

Evaluation of Tolerance to Phosphorus Deficiency Stress in Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines Using Stress Tolerance Indices

Maryam Razmjou¹, Reza Darvishzadeh^{2*}, Hadi Alipour³, Ebrahim Sepehr⁴

(Received: March, 2025

Accepted: July 2025)

Abstract

Phosphorus (P) is an essential nutrient with a significant effect on plant growth. Maize is highly sensitive to phosphorus deficiency during early growth stages. This study was conducted under two conditions: optimal and phosphorus deficiency stress to analyze stress tolerance indices in 93 maize inbred lines and identify lines tolerant to low phosphorus stress. The experiment used a completely randomized design with three replications at Urmia University in 2017–2018. Based on performance under both optimal and phosphorus deficiency stress conditions, various stress tolerance indices were calculated, including Mean Productivity (MP), Tolerance Index (TOL), Stress Susceptibility Index (SSI), Geometric Mean Productivity (GMP), Stress Tolerance Index (STI), Harmonic Mean (HM), Yield Stability Index (YSI), Yield Index (YI), Abiotic Tolerance Index (ATI), and Modified Stress Tolerance Index under stress conditions (MSTI). Correlation, principal component, and cluster analyses showed that HM, GMP, YI, MP, MpSTI, and MsSTI were ideal indices for selecting lines that performed well under both optimal and phosphorus deficiency stress conditions. Based on these indices, lines Ma005, Ma006, Ma007, Ma009, Ma010, Ma011, Ma022, Ma024, Ma025, Ma026, Ma027, Ma028, and Ma064 were identified as phosphorus deficiency stress-tolerant lines, showing better grain yield under both phosphorus stress (YS) and optimal phosphorus (YP) conditions. The results of this study can help scientists develop sustainable and optimal cultivation strategies in phosphorus-deficient areas. Additionally, plants tolerant to nutrient deficiencies can help farmers increase yields and reduce the need for chemical fertilizers under these conditions.

Keywords: Correlation, Maize, Phosphorus deficiency stress, Principal component analysis, Tolerance indices

Razmjou M., Darvishzadeh R., Alipour H., and Sepehr E. 2026. Evaluation of tolerance to phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L.) inbred lines using stress tolerance indices. *Applied Soil Research*, 13(4): 64-84.

1. Ph.D., Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

4. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding Author Email: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

ارزیابی تحمل به تنش کمبود فسفر در لاین‌های خالص ذرت (*Zea mays L.*) با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش

مریم رزمجو^۱، رضا درویش‌زاده^{۲*}، هادی علیپور^۳، ابراهیم سپهر^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

چکیده

اثر فسفر (P) به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری، بر رشد گیاه بسیار قابل توجه است. ذرت در مراحل اولیه رشد نسبت به کمبود فسفر حساسیت بالایی دارد. این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل شاخص‌های تحمل به تنش کمبود فسفر در ۹۳ لاین خالص ذرت و شناسایی لاین‌های متحمل، تحت دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در دانشگاه ارومیه در سال ۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. بر اساس عملکرد لاین‌ها تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر، شاخص‌های تحمل تنش مختلفی از جمله میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین هارمونیک (HM) شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص عملکرد (YI)، شاخص تحمل به کمبودهای غیر زیستی (ATI) و شاخص تحمل به تنش تغییر یافته (MSTI) محاسبه شد. نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای نشان داد که شاخص‌های MP، YI، GMP، HM، MsSTI و MpSTI شاخص‌های ایده‌آلی برای انتخاب لاین‌هایی هستند که تحت هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر عملکرد خوبی دارند. براساس این شاخص‌ها، لاین‌های Ma005، Ma006، Ma007، Ma009، Ma010، Ma011، Ma022، Ma024، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028 و Ma064 به‌عنوان لاین‌های متحمل به تنش کمبود فسفر شناسایی شدند که در هر دو شرایط تنش کمبود فسفر (YS) و بهینه فسفر (YP) عملکرد دانه بهتری نشان دادند. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه استراتژی‌های کشت پایدار و بهینه در مناطق با کمبود فسفر کمک کند. گیاهان متحمل به تنش کمبود عناصر غذایی می‌توانند به کشاورزان در افزایش عملکرد و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی در این محیط‌ها کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: تنش کمبود فسفر، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ذرت، شاخص تحمل تنش، همبستگی

رزمجو م.، درویش‌زاده ر.، علیپور ه.، سپهر ا. ۱۴۰۴. ارزیابی تحمل به تنش کمبود فسفر در لاین‌های خالص ذرت (*Zea mays L.*) با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳ شماره ۴. ص: ۸۴-۶۴.

1 - دانش آموخته دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه. ارومیه

1 - استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه. ارومیه

1 - دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه. ارومیه

1 - استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه. ارومیه

*پست الکترونیک: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یک محصول چند منظوره در سطح جهانی است که می‌تواند برای مصارف غذایی، تأمین خوراک دام و مصارف صنعتی استفاده شود. انتظار می‌رود در ۳۰ سال آینده، جمعیت انسانی به ۱۰ میلیارد نفر برسد و بنابراین برای پاسخگویی به تقاضا، به تولید محصول بیشتر نیاز خواهد بود (Hickey *et al.*, 2019). گیاهان در طول دوره رشد خود با اثرات منفی تنش‌های مختلف مواجه هستند. فسفر (P)، به‌عنوان یک جزء مهم سلول‌های گیاهی نقش مهمی در حفظ رشد طبیعی و فعالیت‌های متابولیکی و افزایش تحمل گیاهان در برابر محیط‌های تنش‌زا دارد (Childers *et al.*, 2011; Irfan *et al.*, 2020; Pacheco *et al.*, 2010; Yang & Finnegan, 2010). ذرت به کمبود فسفر خاک حساس است. کمبود فسفر قابل دسترس در خاک عملکرد و کیفیت دانه ذرت را به صورت منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Calderón-Vázquez *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2007). تفاوت در کارایی ژنوتیپ‌های مختلف ذرت در جذب و استفاده از عناصر غذایی خاک، فرصتی برای استفاده کامل از پتانسیل گیاه برای استفاده مؤثر از منابع مختلف فسفر خاک فراهم می‌نماید (Chen *et al.*, 2018; Lun *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2016). با توجه به فراهمی کم فسفر در خاک‌های آهکی و کمبود آن در گیاهان مختلف و همچنین کاهش منابع کود فسفر، بررسی پتانسیل ژنتیکی ژنوتیپ‌های ذرت برای فسفر-کارایی و اصلاح لاین‌های اینبرد با تحمل بالا به تنش کمبود فسفر، از راهکارهای مؤثر برای توسعه کشت و کاهش فشار به منابع فسفر است (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2011; Cadot *et al.*, 2018; Simpson *et al.*, 2011; Yaseen & Malhi, 2009; Zhang *et al.*, 2015). معیارهای متفاوتی برای انتخاب ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد آن‌ها در محیط‌های تنش و نرمال پیشنهاد شده است که از آن‌ها می‌توان به شاخص میانگین بهره‌وری (MP¹)، شاخص تحمل (TOL²)، شاخص حساسیت به

تنش (SSI³)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP⁴)، شاخص تحمل تنش (STI⁵)، میانگین هارمونیک (HM⁶)، شاخص پایداری عملکرد (YSI⁷)، شاخص عملکرد (YI⁸)، نرخ کاهش عملکرد (Yr⁹)، شاخص تحمل به کمبودهای غیر زیستی (ATI¹⁰) و شاخص تحمل خشکی (DI¹¹) اشاره کرد. همچنین به منظور افزایش کارایی STI، شاخص جدیدی به نام شاخص تحمل به تنش تغییر یافته (MSTI¹²) پیشنهاد گردیده است که در آن فرمول STI با استفاده از وزنی بهینه‌سازی می‌شود (Farshadfar & Sutka, 2002). فرناندز (Fernandez, 1992) در بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و بدون تنش، چهار نوع پاسخ مختلف را مشاهده نمود: عملکرد بالاتر از میانگین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (گروه A)، عملکرد بالاتر از میانگین در شرایط بدون تنش (گروه B)، عملکرد پایین‌تر از میانگین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (گروه D). معیاری برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش مناسب است، که توانایی تمایز ژنوتیپ‌های گروه A از سایر ژنوتیپ‌ها را داشته باشد و همچنین با عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش همبستگی بالایی داشته باشد. محققین مختلفی از این شاخص‌ها برای ارزیابی تحمل تنش خشکی در بسیاری از محصولات زراعی استفاده کرده‌اند (Mollasadeghi, 2011; Ashraf *et al.*, 2015; Shojaei *et al.*, 2022). گزارش‌هایی در مورد استفاده از این شاخص‌ها برای مطالعه تحمل تنش شوری در گندم (Singh *et al.*, 2015) و تحمل تنش کمبود نیتروژن در کلزا (Rameeh, 2015) و گندم (Khan & Mohammad, 2016) ارائه شده است. فتحی‌باهری و همکاران (Fathi Baheri *et al.*, 2003) همبستگی معنی‌داری بین سه شاخص STI، GMP و MP در ارزیابی تحمل تنش خشکی مشاهده نمودند. حاجی‌بابایی و عزیزی (Hajibabaei & Azizi, 2011) به بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد هیبریدهای ذرت پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که در شرایط تنش خفیف

⁷ Yield Stability Index

⁸ Yield Index

⁹ Yield reduction

¹⁰ Abiotic Tolerance Index

¹¹ Drought resistance Index

¹² Modified Stress Tolerance Index

¹ Mean Productivity

² Tolerance Index

³ Stress Susceptibility Index

⁴ Geometric Mean Productivity

⁵ Stress Tolerance Index

⁶ Harmonic Mean

فسفر ۱۰ تا ۲۰ میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک (Bishart, 2014 & Shahbazi) انتخاب شد. بر اساس نتایج آزمون خاک و به منظور جلوگیری از تنش تغذیه‌ای ناشی از کمبود سایر عناصر غذایی، کوددهی خاک مورد نظر با کودهای نیتروژن به مقدار ۰/۶ g/kg، سولفات پتاسیم به مقدار ۰/۹ g/kg، سکوسترین آهن به مقدار ۰/۱ g/kg، سولفات منگنز به مقدار ۰/۱۵ g/kg، سولفات روی به مقدار ۰/۰۶۶ g/kg، سولفات مس به مقدار ۰/۰۲ g/kg و اسیدبوریک به مقدار ۰/۱۴ g/kg انجام شد (جدول ۲). تعداد ۵۵۸ گلدان ۱۵ کیلوگرمی تهیه و سپس به دو گروه ۲۷۹ تایی تقسیم شد. گلدان‌ها با خاک آماده شده برای هر یک از شرایط به نسبت دو قسمت خاک و یک قسمت ماسه پر شدند. به ۲۷۹ گلدان آزمایش شرایط بهینه، کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۰/۴ گرم بر کیلوگرم خاک (g/kg) نیز اضافه شد اما کود فسفر به گلدان‌های آزمایش تنش کمبود فسفر اضافه نشد. کود نیتروژن به صورت تقسیط در سه مرحله؛ یک قسمت به مقدار ۰/۲ g/kg به مانند سایر کودها در ابتدا و دو قسمت دیگر (۰/۴ g/kg) طی مرحله رشد به گلدان‌ها اضافه شد. در هر گلدان ۴ عدد بذر ذرت کشت شد و پس از جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در مرحله چهار برگی دو تا از گیاهچه‌ها حذف و دو گیاه در هر گلدان نگهداری شد (شکل ۱). در مرحله جوانه‌زنی، آبیاری گلدان‌ها هر سه روز یک بار به وسیله آبیاش، ولی بعد از جوانه‌زدن بذرها به صورت روزانه و با سامانه آبیاری قطره‌ای انجام گرفت. پس از رسیدگی، عملکرد دانه در هر یک از شرایط بهینه (Yp) و تنش کمبود فسفر (Ys) اندازه‌گیری و شاخص‌های تحمل تنش بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۳ محاسبه شدند.

