

## Original article

# Genetic diversity and relationships among morphological traits in maize (*Zea mays* L.) lines under optimal and phosphorus-deficient conditions

Maryam Razmjou<sup>1</sup>, Reza Darvishzadeh<sup>2\*</sup>, Hadi Alipour<sup>3</sup>, Ebrahim Sepehr<sup>4</sup>

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, Western Azerbaijan, 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

Received 7 November 2024; Revised 26 January 2025; Accepted 8 February 2025

## Extended abstract

### Introduction

Phosphorus (P) is an essential and non-renewable nutrient critical for crop productivity worldwide. Phosphorus deficiency is a major abiotic constraint that substantially limits crop yield. Because phosphorus is inherently immobile in soil, identifying novel genotypes with efficient phosphorus uptake and utilization under low-phosphorus conditions is essential. Maize is a major cereal crop cultivated worldwide; therefore, improving its phosphorus-use efficiency is crucial for optimizing maize production. This study aimed to evaluate the genetic diversity of maize lines under optimal and phosphorus-deficient conditions.

### Materials and methods

Genetic diversity among 93 maize lines was evaluated based on morphological traits under optimal and phosphorus-deficient conditions in pot culture. Pots were arranged outdoors in a completely randomized design (CRD) with three replications at the Faculty of Agriculture, Urmia University (45.5°E, 37.37°N, 1320 m above sea level). The pots were filled with soil collected from the Urmia University research farm, which contained low phosphorus levels (7.2 mg kg<sup>-1</sup>). A total of 558 pots, each containing 15 kg of soil, were prepared and divided into two groups of 279 pots each. In both groups, pots were filled with a mixture of low-phosphorus soil and sand in a 2:1 ratio. All pots were fertilized with nitrogen at 6.0 g kg<sup>-1</sup> (applied in three splits during the growing season), potassium sulfate at 9.0 g kg<sup>-1</sup>, iron sulfate at 1.0 g kg<sup>-1</sup>, manganese sulfate at 0.15 g kg<sup>-1</sup>, zinc sulfate at 0.66 g kg<sup>-1</sup>, copper sulfate at 0.20 g kg<sup>-1</sup>, and boric acid at 0.014 g kg<sup>-1</sup>. In the optimal-phosphorus group, triple superphosphate was applied at 4.0 g kg<sup>-1</sup>, whereas no phosphorus fertilizer was added in the control group. After pollination, various morphological traits were measured. Statistical analyses, including analysis of variance (ANOVA), descriptive statistics, correlation analysis, stepwise regression, path analysis, cluster analysis, and factor analysis, were performed using R software.

### Results and discussion

Phosphorus deficiency caused a significant reduction in the mean values of morphological traits compared with optimal conditions. Stepwise regression and path analysis indicated that under optimal conditions, weight of ear without husk (WEWH), ear wood weight (EW), ear diameter (ED), cob diameter (CD), ear length (EL), and ear-up leaves (EUL) were the most important traits affecting grain yield. Under phosphorus-deficient conditions, WEWH, EL, ED, 100-grain weight (HGW), and biological

\* Corresponding author: Reza Darvishzadeh; E-Mail: [r.darvishzadeh@urmia.ac.ir](mailto:r.darvishzadeh@urmia.ac.ir)

yield (BY) were the key contributors to grain yield. Cluster analysis grouped the maize lines into three clusters under optimal conditions and two clusters under phosphorus-deficient conditions. Under both optimal and phosphorus-deficient stress conditions, the first cluster comprised high-yielding lines that can be utilized in developing maize hybrids tolerant to phosphorus deficiency. Factor analysis revealed that grain yield (GY), weight of ear together with husk (WETH), WEWH, and tassel height (TH), which exhibited high communalities in both environments, are key traits for selecting lines tolerant to phosphorus deficiency.

### **Conclusion**

Significant differences were observed among the evaluated maize lines under optimal and phosphorus-deficient conditions. Nevertheless, lines 5, 7, 10, 24, 28, 48, 64, 114, and 121 exhibited suitable grain performance across both environments and can be utilized in breeding programs to develop phosphorus-efficient genotypes.

**Keywords:** Cluster analysis, Factor analysis, Maize, Phosphorus deficiency stress

## مطالعه تنوع ژنتیکی و روابط بین صفات مورفولوژیک در لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

مریم رزمجو<sup>۱</sup>، رضا درویش زاده<sup>۲\*</sup>، هادی علیپور<sup>۳</sup>، ابراهیم سپهر<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی سابق دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳. دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴. استاد، گروه خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: تحلیل عاملی تجزیه خوشه‌ای تنش کمبود فسفر ذرت	فسفر یک منبع ضروری و غیرقابل تجدید است که برای بهره‌وری محصولات در سراسر جهان حیاتی است. فسفر در طبیعت غیر متحرک است و بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های جدید با جذب و استفاده کارآمد از فسفر در یک محیط با فسفر ناکافی بسیار مهم است. در این تحقیق، تنوع ژنتیکی ۹۳ لاین خالص ذرت با استفاده از صفات مورفولوژیک تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلدانی بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش کمبود فسفر باعث کاهش معنی‌دار میانگین صفات مورفولوژیک شد. نتایج رگرسیون گام‌به‌گام و تجزیه علیت نشان داد که تحت شرایط بهینه؛ صفات وزن بلال بدون غلاف، وزن چوب‌بلال، قطر چوب‌بلال، طول بلال و تعداد برگ بالای بلال و تحت شرایط تنش کمبود فسفر؛ صفات وزن بلال بدون غلاف، طول بلال، قطر بلال، وزن صد دانه و عملکرد بیولوژیک مهم‌ترین صفات مؤثر بر عملکرد دانه بودند. در تجزیه خوشه‌ای، لاین‌های ذرت در شرایط بهینه در سه خوشه و تحت شرایط تنش کمبود فسفر در دو خوشه گروه‌بندی شدند. در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر، خوشه اول شامل لاین‌هایی با عملکرد بالا بود که می‌توان در پروژه‌های تولید هیبریدهای ذرت متحمل به تنش کمبود فسفر استفاده نمود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عاملی، صفات عملکرد دانه، وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف و ارتفاع تا تاسل که میزان اشتراک بالایی در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر داشتند، به عنوان صفات کلیدی جهت انتخاب لاین‌های متحمل به تنش کمبود فسفر معرفی می‌شوند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰	
تاریخ انتشار:	
تابستان ۱۴۰۵	
۲۵۸-۲۳۱: (۲) ۱۹	

### مقدمه

عناصر پرمصرفی مثل نیتروژن و فسفر در کنار عناصر کم‌مصرف برای رشد و تولید عملکرد مطلوب در گیاهان لازم هستند (Zabet et al., 2014). فسفر برای بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند گلدهی، جوانه‌زنی بذر و تشکیل میوه در گیاهان زراعی ضروری است (Panigrahy et al., 2009). در زراعت‌های متوالی، خاک پس از کشت مکرر از نظر یک یا چند ماده غذایی فقیر و بی‌اثر شده که استفاده از کود برای حفظ بهره‌وری را در مزرعه ضروری می‌نماید (Das et al., 2023). فسفر پس از نیتروژن یک عامل کلیدی برای افزایش عملکرد است (Salimpour et al., 2010; Adeyemi et al., 2020) و در بین غلات، ذرت به آن نیاز بیشتری دارد (Kettering and Czymmek, 2012; Qureshi et al., 2020). بیش از ۳۰ تا ۴۰ درصد از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان دارای کمبود فسفر هستند (Von Uexküll and Mutert, 1995)؛ بنابراین، در چنین خاک‌هایی با افزودن فسفر از طریق کودهای معدنی حاوی فسفر به خاک نیاز فسفر در محصولات پرمصرف تأمین می‌شود (Bialeski, 1973). منبع اصلی فسفر غیرآلی، سنگ فسفات است که تنها در چند کشور جهان قابل استحصال است (Cordell and White, 2013). با پیش‌بینی مواجهه با

عناصر پرمصرفی مثل نیتروژن و فسفر در کنار عناصر کم‌مصرف برای رشد و تولید عملکرد مطلوب در گیاهان لازم هستند (Zabet et al., 2014). فسفر برای بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند گلدهی، جوانه‌زنی بذر و تشکیل میوه در گیاهان زراعی ضروری است (Panigrahy et al., 2009). در زراعت‌های متوالی، خاک پس از کشت مکرر از نظر یک یا چند ماده غذایی فقیر و بی‌اثر شده که استفاده از کود برای حفظ بهره‌وری را در مزرعه ضروری می‌نماید (Das et al., 2023). فسفر پس از نیتروژن یک عامل کلیدی برای افزایش عملکرد است (Salimpour et al., 2010; Adeyemi et al., 2020) و در بین غلات، ذرت به آن نیاز بیشتری دارد (Kettering and Czymmek, 2012; Qureshi et al., 2020). بیش از ۳۰ تا ۴۰ درصد از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان دارای کمبود فسفر هستند (Von Uexküll and Mutert, 1995)؛ بنابراین، در چنین خاک‌هایی با افزودن فسفر از طریق کودهای معدنی حاوی فسفر به خاک نیاز فسفر در محصولات پرمصرف تأمین می‌شود (Bialeski, 1973). منبع اصلی فسفر غیرآلی، سنگ فسفات است که تنها در چند کشور جهان قابل استحصال است (Cordell and White, 2013). با پیش‌بینی مواجهه با

ذرت مهم است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تنوع ژنتیکی لاین‌های خالص ذرت و معرفی صفات کلیدی برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی تحت شرایط تنش کمبود فسفر است.

### مواد و روش‌ها

تعداد ۹۳ لاین خالص ذرت (جدول ۱) در دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر به‌صورت گلدانی در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ در فضای باز در دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه ارزیابی شدند. از خاک مناطق مختلف نمونه‌های خاک تهیه و به آزمایشگاه تجزیه خاک گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه ارسال شد. بر اساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۲)، خاک منطقه خان ارخی (Khan Arkhi) در محال نازلوچایی با مقدار فسفر پایین (۷/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم؛ *Shahbazi and Bishart, 2014*) برای انجام آزمایش انتخاب شد. برای پُر کردن گلدان‌ها، خاک از منطقه خان ارخی از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتر برداشته‌شده و به محل آزمایش در دانشگاه ارومیه انتقال یافت. نخست خاک موردنظر با کودهای نیتروژن به مقدار ۰/۶ گرم بر کیلوگرم، سولفات پتاسیم به مقدار ۰/۹ گرم بر کیلوگرم، سکوسترین آهن به مقدار ۰/۱ گرم بر کیلوگرم، سولفات منگنز به مقدار ۰/۱۵ گرم بر کیلوگرم، سولفات روی به مقدار ۰/۰۶۶ گرم بر کیلوگرم، سولفات مس به مقدار ۰/۰۲ گرم بر کیلوگرم و اسیدبوریک به مقدار ۰/۰۱۴ گرم بر کیلوگرم، تقویت شدند. سپس تلّ خاک به دو قسمت برای استفاده در آزمایش شرایط نرمال و تنش کمبود فسفر تقسیم شد. به خاک آزمایش نرمال علاوه بر کودهای گفته‌شده کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۰/۴ گرم بر کیلوگرم اضافه شد. تعداد ۵۵۸ گلدان ۱۵ کیلویی تهیه و سپس به دو گروه ۲۷۹ تایی تقسیم شدند. گلدان‌ها با خاک تهیه‌شده برای هر یک از شرایط به نسبت دو قسمت خاک و یک قسمت ماسه پر شدند. یک قسمت از کود نیتروژن موردنظر (۰/۲ گرم بر کیلوگرم از ۰/۶ گرم بر کیلوگرم) به‌مانند سایر کودها در ابتدا و دو قسمت دیگر آن طی مرحله رشد به گلدان‌ها اضافه شد. تعداد ۴ عدد بذر ذرت در هر گلدان کشت شد و بعد از جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در مرحله چهار برگی عمل تُنک کردن انجام گرفت و دو گیاه در هر گلدان نگهداری شد. در مرحله جوانه‌زنی، آبیاری گلدان‌ها هر سه روز یک‌بار به‌وسیله

کمبود فسفر در آینده، کشورهایمانند چین و ایالات‌متحده صادرات فسفر به سایر کشورهای جهان را به دلایل استراتژیک متوقف کرده‌اند (*Van de Wiel et al., 2016*). در چنین شرایطی توسعه ارقام با راندمان مصرف فسفر بالا (بیش‌ازپیش ضروری به نظر می‌رسد. گیاهان فسفر-کارا در مواجهه با تنش کمبود فسفر، برخی از تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی را متحمل می‌شوند تا بتوانند فسفر کافی جذب نمایند (*Vance et al., 2003*).

ذرت یک محصول استراتژیک است که به علت موارد مصرف مختلف و کیفیت و ارزش غذایی بالا، در کشورهای جهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در اکثر نقاط ایران ذرت به‌عنوان دومین محصول بعد از غلات پاییزه کشت می‌شود (*Fathi and Zeidali, 2021; Maleki et al., 2020*). علاوه بر تأمین غذا، روغن و علوفه، ذرت اخیراً به علت داشتن پتانسیل بالای تولید بیوماس، به‌عنوان یک گیاه جهت تولید سوخت زیستی؛ یک منبع تجدیدپذیر انرژی، اهمیت فراوانی پیدا کرده است (*Masood et al., 2020*). بیش از ۳۰ درصد ذرت تولیدشده در جهان تحت تأثیر کمبود فسفر در خاک قرار می‌گیرد (*Vance et al., 2003*). کمبود فسفر قابل‌دسترس در خاک، پتانسیل عملکرد و کیفیت دانه ذرت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (*Calderón-Vázquez et al., 2009; Li et al., 2007*). کمبود فسفر باعث ایجاد گیاهان کوتاه‌قد با ریشه‌های توسعه‌نیافته، اختلال در گرده‌افشانی و ضعیف پر شدن دانه‌ها و تولید بلال‌های کوچک و تغییر شکل یافته می‌شود (*Tang et al., 2020; Wen et al., 2017*). تفاوت در کارایی ژنوتیپ‌های مختلف ذرت برای جذب و استفاده از مواد مغذی خاک، فرصتی برای استفاده کامل از پتانسیل گیاه برای استفاده کارآمد از منابع مختلف فسفر خاک فراهم می‌کند (*Chen et al., 2018; Yao et al., 2016; Sun et al., 2007*). بررسی پتانسیل ژنتیکی ژنوتیپ‌های ذرت برای فسفر-کارایی در راستای انتخاب والدین مناسب برای توسعه هیبریدهای متحمل به کمبود فسفر راه مؤثری برای استفاده کارآمد از منابع محدود فسفر هستند (*Bayuelo-Jiménez et al., 2011; Cadot et al., 2018; Simpson et al., 2011; Yaseen and Malhi, 2015; Zhang et al., 2009*). گرانت و همکاران (*et al., 2001*) گزارش دادند که عرضه کافی فسفر برای استقرار زود هنگام محصول و در نتیجه برای عملکرد نهایی

Table 1. The names of studied maize lines

جدول ۱. اسامی لاین‌های ذرت مورد مطالعه

کد لاین Line code	نام لاین Line name	مرکز تحقیقات Research center	کد لاین Line code	نام لاین Line name	مرکز تحقیقات Research center
Ma001	P3L2	Kermanshah	Ma051	9/K19/1	Mashhad
Ma002	P11L2	Kermanshah	Ma052	3/K19/1 & (K19/1*/1392)	Mashhad
Ma003	P15L16 Kahriz	Mashhad	Ma053	25*/89	Mashhad
Ma004	P9L3 Kahriz	Kermanshah	Ma054	2/ K19/1 & (K19/1)	Mashhad
Ma005	P13L2	Kermanshah	Ma055	K3640/S /55-N	Mashhad
Ma006	P19L7 Kahriz	Kermanshah	Ma057	20*/1389	Mashhad
Ma007	P6L1	Kermanshah	Ma060	S2/ QPM/ SUKMA (Indonesia)	Mashhad
Ma008	P19 L3 Kahriz	Kermanshah	Ma062	6*/88	Mashhad
Ma009	P14L1 Kahriz	Kermanshah	Ma064	4/ K19/1	Mashhad
Ma010	P11L7	Kermanshah	Ma065	66*/1388	Mashhad
Ma011	P14L2	Kermanshah	Ma066	48*/1390	Mashhad
Ma012	P10L5	Kermanshah	Ma072	K166 B/89 & (14* K166 B/1390)	Mashhad
Ma013	P1L4(Dialell-(Karaj))	Kermanshah	Ma073	K18-B /1392 (Isolated)	Mashhad
Ma014	P11L6	Kermanshah	Ma074	7/K19/1	Mashhad
Ma015	P13L3	Kermanshah	Ma075	23*/89	Mashhad
Ma016	P16L4 Kahriz	Kermanshah	Ma076	70*/1388	Mashhad
Ma017	P3 L4 Kahriz	Kermanshah	Ma077	10/K 19/1	Mashhad
Ma018	P1 L5 Kahriz	Kermanshah	Ma079	138*/89	Mashhad
Ma019	P19L5 Kahriz	Kermanshah	Ma080	K19 */1392 (Isolated)	Mashhad
Ma020	P15L14	Kermanshah	Ma083	1*/89 (Red cob)	Mashhad
Ma021	P16L6 Kahriz	Kermanshah	Ma085	1390/Popcorn- 53 or 54 (Line)	Mashhad
Ma022	P15L4	Kermanshah	Ma089	172*/89	Mashhad
Ma023	P11 L9	Kermanshah	Ma091	8/K19/1	Mashhad
Ma024	P9L6	Kermanshah	Ma096	67*/88	Mashhad
Ma025	P13L1	Kermanshah	Ma098	1387/193/Chase*/S2	Mashhad
Ma026	P10L7	Kermanshah	Ma100	36-N/88-K3653/2	Mashhad
Ma027	P16L12 Kahriz	Kermanshah	Ma104	Line1	Karaj2
Ma028	P10L9	Kermanshah	Ma105	Line2	Karaj2
Ma030	Mo17	Karaj	Ma106	Line3	Karaj2
Ma031	OH43/1- 42	Karaj	Ma107	Line4	Karaj2
Ma032	K1264/ 5-1	Karaj	Ma108	Line5	Karaj2
Ma033	R59(Maternal)	Karaj	Ma109	Line6	Karaj2
Ma034	K615/1	Karaj	Ma110	Line7	Karaj2
Ma035	B73	Karaj	Ma111	Line8	Karaj2
Ma036	OH 43/1-42 (Paternal)	Karaj	Ma112	Line9	Karaj2
Ma037	R59 (Paternal)	Karaj	Ma113	Line10	Karaj2
Ma038	W37A	Karaj	Ma114	Line11	Karaj2
Ma039	R319	Karaj	Ma115	Line12	Karaj2
Ma040	R59	Karaj	Ma116	Line13	Karaj2
Ma042	W153R	Karaj	Ma117	Line14	Karaj2
Ma043	K1533 Popcorn	Karaj	Ma118	Line15	Karaj2
Ma044	R59xR319(Maternal line of DC370) (SC)	Karaj	Ma119	Line16	Karaj2
Ma045	B73(RFC OR CMS)	Karaj	Ma120	Line17	Karaj2
Ma046	1264/ 1	Karaj	Ma121	Line18	Karaj2
Ma048	ZK472221	Karaj	Ma122	Line19	Karaj2
Ma049	K1263/1/1388	Mashhad	Ma123	Line20	Karaj2
Ma050	4*/89	Mashhad	-	-	-

### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر با رویه glm و آزمون LSD در نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام گرفت. محاسبه آماره‌های توصیفی،

آبپاش، ولی بعد از جوانه‌زدن بذرها (سبز شدن مزرعه) هرروز یکبار با سامانه آبیاری قطره‌ای انجام گرفت. بعد از گلدهی، صفات مختلف مورفولوژیک (جدول ۳) و درصد فسفر اندازه‌گیری شد.

