Selection of Superior Cold-Tolerant Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Genotypes Based on Morpho-Physiological Traits and Grain Yield

Hamid Hasanian Khoshro[1*], Saba Kokab Someh-Sofla[2]

1. Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), 119 Maragheh, Iran. E-mail: h.hosnian@areeo.ac.ir, Orcid No: 0000-0002-12510388

2. Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), 119 Maragheh, Iran. E-mail: saba.kokab352@gmail.com

***Corresponding author**: E-mail: h.hosnian@areeo.ac.ir

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is an important food legume in dryland farming systems and is widely cultivated in regions where water availability is limited. In many areas of Iran, chickpea is traditionally grown in spring; however, autumn sowing can provide advantages such as better utilization of winter precipitation, earlier crop establishment, and potentially improved yield under dryland conditions. The major limitation to the expansion of autumn-sown chickpea in cold and high-altitude regions is the occurrence of low temperatures during early vegetative growth. Therefore, the identification and utilization of cold-tolerant genotypes are important prerequisites for developing cultivars suitable for autumn cultivation in cold dryland environments. The objective of this study was to evaluate the phenotypic variation for cold tolerance among Iranian Kabuli chickpea landraces, estimate genetic parameters for important traits, and identify promising genotypes for use in chickpea breeding programs.

Materials and Methods

In this study, 79 Kabuli-type chickpea landraces from six provinces of western and northwestern Iran, including East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardabil, Kurdistan, Kermanshah, and Lorestan, were evaluated along with the cold-tolerant check ‘Ana’ and cold-sensitive check ‘ILC533’, comprising 81 genotypes in total. Cold tolerance was assessed under both controlled and field conditions. Ten seeds of each genotype were grown in each pot until the three-leaf stage. Plants were initially maintained at 20 °C, and the temperature was then gradually reduced by 2 °C every 3 h until reaching -16 °C. Plants were maintained at -16 °C for 2 h, followed by exposure to 4 °C for 24 h and subsequent recovery under greenhouse conditions. The number of surviving plants before and after cold stress (PC1 and PC2, respectively) was recorded, and survival percentage (SU) was calculated as SU =(PC2/PC1) × 100. Cold tolerance (CT) was evaluated using a 1–9 scoring scale, with lower scores indicating greater tolerance. Electrolyte leakage index (ELI) was measured as an indicator of membrane damage. Field evaluation was conducted under dryland conditions during the 2024–2025 growing season. Plant height, days to flowering, days to maturity, 100-seed weight, and grain yield were recorded. Data were analyzed using analysis of variance, genotypic and phenotypic coefficients of variation (GCV and PCV), broad-sense heritability, genetic advance, and genetic advance as a percentage of the mean. Correlation, principal component analysis (PCA), and cluster analyses were also performed. Cluster analysis was based on squared Euclidean distance and Ward’s method.

Results and Discussion

The results demonstrated substantial phenotypic variation among the evaluated chickpea genotypes for cold-tolerance-related and agronomic traits. The overall means for survival percentage, electrolyte leakage index, cold tolerance score, plant height, days to flowering, days to maturity, 100-seed weight, and grain yield were 89.76%, 81.43%, 3.97, 43.40 cm, 159 days, 199 days, 33.79 g, and 712.6 kg ha^{-1}, respectively. The considerable variation observed among genotypes indicates the presence of useful phenotypic diversity that can be exploited in breeding and selection programs. The highest GCV and PCV values were observed for cold tolerance, with values of 76.83% and 74.91%, respectively, followed by electrolyte leakage index, with GCV and PCV values of 26.70% and 27.18%, respectively. In contrast, days to flowering and days to maturity showed relatively lower variation. Broad-sense heritability was relatively high for the evaluated traits, ranging from 44.87% for days to flowering to 96.45% for electrolyte leakage index. The highest genetic advance as a percentage of the mean was obtained for cold tolerance (146%), followed by electrolyte leakage index (53.13%), suggesting considerable scope for effective selection based on these traits. Under controlled cold-stress conditions, 10 genotypes were classified as susceptible, 9 as moderately tolerant, and 62 as tolerant. Field evaluation also demonstrated considerable differences among genotypes in their response to cold conditions, with 6 genotypes classified as susceptible, 39 as moderately tolerant, and 36 as tolerant. Correlation analysis showed strong relationships among the principal cold-tolerance traits. Cold-tolerance score was positively and strongly correlated with electrolyte leakage, whereas both traits were negatively correlated with survival percentage. These relationships indicate that genotypes showing greater membrane injury generally had lower survival under cold stress. Cold-tolerance score and electrolyte leakage were also negatively associated with grain yield, while survival percentage showed a positive association with yield. Therefore, survival percentage and electrolyte leakage can provide complementary criteria for screening, while grain yield can be used to verify the agronomic value of selected materials. Principal component analysis based on cold-tolerance and agronomic traits indicated that the first two principal components accounted for approximately 67% of the total phenotypic variation, with about 44% explained by PC1 and 23% by PC2. Electrolyte leakage, survival percentage, cold-tolerance score, grain yield, 100-seed weight, and plant height contributed to the differentiation of genotypes in the PCA space. The distribution of genotypes demonstrated both differentiation and overlap among the evaluated landraces, reflecting the multidimensional nature of cold response. Cluster analysis based on Ward's method further separated the genotypes according to their overall phenotypic similarity. In particular, genotypes G78 and G79 were positioned close to the cold-tolerant check 'Ana', indicating that these materials may warrant further evaluation as potential sources of cold-tolerance-related variation.

Conclusions

The findings demonstrated considerable phenotypic variation for cold tolerance and agronomic performance among Kabuli chickpea landraces from western and northwestern Iran. The high heritability estimates and relatively high genetic advance observed for several traits, particularly survival percentage and electrolyte leakage, indicate that these traits can be useful for selection. The strong relationships among survival percentage, electrolyte leakage, cold-tolerance score, and grain yield further support the use of multiple complementary traits for identifying superior genotypes. The tolerant landraces identified in this study represent valuable genetic resources for chickpea improvement and may contribute to the development of cultivars adapted to autumn sowing in cold dryland environments.

Keywords: Chickpea, landraces, cold tolerance, selection, genetic diversity

به‌گزینی ژنوتیپ‌های برتر نخود (*Cicer arietinum* L.) متحمل به تنش سرما بر اساس صفات مورفو-فیزیولوژیک و عملکرد دانه

حمید حسنیان خوشرو[1*]، صبا کوکب سومعه سفلی[2]

۱- حمید حسنیان خوشرو، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران، ایمیل: h.hosnian@areeo.ac.ir، Orcid No: 0000-0002-12510388

۲- صبا کوکب سومعه سفلی، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران، ایمیل: saba.kokab352@gmail.com

*-نویسنده مسئول، حمید حسنیان خوشرو، ایمیل: h.hosnian@areeo.ac.ir،

چکیده

سودمندی و افزایش عملکرد ناشی از کشت پاییزه نخود در مطالعات متعدد به اثبات رسیده است؛ با این‌حال، توسعه این کشت در دیمزارهای مناطق سرد و مرتفع ایران، مستلزم شناسایی و معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به سرما است. در این پژوهش، با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به سرما و بررسی تنوع ژنتیکی توده‌های بومی نخود غرب و شمال‌غرب ایران، ۷۹ ژنوتیپ بومی نخود تیپ کابلی، به‌همراه رقم شاهد مقاوم «آنا» و رقم شاهد حساس«ILC533» ، تحت تنش سرمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد در اتاقک رشد و شرایط مزرعه در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه طی یکسال زراعی ۴۰۴-۱۴۰۳ ارزیابی شدند. صفات درصد زنده‌مانی، شاخص تحمل به سرما، شاخص نشت الکترولیت، ارتفاع بوته، روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، وزن صد دانه و عملکرد دانه بررسی شدند. میانگین این صفات به‌ترتیب ۷۶/۸۹ درصد، ۳/۹۷، ۴۳/۸۱ درصد، ۴۰/۴۳ سانتی‌متر، ۱۵۹روز، ۱۹۹ روز، ۳۳/۷۹ گرم و ۷۱۲/۶ کیلوگرم در هکتار بود. بیشترین ضرایب تغییرات ژنتیکی و فنوتیپی به‌ترتیب برای درصد زنده‌مانی و شاخص نشت الکترولیت مشاهده شد. وراثت‌پذیری عمومی صفات از ۴۴/۸۷ تا ۹۶/۴۵ درصد متغیر بود و بیشترین پیشرفت ژنتیکی مورد انتظار برای شاخص نشت الکترولیتی و عملکرد دانه به‌ترتیب ۲۳/۲۸ و ۴۶/۰۵ درصد به‌دست آمد. بر اساس ارزیابی کنترل‌شده، ۱۰ ژنوتیپ حساس، ۹ ژنوتیپ نیمه‌متحمل و ۶۲ ژنوتیپ متحمل شناسایی شدند؛ در شرایط مزرعه نیز ۶، ۳۹ و ۳۶ ژنوتیپ به‌ترتیب در گروه‌های حساس، نیمه‌متحمل و متحمل قرار گرفتند. در مجموع، نتایج نشان داد توده‌های بومی نخود ایران از تنوع ارزشمندی برای تحمل به سرما برخوردارند و ژنوتیپ‌های

متحمل شناسایی‌شده پس از ارزیابی‌های تکمیلی می‌توانند به‌عنوان منابع ژنتیکی مناسب در برنامه‌های اصلاحی برای توسعه ارقام متحمل به سرما و گسترش کشت پاییزه نخود مورد استفاده قرار گیرند

کلمات کلیدی :نخود، توده بومی، تحمل به سرما، گزینش، تنوع ژنتیکی

پیش از انتشار

مقدمه

نخود (*Cicer arietinum* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی خانواده بقولات است که به دلیل ارزش غذایی بالا، توانایی تثبیت بیولوژیک نیتروژن و سازگاری با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و کشاورزی پایدار در بسیاری از کشورهای جهان ایفا می‌کند. دانه نخود منبع ارزشمندی از پروتئین (۱۸ تا ۲۴ درصد)، کربوهیدرات، فیبر غذایی، اسیدهای آمینه ضروری، مواد معدنی و ویتامین‌ها بوده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع پروتئین گیاهی در کشورهای در حال توسعه شناخته می‌شود (Jukanti et al., 2012). علاوه بر این، توانایی همزیستی با باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن موجب کاهش مصرف کودهای شیمیایی و افزایش حاصلخیزی خاک شده و جایگاه ویژه‌ای برای این گیاه در نظام‌های زراعی پایدار ایجاد کرده است.(Varshney et al., 2021) بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2024)، سطح زیر کشت نخود در جهان بیش از ۱۷ میلیون هکتار و میزان تولید آن حدود ۱۸ میلیون تن است. ایران نیز یکی از مراکز مهم تنوع ژنتیکی نخود محسوب می‌شود و این محصول، به‌ویژه در مناطق غرب، شمال‌غرب و شمال‌شرق کشور، سهم قابل توجهی در نظام‌های زراعی دیم دارد. با این حال، عملکرد متوسط نخود در ایران همچنان پایین‌تر از میانگین جهانی است که بخش عمده‌ای از این اختلاف ناشی از تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش سرما، خشکی و نوسانات اقلیمی است (Khoshro et al., 2025). از دیر باز در مناطق مرتفع و سردسیر دیم ایران نخود بصورت بهاره کشت می‌شود. کشت بهاره نخود بعلت کوتاه شدن طول دوره رشد رویشی و مواجه با خشکی و گرمای آخر فصل معمولا از عملکرد مطلوبی برخوردار نمی‌باشد. با تغییر سیستم کشت از بهاره به پاییز عمده‌ترین مشکل مبتلا به این محصول یعنی عملکرد پایین و غیراقتصادی بودن آن در زراعت دیم ایران از بین می‌رود (Clarke & Siddique, 2004; Malaki et al., 2024). با این حال، توسعه کشت پاییزه این

