



Principal Components Analysis of Some Maize Genotypes using Agromorphological Traits under Non-Stress and Cadmium Stress Conditions

Sara Farokhzadeh¹ | Ali Asghar Ghaderi² | Nafiseh Mahdinezhad³ | Reza Darvishzadeh⁴ | Barat Ali Fakheri⁵ | Sorour Arzhang⁶

1. Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: s.farokhzadeh@uoz.ac.ir
2. Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: aa.ghaderi@uoz.ac.ir
3. Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: nmahdinezhad@uoz.ac.ir
4. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir
5. Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: fakheri@uoz.ac.ir
6. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.arzhang@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: April 27, 2024

Received in revised form:
June 11, 2024

Accepted: June 20, 2024

Published online: March 21,
2025

Keywords:

Agromorphological traits,
cadmium heavy metal,
correlation,
maize,
principal component analysis.

ABSTRACT

Cadmium (Cd) stress, as one of the most significant abiotic stresses, negatively affects the growth and performance of maize. In this study, the diversity and relationship between yield and various agromorphological characteristics of maize lines in 95 genotypes were investigated using a randomized complete block design with three replications under two conditions: Non-stress and Cd stress, in a pot experiment conducted in an open area at the Agricultural Research Station of Jiroft during two cropping years. Under stress conditions, a cadmium chloride solution with a concentration of 30 mg.L⁻¹ was applied at two stages of plant growth (at the six-leaf stage and the appearance of the first male flowers). In both conditions, the results revealed a positive and significant correlation between grain yield with grain number per main ear, 1000-grain weight, the grain number per row, and ear wood weight. In principal component analysis, the first nine and eight principal components were identified under both non-stress and stress conditions, explaining 79.26% and 76.42% of the total diversity of genotypes, respectively. In both conditions, the first component was identified as the phenology component, while the second and third components were recognized as the yield component, yield components, and the dimensional component, and plant type. The present study showed that yield traits, yield components, and phenological characteristics are key indicators for demonstrating the diversity and differentiation among different maize genotypes under Cd stress. This diversity can be utilized in maize breeding programs to enhance tolerance to Cd stress and achieve other breeding purposes such as earliness.

Cite this article: Farokhzadeh, S., Ghaderi, A.A., Mahdinezhad, N., Darvishzadeh, R., Fakheri, B.A., & Arzhang, S. (2025). Principal components analysis of some maize genotypes using agromorphological traits under non-stress and cadmium stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(1), 51-64. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.375697.655079.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برخی از ژنوتیپ‌های ذرت با استفاده از صفات آگرومورفولوژیک تحت شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم

سارا فرخ‌زاده^۱ | علی اصغر قادری^۲ | نفیسه مهدی‌نژاد^۳ | رضا درویش‌زاده^۴ | براتعلی فاخری^۵ | سرور ارژنگ^۶

۱. گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: s.farokhzadeh@uoz.ac.ir
۲. گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: aa.ghaderi@uoz.ac.ir
۳. گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: nmahdinezhad@uoz.ac.ir
۴. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir
۵. گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: fakheri@uoz.ac.ir
۶. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: s.arzhang@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱</p>	<p>تنش کادمیوم، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی، بر رشد و عملکرد ذرت تأثیر منفی دارد. در این مطالعه، تنوع و ارتباط بین عملکرد و ویژگی‌های مختلف آگرومورفولوژیک لاینهای ذرت در ۹۵ ژنوتیپ ذرت در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم به صورت گلدانی در فضای باز ایستگاه تحقیقات کشاورزی جیرفت در دو سال زراعی بررسی شد. در شرایط تنش، محلول کلرید کادمیوم با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در دو مرحله از رشد گیاه (در مرحله شش‌برگی و ظهور اولین گل‌های نر) اعمال شد. نتایج نشان داد که در هر دو شرایط، بین عملکرد دانه با تعداد دانه در بلال اصلی، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، و وزن چوب بلال همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، نه و هشت مؤلفه اصلی اول در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شناسایی شدند که به ترتیب ۷۹/۲۶ و ۷۶/۴۲ درصد از تنوع کل ژنوتیپ‌ها را توجیه کردند. در هر دو شرایط، مؤلفه اول به‌عنوان مؤلفه فنولوژی معرفی شد؛ درحالی‌که مؤلفه‌های دوم و سوم به‌عنوان مؤلفه عملکرد و اجزای عملکرد و مؤلفه ابعادی و تیپ بوته معرفی شدند. مطالعه حاضر نشان داد که صفات عملکرد، اجزای عملکرد و ویژگی‌های فنولوژیک، شاخص‌های کلیدی برای نشان دادن تنوع و تمایز بین ژنوتیپ‌های مختلف ذرت تحت تنش کادمیوم هستند. این تنوع می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی ذرت برای افزایش تحمل به تنش کادمیوم و دستیابی به سایر اهداف اصلاحی مانند زودرسی مورد استفاده قرار گیرد.</p>
<p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ذرت، صفات آگرومورفولوژیک، فلز سنگین کادمیوم، همبستگی.</p>	

استناد: فرخ‌زاده، س.، قادری، ع.ا.، مهدی‌نژاد، ن.، درویش‌زاده، ر.، فاخری، ب.، و ارژنگ، س. (۱۴۰۴). تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برخی از ژنوتیپ‌های ذرت با استفاده از صفات آگرومورفولوژیک تحت شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۱(۱)، ۶۴-۵۱

DOI: 10.22059/ijfcs.2024.375697.655079



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

گیاهان همواره در معرض تنش‌های محیطی متعددی قرار می‌گیرند که بر متابولیسم، رشد و عملکرد آن‌ها تأثیرات منفی دارد. یکی از تنش‌های غیر زیستی مهم برای گیاهان، تنش ناشی از فلزات سنگین است. مناطق گسترده‌ای از اراضی به دلیل استفاده از سموم دفع آفات، کودهای شیمیایی، پسماندهای شهری و کمپوست، همچنین به علت آزادسازی فلزات سنگین از منابع صنعتی، به فلزات سنگین آلوده شده‌اند. اگرچه بسیاری از فلزات سنگین در طبیعت وجود دارند، اما مشکل زمانی ایجاد می‌شود که این فلزات به صورت نامتعارف و به میزان زیادی در محیط زیست منتشر می‌شوند که ناشی از فعالیت‌های طبیعی و انسانی است (Singh *et al.*, 2016). اصطلاح فلزات سنگین به عناصر فلزی با چگالی نسبتاً بالا (بیش از پنج گرم بر سانتیمتر مکعب) اشاره دارد که حتی در غلظت‌های پایین نیز سمیت آن‌ها مشاهده می‌شود (Torabi *et al.*, 2023). در میان فلزات سنگین، کادمیوم به دلیل پایداری و دوام بیشتر در محیط زیست، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است (Pandey *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2017). آلودگی خاک به واسطه فلزات سنگین از جمله کادمیوم، منجر به اختلالات فیزیولوژیکی اساسی در گیاهان می‌شود. این اختلالات شامل کاهش زیست‌توده گیاه، کاهش در رشد و نمو آن، کاهش کیفیت محصول نهایی، ممانعت از فرآیند فتوسنتز و اختلال در جذب مواد غذایی توسط گیاه می‌باشند (Flore *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2020).