تجزیه آماری

تجزیه واریانس تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در نرم‌افزار RStudio و بسته agricolae با استفاده از تابع aov() انجام شد. ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از بسته corrplot محاسبه شد. تجزیه خوشه‌ای به روش وارد در بسته d3heatmap انجام شد. نمودار سه‌بعدی جهت شناسایی لاین‌های متحمل به تنش کمبود فسفر با عملکرد بالا در هر دو شرایط (بهینه و تنش کمبود فسفر) با استفاده از نرم‌افزار

خشکی، شاخص‌های GMP، MP و STI و در شرایط تنش شدید خشکی، شاخص‌های SSI و TOL مطلوب هستند. برخی از محققان معتقدند که استفاده از ترکیبی از شاخص‌های تحمل موجود می‌تواند معیارهای مؤثرتری برای ارزیابی سازگاری با تنش ارائه دهد (Aberkane et al., 2021; Sabouri et al., 2022). در مقایسه، شاخص‌های STI و SSI می‌توان ژنوتیپ‌هایی را که بهره‌وری بالایی دارند یا کمتر تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرند، به طور مؤثرتری غربالگری کنند (Lan et al., 2022; Sánchez-Reinoso et al., 2020). در مطالعه بی‌همتا و همکاران (Bihamta et al., 2018) برای شناسایی بهترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ پاسخ به تنش خشکی از شاخص‌های TOL، MP، GMP و STI استفاده شد. در ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در ذرت مشاهده شد که شاخص‌های MP، GMP، STI، HM، MRP، REI، MpSTI، MsSTI و YI مناسب‌ترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در ذرت هستند (Shahrokhi et al., 2020). مطالعه حاضر به منظور شناسایی شاخص‌های تحمل تنش مناسب برای شناسایی لاین‌های ذرت متحمل به تنش کمبود فسفر انجام شد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بررسی اثر تنش کمبود فسفر بر روی لاین‌های ذرت انجام نشده است و این اولین مطالعه در کشور برای بررسی اثر کمبود فسفر بر روی تعداد زیادی لاین ذرت می‌باشد. لذا نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان یک منبع ارزشمند برای محققان کشاورزی در زمینه توسعه ارقام متحمل مورد استفاده قرار گیرد و راهگشای بسیاری از مشکلات ناشی از کمبود فسفر در مزارع ذرت باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ارزیابی ۹۳ لاین خالص ذرت (جدول ۱) در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ در فضای باز محوطه گلخانه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. براساس نتایج آزمون خاک (جدول ۲)، از بین خاک‌های نواحی مختلف، خاک منطقه خان‌ارخی دانشگاه ارومیه با غلظت فسفر قابل دسترس کم ۷/۲۴ mg/kg (غلظت بحرانی

Statistica ترسیم گردید که در آن عملکرد دانه در شرایط
 بهینه فسفر روی محور Y و شاخص تحمل بر روی محور Z
 تنش کمبود فسفر روی محور X، عملکرد دانه در شرایط
 نشان داده شد.

جدول ۱- اسامی لاین‌های ذرت مورد مطالعه تحت شرایط تنش کمبود فسفر

Table 1. Names of studied maize lines under phosphorus deficiency stress conditions

Code	Line Name	Code	Line Name	Code	Line Name
Ma001	P3L2	Ma033	R59(Maternal)	Ma076	70*/ 1388
Ma002	P11L2	Ma034	K615/1	Ma077	10/K 19/1
Ma003	P15L16 Kahriz	Ma035	B73	Ma079	138* /89
Ma004	P9L3 Kahriz	Ma036	OH 43/1-42 (Paternal)	Ma080	K19 */ 1392 (Isolated)
Ma005	P13L2	Ma037	R59 (Paternal)	Ma083	1* /89 (Red cob)
Ma006	P19L7 Kahriz	Ma038	W37A	Ma085	1390/Popcorn- 53 or 54 (Line)
Ma007	P6L1	Ma039	R319	Ma089	172* /89
Ma008	P19 L3 Kahriz	Ma040	R59	Ma091	8/K19/1
Ma009	P14L1 Kahriz	Ma042	W153R	Ma096	67*/88
Ma010	P11L7	Ma043	K1533 Popcorn	Ma098	1387/193/ chase*/S2
Ma011	P14L2	Ma044	R59 _x R319(Maternal line of DC370) (SC)	Ma100	36-N/88-K3653/2
Ma012	P10L5	Ma045	B73(RFC OR CMS)	Ma104	Line1
Ma013	P1L4(Dialell- (karaj)	Ma046	1264/ 1	Ma105	Line2
Ma014	P11L6	Ma048	ZK472221	Ma106	Line3
Ma015	P13L3	Ma049	K1263/1/1388	Ma107	Line4
Ma016	P16L4 Kahriz	Ma050	4*/89	Ma108	Line5
Ma017	P3 L4 Kahriz	Ma051	9/K19/1	Ma109	Line6
Ma018	P1 L5 Kahriz	Ma052	3/K19/1 & (K19/1*/1392)	Ma110	Line7
Ma019	P19L5 Kahriz	Ma053	25* /89	Ma111	Line8
Ma020	P15L14	Ma054	2/ K19/1 & (K19/1)	Ma112	Line9
Ma021	P16L6 Kahriz	Ma055	K3640/S /55-N	Ma113	Line10
Ma022	P15L4	Ma057	20* /1389	Ma114	Line11
Ma023	P11 L9	Ma060	S2/ QPM/ SUKMA (Indonesia)	Ma115	Line12
Ma024	P9L6	Ma062	6* /88	Ma116	Line13
Ma025	P13L1	Ma064	4/ K19/1	Ma117	Line14
Ma026	P10L7	Ma065	66* /1388	Ma118	Line15
Ma027	P16L12 Kahriz	Ma066	48* /1390	Ma119	Line16
Ma028	P10L9	Ma072	K166 B/89 & (14* K166 B/1390)	Ma120	Line17
Ma030	Mo17	Ma073	K18-B /1392 (Isolated)	Ma121	Line18
Ma031	OH43/1- 42	Ma074	7/K19/1	Ma122	Line19
Ma032	K1264/ 5-1	Ma075	23* /89	Ma123	Line20

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش ارزیابی لاین‌های ذرت تحت شرایط تنش کمبود فسفر

Table 2. Some physical and chemical properties of the soil used in the experiment to evaluate maize lines under phosphorus deficiency stress conditions

Organic carbon (%)	Electrical conductivity (EC) (dS m ⁻¹)	pH	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Lime (%)	Type of texture	Sample name and depth (cm)
0.74	0.78	7.92	30	30	40	31.5	Clay loam	(0-30) Khan Arkhi
Available Zn (mg kg ⁻¹)	Available Fe (mg kg ⁻¹)	Available Mn (mg kg ⁻¹)	Available Cu (mg kg ⁻¹)	Organic matter (mg kg ⁻¹)	Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	Available potassium (mg kg ⁻¹)	Sample name and depth (cm)	
0.11	11	10.3	1.3	1.28	7.24	102	(0-30) Khan Arkhi	



شکل ۱- کشت گیاهان ذرت در گلدان و تکمیل مراحل رشدی گیاه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر
Figure 1. Cultivation of maize plants in pots and completion of plant growth stages under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

جدول ۳- شاخص های تحمل تنش محاسبه شده در آزمایش ارزیابی لاین های ذرت تحت شرایط تنش کمبود فسفر
Table 3. Stress tolerance indices calculated in the experiment evaluating maize lines under phosphorus deficiency stress conditions

Reference	Formula	Desirability
Fischer & Maurer, 1978	$SSI = \frac{1 - (Y_s / Y_p)}{1 - (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)}$	Low
Rosille & Hamblin, 1981	$HM = \frac{2 \times (Y_p \times Y_s)}{(Y_p + Y_s)}$	High
Bousslama & Schapaugh, 1984	$YSI = \frac{Y_{Si}}{Y_{Pi}}$	High
Rosille & Hamblin, 1981	$TOL = Y_p - Y_s$	Low
Fernandez, 1992	$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$	Low
Fernandez, 1992	$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s}$	High
Gavuzzi <i>et al.</i> , 1997	$YI = \frac{Y_{Si}}{\bar{Y}_s}$	High
Golestani & Assad, 1998	$Yr = 1 - \frac{Y_{Si}}{Y_{Pi}}$	Low
Rosille & Hamblin, 1981	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	High
Fischer & Maurer, 1978	$ATI = \frac{Y_{Pi} - Y_{Si}}{\bar{Y}_s / \bar{Y}_p} \times GMP$	High
Fischer <i>et al.</i> , 1998	$DI = \frac{Y_{Si} \times (\bar{Y}_{Si} / Y_p)}{\bar{Y}_s}$	High
Farshadfar & Sutka, 2002	$MpSTI = \frac{(Y_p)^2}{(\bar{Y}_p)^2} \times STI$	High
Farshadfar & Sutka, 2002	$MsSTI = \frac{(Y_s)^2}{(\bar{Y}_s)^2} \times STI$	High

SSI: Stress Susceptibility Index; HM: Harmonic Mean; YSI: Yield Stability Index; TOL: Tolerance Index; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometric Mean Productivity; YI: Yield Index; Yr: Yield reduction; MP: Mean Productivity; ATI: Abiotic Tolerance Index; DI: Drought resistance Index; MpSTI: Modified Stress Tolerance Index in normal conditions; MsSTI: Modified Stress Tolerance Index in stress conditions.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس در تمامی شاخص های تحمل و همچنین عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر اختلاف معنی داری بین لاین های ذرت مشاهده شد (جدول ۴) که حاکی از پتانسیل ژنتیکی و فیزیولوژیکی گیاه ذرت برای بقا و سازگاری در شرایط تنش کمبود فسفر است. از دید به‌نژادی این تنوع بالقوه فرصت مناسبی برای انتخاب لاین های متحمل به تنش کمبود فسفر و توسعه ارقام متحمل فراهم می کند. جهان‌دیده و همکاران (Jahandideh *et al.*, 2020) در بررسی تأثیر کاربرد هم‌زمان اسید هیومیک و کود فسفر بر شاخص های رشد رویشی و فراهمی فسفر در کلزا مشاهده کردند که این عوامل و اثرات متقابلشان بر همه صفات، به جز تعداد شاخه های فرعی در سطح احتمال یک

درصد معنی دار هستند. بیشترین وزن تر و خشک برگ و ساقه در تیمار مصرف ۱۳۳ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم و ۱ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم همراه با آب آبیاری به دست آمد. همچنین، غلظت فسفر در برگ و ساقه در تیمار مصرف ۱ گرم اسید هیومیک و ۱۳۳ میلی گرم فسفر، به ۹/۳ درصد رسید. مصرف هم‌زمان فسفر و اسید هیومیک، طول دوره گلدهی را از ۱۱۱ روز به ۱۹ روز کاهش داد. در نهایت، تیمار ترکیبی ۱۳۳ میلی گرم فسفر و ۱ گرم اسید هیومیک همراه با آب، بیشترین رشد رویشی و غلظت فسفر در بخش هوایی کلزا را به همراه داشت. مهربان و همکاران (Mehraban *et al.*, 2018) تفاوت معنی داری بین ۱۰ رقم گندم از لحاظ شاخص های YSI, HM, STI, SSI, GMP, MP, TOL و DI در تیمارهای تنش خشکی مشاهده کردند.