محصول مستلزم اصلاح و معرفی ارقام متحمل به سرما است. در دهه اخیر، تغییرات اقلیمی موجب افزایش فراوانی وقوع تنش‌های دمایی، به‌ویژه یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره شده است. این پدیده علاوه بر کاهش سطح سبز، موجب اختلال در رشد و نمو گیاه، کاهش فتوسنتز، تخریب غشاهای سلولی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و در نهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (IPCC, 2023). تنش سرما یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید نخود در مناطق معتدل و سردسیر به شمار می‌رود و خسارت ناشی از آن می‌تواند در سال‌های سرد تا نابودی کامل مزرعه نیز منجر شود (Croser et al., 2003). یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات منفی تنش سرما، توسعه و کشت ارقام متحمل است. کشت پاییزه نخود با استفاده از ژنوتیپ‌های متحمل به سرما، ضمن بهره‌برداری بهتر از بارندگی‌های زمستانه، افزایش کارایی مصرف آب و اجتناب از گرمای انتهای فصل، می‌تواند عملکرد دانه را نسبت به کشت بهاره به‌طور معنی‌داری افزایش دهد(Clarke & Siddique, 2004; Malaki et al., 2024) . از این‌رو، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به سرما به یکی از اولویت‌های اصلی برنامه‌های اصلاح نباتات نخود در بسیاری از کشورها از جمله ایران تبدیل شده است. تحمل به سرما صفتی پیچیده و چندژنی است که تحت تأثیر برهم‌کنش عوامل ژنتیکی، فیزیولوژیکی و محیطی قرار دارد. ژنوتیپ‌های متحمل معمولاً با حفظ یکپارچگی غشای سلولی، کاهش نشت الکترولیت، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، حفظ فعالیت فتوسنتزی و تنظیم مناسب فرآیندهای اسمزی، خسارت ناشی از دماهای پایین را کاهش می‌دهند (Thomashow, 2010) . به همین دلیل، صفات فیزیولوژیکی نظیر شاخص نشت الکترولیت[1] و درصد بقای گیاه، در کنار صفات زراعی مانند عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته و صفات فنولوژیک، از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی تحمل به سرما محسوب می‌شوند. موفقیت انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در برنامه‌های اصلاح نباتات تا حد زیادی به میزان تنوع ژنتیکی موجود در جمعیت وابسته است. تجزیه واریانس، برآورد پارامترهای ژنتیکی، شامل وراثت‌پذیری، ضرایب تغییرات ژنتیکی و فنوتیپی، پیشرفت ژنتیکی مورد انتظار، بررسی همبستگی صفات و استفاده از روش‌های چندمتغیره مانند تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای، ابزارهای مؤثری برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و تعیین مهم‌ترین صفات مؤثر در انتخاب محسوب می‌شوند (Johnson et al., 1955; Mohammadi & Prasanna, 2003) . استفاده هم‌زمان از این روش‌ها امکان بررسی جامع روابط بین صفات، تعیین منابع اصلی تنوع و انتخاب دقیق‌تر ژنوتیپ‌های امیدبخش را فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر اهمیت استفاده از ارزیابی‌های فنوتیپی در کنار ابزارهای ژنومی برای اصلاح نخود تأکید کرده‌اند. تودی و همکاران (Thudi et al., 2016) نشان دادند که اگرچه فناوری‌های ژنومی نقش مهمی در شناسایی ژن‌های مؤثر بر تحمل به تنش دارند، اما ارزیابی دقیق فنوتیپی همچنان پایه اصلی شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در برنامه‌های اصلاحی است. همچنین

1. Electrolyte Leakage Index (ELI)

رورکیوال و همکاران (Roorkiwal et al., 2020) گزارش کردند که صفات مرتبط با بقای گیاه، عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژیک، بهترین شاخص‌ها برای غربالگری ژرم‌پلاسم نخود در شرایط تنش‌های غیرزیستی هستند. شهناز و همکاران (Shahnaz et al., 2025) نیز با ارزیابی مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های نخود، وجود تنوع فنوتیپی قابل توجه برای صفات مرتبط با تحمل به سرما و عملکرد را گزارش کردند و بر اهمیت استفاده از شاخص‌های چندگانه در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر تأکید نمودند. مطالعات انجام‌شده در ایران نیز وجود تنوع قابل توجه در ژرم‌پلاسم‌های بومی نخود را نشان داده‌اند (نظامی و باقری، ۱۳۸۰؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۲؛ صادق‌زاده اهری، ۱۳۹۴)، با این حال بیشتر پژوهش‌ها بر تعداد محدودی از ژنوتیپ‌ها یا تعداد اندکی از صفات تمرکز داشته‌اند و کمتر مطالعه‌ای مجموعه‌ای نسبتاً بزرگ از ژنوتیپ‌ها را به‌طور هم‌زمان با استفاده از شاخص‌های زراعی، فنولوژیک و فیزیولوژیک در شرایط مزرعه و کنترل شده ارزیابی کرده است. علاوه بر این، اطلاعات مربوط به روابط بین این صفات و نقش آن‌ها در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به سرما همچنان محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تنوع فنوتیپی ۸۱ ژنوتیپ نخود تحت شرایط تنش طبیعی سرمای مزرعه و کنترل شده، برآورد پارامترهای ژنتیکی صفات زراعی و فیزیولوژیک، بررسی روابط بین صفات از طریق تحلیل همبستگی و روش‌های چندمتغیره و در نهایت شناسایی و به‌گزینی ژنوتیپ‌های برتر متحمل به سرما انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند ضمن معرفی ژنوتیپ‌های امیدبخش برای کشت در مناطق مرتفع و سردسیر دیم ایران، اطلاعات ارزشمندی را برای برنامه‌های اصلاحی و توسعه ارقام جدید نخود متحمل به سرما فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی مورد استفاده

در این مطالعه، ۷۹ ژنوتیپ بومی نخود (*Cicer arietinum* L.) از تیپ‌های کابلی، جمع‌آوری‌شده از شش استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، کرمانشاه و لرستان، به همراه دو رقم شاهد شامل رقم متحمل آنا و ژنوتیپ حساس (ILC533) مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱) تعداد و اطلاعات توده‌های بومی نخود مورد مطالعه

Table 1. Number and origin of the chickpea landraces evaluated in the study

کد Code	منشا Origin	کد Code	منشا Origin	کد Code	منشا Origin	کد Code	منشا Origin
G1	اردبیل	G23	آذربایجان شرقی	G45	کرمانشاه	G67	لرستان
G2	اردبیل	G24	آذربایجان شرقی	G46	کرمانشاه	G68	لرستان
G3	اردبیل	G25	آذربایجان شرقی	G47	کرمانشاه	G69	آذربایجان غربی
G4	اردبیل	G26	آذربایجان شرقی	G48	کرمانشاه	G70	آذربایجان غربی
G5	اردبیل	G27	آذربایجان شرقی	G49	کرمانشاه	G71	آذربایجان غربی

G6	اردبیل	G28	آذربایجان شرقی	G50	لرستان	G72	آذربایجان غربی
G7	اردبیل	G29	آذربایجان شرقی	G51	لرستان	G73	آذربایجان غربی
G8	اردبیل	G30	آذربایجان شرقی	G52	لرستان	G74	آذربایجان غربی
G9	اردبیل	G31	آذربایجان شرقی	G53	لرستان	G75	آذربایجان غربی
G10	کردستان	G32	آذربایجان شرقی	G54	لرستان	G76	آذربایجان غربی
G11	کردستان	G33	آذربایجان شرقی	G55	لرستان	G77	آذربایجان غربی
G12	کردستان	G34	کرمانشاه	G56	لرستان	G78	آذربایجان غربی
G13	کردستان	G35	کرمانشاه	G57	لرستان	G79	آذربایجان غربی
G14	کردستان	G36	کرمانشاه	G58	لرستان	G80	ILC533
G15	کردستان	G37	کرمانشاه	G59	لرستان	G81	ANA
G16	کردستان	G38	کرمانشاه	G60	لرستان		
G17	کردستان	G39	کرمانشاه	G61	لرستان		
G18	آذر. شرقی	G40	کرمانشاه	G62	لرستان		
G19	آذر. شرقی	G41	کرمانشاه	G63	لرستان		
G20	آذر. شرقی	G42	کرمانشاه	G64	لرستان		
G21	آذر. شرقی	G43	کرمانشاه	G65	لرستان		
G22	آذر. شرقی	G44	کرمانشاه	G66	لرستان		

ارزیابی تحمل به سرما در شرایط کنترل شده

آزمایش ارزیابی تحمل به سرما در سال زراعی ۱۴۰۴–۱۴۰۳ در اتاقک رشد واقع در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور انجام شد. ۷۹ ژنوتیپ بومی نخود به همراه دو رقم شاهد متحمل (Ana) و حساس (ILC533) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار ارزیابی شدند. برای هر ژنوتیپ، ۱۰ بذر در گلدان کشت شد. گیاهچه‌ها تا مرحله سه‌برگی در شرایط طبیعی رشد کرده و سپس برای اعمال تنش سرما به اتاقک سرما منتقل شدند. دمای اولیه اتاقک ۲۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد، دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی با شدت نور حدود ۴۰۰ میکرومول فوتون برمترمربع بر ثانیه بود. پس از انتقال گیاهان، دما با شیب ۲ درجه سانتی‌گراد در هر سه ساعت به‌صورت تدریجی کاهش یافت تا به دمای هدف ۱۶- درجه سانتی‌گراد رسید. گیاهان به‌منظور برقراری تعادل دمایی در دمای هدف به مدت دو ساعت نگهداری شدند. آبیاری گلدان‌ها تا مرحله حفظ رطوبت بستر کشت (بدون اشباع) تا ۲۴ ساعت قبل از شروع کاهش دما انجام می‌شد. پس از پایان تیمار، گلدان‌ها به‌منظور کاهش سرعت ذوب و جلوگیری از بروز آسیب ثانویه ناشی از ذوب سریع، بلافاصله به محیطی با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد منتقل و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. سپس گیاهان به گلخانه با دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی حدود ۵۰ الی ۶۰ درصد، دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی با شدت نور حدود ۳۰۰ الی ۴۰۰ میکرومول فوتون برمترمربع بر ثانیه منتقل شدند. سه هفته

پس از انتقال گیاهان به گلخانه، میزان بقا و توانایی بازیابی گیاهان ارزیابی شد. تعداد گیاهان سبزشده پیش از اعمال تنش (PC1) و تعداد گیاهان زنده پس از اعمال تنش (PC2) ثبت و درصد بقا بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Survival}(\%) = \frac{PC2}{PC1} \times 100$$

همچنین میزان تحمل ژنوتیپ‌ها به سرما (CT) بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ و مطابق روش Malhotra and Saxena (1993) ارزیابی شد (جدول ۲). به‌منظور بررسی مناسب‌بودن تحلیل واریانس برای داده‌های درصدی، مفروضات مدل ارزیابی شد. در صورت نیاز به تبدیل داده‌ها، تبدیل آرک‌سینوس ریشه دوم نسبت بقا پیش از انجام تجزیه واریانس اعمال شد. مقادیر صفر و صد درصد بدون تغییر در محاسبه این تبدیل لحاظ شدند (Ahrens et al. 1990).