ذرت (*Zea mays* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات، دارای ویژگی‌های مفید متعددی است و اهمیت این گیاه در امنیت غذایی جهانی، به‌ویژه در زمینه‌های کشاورزی و تامین غذا در آینده، حداقل هم‌اندازه با نقش آن در بهبود بودجه کربن جهانی، به‌عنوان یک گیاه چهار کربنه (C4) است. همچنین، توانایی ذرت در تحمل شرایط نامساعد محیطی، به‌ویژه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از جمله کادمیوم، از اهمیت بسیاری برخوردار است (Nascimento & Xing, 2006; Ghannoum, 2009; Alzreejawi & Al-Juthery, 2021). ذرت یکی از محصولات راهبردی بسیار حیاتی به شمار می‌آید و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع کشاورزی و صنعتی دارد (Yerva *et al.*, 2016). این محصول در جهان بعد از گندم و برنج به‌عنوان سومین محصول با بیشترین مساحت زیر کشت و بالاترین تولید شناخته می‌شود (Liu *et al.*, 2019). از آن جایی که ذرت به‌عنوان یک گیاه C4 شناخته می‌شود، توانایی بسیار بالایی در تولید نسبت به دیگر محصولات دارد و به‌عنوان محصولی با بیشترین میانگین عملکرد دانه در واحد سطح معرفی می‌شود (Alzreejawi & Al-Juthery, 2021). در مقیاس جهانی، سطح زیر کشت ذرت حدود ۱۹۳/۷ میلیون هکتار، میانگین تولید آن حدود ۱۱۴۷/۷ میلیون تن و عملکرد آن برابر با ۵/۷۵ تن در هر هکتار می‌باشد (Alzreejawi & Al-Juthery, 2021; Anusha *et al.*, 2022). در ایران، سطح زیر کشت ذرت تقریباً ۱۳۹ هزار هکتار است که تولیدی در حدود یک میلیون تن دارد. متوسط عملکرد ذرت در هر هکتار حدود ۷۷۰۰ کیلوگرم است و سهم آن در سبد غذایی ملی حدود ۱/۳ درصد است (Ahmadi *et al.*, 2018). گسترش کشت ذرت و بهبود عملکرد و کیفیت آن از دیدگاه تأمین غذای دام و طیور و همچنین تأمین تغذیه برای انسان به علت میزان بالای لیزین در آن، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Fageria *et al.*, 2010). کشت ذرت در ایران، به‌خصوص در استان‌هایی مانند کرمان، به‌صورت مکانیزه انجام می‌شود. با این حال، آلودگی خاک و هوا یک چالش مهم در این مناطق است و تأثیرات نامطلوبی بر عملکرد کمی و کیفی محصولات ایجاد کرده است. استان کرمان به‌عنوان یک منطقه صنعتی با منابع معدنی غنی محسوب می‌شود. پساب‌ها و بخارات رها شده ناشی از کارخانه‌ها، همچنین آلاینده‌های جوی ناشی از فعالیت معادن و کارخانه‌ها، در خاک مزارع جذب و تثبیت می‌شوند. این امر باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک مزارع شده است (Torabi *et al.*, 2023). این مسائل تأثیر منفی بر تولید زیست‌توده ذرت داشته و اهمیت یافتن انواع ذرت مقاوم برای تأمین نیازهای غذایی جمعیت جهانی را بیشتر کرده است. تنش ناشی از عناصر سنگین موجود در گرد و غبار تأثیر قابل توجهی بر گیاهان دارد. آلاینده‌ها می‌توانند هم از طریق خاک و هم از طریق هوا وارد گیاه شوند؛ با این حال، مقصد اصلی آلاینده‌های هوا در گیاهان، اندام‌های هوایی، به‌ویژه برگ‌ها می‌باشد (Qin *et al.*, 2014). در برخی مناطق صنعتی، علت غلظت بالای عناصر سرب، کادمیوم و روی در بافت گیاهی، با وجود کمبود این عناصر در خاک منطقه، به وجود گرد و غبار و رسوبات جوی نسبت داده می‌شود. وجود کادمیوم، به‌عنوان یکی از متحرک‌ترین فلزات سنگین، در هوا یا در غبارهای معلق منجر به افزایش غلظت این عنصر در گیاهان از طریق جذب توسط برگ‌ها و سایر اندام‌های هوایی می‌شود (Yang *et al.*, 2012).

تجزیه همبستگی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA: Principal Component Analysis)، روش‌های مؤثری در بررسی همزمان صفات آگرومورفولوژیک و عملکرد گیاهان می‌باشند که از اطلاعات متعددی درباره صفات مختلف در افراد استفاده می‌کنند (Arzangh *et al.*, 2021). همبستگی در تعیین روابط بین عملکرد و اجزای عملکرد در انتخاب ارقام برتر اهمیت زیادی دارد (Farokhzadeh *et al.*, 2013). تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش آماری چندمتغیره، در تعیین سهم هر صفت در تنوع کل، کاهش حجم داده‌ها و تفسیر بهتر روابط استفاده می‌شود (Ghaffari Azar *et al.*, 2019; Farokhzadeh *et al.*, 2022). در پژوهشی، تأثیر آلودگی آب و خاک به کادمیوم بر اجزای عملکرد ذرت مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار آلودگی به کادمیوم بر وزن خشک برگ و ساقه، تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در هر ردیف و عملکرد دانه در هر بوته ذرت بود (Riahi Farsani *et al.*, 2020). در مطالعه‌ای، ایجاد تنش با استفاده از کادمیوم منجر به کاهش رشد رویشی و تجمع کادمیوم در شاخساره و ریشه گیاهان ذرت و سویا شد (Zaefarian *et al.*, 2023). در مطالعه‌ای اثرات کادمیوم بر گیاه گندم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که دریافت کادمیوم باعث تنش در گیاه، کاهش تولید پروتئین و اختلال در فرآیند فتوسنتز می‌شود که این موارد به کاهش عملکرد گیاه منجر می‌شود (Zhang *et al.*, 2002). همچنین، در مناطق زراعی که به فلزات سنگین مانند سرب، روی و کادمیوم آلوده هستند، افزایش مقادیر پرولین و کاهش محتوای کلروفیل، همچنین کاهش عملکرد دانه و اجزای آن، عملکرد زیستی و ارتفاع بوته در گیاه ذرت گزارش شده است (Torabi *et al.*, 2023). با توجه به اهمیت استراتژیک ذرت و افزایش آلودگی فلزات سنگین در هوا و خاک‌های کشاورزی، این تحقیق با هدف بررسی تنوع صفات آگرومورفولوژیک و درک ارتباط بین عملکرد و ویژگی‌های مختلف ژنوتیپ‌های ذرت، با استفاده از همبستگی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تحت شرایط بدون تنش و شرایط شبیه‌سازی تنش کادمیوم انجام گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، انتخاب صفات مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی ذرت است که نقش بسیار حیاتی در تحلیل و بهبود بهره‌وری تولید ذرت در مناطقی با آلودگی به فلز سنگین کادمیوم ایفا می‌کنند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه در ایستگاه تحقیقات کشاورزی واقع در شهرستان جیرفت (استان کرمان) با طول جغرافیایی $28^{\circ} 40'$ شمالی، در طول دو فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ انجام شد. منطقه مورد مطالعه از نظر طبقه‌بندی‌های اقلیمی دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (Jazinizadeh *et al.*, 2023) و ارتفاع آن از سطح دریا ۷۲۰ متر بوده و میانگین دمای سالانه حدود ۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد.

مواد گیاهی استفاده‌شده در این پژوهش شامل ۹۵ ژنوتیپ ذرت بود که در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، تحت دو شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم، به‌صورت آزمایش‌های گلدانی در محیط باز منطقه تحقیقاتی مورد کشت و ارزیابی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های مورد نظر از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج و دانشگاه رازی کرمانشاه در قالب طرح تحقیقاتی شماره 94/101/T.T مصوب پژوهشکده زیست‌فناوری دانشگاه ارومیه تهیه شدند. بذرها در گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۶ سانتی‌متر و با ظرفیت ۱۰ کیلوگرم کشت شدند. گلدان‌ها با ترکیب خاک لومی-شنی و ماسه به نسبت ۲ به ۱ پر شدند. فاصله بین گلدان‌ها روی خط کاشت ۲۵ سانتی‌متر، فاصله میان ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متر و عمق تقریبی کاشت بین ۳ الی ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر محیط، هر تکرار شامل سه گلدان و هر گلدان شامل یک گیاه بود.

در شرایط تنش، محلول کلرید کادمیوم ($CdCl_2 \cdot 2H_2O$) با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر (Li *et al.*, 2020) در دو مرحله اساسی از رشد گیاه ذرت، یعنی در مرحله شش‌برگی (کد ۱۶ مقیاس زادوکس) و مرحله ظهور اولین گل‌های نر (کد ۵۰ مقیاس زادوکس) مورد استفاده قرار گرفت (Kirby & Appleyard, 1987). محلول کلرید کادمیوم با دقت و به‌وسیله‌ی سم‌پاش دستی روی بوته‌های کامل ذرت اسپری شد، به‌طوری‌که لایه‌ای یکنواخت از قطرات محلول روی تمام قسمت‌های گیاه (برگ‌ها، ساقه‌ها و دیگر قسمت‌ها) باقی بماند، بدون این که مقدار محلول اسپری‌شده از برگ‌ها و ساقه‌ها سرازیر شود. پیش از هر بار محلول‌پاشی، سطح خاک با یک

فیلم پلاستیکی پوشانده شد تا از آلودگی خاک توسط محلول کادمیوم جلوگیری شود (Li et al., 2020). علاوه بر این، مراقبت‌های لازم از گلدان‌ها به صورت منظم انجام شد.