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد دانه و شاخص های تحمل تنش در ذرت تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

Table 4. Analysis of variance for grain yield and stress tolerance indices in maize under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

Source of variation	df	Mean square							
		YS	YP	SSI	HM	YSI	TOL	STI	GMP
Genotype	92	3190***	6673***	0.3598**	4123***	0.03881**	1568.5***	1.0639***	4306***
Experimental error	186	385	520	0.2284	351	0.02463	600.6	0.1061	318

Source of variation	df	Mean square						
		YI	Yr	MP	MpSTI	MsSTI	DI	ATI
Genotype	92	0.5479***	0.0388**	4540***	14.565***	12.913***	0.3799***	100787433***
Experimental error	186	0.0661	0.0246	302	2.163	3.491	0.0877	18324575

** and *** significant at the 1 and 0.1 percent probability levels. df: degree of freedom; SSI: Stress Susceptibility Index; HM: Harmonic Mean; YSI: Yield Stability Index; TOL: Tolerance Index; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometric Mean Productivity; YI: Yield Index; Yr: Yield reduction; MP: Mean Productivity; ATI: Abiotic Tolerance Index; DI: Drought resistance Index; MpSTI: Modified Stress Tolerance Index in normal conditions; MsSTI: Modified Stress Tolerance Index in stress conditions.

به میانگین عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر لاین های Ma003, Ma025, Ma027, Ma028 و Ma064 جزء لاین هایی بودند که اختلاف عملکرد دانه نسبتاً بالایی در مقایسه دو شرایط داشتند، این لاین ها به طور ژنتیکی پتانسیل بالایی برای تولید دانه در شرایط نرمال دارند. لاین های Ma038, Ma043, Ma044, Ma054, Ma083, Ma091, Ma098 و Ma107 در مقایسه دو شرایط اختلاف عملکرد پایینی داشتند و می توان آن ها را به عنوان لاین هایی با کارایی بالا در جذب و استفاده از فسفر معرفی کرد. در مطالعه رسول زاده و همکاران (Rasoulzadeh *et al.*, 2021) مقایسه دو شرایط فراهمی و تنش کمبود فسفر

میانگین شاخص های تحمل تنش کمبود فسفر

میانگین لاین ها در هر کدام از شاخص های تحمل تنش در جدول ۵ ارائه شده است. عملکرد دانه در شرایط بهینه از ۳۴/۷ (لاین Ma050) تا ۲۳۹/۰۳ (لاین Ma007) و در شرایط تنش کمبود فسفر از ۲۳/۹۷ (لاین Ma050) تا ۱۴۴/۹۲ (لاین Ma010) متغییر بود. بر اساس آزمون تی-ولچ (Welch t tetst) تفاوت معنی دار بین میانگین عملکرد دانه در شرایط بهینه (۱۱۳/۶۳) و تنش کمبود فسفر (۷۶/۳۱) مشاهده شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که تنش کمبود فسفر باعث کاهش ۳۲/۸۴ درصدی عملکرد دانه در لاین های خالص ذرت در مقایسه با شرایط بهینه شد. با توجه

عملکرد (GMP) لاین‌هایی متحمل‌تر هستند که مقدار بیشتری از شاخص داشته باشند (Fernandez, 1992). بر این اساس لاین‌های Ma007، Ma025، Ma026 و Ma028 با بیشترین مقدار شاخص میانگین هندسی عملکرد به ترتیب برابر با ۱۶۳/۷۰، ۱۶۵/۵۳، ۱۶۴/۴۹ و ۱۶۵/۲۳ به عنوان متحمل‌ترین لاین‌ها تحت شرایط تنش کمبود شناخته می‌شوند. مقادیر عددی بالای شاخص‌های HM، ATI، YSI، DI، YI و MSTI نیز بیانگر تحمل بیشتر به تنش می‌باشد. بنابراین بر اساس شاخص هارمونیک (HM) لاین-های Ma010، Ma025 و Ma028 با بیشترین مقادیر شاخص به ترتیب برابر با ۱۵۶/۸۳، ۱۵۹/۷۰ و ۱۵۸/۲۸ متحمل‌ترین و لاین‌های Ma032، Ma045 و Ma050 با کمترین مقادیر شاخص به ترتیب برابر با ۳۷/۷۳، ۳۷/۱۷ و ۲۸/۳۲ حساسترین لاین‌ها به تنش کمبود فسفر هستند. بر اساس شاخص ATI لاین‌های Ma007، Ma025، Ma026، Ma027 و Ma028 با بیشترین مقدار شاخص به‌عنوان متحمل‌ترین لاین‌ها شناسایی شدند. بر اساس شاخص YSI، لاین‌های Ma083، Ma107 و Ma022 و بر اساس شاخص DI، لاین-های Ma010، Ma022 و Ma024 متحمل‌ترین لاین‌ها بودند. شاخص عملکرد (YI) لاین‌ها را بر حسب میزان عملکرد آن-ها در محیط تنش رتبه‌بندی می‌کند؛ بر این اساس لاین‌های Ma010، Ma022 و Ma024 به ترتیب بالاترین جایگاه را به خود اختصاص دادند. بر اساس شاخص تحمل به تنش تغییر یافته (MpSTI)، لاین‌های Ma007، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028 و Ma064 در شرایط بهینه و لاین‌های Ma007، Ma009، Ma010، Ma024، Ma025، Ma026 و Ma028 در شرایط تنش کمبود فسفر (MsSTI) بالاترین مقادیر را داشتند. بر اساس شاخص‌های STI، MSTI، MP، HM، GMP، ATI، YSI، YI و DI لاین‌هایی متحمل محسوب می‌شوند که مقادیر بیشتری از شاخص‌های فوق را دارا باشند. بر این اساس لاین‌های Ma007، Ma010، Ma022، Ma024، Ma025، Ma026، Ma027 و Ma028 به-طور مشترک بر اساس شاخص‌های ذکر شده متحمل‌ترین لاین‌ها بودند. در تحقیقی ۳۱ ژنوتیپ برنج از نظر عملکرد دانه تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در دو فصل زراعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج، شاخص‌های

نشان داد که میانگین غلظت فسفر بخش هوایی در شرایط بهینه فسفر تقریباً دو برابر شرایط کمبود فسفر است. در شاخص حساسیت به تنش (SSI) مقادیر عددی پایین نشان‌دهنده تحمل بالای لاین‌ها بوده و هر لاینی که مقادیر بالاتری از این شاخص نشان دهد در برابر کمبود فسفر حساس‌تر می‌باشد (Fischer & Maurer, 1978). بر اساس SSI لاین‌های Ma113 و Ma007 به ترتیب با مقدار بیشتر شاخص (۱/۷۳۳ و ۱/۶۲۳) حساسیت بالا به تنش کمبود فسفر دارند. دو لاین Ma083 و Ma107 با شاخص SSI کمتر (۰/۲۵۰ و ۰/۲۵۳) تحمل قابل ملاحظه‌ای به تنش کمبود فسفر دارند. در شاخص STI مقادیر کمتر نشان‌دهنده تحمل بیشتر به تنش کمبود فسفر است. بر اساس این شاخص، لاین‌های Ma001، Ma010، Ma012، Ma013، Ma022، Ma073، Ma076، Ma083، Ma105، Ma106، Ma107، Ma109 و Ma118 به‌عنوان لاین‌های متحمل به تنش کمبود فسفر شناخته شدند. این لاین‌ها عملکرد بالاتر از میانگین در هر دو شرایط بهینه و کمبود فسفر داشتند. استفاده از این شاخص توسط محققان در چندین مطالعه از جمله: انشوری و همکاران (Anshori *et al.*, 2018) در برنج تحت تنش شوری، فرید و همکاران (Farid *et al.*, 2019b) در برنج تحت تنش خشکی، انور و همکاران (Anwar *et al.*, 2020) در گندم تحت تنش خشکی و کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2015) در ذرت تحت تنش خشکی گزارش شده است. بر اساس شاخص تحمل (TOL) لاین‌هایی متحمل محسوب می‌شوند که مقادیر کمتری از شاخص را نشان دهند (Rosielle & Hamblin, 1981). بر اساس این شاخص لاین-های Ma043، Ma050، Ma083 و Ma107 با مقدار TOL کمتر (به ترتیب ۹/۸۵، ۱۰/۷۷، ۵/۶۰ و ۴/۷۷) نسبت به کمبود فسفر متحمل‌تر هستند. نتیجه‌ی گزینش لاین‌ها بر اساس شاخص TOL با شاخص‌های SSI و STI همخوانی دارد. بر اساس شاخص میانگین بهره‌وری (MP) لاین‌هایی متحمل‌تر هستند که مقادیر بیشتری از این شاخص داشته باشند. بر همین اساس لاین‌های Ma026 (۱۷۸/۶۳)، Ma028 (۱۷۲/۵۵) و Ma025 (۱۷۱/۶۰) با مقدار بیشتر شاخص به‌عنوان متحمل‌ترین لاین‌ها تحت شرایط تنش کمبود شناخته می‌شوند. بر اساس شاخص میانگین هندسی

شاخص های YI و STI بهترین شاخص برای شناسایی ژنوتیپ های مناسب بودند (Manoj *et al.*, 2023). در ارزیابی ژنوتیپ های سورگوم تحت تنش کمبود نیتروژن، مشاهده شد که شاخص های MP، GMP و STI می توانند با انتخاب ژنوتیپ های نیتروژن-کارا به بهبود عملکرد سورگوم کمک کنند (Ararisa *et al.*, 2024).

جدول ۵- شاخص های تحمل تنش کمبود فسفر در لاین های ذرت مورد بررسی

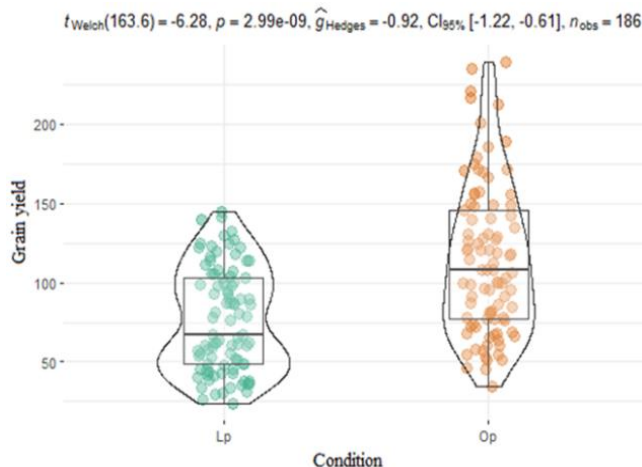
Table 5. Phosphorus deficiency stress tolerance indices in the studied maize lines