اندازه‌گیری نشت الکترولیت

به‌منظور ارزیابی آسیب غشای سلولی ناشی از تنش سرما، شاخص نشت الکترولیت مطابق روش Campos et al. (2003) با کمی تغییرات اندازه‌گیری شد. پس از اعمال تیمار سرما، از برگ‌های کاملاً سالم بخش میانی ساقه گیاهان نمونه‌برداری شد. برای هر نمونه، ۸۰ میلی‌گرم بافت برگ پس از برش به قطعات یکنواخت، در لوله آزمایش حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. نمونه‌ها به‌منظور تسهیل خروج الکترولیت‌ها در تماس با آب قرار گرفته و به مدت ۳۰ دقیقه روی شیکر نگهداری شدند. سپس هدایت الکتریکی محلول (EC_1) با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (EC meter; Inolab, Germany) اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها برای تعیین هدایت الکتریکی کل، لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار داده شده و مجدداً روی شیکر قرار گرفتند. پس از آن، هدایت الکتریکی نهایی (EC_2) اندازه‌گیری شد. شاخص نشت الکترولیت یا میزان آسیب غشای سلولی بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط Popov et al. (2005) محاسبه شد:

$$ELI = \frac{Ec1}{Ec2} \times 100$$

مقادیر بالاتر ELI نشان‌دهنده افزایش نشت الکترولیت و در نتیجه آسیب بیشتر به غشای سلولی در اثر تنش سرما می‌باشد.

جدول ۲) امتیاز دهی تحمل به سرما گیاه نخود تحت تنش سرما

Table 2) Scoring of cold tolerance in chickpea plant under cold stress

مقیاس Scale	دسته Category	واکنش Reaction
1	مقاوم Resistance	هیچ‌گونه علائم ظاهری آسیب‌دیدگی وجود ندارد No visible symptoms of damage
2	بسیار متحمل Highly tolerant	تا ۱۰۰ درصد برگچه‌ها دچار پژمردگی و خشک‌شدگی می‌شوند، اما از بین نمی‌روند. Up to 100% of leaflets show withering and drying, no killing

3	متحمل Tolerant	۱۱ تا ۲۰ درصد برگچه‌ها دچار پژمردگی شده‌اند و تا ۲۰ درصد شاخه‌ها پژمرده و خشک شده‌اند، اما گیاه از بین نرفته است. 11–20% leaflets show withering and upto 20% of branches show withering and drying, no killing
4	نسبتا متحمل Moderately tolerant	۲۱ تا ۴۰ درصد برگچه‌ها و تا ۲۰ درصد شاخه‌ها دچار پژمردگی و خشکیدگی می‌شوند، اما منجر به مرگ گیاه نمی‌شود. 21–40% leaflets and up to 20% of branches show withering and dryings, no killing
5	نیمه متحمل Intermediate	۴۱ تا ۶۰ درصد برگچه‌ها و ۲۱ تا ۴۰ درصد شاخه‌ها دچار پژمردگی و خشکیدگی شده‌اند، و تا ۵ درصد موارد منجر به مرگ گیاه می‌شود. 41–60% leaflets and 21–40% branches show withering and drying, up to 5% plant-killing
6	نسبتا حساس Moderately susceptible	۶۱ تا ۸۰ درصد برگچه‌ها و ۴۱ تا ۰ درصد شاخه‌ها دچار پژمردگی و خشکیدگی شده‌اند، که در نهایت منجر به از بین رفتن (مرگ) تا ۲۵ درصد گیاهان می‌شود. 61–80% leaflets and from 41 to 0% branches show withering and drying, to 25% plant-killing
7	حساس Susceptible	۸۱ تا ۹۹ درصد برگچه‌ها و ۶۱ تا ۸۰ درصد شاخه‌ها دچار پژمردگی و خشکیدگی شده‌اند؛ ۲۶ تا ۵۰ درصد گیاهان از بین رفته‌اند. 81–99% leaflets and 61–80% branches show withering and drying, 26–50% plant-killing
8	بسیار حساس Highly susceptible	۱۰۰% برگچه‌ها و ۸۱ تا ۹۹% شاخه‌ها دچار پژمردگی و خشکیدگی شده‌اند؛ ۵۱ تا ۹۹% گیاه از بین رفته است. 100% leaflets and 81–99% branches show withering and drying, 51–99% plant-killing
9	-	۱۰۰ درصد گیاهان از بین رفته اند. 100% plant-killing

ارزیابی تحمل به سرما در شرایط مزرعه

آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۴–۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور در مراغه انجام شد. ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در مهرماه ۱۴۰۳ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار کشت شدند. هر ژنوتیپ در دو ردیف به طول ۲ متر و با تراکم ۴۰ بذر در هر ردیف کشت شدند و فاصله بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به‌دلیل عدم وقوع بارندگی مؤثر در زمان کاشت (مهر ماه) و در نتیجه ناکافی بودن رطوبت خاک برای استقرار گیاهچه‌ها، آبیاری تکمیلی در این مرحله انجام شد (جدول ۳). پس از سبز شدن گیاهچه‌ها، تعداد بوته‌های سبزشده پیش از شروع سرمای زمستان (PC1) ثبت شد. پس از سپری شدن دوره سرمای زمستان، تعداد بوته‌های باقی‌مانده (PC2) شمارش و میزان تحمل ژنوتیپ‌ها به سرما (CT) بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ و مطابق روش Malhotra and Saxena (1993) ارزیابی شد (جدول ۲). در طول فصل رشد، عملیات زراعی معمول، شامل کنترل علف‌های‌هرز و مدیریت آفات و بیماری‌های احتمالی، انجام شد. همچنین صفات ارتفاع بوته (PH)، تعداد روز تا گلدهی (DF) و تعداد روز تا رسیدگی (DM) ثبت شدند. پس از رسیدگی کامل، کل بوته‌های هر کرت برداشت و پس از خرمن‌کوبی و بوجاری، عملکرد دانه (GY) و وزن صد دانه (100SW) اندازه‌گیری شدند.

جدول ۳- آمار هواشناسی سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم- مراغه

Table 3. Meteorological data for the 2024–2025 growing season at the Dryland Agricultural Research Station, Maragheh

ماه	بارندگی (میلی متر)	حداقل دمای مطلق (درجه سانتی گراد)	حداکثر دمای مطلق (درجه سانتی گراد)
Month	**Precipitation (mm)**	**Absolute minimum temperature (°C)**	**Absolute maximum temperature (°C)**
مهر	6.5	-3	28
آبان	28.5	-5.5	16
آذر	33.4	-19.5	15
دی	24.9	-10	11
بهمن	7.1	-18	9.8
اسفند	41.1	-20.5	19.4
فروردین	100.7	-6	20.4
اردیبهشت	89.4	4	27.4
خرداد	9	5	33.2
تیر	0	11	36.5
جمع	340.6		

تجزیه و تحلیل‌های آماری

داده‌های حاصل از آزمایش‌های کنترل‌شده و مزرعه‌ای پس از بررسی اولیه، بر اساس طرح آزمایشی مربوطه تجزیه واریانس شدند. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن[1] در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. به‌منظور بررسی الگوی تنوع ژنوتیپ‌ها بر اساس صفات مورد مطالعه، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی[2] و تجزیه خوشه‌ای انجام شد. پیش از انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، به‌منظور حذف اثر تفاوت مقیاس و واحد اندازه‌گیری صفات، داده‌های مربوط به صفات مورد مطالعه با استفاده از روش استانداردسازی Z-score استاندارد شدند. همچنین، در تجزیه خوشه‌ای، مربع فاصله اقلیدسی به‌عنوان معیار فاصله و روش Ward برای تشکیل خوشه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این تجزیه‌ها با استفاده از بسته factoextra در محیط R نسخه 4.6.0 انجام شدند.

برآورد پارامترهای ژنتیکی

واریانس فنوتیپی (δ_p^2)، واریانس ژنوتیپی (δ_g^2) و واریانس محیطی (δ_e^2) با توجه به مقدار میانگین مربعات مورد انتظار از جدول تجزیه واریانس که توسط فدرر و سئال (۱۹۷۶) توصیف شده است، به شرح زیر به دست آمدند:

1 Duncan's Multiple Range Test; DMRT
2 Principal Component Analysis; PCA

$$\delta_g^2 = \delta_p^2 - \delta_e^2$$

ضریب تغییرات فنوتیپی (PCV)، ضریب تغییرات ژنوتیپی (GCV) و ضریب تغییرات محیطی (ECV) از فرمول‌های زیر تخمین زده شدند:

$$PCV = \frac{\sqrt{\delta_p^2}}{\bar{x}} \times 100 \qquad GCV = \frac{\sqrt{\delta_g^2}}{\bar{x}} \times 100 \qquad ECV = \frac{\sqrt{\delta_e^2}}{\bar{x}} \times 100$$

که در روابط فوق، $\bar{x}$ میانگین صفت مربوطه می‌باشد. از سویی دیگر، وراثت‌پذیری عمومی[1] با استفاده از رابطه $H_{BS}^2 = (\delta_g^2/\delta_p^2) \times 100$ برآورد گردید و طی آن مقادیر با وراثت‌پذیری کمتر از ۳۰ درصد، بین ۳۰ تا ۶۰ درصد و بالاتر از ۶۰ درصد به‌ترتیب به‌عنوان صفاتی با وراثت‌پذیری کم، متوسط و بالا طبقه‌بندی شدند. در نهایت، پیشرفت ژنتیکی[2] و پیشرفت ژنتیکی به‌صورت درصدی از میانگین[3] نیز بر اساس روابط زیر محاسبه شدند:

$$GAM = \frac{GA}{\bar{x}} \times 100$$

که در آن، $\bar{x}$ میانگین صفت مربوطه می‌باشد و GA پیشرفت ژنتیکی می‌باشد که از طریق رابطه زیر محاسبه شد:

$$GA = k \times \delta_g \times \frac{H_{BS}^2}{100}$$

در این معادله، δ_g جذر واریانس ژنتیکی، H_{BS}^2 میزان وراثت‌پذیری و k دیفرانسیل گزینش استاندارد شده یا شدت گزینش می‌باشد. مقدار k در نسبت ۵ درصد برابر با ۲/۰۶۳ می‌باشد. مقادیر GAM کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۰ درصد و بیشتر از ۲۰ درصد به‌ترتیب نشان‌دهنده پیشرفت ژنتیکی کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شدند. برآورد پارامترهای ژنتیکی با استفاده از تابع gva.augmentedRCBD از بسته AugmentedRCBD در محیط R انجام شد.