در این پژوهش، ۲۴ صفت متنوع فنولوژی، مورفولوژی و زراعی مورد ارزیابی قرار گرفتند (Ghaderi et al., 2023). این صفات عبارت بودند از تعداد روز تا سبز شدن ($X1=DEM$: Days to emergence)، تعداد روز تا تاسل دهی ($X2=DTA$: Days to tasseling)، تعداد روز تا گرده‌افشانی ($X3=DPO$: Days to pollination)، تعداد روز تا ظهور بلال ($X4=DEE$: Days to ear emergence)، تعداد روز تا پایان گرده‌افشانی ($X5=DEPO$: Day to end of pollination)، تعداد روز تا رسیدگی ($X6=DMA$: Days to maturity)، قطر ساقه ($X7=SD$: Stem diameter, cm)، تعداد برگ ($X8=LN$: Leaf number)، تعداد برگ بالای بلال ($X9=LNAE$: Leaf number above the ear)، طول برگ ($X10=LL$: Leaf length, cm)، عرض برگ ($X11=LW$: Leaf width, cm)، نسبت طول به عرض برگ ($X12=LL/LW$: Leaf length/leaf width ratio)، ارتفاع بوته ($X13=PHE$: Plant height, cm)، تعداد ردیف در بلال ($X14=RNE$: Row number per ear)، تعداد دانه در ردیف ($X15=GNR$: Grain number per row)، وزن چوب بلال ($X16=EW$: Ear wood weight, g)، عملکرد دانه ($X17=GY$: Grain yield, g/plant)، تعداد دانه در بلال اصلی ($X18=GNME$: Grain number per main ear)، وزن هزار دانه ($X19=TSW$: 1000-grain weight, g)، قطر چوب بلال ($X20=EWD$: Ear wood diameter, mm)، طول دانه ($X21=GL$: Grain length, mm)، عرض دانه ($X22=GW$: Grain width, mm)، نسبت طول به عرض دانه ($X23=GL/GW$: Grain length/grain width ratio)، و تعداد انشعابات تاسل ($X24=TBN$: Tassel branch number). صفت تعداد روز تا سبز شدن قبل از محلول‌پاشی، صفت تعداد روز تا تاسل‌دهی بین دو مرحله محلول‌پاشی و سایر صفات فنولوژیکی بعد از اعمال مرحله دوم تنش اندازه‌گیری شدند. خصوصیات مورفولوژیکی برگ و ارتفاع بوته سه هفته (۲۱ روز) پس از اعمال تنش در مرحله ظهور اولین گل‌های نر اندازه‌گیری شدند. صفات مربوط به بلال پس از رسیدگی فیزیولوژیک ارزیابی شدند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل محاسبه ضریب همبستگی فنوتیپی پیرسون (بسته corrplot) و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA: Principal Component Analysis، بسته‌های Factoextra و FactoMineR) با استفاده از میانگین داده‌های دو سال زراعی و در نرم‌افزار R انجام شد.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. همبستگی فنوتیپی

ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های ذرت در محیط بدون تنش (a) و تنش کادمیوم (b) در شکل ۱ نشان داده شده است. بالاترین همبستگی آماری مثبت و معنی‌دار ($P < 0.01$)، بین صفات فنولوژیک تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا ظهور بلال، تعداد روز تا پایان گرده‌افشانی و تعداد روز تا رسیدگی در هر دو محیط بدون تنش و تنش مشاهده شد. همبستگی‌های مثبت بین صفات فنولوژیک مختلف می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط‌های پیچیده و معنی‌داری در میان رشد و توسعه گیاهان باشد. این همبستگی‌ها ممکن است به علت تنظیمات ژنتیکی مشابه، واکنش‌های مشابه به محیط یا تأثیر عوامل محیطی مشترکی که بر رشد گیاهان اثر می‌گذارند، ایجاد شده باشند. ارتباط مثبت و معنی‌دار بین صفات فنولوژیک در هر دو شرایط محیطی نشان می‌دهد که واکنش گیاهان به تغییرات محیطی در این دو شرایط مشابه است. این ممکن است به دلیل تطابق فیزیولوژیکی و زیست‌شناسی گیاهان با شرایط رشد مختلف باشد. به عبارت دیگر، گیاهان تمایل دارند که در شرایط بدون تنش یا تنش، یکنواخت و هماهنگ با تغییرات محیطی واکنش نشان دهند. در اینجا می‌توان به عوامل مختلفی اشاره کرد که ممکن است در تشریح این همبستگی‌ها نقش داشته باشند. به عنوان مثال، ارتباط مثبت بین تعداد روز تا تاسل‌دهی و تعداد روز تا گرده‌افشانی می‌تواند به معنای این باشد که گیاهانی که زمان تاسل‌دهی آن‌ها کوتاه‌تر است، معمولاً زمان گرده‌افشانی آن‌ها نیز کمتر می‌باشد. این ممکن است به علت تنظیمات ژنتیکی مشابه در این دو فرآیند یا به دلیل واکنش‌های مشابه به محیط باشد. همبستگی مثبت بین تعداد روز تا رسیدگی و سایر صفات فنولوژیک می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که گیاهانی که سریع‌تر به مراحل

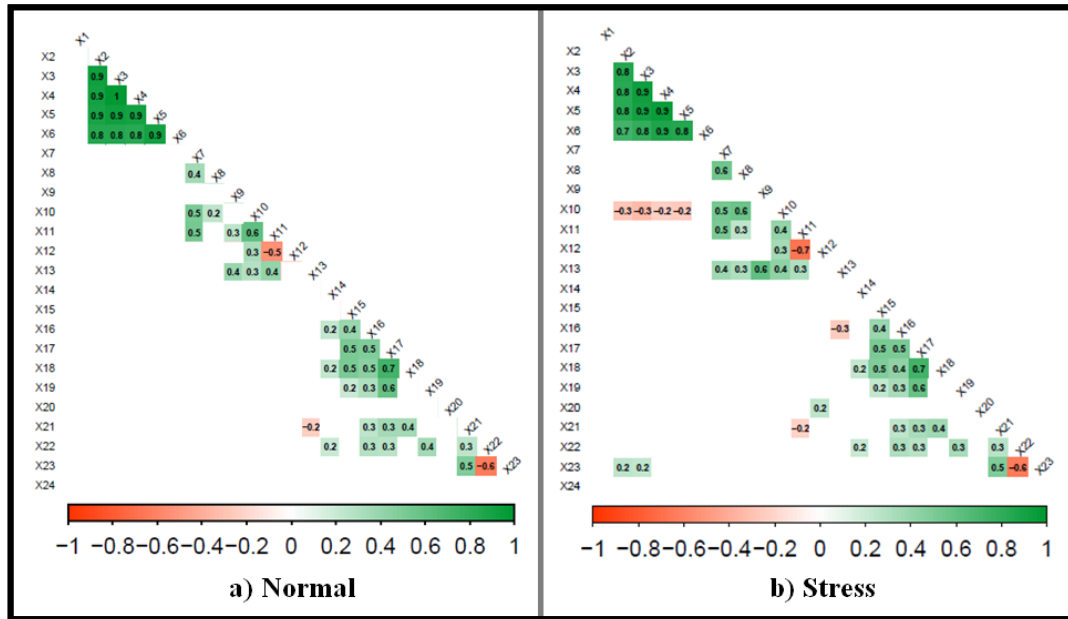
بعدی از رشد می‌رسند، احتمالاً در مقابل تنش‌های محیطی نیز بهتر عمل می‌کنند. به‌طور کلی، نتایج حاصل می‌تواند به توسعه استراتژی‌های بهتر برای بهبود عملکرد گیاهان در شرایط مختلف کمک کند.

در شرایط تنش کادمیوم، همبستگی منفی و معنی‌دار بین طول برگ و زمان‌های مختلف مرتبط با گل‌دهی، از جمله تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا ظهور بلال، و تعداد روز تا پایان گرده‌افشانی مشاهده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که با افزایش طول برگ، زمان تاسل‌دهی، گرده‌افشانی، ظهور بلال، و پایان گرده‌افشانی کاهش یافته است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و حیاتی طول برگ بر فیزیولوژی و زمان‌بندی مراحل مختلف گل‌دهی گیاهان می‌باشند. به‌عبارت دیگر، زمان‌های مختلف مرتبط با گل‌دهی در شرایط تنش کادمیوم به وضوح تحت تأثیر طول برگ قرار گرفته‌اند. همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تعداد دانه در بلال اصلی، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف و وزن چوب بلال با عملکرد دانه به‌طور مشابه در هر دو محیط بدون تنش و تنش وجود داشت. بنابراین افزایش هر کدام از آن‌ها می‌تواند باعث افزایش عملکرد شود. ضرایب همبستگی تحت تأثیر هر دو نوع عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرند و بررسی این ضرایب بین صفات مختلف، امکان انتخاب صفات مؤثر و حذف دقیق‌تر صفات غیر مؤثر را با توجه به رابطه‌های معنی‌دار فراهم می‌کند. این بررسی همچنین به تصمیم‌گیری دقیق‌تر درباره بهینه‌سازی انتخاب و حذف صفات غیر مستقیم کمک می‌کند (Gilevaei *et al.*, 2016; Pishnamazzadeh Emami *et al.*, 2020; Sourilaki *et al.*, 2022).