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده منطقه خان ارخی در آزمایش

Table 2. Some physical and chemical properties of the soil used from the Khan Arkhi region in the experiment

عمق نمونه Sample depth	نوع بافت Type of texture	آهک Lime	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	pH عصاره pH of extract	هدایت عصاره Conduction of extract	کربن آلی Organic carbon	
عمق نمونه Sample depth	پتاسیم قابل جذب Absorbable Potassium	فسفر قابل جذب Available phosphorus	ماده آلی Organic matter			مس Cu	منگنز Mn	آهن Fe	روی Zn
cm			mg kg <sup>-1</sup>						
0-30	clay loam	31.5	40	30	30	7.92	0.78	0.74	
0-30	102	7.24	1.28	1.3	10.3	11	0.11		

جدول ۳. صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش مطالعه تنوع ژنتیکی لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

Table 3. Names of traits measured in the experiment of studying genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) in optimal and phosphorus deficiency stress conditions

ردیف Row	صفت Trait	خلاصه Abbreviation	اندازه‌گیری Unit	واحد	ردیف Row	صفت Trait	خلاصه Abbreviation	اندازه‌گیری Unit	واحد
1	محتوای نسبی آب برگ	RWC	درصد	Percent	13	طول پدانکل	PL	سانتی‌متر	Centimeter
2	دمای کانوپی	LCT	سانتی‌گراد	Centigrade	14	تعداد شاخه فرعی	BN	عدد/سانتی‌متر	Number
3	شاخص سبزیگی برگ اسپد	SPAD	سانتی‌متر	SPAD	15	طول بلال	EL	سانتی‌متر	Centimeter
4	طول برگ پرچم	FLL	سانتی‌متر	Centimeter	16	قطر بلال	ED	سانتی‌متر	Centimeter
5	عرض برگ پرچم	FLW	سانتی‌متر	Centimeter	17	قطر چوب‌بلال	CD	سانتی‌متر	Centimeter
6	تعداد برگ بالای بلال	EUL	عدد	Number	18	وزن چوب‌بلال	EW	گرم	Grams
7	برگ کل بوته	TL	عدد	Number	19	وزن صد دانه	HGW	گرم	Grams
8	زاویه برگ	LA	درجه	Degree	20	عملکرد دانه	GY	گرم	Grams
9	ارتفاع تا بلال	EH	سانتی‌متر	Centimeter	21	عملکرد بیولوژیک	BY	گرم	Grams
10	ارتفاع تا تاسل	TH	سانتی‌متر	Centimeter	22	ارتفاع بوته	PH	سانتی‌متر	Centimeter
11	وزن بلال با غلاف	WETH	گرم	Grams	23	قطر ساقه	SD	سانتی‌متر	Centimeter
12	وزن بلال بدون غلاف	WEWH	گرم	Grams	24	درصد فسفر	P%	درصد	Percent

بررسی دقیق‌تر روابط و ساختار عملکرد دانه و اجزای آن از تحلیل عاملی بسته psych در نرم‌افزار R استفاده شد. قبل از اقدام به انجام تحلیل عاملی شاخص Kaiser-MO (Kaiser-Meyer-Olkin) جهت تعیین میزان مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی و آماره کی-دو آزمون بارتلت برای ارزیابی برابری واریانس در نمونه‌های مختلف محاسبه شدند. برای تجزیه خوشه‌ای، ابتدا تعداد بهینه خوشه‌ها با استفاده از

تجزیه همبستگی پیرسون در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر و تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام به ترتیب با استفاده از بسته‌های pastecs (Wei and Simko, 2021)، corrplot، agricolae و olsrr (Hebbali, 2020) در نرم‌افزار R انجام گرفت. تجزیه علیت برای صفات وارد شده در مدل نهایی رگرسیون و مشخص کردن اثر مستقیم و غیرمستقیم با استفاده از بسته agricolae در نرم‌افزار R انجام گرفت. برای

بیولوژیک در بوته در لاین ۱۰ به میزان ۴۸۹/۳ گرم و کمترین مقدار در لاین ۷۹ به میزان ۱۰۴/۳ گرم مشاهده شد. لاین ۲۷ با مقدار ۲۸۸ گرم و لاین ۶۵ با مقدار ۶۳ گرم دارای بیشترین و کمترین میزان وزن بلال با غلاف بودند. بیشترین میزان وزن بلال بدون غلاف در لاین ۲۱ با مقدار ۲۷۲ گرم و کمترین میزان در لاین ۶۵ با مقدار ۵۱ گرم مشاهده شد. بیشترین مقدار وزن صد دانه در لاین ۵ با مقدار ۴۶/۱۰ گرم و کمترین مقدار در لاین ۸۵ با مقدار ۱۴/۸۰ گرم مشاهده شد. در این شرایط (فراهمی فسفر) بیشترین مقدار صفات؛ وزن چوب‌بلال در لاین ۶۴ (۵۱/۸۱ گرم)، قطر چوب‌بلال در لاین ۹۱ (۳۳/۳۱ سانتیمتر)، قطر بلال در لاین ۲۵ (۵۰/۵۳ سانتیمتر)، طول بلال در لاین ۲۴ (۲۴/۱۳ سانتیمتر)، تعداد شاخه فرعی در لاین ۴۸ (۱۶)، طول پدانکل در لاین ۳۸ (۲۲/۳۸ سانتیمتر)، قطر ساقه در لاین ۲۴ (۲۸/۴۹ سانتیمتر)، ارتفاع بوته در لاین ۷ (۲۴۴/۳۳ سانتیمتر)، ارتفاع تاسل در لاین ۷ (۲۵۷/۳۳ سانتیمتر)، ارتفاع بلال در لاین ۶۰ (۱۴۵/۶۷ سانتیمتر)، زاویه برگ در لاین ۱۱۴ (۱۶۲ درجه)، تعداد کل برگ در لاین ۶۰ (۱۵/۳۳)، برگ بالای بلال در لاین ۱۲۱ (۶/۶۷)، عرض برگ پرچم در لاین ۲۰ (۶/۶۳ سانتیمتر)، طول برگ پرچم در لاین ۴۸ (۵۴/۳۳ سانتیمتر)، شاخص سبزی‌نگی SPAD در لاین ۷۷ (۷۹/۰۷ درصد)، دمای کانوپی در لاین ۱۷ (۴۲/۰۹ سانتی‌گراد)، محتوای نسبی آب برگ در لاین ۶۶ (۹۰/۸۳ درصد) و درصد فسفر در لاین ۸۰ (۱/۹۱ درصد) مشاهده شد (جدول پیوست ۱). در این شرایط (فراهمی فسفر) کمترین مقدار صفات، وزن چوب‌بلال در لاین ۸۹ (۸/۴۰ گرم)، قطر چوب‌بلال در لاین ۸۵ (۲۰/۱۷ سانتیمتر)، قطر بلال در لاین ۸۵ (۳۰/۲۹ سانتیمتر)، طول بلال در لاین ۵۰ (۹/۰۳ سانتیمتر)، تعداد شاخه فرعی در لاین ۵۷ (۳)، طول پدانکل در لاین ۱۰۷ (۳/۱۷ سانتیمتر)، قطر ساقه در لاین ۵۰ (۱۲/۶۴ سانتیمتر)، ارتفاع بوته در لاین ۹۸ (۱۰۷/۳۳ سانتیمتر)، ارتفاع تاسل در لاین ۹۸ (۱۴۰/۳۳ سانتیمتر)، ارتفاع بلال در لاین ۵۰ (۳۵ سانتیمتر)، زاویه برگ در لاین ۶۶ (۱۲۲ درجه)، تعداد کل برگ در لاین ۵۰ (۸)، برگ بالای بلال در لاین ۶۲ (۴)، عرض برگ پرچم در لاین ۳۸ (۲/۹۷ سانتیمتر)، طول برگ پرچم در لاین ۳۸ (۲۵/۱۷ سانتیمتر)، شاخص سبزی‌نگی SPAD در لاین ۵۳ (۳۲/۹۰ درصد)، دمای کانوپی در لاین ۴۴ (۲۹/۵۰ سانتی‌گراد)، محتوای نسبی آب برگ در لاین ۱۵ (۶۸/۵۳ درصد) و درصد فسفر در لاین ۳۲ (۰/۶۵ درصد) مشاهده شد.

روش‌های Elbow, Silhouette, Gap در بسته factoxtra (Kassambara and Mundt, 2020) تعیین گردید سپس خوشه‌بندی سلسله مراتبی به روش وارد انجام شد.

## نتایج و بحث

در تجزیه واریانس صفات مختلف در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر بین لاین‌ها از نظر تمامی صفات مورد مطالعه اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۴) که بیانگر وجود تنوع در میان لاین‌ها برای صفات مورد بررسی است. در این بررسی ضریب تغییرات در جدول تجزیه واریانس که نماد دقت آزمایش است در شرایط بهینه از ۲/۸۸ درصد برای زاویه برگ تا ۲۹/۰۳ درصد برای وزن بلال بدون غلاف و در شرایط تنش کمبود فسفر از ۲/۶۸ درصد برای زاویه برگ تا ۲۹/۹۲ درصد برای تعداد انشعاب فرعی متغیر بود. ضریب تغییرات دقت آزمایش را نشان می‌دهد؛ مقادیر کمتر از ۳۰ درصد حاکی از دقت بالای آزمایش است (Jayaraman, 1999). بر اساس نتایج در مقایسه دو شرایط مورد مطالعه بیشترین عملکرد بیولوژیک در شرایط بهینه فسفر مشاهده شد. عملکرد بیولوژیک یک سیستم گیاهی نشان‌دهنده تجمع ماده خشک در اندام هوایی در زمان برداشت است. محققین با کاربرد مناسب کودهای شیمیایی افزایش در عملکرد گیاهان زراعی مشاهده کردند (Kafi Ghasemi and Esfahani, 2005). بیارت و روی (Beyaert and Roy, 2005) گزارش کردند که عملکرد سورگوم با افزایش مقادیر نیتروژن و فسفر به طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش می‌یابد. کارایی جذب فسفر به میزان کل فسفر جذب‌شده و کل عملکرد ماده خشک گیاه وابسته است؛ بنابراین، برای بهبود کارایی جذب فسفر، نیازمند افزایش کل عملکرد ماده خشک گیاه است (Sandana, 2016). در مطالعه هیبریدهای ذرت از نظر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، ارتفاع بلال و وزن هزار دانه تنوع قابل توجهی در سطوح احتمال یک و پنج درصد مشاهده شد (Hosseini et al., 2021). تنوع ژنتیکی در صفات مختلف، حاکی از پتانسیل بالای توده‌های ذرت برای استفاده در برنامه‌های اصلاحی آینده است (Rahimi et al., 2019).

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین صفات در شرایط بهینه (فراهمی فسفر)، بیشترین مقدار عملکرد دانه در بوته در لاین ۷ به میزان ۲۳۹ گرم و کمترین مقدار در لاین ۵۰ به میزان ۳۴/۷ گرم مشاهده شد. بیشترین مقدار عملکرد

جدول ۴. تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در لاین‌های خالص ذرت در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر  
 Table 4. Analysis of variance for measured traits in maize inbred lines under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

صفات Trait	شرایط بهینه فسفر Optimal phosphorus conditions			شرایط تنش کمبود فسفر Phosphorus deficiency stress conditions		
	Line	Error	CV%	Line	Error	CV%
	df			df		
	92	186		92	186	
<b>RWC</b>	46.76**	17.77	5.19	89.14**	47.81	8.93
<b>LCT</b>	12.17**	12.16	4.50	5.34**	1.37	3.84
<b>SPAD</b>	237.4**	40.47	13.53	160.3**	22.90	13.86
<b>FLL</b>	104.24**	25.17	13.87	93.59**	24.50	16.54
<b>FLW</b>	1.97**	0.64	16.65	1.59**	0.42	17.09
<b>EUL</b>	0.79**	0.35	11.45	0.87**	0.30	12.11
<b>TL</b>	4.35**	0.73	7.48	4.85**	0.91	9.26
<b>LA</b>	251.1**	16.75	2.88	326.8**	13.25	2.68
<b>EH</b>	1190.3**	110.6	12.94	955.5**	82.62	13.40
<b>TH</b>	2615.3**	194.11	6.78	3329.7**	306.3	9.61
<b>PH</b>	2233.6**	171.72	7.60	2391.6**	213.7	9.61
<b>SD</b>	27.42**	3.64	8.87	22.78**	5.55	13.05
<b>PL</b>	30.16**	3.19	16.94	22.91**	3.38	21.45
<b>BN</b>	26.16**	3.26	20.63	25.03**	4.72	29.92
<b>EL</b>	32.40**	3.49	11.22	31.18**	3.61	14.14
<b>ED</b>	51.13**	10.35	7.65	45.60**	13.64	10.09
<b>CD</b>	16.04**	4.43	8.15	11.28**	6.83	11.69
<b>EW</b>	192.4**	32.15	24.97	100.7**	11.85	22.67
<b>HGW</b>	97.59**	18.21	14.16	67.87**	13.93	15.85
<b>GY</b>	6673.6**	519.4	20.05	3190.4**	385.1	25.71
<b>BY</b>	25132.8**	1732.9	17.46	13952.1**	710.5	15.84
<b>WETH</b>	11067.7**	1846.2	27.51	6971.1**	589.7	24.53
<b>WEWH</b>	10594.9**	1697.1	29.03	6657.4**	574.7	27.36
<b>P%</b>	0.0492**	0.0140	11.39	0.0500**	0.0193	23.50

\*\* Significant at 1% probability levels.

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

The traits abbreviations are indicated in Table 3.

اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

چوب‌بلال در لاین ۳۶ (۲۷/۳۶ سانتیمتر)، قطر بلال در لاین ۱۲۱ (۴۴/۴۹ سانتیمتر)، طول بلال در لاین ۲۴ (۲۰/۵۳ سانتیمتر)، تعداد شاخه فرعی در لاین ۴۸ (۱۴/۶۷)، طول پدانکل در لاین ۳۸ (۱۵ سانتیمتر)، قطر ساقه در لاین ۱۱۴ (۲۵/۲۱ سانتیمتر)، ارتفاع بوته در لاین ۲۴ (۲۰/۳۳) سانتیمتر، ارتفاع تاسل در لاین ۲۸ (۲۴۱/۶۷ سانتیمتر)، ارتفاع بلال در لاین ۶۰ (۱۱۶/۳۳ سانتیمتر)، زاویه برگ در لاین ۷۶ (۱۵۵/۶۷ درجه)، تعداد کل برگ در لاین ۶۰ (۱۴/۳۳)، تعداد برگ بالای بلال در لاین ۷۴ (۶)، عرض برگ پرچم در لاین ۱۲ (۵/۷۳ سانتیمتر)، طول برگ پرچم در لاین ۲۱ (۴۴ سانتیمتر)، شاخص سبزی‌نگی SPAD در لاین ۵۰ (۳۴/۳۹ درصد)، دمای کانوپی در لاین ۱ (۸۷/۲۰ سانتی‌گراد)، محتوای نسبی آب برگ در لاین ۶۴ (۰/۹۱ درصد) مشاهده

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین صفات در شرایط تنش کمبود فسفر، بیشترین مقدار عملکرد دانه در بوته در لاین ۱۰ به میزان ۱۴۴/۹۲ گرم و کمترین مقدار در لاین ۵۰ به میزان ۲۳/۹۷ گرم مشاهده شد. بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیک در بوته در لاین ۱۰ به میزان ۳۵۴/۶۷ گرم و کمترین مقدار در لاین ۷۹ به میزان ۶۰ گرم مشاهده شد. لاین ۱۰ با مقدار ۲۱۹/۳۳ گرم و لاین ۳۸ با مقدار ۱۶/۶۷ گرم بیشترین و کمترین میزان وزن بلال با غلاف را نشان دادند. بیشترین مقدار وزن بلال بدون غلاف در لاین ۱۰ به میزان ۲۰۷/۶۷ گرم و کمترین مقدار در لاین ۳۸ به میزان ۸ گرم مشاهده شد. بیشترین مقدار وزن صد دانه در لاین ۵ به میزان ۳۴/۱۰ گرم و کمترین مقدار در لاین ۸۵ به میزان ۱۲/۷۰ گرم مشاهده شد. در این شرایط (تنش کمبود فسفر) صفات؛ وزن چوب‌بلال در لاین ۲۸ (۲۹/۶۷ گرم)، قطر

بلال در بوته، تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در بلال، وزن دانه در بلال و وزن هزار دانه است. در ارزیابی ژنوتیپ‌های ذرت از حیث فسفر-کارایی بر اساس صفات مرتبط با رشد و عملکرد تحت سطوح مختلف فسفر؛ ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم، مشاهده شد که استفاده از ۸۰ کیلوگرم در هکتار فسفر باعث بهبود رشد و تولید دانه می‌شود (Khan et al., 2023). در مطالعه واکنش ارقام جو (Super laxmi, NDB-2 and NDB-1445) به سطوح فسفر (۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ کیلوگرم در هکتار)، نتایج نشان داد که استفاده از فسفر به میزان ۳۰ و ۴۵ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، تعداد پنجه، تولید ماده خشک، طول سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، کاه و عملکرد بیولوژیک در مقایسه با ۰ و ۱۵ کیلوگرم فسفر در هکتار شد (Singh et al., 2020).

آماره‌های توصیفی و مقایسه میانگین صفات تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر بر اساس آزمون تی ولج (Welch's t-test) در سطح احتمال یک درصد در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج همگنی واریانس دو گروه، از این آزمون استفاده شد. اجرای آزمون t بین دو گروه نشان داد که تفاوت بین شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر بسیار معنی‌دار است. پارامتر ضریب تغییرات یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی تنوع در جمعیت‌ها بوده و به دلیل عدم تأثیرپذیری از واحد اندازه‌گیری صفات، اهمیت بیشتری نسبت به دیگر معیارهای تنوع دارد. به‌عنوان یک اصل مسلم، امکان‌پذیری در صفاتی با ضریب تغییرات بالاتر بیشتر است (Zhang et al., 2007). در شرایط بهینه فسفر بیشترین درصد ضریب تغییرات به ترتیب برای وزن بلال بدون غلاف (۴۱/۸۸)، عملکرد دانه (۴۱/۵۱)، وزن بلال با غلاف (۳۸/۸۹) و عملکرد بیولوژیک (۳۸/۳۹) مشاهده شد. در مقابل کمترین درصد ضریب تغییرات به ترتیب در صفات محتوای نسبی آب برگ (۴/۸۷) و دمای کانوپی (۶/۱۷) مشاهده شد. بیشترین درصد ضریب تغییرات در شرایط تنش کمبود فسفر به ترتیب برای وزن بلال بدون غلاف (۵۳/۷۷)، وزن بلال با غلاف (۴۸/۷۰)، عملکرد دانه (۴۲/۷۳) و عملکرد بیولوژیک (۴۰/۵۳) و کمترین درصد ضریب تغییرات به ترتیب در صفات دمای کانوپی (۴/۳۷) و محتوای نسبی آب برگ (۷/۰۴) مشاهده شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر تنوع بیشتری در بین لاین‌های ذرت موردبررسی از نظر صفات وزن بلال بدون غلاف، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و وزن بلال با غلاف وجود دارد که

شد (جدول پیوست ۲). در این شرایط (تنش کمبود فسفر) کمترین مقدار صفات؛ وزن چوب‌بلال در لاین ۹۸ (۵/۶۷ گرم)، قطر چوب‌بلال در لاین ۸۵ (۱۷/۸۹ سانتیمتر)، قطر بلال در لاین ۵۴ (۲۷/۸۲ سانتیمتر)، طول بلال در لاین ۵۰ (۵/۴۷ سانتیمتر)، شاخه فرعی در لاین ۴۹ (۱/۳۳)، طول پدانکل در لاین ۱۲۰ (۱/۶۷ سانتیمتر)، قطر ساقه در لاین ۵۰ (۱۰/۰۲ سانتیمتر)، ارتفاع بوته و ارتفاع تاسل در لاین ۴۹ (۸۴/۶۷ سانتیمتر)، ارتفاع بلال در لاین ۵۰ (۱۹/۳۳ سانتیمتر)، زاویه برگ در لاین ۲۸ (۱۱۱ درجه)، تعداد کل برگ در لاین ۵۰ (۷/۳۳)، تعداد برگ بالای بلال در لاین ۴۹ (۳/۳۳)، عرض برگ پرچم در لاین ۵۰ (۲/۱۷ سانتیمتر)، طول برگ پرچم در لاین ۹۶ (۱۸ سانتیمتر)، شاخص سبزی‌نگی SPAD در لاین ۳۱ (۱۹/۳۰ درصد)، دمای کانوپی در لاین ۱۲۱ (۲۷/۵۹ سانتی‌گراد)، محتوای نسبی آب برگ در لاین ۶۰ (۵۳/۰۷ درصد) و درصد فسفر در لاین ۵۳ (۰/۲۴ درصد) مشاهده شد (جدول پیوست ۲). با توجه به نتایج مقایسه میانگین می‌توان گفت که تنش کمبود فسفر باعث کاهش میانگین صفات موردبررسی نسبت به شرایط بهینه شده است که نشان‌دهنده نقش فسفر به‌عنوان عنصر کلیدی در رشد گیاه ذرت است.

با توجه به نتایج مقایسات میانگین می‌توان گفت که در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر لاین‌های ۵، ۷، ۱۰، ۲۴، ۲۸، ۴۸، ۶۴، ۱۱۴ و ۱۲۱ از نظر صفات عملکرد و وابسته به عملکرد از جمله عملکرد بیولوژیک، وزن صد دانه، وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف، قطر بلال، طول بلال، وزن چوب‌بلال دارای بیشترین مقدار بودند. چنین استنباط می‌شود که این لاین‌ها مقاومت بیشتری به کمبود فسفر دارند و قادر به جذب و استفاده بهینه از فسفر در شرایط کمبود هستند. در مقابل لاین‌های ۳۸، ۴۹، ۵۰، ۷۹، ۸۵ و ۹۸ از نظر صفات موردبررسی در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر کمترین مقدار را دارا بودند. این لاین‌ها احتمالاً حساسیت بیشتری به کمبود فسفر دارند و نمی‌توانند عملکرد مطلوبی در این شرایط داشته باشند. این موضوع ممکن است به دلیل عدم توانایی در جذب یا استفاده بهینه از فسفر در شرایط تنش باشد. در مقایسه ارقام مختلف ذرت از لحاظ عملکرد و ویژگی‌های مرتبط، تفاوت‌هایی در صفات مختلف از جمله وزن دانه در بلال در دامنه ۱۶۳/۲۳ تا ۱۳۳/۹۷ گرم مشاهده شد (Ali et al., 2020). محققین مذکور بیان داشتند که افزایش عملکرد دانه به دلیل مقادیر بیشتر شاخص‌هایی مانند تعداد

تعداد دانه در سنبله مشاهده شد (Naruee Rad et al., 2006). عظیمی و همکاران (Azimi et al., 2015) با بررسی تأثیر کود فسفر بر عملکرد گیاه جو بیان کردند که کود فسفر تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه دارد. بیشترین عملکرد دانه در تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر مشاهده شد، در حالی که کمترین عملکرد دانه در شرایطی که کود فسفر استفاده نشده بود، به دست آمد. افضل و بانو (Afzal and Bano, 2008) با کاربرد کود فسفر افزایش معنی‌دار و ۱۰۰ درصدی در وزن خشک اندام هوایی گندم گزارش کردند. انصاری (Ansari, 2004) در آزمایشی روی ذرت نشان داد که عملکرد دانه در تیمار ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاهد (بدون کود) بود. نتایج آزمایشی در زمینه اثر غلظت روی و کاربرد آن بر رشد و عملکرد ذرت نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در طول و قطر بلال و تعداد ردیف دانه ذرت برای اکثر گروه‌های تیماری در مقایسه با شاهد وجود داشت (Ahmad Hisham et al., 2021).

می‌توان از این صفات به‌عنوان منبع بالقوه برای انتخاب لاین‌های مطلوب ذرت و بهبود تحمل به تنش کمبود فسفر استفاده کرد. با مقایسه میانگین صفات در دو گروه موردبررسی (شرایط بهینه در مقابل تنش کمبود فسفر)، مشاهده شد تنش کمبود فسفر در مقایسه با شرایط بهینه باعث کاهش معنی‌دار صفات از جمله عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، طول و عرض برگ پرچم، درصد فسفر و سایر صفات گردیده است که نشان می‌دهد کمبود فسفر روی صفات موردبررسی تأثیر منفی گذاشته است. در مطالعه تنوع ژنتیکی در لاین‌های پیشرفته جو، بیشترین ضریب تغییرات در صفات طول پدانکل و به دنبال آن بنیه اولیه، طول سنبله و عملکرد دانه و کمترین مقادیر در صفات رشدی از قبیل روزهای قبل رویش نوک جوانه و روز تا رسیدن فیزیولوژیکی مشاهده شد (Ahmadi et al., 2016). در مطالعه تنوع ژنتیکی صفات مورفولوژیک توده‌های بومی گندم سیستان و بلوچستان، بیشترین ضریب تغییرات در صفات عملکرد بوته و

جدول ۵. آماره‌های توصیفی برای صفات موردبررسی در لاین‌های خالص ذرت تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

Table 5. Descriptive statistics for investigated traits in maize inbred lines under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

صفات	حداقل		حداکثر		میانگین		انحراف معیار		درصد ضریب تغییرات		آزمون تی-ولج Welch's t-test
	Minimum	LP	OP	LP	OP	LP	OP	LP	OP	LP	
RWC	68.53	53.07	90.82	87.2	81.17	77.40	3.95	5.45	4.87	7.04	5.4****
LCT	29.50	27.59	42.10	34.39	32.66	30.51	2.01	1.33	6.17	4.37	8.5****
SPAD	32.9	19.3	79.10	54.3	46.99	34.51	8.90	7.31	18.94	21.18	10.4****
FLL	24.7	18.0	54.30	44.0	36.16	29.91	5.89	5.59	16.29	18.67	7.4****
FLW	3.0	2.17	6.7	5.73	4.81	3.80	0.81	0.73	16.85	19.17	8.9****
EUL	4.0	3.33	6.7	6.0	5.20	4.58	0.51	0.54	9.87	11.78	7.9****
TL	8.0	7.33	15.3	14.33	11.47	10.30	1.20	1.27	10.48	12.36	6.4****
LA	122.0	111.0	162.0	155.67	141.97	135.70	9.15	10.44	6.45	7.69	4.3****
EH	35.0	19.33	145.7	116.33	81.26	67.83	19.92	17.85	24.51	26.31	4.8****
TH	140.3	84.67	257.3	241.67	205.21	182.11	29.53	33.32	14.39	18.29	5.0****
PH	107.3	84.67	224.3	206.33	172.31	152.06	27.29	28.23	15.84	18.57	4.9****
SD	12.6	10.02	28.5	25.21	21.49	18.05	3.03	2.76	14.09	15.27	8.1****
PL	3.2	1.67	22.8	15.00	10.54	8.58	3.17	2.76	30.05	32.23	4.5****
BN	3.0	1.33	16.0	14.67	8.75	7.27	2.96	2.89	33.78	39.76	3.4***
EL	9.0	5.47	24.1	20.53	16.64	13.44	3.29	3.22	19.77	23.98	6.7****
ED	30.3	27.82	50.5	44.49	42.00	36.58	4.13	3.90	9.82	10.66	9.2****
CD	20.2	17.89	33.3	27.36	25.83	22.36	2.31	1.94	8.94	8.67	11.1****
EW	8.4	5.67	51.8	29.67	22.70	15.18	8.01	5.80	35.27	38.17	7.3****
HGW	14.80	12.70	46.10	34.10	30.14	23.54	5.71	4.76	18.93	20.20	8.5****
GY	34.7	23.97	239.0	144.92	113.63	76.31	47.17	32.61	41.51	42.73	6.2****
BY	104.3	60.0	489.3	354.67	238.41	168.27	91.53	68.20	38.39	40.53	5.9****
WETH	63.0	16.67	288.0	219.33	156.15	98.98	60.73	48.21	38.89	48.70	7.1****
WEWH	51.0	8.0	272.0	207.67	141.90	87.61	59.43	47.11	41.88	53.77	6.9****
P%	0.65	0.24	1.91	0.91	1.12	0.59	0.28	0.13	25.40	21.75	16.2****

\*\* Significant at 1% probability levels.

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

The traits abbreviations are indicated in Table 3.

اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

### همبستگی صفات

در برنامه‌های به‌نژادی گیاهی، انتخاب بر اساس تعداد زیادی صفت زراعی صورت می‌گیرد که ممکن است بین آن‌ها همبستگی مثبت یا منفی وجود داشته باشد. به همین دلیل، روش‌های تجزیه و تحلیلی که بدون از دست دادن میزان قابل توجهی از اطلاعات مفید، تعداد صفات را کاهش داده و صفات مؤثر در عملکرد را شناسایی کنند، برای پژوهشگران بسیار ارزشمند محسوب می‌شوند. در این زمینه، بررسی روابط همبستگی میان صفات متداول است (Acquah et al., 1992). ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر در شکل ۱ ارائه شده است. در شرایط بهینه بیشترین ضرایب همبستگی به ترتیب بین عملکرد دانه با صفات وزن بلال بدون غلاف (۰/۸۶)، وزن بلال با غلاف (۰/۸۵)، وزن چوب‌بلال (۰/۸۲)، طول بلال و عملکرد بیولوژیک (۰/۷۹) مشاهده شد. در شرایط تنش کمبود فسفر بیشترین ضرایب همبستگی به ترتیب بین عملکرد دانه با صفات وزن بلال بدون غلاف و وزن بلال با غلاف (۰/۸۸)، عملکرد بیولوژیک (۰/۸۶) و طول بلال (۰/۸۴) مشاهده شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که صفات وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف، عملکرد بیولوژیک و طول بلال در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد دانه در ذرت به شمار می‌آیند و با افزایش این صفات در لاین‌های مورد بررسی عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت با توجه به همبستگی‌های مثبت و بنابراین تأثیر بیشتر این صفات نسبت به سایر صفات ارزیابی شده در میزان عملکرد، بالقوه افزایش این مؤلفه‌ها در فرآیند انتخاب منجر به انتخاب لاین‌های با عملکرد بالا تحت شرایط تنش کمبود فسفر خواهند شد. در شرایط بهینه، درصد فسفر با صفات قطر چوب‌بلال، برگ بالای بلال و شاخص سبزی‌نگی برگ اسپد همبستگی مثبت و معنی‌دار و با دمای کانوپی همبستگی منفی داشت. در شرایط تنش کمبود فسفر بین صفت درصد فسفر با صفات قطر ساقه، ارتفاع تا تاسل، قطر بلال، ارتفاع بوته و وزن بلال با غلاف همبستگی منفی وجود داشت. برخی مقادیر همبستگی کم و ضعیف

هستند که احتمالاً به این دلیل است که تنش کمبود فسفر ساختارهای داخلی گیاه را مختل و رابطه بین آن‌ها را نامنظم کرده است. در مطالعه‌ای ارتباط ۱۳ شاخص گیاهی (SR<sup>1</sup>، OS<sup>2</sup>، EVI<sup>3</sup>، SAVI<sup>4</sup>، EVI<sup>5</sup>، NGRDI<sup>6</sup>، OSAVI<sup>7</sup>، GNDVI<sup>8</sup>، RVI<sup>9</sup>، DVI<sup>10</sup>، TGI<sup>11</sup>، MS<sup>12</sup> و MS<sup>13</sup>) با هشت پارامتر فنوتیپی مختلف (شامل سطح برگ، عملکرد، ارتفاع بوته، طول بلال، قطر بلال، وزن ۱۰۰ دانه، دانه و وزن خشک بلال) بررسی شد. نتایج همبستگی نشان داد که نسبت بین اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی و پارامترهای فنوتیپی معنی‌دار است؛ بنابراین شاخص‌های پوشش گیاهی انتخاب شده می‌توانند به‌عنوان معیار خوب برای پیش‌بینی عملکرد به دلیل همبستگی معنی‌دار آن‌ها در شرایط تنش کمبود فسفر در ذرت استفاده شوند (Qiao et al., 2022). شعاع حسینی و همکاران (Sho Hosseyini et al., 2009) گزارش کردند در نتیجه افزایش قطر بلال و وزن چوب‌بلال، وزن چوب و درصد چوب‌بلال در مجموع کاهش و عملکرد دانه افزایش می‌یابد. با توجه به نقش مهم عنصر فسفر در محافظت سلول در برابر خشکی و بهبود پرشدگی دانه، افزایش جذب فسفر موجب افزایش وزن دانه و در نتیجه عملکرد دانه می‌شود (Jones et al., 2003). بیراگی و همکاران (Beiragi et al., 2011) در بررسی اثرات تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد ۱۸ هیبرید ذرت، بین عملکرد دانه با تعداد دانه در ردیف همبستگی مثبت گزارش کردند. در مطالعه ایشان در شرایط نرمال و تنش شدید، عملکرد دانه با صفات تعداد دانه در ردیف و در شرایط تنش ملایم با صفات طول بلال و در شرایط تنش خیلی شدید با صفات وزن هزار دانه و تعداد دانه در ردیف همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان دادند. در مطالعه‌ای عملکرد دانه با صفات تعداد دانه در ردیف و طول بلال همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (Masjibahoosh et al., 2006). در بررسی اثرات تنش کمبود فسفر بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی توده‌های ذرت، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد که عملکرد اقتصادی توده‌های بومی ذرت با ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی آن‌ها در شرایط کمبود فسفر