نتایج و بحث

ارزیابی تحمل به سرما تحت شرایط کنترل شده

نتایج ارزیابی تحمل به سرمای ژنوتیپ‌های نخود در شرایط کنترل شده حاکی از وجود تفاوت معنی‌دار ژنوتیپ‌ها از نظر صفات اندازه گیری شده تحت تنش سرما در سطح احتمال خطای یک درصد می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات تحمل به سرما در بین ۸۱ ژنوتیپ مختلف در شرایط کنترل شده

Table 4. Analysis of variance for cold-tolerance traits among 81 chickpea genotypes under controlled conditions

	میانگین مربعات Mean of Squares

1. Broad-sense heritability
2. Genetic Advance: GA
3. Genetic Advance as Percentage of Mean: GAM

منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی Degree of freedom	تحمل به سرما Cold tolerance	درصد بقا Survival	شاخص نشت الکترولیتی Electrolyte Leakage Index
بلوک (Block)	2	$4.12^{n.s}$	$7080.37^{n.s}$	$798.3^{n.s}$
ژنوتیپ(Genotype)	80	20.89^{**}	29933.48^{**}	425.36^{**}
خطا (Erorr)	160	2.52	6182.62	15.10
ضریب تغییرات (%) CV		2.37	10.53	8.56

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی دار در سطوح احتمال خطای ۱٪ ، ۵ ٪و عدم اختلاف معنی دار

مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵) نشان داد که از نظر شاخص تحمل به سرما (CT) ۳۶ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=3) و مشاهده خسارت جزئی در بوته‌ها برتر از رقم آنا بعنوان شاهد متحمل (CT=4) بوده و جزء ژنوتیپ‌های با تحمل بالا شناخته شدند. ۳۷ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=4&5) و مشاهده خسارت برروی بعضی از ساقه و برگ‌ها از نظر تحمل به سرما برابر ژنوتیپ آنا بوده و جزء ارقام متحمل شناسایی شدند. ۷ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=7) و مشاهده خسارت شدید ساقه وبرگ‌ها به همراه شاهد حساس آزمایش (ILC533) بعنوان ژنوتیپ‌های حساس شناسایی شدند. همان‌طوری‌که قبلا ذکر شد درصد بقا گیاهان بعد از تنش سرما شاخص خوبی برای مقاومت به سرما در آزمایش‌های نخود دیم پاییزه محسوب می‌شود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴) اغلب ژنوتیپ‌ها بطور متوسط حدود ۶۰-۵۰ درصد بوته بعد از یخبندان را دارا بودند که در این میان ۱۴ ژنوتیپ با متوسط مساوی یا بیش از ۹۰ درصد، دارای بیشترین تعداد بوته بعد از آخرین یخبندان بودند (جدول ۵).

در ارزیابی اثر تنش سرما بر روی پایداری غشای ژنوتیپ‌های مورد بررسی، شاخص نشت الکترولیت‌های سلولی به‌عنوان شاخص خسارت، همزمان با تنش سرما اندازه‌گیری شدند. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد که نشت الکترولیت‌های سلولی در ۱۰ ژنوتیپ به همراه شاهد حساس ILC533 تحت شرایط قبل و بعد از وقوع تنش سرما بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود (متوسط حدود ۶۰ درصد). این یافته‌ها با یافته‌های پیشین مبنی بر اینکه ژنوتیپ‌های متحمل تحت شرایط دمای طبیعی و تنش سرما نشت یونی کمتری در مقایسه با ژنوتیپ‌های حساس دارد کاملاً همخوانی دارد (Heidarvand et al. 2011). آزاد شدن ۵۰ درصد الکترولیت‌های کل از بافت گیاهان به‌عنوان شاخص مرگ سلول در نظر گرفته شده است (Bienert et al. 2007., Heidarvand et al. 2011). همچنین شش ژنوتیپ دارای کمترین (کمتر از ۳۵ درصد) میزان شاخص ELI بوده که با نتایج دو شاخص SU و CT مطابقت داشته و بعنوان ژنوتیپ‌های مقاوم به سرما شناخته شدند. کاهش محتویات ELI در ژنوتیپ‌های مقاوم و شاهد مقاوم رقم آنا، می‌تواند دلالت بر فعال‌سازی مکانیسم‌های تحمل بویژه القای سیستم‌های دفاعی و سمیت زدایی ROSها در بافت‌ها باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های نخود تحت تنش سرما (شرایط کنترل شده)

Table 5. Mean comparison of physiological traits of chickpea genotypes under cold stress (controlled conditions)

ردیف Row	ژنوتیپ Genotype	تحمل به سرما Cold tolerance	درصد بقا Survival (SU%)	شاخص نشت الکترولیتی Electrolyte Leakage Index	ردیف Row	ژنوتیپ Genotype	تحمل به سرما Cold tolerance	درصد بقا Survival (SU%)	شاخص نشت الکترولیتی Electrolyte Leakage Index
1	G1	5	55	62.71c	42	G42	5	69	53.13d
2	G2	5	74	49.86de	43	G43	4	84	46.47ef
3	G3	7	45	75.35a	44	G44	3	88	37.19g-k
4	G4	4	85	41.92fgh	45	G45	3	90	36.10h-k
5	G5	3	93	33.27k	46	G46	3	89	36.49h-k
6	G6	4	84	42.19fgh	47	G47	3	89	36.09h-k
7	G7	3	88	37.78g-k	48	G48	5	67	51.15d
8	G8	5	68	52.14d	49	G49	5	69	49.56de
9	G9	4	84	46.47ef	50	G50	4	84	46.47ef
10	G10	3	88	37.19g-k	51	G51	3	88	37.19g-k
11	G11	3	90	36.10h-k	52	G52	3	90	36.10h-k
12	G12	3	89	36.49h-k	53	G53	3	89	36.49h-k
13	G13	3	89	36.09h-k	54	G54	3	89	36.09h-k
14	G14	4	85	40.97f-i	55	G55	4	85	40.97f-i
15	G15	4	85	41.33fgh	56	G56	4	85	41.33fgh
16	G16	3	90	38.56g-k	57	G57	3	90	38.56g-k
17	G17	4	85	40.38f-j	58	G58	4	85	40.38f-j
18	G18	4	85	42.78fgh	59	G59	4	85	42.78fgh
19	G19	3	91	34.192ijk	60	G60	3	91	34.192ijk
20	G20	7	49	69.26b	61	G61	7	49	69.26b
21	G21	7	48	61.03c	62	G62	7	48	61.03c
22	G22	3	89	38.45g-k	63	G63	3	89	38.45g-k
23	G23	3	91	33.924jk	64	G64	3	91	33.924jk
24	G24	4	81	44.12efg	65	G65	4	81	44.12efg
25	G25	4	84	46.47ef	66	G66	7	48	61.65c
26	G26	3	88	37.19g-k	67	G67	4	85	40.24f-j
27	G27	3	90	36.10h-k	68	G68	5	55	62.71c
28	G28	3	89	36.49h-k	69	G69	5	74	49.86de
29	G29	3	89	36.09h-k	70	G70	7	45	75.35a
30	G30	4	85	40.97f-i	71	G71	4	85	41.92fgh
31	G31	4	85	41.33fgh	72	G72	3	93	33.27k
32	G32	3	90	38.56g-k	73	G73	4	84	42.19fgh
33	G33	4	85	40.38f-j	74	G74	3	88	37.78g-k

34	G34	3	88	37.78g-k	75	G75	5	67	51.17d
35	G35	5	70	53.03d	76	G76	4	84	46.47ef
36	G36	4	84	46.47ef	77	G77	3	88	37.19g-k
37	G37	3	88	37.19g-k	78	G78	3	88	37.78g-k
38	G38	3	90	36.10h-k	79	G79	5	69	54.32d
39	G39	3	89	36.49h-k	80	ILC533	7	48	61.65c
40	G40	3	89	36.09h-k	81	ANA	4	85	40.24f-j
41	G41	4	85	40.97f-i					

میانگین‌هایی که در هر ستون، حداقل دارای یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

تجزیه واریانس و پارامترهای ژنتیکی صفات فنوتیپی

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در ۸۱ ژنوتیپ نخود تحت شرایط تنش سرما مزرعه در جدول ۵ ارائه شده است. اثر ژنوتیپ و بلوک برای تمامی صفات (بجز صفت روز تا رسیدگی) شامل درصد بقا پس از تنش سرما، تحمل به سرما، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، روز تا گلدهی و عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۶). معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی است که امکان انتخاب و بهبود این صفات را در برنامه‌های اصلاحی فراهم می‌کند (جدول ۶).

جدول ۶- تجزیه واریانس صفات زراعی و تحمل به سرما در بین ۸۱ ژنوتیپ مختلف در شرایط مزرعه

Table 6. Analysis of variance for agronomic and cold-tolerance traits among 81 chickpea genotypes under field conditions

		میانگین مربعات Mean of Squares						
منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی Degree of freedom	درصد بقا Survival	تحمل به سرما Cold tolerance	وزن صد دانه 100 Seed Weight	ارتفاع بوته Plant height	روز تا رسیدگی Day to Maturity	روز تا گلدهی Day to flowering	عملکرد دانه Grain yield
بلوک (Block)	2	9.73*	12.34**	7.70**	1.02n.s	22.39**	1.15n.s	8880.37**
ژنوتیپ (Genotype)	80	13.69**	27.91**	10.21**	7.52*	13.52**	0.78n.s	2993.48**
خطا (Erorr)	160	6.088	1.38	1.24	2.61	5.28	0.43	618.62
ضریب تغییرات CV (%)		3.21	20.37	3.29	3.99	1.15	0.41	3.49

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی دار در سطوح احتمال خطای ۱٪ ، ۵ ٪و عدم اختلاف معنی دار

معنی‌دار بودن اختلاف بین ژنوتیپ‌ها برای تمامی صفات نشان می‌دهد که ژرم‌پلاسم مورد بررسی دارای تنوع ژنتیکی مناسبی برای صفات مرتبط با تحمل به سرما است. وجود چنین تنوعی شرط اولیه و ضروری برای موفقیت برنامه‌های اصلاحی محسوب می‌شود، زیرا امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و انتقال آلل‌های مطلوب به نسل‌های بعد را فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش با گزارش Croser و همکاران (2003) مطابقت دارد. آنان نیز در ارزیابی ژنوتیپ‌های نخود تحت تنش سرما، اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها برای شاخص‌های تحمل به سرما، درصد بقا و عملکرد دانه گزارش کردند و نتیجه گرفتند که تنوع ژنتیکی موجود می‌تواند به‌طور مؤثری

در اصلاح ارقام متحمل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین Clarke و Siddique (2004) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های نخود از نظر صفات فنولوژیک، عملکرد و مقاومت به سرما اختلاف ژنتیکی قابل توجهی دارند و این اختلافات عمدتاً ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها است. نتایج مطالعه حاضر نیز این یافته را تأیید می‌کند.

واریانس و ضرایب تغییرات ژنوتیپی، محیطی و فنوتیپی در جدول ۷ ارائه شده است. ضریب تغییرات (CV) صفات بین ۰/۴۱ درصد برای روز تا گلدهی تا ۲۰/۳۷ درصد برای صفت تحمل به سرما متغیر بود. پایین بودن CV برای صفات فنولوژیک نشان‌دهنده دقت مناسب آزمایش و تأثیر کمتر عوامل محیطی بر این صفات است. بررسی آمارهای توصیفی و پارامترهای ژنتیکی (جدول ۷) نشان داد که میانگین صفات به ترتیب ۷۶/۸۹ درصد برای درصد زنده‌مانی، ۴۳/۸۱ برای شاخص نشت الکترولیت،۳/۹۷ برای تحمل به سرما، ۴۰/۴۳ سانتی‌متر برای ارتفاع بوته، ۱۵۹ روز برای گلدهی، ۱۹۹ روز برای رسیدگی، ۳۳/۷۹ گرم برای وزن صد دانه و ۷۱۲/۶ کیلوگرم در هکتار برای عملکرد دانه بود. بیشترین ضریب تغییرات ژنتیکی (GCV) و فنوتیپی (PCV) به‌ترتیب مربوط به درصد شاخص تحمل به سرما (۷۴/۹۱ و ۷۶/۸۳ درصد) و شاخص نشت الکترولیت (۲۶/۷۰ و ۲۷/۱۸ درصد) بود، در حالی که صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی کمترین مقادیر GCV و PCV را نشان دادند. همچنین، وراثت‌پذیری عمومی برای تمامی صفات نسبتاً بالا بود و از ۴۴/۸۷ درصد برای روز تا گلدهی تا ۹۶/۴۵ درصد برای شاخص تحمل به سرما متغیر بود. بیشترین میزان پیشرفت ژنتیکی (GA) نیز در شاخص تحمل به سرما (۲۳/۲۸ درصد) و عملکرد دانه (۴۶/۰۵ درصد) مشاهده شد (جدول ۷).