صفات با همبستگی معنی‌دار با عملکرد دانه در محیط‌های بدون تنش و تنش، به‌عنوان صفات مناسب‌تر برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش مورد توجه قرار می‌گیرند و در نتیجه به انتخاب و پیشرفت برنامه‌های اصلاحی کمک می‌کند. این نتایج با مطالعات قبلی که در ذرت انجام شده است، مطابقت دارد و همبستگی‌های مثبت و معنی‌دار بین صفات مرتبط با عملکرد دانه را تأیید می‌کند (Arzangh *et al.*, 2021; Harati Rad *et al.*, 2023; Sudika *et al.*, 2023). با این حال برخلاف نتایج ما، برخی گزارش‌ها نشان داده‌اند که همبستگی منفی و معنی‌داری بین عملکرد دانه و وزن هزار دانه وجود دارد (Sinana *et al.*, 2023). در مطالعات دیگر، بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار بین صفات وزن چوب بلال با طول آن (Ghaffari Azar *et al.*, 2019)، ارتفاع بوته با طول بلال (Golbashy *et al.*, 2010; Ashofteh Beiragi *et al.*, 2011; Ghaffari Azar *et al.*, 2019)، وزن چوب بلال با درصد چوب (Golbashy *et al.*, 2010)، طول بلال با تعداد دانه در ردیف بلال و همچنین بین رسیدگی فیزیولوژیک با تعداد برگ (Ashofteh Beiragi *et al.*, 2011) مشاهده شده است. وجود پیوستگی قوی بین صفات یا اثر پلیوتروپی ژنی که در آن یک ژن به‌طور همزمان دو یا چند صفت را کنترل می‌کند، می‌تواند باعث ایجاد همبستگی معنی‌دار بین صفات شود (McIntyre *et al.*, 2010). به این ترتیب، گزینش یک صفت، تأثیر مثبت یا منفی روی دیگر صفات مرتبط می‌گذارد. علاوه بر این، همبستگی می‌تواند به دلیل عدم تعادل پیوستگی نیز رخ دهد. به‌طور دقیق، ارتباط غیر تصادفی میان آلل‌ها در موقعیت‌های مختلف ژنی که بر صفات تأثیر می‌گذارند، می‌تواند منجر به ایجاد همبستگی شود (McIntyre *et al.*, 2010).

۳-۲. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کاهش متغیرها به چند شاخص که ابعاد مختلفی از تنوع را در داده‌ها اندازه‌گیری می‌کنند، استفاده شد. شاخص‌ها یا مؤلفه‌های حاصل از این تجزیه می‌تواند دریافت ساده‌تری از داده‌ها را فراهم کند. با این روش می‌توان تغییرات داده‌ها را به صورت فشرده و خلاصه بیان کرد. مؤلفه‌های به‌دست‌آمده از این روش، کاملاً مستقل از یکدیگر هستند و هیچ همبستگی با یکدیگر ندارند (Farokhzadeh *et al.*, 2022). نتایج PCA با استفاده از صفات مورد مطالعه در ۹۵ ژنوتیپ ذرت تحت محیط بدون تنش در جدول ۱ ذکر شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نه مؤلفه اول دارای مقادیر ویژه یا ریشه مشخصه‌ی بزرگتر از یک بودند که در مجموع ۷۹/۲۶ درصد از تنوع بین صفات مورد بررسی را تبیین نمودند. یکی از اهداف این تجزیه این است که ۲۴ صفت مورد بررسی را در قالب چند مؤلفه اصلی خلاصه نموده و نقش این صفات را در تبیین تنوع کل بیان نماید. مؤلفه اول که ۲۰/۰۶ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کرد، دارای بزرگ‌ترین ضرایب (منفی) برای همه صفات فنولوژی بجز تعداد روز تا سبز شدن بود. بنابراین، این مؤلفه به‌عنوان "مؤلفه فنولوژی بوته" نام‌گذاری شد. با توجه به این مؤلفه، امکان تفکیک ژنوتیپ‌های زودرس وجود دارد.



شکل ۱. ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های ذرت تحت شرایط بدون تنش (a) و تنش کادمیوم (b). در نقشه هیتمپ (حرارتی)، جبهه‌های سبز و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب همبستگی مثبت و منفی هستند و افزایش شدت رنگ دلالت بر ضرایب بزرگ‌تر دارد. علاوه بر این، جبهه‌های سفید نشان‌دهنده ضرایب همبستگی غیر معنی‌دار هستند.

X1 (DEM): Days to emergence, X2 (DTA): Days to tasseling, X3 (DPO): Days to pollination, X4 (DEE): Days to ear emergence, X5 (DEPO): Day to end of pollination, X6 (DMA): Days to maturity, X7 (SD): Stem diameter, X8 (LN): Leaf number, X9 (LNAE): Leaf number above the ear, X10 (LL): Leaf length (cm), X11 (LW): Leaf width (cm), X12 (LL/LW): Leaf length/leaf width ratio, X13 (PHE): Plant height (cm), X14 (RNE): Row number per ear, X15 (GNR): Grain number per row, X16 (EWW): Ear wood weight (g), X17 (GY): Grain yield (g/plant), X18 (GNME): Grain number per main ear, X19 (TSW): 1000-grain weight (g), X20 (EWD): Ear wood diameter (mm), X21 (GL): Grain length (mm), X22 (GW): Grain width (mm), X23 (GL/GW): Grain length/grain width ratio, and X24 (TBN): Tassel branch number.

در مؤلفه دوم با تبیین ۱۴/۳۶ از واریانس کل، بزرگ‌ترین ضرایب به ترتیب به صفات عملکرد دانه (-0.76)، تعداد دانه در بلال اصلی (-0.72)، وزن چوب بلال (-0.63)، تعداد دانه در ردیف (-0.58)، عرض برگ (0.49)، طول دانه (-0.49)، عرض دانه (-0.47)، وزن هزار دانه (-0.43) و قطر ساقه (0.40) اختصاص داشت. در مؤلفه سوم با تبیین ۹/۸۳ از واریانس کل، صفات عرض برگ، طول برگ، قطر ساقه، عملکرد دانه، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و تعداد برگ بالای بلال به ترتیب دارای بزرگ‌ترین ضرایب مثبت بودند و در توجیه تغییرات سهم بیشتری نسبت به سایر صفات داشتند. با توجه به این که مؤلفه‌های دوم و سوم اختلاف بین ژنوتیپ‌ها را از نظر صفات عملکرد، اجزای عملکرد و همچنین صفات مورفولوژیک نشان می‌دهند، می‌توان آن‌ها را به عنوان "مؤلفه عملکرد و اجزای عملکرد و مؤلفه تیپ بوته" نام‌گذاری کرد. این مؤلفه‌ها می‌توانند ژنوتیپ‌های دارای پتانسیل عملکرد بالا را از ژنوتیپ‌های با میانگین عملکرد پایین متمایز کنند. مؤلفه چهارم دارای بزرگ‌ترین ضرایب مثبت برای صفت نسبت طول به عرض دانه و ضرایب منفی برای صفات نسبت طول به عرض برگ و عرض دانه بود که این عامل با تبیین ۷/۷۷ از واریانس کل، به عنوان "مؤلفه مورفولوژی دانه و برگ" نام‌گذاری شد. مؤلفه پنجم که بزرگ‌ترین ضرایب منفی را به صفات تعداد روز تا سبز شدن، تعداد برگ، وزن هزار دانه، طول دانه، نسبت طول به عرض دانه و تعداد انشعابات تاسل اختصاص داد، می‌تواند تحت عنوان "مؤلفه ویژگی‌های رشدی و شکل دانه" نام‌گذاری شود. همچنین، بزرگ‌ترین ضرایب منفی در مؤلفه ششم به صفات طول برگ، نسبت طول به عرض برگ و در مؤلفه هفتم به صفت قطر چوب بلال تعلق داشت. مؤلفه ششم و هفتم به ترتیب تحت عنوان "مؤلفه‌های ابعادی برگ و بلال" در نظر گرفته شدند. همچنین، در مؤلفه هشتم، صفات قطر ساقه، تعداد ردیف در بلال و طول دانه بزرگ‌ترین ضرایب منفی را داشتند. در حالی که در مؤلفه نهم، صفات تعداد ردیف در بلال و تعداد انشعابات تاسل بزرگ‌ترین ضرایب مثبت را به خود اختصاص دادند. بنابراین می‌توان این دو مؤلفه را به ترتیب به نام "مؤلفه قطر ساقه و تراکم بلال" و "مؤلفه شاخص‌های تاسل" نام‌گذاری کرد. Ghaffari Azar *et al.* (2019) در بررسی ۱۰۰ ژنوتیپ ذرت با استفاده از ویژگی‌های آگرومورفولوژیکی از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی گزارش کردند که دو مؤلفه اول ۵۲ درصد از واریانس را توضیح می‌دهند و صفات ارتفاع بوته، وزن

دانه در بوته، وزن چوب بلال و قطر ابتدای چوب بلال به ترتیب بیشترین تأثیر را در تبیین مؤلفه اول دارند، در حالی که صفات وزن دانه در بوته، تاریخ ظهور گل نر و تاریخ ظهور بلال اول نیز بیشترین نقش را در تشکیل مؤلفه دوم ایفا می کنند.