Line	YS	YP	SSI	HM	YSI	TOL	STI	GMP	YI	Yr	MP	ATI	DI	MpSTI	MsSTI
Ma001	122.15	149.00	0.557	133.97	0.820	26.85	1.417	134.77	1.590	0.180	135.58	5223	1.32	2.463	3.821
Ma002	102.80	169.63	1.003	119.63	0.670	66.83	1.273	127.07	1.340	0.330	136.22	11710	1.02	2.921	2.981
Ma003	86.53	179.23	1.557	115.85	0.493	92.70	1.193	124.01	1.127	0.507	132.88	17139	0.56	3.029	1.571
Ma004	121.77	171.47	0.843	135.57	0.723	49.70	1.603	140.66	1.587	0.277	146.62	8268	1.32	3.660	5.804
Ma005	113.63	185.23	1.230	139.52	0.600	71.60	1.700	144.34	1.477	0.400	149.43	14768	0.94	5.068	5.150
Ma006	129.33	166.70	0.687	145.65	0.773	37.37	1.693	146.82	1.683	0.227	148.02	8214	1.31	3.860	5.206
Ma007	113.57	239.03	1.623	152.24	0.470	125.47	2.137	163.70	1.480	0.530	176.30	29765	0.74	9.934	6.267
Ma008	105.83	149.97	0.840	122.46	0.723	44.13	1.220	125.11	1.380	0.277	127.90	8269	1.02	2.226	2.473
Ma009	132.18	189.07	0.900	155.18	0.707	56.88	1.957	157.87	1.720	0.293	160.63	13733	1.22	5.894	6.210
Ma010	144.92	171.07	0.463	156.83	0.847	26.15	1.920	157.41	1.890	0.153	157.99	6101	1.60	4.351	6.953
Ma011	124.28	157.33	0.637	138.81	0.790	33.05	1.513	139.80	1.620	0.210	140.81	6921	1.28	2.931	4.024
Ma012	99.13	128.90	0.583	111.20	0.810	29.77	1.027	112.59	1.290	0.190	114.02	5946	1.03	1.811	1.933
Ma013	103.77	126.27	0.547	113.89	0.823	22.50	1.017	114.45	1.350	0.177	115.02	3817	1.11	1.258	1.895
Ma014	87.00	130.63	1.007	103.67	0.670	43.63	0.880	106.19	1.133	0.330	108.82	6759	0.78	1.160	1.204
Ma015	102.88	134.77	0.713	116.58	0.767	31.88	1.077	117.69	1.340	0.233	118.83	5630	1.02	1.540	1.974
Ma016	67.47	99.90	0.887	79.85	0.713	32.43	0.537	81.73	0.877	0.287	83.68	4335	0.61	0.502	0.453
Ma017	89.80	120.90	0.693	100.99	0.773	31.10	0.833	103.10	1.170	0.227	105.35	4764	0.94	0.992	1.245
Ma018	86.37	142.43	1.213	107.47	0.603	56.07	1.030	110.88	1.123	0.397	114.40	9896	0.69	2.297	1.917
Ma019	92.73	127.37	0.820	106.45	0.733	34.63	0.933	108.22	1.210	0.267	110.05	5512	0.91	1.297	1.656
Ma020	100.30	148.17	0.997	116.21	0.670	47.87	1.173	120.00	1.307	0.330	124.23	7579	0.98	2.164	2.807
Ma021	107.37	139.57	0.707	120.85	0.770	32.20	1.163	122.15	1.397	0.230	123.47	5680	1.09	1.754	2.418
Ma022	141.07	156.10	0.293	148.17	0.907	15.03	1.707	148.37	1.837	0.093	148.58	3342	1.66	3.233	5.832
Ma023	89.37	140.57	0.967	107.82	0.683	51.20	1.000	111.30	1.163	0.317	114.97	9513	0.78	1.970	1.509
Ma024	140.02	174.53	0.570	155.06	0.813	34.52	1.917	156.16	1.823	0.187	157.28	8469	1.47	4.987	6.814
Ma025	127.07	216.13	1.270	159.70	0.583	89.06	2.153	165.53	1.653	0.417	171.60	21825	0.98	8.173	6.628
Ma026	122.75	234.50	1.383	152.66	0.547	111.75	2.147	164.49	1.600	0.453	178.63	24642	1.04	8.698	7.827
Ma027	114.17	212.00	1.350	147.30	0.557	97.83	1.880	154.94	1.487	0.443	163.08	23352	0.83	7.218	4.320
Ma028	124.33	220.77	1.320	158.28	0.567	96.43	2.143	165.23	1.620	0.433	172.55	23854	0.93	8.561	6.208
Ma030	60.27	95.43	1.087	72.44	0.647	35.17	0.440	75.06	0.787	0.353	77.85	3779	0.54	0.313	0.315
Ma031	55.30	84.83	0.990	66.48	0.677	29.53	0.370	68.24	0.720	0.323	70.07	3178	0.48	0.236	0.206
Ma032	30.87	51.23	1.140	37.73	0.623	20.37	0.123	39.34	0.403	0.377	41.05	1180	0.27	0.025	0.021
Ma033	40.95	71.70	1.367	51.57	0.550	30.75	0.247	53.87	0.533	0.450	56.33	2439	0.32	0.126	0.118
Ma034	35.80	60.23	1.267	44.20	0.587	24.43	0.177	46.04	0.467	0.413	48.02	1604	0.29	0.059	0.061
Ma035	51.34	91.30	1.167	64.60	0.620	39.96	0.377	67.84	0.667	0.380	71.32	4667	0.41	0.361	0.190
Ma036	58.33	86.97	1.047	69.79	0.657	28.62	0.483	71.20	0.763	0.343	72.64	3553	0.51	0.609	0.654
Ma037	61.78	124.73	1.560	80.64	0.487	62.95	0.613	86.58	0.807	0.513	93.26	7826	0.44	0.821	0.588
Ma038	35.07	51.33	0.940	41.19	0.690	16.27	0.140	42.17	0.457	0.310	43.20	1000	0.33	0.030	0.034
Ma039	44.27	80.87	1.433	56.72	0.530	36.60	0.293	59.55	0.580	0.470	62.57	3201	0.33	0.176	0.144
Ma040	65.47	98.77	1.047	76.47	0.657	33.30	0.507	79.15	0.853	0.343	82.12	3410	0.63	0.396	0.538
Ma042	41.76	68.93	1.163	51.47	0.620	27.18	0.223	53.35	0.543	0.380	55.35	2153	0.35	0.082	0.067
Ma043	44.98	54.83	0.577	49.30	0.813	9.85	0.197	49.60	0.587	0.187	49.91	692	0.49	0.048	0.077
Ma044	94.27	108.03	0.390	100.43	0.870	13.77	0.793	100.79	1.227	0.130	101.15	1987	1.08	0.723	1.262
Ma045	26.13	77.43	1.850	37.17	0.390	51.30	0.143	43.48	0.340	0.610	51.78	3392	0.14	0.077	0.018
Ma046	50.83	95.63	1.360	65.41	0.557	44.80	0.373	69.16	0.663	0.443	73.23	4698	0.37	0.284	0.173
Ma048	43.63	66.33	1.043	52.56	0.657	22.71	0.223	53.75	0.570	0.343	54.98	1806	0.38	0.076	0.075
Ma049	37.87	77.27	1.333	49.43	0.563	39.40	0.233	53.24	0.493	0.437	57.57	3748	0.27	0.185	0.062
Ma050	23.97	34.73	0.947	28.32	0.690	10.77	0.063	28.83	0.310	0.310	29.35	459	0.22	0.006	0.007
Ma051	29.57	54.73	1.380	38.26	0.547	25.17	0.127	40.15	0.387	0.453	42.15	1522	0.21	0.030	0.019
Ma052	40.43	63.80	0.923	49.03	0.697	23.37	0.223	50.54	0.523	0.303	52.12	2250	0.35	0.130	0.088
Ma053	107.77	155.57	0.890	126.34	0.710	47.80	1.290	128.95	1.403	0.290	131.67	9359	1.00	2.526	2.589
Ma054	52.52	67.63	0.643	58.88	0.790	15.12	0.287	59.47	0.683	0.210	60.08	1449	0.54	0.126	0.161
Ma055	38.17	72.03	1.453	49.72	0.523	33.87	0.217	52.33	0.500	0.477	55.10	2619	0.27	0.095	0.067
Ma057	60.43	80.17	0.740	68.57	0.757	19.72	0.373	69.42	0.787	0.243	70.30	2002	0.61	0.185	0.241
Ma060	33.43	45.70	0.860	38.56	0.720	12.28	0.127	39.06	0.433	0.280	39.57	744	0.32	0.029	0.037
Ma062	57.37	106.50	1.373	74.19	0.550	49.13	0.477	77.94	0.743	0.450	81.93	5829	0.41	0.449	0.278

ادامه جدول ۵-

Table 5. Continued

Line	YS	YP	SSI	HM	YSI	TOL	STI	GMP	YI	Yr	MP	ATI	DI	MpSTI	MsSTI
Ma064	117.66	200.67	1.270	148.28	0.587	83.01	1.890	153.62	1.530	0.413	159.16	19329	0.90	6.800	5.417
Ma065	49.00	96.00	1.487	64.69	0.513	47.00	0.367	68.47	0.637	0.487	72.50	4825	0.33	0.275	0.160
Ma066	120.07	170.87	0.893	140.27	0.707	50.80	1.587	142.83	1.563	0.293	145.47	10687	1.12	3.637	4.099
Ma072	67.50	120.70	1.350	86.41	0.557	53.20	0.633	90.17	0.877	0.443	94.10	7093	0.50	0.727	0.529
Ma073	111.50	130.30	0.420	119.66	0.860	18.80	1.123	120.27	1.453	0.140	120.90	3337	1.26	1.476	2.415
Ma074	48.27	65.13	0.783	55.09	0.743	16.87	0.247	55.88	0.627	0.257	56.70	1379	0.48	0.085	0.109
Ma075	52.27	91.13	1.177	64.52	0.613	38.87	0.357	67.90	0.680	0.387	71.70	3983	0.44	0.244	0.169
Ma076	80.53	100.17	0.550	89.09	0.820	19.63	0.647	89.72	1.047	0.180	90.35	2906	0.85	0.610	0.795
Ma077	63.37	108.17	1.237	79.40	0.593	44.80	0.533	82.50	0.827	0.407	85.77	5551	0.50	0.512	0.389
Ma079	36.62	52.53	0.867	42.55	0.717	15.92	0.153	43.54	0.477	0.283	44.58	1049	0.35	0.038	0.041
Ma080	49.10	81.07	1.150	60.46	0.620	31.97	0.307	62.71	0.640	0.380	65.08	3027	0.40	0.162	0.126
Ma083	61.80	67.40	0.250	64.42	0.920	5.60	0.323	64.51	0.807	0.080	64.60	544	0.74	0.118	0.220
Ma085	38.63	60.40	1.093	46.58	0.640	21.77	0.193	48.00	0.507	0.360	49.52	1622	0.34	0.080	0.078
Ma089	43.23	77.80	1.277	52.93	0.583	34.57	0.273	56.36	0.563	0.417	60.52	2739	0.37	0.161	0.163
Ma091	60.53	76.23	0.600	67.11	0.803	15.70	0.353	67.74	0.787	0.197	68.38	1590	0.64	0.162	0.225
Ma096	55.63	81.83	1.047	64.59	0.657	26.20	0.373	66.60	0.727	0.343	68.73	2231	0.54	0.225	0.341
Ma098	33.77	46.00	0.813	38.79	0.733	12.23	0.120	39.33	0.440	0.267	39.88	701	0.33	0.020	0.025
Ma100	61.23	99.50	1.163	75.61	0.617	38.27	0.477	77.95	0.797	0.383	80.37	4490	0.49	0.392	0.331
Ma104	97.63	128.00	0.707	110.68	0.767	30.37	0.990	111.74	1.273	0.233	112.82	5237	0.97	1.387	1.755
Ma105	99.23	121.07	0.550	109.07	0.820	21.83	0.940	109.60	1.293	0.180	110.15	3585	1.06	1.104	1.646
Ma106	45.03	57.03	0.587	50.14	0.810	12.00	0.200	50.59	0.587	0.193	51.03	984	0.47	0.059	0.073
Ma107	53.57	58.33	0.253	55.84	0.917	4.77	0.253	55.89	0.697	0.083	55.95	401	0.64	0.079	0.151
Ma108	90.52	114.27	0.637	100.65	0.790	23.75	0.807	101.51	1.180	0.210	102.39	3492	0.95	0.841	1.225
Ma109	98.35	119.17	0.533	107.76	0.827	20.82	0.950	108.26	1.280	0.173	108.76	3531	1.06	1.302	1.958
Ma110	59.87	86.37	0.957	70.54	0.687	26.50	0.410	71.81	0.780	0.313	73.12	2805	0.55	0.261	0.296
Ma111	87.23	120.67	0.797	100.51	0.737	33.43	0.810	102.20	1.137	0.263	103.95	5185	0.84	0.946	1.059
Ma112	62.07	107.80	1.180	76.72	0.610	45.73	0.500	80.61	0.807	0.390	84.93	5573	0.52	0.481	0.335
Ma113	30.54	73.37	1.733	42.79	0.433	42.83	0.173	47.11	0.397	0.567	51.95	3088	0.17	0.079	0.028
Ma114	77.72	118.27	1.033	93.68	0.660	40.55	0.727	95.81	1.010	0.340	97.99	5958	0.67	0.891	0.838
Ma115	81.47	99.70	0.537	89.44	0.823	18.23	0.630	90.01	1.060	0.177	90.58	2486	0.87	0.493	0.715
Ma116	92.93	149.20	1.133	113.80	0.627	56.25	1.067	117.36	1.207	0.373	121.06	9739	0.78	1.835	1.622
Ma117	43.30	67.90	1.107	52.34	0.637	24.60	0.237	53.94	0.563	0.363	55.60	1965	0.37	0.099	0.103
Ma118	87.23	103.30	0.470	94.38	0.847	16.07	0.697	94.83	1.137	0.153	95.27	2237	0.97	0.577	0.926
Ma119	78.43	117.50	1.020	93.73	0.667	39.07	0.720	95.82	1.020	0.333	97.97	5478	0.69	0.779	0.819
Ma120	48.37	78.07	1.193	57.24	0.607	29.70	0.300	59.95	0.630	0.393	63.22	2253	0.45	0.149	0.182
Ma121	76.00	112.40	0.987	89.46	0.677	36.40	0.670	91.77	0.987	0.323	94.20	4746	0.71	0.700	0.840
Ma122	105.40	155.63	0.950	124.90	0.687	50.23	1.267	127.66	1.370	0.313	130.52	9633	0.95	2.435	2.442
Ma123	116.10	145.73	0.620	129.04	0.793	29.63	1.357	129.98	1.510	0.207	130.92	5882	1.21	2.602	3.683