جدول ۷) آماره‌های توصیفی و ژنتیکی صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های نخود تحت شرایط تنش سرما

Table 7. Descriptive statistics and genetic parameters of the traits evaluated in chickpea genotypes under cold stress

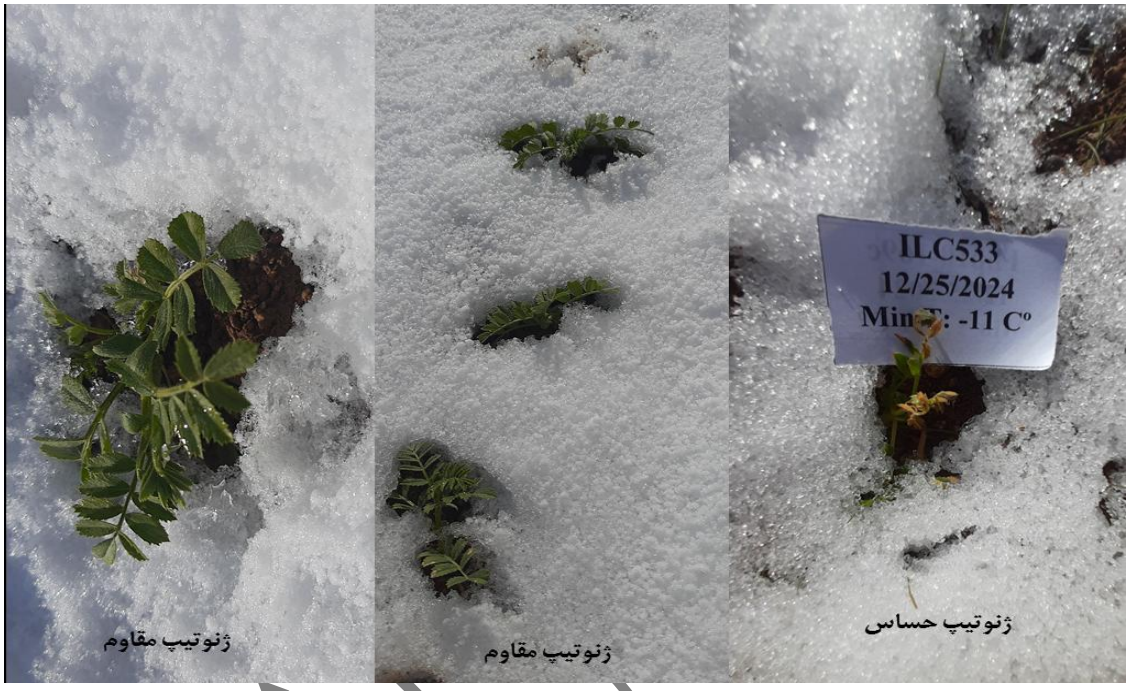
طبقه GAM	طبقه وراثت پذیری	GAM (%)	پیشرفت ژنتیکی Genetic advance	وراثت‌پذیری عمومی Broad-sense heritability	ضریب تغییرات فنوتیپی Phenotypic coefficient of variation (%)	ضریب تغییرات محیطی Coefficient of environmental variation (%)	ضریب تغییرات ژنتیکی Coefficient of genetic variation (%)	واریانس محیطی Environmental variance	واریانس ژنتیکی Genetic variance	واریانس فنوتیپی Phenotypic variance	میانگین Mean	صفت Trait
کم	متوسط	2.37	1.82	55.53	2.78	1.85	2.07	2.03	2.53	4.56	76.89	درصد بقا Survival
بیشتر	بالا	53.13	23.28	96.45	27.18	5.12	26.70	5.03	136.83	141.87	43.81	شاخص نشت الکترولیتی Electrolyte Leakage Index
زیاد	بالا	146	5.83	95.06	76.83	17.08	74.91	0.46	8.84	9.30	3.97	تحمل به سرما Cold tolerance
کم	بالا	9.28	3.13	87.86	5.46	1.90	5.12	0.41	2.99	3.40	40.43	وزن صد دانه seed weight (gr)
کم	بالا	4.26	1.72	65.29	3.92	2.31	3.16	0.87	1.64	2.51	159	ارتفاع بوته Plant height (cm)
کم	بالا	1.05	2.08	60.95	1.07	0.67	0.83	1.76	2.75	4.51	199	روز تا رسیدگی Days to maturity
کم	متوسط	0.20	0.32	44.87	0.32	0.24	0.22	0.14	0.12	0.26	33.79	روز تا گلدهی Days to flowering
کم	بالا	6.46	46.05	79.33	4.43	2.02	3.95	206.21	791.62	997.83	712.6	عملکرد دانه Grain yield (kg/h)

پیش از انتشار

در این پژوهش، اختلاف اندک بین GCV و PCV برای اغلب صفات نشان داد که سهم عوامل محیطی در بیان این صفات نسبتاً محدود بوده و بخش عمده تغییرات مشاهده‌شده ناشی از عوامل ژنتیکی است. چنین الگویی بیانگر پایداری نسبی صفات و قابلیت انتخاب مؤثر آن‌ها در نسل‌های بعدی است. وراثت‌پذیری نسبتاً زیاد همراه با پیشرفت ژنتیکی بالا برای تحمل به سرما و شاخص نشت الکترولیت نشان می‌دهد که این صفات عمدتاً تحت کنترل اثرات افزایشی ژن‌ها قرار دارند؛ بنابراین انتخاب مستقیم برای این صفات می‌تواند با موفقیت بالایی همراه باشد. در مقابل، صفاتی که وراثت‌پذیری بالا ولی پیشرفت ژنتیکی نسبتاً پایین‌تری دارند، احتمالاً علاوه بر اثرات افزایشی، تحت تأثیر اثرات غالبیت و اپیستازی نیز قرار دارند. نتایج این پژوهش با یافته‌های Johnson و همکاران (Johnson et al., 1955) همخوانی دارد که بیان کردند وراثت‌پذیری زمانی ارزش اصلاحی بیشتری دارد که همراه با پیشرفت ژنتیکی بالا باشد، زیرا چنین شرایطی نشان‌دهنده غالب بودن اثرات افزایشی ژن‌ها است. همچنین Burton و DeVane (Burton&DeVane, 1953) گزارش کردند که صفاتی با GCV و PCV بالا معمولاً ظرفیت بیشتری برای اصلاح از طریق انتخاب دارند. در مطالعه حاضر نیز درصد زنده‌مانی و شاخص نشت الکترولیت دارای بیشترین مقادیر GCV و PCV بودند که اهمیت این دو صفت را در برنامه‌های اصلاحی تحمل به سرما نشان می‌دهد. مطالعات Upadhyaya و همکاران(Upadhyaya et al., 2011) نیز روی مجموعه‌های ژرم‌پلاسم نخود نشان داد که صفات مرتبط با تحمل تنش و اجزای عملکرد دارای تنوع ژنتیکی قابل توجه و وراثت‌پذیری نسبتاً بالایی هستند؛ یافته‌ای که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. علاوه بر این، Thudi و همکاران (Thudi et al., 2016) نیز گزارش کردند که ژنوتیپ‌های نخود دارای تنوع ژنتیکی گسترده‌ای برای صفات زراعی و فیزیولوژیک هستند و این تنوع می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای مناسب برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و توسعه ارقام جدید مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، نتایج این بخش از پژوهش نشان می‌دهد که صفات تحمل به سرما و شاخص نشت الکترولیت و وزن صد دانه علاوه بر تنوع ژنتیکی مناسب، از وراثت‌پذیری و پیشرفت ژنتیکی مطلوبی برخوردار هستند و می‌توانند به‌عنوان معیارهای مؤثر در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به سرما در برنامه‌های اصلاحی نخود مورد استفاده قرار گیرند .

میانگین صفات تحمل به سرما (جدول ۸) در شرایط مزرعه نشان داد که از نظر شاخص تحمل به سرما ۳۶ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=3) و مشاهده خسارت جزئی در بوته‌ها برتر از رقم آنا بعنوان شاهد متحمل (CT=4) بوده و جزء ژنوتیپ‌های خیلی متحمل شناخته شدند. ۳۹ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=4&5) و مشاهده خسارت برروی بعضی از ساقه و برگ‌ها از نظر تحمل به سرما برابر ژنوتیپ آنا بوده و جزء ارقام متحمل شناسایی شدند. ۶ ژنوتیپ با متوسط شاخص تحمل به سرما (CT=7) و مشاهده خسارت شدید ساقه وبرگ‌ها به همراه شاهد حساس آزمایش (ILC533) بعنوان ژنوتیپ‌های حساس شناسایی شدند. نتایج حاصل از ارزیابی ژنوتیپ‌ها برای تحمل به سرما در شرایط مزرعه تایید کننده نتایج ارزیابی در شرایط کنترل شده بود. همان‌طوری‌که در بخش‌های قبلی ذکر گردید تعداد بوته بعد از سرمای زمستان (PC2) و درصد زنده مانی (SU%) شاخص خوبی برای مقاومت به سرما در آزمایش‌های نخود دیم پاییزه محسوب می‌شود (شکل ۱). بر اساس نتایج میانگین (جدول ۸) اغلب ژنوتیپ‌ها بطور متوسط حدود ۶۰-۵۰ درصد بوته بعد از سرمای زمستان را دارا بودند که در این میان ۲۵

ژنوتیپ با متوسط بیش از ۶۰ درصد دارای بیشترین تعداد بوته بعد از آخرین یخبندان بودند همچنین از نظر شاخص زنده مانی ۴۵ ژنوتیپ با متوسط بیش از ۸۰ درصد متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به سرما شناخته شدند (جدول ۸).



شکل ۱- تصاویری از ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف نخود نسبت به تنش سرما در شرایط مزرعه

Figure 1. Images of the evaluation of different chickpea genotypes for cold stress tolerance under field conditions

جدول ۸) میانگین صفات تحمل به سرما در ژنوتیپ‌های نخود در شرایط مزرعه

Table 8. Mean cold-tolerance traits of chickpea genotypes under field conditions

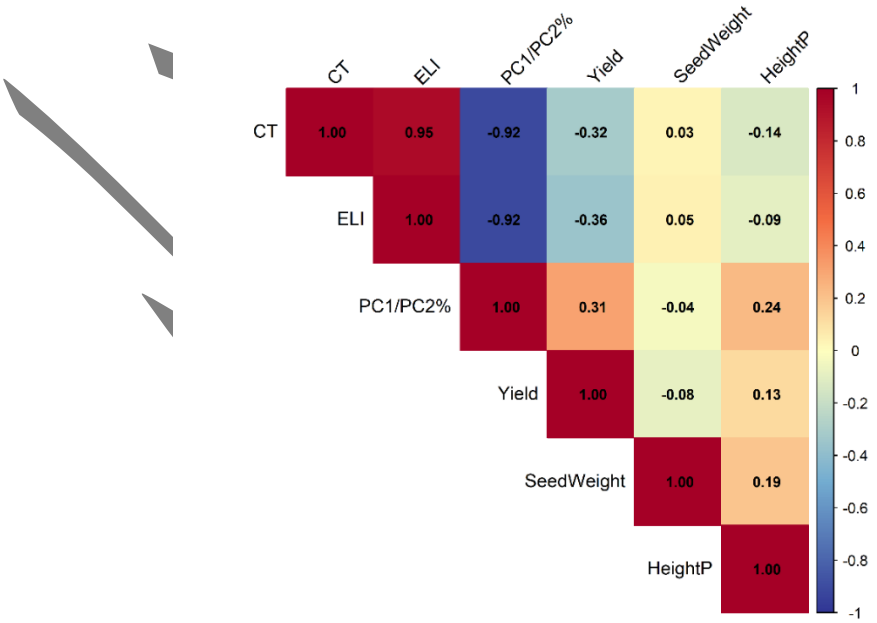
ردیف Row	ژنوتیپ Genotype	تحمل به سرما Cold tolerance	تعداد بوته قبل از تنش Number of plants before stress	تعداد بوته بعد از تنش Number of plants after stress	درصد بقا Survival	ردیف Row	ژنوتیپ Genotype	تحمل به سرما Cold tolerance	تعداد بوته قبل از تنش Number of plants before stress	تعداد بوته بعد از تنش Number of plants after stress	درصد بقا Survival
1	G1	5	43	29	67	42	G42	5	54	39	72
2	G2	5	62	48	77	43	G43	4	69	54	78
3	G3	7	33	19	58	44	G44	3	73	58	79
4	G4	4	73	59	81	45	G45	3	75	60	80
5	G5	3	81	67	83	46	G46	3	74	59	80
6	G6	4	72	58	81	47	G47	3	74	59	80
7	G7	3	76	62	82	48	G48	5	54	39	72
8	G8	5	57	43	75	49	G49	5	54	39	72
9	G9	4	72	58	81	50	G50	4	69	54	78
10	G10	3	76	62	82	51	G51	3	73	58	79
11	G11	3	78	64	82	52	G52	3	75	60	80
12	G12	3	77	63	82	53	G53	3	76	61	80
13	G13	3	77	63	82	54	G54	3	75	60	80