جدول ۱. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای صفات مورد مطالعه ژنوتیپ‌های ذرت تحت شرایط محیطی بدون تنش.

Traits	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
DEM	-0.14	-0.08	-0.15	-0.35	-0.50	0.27	-0.23	0.00	-0.12
DTA	-0.95	-0.02	-0.03	-0.03	0.10	0.03	0.02	0.03	0.03
DPO	-0.97	-0.03	0.00	-0.06	0.09	0.03	-0.02	0.03	0.04
DEE	-0.96	-0.04	0.00	-0.02	0.11	0.05	0.01	0.04	0.03
DEPO	-0.96	-0.01	0.04	-0.04	0.07	0.03	0.02	-0.02	0.05
DMA	-0.92	-0.02	0.02	-0.06	0.03	0.06	0.03	-0.02	-0.08
SD	-0.07	0.40	0.56	-0.10	-0.05	-0.24	0.27	-0.37	-0.06
LN	-0.24	0.20	0.24	-0.20	-0.52	-0.20	0.31	-0.01	0.28
LNAE	-0.01	0.27	0.38	0.12	-0.35	0.36	-0.22	0.36	0.25
LL	0.00	0.38	0.64	-0.17	-0.05	-0.52	-0.09	0.04	0.01
LW	-0.04	0.49	0.71	0.23	0.15	0.09	-0.08	-0.25	-0.14
LL/LW	0.04	-0.18	-0.17	-0.46	-0.21	-0.68	0.01	0.36	0.16
PHE	0.09	0.38	0.41	0.21	0.15	0.22	-0.27	0.31	0.33
RNE	0.12	-0.27	-0.02	-0.24	0.28	0.01	-0.24	-0.38	0.57
GNR	-0.17	-0.58	0.26	0.20	0.24	-0.13	0.28	0.28	-0.07
EWV	0.10	-0.63	0.28	0.10	0.03	0.07	0.14	-0.09	0.14
GY	0.08	-0.76	0.42	0.22	-0.12	0.06	0.01	0.18	0.01
GNME	-0.02	-0.72	0.18	0.32	0.17	-0.24	-0.07	0.00	0.25
TSW	0.06	-0.43	0.41	-0.19	-0.37	0.31	0.15	0.15	-0.28
EWD	-0.17	-0.19	0.18	-0.31	0.00	-0.16	-0.71	0.04	-0.12
GL	-0.16	-0.49	0.05	0.28	-0.44	-0.15	-0.26	-0.42	-0.14
GW	0.16	-0.47	0.28	-0.57	0.09	0.21	0.00	-0.26	-0.07
GL/GW	-0.24	0.06	-0.24	0.74	-0.43	-0.26	-0.16	-0.12	0.02
TBN	-0.07	0.01	-0.11	-0.06	-0.36	0.27	0.23	-0.18	0.50
Eigen value	4.82	3.45	2.36	1.86	1.60	1.50	1.19	1.13	1.11
Proportional variance (%)	20.06	14.36	9.83	7.77	6.67	6.26	4.95	4.72	4.63
Cumulative variance (%)	20.06	34.43	44.26	52.03	58.70	64.96	69.91	74.63	79.26

DEM: days to emergence, DTA: days to tasseling, DPO: days to pollination, DEE: days to ear emergence, DEPO: day to end of pollination, DMA: days to maturity, SD: stem diameter (cm), LN: leaf number, LNAE: leaf number above the ear, LL: leaf length (cm), LW: leaf width (cm), LL/LW: leaf length to width ratio, PHE: plant height (cm), RNE: row number per ear, GNR: grain number per row, EWW: ear wood weight (g), GY: grain yield (g/plant), GNME: grain number per main ear, TSW: 1000-grain weight (g), EWD: ear wood diameter (mm), GL: grain length (mm), GW: grain width (mm), GL/GW: grain length to width ratio, and TBN: tassel branch number.

در مطالعه حاضر، تحت شرایط تنش (جدول ۲)، با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تعداد هشت مؤلفه مستقل شناسایی شدند که در کل ۷۶/۴۲ درصد از تنوع کل صفات را در جمعیت مورد مطالعه توجیه کردند. مؤلفه اول با بیشترین سهم در توجیه تنوع بین ژنوتیپ‌های ذرت (۲۰/۳۰ درصد)، دارای بزرگ‌ترین ضرایب مثبت برای صفات تعداد روز تا تاسل‌دهی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا ظهور بلال، تعداد روز تا پایان گرده‌افشانی و تعداد روز تا رسیدگی بود. بنابراین، با توجه به این مؤلفه می‌توان ژنوتیپ‌های دیررس را از زودرس تفکیک کرد و این مؤلفه را "مؤلفه فنولوژی" نامید. مؤلفه دوم با تبیین ۱۴/۳۶ از واریانس کل، بزرگ‌ترین ضرایب منفی را برای صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال اصلی، وزن هزار دانه وزن چوب بلال، و طول دانه نشان داد که با استناد به این مؤلفه، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های کم‌محصول یا حساس به تنش وجود دارد و این مؤلفه به‌عنوان "مؤلفه عملکرد و اجزای عملکرد" نام‌گذاری شد. از طرف دیگر، مؤلفه سوم که ۹/۸۳ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کرد، بزرگ‌ترین ضرایب مثبت در صفات قطر ساقه، تعداد برگ، طول برگ، عرض برگ و ارتفاع بوته مشاهده شد. بنابراین

می‌توان این مؤلفه را به‌عنوان "مؤلفه ابعادی گیاه" در نظر گرفت. مؤلفه چهارم دارای ضرایب بزرگ برای صفات نسبت طول به عرض برگ، نسبت طول به عرض دانه، تعداد و عرض برگ و قطر چوب بلال بود.

در مؤلفه پنجم نیز، صفات عرض دانه و نسبت طول به عرض دانه بزرگ‌ترین ضرایب را شامل شدند. این دو مؤلفه را می‌توان تحت عنوان "مؤلفه‌های ابعادی برگ و دانه" معرفی کرد. در مؤلفه ششم بزرگ‌ترین ضرایب به صفات تعداد روز تا سبز شدن، تعداد برگ بالای بلال و تعداد انشعابات تاسل اختصاص داشتند. مؤلفه‌های هفتم و هشتم نیز دارای بزرگ‌ترین ضرایب برای صفات تعداد برگ بالای بلال و تعداد ردیف در بلال بودند. به‌طور کلی، می‌توان این سه مؤلفه را تحت عنوان "مؤلفه‌های ویژگی‌های رشدی و ساختاری یا معماری بلال" نام‌گذاری کرد. Arzangh *et al.* (2021) گزارش کردند که مؤلفه اول با بیشترین درصد واریانس، دربرگیرنده قسمت عمده تغییرات صفات عرض و سطح برگ، تعداد برگ، ارتفاع بلال اصلی، ارتفاع بوته، قطر و طول بلال، تعداد دانه در ردیف، عرض و عمق دانه، وزن چوب بلال، وزن صد دانه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در ژنوتیپ‌های ذرت تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری بود. در مطالعه An *et al.* (2023)، در بررسی اثر تنش کادمیوم روی صفات فیزیولوژی گیاه، مورفولوژی ریشه و ریزساختار کلروپلاست در چهار ژنوتیپ ذرت، پنج مؤلفه اصلی با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک مشاهده شدند که مؤلفه‌های اول و دوم به‌ترتیب ۴۵/۰۰ و ۱۱/۱ درصد از واریانس صفات را توجیه نمودند.