<sup>8</sup> Transformed chlorophyll absorption reflectance index

<sup>9</sup> Triangular greenness index

<sup>10</sup> Difference vegetation index

<sup>11</sup> Relative vigor index

<sup>12</sup> Green normalized difference vegetation index

<sup>13</sup> Modified soil adjusted vegetation index

<sup>1</sup> Simple ratio

<sup>2</sup> Normalized difference vegetation index

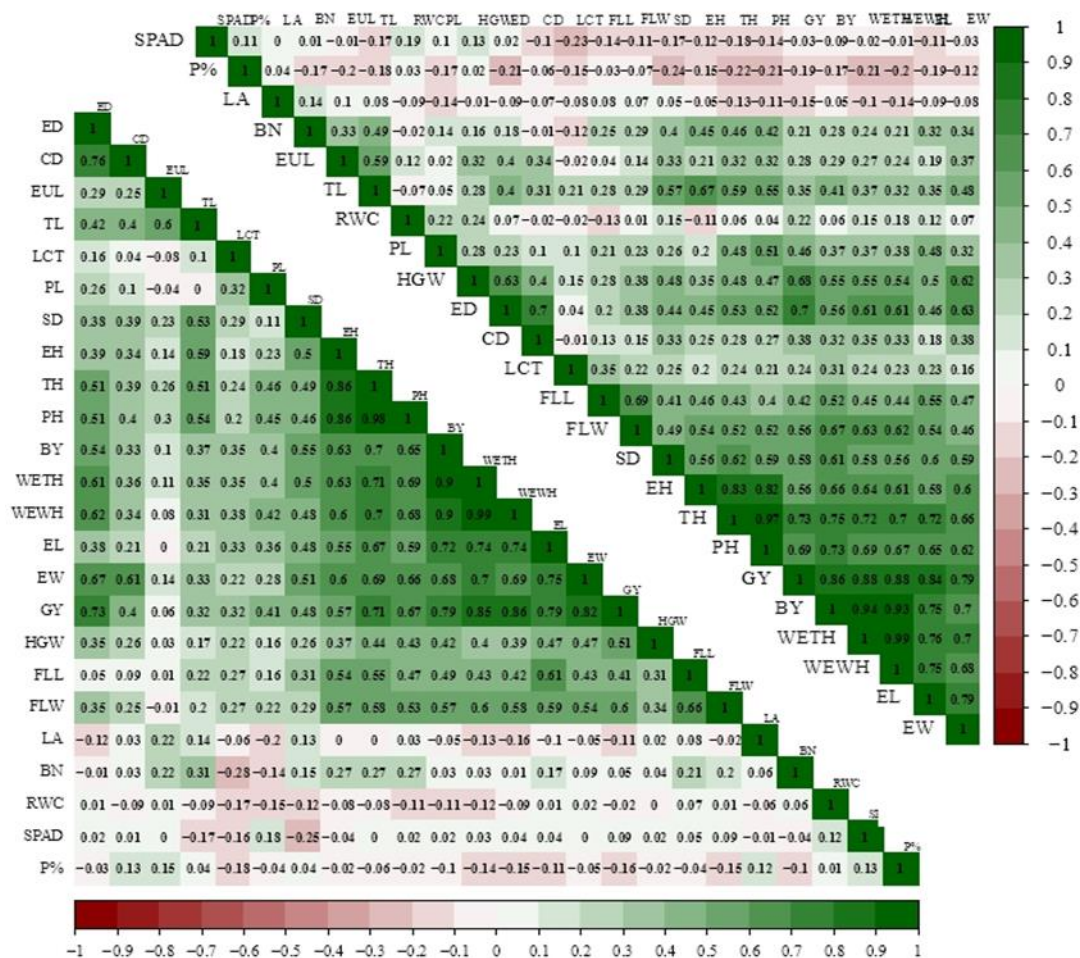
<sup>3</sup> Enhanced vegetation index

<sup>4</sup> Soil adjusted vegetation index

<sup>5</sup> Enhanced vegetation index 2

<sup>6</sup> Normalized green red difference index

<sup>7</sup> Optimized soil adjusted vegetation index



شکل ۱. ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت تحت شرایط بهینه (قطر پایین) و تنش کمبود فسفر (قطر بالا). جعبه‌های سبز و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب مثبت و منفی هستند و افزایش شدت رنگ دلالت بر ضرایب بزرگ‌تر دارد. جعبه‌های سفید نشان‌دهنده ضرایب غیر معنی‌دار هستند. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

Fig. 1. Pearson correlation coefficients among investigated traits in maize inbred lines under optimal (lower panel) and phosphorus deficiency stress conditions (upper panel). Green and red boxes indicate positive and negative correlations, respectively, and increasing color intensity reflects a higher coefficient. The white boxes indicate non-significant correlations. The traits abbreviations are indicated in Table 3.

افزایش بهره‌وری تابعی از بهبود ژنتیکی ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی است (Mousavi and Nagy, 2021). در مطالعه تنوع ژنتیکی صفات مرتبط با تحمل خشکی در ذرت، عملکرد دانه با صفات قطر بلال، ارتفاع بلال، وزن صد دانه، تعداد دانه در ردیف و ارتفاع بوته همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (Islam et al., 2020).

#### تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام

به منظور بررسی اهمیت صفات مورفولوژیک مورد مطالعه در تغییرات عملکرد دانه، تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام انجام شد. قبل از تجزیه رگرسیون، فرض‌های تجزیه رگرسیون چندگانه

ارتباط دارد (Yao et al., 2007). در مطالعه ارتباط بین عملکرد و اجزای آن در هیبریدهای سینگل کراس ذرت گزارش شد که وزن صد دانه با عملکرد دانه ارتباط مثبت معنی‌داری دارد (Devasree et al., 2020). وارا کشمی و همکاران (Varalakshmi et al., 2018) مشاهده کردند که قطر بلال با وزن صد دانه و عملکرد بیولوژیک در بوته ارتباط مثبت قوی دارد. در مطالعه یوسف و همکاران (Yousaf et al., 2018)، عملکرد دانه با وزن هزار دانه همبستگی مثبت نشان داد که بدین معنی است هر چه وزن هزار دانه بیشتر شود، مقدار دانه بیشتر می‌شود. در تشکیل عملکرد دانه صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک نقش اساسی دارند؛ بنابراین،

تعداد انشعابات فرعی، عملکرد بیولوژیک، محتوای نسبی آب برگ، طول برگ پرچم، طول پدانکل و قطر ساقه با توجه کمتر از یک درصد از تغییرات عملکرد دانه در گام‌های پنجم تا دهم وارد مدل رگرسیون شدند. با توجه به غیر معنی‌دار شدن ضریب رگرسیون استاندارد صفات تعداد انشعابات فرعی، محتوای نسبی آب برگ، طول برگ پرچم، طول پدانکل و قطر ساقه، این صفات در تجزیه علیت حذف شدند. شعاع حسینی و همکاران (Shoa Hosseyini, 2008) در بررسی اثرات تنش کمبود آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد در ذرت نشان دادند که هفت صفت قطر ساقه، ارتفاع گیاه، ارتفاع استقرار بلال، تعداد برگ بالای بلال اصلی، تعداد دانه در ردیف، عمق دانه و وزن ۳۰۰ دانه وارد مدل شدند. در تحقیقی نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام در ذرت تحت تنش کمبود آب نشان داد تعداد ردیف در بلال، وزن ۳۰۰ دانه و تعداد دانه در ردیف در مجموع ۸۳ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه می‌نمایند (Seyedzavar et al., 2014).

جدول ۶. تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام برای عملکرد دانه و صفات مورفولوژیک مورد بررسی در لاین‌های خالص ذرت تحت شرایط بهینه فسفر

Table 6. Stepwise regression analysis for grain yield and investigated morphological traits in maize inbred lines under optimal phosphorus conditions

مرحله	صفات	ضریب رگرسیون استاندارد	خطای استاندارد	ضریب تعیین
Step	Traits	Standard Beta	Standard Error	Adjusted R <sup>2</sup>
1	WEWH	**0.228	0.045	72.92
2	EW	**0.306	0.401	82.50
3	ED	**0.546	0.715	84.07
4	CD	** -0.34	1.16	88.45
5	EL	**0.219	0.884	90.05
6	EUL	** -0.128	3.712	90.50
7	LA	0.056 <sup>ns</sup>	0.168	90.82
8	SPAD	0.072*	0.168	91.03
9	TL	0.071 <sup>ns</sup>	1.698	91.25
10	HGW	0.056 <sup>ns</sup>	0.295	91.41
11	RWC	-0.04 <sup>ns</sup>	0.384	91.47

<sup>ns</sup>, \* and \*\*: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

<sup>ns</sup>, \* and \*\*: Non significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

The traits abbreviations are indicated in Table 3.

شامل استقلال متغیرهای پیشگو (هم خطی چندگانه)، توزیع نرمال و استقلال خطاهای آزمایشی بررسی شد. مقدار آماره دوربین و اتسون در شرایط بهینه برابر ۱/۵۶۳ و در شرایط کمبود فسفر ۲/۱۸۷ بود که بیانگر مستقل بودن خطاهای آزمایشی است. وجود هم خطی چندگانه با عامل تورم واریانس بررسی شد (Leilah and Al-Khateeb, 2005). بر اساس نتایج حاصل در هر دو شرایط بهینه و کمبود فسفر برای هیچ‌کدام از صفات مورد بررسی میزان تورم واریانس از حد مجاز (شاخص تورم واریانس کمتر از ۱۰ و مقدار نزدیک به ۱ نشان‌دهنده وضعیت مطلوب است) خارج نشد که حاکی از عدم وجود هم خطی است. بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون در شرایط بهینه فسفر (جدول ۶)، صفت وزن بلال بدون غلاف با توجه ۷۲/۹۲ درصد از تغییرات عملکرد، اولین صفتی بود که وارد مدل رگرسیون شد. همبستگی قوی این صفت با عملکرد دانه نشان‌دهنده تأثیر این صفت بر عملکرد دانه است. صفت وزن چوب‌بلال دومین صفتی بود که با توجه ۱۰ درصد از تغییرات عملکرد دانه وارد مدل شد. این صفت نیز همبستگی بالایی با عملکرد دانه داشت. قطر بلال با توجه کمتر از یک درصد و قطر چوب‌بلال با توجه ۴ درصد به ترتیب سومین و چهارمین صفتی بودند که وارد مدل رگرسیونی شدند. بعد از این صفات، صفات طول بلال، برگ بالای بلال، زاویه برگ، عدد اسپد (شاخصی از میزان کلروفیل؛ سبزی‌نگی)، ارتفاع تا تاسل، وزن صد دانه و محتوای نسبی آب برگ به ترتیب وارد مدل رگرسیونی شدند که سهم هر یک از آن‌ها در توجیه تغییرات عملکرد کمتر از یک درصد بود. در مجموع، ۹۱/۴۷ درصد از تغییرات عملکرد دانه توسط ۱۱ صفت تبیین شد. با توجه به غیر معنی‌دار شدن ضریب رگرسیون استاندارد صفات زاویه برگ، تعداد برگ در بوته، وزن صد دانه و محتوای نسبی آب برگ، این صفات در تجزیه علیت حذف شدند.

بر اساس تجزیه رگرسیون در شرایط تنش کمبود فسفر (جدول ۷)، صفات وزن دانه بدون غلاف و طول بلال به ترتیب با ۷۷/۱۵ و ۷/۰۲ درصد، بیشترین نقش را در توجیه تغییرات عملکرد دانه داشتند. این نتایج با نتایج همبستگی در شرایط تنش کمبود فسفر مطابقت داشت. قطر بلال با توجه ۴/۳۵ درصد تغییرات عملکرد، در گام سوم وارد مدل رگرسیون شد. صفت وزن صد دانه با توجه ۱/۲ درصد از تغییرات عملکرد در گام چهارم وارد مدل شد، این چهار صفت در مجموع ۸۹/۷۲ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه نمودند. صفات

تحت شرایط تنش کمبود فسفر (جدول ۹)، نشان داد که طول بلال بیشترین اثر مستقیم و مثبت (۰/۳۶۲) و صفت عملکرد بیولوژیک از طریق وزن بلال بدون غلاف (۰/۲۷۶) بیشترین اثر غیرمستقیم و مثبت را بر عملکرد دانه نشان داد. صفات طول بلال (۰/۸۴۰)، عملکرد بیولوژیک (۰/۸۶۰) و وزن بلال بدون غلاف (۰/۸۸۰) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد می‌باشند؛ بنابراین انتخاب هیبریدهایی با بیشترین طول بلال، عملکرد بیولوژیک و وزن بلال بدون غلاف به معنای انتخاب غیرمستقیم هیبریدهایی با بیشترین عملکرد دانه است. به این ترتیب، این صفات در بهبود عملکرد دانه ذرت تحت شرایط مختلف فسفر اهمیت زیادی دارند.

در مطالعه همبستگی و تحلیل مسیر هیبریدهای ذرت، مشاهده شد که بین عملکرد دانه با وزن هزار دانه و قطر بلال همبستگی قوی و مثبت وجود دارد (Zuffo et al., 2023). در مطالعه آکشایا و همکاران (Akshaya et al., 2022) تأثیر مستقیم مثبت صفات قطر بلال، وزن ۱۰۰ دانه، طول بلال و تعداد دانه در ردیف بر عملکرد دانه گزارش شد. در مطالعه همبستگی و تجزیه مسیر عملکرد هیبریدهای ذرت، اثرات مستقیم مثبت بالای درصد غلاف، قطر بلال، ارتفاع بلال و وزن بوته بر عملکرد دانه مشاهده شد (Priyanto et al., 2023). یزدان‌دوست همدانی و رضایی (Yazdandoost and Hamedani and Rezai, 2001) در بررسی اثر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک بر عملکرد دانه ذرت از طریق تجزیه علیت نشان دادند که صفت تعداد دانه در بلال با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار، دارای اثر مستقیم و معنی‌دار برابر با ۰/۶۹۳ و اثر غیرمستقیم از طریق صفت وزن صد دانه برابر با ۰/۲۳۶ بر عملکرد دانه است. فاطمی و همکاران (Fatemi, 2006) در بررسی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد در ذرت نشان دادند که وزن هزار دانه با همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۶۸۸) با عملکرد، دارای بیشترین اثر مستقیم و مثبت و غیرمستقیم و مثبت از طریق صفت روز از گرده‌افشانی تا ابریشم‌دهی بر عملکرد دانه است.

جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد در ذرت در شرایط بهینه فسفر صفات قطر بلال و قطر چوب‌بلال می‌توانند به‌عنوان ویژگی‌های بالقوه مطلوب در بهنژادی لاین‌های برتر از نظر عملکرد دانه معرفی شوند. تجزیه علیت در شرایط بهینه فسفر نشان داد سهم بزرگی از همبستگی بین صفات وزن بلال بدون

جدول ۷. تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام برای عملکرد دانه و صفات مورفولوژیک مورد بررسی در لاین‌های خالص ذرت تحت شرایط تنش کمبود فسفر

Table 7. Stepwise regression analysis for grain yield and investigated morphological traits in maize inbred lines under phosphorus deficiency stress conditions

مرحله Step	صفات Traits	ضریب رگرسیون استاندارد Standard Beta	خطای استاندارد Standard Error	ضریب تعیین Adjusted R <sup>2</sup>
1	WEWH	0.136*	0.072	77.15
2	EL	0.415**	0.577	84.17
3	ED	0.225**	0.389	88.52
4	HGW	0.118*	0.31	89.72
5	BN	-0.062 <sup>ns</sup>	0.397	89.97
6	BY	0.291*	0.049	90.15
7	RWC	0.069 <sup>ns</sup>	0.22	90.61
8	FLL	-0.066 <sup>ns</sup>	0.236	90.83
9	PL	0.043 <sup>ns</sup>	0.431	90.89
10	SD	-0.051 <sup>ns</sup>	0.529	90.92

<sup>ns</sup>، \* و \*\* به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

<sup>ns</sup>، \* and \*\*: Non significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

The traits abbreviations are indicated in Table 3.

