxidant responses of pea genotypes to zinc deficiency. Russian Journal of Plant Physiology. 59, 198-205. <https://doi.org/10.1134/S1021443712010141>
- Pour- Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Moghaddam Vahed, M., Pocza, P., Siddique, K.H.M., 2019. iPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. Applications in Plant Sciences, 7, p.e11278. <https://doi.org/10.1002/aps3.11278>
- Rosielle, A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Science. 21, 943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Sadeghzadeh, B., 2015. Soil-zinc application required to improve bread and durum wheat production under cold rainfed conditions. Iranian Dryland Agronomy Journal. 4, 149-162. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22092/idadj.2016.106098>
- Safaei Chaeikar, S., Rabiei, B., Samizadeh, H., Esfahani, M., 2008. Evaluation of tolerance to terminal drought stress in rice (*Oryza Sativa* L.) genotypes. Iranian Journal of Field Crop

- Science. 9, 315-331. [In Persian with English Summary]
- Shahrokhi, M., Khavari Khorasani, S., Ebrahimi, A., 2020. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of super sweet maize (*Zea mays* L. var. *saccharata*) inbred lines. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*. 42(3), 435-448. <http://doi.org/10.17503/agrivita.v42i3.2574>
- Soleimani, A., Bihamta, M.R., Peyghambari, S.A., Maali Amiri, R., 2019. Evaluation of late season drought in barley genotypes using some drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*. 9, 166–176. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.23.166>
- Tabkhkar, N., Rabiei, B., Samizadeh Lahiji, H., Hosseini Chaleshtori, M., 2018. Assessment of rice genotypes response to drought stress at the early reproductive stage using stress tolerance indices. *Journal of Crop Production and Processing*. 7, 83–106. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcpp.7.4.83>
- Tahmasbali, M., Darvishzadeh, R., Fayaz Moghaddam, A., Alipour, H., 2021. Selection of tolerant genotypes to broomrape *Orobancha cernua* stress in oriental tobacco *Nicotiana tabacum* genotypes using stress tolerance indices. *Journal of Applied Research in Plant Protection*. 9, 83-100. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22034/arpp.2021.12247>
- Ullah, A., Farooq, M., Hussain, M., 2019. Improving the productivity, profitability and grain quality of Kabuli chickpea with co-application of zinc and endophyte bacteria *Enterobacter* sp. MN17. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 66, 897-912. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1644501>
- White P.J., Pongrac, P., 2017. Heavy-metal toxicity in plants. In: Shabala, S. (ed), *Plant Stress Physiology*. Cabi, Wallingford UK, pp. 300-331. <https://doi.org/10.1079/9781780647296.0300>