با توجه به گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس دو مؤلفه اول با بالاترین مقادیر ویژه، ۹۵ ژنوتیپ مورد مطالعه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش به چهار گروه متمایز تقسیم شدند (شکل ۲، a و c). این تقسیم‌بندی‌ها به‌طور دقیق گروه‌بندی‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای در مطالعات قبلی تحت شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم را تایید کرد (Ghaderi *et al.*, 2023). هدف از این گونه گروه‌بندی، تشکیل گروه‌هایی از ژنوتیپ‌ها با توجه به شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها در مؤلفه‌های اصلی است. این گروه‌بندی نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی که در یک ناحیه مشخص از نمودار بای‌پلات قرار می‌گیرند، شباهت‌های بیشتری در ویژگی‌های گیاهی و ژنتیکی دارند. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در واقع مکمل تجزیه خوشه‌ای می‌باشد که با کاهش تعداد متغیرها به تعداد محدودی از مؤلفه‌های متعامدی که همبستگی با یکدیگر ندارند، انجام می‌شود. هر مؤلفه به نوعی جنبه‌های متفاوتی از داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و اهمیت نسبی متغیرها در خوشه‌های حاصل را آشکار می‌سازد (Jolliffe, 2002).

عملکرد دانه به‌عنوان یک صفت، وابسته به عوامل متعددی است و اهمیت نسبی یک صفت به‌عنوان یک معیار غیر مستقیم در بهبود عملکرد در یک برنامه اصلاحی به همبستگی آن صفت با عملکرد بستگی دارد. پاسخ‌های عملکرد و صفات مرتبط با آن به‌طور متفاوتی تحت تاثیر محیط قرار می‌گیرد (Lopes & Reynolds, 2012; Tahmasebi *et al.*, 2014). بنابراین، در این مطالعه، ارتباط صفات مهم در هر محیط با استفاده از PCA بررسی شد. نمودار بای‌پلات به‌عنوان ابزاری برای تجسم روابط بین ویژگی‌های مختلف در مجموعه داده‌ها استفاده شد. زوایا در نمودار بای‌پلات، اطلاعاتی را درباره ارتباطات بین ویژگی‌ها ارائه می‌دهند؛ به‌طور خاص، زاویه حاده نمایانگر همبستگی مثبت، زاویه منفرجه نشان‌دهنده همبستگی منفی و زاویه قائمه نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی است. در نهایت، شدت همبستگی با زوایای نزدیک به صفر و ۱۸۰ درجه افزایش می‌یابد و طول بردارها نشان‌دهنده میزان تنوع در صفات است (Tahmasebi *et al.*, 2014). در این مطالعه تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش، همه صفات فنولوژی بجز تعداد روز تا سبز شدن و صفات وزن چوب بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال اصلی و عملکرد دانه، با داشتن طول بردار بیشتر، به‌عنوان صفات مؤثر در نشان‌دادن تنوع بین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. در مطالعات دیگر با بررسی ۶۵ ژنوتیپ ذرت، نتایج نمودار بای‌پلات PCA نشان داد که تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، ارتفاع بوته و عملکرد تک‌بوته بیشترین نقش را در ایجاد تنوع ایفا کرده‌اند (Sinana *et al.*, 2023).

با توجه به زوایای بین صفات در نمودار بای‌پلات بر اساس صفات فنولوژی، مورفولوژی و زراعی (شکل ۲، b و d)، می‌توان نتیجه گرفت که صفات نسبت طول به عرض برگ، تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن چوب بلال، تعداد دانه در بلال اصلی، وزن هزار دانه، قطر چوب بلال و طول و عرض دانه دارای همبستگی مثبت با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند. به‌عبارت دیگر، افزایش این صفات می‌تواند با افزایش عملکرد دانه همراه باشد. درحالی‌که صفات قطر ساقه، تعداد برگ، تعداد برگ بالای بلال، عرض برگ و ارتفاع بوته دارای همبستگی منفی با عملکرد دانه در هر دو شرایط بوده و باعث کاهش

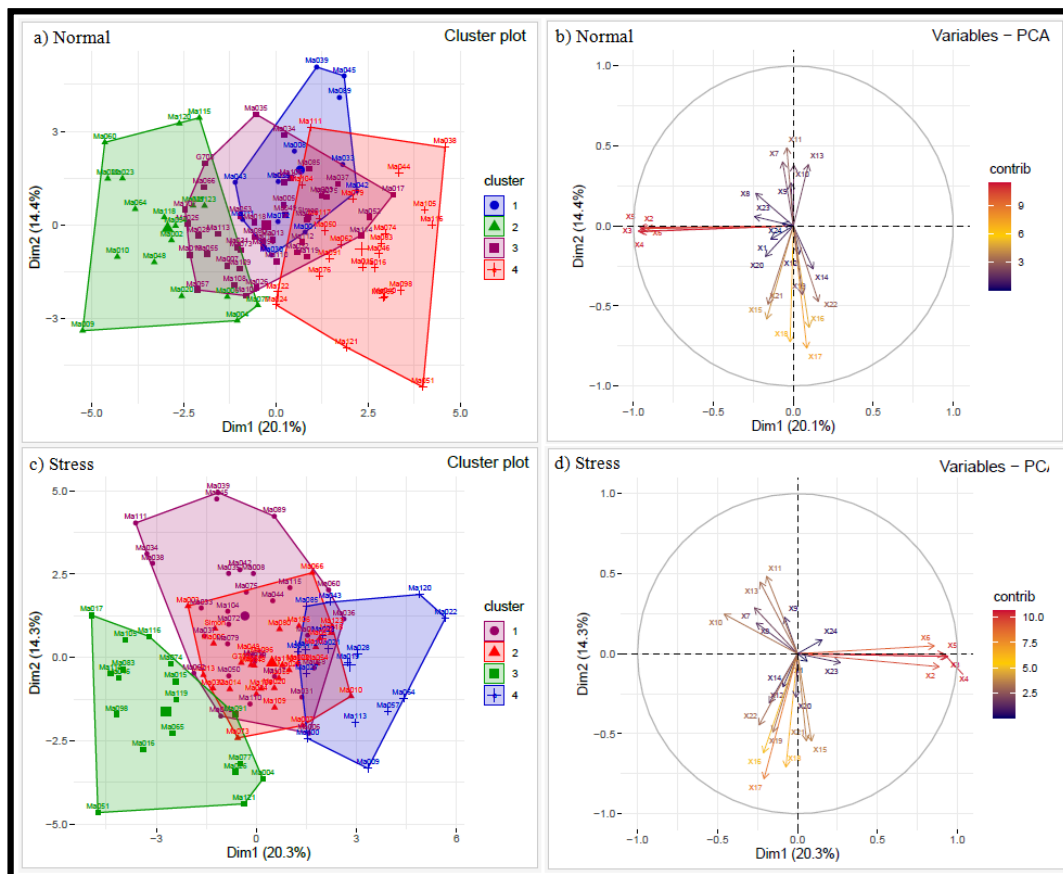
عملکرد دانه می‌شوند. این نتایج از نظر آماری معنی‌دار و به‌عنوان یک شاخص برای پیش‌بینی عملکرد دانه در شرایط مختلف می‌تواند مفید باشد. به‌طور کلی، نتایج بای‌پلات PCA، ضریب همبستگی مثبت صفات مهم تعداد دانه در ردیف، وزن چوب بلال، تعداد دانه در بلال اصلی و وزن هزار دانه را با عملکرد دانه تایید کرد و تجزیه بای‌پلات همچنین نشان داد که ماتریس همبستگی یک ابزار چندمتغیره مؤثر برای ارزیابی ارتباط بین صفات در ژنوتیپ‌های ذرت است.

جدول ۲. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای صفات مورد مطالعه ژنوتیپ‌های ذرت تحت شرایط محیطی تنش کادمیوم.

Traits	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
DEM	0.06	-0.05	0.06	0.12	-0.01	0.44	-0.61	0.17
DTA	0.88	-0.08	0.19	0.09	-0.03	0.01	-0.02	0.02
DPO	0.94	-0.02	0.17	0.00	0.00	0.01	-0.02	-0.02
DEE	0.93	-0.02	0.26	0.01	-0.11	-0.07	0.00	-0.04
DEPO	0.91	0.00	0.27	-0.08	-0.10	-0.09	-0.01	0.01
DMA	0.85	0.05	0.21	0.04	-0.18	-0.11	0.01	-0.05
SD	-0.27	0.29	0.71	0.09	-0.01	0.16	0.11	0.04
LN	-0.26	0.19	0.62	0.40	-0.05	0.11	0.16	-0.18
LNAE	-0.08	0.23	0.18	-0.29	0.42	-0.48	-0.46	0.25
LL	-0.46	0.25	0.59	0.33	-0.20	0.03	0.09	-0.07
LW	-0.19	0.48	0.51	-0.49	0.04	0.26	0.19	0.06
LL/LW	-0.18	-0.31	-0.05	0.76	-0.22	-0.30	-0.08	-0.08
PHE	-0.23	0.45	0.48	0.03	0.29	-0.31	-0.37	0.11
RNE	-0.09	-0.21	0.03	-0.08	-0.32	-0.10	0.22	0.75
GNR	0.09	-0.55	0.34	-0.27	0.20	-0.23	0.15	-0.22
EWV	-0.21	-0.62	0.19	-0.27	0.02	0.08	0.21	-0.02
GY	-0.21	-0.78	0.29	-0.16	0.25	-0.10	-0.11	-0.05
GNME	-0.07	-0.71	0.27	0.04	0.27	-0.16	0.27	0.24
TSW	-0.15	-0.49	0.15	-0.26	-0.09	0.18	-0.44	-0.38
EWD	-0.01	-0.27	0.17	0.36	-0.23	-0.04	-0.27	0.29
GL	0.06	-0.54	0.11	0.26	0.26	0.44	-0.08	0.11
GW	-0.24	-0.45	0.17	-0.18	-0.65	0.02	-0.17	0.02
GL/GW	0.27	-0.06	-0.07	0.40	0.76	0.33	0.11	0.11
TBN	0.15	0.09	0.03	-0.25	-0.12	0.51	-0.07	0.21
Eigen value	4.87	3.42	2.42	1.91	1.82	1.44	1.34	1.12
Proportional variance (%)	20.30	14.27	10.09	7.94	7.58	6.00	5.58	4.65
Cumulative variance (%)	20.30	34.56	44.66	52.60	60.18	66.18	71.76	76.42