### تجزیه علیت

جهت بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم صفات بر روی عملکرد دانه، تجزیه علیت بر روی صفات وارد شده به مدل رگرسیون گام‌به‌گام انجام شد. بر اساس نتایج تجزیه علیت تحت شرایط بهینه فسفر؛ صفت قطر بلال (۰/۵۳۵) بیشترین اثر مستقیم و مثبت و قطر چوب‌بلال از طریق قطر بلال (۰/۴۰۶) بیشترین اثر غیرمستقیم و مثبت را بر عملکرد دانه نشان دادند (جدول ۸). صفات قطر بلال (۰/۷۳۰) و قطر چوب‌بلال (۰/۴۰۰) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد می‌باشند؛ این بدان معنی است که هرچه قطر بلال و قطر چوب‌بلال بیشتر شود عملکرد دانه بیشتر می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که این صفات به‌عنوان صفات اصلی تعیین‌کننده تغییرات در عملکرد دانه هستند و می‌توانند به‌عنوان صفات مرتبط با عملکرد در نظر گرفته شوند. در این شرایط (بهینه فسفر) صفت قطر چوب‌بلال بیشترین اثر مستقیم و منفی (۰/۳۲۱-) و صفت قطر بلال از طریق قطر چوب‌بلال (۰/۲۴۴-) بیشترین اثر غیرمستقیم و منفی بر عملکرد دانه نشان داد. تجزیه علیت

مربوط به اثرات مستقیم آن‌هاست. این صفات می‌توانند باعث افزایش عملکرد دانه تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر شوند و بدین طریق با گزینش برای این صفات می‌توان لاین‌های با عملکرد بالا در ذرت اصلاح نمود

غلاف، وزن چوب‌بلال، قطر بلال و طول بلال با عملکرد دانه مربوط به اثر مستقیم آن‌ها با عملکرد است. همچنین در شرایط تنش کمبود فسفر سهم بزرگی از همبستگی بین صفات وزن بلال بدون غلاف، طول بلال، قطر بلال، قطر چوب‌بلال، وزن صد دانه و عملکرد بیولوژیک با عملکرد دانه

جدول ۸. تجزیه علیت در ذرت بر اساس ضرایب همبستگی صفات وارد شده در مدل رگرسیون در شرایط بهینه فسفر

Table 8. Path analysis in maize based on correlation coefficient of traits entered to regression model in optimal phosphorus conditions

صفات Trait	همبستگی با عملکرد دانه Correlation with grain yield	اثرات مستقیم Direct effect	اثرات غیرمستقیم Indirect effect						
			WEWH	EW	ED	CD	EL	EUL	SPAD
WEWH	**0.860	0.253	-	0.231	0.331	-0.109	0.158	-0.007	0.003
EW	**0.820	0.335	0.174	-	0.358	-0.196	0.160	-0.011	0.000
ED	**0.730	0.535	0.157	0.224	-	-0.244	0.081	-0.024	0.001
CD	**0.400	-0.321	0.086	0.204	0.406	-	0.045	-0.020	0.001
EL	**0.790	0.214	0.187	0.251	0.203	-0.067	-	0.000	0.003
EUL	0.060 <sup>ns</sup>	-0.082	0.020	0.047	0.155	-0.080	0.000	-	0.000
SPAD	0.090 <sup>ns</sup>	0.064	0.010	0.000	0.011	-0.003	0.009	0.000	-

<sup>ns</sup> و \* : غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

<sup>ns</sup>, \*\*: Non significant and significant at 1% probability levels, respectively. The traits abbreviations are indicated in Table 3.

جدول ۹. تجزیه علیت در ذرت بر اساس ضرایب همبستگی صفات وارد شده در مدل رگرسیون در شرایط تنش کمبود فسفر

Table 9. Path analysis in maize based on correlation coefficient of traits entered to regression model in phosphorus deficiency stress conditions

صفات Trait	همبستگی با عملکرد دانه Correlation with grain yield	اثرات مستقیم Direct effect	اثرات غیرمستقیم Indirect effect				
			WEWH	EL	ED	HGW	BY
WEWH	**0.880	0.297	-	0.272	0.114	0.083	0.114
EL	**0.840	0.362	0.223	-	0.086	0.076	0.092
ED	**0.700	0.187	0.181	0.167	-	0.096	0.069
HGW	**0.680	0.153	0.161	0.181	0.118	-	0.068
BY	**0.860	0.123	0.276	0.272	0.105	0.084	-

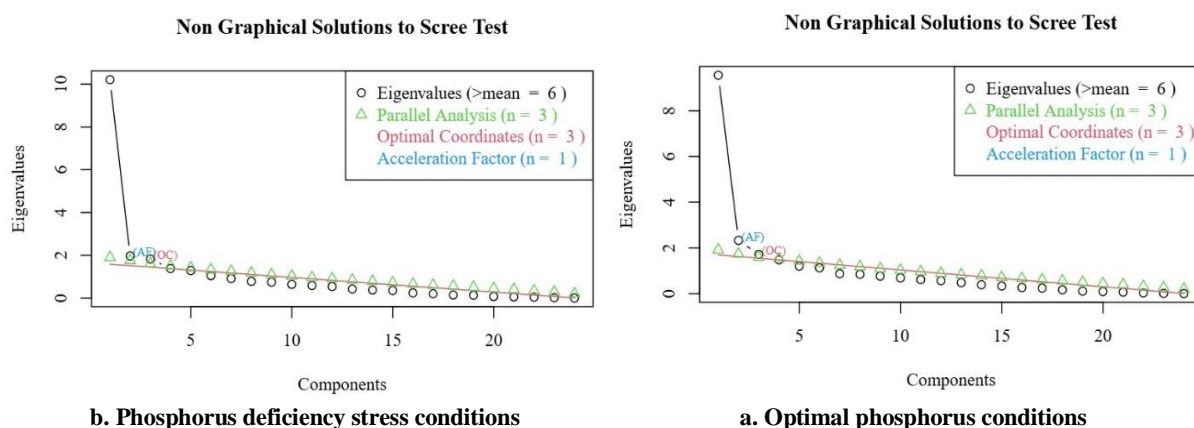
<sup>ns</sup> و \* : غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

<sup>ns</sup>, \*\*: Non significant and significant at 1% probability levels, respectively. The traits abbreviations are indicated in Table 3.

تنش کمبود فسفر، ۲۴ صفت موردبررسی را در سه عامل پنهانی توزیع نمود (شکل ۲) که این عوامل در مجموع در شرایط بهینه فسفر ۵۷ درصد و در شرایط تنش کمبود فسفر ۵۸ درصد از تنوع بین لاین‌های ذرت مورد مطالعه را توجیه نمودند. در مطالعه بر روی ۱۷ هیبرید ذرت دانه‌ای، پنج عامل پنهانی و مشترک بر اساس تجزیه به عامل‌ها شناسایی شد که در مجموع ۸۹/۱۷ درصد از تغییرات کل داده‌ها را تبیین می‌کردند. سهم هر کدام از عامل‌ها در توجیه واریانس کل به ترتیب ۲۷/۱۳، ۲۴/۶۸، ۱۶/۱۴، ۱۱/۵۱ و ۹/۷۲ درصد بود (Maschibahoosh et al., 2015).

### تحلیل عاملی

به منظور شناسایی عوامل توجیه‌کننده ارتباط صفات موردبررسی از تحلیل عاملی استفاده شد. مطلوب بودن حجم نمونه برای انجام تحلیل عاملی با شاخص KMO بررسی شد. مقادیر KMO در شرایط بهینه و کمبود فسفر برابر ۰/۸۲ بود که نشان‌دهنده مطلوب بودن حجم نمونه برای انجام آنالیزهاست. با توجه به تجزیه و تحلیل موازی (Parallel analysis) و معیار ساختار بسیار ساده (VSS=Very simple structure)؛ تحلیل عاملی در هر دو شرایط بهینه و



شکل ۲. تعیین تعداد بهینه عامل‌ها در تحلیل عاملی به روش‌های معیار کایزر، تجزیه و تحلیل موازی و معیار ساختار بسیار ساده در ذرت  
 a. شرایط بهینه فسفر، b. شرایط تنش کمبود فسفر).

Fig. 2. Determining the optimal number of factors in factor analysis using KMO criterion, parallel analysis and very simple structure (VSS) in maize. a. Optimal phosphorus conditions, b. Phosphorus deficiency stress conditions.

اسپد (شاخصی از میزان کلروفیل؛ سبزیگی) و تعداد انشعاب فرعی بود؛ که می‌توان آن را عامل مربوط به صفات فیزیولوژیک نامید. عامل سوم که ۷/۶۰ درصد از تغییرات کل را توجیه نمود، شامل صفات تعداد برگ بالای بلال، تعداد برگ در بوته، قطر چوب‌بلال و قطر بلال بود؛ که با توجه به ماهیت این صفات، عامل مؤثر بر بلال نام‌گذاری شد. نقوی و جهانسوز (Naghavi and Jahansouz, 2005) و مردی و همکاران (Mardi, 2003) عاملی را به‌عنوان عامل عملکرد معرفی کردند که شامل صفات وزن صد دانه، عملکرد دانه تک بوته، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در بوته بود. در مطالعه‌ای با انجام تجزیه عاملی از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و چرخش وریمکس روی صفات اندازه‌گیری شده بر روی ۶۱ هیبرید ذرت دانه‌ای مشاهده شد، هفت عامل مستقل ۷۹/۵ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کردند (Zeinal et al., 2005). خیاط نژاد و همکاران (Khayatnezhad et al., 2011) با انجام تجزیه به عامل‌ها، پنج عامل عملکرد، ویژگی سنبله، پنجه بارور، ارتفاع و شاخص برداشت را شناسایی کردند که بیش از ۸۵ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه می‌نمودند. ملاصادقی و همکاران (Mollasadeghi, 2011) جهت ارزیابی اثر تنش خشکی آخر فصل بر برخی ارقام گندم نان از تجزیه به عامل‌ها استفاده کردند؛ در شرایط تنش خشکی سه عامل تنوع داده‌ها را تبیین می‌نمود. در تحقیقی با مطالعه رابطه بین عملکرد و اجزای عملکرد در دو تیپ بهاره و پاییزه ماشک؛ در تیپ بهاره و پاییزه به ترتیب چهار و سه عامل شناسایی کردند که ۷۷ و ۸۲ درصد از تغییرات را توجیه می‌نمودند (Kansur

ماتریس ضرایب عاملی سه عامل اصلی در جدول ۱۰ ارائه شده است. در شرایط بهینه فسفر سه عامل جمعاً ۵۶/۶۶ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کردند. از این مقدار عامل اول ۳۹/۸۳ درصد از تغییرات را توجیه نمود که شامل صفات عملکرد دانه، وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف، عملکرد بیولوژیک، وزن صد دانه، وزن چوب‌بلال، طول بلال، قطر بلال، ارتفاع تا تاسل، ارتفاع تا بلال اصلی، عرض برگ، طول پدانکل و ارتفاع بوته بود؛ بنابراین می‌توان آن را عامل مؤثر بر عملکرد و اجزای عملکرد نام‌گذاری کرد. عامل دوم حدود ۹/۶۹ درصد از تغییرات را توجیه نمود که شامل صفات برگ بالای بلال، برگ کل بوته، زاویه برگ و تعداد انشعاب فرعی بود؛ که می‌توان آن را عامل وابسته به برگ گیاه نامید. عامل سوم که ۷/۱۵ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌نمود، شامل صفات قطر بلال و قطر چوب‌بلال بود؛ که با توجه به ماهیت این صفات، عامل مؤثر بر بلال نام‌گذاری شد.

در شرایط تنش کمبود فسفر سه عامل جمعاً ۵۸/۳۳ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کردند (جدول ۱۰). عامل اول که عامل مؤثر بر عملکرد و اجزای عملکرد نام‌گذاری شد ۴۲/۵۳ درصد از تغییرات را توجیه نمود که شامل صفات عملکرد دانه، وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف، عملکرد بیولوژیک، وزن صد دانه، وزن چوب‌بلال، طول بلال، قطر ساقه، طول پدانکل، ارتفاع بوته، ارتفاع تا تاسل، ارتفاع تا بلال اصلی، عرض برگ، طول برگ، دمای کانوپی و طول پدانکل بود. عامل دوم حدود ۸/۱۹ درصد از تغییرات کل را توجیه نمود که شامل صفات محتوای نسبی آب برگ، عدد

سبزی‌نگی برگ اسپد (۰/۰۳) کمترین میزان دقت برآورد را داشتند. در شرایط تنش کمبود فسفر صفات عملکرد دانه (۰/۹۱)، ارتفاع تا تاسل (۰/۸۷)، وزن بلال با غلاف و وزن بلال بدون غلاف (۰/۸۶)، عملکرد بیولوژیک (۰/۸۵) و ارتفاع تا تاسل (۰/۸۰) بیشترین میزان دقت برآورد را داشته و صفات درصد فسفر (۰/۰۹) و زاویه برگ (۰/۱۵) کمترین میزان دقت برآورد را داشتند (جدول ۱۰).

پراکنش لاین‌های ذرت در فضای بای‌پلات تحت هر دو شرایط بهینه (شکل ۳-ا) و تنش کمبود فسفر (شکل ۳-ب) مطابق با گروه‌بندی بر اساس تجزیه خوشه‌ای است. جهت‌گیری بردار صفات مورد بررسی در فضای بای‌پلات نشان می‌دهد که تحت هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر صفاتی که دارای میانگین بالا در خوشه اول حاصل از تجزیه خوشه‌ای بودند؛ دارای مقادیر بالا در لاین‌های قرار گرفته در خوشه اول هستند. در خوشه دوم لاین‌ها در شرایط بهینه

(Firincioglu et al., 2010). در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در ذرت مشاهده شد که سه مؤلفه اصلی اول ۸۱/۹۵ درصد از تغییرات صفات اندازه‌گیری شده را به خود اختصاص دادند. صفات مهمی که سهم عمده‌ای در تغییرات کل داشتند شامل عملکرد دانه، تعداد دانه در بلال، روز تا ۵۰ درصد تاسل، روز تا ۵۰ درصد ابریشم و تعداد ردیف دانه در بلال بودند (Pradhan et al., 2022).

میزان اشتراک نشان‌دهنده بخشی از واریانس یک متغیر است که به عوامل مشترک مربوط می‌شود. هرچه میزان آن بیشتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر در برآورد واریانس متغیر مربوطه است (Jackson, 1991). در شرایط بهینه فسفر صفات قطر بلال (۰/۸۰)، عملکرد دانه (۰/۸۵)، وزن بلال با غلاف و وزن بلال بدون غلاف (۰/۸۵)، عملکرد بیولوژیک (۰/۷۸) و ارتفاع تا تاسل (۰/۸۴) بیشترین میزان دقت برآورد را داشته و صفات محتوای نسبی آب برگ (۰/۰۵) و شاخص

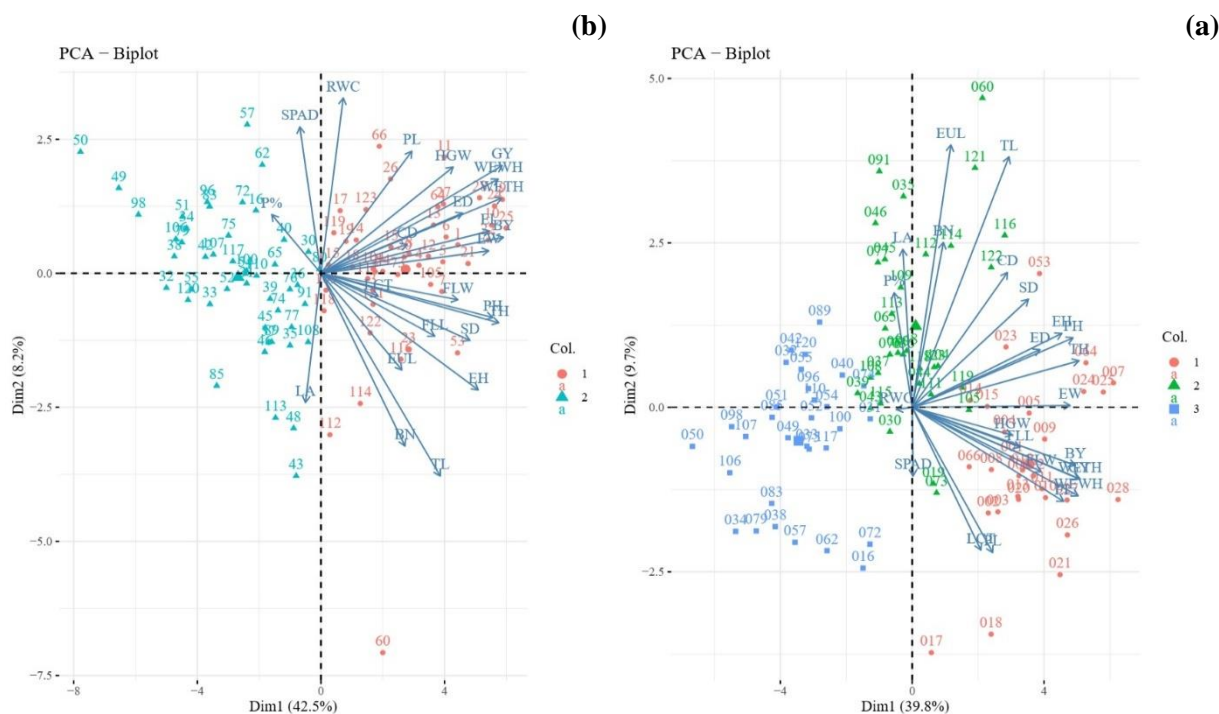
جدول ۱۰. ضرایب تحلیل عاملی صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر

Table 10. Factor analysis coefficients for investigated traits in maize lines under optimal and phosphorus deficiency stress conditions

صفات Traits	شرایط بهینه فسفر Optimal phosphorus conditions				شرایط تنش کمبود فسفر Phosphorus deficiency stress conditions			
	فاکتور ۱ Factor1		فاکتور ۲ Factor2		فاکتور ۳ Factor3		میزان اشتراک Communality	
	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	میزان اشتراک	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	میزان اشتراک
RWC	-0.03	0.01	-0.22	0.05	0.07	0.54	0.10	0.30
LCT	0.36	-0.37	0.17	0.29	0.46	-0.18	-0.23	0.30
SPAD	0.02	-0.18	-0.02	0.03	-0.16	0.47	0.06	0.25
FLL	0.70	0.10	-0.43	0.68	0.69	-0.30	-0.07	0.57
FLW	0.76	-0.09	-0.18	0.62	0.74	-0.16	0.08	0.57
EUL	0.11	0.69	0.24	0.55	0.02	-0.10	0.78	0.62
TL	0.43	0.70	0.21	0.72	0.30	-0.48	0.67	0.77
LA	-0.04	0.44	-0.15	0.22	-0.15	-0.34	0.11	0.15
EH	0.82	0.28	-0.04	0.75	0.68	-0.35	0.38	0.73
TH	0.89	0.20	0.07	0.84	0.78	-0.15	0.42	0.80
PH	0.84	0.25	0.11	0.79	0.75	-0.13	0.41	0.75
SD	0.56	0.32	0.23	0.47	0.59	-0.17	0.46	0.59
PL	0.41	-0.38	0.24	0.37	0.51	0.30	0.01	0.35
BN	0.25	0.51	-0.45	0.53	0.23	-0.44	0.44	0.44
EL	0.85	-0.17	-0.02	0.76	0.84	0.06	0.21	0.76
ED	0.52	0.13	0.71	0.80	0.42	0.29	0.68	0.73
CD	0.34	0.33	0.65	0.65	0.14	0.22	0.63	0.46
EW	0.78	0.04	0.34	0.73	0.68	0.09	0.48	0.71
HGW	0.53	-0.04	0.12	0.29	0.48	0.37	0.48	0.60
GY	0.85	-0.15	0.32	0.85	0.82	0.30	0.37	0.90
BY	0.85	-0.10	0.23	0.78	0.87	0.06	0.3	0.85
WETH	0.86	-0.14	0.29	0.85	0.85	0.19	0.32	0.86
WEWH	0.85	-0.19	0.30	0.85	0.85	0.23	0.29	0.86
P%	-0.16	0.28	0.18	0.14	-0.17	0.15	-0.19	0.09
Variance (%)	39.83	9.69	7.16	-	42.53	8.19	7.60	-
Cumulative variance (%)	39.83	49.52	56.66	-	42.53	50.73	58.33	-

The traits abbreviations are indicated in Table 3.

اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار بای‌پلات دو مؤلفه اصلی اول برای صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت در شرایط بهینه (a) و شرایط تنش کمبود فسفر (b).  
**Fig. 3.** Biplot of the two first principal components for investigated traits in maize lines (a) Optimal conditions and (b) Phosphorus deficiency stress conditions

تنش کمبود فسفر دو خوشه بهینه برای گروه‌بندی لاین مناسب بود (شکل ۴-ا). بر اساس حداکثر مقدار سیلوئت (Silhouette) میانگین، در شرایط بهینه و همچنین تنش کمبود فسفر دو خوشه برای گروه‌بندی لاین مناسب بود (شکل ۴-ب). در روش آرنج (Elbow)؛ که تعداد بهینه خوشه‌ها بر مبنای یافتن کمترین مقدار مجموع مربعات فواصل درون خوشه‌ای است، در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر سه خوشه برای گروه‌بندی لاین‌ها مناسب بود (شکل ۴-ج). بر اساس جمع‌بندی نتایج سه خوشه برای گروه‌بندی لاین‌ها در شرایط بهینه و دو خوشه برای گروه‌بندی در شرایط تنش کمبود فسفر در نظر گرفته شد. خوشه‌بندی سلسله مراتبی به روش وارد (Ward) روی داده‌های استاندارد شده در هر یک از شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر انجام شد. در شرایط بهینه فسفر در خوشه اول ۲۷ لاین Ma006, Ma005, Ma004, Ma003, Ma002, Ma001, Ma012, Ma011, Ma010, Ma009, Ma008, Ma007, Ma018, Ma017, Ma016, Ma015, Ma014, Ma013, Ma026, Ma025, Ma024, Ma022, Ma021, Ma020, Ma027, Ma028 و Ma064 قرار گرفتند که دارای میانگین بالا برای صفات دمای کانوپی، طول برگ پرچم، عرض برگ

مقادیر بالایی برای صفات زاویه برگ، درصد فسفر و محتوای نسبی آب برگ داشتند. لاین‌های قرار گرفته در خوشه سوم از نظر تمامی صفات دارای میانگین کم اما از نظر عدد اسپد (شاخص سبزیگی برگ) مقادیر بالا نشان دادند. در شرایط تنش کمبود فسفر لاین‌های قرار گرفته در خوشه دوم برای عدد اسپد (شاخص سبزیگی برگ)، زاویه برگ و درصد فسفر مقادیر بالا داشتند. در مطالعه غفاری‌آذر و همکاران (Ghaffari Azar et al., 2019) با انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر روی صفات مورد ارزیابی در ۱۰۰ لاین خالص ذرت، مشاهده شد که دو مؤلفه اول ۵۲ درصد از واریانس کل را به خود اختصاص دادند و صفات ارتفاع بوته، وزن دانه در بوته، وزن چوب‌بلال و قطر ابتدای چوب‌بلال به ترتیب بیشترین نقش را در توجیه مؤلفه اول و صفات وزن دانه در بوته، تاریخ ظهور گل نر و تاریخ ظهور بلال اول نیز بیشترین نقش را در توجیه مؤلفه دوم داشتند.

### تجزیه خوشه‌ای

بر اساس آماره Gap؛ که از طریق مقایسه مجموع تفاضلات درون خوشه‌ای داده‌ها با مقادیر مورد انتظار آن‌ها به دست می‌آید، در شرایط بهینه فسفر تعداد سه خوشه و در شرایط

جدول ۱۱. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت در خوشه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای در شرایط بهینه فسفر

Table 11. Comparison of investigated traits means in maize lines in clusters resulting from Hierarchical clustering under optimal phosphorus conditions

صفات	خوشه ۱	تعداد لاین		خوشه ۲	تعداد لاین		خوشه ۳	تعداد لاین	میانگین
Traits	1 Cluster	N=27		2 Cluster	N=45		3 Cluster	N=21	Mean
RWC	79.93 <sup>abc</sup>	Ma001	Ma027	82.18 <sup>abc</sup>	Ma019	Ma080	80.58 <sup>abc</sup>	Ma032	80.90
LCT	34.57 <sup>bc</sup>	Ma002	Ma028	31.94 <sup>bcd</sup>	Ma023	Ma089	31.78 <sup>abc</sup>	Ma033	32.76
SPAD	47.66 <sup>bc</sup>	Ma003	Ma064	45.80 <sup>de</sup>	Ma030	Ma091	48.67 <sup>bcd</sup>	Ma034	47.38
FLL	39.07 <sup>abc</sup>	Ma004		36.96 <sup>cde</sup>	Ma031	Ma104	30.71 <sup>abc</sup>	Ma037	35.58
FLW	5.46 <sup>abc</sup>	Ma005		5.46 <sup>abc</sup>	Ma035	Ma105	5.46 <sup>a</sup>	Ma038	5.46
EUL	5.14 <sup>abc</sup>	Ma006		5.38 <sup>bcd</sup>	Ma036	Ma108	4.90 <sup>a</sup>	Ma040	5.14
TL	11.59 <sup>abc</sup>	Ma007		11.89 <sup>cde</sup>	Ma039	Ma109	10.43 <sup>cde</sup>	Ma042	11.30
LA	139.81 <sup>bcd</sup>	Ma008		143.33 <sup>kl</sup>	Ma043	Ma110	141.83 <sup>cde</sup>	Ma049	141.66
EH	93.99 <sup>cde</sup>	Ma009		83.24 <sup>efg</sup>	Ma044	Ma111	60.68 <sup>abc</sup>	Ma050	79.30
TH	229.75 <sup>de</sup>	Ma010		207.27 <sup>cde</sup>	Ma045	Ma112	169.29 <sup>bcd</sup>	Ma051	202.10
PH	194.02 <sup>cde</sup>	Ma011		173.75 <sup>def</sup>	Ma046	Ma113	141.32 <sup>bcd</sup>	Ma052	169.70
SD	23.00 <sup>bcd</sup>	Ma012		21.98 <sup>def</sup>	Ma048	Ma114	18.53 <sup>de</sup>	Ma055	21.17
PL	13.08 <sup>cd</sup>	Ma013		9.67 <sup>efg</sup>	Ma053	Ma115	9.19 <sup>bcd</sup>	Ma057	10.65
BN	7.93 <sup>cd</sup>	Ma014		9.44 <sup>efg</sup>	Ma054	Ma116	8.37 <sup>cd</sup>	Ma079	8.58
EL	19.83 <sup>bcd</sup>	Ma015		16.49 <sup>bcd</sup>	Ma060	Ma117	12.88 <sup>abc</sup>	Ma083	16.40
ED	45.08 <sup>abc</sup>	Ma016		41.61 <sup>bcd</sup>	Ma062	Ma118	38.92 <sup>bcd</sup>	Ma085	41.87
CD	26.76 <sup>abc</sup>	Ma017		26.09 <sup>bcd</sup>	Ma065	Ma119	24.10 <sup>bc</sup>	Ma096	25.65
EW	30.10 <sup>bcd</sup>	Ma018		22.44 <sup>bcd</sup>	Ma066	Ma120	13.75 <sup>ab</sup>	Ma098	22.10
HGW	33.75 <sup>cde</sup>	Ma020		29.48 <sup>cde</sup>	Ma072	Ma121	25.93 <sup>abc</sup>	Ma100	29.72
GY	167.18 <sup>cde</sup>	Ma021		102.69 <sup>def</sup>	Ma073	Ma122	68.22 <sup>bcd</sup>	Ma106	112.70
BY	346.76 <sup>de</sup>	Ma022		212.64 <sup>bcd</sup>	Ma074	Ma123	154.35 <sup>abc</sup>	Ma107	237.91
WETH	230.43 <sup>abc</sup>	Ma024		138.72 <sup>bcd</sup>	Ma075		97.99 <sup>abc</sup>		155.71
WEWH	215.93 <sup>abc</sup>	Ma025		123.42 <sup>cde</sup>	Ma076		86.34 <sup>abc</sup>		141.90
P%	1.02 <sup>bcd</sup>	Ma026		1.19 <sup>def</sup>	Ma077		1.09 <sup>bc</sup>		1.10

میانگین‌هایی که در هر ردیف با حروف مشابه مشخص شده‌اند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند. اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

Means followed by similar letter in each row are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level. The traits abbreviations are indicated in Table 3.

تعداد برگ بالای بلال، برگ کل بوته، زاویه برگ، تعداد انشعاب فرعی و درصد فسفر دارای میانگین بالا نسبت به دو خوشه دیگر بودند و این لاین‌ها عملکرد نسبتاً بالایی در شرایط بهینه فسفر داشتند. در خوشه سوم ۲۱ لاین Ma032، Ma033، Ma034، Ma037، Ma038، Ma040، Ma042، Ma049، Ma050، Ma051، Ma052، Ma055، Ma057، Ma079، Ma083، Ma085، Ma096، Ma098، Ma100، Ma106 و Ma107 قرار گرفت که دارای کمترین میانگین برای تمامی صفات بودند؛ اما از نظر شاخص سبزینگی SPAD دارای میانگین بالا نسبت به دو خوشه دیگر بودند. لاین‌های قرار گرفته در این خوشه نسبت به دو خوشه دیگر عملکرد پایین نشان دادند (شکل ۵-ا و جدول ۱۱).

در شرایط تنش کمبود فسفر تعداد ۴۳ لاین Ma001، Ma002، Ma003، Ma004، Ma005، Ma006، Ma007، Ma008، Ma009، Ma010، Ma011، Ma012، Ma013

پرچم، ارتفاع تا بلال اصلی، ارتفاع تا تاسل، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، وزن چوب‌بلال، قطر ساقه، طول پدانکل، طول بلال، قطر بلال، بلال با غلاف، عملکرد بیولوژیک، وزن بلال بدون غلاف و عملکرد دانه بودند که اختلاف معنی‌داری با دو خوشه دیگر نشان دادند. همچنین این خوشه از نظر صفت قطر چوب‌بلال نسبت به دو خوشه دیگر دارای میانگین بالاتر از میانگین کل بود. ۴۵ لاین Ma019، Ma023، Ma030، Ma031، Ma035، Ma036، Ma039، Ma043، Ma044، Ma045، Ma046، Ma048، Ma053، Ma054، Ma060، Ma062، Ma065، Ma066، Ma072، Ma073، Ma074، Ma075، Ma076، Ma077، Ma080، Ma089، Ma091، Ma104، Ma105، Ma108، Ma109، Ma110، Ma111، Ma112، Ma113، Ma114، Ma115، Ma116، Ma117، Ma118، Ma119، Ma120، Ma121، Ma122 و Ma123 قرار گرفته در خوشه دوم از نظر صفات محتوای نسبی آب برگ،

Ma040, Ma042, Ma043, Ma045, Ma046, Ma048, Ma049, Ma050, Ma051, Ma052, Ma054, Ma055, Ma057, Ma060, Ma062, Ma065, Ma072, Ma074, Ma075, Ma076, Ma077, Ma079, Ma080, Ma083, Ma085, Ma089, Ma091, Ma096, Ma098, Ma100, Ma106, Ma107, Ma108, Ma109, Ma110, Ma111, Ma112, Ma117, Ma120 و قرار گرفته در خوشه دوم از نظر صفات شاخص سبزی‌نگی SPAD، زاویه برگ و درصد فسفر دارای میانگین بالا نسبت به خوشه دیگر و میانگین کل بودند، این لاین‌ها دارای عملکرد بالا در شرایط تنش کمبود فسفر بودند. تعداد ۵۰ لاین Ma016, Ma030, Ma031, Ma032, Ma033, Ma034, Ma035, Ma036, Ma037, Ma038, Ma039، Ma014, Ma015, Ma017, Ma018, Ma019, Ma020, Ma021, Ma022, Ma023, Ma024, Ma025, Ma026, Ma027, Ma028, Ma044, Ma053, Ma064, Ma066, Ma073, Ma105, Ma114, Ma115, Ma118, Ma119 و Ma121 و Ma122 در خوشه اول قرار گرفت که از نظر تمامی صفات به جز صفات شاخص سبزی‌نگی SPAD، زاویه برگ و درصد فسفر دارای میانگین بالا نسبت به خوشه دیگر و میانگین کل بودند، این لاین‌ها دارای عملکرد بالا در شرایط تنش کمبود فسفر بودند. تعداد ۵۰ لاین Ma016, Ma030, Ma031, Ma032, Ma033, Ma034, Ma035, Ma036, Ma037, Ma038, Ma039، Ma014, Ma015, Ma017, Ma018, Ma019, Ma020, Ma021, Ma022, Ma023, Ma024, Ma025, Ma026, Ma027, Ma028, Ma044, Ma053, Ma064, Ma066, Ma073, Ma105, Ma114, Ma115, Ma118, Ma119 و Ma121 و Ma122 در خوشه اول قرار گرفت که از نظر تمامی صفات به جز صفات شاخص سبزی‌نگی SPAD، زاویه برگ و درصد فسفر دارای میانگین بالا نسبت به خوشه دیگر و میانگین کل بودند، این لاین‌ها دارای عملکرد پایین‌تر نسبت به لاین‌های قرار گرفته در خوشه اول بودند (شکل ۵-b و جدول ۱۲).