شکل ۲- نمودار جعبه‌ای میانگین عملکرد دانه در لاین‌های ذرت تحت شرایط نرمال و تنش کمبود فسفر؛

(Op) میانگین در شرایط بهینه و (Lp) میانگین در شرایط تنش کمبود فسفر

Figure 2. Box plot of average grain yield in maize lines under normal and phosphorus deficiency stress conditions; (Op) Average under optimal conditions and (Lp) Average under phosphorus deficiency stress conditions

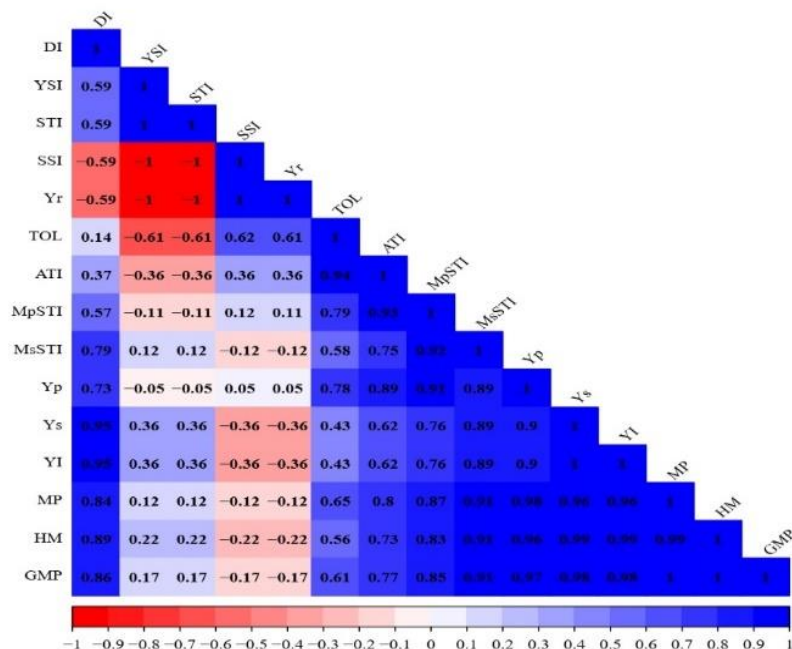
همبستگی شاخص های تحمل تنش با عملکرد

نتایج بررسی همبستگی عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر با شاخص های تحمل تنش نشان داد (شکل ۳) که عملکرد دانه در شرایط بهینه با شاخص های HM, GMP, YI, MP, MsSTI, MpSTI, DI و ATI همبستگی مثبت و معنی دار (به ترتیب با مقدار ۰/۹۶، ۰/۹۷، ۰/۹۰، ۰/۹۸، ۰/۹۱، ۰/۸۹، ۰/۷۳ و ۰/۸۹) دارد. عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود فسفر با شاخص های HM, GMP, YI, MP, MsSTI, MpSTI, DI و ATI همبستگی مثبت و معنی دار (به ترتیب با مقدار ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۶، ۰/۷۶، ۰/۸۹، ۰/۹۵ و ۰/۶۲) نشان داد. همچنین عملکرد دانه در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر با شاخص تحمل (TOL) همبستگی مثبت به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۴۳ نشان داد. عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود فسفر همبستگی مثبت با شاخص STI و منفی با شاخص SSI نشان داد. یک شاخص مناسب باید در هر دو شرایط با عملکرد دانه همبستگی معنی دار داشته باشد (Mitra, 2001). بنابراین شاخص های فوق مناسب برای غربال لاین های متحمل به تنش کمبود فسفر با عملکرد بالا در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر هستند. تورچی و همکاران (Toorchi et al., 2012) نشان دادند که همبستگی بین MP، GMP، Ys و Yp مثبت است. در مطالعه انجام شده توسط فرشادفر و الیاسی (Farshadfar & Elyasi, 2012) و فرشادفر و همکاران (Farshadfar et al., 2012a,b) عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش با MSTI همبستگی مثبت نشان داد. فرشادفر و همکاران (Farshadfar et al., 2001) نشان دادند که مناسب ترین شاخص ها برای انتخاب ارقام متحمل به خشکی، شاخص هایی هستند که همبستگی نسبتاً بالایی با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش نشان دهند. در مطالعه شاخص های تحمل به تنش در ۲۰ ژنوتیپ گندم تحت تنش گرما (Poudel et al., 2021)، شاخص های TOL، SSI همبستگی منفی قوی با عملکرد دانه در شرایط تنش نشان دادند. به طور مشابه، عملکرد دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش همبستگی قوی و مثبت با MP، GMP و STI نشان داد، بنابراین محققین مذکور پیشنهاد کردند می توان از این شاخص ها برای انتخاب ژنوتیپ های پر محصول در هر

دو شرایط استفاده کرد. در بررسی پاسخ هیبریدهای ذرت به تنش خشکی با استفاده از شاخص های تحمل تنش، همبستگی مثبت بین شاخص های STI، MP و GMP با عملکرد در هر دو شرایط مشاهده شد (Khatibi et al., 2022). محققین مذکور پیشنهاد کردند می توان از این شاخص ها به طور مؤثر برای انتخاب هیبریدهای پر محصول استفاده کرد. در آزمایشی همبستگی معنی داری بین عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش با شاخص های MP، GMP، STI، YI، HM و MSTI مشاهده شد (Amiri et al., 2014). در مطالعه سیدزوار و همکاران (Seyedzavar et al., 2023) در ذرت عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش همبستگی پایین با شاخص TOL، همبستگی منفی و معنی دار با شاخص SSI و همبستگی مثبت و معنی دار با شاخص های DI، RDI، YSI، HM، GMP، STI، MP و SIIG نشان داد، بنابراین هیبریدهای با مقادیر عددی بیشتر برای این شاخص ها، عملکرد بالایی در شرایط تنش و نرمال داشتند. ایشان این شاخص ها را به عنوان شاخص های مناسب برای شناسایی هیبریدهای پر محصول در هر دو شرایط محیطی معرفی کردند. در ارزیابی سازگاری ژنوتیپ های جو با خشکی بر اساس شاخص های تنش شاخص های GMP، MP، DC و STI با وزن خشک بوته همبستگی مثبت نشان دادند. مقادیر بالاتر این شاخص ها نشان دهنده سازگاری بیشتر به خشکی است. برعکس، SSI و TOL با وزن خشک بوته همبستگی منفی نشان داد. مقادیر بالاتر این شاخص ها نشان دهنده سازگاری کمتر به خشکی است. ضریب تغییرات برای همه شاخص های تنش در محدوده ۰/۷ تا ۳۳/۵۱ درصد بود (Song et al., 2024). در تجزیه و تحلیل چند متغیره برای انتخاب ژنوتیپ های امیدبخش سورگوم تحت تنش خشکی، شاخص های STI، MP، GMP، MRP و YI که همبستگی مثبت با عملکرد در هر دو شرایط داشتند به عنوان بهترین شاخص معرفی شدند. بنابراین می توان از آنها به طور مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ های متحمل به شرایط کمبود رطوبت استفاده کرد (Karthik & Hanamaratti, 2025). در مطالعه ای که بر روی تأثیر کود اوره فسفات بر نیشکر انجام شد، مشاهده گردید که میزان فسفر موجود در خاک، رابطه مستقیمی با عملکرد نیشکر (از

نیشکر و به خصوص با تأثیر مثبت بر تعداد ساقه در هر واحد سطح، طول و قطر ساقه، باعث افزایش محصول نیشکر شده است (Mahohi *et al.*, 2023).

نظر میزان شکر قابل استحصال) دارد. این یافته با ارتباط بین فسفر خاک و میزان فسفر در برگ و غلاف نیشکر، همچنین تعداد، طول و قطر ساقه، همخوانی دارد. به عبارتی دیگر، فسفر موجود در خاک با افزایش میزان فسفر در گیاه

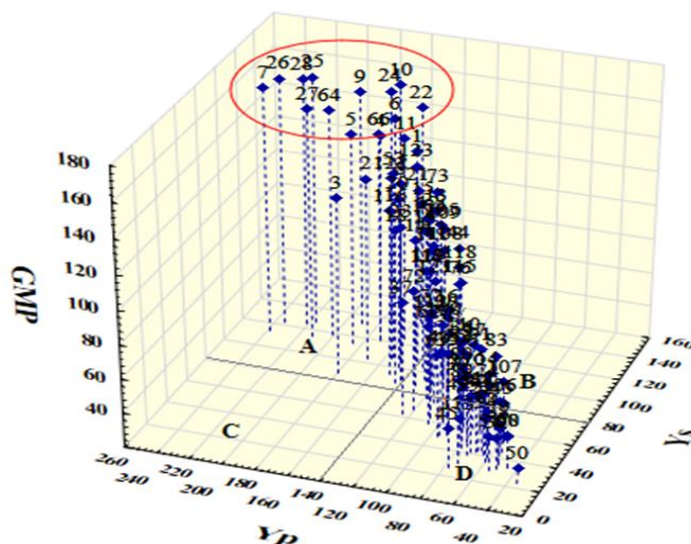


شکل ۳- ضرایب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر و شاخص های تحمل به تنش کمبود فسفر. جعبه های آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده ضرایب همبستگی مثبت و منفی هستند؛ به طوری که افزایش شدت رنگ دلالت بر ضرایب بزرگتر دارد. جعبه های سفید نشان دهنده ضرایب غیرمعنی دار هستند

Figure 3. Correlation coefficients Pearson between grain yield under optimal conditions and phosphorus deficiency stress and phosphorus deficiency stress tolerance indices. Blue and red boxes indicate positive and negative correlation coefficients, respectively, with increasing color intensity indicating larger coefficients. White boxes indicate insignificant coefficients.