DEM: days to emergence, DTA: days to tasseling, DPO: days to pollination, DEE: days to ear emergence, DEPO: day to end of pollination, DMA: days to maturity, SD: stem diameter (cm), LN: leaf number, LNAE: leaf number above the ear, LL: leaf length (cm), LW: leaf width (cm), LL/LW: leaf length to width ratio, PHE: plant height (cm), RNE: row number per ear, GNR: grain number per row, EWW: ear wood weight (g), GY: grain yield (g/plant), GNME: grain number per main ear, TSW: 1000-grain weight (g), EWD: ear wood diameter (mm), GL: grain length (mm), GW: grain width (mm), GL/GW: grain length to width ratio, and TBN: tassel branch number.

در مطالعه انجام‌شده توسط Lopes & Reynolds (2012) روی ژنوتیپ‌های گندم با استفاده از PCA، گزارش شده است که در شرایط محیطی نرمال، تعداد دانه در متر مربع و دمای کانوپی در مراحل رشد رویشی و پرشدن دانه به‌ترتیب با عملکرد دانه همبستگی مثبت و منفی معنی‌داری داشتند. درحالی‌که، روز تا سنبله‌دهی و روز تا رسیدگی با عملکرد دانه هیچ ارتباط معنی‌داری نداشتند. همچنین، تحت شرایط تنش گرما و خشکی، عملکرد دانه با روز تا سنبله‌دهی، روز تا رسیدگی و دمای کانوپی دارای همبستگی منفی بود.



شکل ۲. نمودار بای‌پلات دو مؤلفه اصلی اول برای ژنوتیپ‌های ذرت (a و c) و صفات مورد مطالعه (b و d) تحت شرایط محیطی بدون تنش و تنش کادمیوم. طول و شدت رنگ بردارهای صفت به ترتیب نشان‌دهنده کیفیت نمایندگی و سهم صفات در دو مؤلفه اصلی اول است.

X1 (DEM): Days to emergence, X2 (DTA): Days to tasseling, X3 (DPO): Days to pollination, X4 (DEE): Days to ear emergence, X5 (DEPO): Day to end of pollination, X6 (DMA): Days to maturity, X7 (SD): Stem diameter, X8 (LN): Leaf number, X9 (LNAE): Leaf number above the ear, X10 (LL): Leaf length (cm), X11 (LW): Leaf width (cm), X12 (LL/LW): Leaf length/leaf width ratio, X13 (PHE): Plant height (cm), X14 (RNE): Row number per ear, X15 (GMR): Grain number per row, X16 (EWW): Ear wood weight (g), X17 (GY): Grain yield (g/plant), X18 (GNME): Grain number per main ear, X19 (TSW): 1000-grain weight (g), X20 (EWD): Ear wood diameter (mm), X21 (GL): Grain length (mm), X22 (GW): Grain width (mm), X23 (GL/GW): Grain length/grain width ratio, and X24 (TBN): Tassel branch number.

۴. نتیجه‌گیری

تنش فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم، سلامتی انسان و سایر موجودات زنده را به‌طور جدی تهدید می‌کند و ذرت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر این تنش قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که در هر دو محیط بدون تنش و تنش، صفات تعداد دانه در بلال اصلی، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف و وزن چوب بلال با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری دارند. این همبستگی‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت این صفات بر بهبود عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش است. علاوه بر این، بالاترین همبستگی آماری مثبت و بسیار معنی‌دار بین صفات فنولوژیک مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت بررسی این صفات در پیش‌بینی عملکرد گیاهان در محیط‌های مختلف است. بنابراین، می‌توان با انتخاب ژنوتیپ‌هایی که دارای تعداد دانه، وزن دانه و وزن چوب بلال بیشتری هستند، انتظار داشت که به عملکرد دانه بیشتری، به‌ویژه در شرایط تنش کادمیوم، دست یافت. نتایج PCA نشان داد که هشت و نه مؤلفه اول به ترتیب در محیط‌های تنش و بدون تنش، ۷۶/۴۲ و ۷۹/۲۶ درصد از تنوع صفات را توجیه کردند. مؤلفه اول تحت هر دو شرایط، به‌عنوان مؤلفه فنولوژی بوته معرفی شد. مؤلفه‌های دوم و سوم نیز به‌عنوان مؤلفه عملکرد و اجزای عملکرد و مؤلفه ابعادی و تیپ بوته شناخته شدند. از این مؤلفه‌ها می‌توان برای گزینش ژنوتیپ‌های ذرت استفاده کرد. همچنین، نتایج تجزیه و تحلیل بای‌پلات PCA همبستگی‌های مثبت بین صفات و عملکرد دانه را تایید کرد و نشان داد که صفات مربوط به اجزای عملکرد به همراه ویژگی‌های فنولوژیک، از مهم‌ترین صفات برای نشان دادن تنوع بین ژنوتیپ‌های مختلف ذرت هستند. این تنوع می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی ذرت برای بهبود تحمل به تنش‌های غیر زیستی، از

جمله تنش کادمیوم و اهداف اصلاحی مانند زودرسی استفاده شود. تنش کادمیوم یکی از عوامل مهم کاهش دهنده عملکرد محصولات زراعی است، بنابراین شناسایی و استفاده از ژنوتیپ‌های متحمل به این تنش می‌تواند به بهبود عملکرد و کیفیت محصول کمک کند. زودرسی نیز ویژگی مهمی در برنامه‌های به‌نژادی است، زیرا می‌تواند به کاهش دوره رشد گیاه و در نتیجه کاهش مصرف منابع مانند آب و مواد مغذی کمک کند. این امر به‌ویژه در مناطق با دوره‌های رشد کوتاه یا شرایط سخت محیطی اهمیت دارد. این ویژگی‌ها بهره‌وری کشاورزی را افزایش داده و به پایداری تولیدات کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی و شرایط محیطی سخت کمک می‌کنند. با استفاده از روش‌های نوین اصلاح نباتات و تکنیک‌های ژنتیکی، می‌توان این صفات مطلوب را در ژنوتیپ‌های مختلف ذرت تثبیت و تقویت کرد و در نهایت ارقام بهبود یافته و مقاوم‌تر تولید کرد. در ادامه در نظر است به منظور بررسی دقیق‌تر روابط بین صفات از شبکه عصبی که علاوه بر روابط خطی، روابط غیر خطی را نیز در نظر می‌گیرد (Khalifani *et al.*, 2022, 2023) استفاده شود. نتایج این مطالعه می‌تواند در معرفی متغیرهای ورودی به شبکه مفید باشد.