جدول ۱۲. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی در لاین‌های ذرت در خوشه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای در شرایط تنش کمبود فسفر

Table 12. Comparison of investigated traits means in maize lines in clusters resulting from Hierarchical clustering under phosphorus deficiency stress conditions

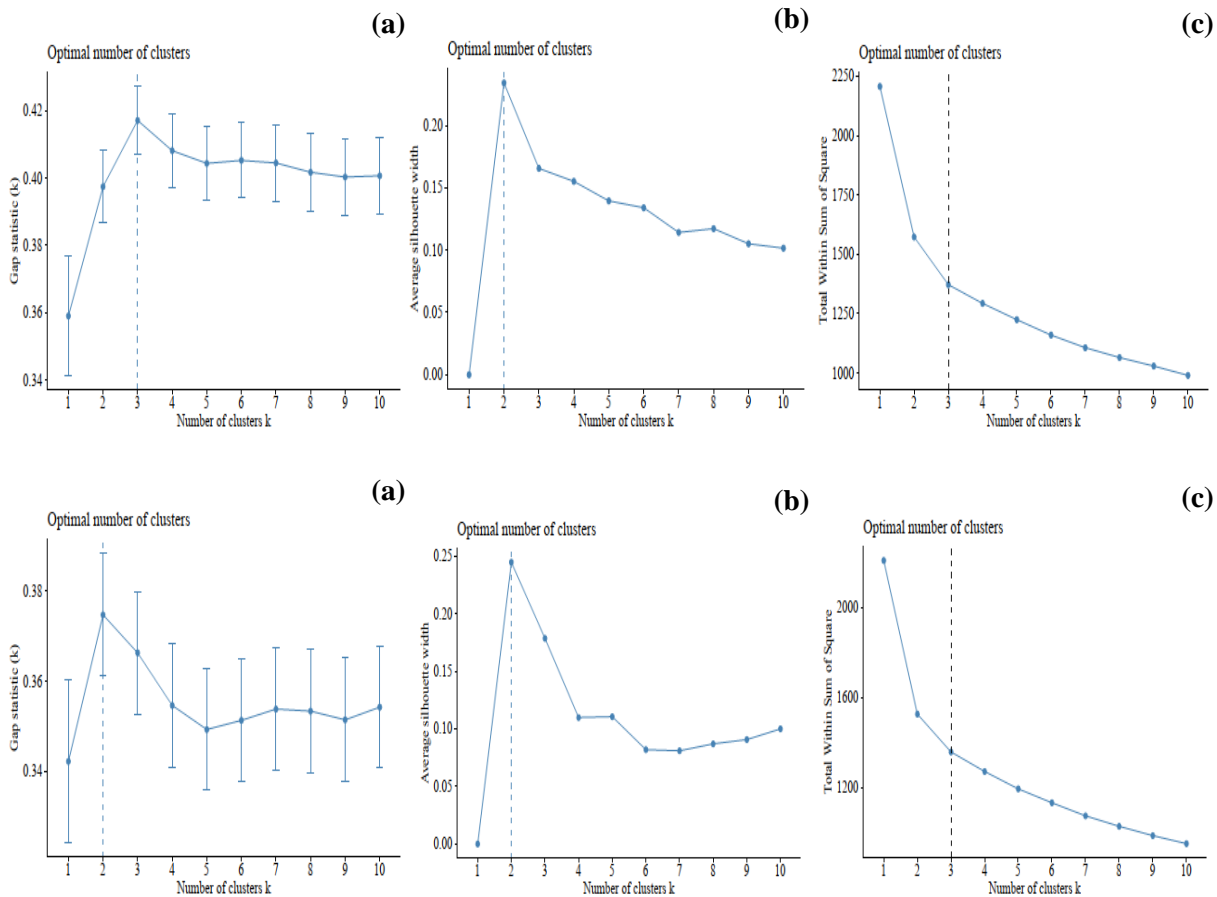
صفات	خوشه ۱	تعداد لاین		خوشه ۲	تعداد لاین			میانگین
Traits	1 Cluster	N=43		2 Cluster	N=50			Mean
RWC	78.38 <sup>abc</sup>	Ma001	Ma026	76.56 <sup>abc</sup>	Ma016	Ma060	Ma117	77.47
LCT	30.77 <sup>def</sup>	Ma002	Ma027	30.30 <sup>cde</sup>	Ma030	Ma062	Ma120	30.53
SPAD	34.09 <sup>def</sup>	Ma003	Ma028	34.88 <sup>ghi</sup>	Ma031	Ma065		34.49
FLL	32.74 <sup>bcd</sup>	Ma004	Ma044	27.48 <sup>def</sup>	Ma032	Ma072		30.11
FLW	4.25 <sup>bcd</sup>	Ma005	Ma053	3.41 <sup>cde</sup>	Ma033	Ma074		3.83
EUL	4.71 <sup>abc</sup>	Ma006	Ma064	4.47 <sup>bcd</sup>	Ma034	Ma075		4.59
TL	10.74 <sup>bcd</sup>	Ma007	Ma066	9.92 <sup>def</sup>	Ma035	Ma076		10.33
LA	134.88 <sup>efg</sup>	Ma008	Ma073	136.40 <sup>hij</sup>	Ma036	Ma077		135.64
EH	77.62 <sup>cde</sup>	Ma009	Ma104	59.41 <sup>fgh</sup>	Ma037	Ma079		68.52
TH	206.09 <sup>bcd</sup>	Ma010	Ma105	161.49 <sup>cde</sup>	Ma038	Ma080		183.79
PH	171.83 <sup>cde</sup>	Ma011	Ma111	135.05 <sup>cde</sup>	Ma039	Ma083		153.44
SD	19.77 <sup>bcd</sup>	Ma012	Ma114	16.56 <sup>bcd</sup>	Ma040	Ma085		18.17
PL	10.13 <sup>bcd</sup>	Ma013	Ma115	7.24 <sup>cde</sup>	Ma042	Ma089		8.68
BN	8.19 <sup>bcd</sup>	Ma014	Ma116	6.47 <sup>def</sup>	Ma043	Ma091		7.33
EL	16.12 <sup>bcd</sup>	Ma015	Ma118	11.14 <sup>def</sup>	Ma045	Ma096		13.63
ED	39.21 <sup>ab</sup>	Ma017	Ma119	34.32 <sup>abc</sup>	Ma046	Ma098		36.77
CD	23.12 <sup>abc</sup>	Ma018	Ma121	21.71 <sup>abc</sup>	Ma048	Ma100		22.41
EW	19.77 <sup>bcd</sup>	Ma019	Ma122	11.24 <sup>def</sup>	Ma049	Ma106		15.50
HGW	26.65 <sup>abc</sup>	Ma020	Ma123	20.87 <sup>def</sup>	Ma050	Ma107		23.76
GY	106.41 <sup>abc</sup>	Ma021		50.42 <sup>cde</sup>	Ma051	Ma108		78.42
BY	223.96 <sup>efg</sup>	Ma022		120.38 <sup>efg</sup>	Ma052	Ma109		172.17
WETH	139.10 <sup>bcd</sup>	Ma023		64.47 <sup>efg</sup>	Ma054	Ma110		101.79
WEWH	126.47 <sup>cde</sup>	Ma024		54.19 <sup>efg</sup>	Ma055	Ma111		90.33
P%	0.56 <sup>abc</sup>	Ma025		0.62 <sup>bcd</sup>	Ma057	Ma112		0.59

میانگین‌هایی که در هر ردیف با حروف مشابه مشخص شده‌اند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

اختصارات صفات در جدول ۳ نشان داده شده است.

Means followed by similar letter in each row are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

The traits abbreviations are indicated in Table 3.



شکل ۴. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در گروه‌بندی لاین‌های ذرت بر اساس صفات موردبررسی در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر به روش‌های (a) Gap، (b) Silhouette، و (c) Elbow.

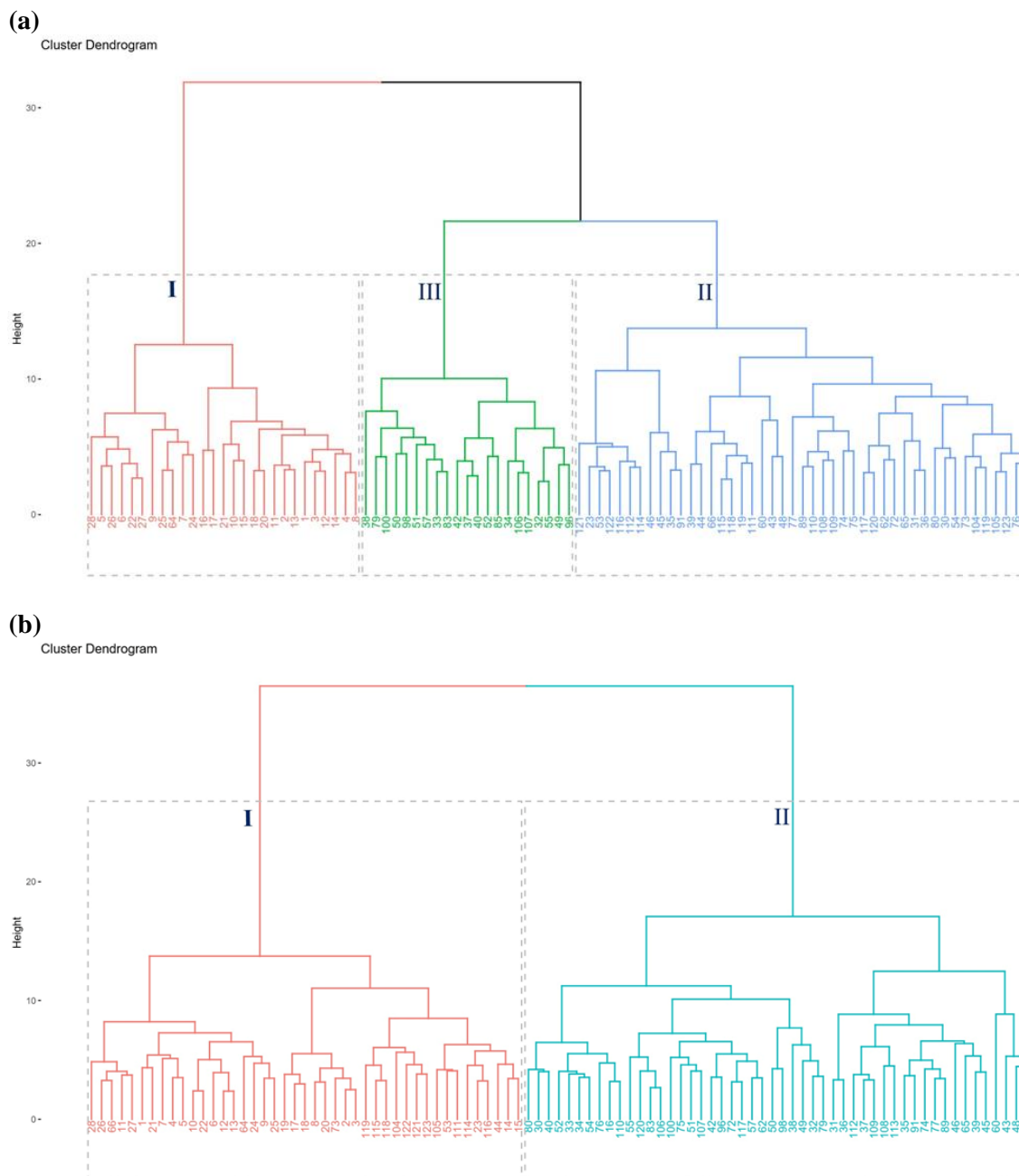
**Fig. 4.** Determining the optimal number of clusters in the grouping maize lines based on the investigated traits under optimal and phosphorus deficiency stress conditions using Gap (a), Silhouette (b) and Elbow (c) methods.

موقعیت را در دندروگرام داشتند (Nikkhoy and Shiri, 2017). ولیزاده و همکاران (Valizadeh et al., 2014) هیبرید ذرت را با استفاده از تجزیه خوشه‌ای از نظر عملکرد و صفات مورفولوژیک مطالعه کردند، نتایج نشان داد که صفات موردبررسی در دو خوشه گروه‌بندی شدند؛ خوشه اول از نظر ارتفاع بوته، عمق دانه، وزن هزار دانه، طول بلال، فاصله گرده‌افشانی تا کاکل دهی و تعداد دانه در ردیف و خوشه دوم نیز از نظر صفات تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، تعداد دانه در ردیف، قطر بلال، ارتفاع بلال، قطر چوب‌بلال، تعداد روز تا گرده‌افشانی و روز تا کاکل دهی دارای میانگین بیشتری بودند. در تحقیق بر روی ۶۴ رقم گندم بهاره، ارقام نیشابور، گلستان و گهر به‌عنوان ارقام مطلوب و متحمل تحت شرایط بهینه و کمبود عنصر روی بر اساس تجزیه خوشه‌ای شناسایی شدند که می‌توان از آن‌ها در برنامه‌های بهنژادی استفاده کرد

در این مطالعه تنوع و پتانسیل قابل توجهی در لاین‌های ذرت تحت تنش کمبود فسفر مشاهده شد. لاین‌های موجود در خوشه اول به دلیل میانگین عملکرد بالا در شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر، از پتانسیل بالایی برای توسعه هیبریدهای متحمل به تنش کمبود دارند. النگار و همکاران (Al-Naggar, 2020) از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای برای ارزیابی و طبقه‌بندی ۱۹ هیبرید ذرت استفاده کردند و نشان دادند که این روش قادر است به‌طور مؤثر هیبریدهای ذرت را بر اساس تنوع ژنتیکی آن‌ها گروه‌بندی کند. در مطالعه ۲۰ هیبرید ذرت با استفاده از صفات مورفولوژیک مشاهده شد، هیبریدهای ذرت مورد مطالعه در پنج خوشه دسته‌بندی شدند که نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی قابل توجهی در بین هیبریدهای ذرت است؛ بالاترین فاصله ژنتیکی بین دو هیبرید KERMESS و KSC706 یافت شد که اولین و آخرین

رقم ذرت، تعداد بهینه خوشه‌ها از طریق آماره Gap سه خوشه تشخیص داده شد؛ ارقام قرارگرفته در خوشه اول تحمل به تنش شوری بیشتری نشان دادند (Huqe et al., 2021).

(Valipour et al., 2023). در گروه‌بندی نژادهای مکزیکی ذرت، تعداد ۷۱ نژاد با استفاده از ۲۵ صفت مورفولوژیکی در هفت گروه مختلف گروه‌بندی شدند (Sanchez and Goodman, 1992). در مطالعه تحمل به تنش شوری ۱۸



شکل ۵. دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای سلسله مراتبی به روش وارد لاین‌های ذرت (a. شرایط بهینه، b. شرایط تنش کمبود فسفر).

Fig. 5. Dendrogram resulted from hierarchical cluster analysis using Ward method of maize lines (a. Optimal conditions, b. Phosphorus deficiency stress conditions)

کمبود فسفر از نظر صفات مورد بررسی از جمله عملکرد دانه که با بیشتر صفات مانند وزن بلال با غلاف، وزن بلال بدون غلاف، عملکرد بیولوژیک، طول بلال و وزن چوب‌بلال همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد، لاین‌های ۵، ۷، ۱۰، ۲۴، ۲۸، ۴۸،

### نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تنوع ژنتیکی گسترده‌ای بین لاین‌های ذرت از لحاظ صفات بررسی شده تحت شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر وجود دارد. در شرایط بهینه و تنش

بدون غلاف، طول بلال، قطر بلال، عملکرد بیولوژیک و وزن صد دانه در شرایط تنش کمبود فسفر بیشترین تأثیر را بر عملکرد دانه داشتند بنابراین، می‌توان این صفات را به‌عنوان صفات کلیدی برای توسعه ژنوتیپ‌های ذرت با عملکرد بالا تحت شرایط تنش کمبود فسفر معرفی نمود. برای بهره‌برداری عملی از این یافته‌ها، راهکارهای مدیریتی و اجرایی همچون انتخاب دقیق مواد ژنتیکی، بهبود مدیریت خاک و کوددهی پیشنهاد می‌شود. این رویکردها می‌توانند به ارتقای پایداری و کارایی سامانه‌های زراعی کمک کنند و درنهایت به افزایش بهره‌وری و مقاومت محصول در برابر تنش‌های محیطی منجر شوند.

۶۴، ۱۱۴ و ۱۲۱ بیشترین مقدار میانگین را دارا بودند که می‌توان این لاین‌ها را به‌عنوان لاین‌هایی با کارایی بالای فسفر معرفی نمود؛ بنابراین می‌توان از این لاین‌ها به‌عنوان والدین در برنامه‌های بهنژادی در جهت بهبود عملکرد و توسعه ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کمبود فسفر استفاده نمود. لاین‌های ۳۸، ۴۹، ۵۰، ۷۹، ۸۵ و ۹۸ از نظر صفات موردبررسی در هر دو شرایط بهینه و تنش کمبود فسفر کمترین مقدار میانگین را دارا بودند که این لاین‌ها به‌عنوان لاین‌های فسفر-ناکارا شناسایی شدند. این لاین‌ها پتانسیل کمتری برای رشد و عملکرد در شرایط کمبود فسفر هستند. با توجه به اینکه صفات وزن بلال بدون غلاف، وزن چوب‌بلال، قطر بلال، طول بلال و قطر چوب‌بلال در شرایط بهینه و صفات وزن بلال