کمبود فسفر بودند. یافته های این تحقیق با نتایج امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2014) مطابقت داشت. با توجه به گزارش نقوی و همکاران (Naghavi *et al.*, 2016)، ژنوتیپ-هایی که از طریق نمودار سه بعدی شاخص های تحمل تنش شناسایی شده اند و در نمودار بای پلات در کنار بردارهای مربوط به بهترین شاخص های تحمل تنش مانند MP، GMP، STI و HM قرار دارند، نشان دهنده تحمل بالای آن ها در برابر تنش هستند.

در نمودار سه بعدی عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر با شاخص GMP، لاین های Ma005، Ma006، Ma007، Ma009، Ma010، Ma011، Ma022، Ma024، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028، Ma064 و Ma066 که در گروه A قرار گرفتند، دارای عملکرد بالا در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر بودند (شکل ۴). در گروه B و C هیچ لاینی قرار نگرفت. سایر لاین ها که در گروه D قرار گرفتند دارای عملکرد پایینی در هر دو شرایط بهینه و تنش



شکل ۴- نمودار سه بعدی پراکنش لاین های ذرت براساس عملکرد دانه در شرایط بهینه (Yp)، عملکرد دانه در شرایط تنش کمبود فسفر (Ys) و شاخص GMP

Figure 4. 3D plot of dispersion of maize lines based on grain yield under optimal (Yp) and phosphorus deficiency stress conditions (Ys) and GMP index

همچنین همبستگی منفی با شاخص های STI و YSI داشت. بنابراین بر مبنای این مؤلفه، لاین هایی انتخاب می شوند که سازگاری خصوصی به شرایط بدون تنش دارند. بنابراین با این مؤلفه می توان لاین هایی را که دارای TOL و SSI بالا و عملکرد پایین در شرایط کمبود فسفر هستند را شناسایی و معرفی نمود. به همین دلیل می توان مؤلفه دوم را به عنوان مؤلفه حساسیت به تنش کمبود فسفر نام گذاری کرد. از چنین لاین هایی می توان برای تولید جمعیت های در حال تفرق که معمولاً والدین باید حالت متقابل داشته باشند استفاده نمود. براساس نمودار بای پلات (شکل ۵)، لاین های Ma003، Ma007، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028 و Ma062 که در سمت چپ و ناحیه بالای بای پلات و در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص های مهم تحمل تنش کمبود فسفر؛ GMP، MP، Yp، MsSTI، ATI و MsSTI قرار دارند به عنوان لاین های متحمل با عملکرد بالا شناخته می شوند و لاین های Ma037، Ma045، Ma049، Ma062، Ma065، Ma072 و Ma113 که در مجاورت شاخص های مهم حساسیت به کمبود فسفر TOL و SSI قرار گرفتند، به عنوان لاین های حساس معرفی می شوند.

تجزیه به مؤلفه های اصلی شاخص های تحمل تنش کمبود فسفر

تجزیه به مؤلفه های اصلی بر مبنای شاخص های تحمل تنش و عملکرد تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر انجام شد (جدول ۶). به منظور گزینش لاین های متحمل به تنش کمبود فسفر و با عملکرد بالا در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر، از نمودار بای پلات استفاده شد. در نمودار بای پلات لاین ها در گروه های مشخصی قرار گرفتند که مرتبط با میانگین عملکرد و تحمل آن ها به تنش کمبود فسفر است. بر اساس نتایج تجزیه به مؤلفه های اصلی ۶۲/۲۰ درصد از تغییرات کل داده ها مربوط به مؤلفه اول است که دارای همبستگی منفی و بالایی با شاخص های HM، Ys، YI، GMP، MP، Yp، DI، MpSTI، MsSTI، TOL و ATI بوده و همبستگی مثبت با شاخص SSI و Yr دارد. بنابراین می توان مؤلفه اول را به عنوان مؤلفه تحمل تنش کمبود فسفر نامگذاری کرد. روی بای پلات حاصله با توجه به مقادیر بالای این مؤلفه می توان لاین های متحمل به تنش کمبود فسفر با عملکرد بالا را انتخاب کرد. دومین مؤلفه ۳۴/۴۰ درصد از تغییرات کل داده ها را توجیه کرد و همبستگی مثبت و بالایی با شاخص های SSI و Yr نشان داد. این مؤلفه

اصلی اول ۹۶/۳۴ درصد از تغییرات کل را توضیح دادند و مؤلفه اول به عنوان یک عملکرد بالقوه پایدار (Potentially stable yield) معرفی شد. نمودار بای پلات براساس مؤلفه اصلی و شاخص های تحمل به خشکی نشان داد که شاخص-های MP، GMP، STI، HM، MRP، REI، MSTIK1، MSTIK2 و YI بهترین شاخص ها برای غربال لاین های اینبرد متحمل هستند (Shahrokhi *et al.*, 2020).

در ارزیابی تحمل به خشکی توده های بومی گندم نان نتایج تجزیه به مؤلفه های اصلی در شاخص های تحمل به خشکی نشان داد که دو مؤلفه اول و دوم ۹۸/۲۱ درصد واریانس را توجیه می کنند. مؤلفه اول، مؤلفه مقاومت به خشکی و مؤلفه دوم مؤلفه حساسیت به تنش نامیده شد (Bavandpuri *et al.*, 2021). در بررسی شاخص های تحمل به تنش برای شناسایی لاین های اینتروگرسیون متحمل به فسفر کم مشتق شده از *Oryza rufipogon* Griff. مطالعات تجزیه همبستگی، تجزیه به مؤلفه های اصلی و خوشه بندی نشان داد که STI، YSI و GMP شاخص های ایده آلی برای انتخاب ژنوتیپ هایی هستند که در هر دو شرایط تنش و نرمال عملکرد خوبی دارند. بر اساس این شاخص ها، لاین های اینتروگرسیون IL-24، IL-29 و IL-32 به عنوان لاین های متحمل به فسفر کم شناسایی شدند که عملکرد دانه بهتری را در هر دو شرایط تنش (YS) و نرمال (YP) نشان دادند (Basavaraj *et al.*, 2021). در ارزیابی کارایی عملکرد و شاخص های تحمل به تنش ژنوتیپ های گندم در شرایط آبی و دیم، شاخص های MP، GMP و STI همبستگی مثبت و معنی داری با عملکرد در شرایط آبی و عملکرد در شرایط دیم نشان دادند. از این رو شاخص های MP، GMP و STI می توانند برای شناسایی ژنوتیپ های پرمحصول و متحمل به تنش استفاده شوند. بر اساس تجزیه به مؤلفه های اصلی و بای پلات، لاین های NL1506 و NL1508 به عنوان ژنوتیپ های گندم پرمحصول و متحمل به تنش پیشنهاد شدند (Poudel *et al.*, 2023).

در نمودار بای پلات زاویه بین بردارها میزان همبستگی بین متغیرها را نشان می دهد. گل آبادی و همکاران (Golabadi *et al.*, 2006) با استفاده از تجزیه به مؤلفه های اصلی روی شاخص های تحمل تنش خشکی در گندم دوروم، دو مؤلفه اصلی معرفی کردند که مؤلفه اول ۷۰ درصد تغییرات کل را تبیین می کرد و با Yp، Ys، MP، STI و MP همبستگی مثبت و معنی داری داشت. این مؤلفه به عنوان مؤلفه پتانسیل عملکرد و تحمل به خشکی نامیده شد.

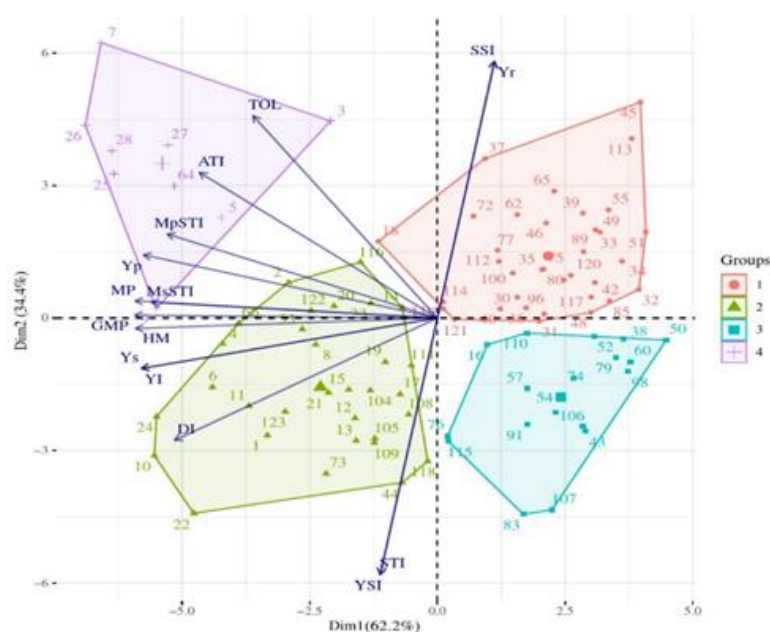
مؤلفه دوم حدود ۲۸ درصد تغییرات را تبیین می کرد و شاخص های TOL و SSI همبستگی معنی داری داشت و شاخص تحمل به تنش نام گذاری شد. کریمزاده و همکاران (Karimzade *et al.*, 2012) در ارزیابی شاخص های تحمل در گندم دوروم به این نتیجه رسیدند که مؤلفه اول دارای همبستگی مثبت و معنی داری با شاخص های MP، GMP و STI است. این مؤلفه به عنوان مؤلفه پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش خشکی نامگذاری شد. در این مطالعه، مؤلفه دوم که همبستگی مثبت و بالایی با SSI و TOL داشت به-عنوان مؤلفه حساسیت به تنش نام گذاری گردید. در مطالعه تحمل به تنش کمبود نیتروژن در ژنوتیپ های برنج تجزیه به مؤلفه های اصلی نشان داد که اولین مؤلفه ۶۹/۵ درصد از تغییرات کل را تبیین می کند و با شاخص های MP، GMP، STI و TOL همبستگی مثبت و معنی داری دارد. در این مطالعه مؤلفه دوم ۲۸/۵ درصد از تغییرات کل شاخص های تحمل به تنش کمبود نیتروژن را توجیه می نمود (Lestari *et al.*, 2019). بهرامی و همکاران (Bahrami *et al.*, 2014) و درستکار و همکاران (Dorostkar *et al.*, 2015) رویکرد مشابهی را برای دسته بندی PC1 و PC2 بر اساس همبستگی آن ها با YP، YS و شاخص های تحمل تنش دنبال کردند. کایا و همکاران (Kaya *et al.*, 2002) پیشنهاد کردند که ژنوتیپ های پایدار دارای مقادیر PC1 بالاتر و PC2 کمتری هستند.