۵. منابع

- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H., Abd-Shah, H., Kazimian, A., & Rafiei, M. (2018). Agricultural statistics of crop years 2016-17, Volume One: Crop production. Ministry of Agriculture-Jahad, Planning and Economics Affairs, Information and Communication Technology Center, Tehran, Iran. (In Persian).
- Alzreejawi, S.A., & Al-Juthery, H.W. (2021). Effect of foliar application of nano nutrients and amino acids as a complementary nutrition on quantity and quality of maize grains. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- An, T., Kuang, Q., Wu, Y., Gao, Y., Zhang, Y., Mickan, B.S., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., & Chen, Y. (2023). Variability in cadmium stress tolerance among four maize genotypes: Impacts on plant physiology, root morphology, and chloroplast microstructure. *Plant Physiology and Biochemistry*, 205, 108135.
- Anusha, G., Bhadr, D., Vanisri, S., Usha Rani, G., Mallaiiah, B., & Sridhar, V. (2022). Assessment of genetic diversity in 62 maize genotypes for yield and yield accredited traits. *Biological Forum – An International Journal*, 14(2a), 261-265.
- Arzangh, S., Darvishzadeh, R., & Alipour, H. (2021). Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) under normal and salinity stress conditions. *Cereal Research*, 11(3), 243-268. (In Persian).
- Ashofteh Beiragi, M., Khavari Khorasani, S., Mostafavi Kh, G.M., & Alizadeh, A. (2011). Study on grain yield and related traits in new corn (*Zea mays* L.) hybrid varieties using statistical multivariate analysis. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 7(1), 97-116. (In Persian).
- Chen, J., Wang, X., Zhang, W., Zhang, S., & Zhao, F.J. (2020). Protein phosphatase 2A alleviates cadmium toxicity by modulating ethylene production in *Arabidopsis thaliana*. *Plant, Cell & Environment*, 43(4), 1008-1022.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., & Jones, C.A. (2010). *Growth and mineral nutrition of field crops*: CRC press.
- Farokhzadeh, S., Hassani, H.S., Zinati, Z., & Rajaei, M. (2022). Evaluation of triticale lines compared to wheat cultivars in terms of agronomic traits using supervised learning methods and multivariate statistics. *The Philippine Agricultural Scientist*, 105(4), 369-389.
- Farokhzadeh, S., Shahsavand-Hassani, H., & Mohammadi-Nejad, G. (2013). Evaluation of genetic diversity of primary tritipyrum, triticale and bread wheat genotypes. *Agricultural Knowledge*, 5(9), 93-112. (In Persian).
- Flore, G., Catherine, K., & Jean-Dominique, M. (2012). Benefits of plant silicon for crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 201-213.
- Ghaderi, A.A., MahdiNezhad, N., Darvishzadeh, R., Fakheri, B.A., & Farokhzadeh, S. (2023). Assessing genetic diversity and reaction of maize genotypes (*Zea mays* L.) under cadmium stress. *Journal of Creal Research*, 13(3), 251-265. (In Persian).
- Ghaffari Azar, A., Darvishzadeh, R., Molaei, B., Kahrizi, D., & Darvishi, B. (2019). Classification of maize inbred line based on agro-morphological traits in order to produce hybrid seed. *Modares Journal of Biotechnology*, 10(2), 297-304. (In Persian).
- Ghannoum, O. (2009). C4 photosynthesis and water stress. *Annals of Botany*, 103(4), 635-644.
- Gilevaei, M., Lahiji, H., & Rabiei, B. (2016). Relationship between grain yield and its components and grouping of rice (*Oryza sativa* L.) recombinant inbred lines. *Journal of Crop Sciences*, 18(3), 257-272. (In Persian).
- Golbashi, M., Ebrahimi, M., Khavari, K.S., Choukan, R., & Zarabi, M. (2010). Evaluation of morphological traits, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.) hybrids in Mashhad climate. *Journal of Agroecology*, 2(1), 75-84. (In Persian).
- Harati Rad, M., Mahdinezhad, N., Darvishzadeh, R., Fakheri, B.A., & Jabbari, M. (2023). Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) based on agro-morphological traits using factor analysis under zinc (Zn) deficiency conditions. *Cereal Research*, 13(1), 47-63. (In Persian).

- Jazinizadeh, S., Ebrahimi-Khusfi, Z., & Parsa Motlagh, B. (2023). Investigating the vegetation status and its relationship with climatic factors: A case study of Jiroft city pastures. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(38), 1-10.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis for special types of data. Springer series in statistics. 2nd Ed. New York, USA.*
- Khalifani, S., Darvishzadeh, R., Azad, N., Shayesteh, M.G., Kalbkhani, H., & Akbari, N. (2023). Comparison of influential input variables in the deep learning modeling of sunflower grain yields under normal and drought stress conditions. *Field Crops Research*, 303, 109145.
- Khalifani, S., Darvishzadeh, R., Azad, N., & Rahmani, R.S. (2022). Prediction of sunflower grain yield under normal and salinity stress by RBF, MLP and, CNN models. *Industrial Crops and Products*, 189, 115762.
- Kirby, E.J.M., & Appleyard, M. (1987). *Cereal development guide. 2nd edition. Arable Unit, National Agricultural Center, Stoneleigh, Kenilworth, England.*
- Li, L., Zhang, Y., Ippolito, J.A., Xing, W., Qiu, K., & Wang, Y. (2020). Cadmium foliar application affects wheat Cd, Cu, Pb and Zn accumulation. *Environmental Pollution*, 262, 114329.
- Liu, S., Zenda, T., Wang, X., Liu, G., Jin, H., Yang, Y., Dong, A., & Duan, H. (2019). Comprehensive meta-analysis of maize QTLs associated with grain yield, flowering date and plant height under drought conditions. *Journal of Agricultural Science*, 11(8), 1.
- Lopes, M.S., & Reynolds, M.P. (2012). Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. *Journal of Experimental Botany*, 63(10), 3789-3798.
- McIntyre, C.L., Mathews, K.L., Rattey, A., Chapman, S.C., Drenth, J., Ghaderi, M., Reynolds, M., & Shorter, R. (2010). Molecular detection of genomic regions associated with grain yield and yield-related components in an elite bread wheat cross evaluated under irrigated and rainfed conditions. *Theoretical and Applied Genetics*, 120, 527-541.
- Nascimento, C.W.A.D., & Xing, B. (2006). Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Scientia Agricola*, 63, 299-311.
- Pandey, J., Shubhashish, K., & Pandey, R. (2009). Metal contamination of Ganga River (India) as influenced by atmospheric deposition. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83, 204-209.
- Pishnamazzadeh Emami, M., Ebadi, A., Mohebalipour, N., Nourafcan, H., & Ajali, J. (2020). Grouping rice recombinant inbred lines using cluster and principal component analysis methods. *Cereal Research*, 10(1), 1-17. (In Persian).
- Qin, X., Sun, N., Ma, L., Chang, Y., & Mu, L. (2014). Anatomical and physiological responses of Colorado blue spruce to vehicle exhausts. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 11094-11098.
- Riahi Farsani, H., Ghobadina, M., Noori Emamzadei, M., Danesh Shahraki, A., & Motaghian, H. (2020). The effect of cadmium contamination water and soil on corn yield components. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 167-184. (In Persian).
- Sinana, H.F., Ravikesavan, R., Iyanar, K., & Senthil, A. (2023). Study of genetic variability and diversity analysis in maize (*Zea mays* L.) by agglomerative hierarchical clustering and principal component analysis. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 14(1), 43-51.
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V.P., & Prasad, S.M. (2016). Heavy metal tolerance in plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1143.
- Souri Laki, E., Rabiei, B., Jokarfard, V., Marashi, H., & Börner, A. (2022). Evaluation of important agronomic traits related to yield and identification of superior quinoa genotypes. *Cereal Research*, 12(1), 99-114. (In Persian).
- Sudika, I.W., Soemeinaboedhy, I.N., & Sutresna, I.W. (2023). Genetic diversity and gain quantitative characters of maize from index-based selection at two dry lands in Lombok, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(1), 11-19.
- Tahmasebi, S., Heidari, B., Pakniyat, H., & Jalal Kamali, M.R. (2014). Independent and combined effects of heat and drought stress in the Seri M82× Babax bread wheat population. *Plant Breeding*, 133(6), 702-711.
- Torabi, S.k., Alahdadi, I., Akbari, G.A., Ghorbani Javid, M., & Fotovat, R. (2023). Effects of foliar application of salicylic acid and nanosilicon on the yield and physiological traits of maize (*Zea mays*) in heavy metal contaminated fields. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(1), 151-168. (In Persian).
- Yang, J., Guo, H., Ma, Y., Wang, L., Wei, D., & Hua, L. (2010). Genotypic variations in the accumulation of Cd exhibited by different vegetables. *Journal of Environmental Sciences*, 22(8), 1246-1252.
- Yerva, S.R., Sekhar, T., Allam, C., & Krishnan, V. (2016). Combining ability studies in maize (*Zea mays* L.) for yield and its attributing traits using Griffing's diallel approach. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 7(4), 1046-1055.

- Zaefarian, F., Sadegh, M., & Hasanpour, R. (2023). Study of the effect of different concentrations of cadmium on vegetative traits and the rate of accumulation of this metal in mixed and monoculture of maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(2), 433-445. (In Persian).
- Zhang, G., Fukami, M., & Sekimoto, H. (2002). Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. *Field Crops Research*, 77(2-3), 93-98.
- Zhu, G., Guo, Q., Xiao, H., Chen, T., & Yang, J. (2017). Multivariate statistical and lead isotopic analyses approach to identify heavy metal sources in topsoil from the industrial zone of Beijing Capital Iron and Steel Factory. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 14877-14888.