#### منابع

- Acquah, G.M., Adamas, W., Kelly, J.D., 1992. A factor analysis of plant variables associated with architecture and seed size in dry bean. *Euphytica*. 60(3), 171-177. <https://doi.org/10.1007/BF00039395>
- Adeyemi, O., Keshavarz-Afshar, R., Jahanzad, E., Battaglia, M.L., Luo, Y. Sadeghpour, A., 2020. Effect of wheat cover crop and split nitrogen application on corn yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy*. 10(8), 1081. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081081>
- Afzal, A., Bano, A., 2008. Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum*). *International Journal of Agriculture and Biology*. 10 (1), 1560-1566. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1081-1\\_108](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1081-1_108)
- Ahmad Hisham, A.R., Ch'ng, H.Y., Rahman, M.M., Mat, K. Zulhisyam, A.K., 2021. Effects of zinc on the growth and yield of maize (*Zea mays* L.) cultivated in a tropical acid soil using different application techniques. *Earth and Environmental Science*. 756, 01205. <http://doi.org/10.1088/17551315/756/1/012056>
- Ahmadi, J., Vaezi, B., Pour-aboughadareh A., 2016. Analysis of variability, heritability, and interrelationships among grain yield and related characters in barley advanced lines. *Genetika*. 48 (1), 73-85. <http://doi.org/10.2298/GENSR1601073A>
- Akshaya, M., Shantakumar, G., Sridevi, O., Sangamesh, N., 2022. Correlation and path coefficient analysis for determining interrelationships among grain yield and yield related characters in maize hybrids (*Zea mays* L.). *Pharma Innovation*. 11(3), 1343-1346. <http://doi.org/10.22271/tpi.2022.v11.i3r.11471>
- Ali, A., Adnan, M., Abbas, A., Javed, M.A., Safdar, M.E., Asif, M., Imran, M., Iqbal, T., Rehman, F.U., Ahmad, R., 2020. Comparative performance of various maize (*Zea mays* L.) cultivars for yield and related attributes under semi-arid environment. *AGBIR*. 36(4), 63-66.
- Al-Naggar, A.M.M., Shafik, M.M., Musa, R.Y.M., 2020. Genetic diversity based on morphological traits of 19 maize genotypes using principal component analysis and GT biplot. *Annual Research & Review in Biology*. 35(2), 68-85. <http://doi.org/10.9734/ARRB/2020/v35i230191>
- Ansari, M., 2004. Effect of biological fertilizer on corn yield in different climates. Report of monitoring and Support Unit of Green Biotech Company. Jahade-Daneshgahi Tehran. [In Persian].
- Azimi, S.M., Nabati, E., Lak, M., Shaban, M., 2015. Effect of N and P fertilizers on yield components of barley. *International Journal Advanced Biology and Biomedical Research*. 2(2), 365-370.
- Bayuelo-Jiménez, J.S., Gallardo-Valdéz, M., Pérez-Decelis, V.A., MagdalenoArmas, L., Ochoa, I., 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.001>
- Beiragi, M.A., Khavari Khrasani, S., Shojaei, S.H., Dadresan, M., Mostafavi, K.h., Golbashy, M., 2011. A study on effects of planting dates on growth and yield of 18 corn hybrids (*Zea mays* L.). *American Journal of Experimental Agriculture*. 1(3), 110-120. <http://doi.org/10.9734/AJEA/2011/339>
- Beyaert, R.P., Roy, R.C., 2005. Influence of nitrogen fertilization on multi-cut forage sorghum – sudangrass yield and nitrogen use. *Agronomy Journal*. 97(6), 1493-1501. <http://doi.org/10.2134/agronj2005.0079>
- Bialeski, R.L., 1973. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Review in Plant Physiology*. 24, 225–252. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.001301>
- Cadot, S., Bélanger, G., Ziadi, N., Morel, C., 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. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9956-0>
- Calderón-Vázquez, C., Alatorre-Cobos, F., Simpson-Williamson, J., Herrera-Estrella, L., 2009. Maize under phosphate limitation. In J.L. Bennetzen, Hake, S.C. (Eds.), *Handbook of Maize: Its Biology*, (pp: 381–404). Springer Link. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-9418-1-19>
- Chen, Y.L., Rengel, Z., Palta, J., 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. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0415-3>
- Cordell, D., White, S., 2013. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. *Agronomy*. 3(1), 86–116. <https://doi.org/10.3390/agronomy3010086>
- Das, H., Devi, N.S., Venu, N., Borah, A., 2023. Chemical fertilizer and its effects on the soil environment. *Research and Review in Agriculture Sciences*. 7, 31-51.
- Devasree, S., Ganesan, K.N., Ravikesavan, R., Senthil, N., Paranidharan, V., 2020. Relationship between yield and its component traits for enhancing grain yield in single cross hybrids of maize (*Zea mays* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*. 11(3), 796-802. <https://doi.org/10.37992/2020.1103.131>
- Fatemi, R., Kahrarian, B., Ghanbary, A., Valizadeh, M., 2006. The evaluation of different irrigation regimes and water requirement on yield and yield component of corn. *Journal of Agricultural Science*. 1, 133-141. [In Persian].
- Fathi, A., Zeidali, E., 2021. Conservation tillage and nitrogen fertilizer: a review of corn growth and yield and weed management. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*. 1(3), 121-142. <https://doi.org/10.22034/CAJPSI.2021.03.01>
- Ghaffari Azar, A., Darvishzadeh, R., Molaii, B., Kahrizi, D., Darvishi, B., 2019. Classification of maize inbred line based on agromorphological traits in order to produce hybrid seed. *Modares Journal of Biotechnology*. 10, 297-304. [In Persian]. <https://dor.org/20.1001.1.23222115.1398.10.2.17.1>
- Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J., Sheppard, S.C., 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*. 81, 211-224. <https://doi.org/10.4141/P00-093>
- Hebbali, A., 2020. R package ‘olsrr’. Ver. 0.5.3. Tools for building OLS regression models.
- Hosseini, S.M.S., Mostafavi, Kh., Shiri, M.R., Mohammadi, A., Miri, S.M., 2021. Genetically analysis of grain yield and some agro - morphological characteristics of selected early maturity maize lines using diallel analysis. *Cereal Research*. 11(3), 269 -280 [In Persian]. <https://doi.org/10.22124/CR.2021.20851.1694>
- Huqe, M.A.S., Haque, M.S., Sagar, A., Uddin, M.N., Hossain, M.A., Hossain, A.Z., Rahman, M.M., Wang, X., Al-Ashkar, I., Ueda, A., El-Sabagh, A., 2021. Characterization of maize hybrids (*Zea mays* L.) for detecting salt tolerance based on morpho-physiological characteristics, ion accumulation and genetic variability at early vegetative stage. *Plants*. 10, 2549. <https://doi.org/10.3390/plants10112549>
- Islam, N.U., Ali, G., Dar, Z.A., Maqbool, S., Baghel, S., Bhat, A., 2020. Genetic variability studies involving drought tolerance related traits in maize (*Zea mays* L.) in bred. *International Journal of Chemical Studies*. 8(1), 414-419.

- <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1f.82>  
82
- Jackson, J.E., 1991. A user's guide to principal components. Wiley Interscience. New York U.S.A. 569 pp.  
<https://doi.org/10.1002/0471725331>
- Jayaraman, K., 1999. A Statistical Manual For Forestry Research. Food and Agricultural Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific Bangkok. 234pp.
- Jones, C.A., Jacobsen, J.S., Wraith, J.M., 2003. The effects of P fertilization on drought tolerance of malt barley. In "Western Nutrient Management Conference. 5, 88-93.
- Kafi Ghasemi, A., Esfahani, M., 2005. Effects of nitrogen fertilizer levels on yield and yield components of dent corn (*Zea mays* L.) in Guilan. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 12(5), 55-62.
- Kansur Firincioglu, H., Unal, S., Erbehtas, E. Dogruyol, L., 2010. Relationships between seed yield and yield components in common vetch (*Vicia sativa ssp. sativa*) populations sown in spring and autumn in central Turkey. Field Crops Research. 116, 30-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.11.005>
- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. R package 'factoextra'. Ver. 1.0.7. Extract and visualize the results of multivariate data analyses.  
<https://rpkgs.datanovia.com/factoextra/#factoextra-extract-and-visualize-the-results-of-multivariate-data-analyses>
- Ketterings, Q., Czymmek, K., Removal of Phosphorus by Field Crops; Agronomy Fact Sheet Series; Fact Sheet #28; Nutrient Management Spear Program, Cornell University: Ithaca, NY, USA; Available online: <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet28.pdf> (accessed on 25 July 2020).
- Khan, T.A., Ashraf, I., Mahmood, A., Ilyas, M., Cheema, S.A., Iqbal, M.M., Hassan, M.U., 2023. Exploring the phosphorus efficient maize genotypes on the base of growth and yield traits. Pakistan Journal of Agricultural Research. 36(2), 161-168.  
<https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2023/36.2.161.168>
- Khayatnezhad, M., Zaefizadeh, M., Gholamain, R., 2011. Factor analysis of yield and other traits of Durum wheat under drought stress and non stress conditions. Plant Ecophysiology. 3, 23-2. [In Persian].
- Leilah, A.A., Al-Khateeb, S.A., 2005. Statistical analysis of wheat yield under drought conditions. Journal Arid Environ. 61, 483-496.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.011>
- Li, K., Xu, Z., Zhang, K., Yang, A., Zhang, J., 2007. Efficient production and characterization for maize inbred lines with low-phosphorus tolerance. Plant Science. 172 (2), 255-264.  
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.09.004>
- Maleki, A., Fathi, A., Bahamin, S., 2020. The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea mays* L.) under drought stress. Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research. 15(59), 1-16. [In Persian].  
<https://dor.org/20.1001.1.76712423.1399.15.5.9.1.8>
- Mardi, M., Taleei, A., Omid, M., 2003. A study of genetic diversity and identification of yield components in Desi chickpea. Iranian Journal of Agriculture Sciences. 34(2), 345-351. [In Persian].
- Maschibahoosh, M., Abbaskokht, H., Rabiee, B., 2015. Diversity among new maize hybrids for quantitative and morphological traits. Iranian Journal of Field Crop Science. 46(3), 351 -367. [In Persian].
- Masjibahoosh, M., Rabiee, B., Abasdokht, H., Kaf ghasemi, A., Jahandide, H., 2006. Analysis of correlation coefficients between grain yield and its components in corn hybrids. Iranian Journal of Crop Sciences. 2, 215-223. [In Persian].
- Masood, M., Ahsan, M., Sadaqat, H.A., Awan, F., 2020. Screening of maize (*Zea mays* L.) inbred lines under water deficit conditions. Biological and Clinical Sciences Research Journal. p.e 007.  
<https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2020i1.7>
- Mollasadeghi, V., Imani, A.A., Shahryari, R., Khayatnezhad, M., 2011. Classifying bread wheat genotypes by multivariable statistical analysis to achieve high yield under after anthesis drought. Middle-East Journal of Scientific Research. 7, 217-220.
- Mousavi, S., Nagy, J., 2021. Evaluation of plant characteristics related to grain yield of FAO410 and FAO340 hybrids using regression models. Cereal Research Communications. 49(1), 161-169.  
<https://doi.org/10.1007/s42976-020-00076-3>

- Naghavi, M.R., Jahansouz, M.R., 2005. Variation in the agronomic and morphological traits of Iranian chickpea accessions. *Journal of Integrative Plant Biology*. 47(3), 375-379. <https://doi.org/10.1111/j.17447909.2005.00058.x>
- Naruee Rad, M.R., Farzanjoo, M., Fanaei, H.R., Arjmandi nejad, A.R., Ghasemi, A, Pol shekan Pahlavan, M.R., 2006. Evaluation of genetic diversity and factor analysis for morphological traits of Sistan and Baluchestan landraces accessions of wheat. *Journal of Construction Research in Agriculture and Horticulture*. 73, 50-57. [In Persian].
- Nikkhoy, F., Shiri, M., 2017. Genetic diversity analysis of maize hybrids through morphological traits and simple sequence repeat markers. *Journal Plant Molecular Breeding*. 5(1), 49-60. <https://doi.org/10.22058/jpmb.2017.31701.1081>
- Panigrahy, M., Rao, D.N., Sarla, N., 2009. Molecular mechanisms in response to phosphate starvation in rice. *Biotechnology Advances*. 27(4), 389-97. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.02.006>
- Pradhan, P., Thapa, B., Ghosh, A., Subba, V., Kundagrami, S., 2022. Trait association and principal component analysis in maize (*Zea mays* L.) inbred lines. *Environment and Ecology*. 40(4C), 2527-2531.
- Priyanto, S.B., Prayitno, O.D., Efendi, R., 2023. Correlation and path analysis maize hybrid yield. *Journal of Suboptimal Lands*. 12(1), 80-87. <https://doi.org/10.36706/JLSO.12.1.2023.629>
- Qiao, B., He, X., Liu, Y., Zhang, H., Zhang, L., Liu, L., Reineke, A.-J., Liu, W., Müller, J., 2022. Maize characteristics estimation and classification by spectral data under two soil phosphorus levels. *Remote Sens*. 14, 493. <https://doi.org/10.3390/rs14030493>
- Qureshi, M.A., Ahmad, Z.A., Akhtar, N., Iqbal, A., Mujeeb, F., Shakir, M.A., 2012. Role of phosphate solubilizing bacteria (PSB) in enhancing P availability and promoting cotton growth. *Journal of Animal and Plant Sciences*. 22, 204-210.
- Rahimi, Y., Bihamta, M.R., Taleei, A.R., Alipour, H., 2019. Genetic variability assessment of Iranian wheat landraces in term of some agronomic attributes under normal irrigation and rain -fed conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 50(3), 1 -16 [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2018.258294.654471>
- Salimpour, S., Khavazi, K., Nadian, H., Besharati, H., Miransari, M., 2010. Enhancing phosphorous availability to canola (*Brassica napus* L.) using P solubilizing and sulfur oxidizing bacteria. *Australian Journal of Crop Sciences*. 4, 330-334.
- Sanchez, J.J., Goodman, M.M., 1992. Relationships among Mexican and some North American and South American races of maize. *Maydica*. 37, 41-51. <https://doi.org/10.1007/BF02985256>
- Sandana, P., 2016. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. *European Journal of Agronomy*. 76, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.003>
- Seyedzavar, J., Norouzi, M., Aharizad, S., Tahmasebpour, S., 2014. Evaluation of correlation among traits in corn hybrids under drought stress conditions. *International Journal of Farming and Allied Sciences*. 3(10), 1088-1091.
- Shahbazi, K., Bisharti, H., 2014. An overview of the fertility status of Iran's agricultural soils. *Journal of Land Management*. 1(1), [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/lmj.2013.100072>
- Shoa Hosseini, M., Golbashy, M., Farsi, M., Khavari Khorasani, S., Ashofte Beiragi, M., 2009. Evaluation of correlation between yield and its dependent trait in single cross corn hybrids under drought stress. *Abstract Book of 1st Regional Conference on Tropical Crops Production under Environmental Stresses Condition*. Islamic Azad University, Khozestan sciences and research branch, Iran. P, 72. [In Persian].
- Shoa Hosseyini, S.M., Farsi, M., Khavari Khorasani, S., 2008. Investigation of water deficit stress effect on yield and yield components using path analysis. *Journal of Agriculture Science*. 18(1), 71-85. [In Persian].
- 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., Richardson, A.E., 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use

- efficiency of farming systems. *Plant and Soil*. 349, 89–120. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0880-1>
- Singh, R., Reddy, M.D., Pandey, G., Kumar, A., 2020. Effect of different levels of phosphorus on performance of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 9(3), 363-366. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i3f.11292>
- Sun, Y., Mu, C., Chen, Y., Kong, X., Xu, Y., Zheng, H., Zhang, H., Wang, Q., Xue, Y., Li, Z., Ding, Z., Liu, X., 2016. Comparative transcript profiling of maize inbreds in response to long-term phosphorus deficiency stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 109, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.017.Epub2016Oct22>
- Tang, H., Chen, X., Gao, Y., Hong, L., Chen, Y., 2020. Alteration in root morphological and physiological traits of two maize cultivars in response to phosphorus deficiency. *Rhizosphere*. 14, 100201. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100201>
- Valipour, N., Alipour, H., Darvishzadeh, R., 2023. Evaluation of phenotypic diversity of cumulative growing degree-days (GDD) and grain yield in spring wheat cultivars under optimal and zinc deficiency conditions. *Plant Productions*. 46. [In Persian]. <https://doi.org/10.22055/ppd.2022.39617.2003>
- Valizadeh, H., Aharizad, S., Shiri, M.R., Mohammadi, S.A., Farahmand, Kh., Bahrapur, T., 2014. Grouping of new maize (*Zea mays* L.) hybrids using yield and morphological traits. *Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding*. 9(4), 27-38. [In Persian].
- Van de Wiel, C.C.M., van der Linden, C.G., Scholten, O.E., 2016. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. *Euphytica*. 207, 1-22.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L., 2003. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*. 157(3), 423–447.
- Varalakshmi, S., Wali, M.C., Deshpande, S.K., Harlapur, S.I., 2018. Correlation and path coefficient analysis of single cross hybrids in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7, 1840-1843.
- Von Uexküll, H.R., Mutert, E., 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*. 171, 1–15.
- Wei, T., Simko, V., 2021. R package 'corrplot'. Ver. 0.92. Visualization of a correlation matrix. <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wen, Z., Li, H., Shen, J., Rengel, Z., 2017. Maize responds to low shoot P concentration by altering root morphology rather than increasing root exudation. *Plant and Soil*. 416, 377–389. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3214-0>
- Westerman, R.L., 1990. *Soil Testing and Plant Analysis*. (3rd Edition). American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, Wisconsin.
- Yao, Q.I., Yang, K.ch., Pan, G.t., Rong, T.zh., 2007. The effects of low phosphorus stress on morphological and physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) Landraces. *Agricultural Sciences in China*. 6(5), 559-566. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(07\)60083-2](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(07)60083-2)
- Yaseen, M., 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. <https://doi.org/10.1080/01904160902872818>
- Yazdandoost Hamedani, M., Rezai, A., 2001. A study of morphological and nphysiological basis of corn yield through path analysis. *Iranian Journal of Agricultural Science*. 32 (3), 671-680. [In Persian].
- Yousaf, M.I., Hussain, K., Hussain, S., Ghani, A., Arshad, M., Mumtaz, A., Hameed, R.A., 2018. Characterization of indigenous and exotic corn hybrids for grain yield and quality traits under heat stress. *International Journal of Agriculture & Biology*. 20, 333-337. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0493>
- Zabet, M., Bahamin, S., Qureshi, P., Sadeghi, H., Mousavi, S.Gh., 2014. Effect of low irrigation and nitrogen fertilizer on the low yield of forage millet in Birjand. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 7, 187-194. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2015.175>
- Zeinali, H., Nasr, Abadi, A., Hossein Zadeh, H., Choukan, R., Sabokdast, M., 2005. Factor

- analysis of hybrid corn seed varieties. *Journal of Agricultural Sciences*. 36(4), 895-902.
- Zhang, H., Xu, R., Xie, C., Huang, C., Liao, H., Xu, Y., Wang, J., Li, W., 2015. Large-scale evaluation of maize germplasm for low-phosphorus tolerance. *PLoS One*. 10(5), e0124212.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124212>
- Zhang, X.Y., Yue-Yu, S.U.I., Zhang, X.D., Kai, M.E.N.G., Herbert, S.J., 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*. 17(1), 19-29.  
[https://doi.org/10.1016/S10020160\(07\)600034](https://doi.org/10.1016/S10020160(07)600034)
- Zuffo, A.M., Oliveira, A.M.d., Aguilera, J.G., Ratke, R.F., Steiner, F., Abreu, C.M.d., Fonseca, W.L., Santos, A.S.d., Argente-Martínez, L., Morales-Aranibar, L., Gonzales, H.H.S., 2023. Correlations and path analysis of second-crop corn hybrids for maximum grain yield performance. *Australian Journal of Crop Science*. 17(8), 639-644.  
<https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.08.p3911>