14	G14	4	73	59	81	55	G55	4	70	55	79
15	G15	4	73	59	81	56	G56	4	70	55	79
16	G16	3	78	64	82	57	G57	3	75	60	80
17	G17	4	73	59	81	58	G58	4	70	55	79
18	G18	4	73	59	81	59	G59	4	70	55	79
19	G19	3	79	65	82	60	G60	3	76	61	80
20	G20	7	37	23	62	61	G61	7	34	19	56
21	G21	7	36	22	61	62	G62	5	33	18	55
22	G22	3	77	63	82	63	G63	3	74	59	80
23	G23	3	79	65	82	64	G64	3	76	61	80
24	G24	4	69	55	80	65	G65	4	66	51	77
25	G25	4	72	58	81	66	G66	7	33	18	55
26	G26	3	76	62	82	67	G67	4	70	55	79
27	G27	3	78	64	82	68	G68	5	40	25	63
28	G28	3	77	63	82	69	G69	5	59	44	75
29	G29	3	77	63	82	70	G70	7	30	15	50
30	G30	4	73	59	81	71	G71	4	70	55	79
31	G31	4	73	59	81	72	G72	3	78	63	81
32	G32	3	78	64	82	73	G73	4	69	54	78
33	G33	4	73	59	81	74	G74	3	73	58	79
34	G34	3	76	62	82	75	G75	5	54	39	72
35	G35	5	57	43	75	76	G76	4	69	54	78
36	G36	4	72	58	81	77	G77	3	73	58	79
37	G37	3	76	62	82	78	G78	3	73	58	79
38	G38	3	78	64	82	79	G79	5	54	39	72
39	G39	3	77	63	82	80	ILC533	7	33	18	55
40	G40	3	77	63	82	81	ANA	4	70	55	79
41	G41	4	73	59	81						

همبستگی بین صفات فنوتیپی

نتایج تجزیه همبستگی بین صفات مورد بررسی نشان داد که بین صفات اندازه گیری شده روابط متفاوتی وجود دارد (شکل ۲). نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که CT و ELI همبستگی مثبت و بسیار قوی ($r = 0.95$) داشتند؛ به‌طوری‌که افزایش حساسیت به سرما با افزایش نشت الکترولیت و آسیب غشایی همراه بود. در مقابل، CT با درصد بقا (SU) همبستگی منفی و بسیار قوی ($r = -0.92$) نشان داد که بیانگر کاهش بقای گیاه با افزایش حساسیت به سرما است. همچنین، بین ELI و SU نیز همبستگی منفی و بسیار قوی ($r = -0.92$) مشاهده شد که نقش آسیب غشایی در کاهش بقای گیاه تحت تنش سرما را تأیید می‌کند. CT و ELI با عملکرد دانه نیز به‌ترتیب همبستگی منفی 0.32- و 0.36-داشتند، در حالی که SU با عملکرد همبستگی مثبت ($r = 0.31$) نشان داد. این الگو بیانگر آن است که افزایش حساسیت به سرما و آسیب غشایی با کاهش بقا و عملکرد همراه است، در حالی که بقای بیشتر گیاه با حفظ عملکرد ارتباط دارد. در مقابل، بین CT و ELI با وزن صد دانه و ارتفاع بوته روابط ضعیفی مشاهده شد. نتایج این پژوهش با

یافته‌های Croser و همکاران (2003) همخوانی دارد. آنان گزارش کردند که ژنوتیپ‌های متحمل به سرما دارای نشت الکترولیت کمتر، بقای بیشتر و عملکرد بالاتری نسبت به ژنوتیپ‌های حساس هستند. این پژوهش نشان داد که پایداری غشای سلولی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیولوژیک تحمل به سرما در نخود است. همچنین Mir و همکاران (Mir et al., 2021) نشان دادند که بین بقای گیاه پس از یخبندان و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد و ژنوتیپ‌هایی که خسارت کمتری از تنش سرما متحمل می‌شوند، عملکرد بالاتری تولید می‌کنند. نتایج پژوهش حاضر نیز این یافته را تأیید می‌کند. نتایج مشابهی توسط Upadhyaya و همکاران (Upadhyaya et al., 2011) در ارزیابی ژرم‌پلاسم نخود گزارش شده است؛ آنان نیز نشان دادند که صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد معمولاً همبستگی مثبتی با عملکرد دانه دارند. همچنین Thudiو همکاران (Thudi et al., 2016) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالا، اغلب از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیک مرتبط با تحمل تنش نیز وضعیت مطلوب‌تری دارند. این موضوع نشان می‌دهد که بهبود عملکرد در نخود تا حد زیادی با افزایش توانایی گیاه در تحمل تنش‌های محیطی مرتبط است. در مجموع، نتایج نشان داد که شاخص‌های CT، ELI و SU ارتباط نزدیکی با پاسخ ژنوتیپ‌ها به تنش سرما داشته و می‌توانند در ارزیابی و گزینش ژنوتیپ‌های متحمل مورد استفاده قرار گیرند.



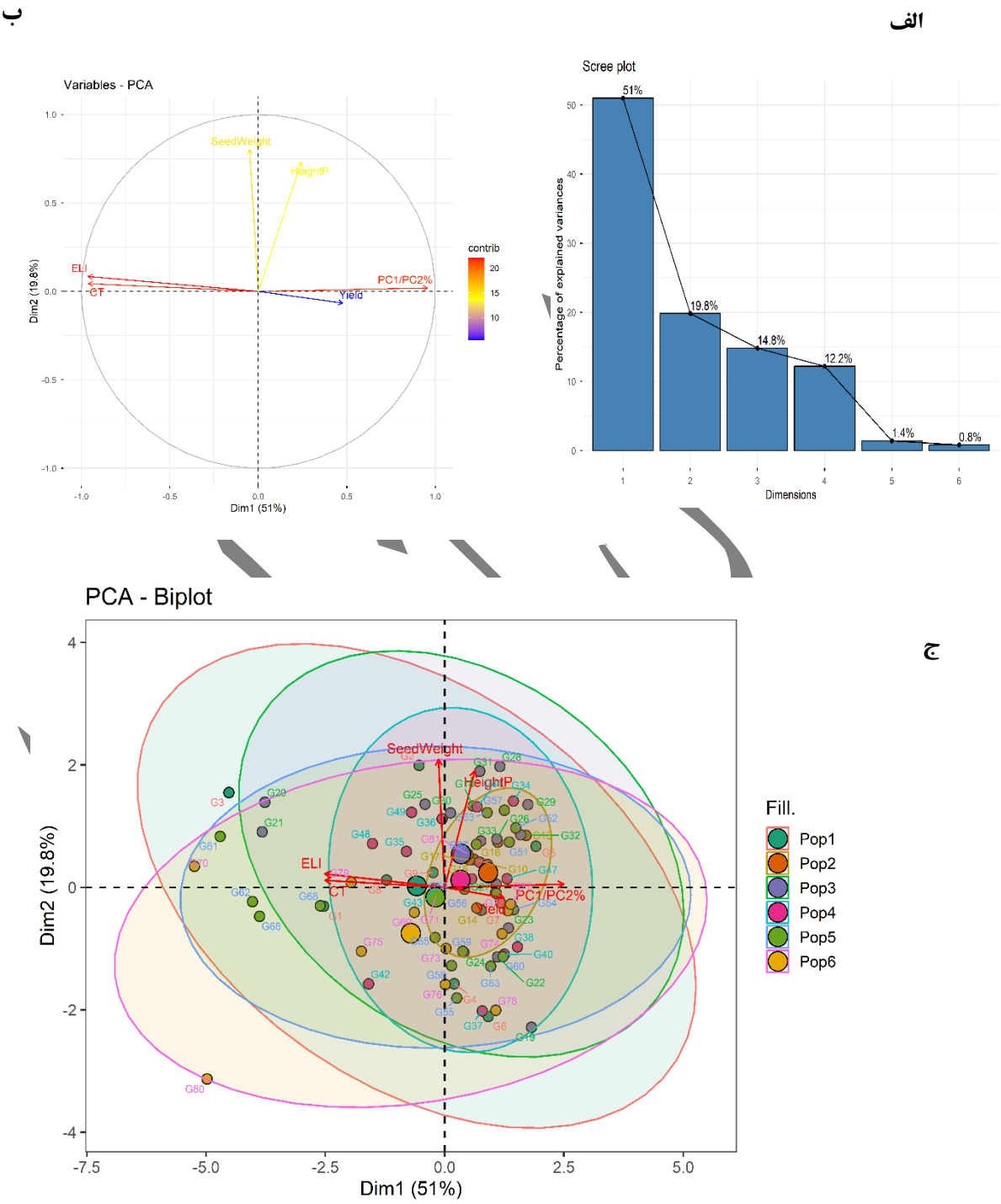
شکل ۲) ضرایب همبستگی بین صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نخود تحت تنش سرما، ELI: شاخص نشت الکترولیت، SW: وزن صددانه، CT: تحمل به سرما، PC2/PC1: درصد زنده مانی، YLD: عملکرد دانه، PH: ارتفاع بوته

Figure 2. Correlation coefficients among the traits evaluated in chickpea genotypes under cold stress. ELI: electrolyte leakage index; SW: 100-seed weight; CT: cold-tolerance score; PC2/PC1: survival percentage; YLD: grain yield; PH: plant height.