در ارزیابی شاخص های تحمل به خشکی برای غربال برخی لاین های اینبرد ذرت شیرین، نتایج نشان داد سه مؤلفه

جدول ۶- مقادیر ویژه، سهم نسبی و تجمعی و بردارهای ویژه دو مؤلفه اصلی اول برای عملکرد دانه در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

Table 6. Eigenvalues, relative and cumulative contributions, and eigenvectors of the first two principal components (PC1 and PC2) for grain yield under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

Indices	PC1	PC2
Stress Yield (Ys)	-0.973	-0.191
Potential Yield (Yp)	-0.966	0.241
Stress Susceptibility Index (SSI)	0.189	0.975
Harmonic Mean (HM)	-0.992	-0.039
Yield Stability Index (YSI)	-0.190	-0.974
Tolerance Index (TOL)	-0.605	0.769
Stress Tolerance Index (STI)	-0.190	-0.974
Geometric Mean Productivity (GMP)	-0.994	0.012
Yield Index (YI)	-0.973	-0.191
Yield reduction (Yr)	0.190	0.974
Mean Productivity (MP)	-0.993	0.066
Abiotic Tolerance Index (ATI)	-0.782	0.554
Drought resistance Index (DI)	-0.864	-0.464
Modified Stress Tolerance Index in normal condition (MpSTI)	-0.887	0.319
Modified Stress Tolerance Index in stress condition (MsSTI)	-0.940	0.061
Eigenvalues	9.32	5.15
Percentage of variation	62.20	34.40
Cumulative percentage	62.20	96.60



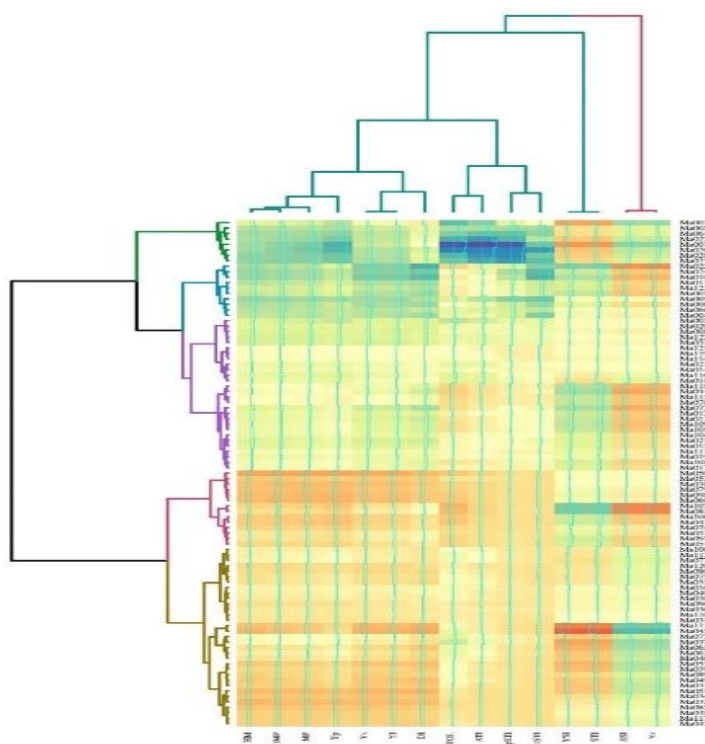
شکل ۵- نمودار بای پلات لاین های ذرت و شاخص های تحمل به تنش کمبود فسفر بر اساس دو مؤلفه اصلی اول
Figure 5. Biplot graph of maize lines and indices of tolerance to phosphorus deficiency stress based on the first two principal components

تجزیه کلاستر لاین های ذرت بر شاخص های تحمل تنش

کمبود فسفر

گروه بندی لاین های ذرت بر مبنای شاخص های تحمل تنش و عملکرد تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر انجام شد (شکل ۶). با توجه به نمودار حرارتی حاصل از تجزیه خوشه-ای ملاحظه می شود که لاین های Ma003، Ma005، Ma007، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028 و Ma064 از نظر شاخص های HM، GMP، MP، YI، DI، MpSTI، MsSTI، YSI و ATI در خوشه اول قرار دارند که همان ژنوتیپ های با پتانسیل عملکرد بالا و متحمل به کمبود فسفر هستند. خوشه دوم شامل لاین های Ma001، Ma002، Ma004، Ma006، Ma008، Ma009، Ma010، Ma011، Ma012، Ma013، Ma014، Ma015، Ma017، Ma018، Ma019، Ma020، Ma021، Ma022، Ma023، Ma024، Ma044، Ma053، Ma066، Ma073، Ma076، Ma104، Ma105، Ma108، Ma109، Ma111، Ma114، Ma115، Ma116، Ma118، Ma119، Ma121، Ma122 و Ma123 است که در شرایط کمبود فسفر عملکرد نسبتاً بالایی دارند؛ می توان گفت این لاین ها از قدرت جذب بالا و تبدیل فسفر غیرقابل جذب به قابل جذب بالا برخوردار هستند. سایر لاین ها که در خوشه سوم Ma038، Ma043، Ma050، Ma052، Ma053، Ma054، Ma057، Ma060، Ma074، Ma079، Ma083، Ma091، Ma098، Ma106 و Ma107 و خوشه چهارم Ma016، Ma030، Ma031، Ma032، Ma033، Ma034، Ma035، Ma036، Ma037، Ma039، Ma040، Ma042، Ma044، Ma045، Ma046، Ma048، Ma049، Ma051، Ma055، Ma062، Ma065، Ma072، Ma075، Ma077، Ma080، Ma085، Ma089، Ma096، Ma100، Ma112، Ma113، Ma117 و Ma120 قرار گرفتند، همان

لاین های دارای عملکرد پایین در شرایط بهینه و کمبود فسفر هستند و در عین حال حساس به کمبود فسفر می باشند. با توجه به حداکثر فاصله ژنتیکی بین این لاین ها از نظر عملکرد و نیز تحمل به کمبود فسفر می توان برای تجزیه ژنتیکی شاخص های تحمل به کمبود فسفر و نیز عملکرد در شرایط بهینه و کمبود فسفر از دورگ گیری بین این لاین ها استفاده کرد. در مطالعه کامرانی و همکاران (Kamrani *et al.*, 2019) بر اساس شاخص های تحمل، ۲۴ ژنوتیپ گندم نان در چهار گروه طبقه بندی شدند و ژنوتیپ های قرار گرفته در گروه اول در اکثر شاخص ها بالاتر از میانگین کل بودند، آن ها این ژنوتیپ ها را به عنوان ژنوتیپ های متحمل معرفی کردند. در مطالعه ای با استفاده از تجزیه خوشه ای بر اساس شاخص های تحمل تنش و گروه بندی ژنوتیپ ها نشان دادند که نتایج حاصل از این روش با تجزیه به مؤلفه های اصلی مطابقت دارد (Mohammadi *et al.*, 2011). در گزارشی ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم با تجزیه خوشه-ای به سه گروه تقسیم شد و ژنوتیپ های گروه دوم متحمل به تنش معرفی شدند. میانگین عملکرد این گروه در اکثر شاخص ها بیشتر از میانگین کل بود اما در رابطه با شاخص های ATI، SSPI، SSI و TOL پایین تر از میانگین کل بودند (Mohammadnia *et al.*, 2016). در تجزیه خوشه ای هشت هیبرید ذرت با استفاده از صفات زراعی و شاخص های تحمل به خشکی، هیبریدها در سه گروه متفاوت قرار گرفتند. هیبریدهای SC703 و SC647 به عنوان هیبریدهای متحمل به تنش خشکی در یک گروه، هیبرید SC700 به تنهایی در گروه دوم به عنوان هیبرید حساس و سایر هیبریدها نیز در گروه سوم به عنوان هیبریدهای نیمه متحمل به خشکی گروه بندی شدند (Seyedzavar *et al.*, 2023).



شکل ۶- نمودار حرارتی لاین‌های ذرت و شاخص‌های تحمل به تنش کمبود فسفر
Figure 6. Heatmap of maize lines and indices of tolerance to phosphorus deficiency stress

کمبود فسفر می‌باشند. این شاخص‌ها معیار انتخاب ارزشمندی برای شناسایی ارقام متحمل به تنش کمبود فسفر هستند. بر اساس این شاخص‌ها لاین‌های Ma005، Ma006، Ma007، Ma009، Ma010، Ma011، Ma022، Ma024، Ma025، Ma026، Ma027، Ma028 و Ma064 به عنوان لاین‌های امیدبخش برای هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر شناسایی شدند که می‌توان از این لاین‌ها برای بهبود ژنتیکی ارقام ذرت برای افزایش تحمل به تنش کمبود فسفر خاک استفاده نمود. شناسایی لاین‌های متعدد که در شرایط کمبود فسفر عملکرد خوبی داشته باشند، به نژادگران گیاهی این امکان را می‌دهد که از این لاین‌ها به عنوان پایه‌های ژنتیکی برای توسعه و بهبود نسل‌های جدید استفاده کنند. این امر می‌تواند به تولید گیاهانی با ویژگی‌های مطلوب کمک کند.

نتیجه‌گیری کلی

فسفر یک عنصر غذایی پرمصرف ضروری برای رشد و نمو طبیعی ذرت است. کمبود فسفر منجر به کاهش قابل توجه بهره‌وری تولید ذرت می‌شود. یکی از بهترین و قابل دوام‌ترین رویکردهای سازگار با محیط زیست برای مقابله با تنش کمبود فسفر، توسعه و استقرار ژنوتیپ‌های ذرت متحمل به کمبود فسفر است. در برنامه‌های اصلاحی، برای توسعه ارقام متحمل به فسفر پایین خاک، بهتر است انتخاب بر اساس شاخص‌های تحمل از عملکرد دانه در هر دو شرایط بهینه و تنش باشد. با توجه به نتایج تحلیل چند متغیره (همبستگی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای) شاخص‌های ATI، DI، MsSTI، MpSTI، MP، YI، GMP، HM همبستگی قوی با YP و YS نشان دادند. بنابراین می‌توان گفت که مؤثرترین شاخص‌های تحمل برای انتخاب لاین‌هایی با پتانسیل عملکرد مطلوب در شرایط بهینه و تنش،

References

- Aberkane H., Belkadi B., Kehel Z., Filali-Maltouf A., Tahir I.S.A., Meheesi S., et al. 2021. Assessment of drought and heat tolerance of durum wheat lines derived from interspecific crosses using physiological parameters and stress indices. *Agronomy-Basel*, 11: 695.
- Amiri R., Bahraminejad S., Sasani Sh., and Ghobadi M. 2014. Genetic evaluation of 80 irrigated bread wheat genotypes for drought tolerance indices. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20: 101-111.
- Anshori M.F., Purwoko B.S., Dewi I.S., Ardie S.W., Suwarno W.B. 2018. Determination of selection criteria for screening of rice genotypes for salinity tolerance. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 50(3): 279-294.
- Anwar H.A., Perveen R., Mansha M., Abid M., Sarwar Z.M., Aatif H.M., Umar Uud Sajid M., Aslam H.M.U., Alam M.M., Rizwan M., Ikram R.M., Alghanem S.M.S., Rashid A., Khan KA. 2020. Assessment of grain yield indices in response to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(7): 1818-1823.
- Ararisa K., Mohammed W., Tesso T., Tesso B., and Liben F. 2024. Yield -based evaluation of low nitrogen tolerance indices for screening of [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes. *Discover Agriculture*, 2(26).
- Ashraf A., El-Mohsen A., Abd El-Shafi M. A., Gheith E. M. S. and Suleiman H. S. 2015. Using Different Statistical Procedures for Evaluating Drought Tolerance Indices of Bread Wheat genotypes. *Advance in Agriculture and Biology*, 3(1): 19-30.
- Bahrami F., Arzani A., and Karimi V. 2014. Evaluation of yield-based drought tolerance indices for screening safflower genotypes. *Agronomy Journal*, 106: 1219–1224.
- Basavaraj P.S., Gireesh C., Muralidhara Bharamappanavara, Manoj C.A., Ishwarya Lakshmi V.G., Honnappa Ajitha V., Senguttuvel P., Sundaram R.M., and Anantha M.S. 2021. Stress tolerance indices for the identification of low phosphorus tolerant introgression lines derived from *Oryza rufipogon* Griff. Plant Genetic Resources, *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*; 1–11.
- Bavandpouri F., Farshadfar E., Farshadfar M. 2021. Evaluation of drought tolerance of bread wheat indigenous populations using yield-based indices and integrated selection index. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(4): 873-886.
- Bayuelo-Jiménez J.S., Gallardo-Valdéz M., Pérez-Decelis V.A., Magdaleno Armas L., Ochoa I., and Lynch J.P. 2011. Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha Plateau under contrasting phosphorus availability. *Field Crops Research*, 121(3): 350–362.
- Bihanta M.R., Shirkavand M., Hasanpour J., and Afzalifar A. 2018. Evaluation of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress condition. *Journal of Crop Breeding*, 9(24): 119-136. (In Persian)
- Cadot S., Bélanger G., Ziadi N., Morel C., and Sinaj S. 2018. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 112: 417–433.
- Calderón-Vázquez C., Alatorre-Cobos F., Simpson-Williamson J., and Herrera-Estrella L. 2009. Maize under phosphate limitation. In J.L. Bennetzen & S.C. Hake (Eds.), *Handbook of maize: Its biology*, pp. 381–404. (Springer Link)
- Chen Y.L., Rengel Z., Palta J., and Siddique K.H. 2018. Efficient root systems for enhancing tolerance of crops to water and phosphorus limitation. *Indian Journal of Plant Physiology*, 23: 689–696.
- Childers D.L., Corman J., Edwards M., and Elser J.J. 2011. Sustainability challenges of phosphorus and food: Solutions from closing the human phosphorus cycle. *Bioscience*, 61(2): 117–124.
- Dorostkar S., Dadkhodaie A., and Heidari B. 2015. Evaluation of grain yield indices in hexaploid wheat genotypes in response to drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61: 397–413.

- Farid Musa Y., Nasaruddin Amin R.M., Ridwan I. 2019b. Tolerance of Wheat mutant (*Triticum aestivum* L.) genotypes in lowland against limited water availability. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 235: 012028. (Indonesian)
- Farshadfar E., and Elyasi P. 2012. Screening quantitative indicators of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces. *European Journal of Experimental Biology*, 2(3): 577-584.
- Farshadfar E., and Sutka J. 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. *Acta Agronomica Hungarica*, 50: 411– 416.
- Farshadfar E., Farshadfar M., Dabiri S. 2012a. Comparison between effective selection criteria of drought tolerance in bread wheat landraces of Iran. *Annals of Biological Research*, 3(7): 3381- 3389.
- Farshadfar E., Ghannadha M.R., Sutka J., Zahravi M. 2001. Genetic analysis of drought tolerance in wheat. *Plant Breeding*, 114: 542-544.
- Farshadfar E., Pour Siahbidi MM., Pour Aboughadareh A.R. 2012b. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(13): 891-903.
- Fathi Baheri S., Javanshir A., Kazemi H., Ahari Zad S. 2003. Evaluation of indicators of drought tolerance in spring barley genotypes. *Journal of Agricultural Science*, 13: 95–105.
- Fernandez G.C. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance PP.257-270. In: Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress. *Taiwan*, 13-16.
- Fischer R.A., and Maurer R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29: 897-912.
- Golabadi M., Arzani A., and Mirmohammadi Maibody S.A.M. 2006. Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 1(5): 162-171.
- Hajibabaei M., Azizi F. 2011. Evaluation of drought tolerance indices in some new hybrids of corn. *Electronic Journal of Crop Production*, 3: 139–155.
- Hickey L.T., Hafeez A.N., Robinson H., Jackson S.A., Leal-Bertioli S.C.M., Tester M., Gao C., Godwin I.D., Hayes B.J., Wulff B.B.H. 2019. Breeding Crops to Feed 10 Billion. *Nature Biotechnology*, 37: 744–754.
- Irfan M., Aziz T., Maqsood M.A., Bilal H.M., Siddique K.H., and Xu M. 2020. Phosphorus (P) use efficiency in rice is linked to tissue-specific biomass and P allocation patterns. *Scientific Reports*, 10(1): 4278.
- Jahandideh A., Barani Motlagh M., Dordipour E., Reza Ghorbani Nasrabadi R., Nazari T. 2020. The effects of co-application of humic acid and phosphorous fertilizer on vegetative growth indices and phosphorous availability in canola. *Applied Soil Research*, 8(1): 68-78.
- Kamrani M., Mehraban A., and Shiri M. 2019. Identification of drought tolerant genotypes in dryland wheat using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 10(28): 13-26. (In Persian)
- Karimzade H., Emam S.Y., and Muri S. 2012. Responses of yield, yield components and tolerance indices in bread and durum wheat cultivars to post-anthesis drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 43(1):151-162. (In Persian)
- Karthik R., and Hanamaratti N.G. 2025. Multivariate analysis and multitrait genotype-ideotype distance index (MGIDI) for selection of promising genotypes under drought stress in post rainy sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 16(1): 57 – 69. doi: 10.37992/2025.1601.007
- Kaya Y., Palta C., and Taner S. 2002. Additive main effects and multiplicative interactions analysis of yield performances of in bread wheat genotypes across environments. *Turkish Journal of Agriculture Forestry*, 26: 275–279.
- Khan U., and Mohammad F. 2016. Application of stress selection indices for assessment of nitrogen tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 26(1): 201-210.
- Khatibi A., Omrani S., Omrani A., Shojaei S.H., Mousavi S.M.N., Illés Á., Bojtor, C., Nagy J. 2022. Response of Maize Hybrids in Drought-Stress Using Drought Tolerance Indices. *Water*, 14: 1012.

- Kumar R., Kaul J., Dubey R.B., Singode A., Chikkappa G.K., Manivannan A., Debnath M.K. 2015. Assessment of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) based on different indices. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 47(3): 291-298.
- Lan Y.Z., Chawade A., Kuktaite R., Johansson E. 2022. Climate change impact on wheat performance—effects on vigour, plant traits and yield from early and late drought stress in diverse lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 23: 3333. doi: 10.3390/ijms23063333
- 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.
- Li K., Xu Z., Zhang K., Yang A., and Zhang J. 2007. Efficient production and characterization for maize inbred lines with low-phosphorus tolerance. *Plant Science*, 172(2): 255–264.
- Lun Y.Q., Cheng Y.K., Tang P.G., and Zhao R.T. 2007. The effects of low phosphorus stress on morphological and physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) landraces. *Agriculture Sciences in China*, 6(5): 559–566.
- Mahohi A., Khatinzadeh H. A., Nouri M., Dariush Nikfar D. 2023. Consequences of urea phosphate fertilizer application on the nutrient status and quantitative and qualitative yield of sugarcane. *Applied Soil Research*, 11(2): 13-27.
- Manoj C.A., Muralidhara B., Basavaraj P.S., Honnappa, Gireesh C., Sundaram R.M., Senguttuvel P., Suneetha K., Rao L.V.S., Kemparaju K.B., Brajendra P., Kumar R.M., Rathod S., Salimath P.M., Lokesh R. and Anantha M.S. 2023. Evaluation of rice genotypes for low phosphorus stress and identification of tolerant genotypes using stress tolerance indices. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 83(1): 24-31.
- Mehraban A., Tobe A., Gholipouri Ab., 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(1): 8-14.
- Mitra J. 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Current Science India*, 80: 758-762.
- Mohammadi H., Ahmadi A., Moradi F., Abasi A., Postini K., Jodi M., and Fatehi F. 2011. Evaluation of important traits for wheat yield improvement under drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 42: 373-385.
- Mohammadnia Sh., Asghari A., Sofalian O., Mohammaddoust Chamanabad H., Karimizadeh R. and Shokouhian A.A. 2016. Evaluation of durum wheat lines using drought stress indices. *Journal of Crop Breeding*, 8(4): 11-23. (In Persian)
- Mollasadeghi V., Valizadeh M., Shahryariand R. A. and Imani A. 2011. Evaluation of end drought tolerance of 12 wheat genotypes by stress indices. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(2): 241-247.
- Naghavi M.R., Moghaddam M., Toorchi M., Shakiba M.R. 2016. Evaluation of spring wheat cultivars based on drought resistance indices. *Journal of Crop Breeding*, 8: 192-207. (In Persian)
- Pacheco I., Ferreira R., Correia P., Carvalho L., Dias T., and Cruz C. 2021. Microbial consortium increases maize productivity and reduces grain phosphorus concentration under field conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1): 232–237.
- Poudel M.R., Neupane M. P., Panthi B., Bhandari R., Nyaupane Sh., Dhakal A., Paudel H. 2023. Yield performance and stress tolerance indices of wheat genotypes under irrigated and rainfed condition. *Journal of Innovative Agriculture*, 10: 10- 20.
- Poudel P.B., Poudel M.R., and Puri R.R. 2021. Evaluation of heat stress tolerance in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using stress tolerance indices in western region of Nepal. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5: 100179.
- Rameeh V. 2015. Nitrogen deficiency stress indices of seed yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. *AGROVOC country report - Republic of Moldova*, 158(1/161): 89-96.

- Rasoulzadeh Aghdam M., Darvishzadeh R., Sepehr E. and Alipour H. 2021. Evaluation of the efficiency of oily sunflower inbred lines (*Helianthus annuus* L.) in terms of adsorption and consumption of phosphorus in soil. *Applied Soil Research*, 8(4): 143-157.
- Rosielle A.A., and Hamblin J. 1981. Theoretical aspects of selections for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21: 943-946.
- Sabouri A., Dadras A.R., Azari M., Kouchesfahani A.S., Taslimi M., Jalalifar R. 2022. Screening of rice drought-tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Scientific Reports*, 12: 2163.
- Sánchez-Reinoso A.D., Ligarreto-Moreno G.A., Restrepo-Díaz H. 2020. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 19: 99–107. doi: 10.1016/S2095-3119(19)62620-1
- Seyedzavar J., Norouzi M., Aharizad S., and Moghaddam M. 2023. Evaluation of Water Stress Tolerance of Maize Hybrids using Tolerance Indices. *Journal of Crop Breeding*, 5(45): 105-114.
- Shahbazi K., and Besharati H. 2013. Overview of agricultural soils fertility status. *Journal Management System*, 1(1): 1-15. (In Persian)
- Shahrokhi M., Khavari Khorasani S., and 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.
- Shojaei S.H., Mostafavi K., Omrani A., Illés Á., Bojtor C., Omrani S., Mousavi S.M.N., and Nagy J. 2022. Comparison of maize genotypes using drought -tolerance indices and graphical analysis under normal and humidity stress conditions. *Plants*, 11: 942.
- Simpson R.J., Oberson A., Culvenor R.A., Ryan M.H., Veneklaas E.J., Lambers H., Lynch J.P., Ryan P.R., Delhaize E., Smith F.A., Smith S.E., Harvey P.R., and Richardson A.E. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant and Soil*, 349: 89–120.
- Singh S., Sengar R. S., Kulshreshtha N., Datta D., Tomar R. S., Rao V. P., Garg D. and Ojha A. 2015. Assessment of multiple tolerance indices for salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agricultural Science*, 7(3): 49-57.
- Song R., Shi P., Xiang L., He Y., Dong Y., Miao Y., and Qi J. 2024 Evaluation of barley genotypes for drought adaptability: based on stress indices and comprehensive evaluation as criteria. *Frontiers in Plant Science*, 15:1436872.
- Sun Y., Mu C., Chen Y., Kong X., Xu Y., Zheng H., Zhang H., Wang Q., Xue Y., Li Z., Ding Z., and Liu X. 2016. Comparative transcript profiling of maize inbreds in response to long-term phosphorus deficiency stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109: 467–481.
- Toorchi M., Naderi R., Kanbar A., Shakiba M.R. 2012. Response of spring canola cultivars to sodium chloride stress. *Annals of Biological Research*, 2(5): 312-322.
- Yang X.J., and Finnegan P. M. 2010. Regulation of phosphate starvation responses in higher plants. *Annals of Botany*, 105(4): 513–526.
- Yaseen M., and Malhi S.S. 2009. Differential growth performance of 15 wheat genotypes for grain yield and phosphorus uptake on a low phosphorus soil without and with applied phosphorus fertilizer. *Journal of Plant Nutrition*, 32(6): 1015–1043.
- Zhang H., Xu R., Xie C., Huang C., Liao H., Xu Y., Wang J., and Li W. 2015. Large-scale evaluation of maize germplasm for low-phosphorus tolerance. *PLoS One*, 10(5): e0124212.