تجزیه به مولفه‌های اصلی PCA

به‌منظور بررسی الگوی تنوع فنوتیپی و روابط بین ژنوتیپ‌های نخود تحت شرایط تنش سرما، تبیین روابط بین صفات و شناسایی صفاتی که بیشترین سهم را در تغییرات چندمتغیره داشتند، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس شش صفت شامل تحمل به سرما، درصد بقای بوته‌ها پس از تنش، شاخص نشت الکترولیت، عملکرد دانه، وزن صد دانه و ارتفاع بوته انجام شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که دو مؤلفه اصلی نخست حدود ۶۷ درصد از کل تغییرات فنوتیپی را تبیین کردند؛ به‌طوری‌که مؤلفه اول (PC1) حدود ۴۴ درصد و مؤلفه دوم (PC2) حدود ۲۳ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که بخش عمده تنوع موجود در مجموعه ژرم‌پلاسم را می‌توان تنها با دو محور اصلی توصیف کرد. نمودار پراکنش ژنوتیپ‌ها بر اساس دو مؤلفه نخست نشان داد که اگرچه تعدادی از ژنوتیپ‌ها در محدوده مشترکی قرار گرفته‌اند، اما تفکیک نسبی بین برخی از جمعیت‌ها نیز مشاهده می‌شود. ژنوتیپ‌های متعلق به هر جمعیت عمدتاً در نواحی مشخصی از نمودار متمرکز بودند، هرچند همپوشانی بین برخی جمعیت‌ها نیز وجود داشت که بیانگر شباهت نسبی آن‌ها از نظر صفات فنوتیپی است. همچنین تعدادی از ژنوتیپ‌ها، مانند G80 (ILC533) در فاصله نسبتاً زیادی از مرکز پراکنش قرار گرفتند که احتمالاً نشان‌دهنده برخورداری از ترکیب‌های فنوتیپی متمایز و ارزشمند در پاسخ به تنش سرما است. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به‌عنوان منابع ژنتیکی مناسب در برنامه‌های اصلاحی مورد توجه قرار گیرند. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یکی از کارآمدترین روش‌های چندمتغیره برای بررسی الگوی تنوع فنوتیپی و شناسایی مهم‌ترین منابع تغییرات در مجموعه‌های ژرم‌پلاسم است. در مطالعه حاضر، دو مؤلفه نخست نزدیک به دو سوم کل تغییرات فنوتیپی را تبیین کردند که نشان‌دهنده قدرت مناسب PCA در خلاصه‌سازی اطلاعات حاصل از شش صفت مورد بررسی است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Upadhyaya و همکاران (Upadhyaya et al., 2011) همخوانی دارد. آنان در بررسی یک مجموعه جهانی ژرم‌پلاسم نخود گزارش کردند که دو تا سه مؤلفه نخست بیش از ۶۰ درصد تغییرات فنوتیپی را توجیه می‌کنند و صفات مرتبط با عملکرد و ویژگی‌های زراعی بیشترین سهم را در تشکیل این مؤلفه‌ها دارند. این شباهت نشان می‌دهد که حتی در مجموعه‌های ژنتیکی متفاوت نیز بخش عمده تنوع فنوتیپی توسط تعداد محدودی از مؤلفه‌های اصلی قابل توصیف است. مطالعه Jha و همکاران (Jha et al., 2018) نیز نشان داد که نتایج PCA با ساختار جمعیت حاصل از تحلیل STRUCTURE و همچنین آنالیزهای خوشه‌ای سازگاری قابل قبولی دارد. به‌طورکلی ژنوتیپ‌های متعلق به یک زمینه ژنتیکی مشابه، گرایش به قرارگیری در نواحی نزدیک به یکدیگر دارند، در این مطالعه براساس نتایج PCA، هرچند همپوشانی بین برخی جمعیت‌ها نیز مشاهده شد. این همپوشانی احتمالاً ناشی از استفاده از والدین مشترک، تبادل ژرم‌پلاسم یا جریان ژنی بین برنامه‌های اصلاحی باشد. وجود چند ژنوتیپ دورافتاده (Outlier) در نمودار PCA از دیگر نتایج مهم این پژوهش بود. این ژنوتیپ‌ها از نظر ترکیب صفات مورد بررسی، فنوتیپ‌های

متمایزی نشـان دادند و می‌توانند برای ارزیابی‌های تکمیلی و بررسـی ارزش اصـلاحی مورد توجه قرار گیرند. Philanim و همکاران (Philanim et al., 2024)نیز در بررسی تنوع ژنتیکی نخود گزارش کردند که ژنوتیپ‌های دور از مرکز پراکنش، اغلب بیشترین ارزش را برای اسـتفاده به‌عنوان والدین در برنامه‌های اصلاحی دارند، زیرا احتمال ایجاد نوترکیبی‌های مطلوب در تلاقی با سـایر ژنوتیپ‌ها را افزایش می‌دهند. از نظر تحمل به تنش سرما، نتایج PCA نشان داد که تفاوت فنوتیپی بین ژنوتیپ‌ها قابل توجه است و این اختلاف احتمالاً ناشـی از اثر هم‌زمان چندین صـفت فیزیولوژیک و زراعی اسـت. صـفاتی مانند شـاخص نشـت الکترولیت ، درصـد بقای بوته‌ها پس از تنش و عملکرد دانه به‌طور مسـتقیم یا غیرمسـتقیم در تعیین موقعیت ژنوتیپ‌ها در فضـای PCA نقش داشـته‌اند. این یافته با نتایج مطالعات انجام‌شده روی تحمل به سرما در نخود و سایر لگوم‌ها مطابقت دارد که نشان داده‌اند پاسخ به تنش سرما یک صفت پیچیده و چندژنی اسـت و نمی‌توان آن را تنها بر اسـاس یک صـفت منفرد ارزیابی کرد (Upadhyaya et al. 2011; Philanim et al. 2024).



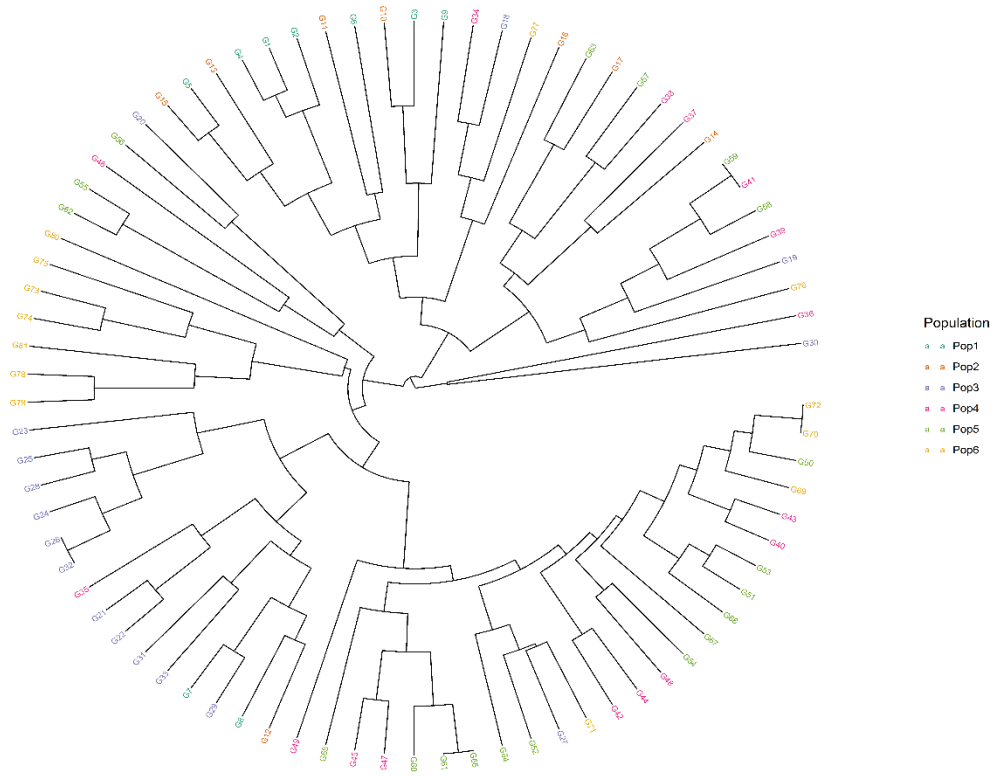
شکل ۳- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) در ژنوتیپ‌های نخود تحت تنش سرما. الف) نمودار سهم هم مؤلفه در توجیه کل تغییرات، ب) نمایش برداری صفات بر اساس بای‌پلات PCA و ج) پراکنش توده‌های بومی نخود در بای‌پلات PCA . ELI: شاخص نشت الکترولیت، SW: وزن صددانه، CT: تحمل به سرما، PC2/PC1: درصد زنده مانی، YLD: عملکرد دانه، PH: ارتفاع بوته

Figure 3. Principal component analysis (PCA) of chickpea genotypes under cold stress. (a) contribution of each component to the total variation, (b) vector representation of traits based on the PCA biplot, and (c) distribution of chickpea landraces

in the PCA biplot. ELI: electrolyte leakage index; SW: 100-seed weight; CT: cold-tolerance score; PC2/PC1: survival percentage; YLD: grain yield; PH: plant height.

تجزیه کلاستر

دندروگرام حاصل از صفات مورفو-فیزیولوژیکی با استفاده از روش Ward در شکل ۴ آورده شده است. نتایج خوشه‌بندی نشان داد که ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در چندین خوشه و زیرخوشه قرار گرفتند که بیانگر وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه در مجموعه ژرم‌پلاسم مورد بررسی است. افراد متعلق به شش جمعیت (استان) مورد مطالعه به طور یکنواخت در سراسر دندروگرام پراکنده بودند و هیچ خوشه اختصاصی متناظر با یک جمعیت جغرافیایی مشاهده نشد. به عبارت دیگر، ژنوتیپ‌های متعلق به جمعیت‌های مختلف در کنار یکدیگر قرار گرفته و شاخه‌های مشترکی را تشکیل دادند که بیانگر همپوشانی ژنتیکی بین جمعیت‌ها است. یکی از مهم‌ترین نتایج دندروگرام، نحوه قرارگیری دو ژنوتیپ شاهد بود. ژنوتیپ متحمل به سرما (G81: ANA) و ژنوتیپ حساس (G80: ILC533)؛ در بخش انتهایی یکی از شاخه‌های اصلی قرار گرفتند، اما در یک گره مشترک اولیه خوشه‌بندی نشدند. ژنوتیپ ANA ابتدا با ژنوتیپ G79 و سپس با G78 خوشه شد، در حالی که ILC533 در شاخه مجاور قرار گرفت و در سطوح بالاتر خوشه‌بندی به این گروه متصل شده است. این الگو بیانگر وجود شباهت ژنتیکی نسبی همراه با اختلاف ژنتیکی قابل تشخیص بین دو ژنوتیپ شاهد است. علاوه بر این، قرار گرفتن ژنوتیپ‌های بومی در مجاورت دو شاهد نشان می‌دهد که برخی از توده‌های بومی احتمالا دارای زمینه ژنتیکی مشابه با ژنوتیپ متحمل یا حساس هستند که می‌تواند در انتخاب والدین برای برنامه‌های اصلاحی مورد استفاده قرار گیرد. در اغلب گروه‌ها ژنوتیپ‌هایی از هر شش استان قرار گرفتند و هیچ تفکیکی از نظر پراکنش جغرافیایی در آن‌ها مشاهده نشد. در حالت کلی، می‌توان گفت در این جمعیت‌ها تفکیک چندانی از نظر جغرافیایی و صفات مورفو-فیزیولوژیکی مشاهده نشد. این امر نشان‌دهنده شباهت فنوتیپی بین توده‌های بومی در شمال‌غرب و غرب ایران است. نتایج مشابهی با این یافته‌ها در گندم‌های دیپلوئید غرب و شمال غرب ایران توسط صفات مورفولوژیکی مختلف گزارش شده است (خارستانی و همکاران، ۱۳۹۲). نکته قابل توجه دیگر، قرار گرفتن ژنوتیپ‌های G78 و G79 در مجاورت ژنوتیپ متحمل ANA است. این امر نشان می‌دهد که این ژنوتیپ‌ها از نظر زمینه ژنتیکی بیشترین شباهت را با شاهد متحمل دارند و می‌توانند به عنوان منابع بالقوه برای شناسایی آلل‌های مرتبط با تحمل به سرما مورد بررسی‌های تکمیلی قرار گیرند. به همین ترتیب، ژنوتیپ‌هایی که در مجاورت ILC533 قرار گرفته‌اند، می‌توانند در مطالعات مقایسه‌ای حساسیت به سرما مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۴- دندروگرام حاصل از صفات مورفو-فیزیولوژکی با استفاده از الگوریتم WARD

Figure 4. Dendrogram derived from morpho-physiological traits using Ward's algorithm

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که توده‌های بومی نخود تیپ کابلی مورد بررسی از نظر پاسخ به تنش سرما، صفات مورفوفیزیولوژیک و عملکرد دانه دارای تنوع قابل توجهی هستند و این تنوع می‌تواند به‌عنوان منبع ارزشمندی در برنامه‌های اصلاحی نخود مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط کنترل‌شده و مزرعه‌ای نشان داد که بخش قابل توجهی از ژرم‌پلاسم مورد مطالعه توانایی مناسبی برای تحمل دماهای پایین و حفظ بقای بوته‌ها پس از تنش سرما دارد. همچنین، مشاهده اختلاف معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها برای اغلب صفات مورد بررسی، وجود تنوع ژنتیکی قابل استفاده برای انتخاب و بهبود صفات مرتبط با تحمل به سرما را تأیید کرد. بررسی پارامترهای ژنتیکی نشان داد که صفاتی از جمله درصد زنده‌مانی و شاخص نشت الکترولیت از تنوع ژنتیکی، وراثت‌پذیری و پیشرفت ژنتیکی مناسبی برخوردار بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که این صفات می‌توانند در کنار شاخص تحمل به سرما و عملکرد دانه، به‌عنوان معیارهای مؤثر برای غربالگری و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر، همبستگی

مشاهده‌شده میان صفات تحمل به سرما، بقای گیاه، نشت الکترولیت و عملکرد دانه بر اهمیت استفاده هم‌زمان از شاخص‌های فیزیولوژیک و زراعی در فرآیند انتخاب تأکید می‌کند. نتایج PCA و تجزیه خوشه‌ای نیز وجود تنوع فنوتیپی قابل توجه در ژرم‌پلاسم مورد مطالعه را تأیید کرد و نشان داد که ژنوتیپ‌ها صرفا بر اساس منشأ جغرافیایی از یکدیگر تفکیک نمی‌شوند. پراکنش ژنوتیپ‌های متعلق به استان‌های مختلف در گروه‌های مشترک، بیانگر همپوشانی قابل توجه الگوهای فنوتیپی توده‌های بومی غرب و شمال‌غرب ایران است. همچنین، تعدادی از ژنوتیپ‌ها در فضای چندمتغیره ویژگی‌های متمایزی نشان دادند که می‌تواند زمینه را برای ارزیابی‌های تکمیلی و استفاده از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی فراهم کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ژرم‌پلاسم بومی نخود ایران دارای منابع ارزشمندی برای تحمل به سرما است و استفاده از ترکیب شاخص‌های بقا، پایداری غشای سلولی، تحمل به سرما و عملکرد دانه می‌تواند دقت انتخاب ژنوتیپ‌های امیدبخش را افزایش دهد. ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی‌شده مانند G78 و G79، پس از ارزیابی‌های چندمحیطی و چندساله و بررسی پایداری عملکرد، می‌توانند به‌عنوان منابع والدینی در برنامه‌های اصلاحی برای توسعه ارقام متحمل به سرما مورد استفاده قرار گیرند. توسعه چنین ارقامی می‌تواند زمینه را برای توسعه کشت پاییزه نخود در مناطق سرد و مرتفع دیم ایران، بهره‌برداری بهتر از بارندگی‌های زمستانه و کاهش خسارت ناشی از گرما و خشکی انتهای فصل فراهم سازد.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل بخشی از نتایج پروژه پژوهشی با کد مصوب ۰۳۰۳۴۶-۰۰۲-۱۵-۱۵-۲۵ است که اعتبار مالی آن توسط بنیاد علم ایران تأمین شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌های بنیاد علم ایران و همچنین از همکاری و مساعدت کارشناسان محترم بخش حبوبات مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم در اجرای این پژوهش، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

خارستانی، ه.، نصراله نژاد قمی، ع.ا. و مهرابی، ع.ا. (۱۳۹۲). بررسی تنوع ژنتیکی گندم‌های اینکورن با استفاده از نشانگرهای ریز ماهواره. مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی، ۶ (۲): ۱۶-۱.

صادق زاده اهری، داوود. (۱۳۹۸). به گزینی ژنوتیپ های نخود برای تحمل به سرما در شرایط کنترل شده. پژوهشهای زراعی ایران، ۱۷(۱)، ۷۵-۸۲.

نادری، حیدر، شکرپور، مجید، اصغری، علی، کانونی، همایون، و اسفندیاری، عزت اله. (۱۳۹۲). ارزیابی تحمل به سرما در کشت پاییزه نخود زراعی (*Cicer arietinum* L) با استفاده از صفات فنولوژیک و مورفولوژیک در منطقه کردستان. پژوهش های حبوبات ایران، ۴(۱)، ۶۹-۸۰.

نظامی، احمد، و باقری، عبدالرضا. (۱۳۸۰). ارزیابی کلکسیون نخود (*Cicer arietinum* L) مشهد برای تحمل به سرما در شرایط مزرعه . علوم و صنایع کشاورزی، ۱۵(۲)، ۱۵۵-۱۶۲.

Ahrens, W. H., Cox, D. J., & Budhwar, G. (1990). Use of the arcsine and square root transformations for subjectively determined percentage data. *Weed Science*, *38*(4-5), 452-458.

Bienert, G. P., Kristiansen, K. A., & Møller, A. L. B. (2007). Specific aquaporins facilitate the diffusion of hydrogen peroxide across membranes. *Journal of Biological Chemistry, 282*, 1183–1192.
Burton, G. W., & DeVane, E. H. (1953). Estimating heritability in tall fescue (*Festuca arundinacea*) from replicated clonal material. *Agronomy Journal, 45*, 478–481.
Campos, P. S., Quartin, V., Ramalho, J. C., & Nunes, M. A. (2003). Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. *Journal of Plant Physiology*, 160, 283–292.
Clarke, H. J., & Siddique, K. H. M. (2004). Response of chickpea genotypes to low-temperature stress during reproductive development. *Field Crops Research*, 90, 323–334.
Croser, J. S., Clarke, H. J., Siddique, K. H. M., & Khan, T. N. (2003). Low-temperature stress: Implications for chickpea (*Cicer arietinum* L.) improvement. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), 185–219. https://doi.org/10.1080/713610855
Federer, W. T., & Searle, S. R. (1976). Model considerations and variance component estimation in augmented completely randomized and randomized complete blocks designs—Preliminary version (Technical Report No. BU-592-M). Cornell University.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *FAOSTAT: Crops and livestock products* [Data set]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL
Heidarvand, L., Maali Amiri, R., Naghavi, M. R., Farayedi, Y., Sadeghzadeh, B., & Alizadeh, K. H. (2011). Physiological and morphological characteristics of chickpea accessions under low temperature stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58, 157–163.
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: *Synthesis report*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/
Jha, U. C., Jha, R., Bohra, A., Parida, S. K., Kole, P. C., Thakro, V., Singh, D., & Singh, N. P. (2018). Population structure and association analysis of heat stress relevant traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *3 Biotech, 8*, 43. https://doi.org/10.1007/s13205-017-1057-2
Johnson, H. W., Robinson, H. F., & Comstock, R. E. (1955). Estimates of genetic and environmental variability in soybeans. *Agronomy Journal*, 47, 314–318.
Jukanti, A. K., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., & Chibbar, R. N. (2012). Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): A review. *British Journal of Nutrition*, 108(S1), S11–S26. https://doi.org/10.1017/S0007114512000797
Khoshro, H. H., Mohammadzadeh, A., Eskandari, I., & Pouralibaba, H. R. (2025). Improving the land, water, and energy productivity of dryland chickpea by managing the genotype and tillage system. *Legume Science*, 7(3), e70033.
Maleki, H. H., Khoshro, H. H., Kanouni, H., Shobeiri, S. S., & Ashour, B. M. (2024). Identifying dryland-resilient chickpea genotypes for autumn sowing, with a focus on multi-trait stability parameters and biochemical enzyme activity. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 750.
Malhotra, R. S., & Saxena, M. C. (1993). Screening for cold and heat tolerance in cool-season food legumes. In K. B. Singh & M. C. Saxena (Eds.), Breeding for stress tolerance in cool-season food legumes (pp. 429–438). John Wiley & Sons.
Mir, A. H., Bhat, M. A., Dar, S. A., Sofi, P. A., Bhat, N. A., & Mir, R. R. (2021). Assessment of cold tolerance in chickpea (*Cicer* spp.) grown under cold/freezing weather conditions of North-Western Himalayas of Jammu and Kashmir, India. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(5), 1105–1118. https://doi.org/10.1007/s12298-021-00997-1
Mohammadi, S. A., & Prasanna, B. M. (2003). Analysis of genetic diversity in crop plants—Salient statistical tools and considerations. *Crop Science*, *43*, 1235–1248. https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235
Philanim, W. S., Bharadwaj, C., Kumar, N., Ngangkham, U., Iangrai, B., & Singh, B. K. (2024). Genetic diversity, population structure and marker–trait association analysis for yield-related traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*. https://doi.org/10.1007/s10722-024-02191-0
Popov, V. N., Orlova, I. V., Kipaikina, N. V., Serebriiskaya, T. S., Merkulova, N. V., Nosov, A. M., ... & Los, D. A. (2005). The effect of tobacco plant transformation with a gene for acyl-lipid δ9-desaturase from synechococcus vulcanus on plant chilling tolerance. *Russian Journal of Plant Physiology*, *52*(5), 664-667. https://doi.org/10.1007/s11183-005-0098-2
Roorkiwal, M., Bharadwaj, C., Barmukh, R., Dixit, G. P., Thudi, M., Gaur, P. M., ... & Varshney, R. K. (2020). Integrating genomics for chickpea improvement: achievements and opportunities. *Theoretical and Applied Genetics*, *133*(5), 1703-1720.
Shahnaz, Z., Shahnaz, A., Ismail, A., Manzoor, Z., Iqbal, R., & Zia, M. A. B. (2025). Chickpea (*Cicer arietinum*) genetic diversity: genetic resources, breeding progress, and future prospects. Crop & Pasture Science, 76(1), CP24238.

Thomashow, M. F. (2010). Molecular basis of plant cold acclimation: Insights gained from studying the CBF cold response pathway. *Plant Physiology, 154*, 571–577. https://doi.org/10.1104/pp.110.161794
Thudi, M., Chitikineni, A., Liu, X., He, W., Roorkiwal, M., Yang, W., Jian, J., Doddamani, D., Gaur, P. M., Rathore, A., Samineni, S., Saxena, R. K., Xu, D., Singh, N. P., Chaturvedi, S. K., Zhang, G., Wang, J., Datta, S. K., Xu, X., & Varshney, R. K. (2016). Recent breeding programs enhanced genetic diversity in both desi and kabuli varieties of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Scientific Reports, 6*, 38636. https://doi.org/10.1038/srep38636 (Nature)
Upadhyaya, H. D., Dwivedi, S. L., Ambrose, M., Ellis, N., Berger, J., Smýkal, P., & Debouck, D. G. (2011). Legume genetic resources: Management, diversity assessment, and utilization in crop improvement. *Euphytica, 180*, 27–47. https://doi.org/10.1007/s10681-011-0504-3
Varshney, R. K., Roorkiwal, M., Sagan, M., et al. (2021). A chickpea genetic variation map based on the sequencing of 3,366 genomes. *Nature, 599*, 622–627. https://doi.org/10.1038/s41586-021-04066-1

پیش از انتشار